

THEMENHEFT FORSCHUNG · N° 7 · 2010/2011

# INTELLIGENTE FAHRZEUGE



Universität Stuttgart

THEMENHEFT FORSCHUNG

# Intelligente Fahrzeuge

Universität Stuttgart • 2010/2011

# Inhalt

Editorial, Impressum..... 4

Geleitwort des Rektors..... 5

Intelligente Fahrzeuge – Einleitung..... 6

*Hans-Christian Reuss*

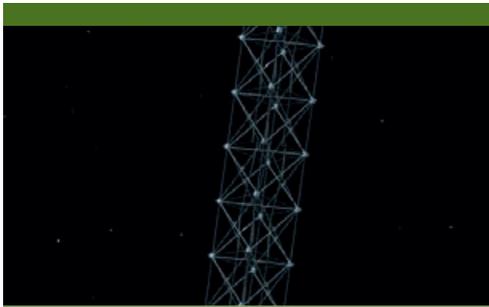
Robuste eingebettete Systeme..... 10

*Martin Radetzki und Thomas Hötzel*



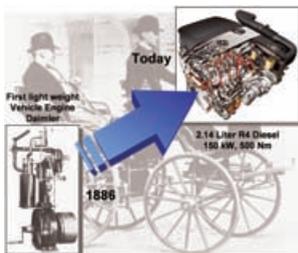
Active Noise and Vibration Reduction..... 20

*Lothar Gaul*



Fahrzeugantriebe heute und morgen..... 26

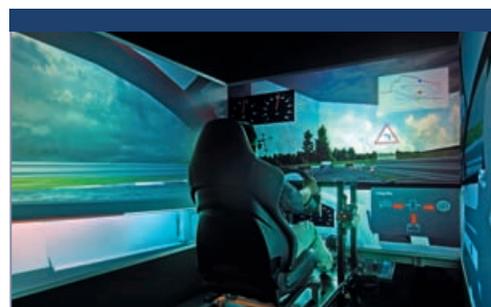
*Michael Bargende*



**Fahrzeugdynamik** ..... 38  
 Das Gesamtsystem  
 Fahrer-Fahrzeug-Regelssysteme  
*Jochen Wiedemann, David Schröck und Werner Krantz*



**The Learning Vehicle** ..... 48  
 A virtual co-driver as trip companion?  
*Anne Piegsa und Hans-Christian Reuss*



**Positionsbestimmung von Fahrzeugen** ..... 60  
*Volker Schwieger*



**Verkehrslage, Verkehrsbeeinflussung und Routenwahl** ..... 68  
*Markus Friedrich*



**Intelligent Energy Management** ..... 76  
 of Plug-In Electric Vehicles  
 with enviroment and traffic awareness  
*Giorgio Rizzoni, Vincenzo Marano,  
 Pinak Tulpule und Qiuming Gong*



# Editorial

## Liebe Leserinnen und Leser,

mit der aktuellen Ausgabe des **T H E M E N - H E F T F O R S C H U N G** wenden wir uns einem Gegenstand zu, der wie kaum ein anderer an der Universität Stuttgart seit vielen Jahren zu Hause ist – dem Automobil. Die Universität begleitet die Forschung zu diesem Alltagsgegenstand und Wirtschaftsgut seit seinen Anfängen: die Aspekte moderner Fahrzeugentwicklung reichen jedoch weit über das eigentliche Fahrzeug hinaus und haben in der Vernetzung mit Informations- und Kommunikationstechnik heute Dimensionen erreicht, die es rechtfertigen, das „Intelligente Fahrzeug“ in unsere Reihe der innovativen und zukunftssträchtigen **T H E M E N H E F T E** aufzunehmen.

Wissenschaft für den Menschen lautet ein Ziel, dem sich die Forschungsuniversität Stuttgart verbunden weiß – und Wissenschaft für den Menschen leitet die Autoren dieses Heftes in ihren vielfältigen Ansätzen, den Menschen im Fahrzeug beim ökonomischen, ökologischen und komfortablen Fahren zu unterstützen. Ein Stichwort zieht sich dabei wie ein roter Faden durch die Beiträge: Komplexität. Die Herausforderungen für die Ingenieure wachsen,

den Vorgang des Fahrens für Fahrerinnen und Fahrer zu erleichtern. Dabei werden die in das Fahrzeug eingebetteten Systeme, sowie die Systeme, in die das Fahrzeug wiederum eingebettet ist, zunehmend mit technischer „Intelligenz“ ausgestattet. Aber dabei soll die natürliche Intelligenz von Fahrerinnen und Fahrern nicht vernachlässigt und die Freude am Fahren nicht zu kurz kommen. Ob und wie diese Aufgabe gelingt, können Sie in den Beiträgen dieser überaus spannenden Ausgabe des **T H E M E N H E F T F O R S C H U N G** nachlesen. •

Viel Spaß dabei wünscht



Ulrich Engler

## Impressum

Das **T H E M E N H E F T F O R S C H U N G** wird herausgegeben im Auftrag des Rektorats der Universität Stuttgart.

Das **T H E M E N H E F T F O R S C H U N G** wird gedruckt auf Recycling-Papier, weiß matt oberflächengeleimt, aus 100% Altpapier, lebensmittelunbedenklich und alterungsbeständig.

### Konzeption und Koordination Themenheft

Forschung: Ulrich Engler, Tel. 0711/685-82205,  
E-Mail: [ulrich.engler@verwaltung.uni-stuttgart.de](mailto:ulrich.engler@verwaltung.uni-stuttgart.de)

### Wissenschaftlicher Koordinator

Intelligente Fahrzeuge: Hans-Christian Reuss

### Autoren Intelligente Fahrzeuge:

Michael Bargende, Markus Friedrich, Lothar Gaul, Qiuming Gong, Thomas Hötzel, Werner Krantz, Vincenzo Marano, Anne Piegsa, Martin Radetzki, Hans-Christian Reuss, Giorgio Rizzoni, David Schröck, Volker Schwieger, Pinak Tulpule, Jochen Wiedemann

### Titelseite und Grundlayout Themenheft Forschung:

Zimmermann Visuelle Kommunikation,  
Gutenbergstraße 94a, 70197 Stuttgart

### Druck und Anzeigenverwaltung:

ALPHA Informationsgesellschaft mbH,  
Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim,  
Verkaufsleitung: Peter Asel,  
Tel. 06206/939-0, Fax 06206/939-232,  
E-Mail: [info@alphapublic.de](mailto:info@alphapublic.de),  
Internet: [www.alphapublic.de](http://www.alphapublic.de)

© Universität Stuttgart 2010/2011

ISSN 1861-0269

# Geleitwort des Rektors

Automobil- und Motorentchnik haben in Stuttgart und Baden-Württemberg eine lange Tradition, und Stuttgart gilt als Geburtsstadt des Automobils. Baden-Württemberg und der Großraum Stuttgart verdanken heute ihren Wohlstand zu einem großen Teil Automobilherstellern wie Audi, Daimler und Porsche und ihren Zulieferern wie z.B. der Robert Bosch GmbH. Die technischen Entwicklungen der Unternehmen profitieren von der Nähe zur wissenschaftlichen Stärke der Universität Stuttgart, die sogar einen eigenen interdisziplinären Studiengang „Fahrzeug- und Motorentchnik“ mit Bachelor- und Masterprogramm anbietet, in dem die Studierenden neben den klassischen Fächern der Fahrzeug- und Motorentchnik auch Elektronik, Softwaretechnik, Datennetze, Embedded Controller, Regelungstechnik und weitere Fächer belegen können. Die Berufsaussichten für die Absolventen dieses Zweiges des Stuttgarter Maschinenbaus sind ausgezeichnet; dies galt sogar für die wirtschaftlich schwächeren vergangenen Krisenjahre.

Zahlreiche Forschungsk Kooperationen zwischen der Automobilindustrie und den Instituten der Universität kommen beiden Seiten zugute. Vermutlich hat keine andere Universität in Baden-Württemberg und auch nicht in der Bundesrepublik eine so ausgeprägte „automotive“ Tradition und ein so ausgeprägtes „automotives“ Profil wie die Universität Stuttgart. Das Institut, das sich schwerpunktmäßig und interdisziplinär an der Universität Stuttgart mit dem Automobil beschäftigt, ist das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK), das in enger Kooperation mit dem Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS) eine wichtige Plattform für Entwicklungs- und Forschungsprojekte mit der Automobilindustrie bildet. Es lag also nahe, dass hier die Fäden für das aktuelle **THEMENHEFT F O R S C H U N G**, das sich mit dem Automobil befasst, zusammenlaufen.

Die Ausgabe „Intelligente Fahrzeuge“ ist ein gutes Beispiel für die weit reichenden Ambitionen der Stuttgarter Ingenieure, die Konzeption für das Auto von morgen voranzu-

treiben. Wenn die Intelligenz der Fahrzeuge in das Zentrum des wissenschaftlichen Interesses rückt, zeigt sich auch auf diesem Feld der Technik, dass Information und Kommunikation im Auto zu einer Schlüsseltechnologie werden. Dabei steht im Zentrum immer der Mensch, auf den die unterstützenden und informierenden Systeme und Techniken bezogen bleiben müssen. Und die Wissenschaft kann weit mehr als effektivere Antriebstechniken oder aerodynamische Karosserien entwickeln. Aus dem Zusammenspiel von Fahrerassistenzsystemen, die ein Höchstmaß an Sicherheit und Ressourcenschonung liefern, mit vorausschauenden und selbsttätig lernenden Systemen zur Routenplanung, die nicht nur die Fahrtdauer, sondern auch den Energieverbrauch berücksichtigen, könnte sich eine Vision in Richtung einer nachhaltigen Mobilität abzeichnen.

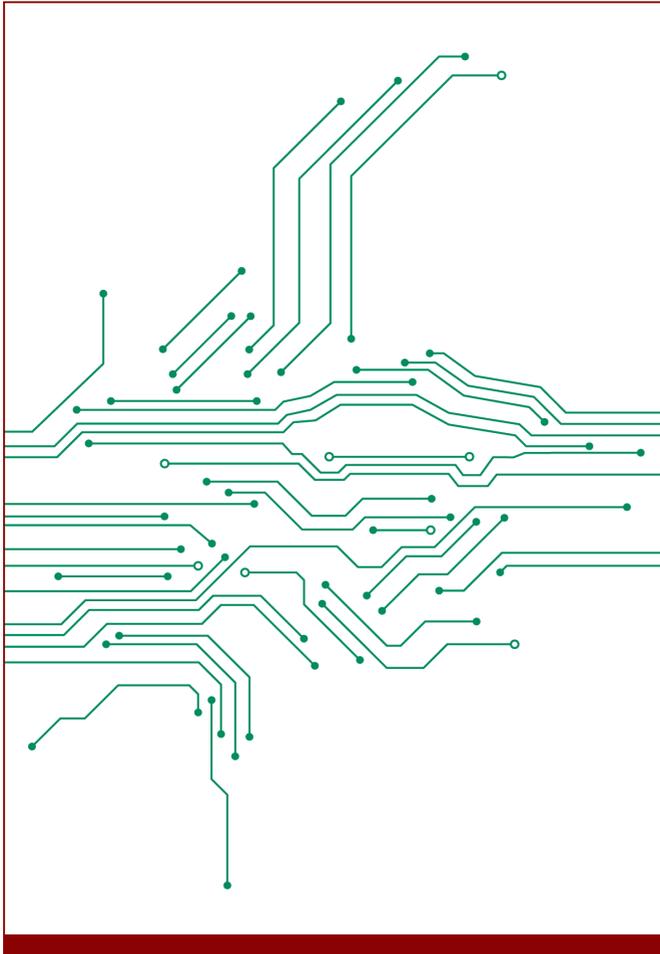
Zahlreiche Institute der Universität Stuttgart sind in die Themen Verkehr und Intelligente Fahrzeuge einbezogen wie diese Ausgabe des **THEMENHEFT F O R S C H U N G** belegt. Und die wissenschaftliche Vernetzung ist international, wie der Gastbeitrag vom Center of Automotive Research der Ohio State University zeigt, mit der die Universität Stuttgart im letzten Jahr ein Partnerschaftsabkommen geschlossen hat. Allen Autorinnen und Autoren des Heftes möchte ich für ihren Beitrag zum Gelingen dieses interdisziplinären Projektes danken, das einen weiteren Baustein zur Profilbildung der Universität bildet. Mein besonderer Dank geht an den Kollegen Hans-Christian Reuss, der als wissenschaftlicher Koordinator die Autoren der verschiedenen Disziplinen zur Teilnahme motivieren konnte. Die Entwicklung moderner Fahrzeuge hat eine lange Tradition in Stuttgart und an der Universität Stuttgart. Ich bin sicher, dass mit der Hinwendung zu den Intelligenten Fahrzeugen sich die Tür zur Zukunft erneut öffnen wird. •



Prof. Dr.-Ing.  
Wolfram Ressel,  
Rektor

Wolfram Ressel

# Intelligente Fahrzeuge



©Zimmermann Visuelle Kommunikation.

Wir haben uns bei diesem THEMENHEFT FORSCHUNG für den Titel „Intelligente Fahrzeuge“ entschieden, um damit die außerordentliche Breite des angesprochenen Forschungsgebietes zum Ausdruck zu bringen. Intelligenz als Eigenschaft des Fahrzeugs, das ein technisches System ist, meint, dass dieses Fahrzeug mit Subsystemen ausgestattet ist, die Informationen über Sensoren aufnehmen, in einer elektronischen Steuer- und Regeleinheit – für die sich in der Automobilindustrie das Wort „Steuergerät“ oder englisch die Abkürzung ECU (Electronic Control Unit) eingebürgert hat – verarbeiten und über Aktuatoren ausgeben können, so dass sich das Verhalten dieses Fahrzeugs ändert. Das Fahrzeug ist damit insoweit „intelligent“ als es in gegebenen Situationen in einer jeweils angepassten Weise aus mehreren Möglichkeiten ein bestimmtes Verhalten auswählt.

Durch den Einsatz von Elektrik und Elektronik ist das Automobil in den vergangenen Jahrzehnten stark geprägt worden, und die „Intelligenz“ in den Subsystemen hat exponentiell zugenommen. Zum einen wurden bereits vorhandene Subsysteme „elektrifiziert“ und „elektronifiziert“, zum anderen haben ganz neue Subsysteme und später dann auch die Vernetzung dieser Subsysteme Einzug ins Fahrzeug gehalten. Dabei ist das „intelligente Fahrzeug“ ein Beispiel für eine gute Partnerschaft von Wissenschaft und Industrie: In verschiedenen Konstellationen der Zusammen-

arbeit werden Forschungsergebnisse erarbeitet, die Grundlage für innovative Produkte sind. Für den zukünftigen Einsatz von Elektronik im Automobil hat die im Jahr 2007 von Automobilherstellern und Zulieferern gegründete und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Innovationsallianz Automobilelektronik die drei Schwerpunkte „Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit“, „Mobilität und Sicherheit“ sowie „Architektur und Standardisierung“ definiert, die auch für diese Betrachtung herangezogen werden sollen [1].

## 1. Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit

Auch wenn Elektroantriebe derzeit viel diskutiert werden und in Forschung und Entwicklung große Fortschritte machen, wird der Verbrennungsmotor auf absehbare Zeit der am weitesten verbreitete Antrieb für Kraftfahrzeuge bleiben und muss seinen Beitrag zu Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit leisten. Der Straßenverkehr ist mit etwa 12 Prozent an den Gesamtemissionen von CO<sub>2</sub> in der Europäischen Union beteiligt. Der aktuelle Vorschlag der EU ist, den Grenzwert für die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Neuwagen von 160 Gramm auf 130 Gramm pro Kilometer im Jahr 2012 zu senken. Die Bundesregierung in Deutschland hat sich darüber hinaus das Ziel gesetzt, zusätzlich rund 34 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> im Verkehrsbereich bis zum Jahr 2020 einzusparen, was einer Kraftstoffeinsparung von rund 30 Prozent entspricht. Der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs muss durch abgestimmte, nachhaltige Maßnahmen zur Reduzierung des Gesamtenergieverbrauchs im Kraftfahrzeug begegnet werden. Ein wesentlicher Schlüssel hierfür ist die Elektronik, zum Beispiel zur Effizienzsteigerung des Antriebs sowie bei der Optimierung des gesamten Bordnetzes durch Integration elektrischer Antriebe, Speicher- und Energiemanagementsysteme. Besonderes Augenmerk gilt dem verbesserten Wirkungsgrad aller elektrischen Verbraucher im Kraftfahrzeug durch Energierückgewinnung und ein kooperatives Energiemanagement, das auch Nebenaggregate berücksichtigt. Aber auch die Unterstützung des Fahrers für eine vorausschauende und damit energiesparende Fahrweise spielt eine zentrale Rolle.

## 2. Mobilität und Sicherheit

Das ehrgeizige Ziel der Europäischen Union, die Anzahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 zu halbieren, hat Wirkung gezeigt. Die Anzahl der Unfallopfer hat sich im Bereich der Europäischen Union vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2007 um rund 22 Prozent reduziert. Trotzdem starben 2007 auf Europas Straßen immer noch 43.000 Menschen, davon rund 5.000 in Deutschland. Der „Faktor Mensch“ ist die Hauptursache für Verkehrsunfälle.

*„Die wesentliche Herausforderung besteht darin, die Komplexität der gesamten Elektronik und eingebetteten Software zu beherrschen.“*

Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme unterstützen den Fahrer, schützen die Fahrzeuginsassen, helfen Unfälle zu vermeiden oder Unfallschwere und Unfallfolgen für alle Verkehrsteilnehmer (u.a. Fußgänger) zu reduzieren. Der Einsatz dieser innovativen Systeme ist bislang weitgehend auf hochwertigere Fahrzeuge beschränkt. Entscheidend für die Effektivität von Fahrerassistenz- und aktiven Sicherheitssystemen von morgen ist jedoch der breite Einsatz der Systeme in möglichst allen Fahrzeugklassen. Der Einführung in den Volumenmarkt stehen aber häufig noch die hohen Kosten dieser Systeme entgegen, denen durch kooperative Forschungsaktivitäten im Bereich Elektrik/Elektronik-Architektur, Software-Architektur und Standardisierung begegnet werden muss.

## 3. Architektur und Standardisierung

Elektrik und Elektronik sowie die eingebettete Software machen heute mehr als 30 Prozent der Wertschöpfung eines Mittelklassefahrzeuges aus und sind an etwa 90 Prozent aller Innovationen im Automobil beteiligt. Eine Vielzahl der elektronischen Funktionen im Kraftfahrzeug wird heute durch Vernetzung von Einzelsystemen realisiert. Dies erfordert einen erheblichen Datenaustausch zwischen den beteiligten Steuergeräten und – damit verbunden – sehr leistungsfähige Bussysteme und Protokolle, um die hohen Anforderungen an Bandbreite und Übertragungssicherheit zu erfüllen. Mit der Vielfalt der eingebetteten Systeme und deren Funktionen steigt auch der Softwareumfang in den Steuergeräten kontinuierlich an. Besonders die Anforderungen an die Rechnerleistungsfähigkeit im Kraftfahrzeug, z.B. für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme sowie Motorsteuerungen, ist sprunghaft gestiegen. Dieser gesteigerte Bedarf erfordert ganz neue Wege für Elektrik/Elektronik-Architekturen.

Die wesentliche Herausforderung besteht darin, die Komplexität der gesamten Elektronik und eingebetteten Software zu beherrschen. Der Übergang von Einzelsystemen zu den heutigen komplexen, vernetzten eingebetteten Systemen mit starken internen Wechselwirkungen stellt hohe Anforderungen an leistungsfähige Bordnetz- sowie Softwarearchitekturen. Dieses komplexe Gesamtsystem muss unter anderem nach Kriterien wie Kundennutzen, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Kosten, Skalierbarkeit, Wartbarkeit, Bauraum und Gewicht optimiert werden. Ein wesentlicher Schlüssel, um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die Definition und Nutzung standardisierter Elektrik/Elektronik- und Software-Architekturen. Darüber hinaus sind leistungsfähige und handhabbare Methoden und Werkzeuge zur Modellierung und Absicherung der Systeme erforderlich, um die Komplexität zu beherrschen, die erforderliche Qualität zu gewährleisten und die Kosten für die Entwicklung wirtschaftlich zu gestalten.

#### 4. Interdisziplinarität

Der Titel „Intelligente Fahrzeuge“ beschreibt auch das Zusammenwachsen verschiedener Wissenschaftsgebiete. Dazu gehören klassische Gebiete wie Mechanik, Strömungslehre, Thermodynamik, Fahrzeugtechnik, Antriebstechnik, technische Verbrennung, Materialwissenschaften und Akustik, die traditionell zum Maschinenbau zählen, aber auch Gebiete wie Energietechnik, Elektronik, Halbleitertechnik,

*„Mit Software werden heute mehr als 90 Prozent aller neuen Funktionen in Fahrzeugen realisiert.“*

Leistungselektronik, Sensorik, Aktuatorik (insbesondere elektrische Antriebe), Regelungstechnik, Rechentechnik, Informationstechnik und Hochspannungstechnik, die in der Regel zur Elektrotechnik gezählt werden. Darüber hinaus ist in den letzten Jahren die Software im Fahrzeug extrem gewachsen, und mit ihr werden heute mehr als 90 Prozent aller neuen Funktionen realisiert, womit das Gebiet der technischen Informatik eine große Bedeutung erlangt hat. Gerne wird das moderne Auto als ein extrem leistungsfähiges, paralleles Rechnersystem beschrieben, an das irgendetwas vier Räder geschraubt hat.

Nicht zu vernachlässigen ist weiterhin der Umstand, dass das Auto nur eines der Verkehrsmittel ist, die zum Gesamtsystem Verkehr gehören. Somit ist es unvermeidbar, das Auto auch in diesem Kontext zu betrachten. Dadurch muss die interdisziplinäre Zusammenarbeit auf die Straßenverkehrstechnik, die Verkehrsanlagentechnik und letztlich auf die gesamten Verkehrswissenschaften, die traditionell häufig zum Bauingenieurwesen gehören, ausgedehnt werden.

Insgesamt sind an diesem Themenheft vier Fakultäten der Universität Stuttgart betei-

#### DER AUTOR



#### PROF. DR.-ING. HANS-CHRISTIAN REUSS

*ist gebürtiger Düsseldorfer. Er studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und wurde dort anschließend am Institut für Elektronik promoviert. Von 1989 bis 1992 war er verantwortlich für serielle Bussysteme und Mikrocontroller zur Anwendung im Kfz bei PHILIPS Semiconductors Hamburg. 1993 wurde er auf die Professur für Kraftfahrzeugelektronik und -elektrik an der TU Dresden berufen. Seit 2004 ist er Ordinarius für Kraftfahrzeugmechatronik an der Universität Stuttgart und Vorstandsmitglied im FKFS (Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart).*

#### Kontakt

*Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen  
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart, Tel. 0711/685-68500, Fax 0711/685-68533  
E-Mail: hans-christian.reuss@fkfs.de, Internet: www.ivk.uni-stuttgart.de, www.fkfs.de*

ligt: die Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, die Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik, die Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften sowie die Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie. Ein internationaler Beitrag kommt vom Department of Mechanical Engineering der Ohio State University, die eine Partneruniversität der Universität Stuttgart ist. Die Themen, die nur eine kleine Auswahl aus der Gesamtheit der wissenschaftlichen Fahrzeugthemen darstellen, sind aus Sicht des Autos von innen nach außen gegliedert: Den Anfang macht das Herz eines jeden intelligenten Systems, das wir im Auto finden: der Embedded Controller und die Frage, wie hier robuste Systemarchitekturen und Entwurfsprozesse aussehen. Danach folgt eine anwendungsbezogene Veröffentlichung zu Geräuschen und Schwingungen im Auto und ihrer aktiven Kompensation. Darauf folgt ein Wechsel auf die nächst höhere Systemebene, wobei es um den gesamten Antriebsstrang geht. Danach werden dann bereits das Gesamtfahrzeug und seine Optimierung betrachtet. Im fünften Beitrag geht es dann um die Fähigkeit des Lernens und den virtuellen Beifahrer. Der nächste Beitrag beschäftigt sich mit der Positionsbestimmung von Fahrzeugen. Folgerichtig kommt danach die Beschäftigung mit der Routenwahl in Straßennetzen. Der letzte und achte Beitrag richtet unter dem Stichwort „Smart Grid“ seinen Blick auf das Fahrzeug im Informations- und Energienetz.

Durch die Vielzahl und Breite der Themen wird deutlich, wie komplex nicht nur die Elektronik und die Software, sondern das „intelligente Fahrzeug“ als Ganzes ist. Vermutlich ist die fachübergreifende Beherrschung der Komplexität die eigentliche wissenschaftliche Herausforderung der Zukunft. • *Hans-Christian Reuss*

## Literatur

- [1] Broschüre der E | ENOVA Innovationsallianz Automobilelektronik, Stuttgart, 2008

# Robuste eingebettete Systeme

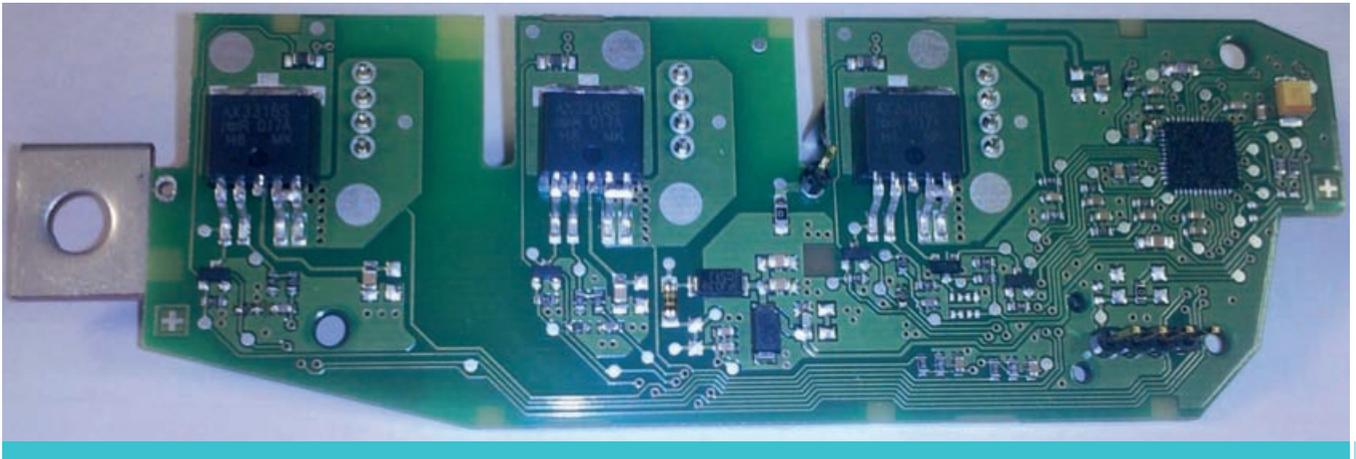


Die Entwicklung intelligenter Automobile leistet einen entscheidenden Beitrag zur Energieeffizienz, zur weiteren Steigerung der Verkehrssicherheit und zur Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses bei steigender Verkehrsdichte. Die Implementierung intelligenten Verhaltens erfordert die Erhebung, Verarbeitung und Übertragung einer großen Menge an Informationen im laufenden Betrieb des Fahrzeugs. Dazu sind leistungsfähige elektronische Systeme erforderlich, die in das Gesamtsystem Automobil integriert sind, so genannte eingebettete Systeme.

Für unsere Gesellschaft ist Mobilität ein wichtiger Faktor der Lebensqualität. Das Automobil – Synonym für Mobilität – wird in den nächsten zehn Jahren einen grundlegenden Wandel erfahren:

- Der klassische Verbrennungsmotor steht vor der Ablösung durch intelligente, hybride oder rein elektrische Antriebe, um Anforderungen der Umweltverträglichkeit zu erfüllen. Die Aufgabe der intelligenten Steuerung dieser Antriebe ist es, im Spannungsfeld zwischen Reichweite, Batterielebensdauer und Umweltbelastung optimale Abwägungen zu treffen.

- Passive Sicherheitssysteme zur Minderung von Unfallfolgen werden zunehmend durch aktive Systeme ergänzt, die in der Lage sind, kritische Situationen zu erkennen und Fahrer bei der Unfallvermeidung zu unterstützen. Dazu ist es erforderlich, durch bildgebende Verfahren gewonnene Informationen äußerst schnell aufzubereiten und automatisch bezüglich der Verkehrssituation zu bewerten.
- Dem wegen wachsenden Verkehrsaufkommens drohenden Verkehrskollaps soll durch eine bessere Koordination des Verkehrsflusses begegnet werden. Zu diesem Zweck werden Automobile die Fähigkeit



01

Beispiel eines eingebetteten Systems im Automobil: LIN (Local Interconnect Network) Modul zur Kommunikation mit intelligenten Sensoren und Aktuatoren.

erhalten, sich untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur, z.B. mit intelligenten Ampeln, zu vernetzen, Informationen auszutauschen und sie zu bewerten, um durch kooperatives Verhalten Verzögerungen und Risiken zu reduzieren. Alle diese Aufgaben der Steuerung, Regelung und Informationsverarbeitung werden durch so genannte *eingebettete Systeme* übernommen. Darunter versteht man aus Hardware- und Softwarekomponenten bestehende elektronische Systeme, die feste Aufgaben innerhalb größerer technischer Systeme übernehmen, in diesem Falle innerhalb des Automobils.

## 1. Rahmenbedingungen

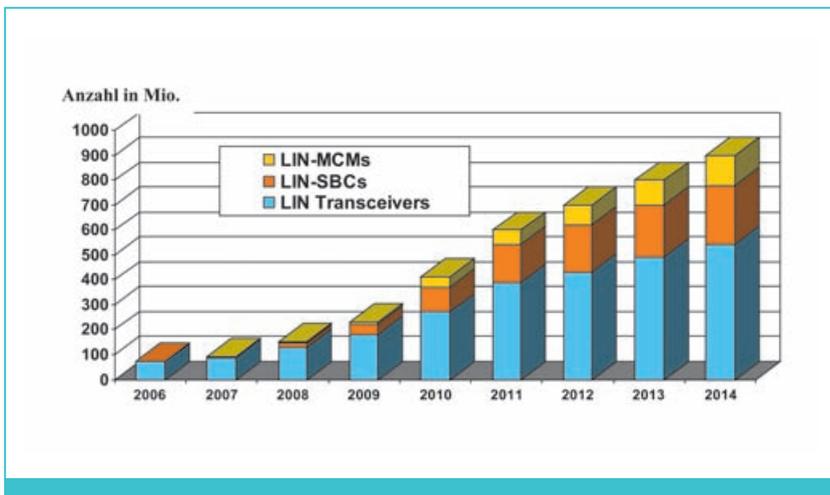
Bereits heute haben eingebettete Systeme entscheidenden Anteil an vielen Aspekten von Automobilen. In einem typischen Mittelklassemodell finden sich leicht über 50 solcher Steuergeräte; in der Oberklasse können es bis zu 100 sein. Ihr Anteil am Wert eines Fahrzeugs beträgt bis zu 30 Prozent. Sie übernehmen Aufgaben auf den Gebieten Sicherheit (Airbagsteuerung, ABS, ESP), Komfort (Klimaautomatik, Navigation), Kommunikation (Radio, Multimedia, Telefon) und Energieeffizienz (Motorsteuerung). Aber auch Fensterheber und Zentralverriegelung, Beleuchtungssystem und Blinker sowie durch Regensensoren gesteuerte Scheibenwischer sind ohne eingebettete Systeme nicht (mehr) denkbar. Verstärkt erfolgt auch die Produktdifferenzierung unterschiedlicher Modelle oder Marken durch eingebettete Systeme. Die Möglichkeiten, die schon sehr ausgereifte Mechanik weiter zu verbessern, sind begrenzt und kostspielig. Häufig ergibt sich

durch die elektronische Steuerung, z.B. von Motoren und Automatikgetrieben, ein wesentlich größeres Verbesserungspotential. Aufgrund von Plattformstrategien und Kooperationen der Fahrzeughersteller ist es auch nicht selten, dass der gleiche Antriebsstrang in verschiedenen Modellen hier um 20 Kilowatt stärker, dort um einige Zehntelliter sparsamer ausgelegt ist. Diese Differenzierung wird durch unterschiedliche Programmierung der eingebetteten Steuerung erreicht.

## SUMMARY

*In Fahrzeugen werden zahlreiche sicherheitskritische Aufgaben, deren Ausfall oder Fehlfunktion vermieden werden muss, von eingebetteten Systemen übernommen. Diese werden im Automobil unter ungünstigen Bedingungen wie z.B. hohen Temperaturen betrieben, die den Alterungsprozess der Systeme beschleunigen können. Zudem erfordern gerade die neuen intelligenten Funktionen vermehrt die Nutzung hoch integrierter Schaltungen, die für Umgebungseinflüsse und Alterung besonders anfällig sind. Das Institut für Technische Informatik erforscht Systemarchitekturen und Entwurfsmethoden, die es erlauben, solche Systeme robust auszulegen, so dass ihre Funktionalität selbst unter ungünstigen Bedingungen und bei Auftreten interner Fehler und Defekte noch gewährleistet werden kann.*

*Within this decade, intelligent cars will make essential contributions to increasing energy efficiency, advancing transportation safety, and avoiding traffic congestion. Intelligence stems from capturing, processing, and transmitting large amounts of information while the car is being used. This requires high-performance electronic systems to be integrated into the automobile, known as embedded systems. Since such systems perform many safety-critical tasks, any malfunction or failure is a potential risk that must be avoided. However, operating conditions are harsh. For example, high temperatures pertinent in the engine compartment accelerate the aging process that integrated circuits are subject to. Moreover, implementing intelligence requires use of highly miniaturized devices which are especially prone to environmental influences and aging. The Institute of Computer Architecture and Computer Engineering (Institut für Technische Informatik, ITI) researches system architectures and design methods for robust embedded systems that maintain essential functionality even under stress, occurrence of internal errors, and emergence of defects in the field.*

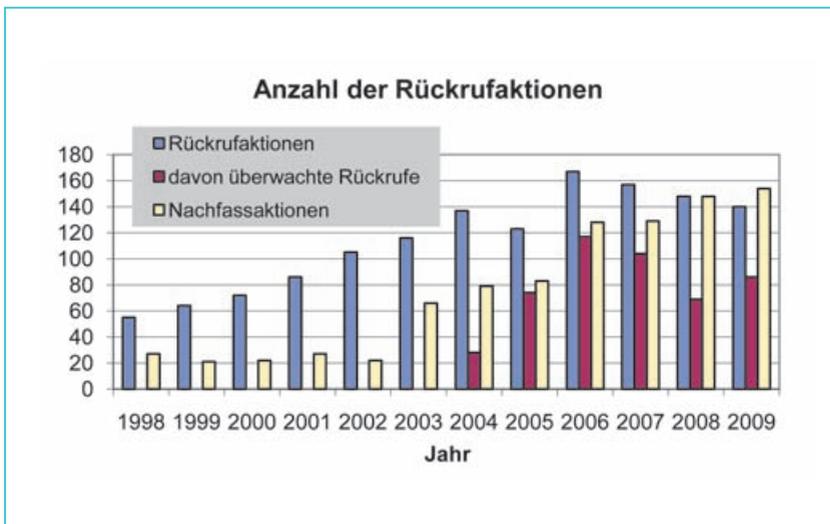


02

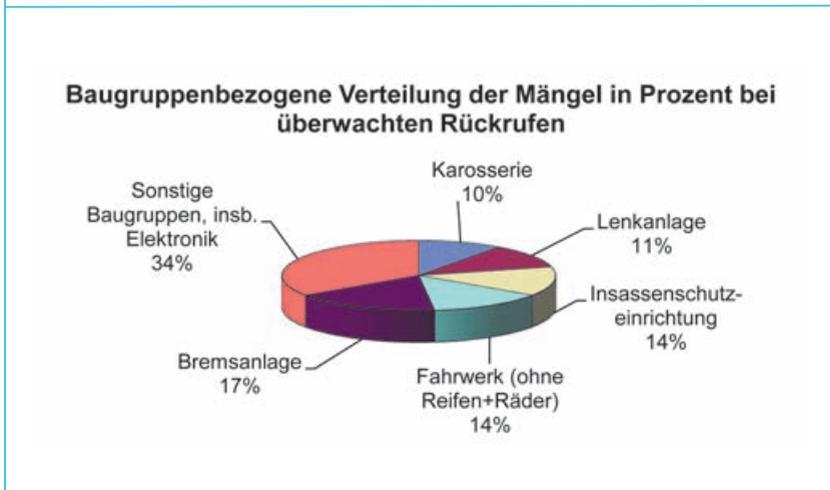
Bedeutung eingebetteter Systeme am Beispiel des prognostizierten Wachstums im Bereich LIN (Local Interconnect Network).

Automobilhersteller und Zulieferer stehen aufgrund der zunehmenden Durchdringung des Automobils durch eingebettete Systeme vor der Herausforderung, die Risiken bezüglich der Betriebssicherheit ihrer Produkte zu beherrschen. Während Verbraucher offensichtlich bereit sind zu akzeptieren, dass ihre Mobiltelefone und Laptops von Zeit zu Zeit „abstürzen“, erfordern Fehlfunktionen der Automobilelektronik kostspielige Rückrufaktionen, um die Sicherheit im Straßenverkehr zu garantieren. Es ist letztlich im Interesse aller Beteiligten, dass Fehler bereits beim Entwurf eingebetteter Systeme ausgeschlossen werden, um Kosten und Risiken gering zu halten. Dabei muss zwischen zwei Arten von Fehlern, logischen und physikalischen, unterschieden werden.

## 2. Fehler in eingebetteten Systemen



Logische Fehler oder Entwurfsfehler entstehen im Entwurfsprozess eingebetteter Systeme. Schon die Spezifikation, die die gewünschte Funktionalität festlegt, kann fehlerhaft sein. In allen weiteren Entwurfsphasen, bei der Implementierung von Hardwarekomponenten ebenso wie bei der Softwareprogrammierung, können Fehler nie gänzlich ausgeschlossen werden. Es mag so erscheinen, dass diese vor allem durch das Versagen der in der Entwicklung Tätigen entstehen. Tatsächlich besteht aber eine grundlegende Erkenntnis der Berechenbarkeitstheorie darin, dass es kein allgemein gültiges Verfahren gibt, mit dem die Frage zu beantworten wäre, ob beispielsweise ein Softwareprogramm richtig funktioniert. Natürlich lassen sich Entwicklungsingenieure von einer solchen Aussage nicht entmutigen. Im Speziellen, also für eingegrenzte Probleme, ist es unter Einsatz guter Ideen und großer Arbeitskraft durchaus möglich, durch Anwendungen teilweise automatisierter Beweistechniken eine mathematisch fundierte Überprüfung sicherheitskritischer Eigenschaften durchzuführen. In anderen Fällen kann mit Hilfe umfangreicher Simulationen und Tests das Vorhandensein logischer Fehler mit hinreichend großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.



03

Anzahl von Rückrufen und deren produktbezogene Aufteilung (Quelle: KBA Bericht 2009).

Eine neue Herausforderung zeichnet sich momentan auf dem Gebiet der *physikalischen Fehler* ab. Traditionell wird für die Fertigung eingebetteter Systeme im Auto-

mobilbereich auf sehr robuste, langjährig erprobte Technologien zurückgegriffen. Dies gilt z.B. für Gehäuse, die die empfindliche Elektronik vor Schmutz und Feuchtigkeit schützen, insbesondere aber auch für die integrierten mikroelektronischen Schaltungen („Chips“), die in solchen Geräten eingesetzt werden und dabei hohen Beanspruchungen, etwa durch Umgebungstemperatur und Vibrationen, ausgesetzt sind. Durch großzügig ausgelegte Strukturen konnten bislang solche Einflüsse toleriert werden.

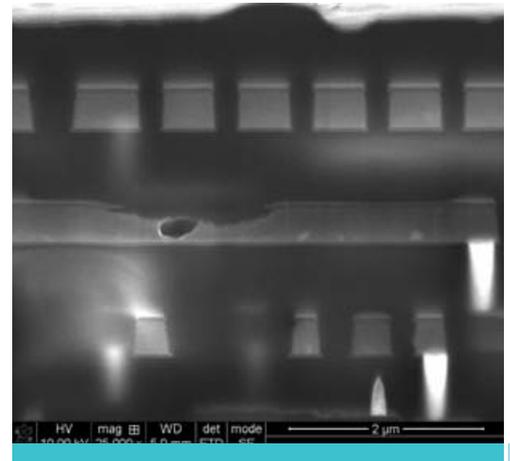
Allerdings erfordert der Trend, immer mehr und immer komplexere Funktionalität in eingebettete Systeme zu „verpacken“, deren zunehmende Miniaturisierung bei gleichzeitig geringerer Stromaufnahme. Schon heute findet sich kaum Platz im Automobil, um noch weitere Steuergeräte unterzubringen. Deshalb ist es erforderlich, mehr Funktionalität in weniger Geräten zu integrieren. In Verbindung mit der Notwendigkeit höchster Rechenleistung für intelligente Funktionen im Automobil der Zukunft ist absehbar, dass auch der Automobilssektor verstärkt auf höchstintegrierte Schaltungen zurückgreifen muss, in denen einzelne Bauelemente wie Leiterbahnen und Transistoren nur noch wenige hundert Atomdurchmesser breit sind. Noch fragiler sind die in Transistoren erforderlichen Isolationsschichten, welche lediglich eine Dicke von wenigen Dutzend Atomen aufweisen und dadurch zunehmend die Ausbildung von Leckströmen sowie die Entstehung von Durchbrucheffekten und Leitbahnfehlern begünstigen. Diese Strukturen sind für mehrere Mechanismen der Fehlerentstehung anfällig. Schon bei der Fertigung von Chips mittels eines photolithographischen Verfahrens treten Abweichungen auf, die mit zunehmender Miniaturisierung immer mehr ins Gewicht fallen. Im Betrieb unter harschen Umgebungsbedingungen können durch hohe Stromstärken, hohe Temperaturen, Spannungsspitzen und Einschläge natürlicher Umgebungsstrahlung zusätzliche vorübergehende oder dauerhafte Fehler entstehen. Heute werden defektbehaftete Chips nach der Fertigung in immer aufwändigeren Testverfahren identifiziert und aussortiert. Um trotz steigenden Fehleraufkommens weiterhin eine wirtschaftlich vertretbare Fertigungsausbeute zu erzielen, wird es in Zukunft erforderlich sein, Fehler zu tolerieren. Dies kann z.B. durch den Einbau

von „Ersatzteilen“ für defekte Elemente geschehen. Solche Verfahren werden bereits in Speicherchips oder redundant ausgelegten CPU-Cores (Cell Processor) angewandt. Darüber hinaus müssen wir auch lernen, mit Fehlern umzugehen, die während des Betriebs auftreten, wobei die Sicherheit des Fahrzeugs stets gewährleistet sein muss und Reparaturaufwand nach Möglichkeit zu vermeiden ist oder nur in relativ großen zeitlichen Abständen, beispielsweise bei der Kfz-Service-Inspektion, erfolgen darf.

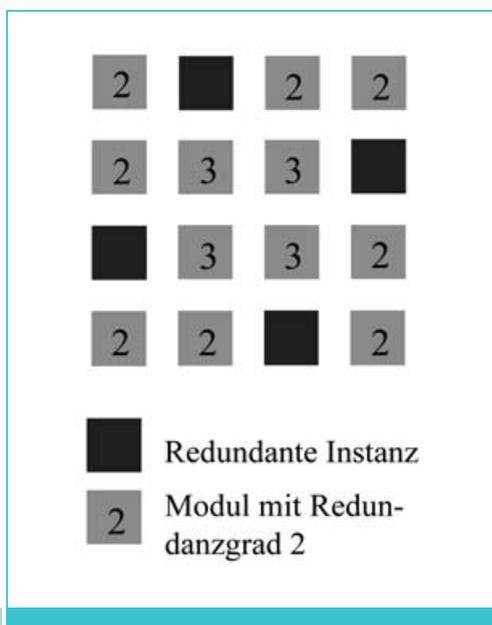
In diesen Zusammenhang passt eine Schlagzeile, die vor einiger Zeit durch die Presse ging: „Oldtimer sterben aus! – Elektronik-tod statt Rosttod?“ Gemeint ist, dass die Lebensdauer von Fahrzeugen mehr und mehr durch die Elektronik begrenzt wird. Für ein verrostetes Blechteil oder eine defekte mechanische Komponente kann, wenn Originalersatzteile nicht mehr verfügbar sind, immer noch maßgefertigter Ersatz hergestellt werden. Letzteres ist für elektronische Komponenten aufgrund des enormen Aufwands für Entwicklung und Fertigung und wegen der Außerdienststellung der ursprünglich eingesetzten Fertigungstechnologien nicht mehr möglich. Umso wichtiger wird es, eine gute Bevorratung mit elektronischen Ersatzteilen zu gewährleisten. Jedoch ist zu bedenken, dass elektronische Komponenten bereits dann altern, wenn sie nur gelagert werden, wenn auch weniger schnell als im Betrieb. Physikalische Fehler können also während der Fertigung, im Betrieb und selbst während der Lagerung entstehen. Ökonomische Gründe und Sicherheitsanforderungen machen es notwendig, eingebettete Systeme so zu entwerfen, dass die Systemfunktionalität auch bei begrenztem Auftreten solcher Fehler noch gewährleistet ist.

### 3. Robuste Auslegung eingebetteter Systeme

Eine klassische Technik hierfür ist die  $n$ -fache modulare Redundanz. Hierbei wird jedes Systemmodul mehrfach ( $n$  mal) eingebaut. Ein zusätzliches Entscheidungsmodul vergleicht die Ausgaben der  $n$  Instanzen und



Leitbahnfehler, sichtbar gemacht durch physikalische Analytik.



05

Verbesserte redundante Anordnung.

wählt die von einer Mehrheit der Module vorgeschlagene Ausgabe aus. Bei dreifacher Redundanz kann somit eine Instanz ausfallen. Für die Flugtüchtigkeit unverzichtbare Rechensysteme in Flugzeugen sind sogar fünffach redundant ausgelegt; damit können zwei Ausfälle toleriert werden. Trotz durchaus erfolgreicher Anwendungen weist diese Technik Schwachpunkte auf. In einem Verkehrsflugzeug im Wert von einigen hundert Millionen Euro mögen die Kosten redundanter elektronischer Systeme von untergeordneter Bedeutung sein. Der

Automobilsektor ist hingegen stark kostengetrieben, und in Verhandlungen über die Lieferung eingebetteter Systeme geht es bei den Stückpreisen oft um Centbeträge. Es ist kaum realisierbar, jedes Modul mehrfach einzubauen. Zudem besteht bei der Integration redundanter Instanzen auf dem gleichen Chip die Gefahr, dass ein Fehler gleich mehrere Instanzen betrifft. Und schließlich ist in jedem Fall das Entscheidungsmodul ein kritisches Element, das besonders robust ausgelegt werden muss, da sein Ausfall nicht kompensiert werden kann.

Es gibt eine Vielzahl anderer Ansätze, eingebettete Systeme so zu gestalten, dass die Unzuverlässigkeit einzelner Teile toleriert werden kann. So können z.B. die Komponenten beim Einschalten bzw. im Betrieb einem gezielten Test unterzogen werden, wodurch fehlerbehaftete Komponenten genau identifiziert und bezüglich des Gesamtsystems isoliert werden können. Damit kann eine höhere Verlässlichkeit gesichert werden als durch die bloße Annahme, dass eine Mehrzahl von Modulen schon richtig arbeiten wird. Dieser Test kann mit Verfahren des Selbsttestens oder durch gegenseitiges Testen effizient implementiert werden. Solche Arbeiten sind schon seit längerem Gegenstand der Forschung am Institut für Technische Informatik [4].

Ein ergänzender Ansatz besteht darin, redundante Instanzen als Ersatz für mehrere andere Module vorzusehen, während sie bei  $n$ -fach modularer Redundanz nur je einem einzelnen Modul zugeordnet sind.

Bei geschickter Anordnung kann dabei ein hoher Redundanzgrad bei vergleichbar geringerem Zusatzaufwand erzielt werden. Ein Beispiel ist in 05 dargestellt. Redundante Instanzen sind mit dunklen Quadraten dargestellt. Jedes andere Modul hat genau eine redundante Instanz in direkter Nachbarschaft. Der Redundanzgrad, wenn eine zwei horizontale oder vertikale Schritte entfernte redundante Instanz für ein fehlerhaftes Modul einspringen kann, ist jeweils mit Zahlen dargestellt. Jedes Modul hat wenigstens zwei redundante Instanzen in Reichweite von zwei Schritten, vergleichbar mit dem dreifach modularen Ansatz. Während letzterer ein Verhältnis redundanter Instanzen zu den restlichen Modulen von 2:1 (200 Prozent Zusatzkosten) aufweist, ist dieses mit 4:12 (33 Prozent Zusatzkosten) für die in 05 gezeigte Lösung deutlich günstiger.

Als Ergebnis unserer Untersuchungen können wir für beliebige Anordnungen und Nachbarschaftsbeziehungen von Modulen eine Platzierung redundanter Instanzen bestimmen, die einen vorgegebenen Redundanzgrad mit minimalem Zusatzaufwand erreicht oder aber bei vorgegebenem Aufwand den Redundanzgrad maximiert. Bei genauem Hinsehen wird jedoch deutlich, dass der geringere Kostenaufwand in unserem Beispiel dadurch erkaufte wird, dass eine redundante Instanz im ungünstigen Fall die Aufgaben mehrerer fehlerbehafteter Module übernehmen muss. Ist das der Fall, so kann es sein, dass die Leistungsfähigkeit der redundanten Instanz überstrapaziert wird und deshalb die Leistung des Gesamtsystems zurückgeht. Um dies zu vermeiden, kann die redundante Instanz mit einer höheren Frequenz betrieben werden, was allerdings den Energieverbrauch steigert. Performanzverlust oder erhöhte Energieaufnahme können in vielen Fällen bis zu einem gewissen Grad akzeptabel sein, sofern die sicherheitsrelevante Funktionalität aufrecht erhalten wird.

Diese Überlegungen sollen verdeutlichen, dass viele Kriterien abzuwägen sind, um die Funktion eines eingebetteten Systems auch unter ungünstigen Umständen, die zum Auftreten von Fehlern führen, aufrecht zu erhalten. Gelingt dies, so spricht man in der Praxis häufig davon, das entworfene System sei robust. Robustheit ist dabei ein qualitativer Begriff. Wir streben an, diesen Begriff quantitativ zu erfassen, also „messbar“ zu machen, so dass die

Robustheit während des Entwurfs eingebetteter Systeme gezielt optimiert werden kann.

#### 4. Quantitativer Robustheitsbegriff

In vielen technischen Zusammenhängen und auch in alltäglichen Lebenssituationen wird der Begriff Robustheit gebraucht, ohne dass es eine formale oder gar quantifizierbare Definition gäbe. Das kann zu Verwirrung oder begrifflicher Redundanz führen, wie zum Beispiel in der nicht selten gehörten Aussage „Robust ist, wenn die Mean Time To Failure hoch ist“. Hier wird Robustheit implizit mit Zuverlässigkeit identifiziert.

Ein Beispiel aus dem Alltag zeigt dagegen, dass Robustheit und Zuverlässigkeit verwandte, aber zu unterscheidende Eigenschaften sind: Leidet ein Mensch bei den für uns normalen Lebensbedingungen lediglich einmal im Jahr an einer leichten Erkrankung, etwa einer Erkältung, kann man zu Recht sagen, dass der Körper zuverlässig arbeitet und die Person mit einer verlässlichen Gesundheit ausgestattet ist. Doch genügt das, um jemandem eine robuste Gesundheit zu bescheinigen? Nein; im üblichen Sprachgebrauch erfreut sich eine Person einer robusten Gesundheit, wenn sie auch unter ungewöhnlichen Bedingungen, etwa bei fortwährender Arbeit im Freien bei schlechtem Wetter, bei Aufenthalt in extremen Klimazonen oder unter schlechten hygienischen Umständen, nicht ernsthaft erkrankt.

Diese Auffassung von Robustheit spiegelt sich auch in folgender enzyklopädischer Definition wider: „Robustheit (lat. *robustus*, von *robur*: Hart-, Eichenholz) ist die Fähigkeit eines Systems, seine Funktion auch bei Schwankungen der Umgebungsbedingungen aufrecht zu erhalten. Meist ist es sinnvoll anzugeben, wogegen das System robust ist (z.B. gegen Änderung der Umgebungstemperatur oder gegen Fehlbedienung)“ [1]. Auf verschiedenen mathematisch-technischen Gebieten, etwa der Regelungstechnik, der Algorithmik und der Statistik, gibt es spezialisierte Varianten dieses qualitativen Robustheitsbegriffes.

Übertragen auf das Gebiet der Automobilelektronik und Elektromobilität, in dem die zunächst angestrebten Anwendungen des Projekts ROBUST liegen, bedeutet dies: Ein Fahrzeug, das während der üblichen erwarteten Lebensdauer von etwa 13 Jah-

ren bei normaler Nutzung ohne größere Reparaturen funktioniert, ist zuverlässig. Robustheit hingegen liegt vor, wenn das Fahrzeug auch unter verschärften Bedingungen oder aber für eine über das Übliche hinausgehende Zeit die erwarteten Eigenschaften aufweist.

Um den Robustheitsbegriff stärker formalisieren und Robustheit quantifizieren zu können, ist es erforderlich, die erwarteten Eigenschaften genau zu erfassen. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei lediglich um die Unterscheidung „funktioniert“ oder „funktioniert nicht“. Im Allgemeinen ist hingegen zu erwarten, dass viele weitere Eigenschaften von einem System erfüllt werden müssen, z.B. die oben angeführten Kriterien einer minimal zu garantierenden Performance und eines maximal akzeptablen Energieverbrauchs. Handelt es sich um  $n$  Eigenschaften, so spannen diese einen  $n$ -dimensionalen Raum auf. In jeder Dimension können die zulässigen Wertebereiche der Eigenschaftsgröße spezifiziert werden. Aus dem kartesischen Produkt dieser Bereiche ergibt sich das Teilgebiet des Eigenschaftsraums, in dem das System wie gewünscht funktioniert. Durch Angabe eines nicht-orthogonalen Gebiets können auch Abhängigkeiten zwischen den Eigenschaften erfasst werden.

In Analogie zu den erwarteten Eigenschaften müssen auch die normalen Betriebsbedingungen erfasst werden. Im Automobilbereich sind diese durch so genannte „Mission Profiles“ spezifiziert, welche Ober- bzw. Untergrenzen für die als üblich angenommene Beanspruchung eines Automobils und seiner nanoelektronischen Subsysteme vorgeben. Jede dafür relevante Einflussgröße kann als eine Dimension eines  $m$ -dimensionalen Raums der Stör-

#### Projekt ROBUST

*Das Projekt ROBUST erforscht neue Methoden und Verfahren zum Entwurf robuster eingebetteter Systeme und konzentriert sich dabei auf die besonders kritischen nanoelektronischen Komponenten. Hierzu werden erstmals Maße zur Quantifizierung der Robustheit definiert. Diese Maße werden mit Hilfe zu abstrahierender Robustheitsmodelle und unter Anwendung neuer Robustheitsanalyseverfahren für die Systemebene ermittelt. Die Robustheitsmaße werden eingesetzt, um beim Entwurf statische und dynamische Optimierungen der Robustheit gezielt durchzuführen und zu bewerten. Als Ergebnisse entstehen neue Methoden und prototypische Werkzeuge, welche im Rahmen eines Top-Down-Systementwurfs nanoelektronischer Systeme die Robustheit bereits in frühen Entwurfsphasen berücksichtigen. Die Methoden und Prototypen werden durch Anwendung auf ein Demonstrator-Design evaluiert und den industriellen Projektpartnern für weiterführende Arbeiten zur Integration in ihren Entwurfsprozess zur Verfügung gestellt.*

*Neben dem Institut für Technische Informatik sind Arbeitsgruppen aus Frankfurt, Hannover, Karlsruhe, München und Oldenburg an ROBUST beteiligt. Das Projekt wird als Clusterforschungsprojekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert und durch die im edacentrum e.V. engagierten Unternehmen kofinanziert.*

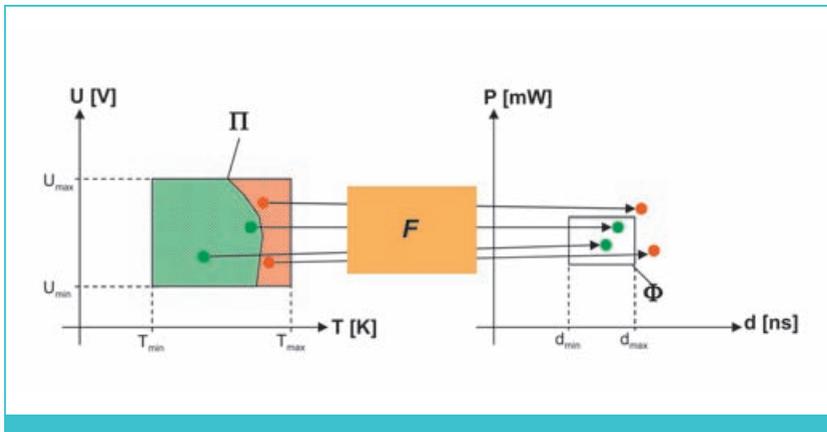
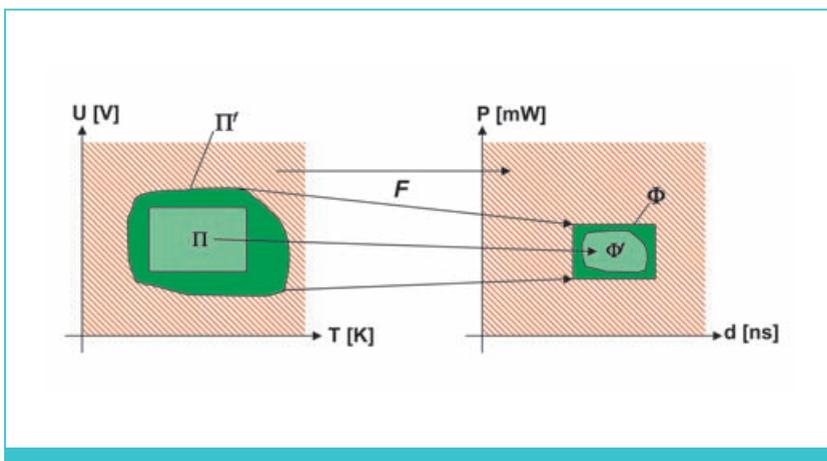


Abbildung der Störeinflüsse (links) in den Eigenschaftsraum (rechts) durch ein nicht-robustes System  $F$ .

einflüsse erfasst werden. Durch Angabe eines Teilgebiets dieses Raumes wird ein Mission Profile festgelegt.

06 zeigt auf der linken Seite als Beispiel für Störeinflüsse die Umgebungstemperatur  $T$  sowie eine Schwankungsbreite der Versorgungsspannung  $U$ . Als normal aufgefasste Werte sind durch das Gebiet  $\Pi$  angegeben. Auf der rechten Seite sind als einzuhaltende Eigenschaften die Leistungsaufnahme  $P$  sowie die Verzögerung (Latenz)  $d$  erfasst. Ein System  $F$  ist nun durch eine Abbildung charakterisiert, die angibt, wie die Störeinflüsse die Systemeigenschaften beeinflussen. Die klassische Methode zur Bestimmung dieser Abbildung ist der Test von Systemprototypen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Im Projekt ROBUST wird angestrebt, durch Analyse- und Simulationsverfahren eine entsprechende Bewertung bereits in frühen Entwurfsphasen zu ermöglichen.



Ein robustes System  $F$  toleriert Störeinflüsse, die das Mission Profile übersteigen.

Ein System, das wie in 06 dargestellt schon für einige „Arbeitspunkte“ innerhalb des Mission Profile die spezifizierten Eigenschaften verletzt, ist nicht als robust zu bezeichnen. Nur wenn im Normalbetrieb alle Eigenschaften erfüllt sind, kann durch Tolerieren von Störeinflüssen, die über das Normale hinaus gehen, Robustheit geschaffen werden, wie in 07 dargestellt: Über das Gebiet  $\Pi$  hinaus werden auch alle im Gebiet  $\Pi'$  liegenden Störeinflüsse in akzeptable Eigenschaften abgebildet. Alternativ lässt sich Robustheit im Eigenschaftsraum dadurch erkennen, dass bei normalen Störeinflüssen die entstehenden Eigenschaften  $\Phi$  einen Spielraum zu den Grenzen des Gebiets  $\Phi$  aufweisen, so dass auch mit noch stärkeren Störungen umgegangen werden könnte. Nur in den rot dargestellten Gebieten führen die Störeinflüsse zu Eigenschaftsverletzungen.

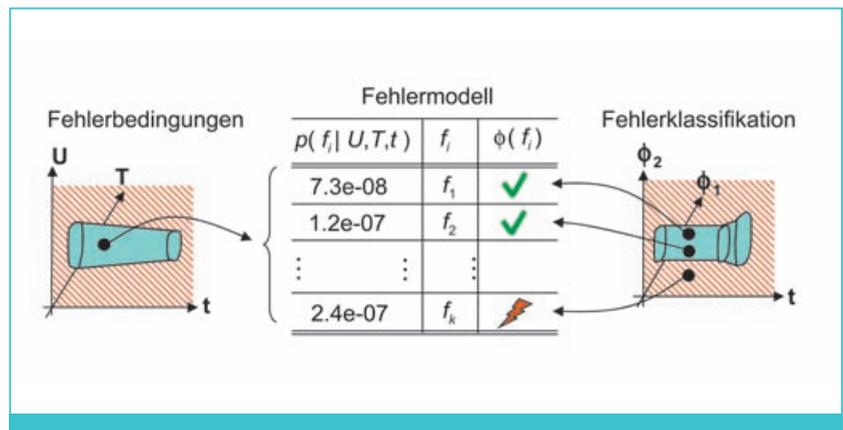
Zwecks Bewertung der Robustheit wird im Handbuch für Robustheitsvalidierung [2] der Sicherheitsabstand zwischen dem Mission Profile  $\Pi$  und dem als Safe Operating Area bezeichneten Gebiet  $\Pi'$  herangezogen. Dieser Abstand lässt sich jedoch nur für einzelne Dimensionen bestimmen; eine Abstandsmetrik, die Größen mit unterschiedlichen physikalischen Einheiten vermischt, wäre weder wohldefiniert noch sinnvoll interpretierbar. Um dennoch die verschiedenen Aspekte mit einem gemeinsamen Robustheitsmaß quantifizieren zu können, verfolgen wir den Ansatz, Robustheit als Wahrscheinlichkeit zu definieren. Robustheit verstehen wir als die Wahrscheinlichkeit, dass ein System auch unter ungünstigen Störeinflüssen im Rahmen der spezifizierten Eigenschaften funktioniert. Dies kann auf solche Störeinflüsse bezogen werden, die das Mission Profile überschreiten; dann ist Robustheit die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass die Eigenschaften eingehalten werden, wenn das System außerhalb des Mission Profile betrieben wird. Diese lässt sich im linken ebenso wie im rechten Diagramm in 07 bestimmen als Quotient der Wahrscheinlichkeit des dunkelgrünen Gebiets und der Wahrscheinlichkeit des Komplements des hellgrünen Gebiets. Eine begriffliche Variante verzichtet durch Annahme eines leeren Gebiets  $\Pi$  auf das Mission Profile und betrachtet die Funktionswahrscheinlichkeit des Systems unter allen möglichen Störeinflüssen. In der wahrscheinlichkeitsbasierten Definition spiegelt sich die begriffliche Nähe von

Robustheit und Zuverlässigkeit wider. Jedoch setzt Robustheit erst bei Überschreiten des Rahmens des normalen Betriebs ein, innerhalb dessen Zuverlässigkeit bewertet wird. Zudem erlaubt es unser Robustheitsbegriff, die betrachteten Störeinflüsse und Eigenschaften explizit anzugeben, wodurch festgelegt wird, wogegen und bezüglich welcher Eigenschaften ein System robust sein soll. Weitere Details zu dem hier nur grob vorgestellten Ansatz sowie zu verwandten Arbeiten sind in [3] verfügbar.

## 5. Robustheitsanalyse

Neben der Koordination eines domänenübergreifenden Robustheitsbegriffs liegt ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten des Instituts für Technische Informatik auf der Untersuchung von Methoden und Verfahren zur Robustheitsanalyse durch Fehler-simulation digitaler Teile eines Systems. Diese Arbeiten ergänzen sich mit jenen anderer Projektpartner, die analoge Fehler-simulationen bearbeiteten. Sie werden integriert durch die Nutzung der Systemmodellierungsbibliothek *SystemC-AMS* als gemeinsame Basis sowie durch die angestrebte integrierte Robustheitsbewertung des Gesamtsystems. An den Berührungspunkten zwischen analogen und digitalen Komponenten sind zudem die unterschiedlichen Fehlerarten der beiden Welten ineinander zu übersetzen. Beispielsweise gilt jede graduelle Abweichung von einem Sollwert als Fehler in der analogen Welt. Eine solche Abweichung löst hingegen in der digitalen Welt nur dann einen Fehler aus, wenn sie einen bestimmten Schwellenwert überschreitet.

Im Zusammenhang mit dem zuvor beschriebenen Robustheitsmodell dient die Fehler-simulation dazu, die durch das System generierten Eigenschaften  $\Phi$  bei unterschiedlichen Störeinflüssen zu bewerten. Sie stellt damit letztlich die Abbildung von dem Raum der Störeinflüsse in den Eigenschaftsraum her. Allerdings kann diese Abbildung nicht in einem einzigen Schritt berechnet bzw. simuliert werden, da im Falle digitaler Systemteile ein direkter Schluss von analogen Störgrößen auf das resultierende Verhalten aufgrund der gewollten Abstraktion digitaler Modelle von analogen Details nicht möglich ist. Stattdessen wird der Zusammenhang zwischen Störungen und Eigenschaften unter



Schematische Übersicht der Robustheitsbewertung mittels Systemfehlersimulation und bedingungsorientiertem Fehlermodell.

Nutzung des Konzepts bedingungsorientierter Fehlermodelle als Bindeglied hergestellt (siehe 08). Ein solches Fehlermodell basiert zunächst auf einer Menge von Fehlern, die für das digitale Modell angenommen werden. Anstelle klassischer Fehlermodelle wie dem Stuck-At-Modell, das auf niedrigen, implementierungsnahen Ebenen gängig ist, können auf der Systemebene abstraktere Fehlermodelle eingesetzt werden. Die betrachteten Simulationsverfahren werden diesbezüglich flexibel ausgelegt, so dass Fehlermodelle austauschbar sind.

Der „bedingungsorientierte“ Anteil eines Fehlermodells beschreibt, wie wahrscheinlich das Auftreten eines Fehlers bei vorgegebenem Fehlermechanismus  $f_i$  und zugehörigen Parametern wie Spannung  $U$ , Temperatur  $T$  und Alter  $t$  ist. Auf diese Weise wird eine Verbindung zum Raum der Störeinflüsse hergestellt. Die parameterabhängigen Wahrscheinlichkeiten müssen zu diesem Zweck für unterschiedliche Systemkomponenten individuell charakterisiert werden. Diese Charakterisierung wird in Zusammenarbeit mit anderen Projektpartnern vorgenommen. Hier fließen wiederum Informationen über die Stressbelastung der Komponenten im Systembetrieb ein, welche durch die Systemsimulation ermittelt werden.

Um nun die Robustheit eines Systems zu bestimmen, wird dieses zunächst mit Fehlern simuliert, wobei die Fehler bezüglich ihrer Auswirkungen klassifiziert werden. Dabei geht es vor allem darum, zu bestimmen, ob das Auftreten eines Fehlers zu einer Verletzung spezifizierter Eigenschaften  $\Phi$  führt. Dieser Schritt ist aufwändig, da er systematisch für alle Fehler durchgeführt werden muss. Dies ist aber

## DIE AUTOREN



### PROF. DR.-ING. MARTIN RADETZKI

studierte an der Universität Oldenburg Informatik und Physik und promovierte dort im Fach Technische Informatik über die „Synthese digitaler Schaltungen aus objektorientierten Spezifikationen“. Von 2000 bis 2005 war er bei der sci-worx GmbH sowie der edacentrum GmbH in Hannover tätig. Seit 2005 leitet er die Abteilung Eingebettete Systeme am Institut für Technische Informatik der Universität Stuttgart.



### DR.-ING. THOMAS HÖTZEL

ist seit 2010 Geschäftsführer der Atmel Automotive GmbH und leitet dort die Entwicklung der Business Unit RF & Automotive. Er hat langjährige Erfahrung im Bereich Halbleiter-Innovationsmanagement und ist Experte für sämtliche Geschäfts- und Entwicklungsprozesse – von der strategischen Planung bis hin zur Massenproduktion. Thomas Hötzel studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig mit Schwerpunkt Multimedia. Seit 1989 war er bei Philips Semiconductors (heute NXP) tätig, danach

von 2000 bis 2005 als COO bei der sci-worx GmbH Hannover, einer Tochterfirma der Infineon Technologies AG. 2005 folgte der Wechsel zur ZMD AG, Dresden, dort war er bis 2009 für die Produktentwicklung verantwortlich und als CTO Mitglied des ZMD-Vorstands. 2005 bis 2009 leitete er den Arbeitskreis IC-Design im Silicon Saxony Netzwerk, 2009 wurde er zum Mitglied des VDE/GMM-Beirats ernannt.

#### Kontakt

Institut für Technische Informatik, Abteilung Eingebettete Systeme  
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart  
Tel. 0711/685-88270, Fax 0711/685-88286  
E-Mail: martin.radetzki@informatik.uni-stuttgart.de, Internet: www.iti.uni-stuttgart.de

bei gegebenem System nur einmal erforderlich. In einem zweiten Schritt werden die Fehler mit ihrer charakterisierten Auftretenswahrscheinlichkeit  $p$  bei unterschiedlichen Störeinflüssen (im Beispiel der **oB**:  $U$ ,  $T$  und  $t$ ) bewertet. Durch Summation wird die Wahrscheinlichkeit einer Eigenschaftsverletzung bestimmt, womit wie zuvor beschrieben die Robustheit berechnet werden kann. •

Martin Radetzki und Thomas Hötzel

#### Literatur

- [1] Wikipedia, „Robustheit“, online: <http://de.wikipedia.org/wiki/Robustheit>, 15.10.2010.
- [2] SAE International Standard J1879, „Handbook for Robustness Validation of Semiconductor Devices in Automotive Applications“, April 2007.
- [3] Radetzki, M., Bringmann, O., Nebel, W., Olbrich, M., Salfelder, F., Schlichtmann, U., „Robustheit nanoelektronischer Schaltungen und Systeme“, in: Zuverlässigkeit und Entwurf, 4. GMM/GI/ITG-Fachtagung vom 13.-15. September 2010 in Wildbad Kreuth, VDE-Verlag, 2010.
- [4] Bertsche, B., Göhner, P., Jensen, U., Schinköthe, W., Wunderlich, H.-J., „Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme“, Springer, 2009.

# Active Noise and Vibration Reduction



Passive measures for reducing noise and vibration or for ensuring optimal structural performance have reached certain limits. For this reason, active techniques are becoming increasingly important. As funds have become available to pursue research in this area, terminologies have been introduced to define the field of study. The terms smart structures, intelligent structures, adaptive structures, active structures, adaptronics, and strucronics all belong to the same field of study. Once developed for aerospace applications like the orbital truss structure used in the shuttle radar topography mission, active noise and vibration reduction is today used in modern automotive engineering.

## 1. Smart Structures

All these terms refer to the integration of actuators, sensors in structural components, and the usage of some kind of control unit or enhanced signal processing with a material or structural component (01). The goal of this integration is the creation of a material system having enhanced structural performance, but without adding too much mass or consuming too much power. Due to its nature, the field of smart structures depends on inter-disciplinary research since numerous disciplines (e.g. material science, applied mechanics, control theory, etc.) are involved in the design of a smart structure system solution. The materials used in smart structures often have interesting and unusual properties. Electrostrictive materials, magne-

tostrictive materials, shape memory alloys, magneto- or electrorheological fluids, polymer gels, and piezoelectric materials, for example, can all be used to design and develop structures that can be called smart. However, the materials themselves are not smart. "Smartness" refers to the exploitation of material properties to better serve a design function than would be possible through conventional structural design. In the following, two active techniques are presented, to demonstrate the use of smart structure systems in production and automotive applications. Starting with vibration isolation, the main concept of active techniques applied to rigid body dynamics is introduced. In the following section the application of an active vibration control to the interior of a car body is presented.

## 2. Vibration Isolation

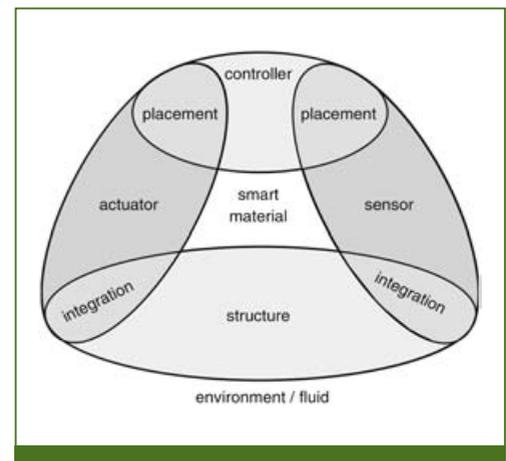
Isolating a piece of delicate equipment from the vibration of a base structure is of practical importance in a number of engineering fields. For instance, in industry and research the quest for tighter production tolerance and higher resolution places stringent requirements on the environment. In the majority of cases, the base is flexible and vibrates with an unpredictable waveform which has a broadband spectrum. Passive anti-vibration mounts are widely used to support the equipment and protect it from severe base vibration. However, conventional passive mounts suffer from the inherent trade-off between poor high frequency isolation and amplification of vibration at the fundamental mounted resonance frequency. Generally the best isolation performance is achieved by using an active system in combination with a passive mount, where the fundamental resonance can be actively controlled without reducing the high frequency performance.

In the last decade various strategies for active vibration isolation have been discussed, including feedforward and feedback concepts for systems under periodic as well as random vibrations.

Especially decentralized velocity feedback control was employed, whereby each electro-dynamic actuator is operated independently by feeding back the absolute equipment velocity at the same location. They obtained good control and robust stability both experimentally and theoretically for multichannel control systems.

To demonstrate the performance of an isolation system, an experimental setup as shown in **03** is considered. The setup consists of a heavy base plate which is suspended on six springs. In order to minimize the interaction between the vibration isolation system and the spring-mass-system of the experimental setup, the mass of the base plate (2 t) is chosen to be much larger than the mass of the vibration isolation system (30 kg). The isolation performance can be determined by constructing a transmissibility curve. Transmissibility is simply the response of the isolation system divided by the excitation (in the frequency domain), where the response and excitation have been measured with accelerometers. The excitation of the base plate is realized using a conventional loudspeaker

which is connected to the base plate via a stinger. The output from the function generator is first amplified using a conventional HIFI amplifier before being used to drive the loudspeaker. The rigid body eigenfrequencies of the spring supported base plate are between 1.44 and 2.88 Hz. **04** depicts the measured transmissibility curves for the passive and active isolation systems, respectively. Here, the active system is realized using a decentralized analog feedback controller. It is seen that almost over the entire frequency range a significant reduction in the transmissibility curve is obtained using the active system. At frequencies above 40 Hz, noise appears in both



01

Integrated smart structure.



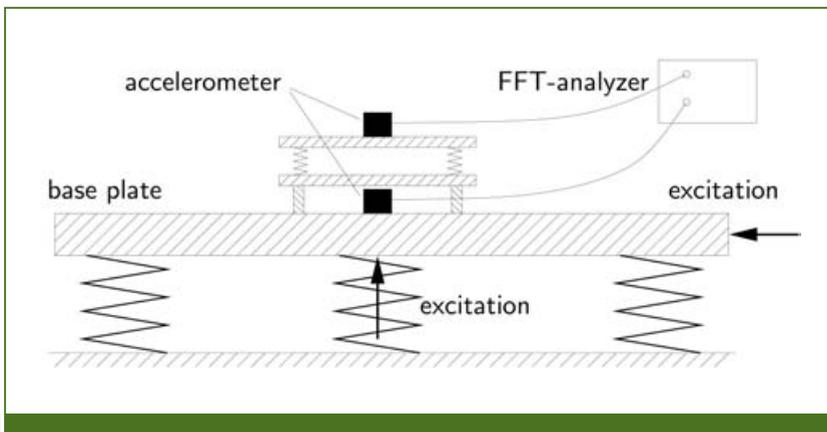
02

Active vibration isolation system.

### SUMMARY

Die akustischen Eigenschaften von technischen Produkten spielen eine immer bedeutendere Rolle. Insbesondere im Automobilbau sind die Anforderungen an das vibroakustische Verhalten durch Leistungssteigerungen, kompaktere Bauweisen und strengere gesetzliche Vorgaben weiter gestiegen. Aktive Schwingungsregelung zur Reduktion oder gezielten Beeinflussung des abgestrahlten Schalls gewinnt dabei mehr denn je an Bedeutung. Während passive Maßnahmen wie Schwermatten und Antidröhnfolien Schwingungen im mittleren und oberen Frequenzbereich effektiv dämpfen, führt deren Einsatz im niedrigen Frequenzbereich zu einer erheblichen Gewichtszunahme. Aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten strebt der Fahrzeugbau jedoch eine leichtere Bauweise an. Diese Anforderung bedingt die Einsparung schwerer Dämmplatten und führt häufig zu einer Verschiebung der Eigenfrequenz der Struktur in einen niedrigeren Frequenzbereich. Aus rein mechanischer Sicht führen die Ziele einer leichten Bauweise und eines Produkts mit guten akustischen Eigenschaften unter Verwendung rein passiver Maßnahmen zu sich widerstrebenden Konstruktionsvorgaben. Aktive Maßnahme und die Verwendung von so genannten Smart-Structures sind hingegen in der Lage diese Lücke zu schließen.

Acoustic properties of modern engineering products have gained more and more in importance. Especially in automotive engineering we have high requirements to the vibroacoustical behavior of each component and the total system. Active control techniques for isolating or reducing the structural vibrations are starting to play a major role in this field of applications. While passive techniques like foam mats can be very efficient in the middle and high frequency range, they lead to a significant increase in weight, when applied to reduce vibrations in the low frequency range. But especially in automotive engineering light-weight constructions are desired. This yields two implications. On the one hand the resonance frequencies of the structure are lowered and on the other hand heavy coatings should be reduced. From mechanical point of view this demands are contradictory. However active concepts and so-called smart structures are able to close this gap.



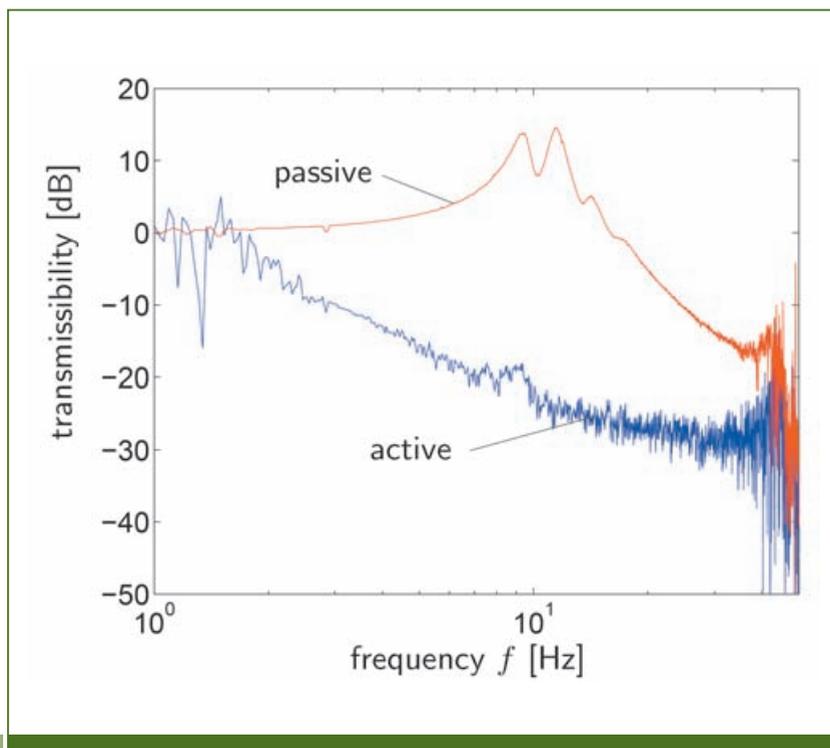
03

Experimental setup for testing of an active vibration isolation system.

curves. This is due to the dynamic behavior of the actuators.

### 3. Active Vibration Control

Structural vibrations of a car body are caused by the engine, the wheels, the chassis, and the airflow. The vibration propagates from its source through the entire car body (05). Since car bodies are made of metal with low material damping, the sound propagates with high efficiency. Vibration of the roof, the doors, and the floor panels



04

Measured vertical transmissibility curves for the passive and active vibration isolation system.

causes the radiation of sound into the interior of the car. The sound radiation can be reduced by covering the surface of the structure with foam mats or by applying active vibration control concepts.

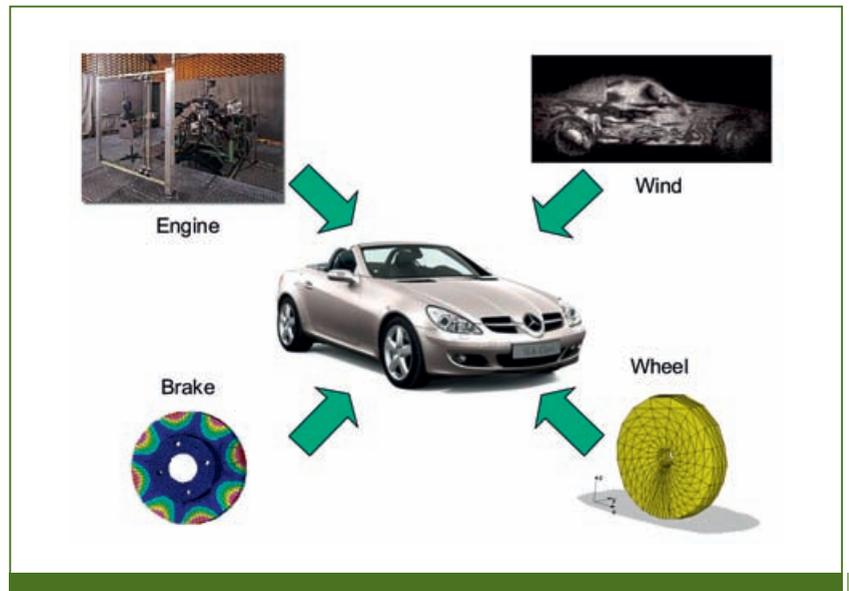
One of the earliest studies of active vibration control was completed by Swigert and Forward [4]. They conducted a theoretical and experimental study that involved electronic dampers. In that study, a system of electromechanical transducers made from lead zirconate titanate (PZT) were implemented to control the mechanical vibration of an end-supported mast. The output signals from the sensors were amplified and appropriately shifted in time to provide control inputs for actuators positioned symmetrically on the surface of the mast. Bailey and Hubbard [6] developed the first smart structure using polyvinylidene fluoride (PVDF). The PVDF was used as an active element for active vibration control of a cantilever beam. In a later study, Fuller et al. [6] described a systematic approach for active control of vibration. They summarized the principles underlying active vibration control and its practical applications by combining material from vibrations, mechanics, signal processing, and control theory. Today, two main approaches exist in vibration control: feedforward and feedback control. The feedforward approach makes use of adaptive filtering methods such as x-filtered LMS algorithms. The main advantages of these control systems are that no model of the structure is needed and that they can be employed at high frequencies. The advantage of the feedforward controller for high frequencies is a result of its less sensitivity to phase lag and the sensor position. The reference sensor used for feedforward control is located up-stream to the incoming wave. Therefore the optimal feedforward control system reacts to the disturbance without time delay as opposed to a feedback control. The major drawback of the feedforward method is that a reference signal is required, which is somehow correlated with the disturbance.

Feedback methods can further be divided into two parts: active damping and model-based control techniques. In the active damping approach, sensors and actuators are located at the same position, which is called a collocated setup. It can be shown that collocated sensor/actuator pairs results to control stability since the root

locus never leaves the left plain of the root locus plot. For non-collocated sensor/actuator pairs so-called pole-zero flipping may lead to instability. To prevent pole-zero flipping the prediction of all imaginary zeros within or near the bandwidth of the control system is required. Feedback control is guaranteed to be stable if ideal sensors and actuators are used. The active damping method has the advantage that it does not require a model of the structure. However, it has the major drawback that it works only near structural resonances.

There exists a large variety of model-based feedback methods, including LQR, H-Infinity and modal feedback methods. Especially modal feedback control has been successfully implemented for the reduction of plate vibrations. The modal parameters for plates can be determined using analytical solutions to the governing plate equation or by using finite element (FE) calculations. For structures with a complex geometry, such as a car body, an analytical solution does not exist, and even a FE calculation is complicated and time intensive. As an alternative, an experimental modal analysis can be used to extract modal parameters, such as eigenfrequencies and mode shapes, from measured data. The mode shapes contain the necessary information for the layout and placement of sensors and actuators. After the actuator and sensor positions and dimensions are fixed, modal input and output matrices of a state-space model can be calculated. These matrices are used in a modal state-space controller. Errors caused by slight nonlinearities of the structure or by the modal analysis curve fitting procedure result in a discontinuity in the mode shape. Therefore, a direct evaluation of the input and output matrices is not possible. In such cases the mode shapes have to be approximated by polynomials or cubic splines. Since the input and output matrices are used to create a real time modal filter, the control law is formulated in modal coordinates.

The proposed modal concept was implemented on the centre panel within the passenger compartment of a roadster car body, as shown in 06. In 07, the experimental set-up is depicted. The set-up consists of two independent circuits. One circuit is used for the vibration control of the car body whereas the other circuit is used to monitor the resulting vibration.



05

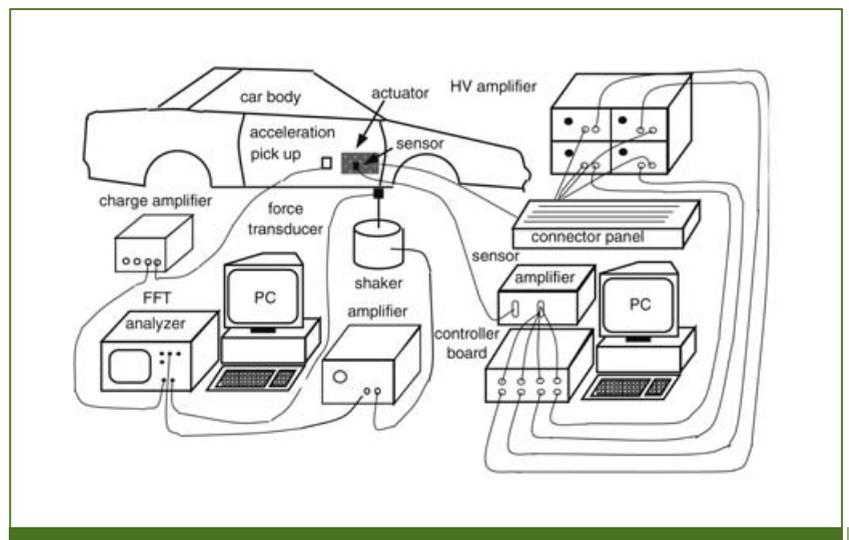
Examples of Vibration Sources in a Car.

08 shows the sensor and actuator layout on the front side of the centre and floor panel. Since the actuator on the back side of the centre panel covers almost the complete area of the panel the sensors are bonded on the surface of the actuator. Nevertheless, there are no collocated sensor/actuator pairs. The collocation of sensors and actuators is not required since the sensor signals are not fed back directly to the actuators but they are



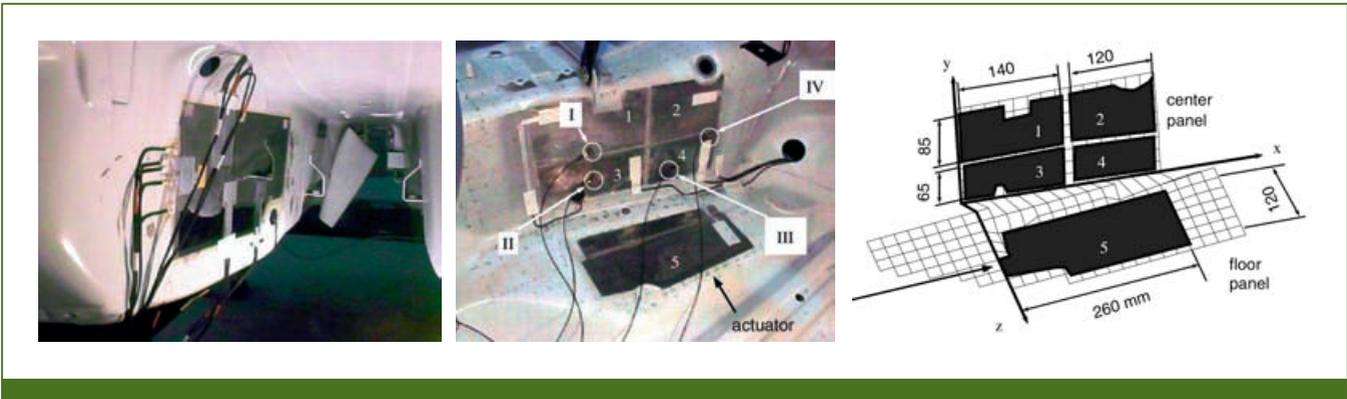
06

Car body in white for active vibration control (AVC).



07

Setup of the controlled car body.



08

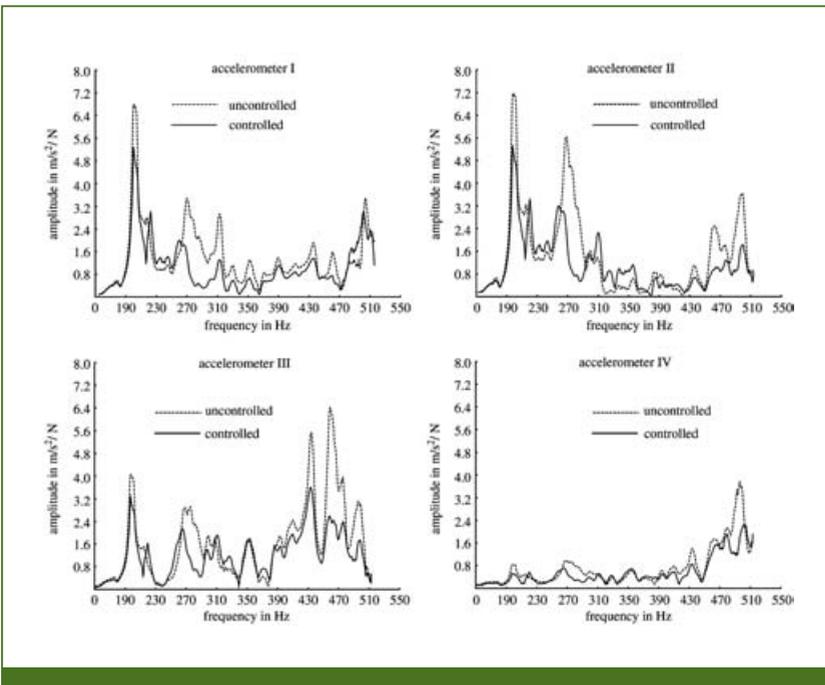
Centre and floor panel with PVDF actuators and collocated sensors inside passenger compartment.

filtered to achieve modal displacements and modal velocities. In order to protect the sensor signals against the electro magnetic field of the actuator, the sensors are covered by an aluminum foil and connected with shielded cables to the signal amplifier. In the evaluation circuit the resulting vibration is monitored with four acceleration sensors. Measuring the excitation force and the structural response enables the calculation of frequency response functions (FRFs). 09 shows the four measured FRFs for the controlled/uncontrolled centre panel of the car body. As a result of the implemented modal controller, the peaks at the resonances

(196 Hz, 281 Hz, 457 Hz and 500 Hz) of the controlled modes are significantly reduced. Additionally, the vibration amplitudes of other modes, which are not explicitly included in the control concept, are also decreased. This can be explained by the shape similarity of the controlled and uncontrolled mode shapes. Nevertheless, not all vibration amplitudes are equally reduced for a particular actuator layout. Only those modes for which a sensor/actuator layout has been tailored, will be effectively controlled. • Lothar Gaul

References

S. Hurlebaus, L. Gaul, Smart structure dynamics, Journal Mechanical Systems and Signal Processing 2006, 20, p. 255-281.  
 U. Stöbener, L. Gaul, Active vibration control of a car body based on experimentally evaluated modal parameters, Journal Mechanical Systems and Signal Processing 2001, 15, p. 173-188.  
 T. Müller, S. Hurlebaus, U. Stöbener, L. Gaul, Modelling and control of an active vibration isolation system, in: Proceedings of the International Modal Analysis Conference IMAC, Orlando, FL, 2005.  
 C. Fuller, S. Elliot, P. Nelson, Active Control of Vibration, Academic Press, London, 1996.  
 C. Swigert, R. Forward, Electronic damping of orthogonal bending modes in a cylindrical mast-theory. Journal Spacecraft Rockets 1981, 18(1):5-10.  
 T. Bailey, J. Hubbard, Distributed piezoelectric-polymer active vibration control of a cantilever beam. Journal Guidance Control 1985, 8(5):605-11.



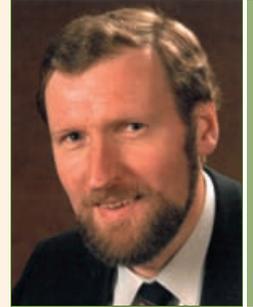
09

Measured frequency response functions for the centre panel of the car body.

## THE AUTHOR

**PROF. DR. DR. LOTHAR GAUL**

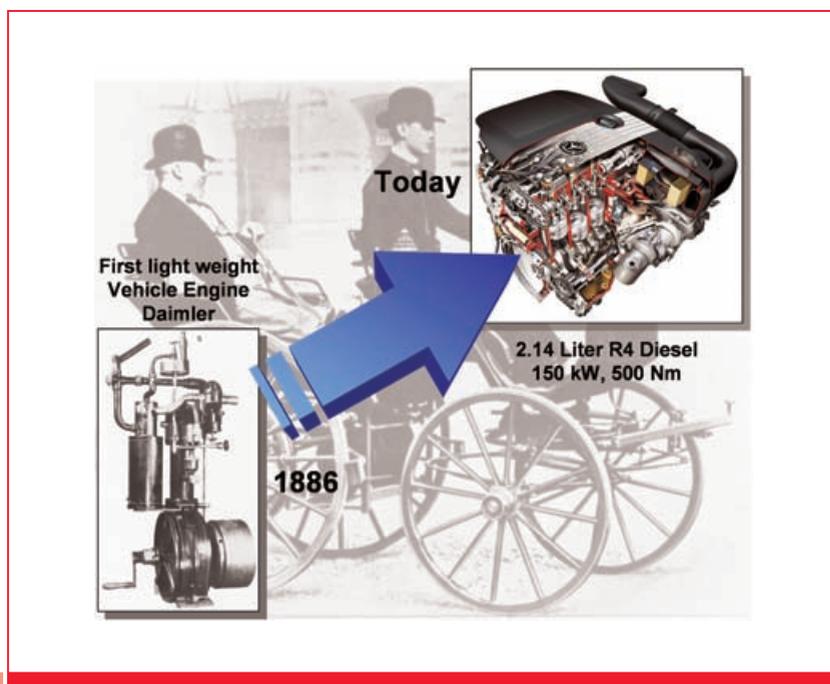
erhielt nach einer Werkzeugmacherlehre seine Ingenieurausbildung in Wilhelmshaven, Berlin und Hannover, wo er promovierte und sich habilitierte. Direktor des Instituts für Mechanik an der Universität der Bundeswehr Hamburg und Dekan des Fachbereichs Maschinenbau wurde er mit 34 Jahren, 1993 Ordinarius und Direktor des Instituts A für Mechanik (jetzt Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik) der Universität Stuttgart, später Dekan der Fakultät Verfahrenstechnik und Technische Kybernetik. Rufe an die Ruhr-Universität Bochum und die Technische Universität München lehnte er ab. Er ist langjähriger Gastprofessor an der Florida Atlantic University, USA, Forschungsauditor bei Daimler und Fachgutachter der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

**Contact**

Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart, Tel. 0711/685-66278, Fax 0711/685-66282  
E-Mail: [gaul@iam.uni-stuttgart.de](mailto:gaul@iam.uni-stuttgart.de), <http://www.iam.uni-stuttgart.de>

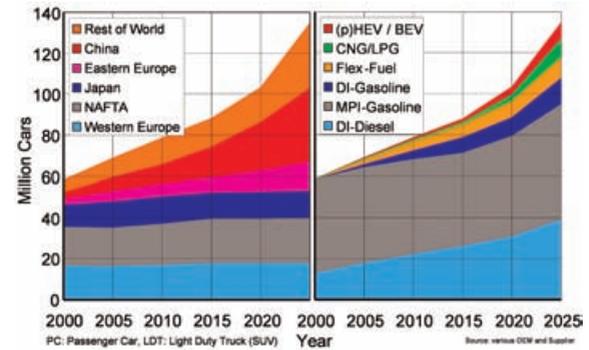
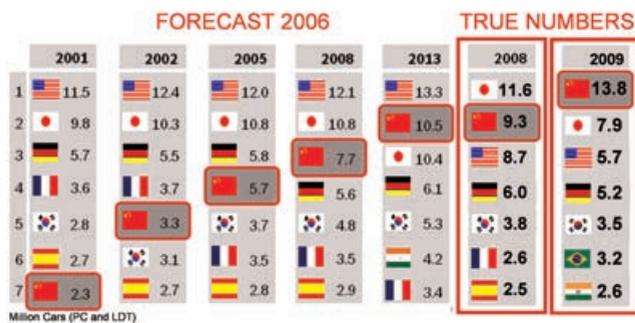
# Fahrzeugantriebe heute und morgen

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



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“.

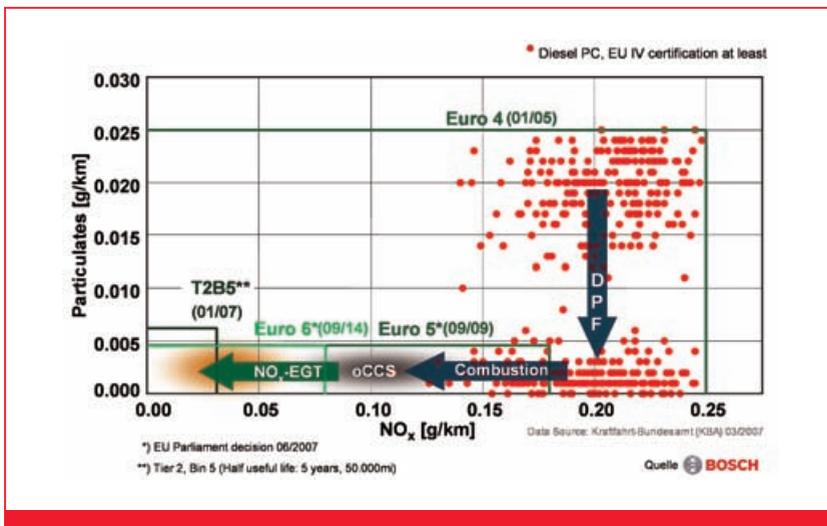
Links: Die sieben größten Automobil-Nationen (Pkw und Light Duty Truck (SUV) Produktion); (Quelle: OICA Statistics).

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 CO<sub>2</sub>-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.

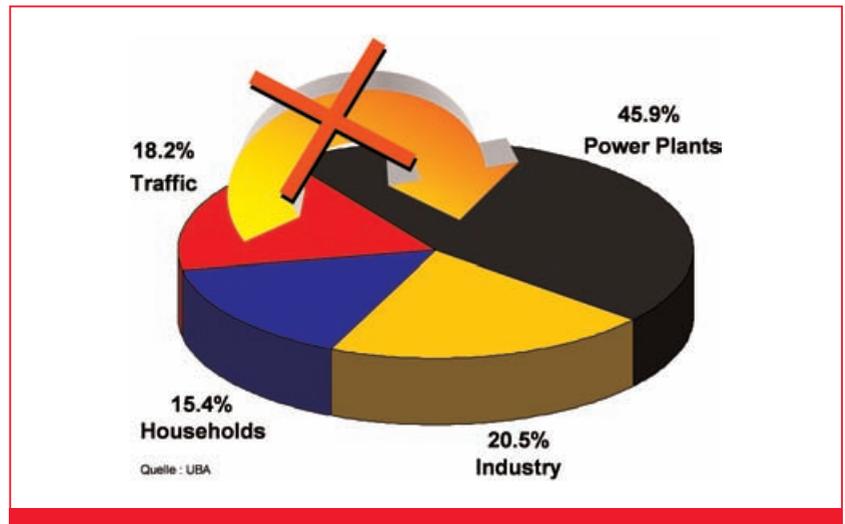
In den Emerging Markets ist in den nächsten 15 Jahren noch von Anteilen kleiner 10 Prozent an elektrifizierten Antriebssträngen (mit Ausnahme von Start/Stop-Systemen) auszugehen, da das Kosten-/Nutzen-Verhältnis zu ungünstig bleibt. Diese Aussage ist vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Anzahl der 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.



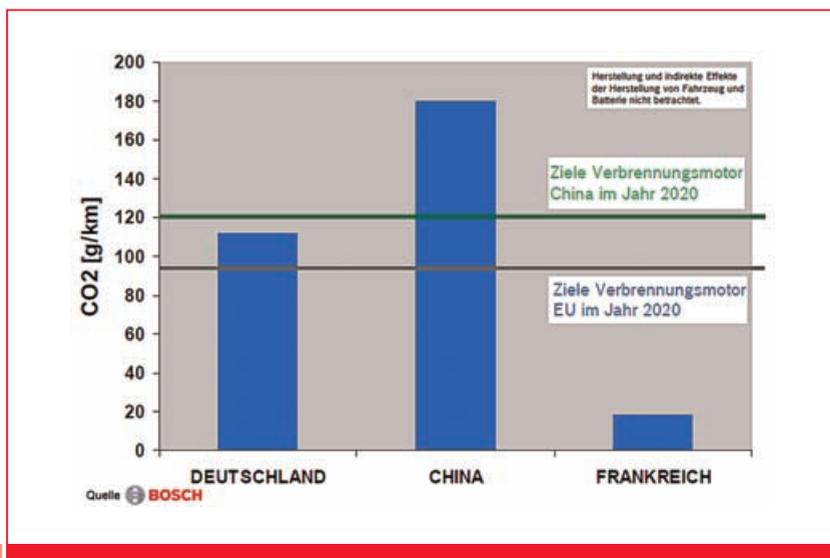
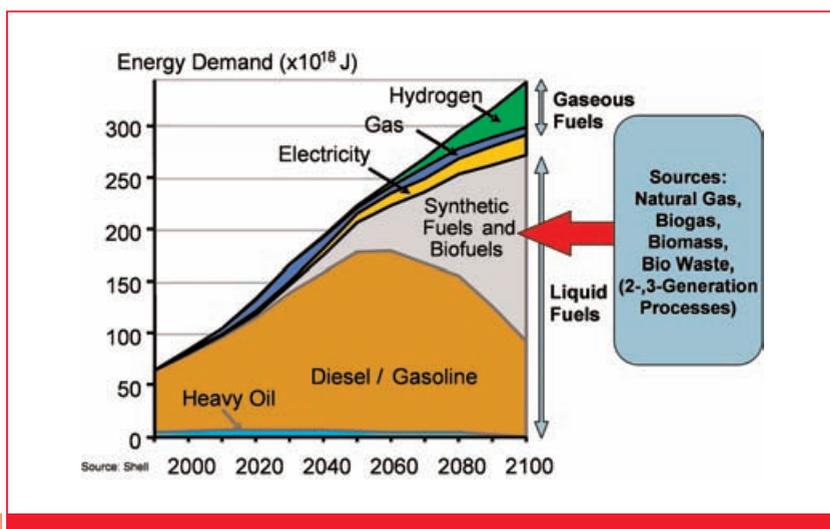
Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland 2007.

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.

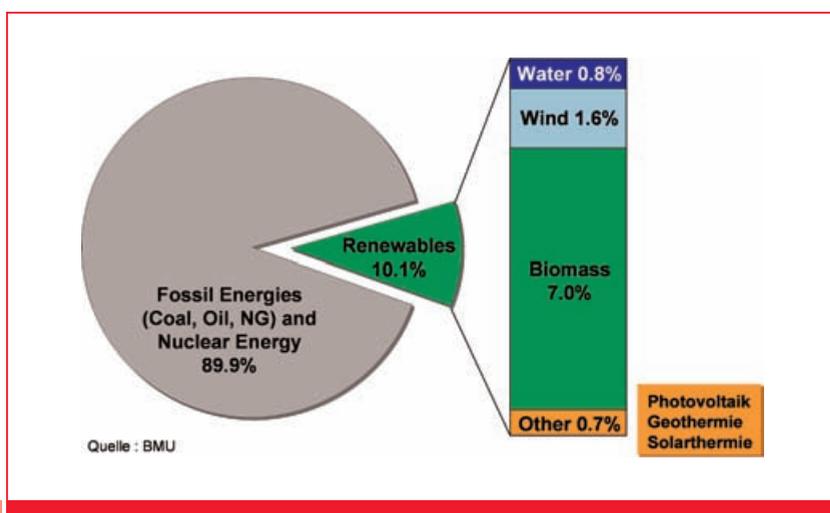
Ottomotoren halten die genannten Grenzwerte bereits seit Jahren ein. Mittlerweile nicht nur mit 3-Wege-Katalysatoren, sondern auch solche mit einer hochpräzisen, strahlgeführten Direkteinspritzung mit Piezo-Düsen, welche eine stabile und verbrauchsoptimale Schichtladeverbrennung zulassen.

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-

CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 und damit auch der Emittent spielen keine Rolle. Ein Blick auf die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emittenten in Deutschland (05) zeigt, dass die Kraftwerke den weitaus größten Anteil haben. Es wäre nun kontraproduktiv, wenn die CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen. Einzig Frankreich und die Schweiz weisen sehr viel günstigere Werte auf, da vorrangig CO<sub>2</sub>-freie Nuklearenergie genutzt wird. Konsequenterweise erzielen batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu zukünftigen Fahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb in Deutschland kaum CO<sub>2</sub>-Vorteile (06). In China ist sogar eine sehr deutliche Verschlechterung zu konstatieren, nur in Frankreich sind Elektrofahrzeuge richtige „CO<sub>2</sub>-Saubermänner“.

### 3. Ressourcenverfügbarkeit

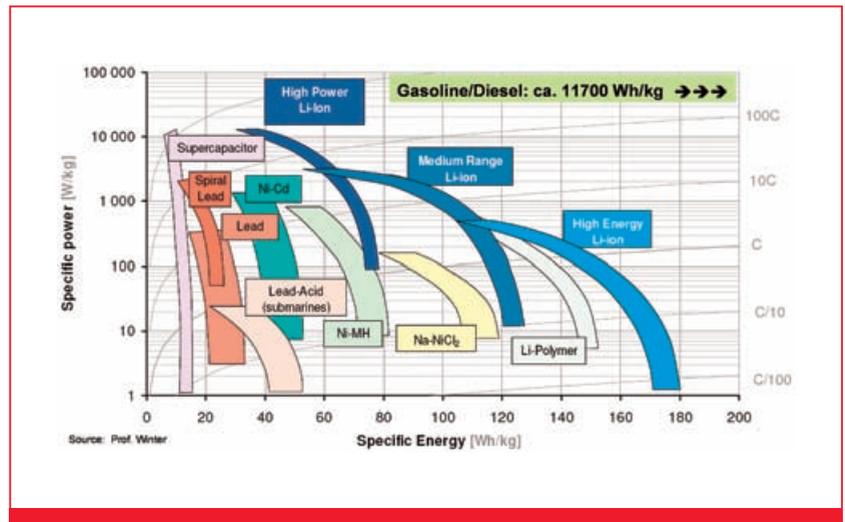
07 zeigt die Ergebnisse einer Studie von Shell zur Entwicklung der zukünftigen Kraftstoffverfügbarkeit. In dieser Studie wird der sogenannte „Oil-Peak“ zwischen 2050 und 2060 prognostiziert. Shell erwartet, dass die sinkende Erdölverfügbarkeit im Wesentli-

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).

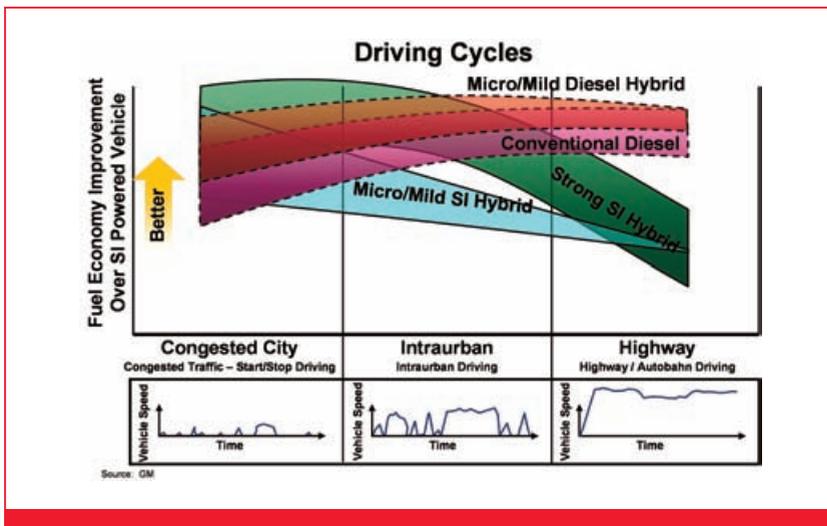
Biomasse in ihren verschiedenen Ausprägungen. Bei Betrachtung von **08** ist der addierte Anteil von Photovoltaik, Geo- und Solarthermie mit gerade mal 0,7 Prozent einigermaßen bescheiden. Ohne Biomasse sähe es schlecht aus um die Bilanz erneuerbarer Energien in Deutschland.

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	

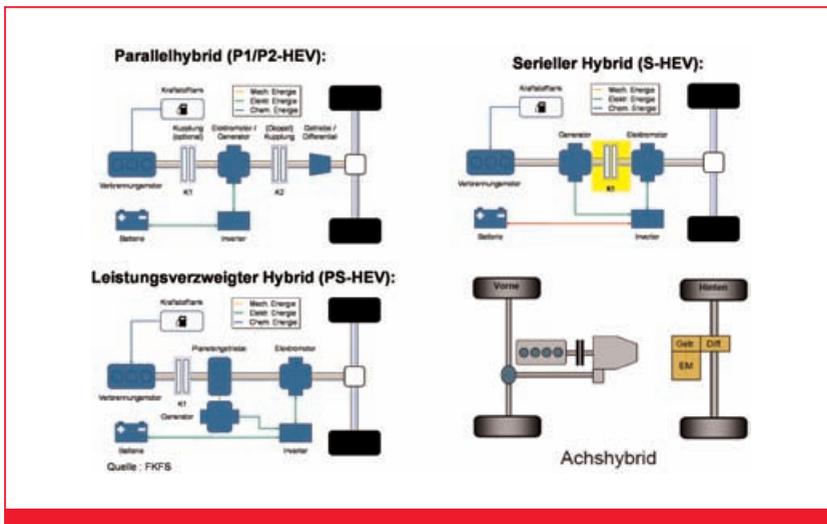
Quelle: FKFS

Substitutionspotenzial von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV).



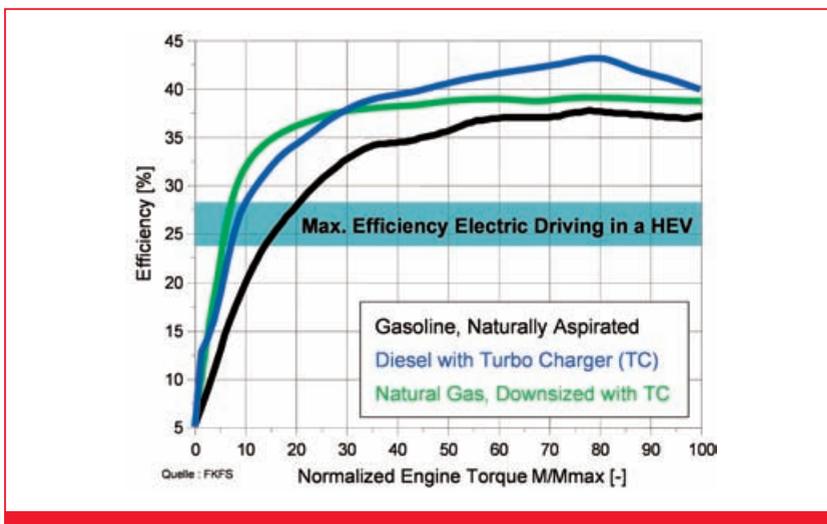
11

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?!

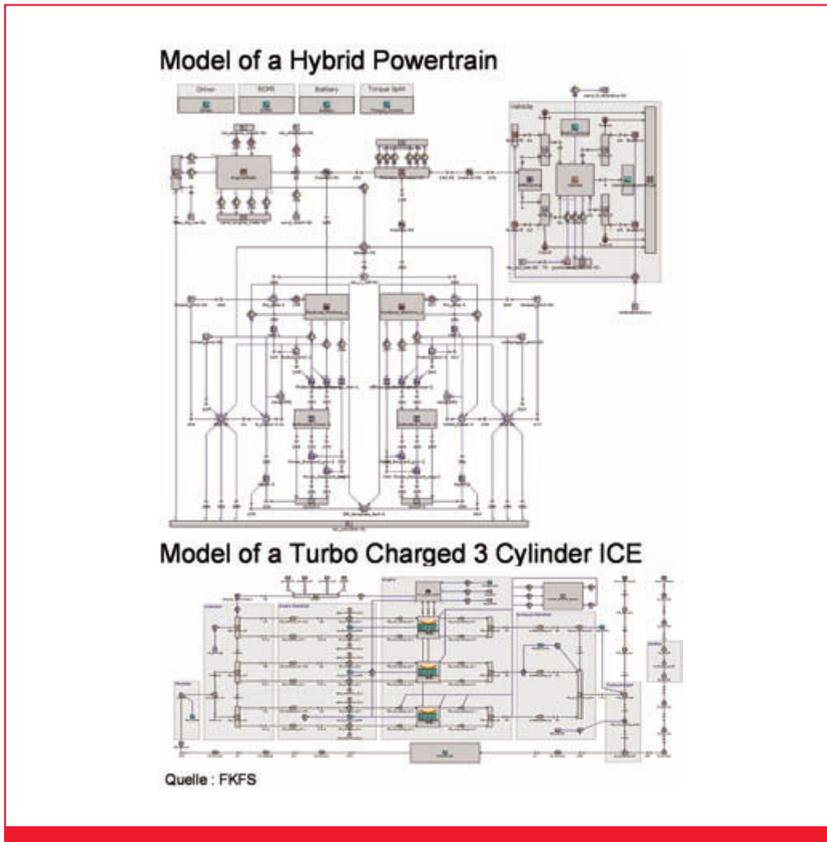
Der Hybridantrieb, d.h. die Kombination aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, könnte also nicht nur die Rolle einer Übergangslösung einnehmen. Der Hybridantrieb hat vielmehr das Potenzial zu einer nachhaltigen Antriebslösung.

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.

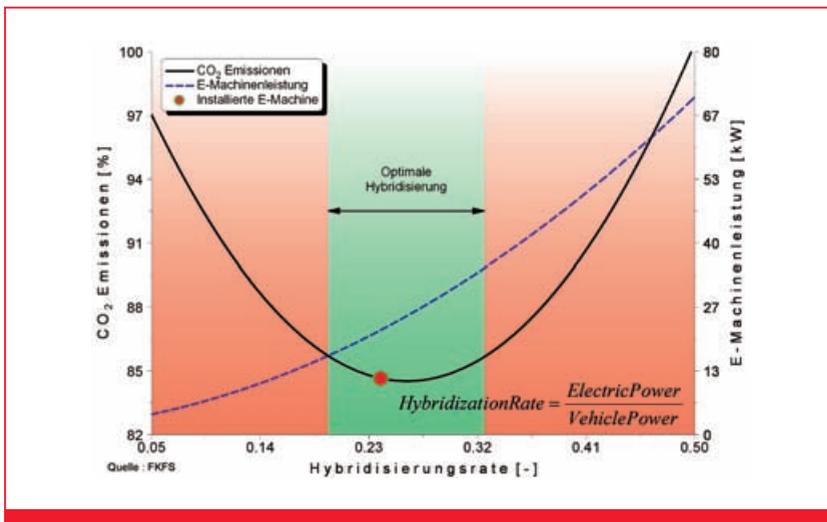
Dies wird deshalb vorgesehen, weil wie 13 für stationäre Zustände zeigt, der Wirkungs-



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

CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>) dann der gedrittete 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht werden [5,6], womit trotz einem Fahrzeuggewicht von mehr als 1,6 Tonnen eine CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-neutralen Individualmobilität, wie wir sie heute gewohnt sind und sehr zu schätzen wissen.

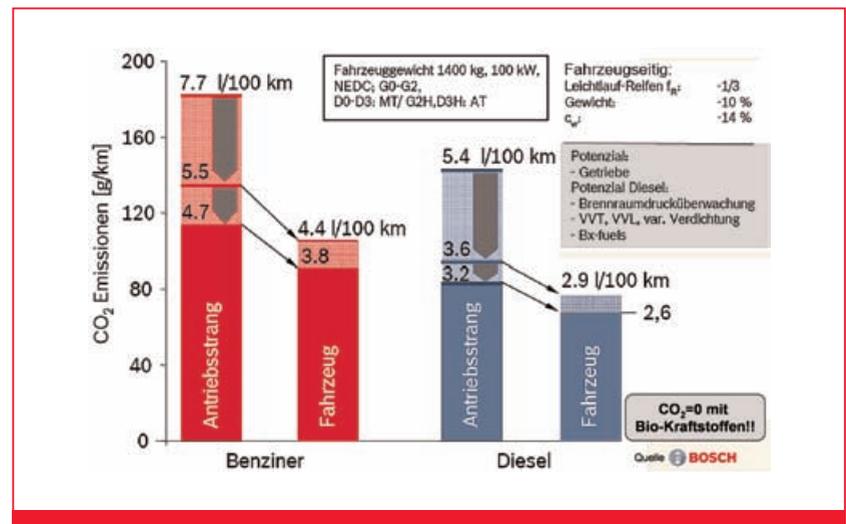
Allerdings wird die „Antriebslandschaft“ sehr viel differenzierter werden um für jede Aufgabe die jeweils richtige, passende und optimale Antriebslösung zur Verfügung zu stellen. Die Bandbreite wird dabei vom rein verbrennungsmotorischen über alle möglichen Ausprägungen der Hybride bis zum rein elektrischen 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 CO<sub>2</sub> 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](mailto:michael.bargende@ivk.uni-stuttgart.de), <http://www.ivk.uni-stuttgart.de/IVK>

# Fahrzeugdynamik

## Das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug-Regelsysteme



Quelle: ©iStockphoto.com/MistikaS

Für einen Automobilhersteller ist eine hervorragende dynamische Performance seiner Produkte seit jeher ein wichtiges Differenzierungsmerkmal, welches zu seinem Image und zu seiner Positionierung am Markt beiträgt.

Früher wurden Fahrzeuge entweder eher sportlich oder eher komfortabel ausgelegt. Dabei ging das Eine immer ein Stück weit zu Lasten des Anderen. Vom Kunden wurde dies akzeptiert und trug letztlich sogar zur Identifikation mit einer bestimmten Marke und deren Auslegungs-Philosophie bei.

Bei heutigen Fahrzeugen mit ihrer fortgeschrittenen Technik und ihrer Vielzahl an aktiven Systemen wird die Auflösung des Zielkonfliktes zwischen sportlichem Handling und hohem Fahrkomfort ebenso selbstverständlich erwartet wie ein Höchstmaß an Sicherheit in jeder Fahrsituation.

Hierfür müssen die vorhandenen Potenziale zunehmend ausgeschöpft werden. Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung des Systems bestehend aus Fahrer, Fahrzeug und Regelsystemen und eine intelligente Abstimmung ihrer Interaktion. Insbesondere die Bewertung von Fahrzeugeigenschaften aus der subjektiven Sicht des Fahrers und damit des Kunden kann hierbei zukünftig entscheidende Impulse liefern.

## 1. Einleitung

Die Entwicklung der fahrdynamischen Eigenschaften bewegt sich heute in einem Spannungsfeld, welches durch zahlreiche Einflüsse geprägt ist. Wesentliche Punkte hierbei sind:

- Das Produkt „Kraftfahrzeug“ ist in einem hohem Maße technisch ausentwickelt. Beim Kunden ist eine entsprechend hohe Erwartungshaltung etabliert. Diese noch weiter zu übertreffen bedeutet einen immer höheren Aufwand für einen immer weniger deutlich zunehmenden Nutzen. Auch die gegenüber früher deutliche Erweiterung des Portfolios, beispielsweise durch Entwicklung von Derivaten wie Sportcoupes o.ä. auf Basis bestehender Fahrzeugplattformen, bringt einen erhöhten Entwicklungsaufwand mit sich. Diese Produktvielfalt stellt eine Voraussetzung für das Bestehen auf dem heutigen globalisierten Markt dar, bedingt aber auch eine immer weitere Verkürzung der Entwicklungszeiten. Beide Faktoren machen neue Wege erforderlich, um zeit- und kostenintensive Entwicklungsschritte, wie etwa aufwändige Fahrversuche mit Prototypen, soweit wie möglich zu reduzieren oder gänzlich durch Simulationsrechnungen zu ersetzen, also einen vollständig digitalen Entwicklungsprozess zu etablieren.
- Mit der fortschreitenden Verbesserung der Fahrdynamik geht in einem bestimmten Maße eine Angleichung der Fahrzeuge einer Klasse einher. Dies bedeutet einen gewissen Prägnanzverlust bei den Fahrzeugmarken. Vergleichbar, wenn auch nicht so negativ belegt, ist dies mit der Situation, als die äußere Form der Fahrzeuge mehr und mehr durch die Forderung nach einem geringen Luftwiderstandsbeiwert bestimmt wurde. Vielfach wurde beklagt, dass als Folge „alle Autos gleich aussehen“. Heute haben die Hersteller, trotz weiterer Verbesserung der aerodynamischen Eigenschaften, wieder eine eigene, klare Designsprache gefunden. Prozesse zur Auslegung der Fahrdynamik müssen es zukünftig in derselben Weise erlauben, ein markenspezifisches Fahrerlebnis herauszuarbeiten und sicherzustellen.
- Der Energieverbrauch der Fahrzeuge, aber auch der Fahrzeugpreis rücken immer mehr in den Vordergrund. Dies berührt nicht zuletzt die aktiven Systeme im Fahrzeug, die im Betrieb zum Teil ein spürbares

Maß an Stellenergie benötigen. Entwicklung, Absicherung und Darstellung dieser Systeme im Fahrzeug stellen zudem einen erheblichen Kostenfaktor dar. Fraglos wird die Zahl der eingebetteten Systeme im Fahrzeug weiter zunehmen. Das Fahrzeug wird mit immer mehr eigener Intelligenz ausgestattet sein und den Fahrer durch gezielte Information unterstützen. Zusätzlich zu aktiv eingreifenden Sicherheitsfunktionen, wie etwa Stabilitätsregelung oder Bremsassistent, werden Komfortfunktionen, wie etwa eine Unterstützung beim Ausregeln von Seitenwind, Einzug ins Fahrzeug halten. Diese Entwicklung kann und darf jedoch nicht das „intelligente Design“ durch den Menschen ersetzen, welches das grundlegende Fahrverhalten des Fahrzeugs an den Fahrer anpasst und dafür sorgt, dass es ihn bei der Fahraufgabe unterstützt, anstatt ihn unnötig zu fordern. Beide Aspekte, künstliche Intelligenz beim Einsatz aktiver Systeme sowie intelligentes Design des passiven Fahrzeugverhaltens müssen ineinandergreifen und sich effizient ergänzen. Das passive Verhalten stellt dabei den „Grundzustand“ dar, die aktiven Systeme kommen zum Einsatz, sobald sich Fahrsicherheit und Komfort dadurch entscheidend verbessern lassen. Randbedingungen wie Fahrzeugklasse und Antriebskonzept müssen hierbei natürlich mit in Betracht gezogen werden. Ein Fahrzeug der gehobenen Klasse wird anders auszulegen sein als ein

### SUMMARY

*Mit dem immer höheren technischen Standard und der Variantenvielfalt heutiger Kraftfahrzeuge geht eine immer weitere Verkürzung der Entwicklungszeiten einher. Dies macht es erforderlich, zeit- und kostenintensive Entwicklungsschritte soweit wie möglich zu reduzieren. Schlüsselbegriff ist hierbei der „digitale Entwicklungsprozess“, mit dessen Einführung Entscheidungen in zunehmendem Maße auf der Grundlage von Simulationsergebnissen getroffen werden anstatt auf Basis aufwändiger Versuche mit Prototypen. In Bezug auf die Auslegung der Fahrdynamik kann hierbei insbesondere die Bewertung von Fahrzeugeigenschaften aus der subjektiven Sicht des Fahrers und damit des Kunden zukünftig entscheidende Impulse liefern.*

*The increasing technical standard and variety of today's production vehicles demand shorter and shorter development periods. This requires reducing time- and cost demanding development steps to a minimum. A key term in this context is the „digital design process“, with whose introduction decisions will be increasingly based on simulation results rather than expensive prototype testing. With regard to vehicle dynamics design, in particular methods for assessing vehicle dynamics properties from the driver's, i.e. the customers, subjective point of view may provide vital input.*



das Fahrerurteil somit messbar gemacht werden. Im Kontext der Fahrzeugentwicklung bedeutet dieses messbar machen des Fahrerurteils die Möglichkeit, klar umrissene Entwicklungsziele zu definieren.

In einem weiteren Schritt muss das Verhalten des Fahrers im Rahmen seiner Regeltätigkeit in geeigneter Weise in der Simulation nachgebildet werden. Das heißt letztlich, dass auf Basis gewonnener Erkenntnisse vorhergesagt werden muss, wie sich ein bestimmter Fahrer in einem bestimmten Fahrzeug verhalten wird. Dieses vorhersehbar machen des Fahrerhaltens bedeutet, Entwicklungszeiten zu verkürzen. Je genauer das objektive Verhalten des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug und die subjektive Fahrerbewertung in der Simulation vorhergesagt werden können, desto weniger muss mit realen Fahrzeugen getestet werden.

Eine solche Entwicklung ganz zu Ende gedacht, bedeutet einen vollständig digitalen Entwicklungsprozess, ohne jede Notwendigkeit für physische Tests. Ein solcher Schritt wäre im Hinblick auf Kosten und Zeitaufwand zu begrüßen, wird bezüglich der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug jedoch nicht in allernächster Zukunft erfolgen, da, wie schon erwähnt, Erfahrung und Urteilsvermögen eines realen Testfahrers oder Abstimmers nicht ohne weiteres in Formeln und Algorithmen auszudrücken sind. Dafür sind das menschliche Handeln zu komplex und die zu betrachtenden Aspekte der Fahrzeugdynamik zu vielfältig.

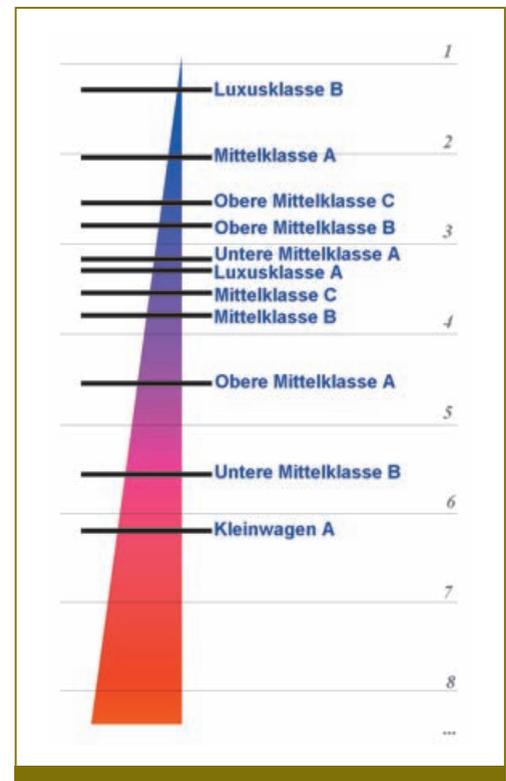
In Teilbereichen ist eine durchgängige simulative Untersuchung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug allerdings bereits heute möglich. Dies soll am Beispiel des Fahrens unter dem Einfluss von natürlichem Seitenwind gezeigt werden. Für diese Fahrsituation wurde am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen/Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (IVK/FKFS) ein Bewertungsverfahren entwickelt, welches im Stande ist, die genannten Teilaufgaben zu erfüllen, also das Fahrerverhalten im geschlossenen Regelkreis Fahrer-Fahrzeug vorherzusagen und eine Bewertung der Eigenschaften dieses Gesamtsystems aus der subjektiven Sicht des Fahrers vorzunehmen, [2]. Insbesondere kann damit anhand von Simulationsrechnungen ein Vergleich mit anderen Fahrzeugen vorgenommen und ein Ranking

erstellt werden (02) noch bevor ein erstes reales Fahrzeug auf der Straße ist. So kann negativen Überraschungen frühzeitig vorgebeugt werden.

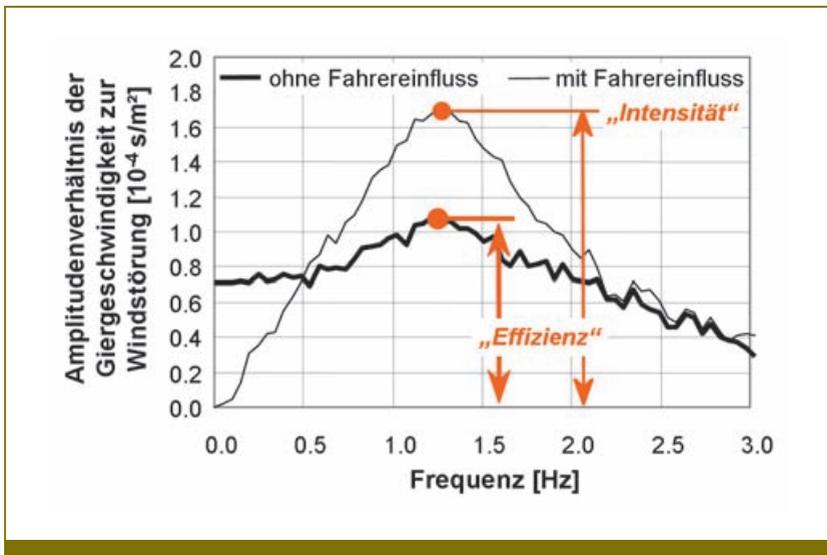
Bei Fahrt unter natürlichem Seitenwind kann das Fahrzeug durch Windböen erfasst und dadurch vom gewünschten Kurs abgebracht werden. Dem muss der Fahrer durch Lenkbewegungen entgegenwirken. Insbesondere bei sehr böigem Wind, also bei häufigen und schnellen Änderungen von Windstärke oder Windrichtung, muss der Fahrer fortwährend korrigierend eingreifen. Je nach Fahrzeug empfindet er dies als mehr oder weniger anstrengend.

Um diesen sich einstellenden subjektiven Eindruck an objektiven Messgrößen festmachen zu können, wird die Geradeausfahrt bei Seitenwind betrachtet. Hier muss der Fahrer keinem kurvigen Fahrbahnverlauf folgen, sondern seine Lenkbewegungen dienen allein dem Ausgleich der Windstörung. Dies vereinfacht die Interpretation des Fahrerhaltens, da nicht zwischen zwei verschiedenen Einflüssen auf den vom Fahrer eingestellten Lenkradwinkel unterschieden werden muss. Darüber hinaus erledigt der Fahrer das Ausregeln der Windstörung bei Geradeausfahrt weitestgehend unterbewusst. Dies führt letztlich dazu, dass die gefundenen Zusammenhänge weitestgehend fahrerunabhängig sind, also auf andere Fahrer übertragbar sind. Diese Besonderheit hebt die „Geradeausfahrt unter Einfluss von stochastischem Seitenwind“ aus der Fülle der möglichen Fahrsituationen heraus.

Zur eigentlichen Bewertung des Seitenwindverhaltens aus Sicht des Fahrers wird unter anderem die Drehgeschwindigkeit des Fahrzeugs um die Hochachse (Gieren) herangezogen, also die Geschwindigkeit, mit der sich das Fahrzeug bei Wind aus der gewünschten Fahrtrichtung herausdreht. Der Fahrer bewertet dabei das Absolutmaß der Gierbewegung sowie die Effizienz sei-

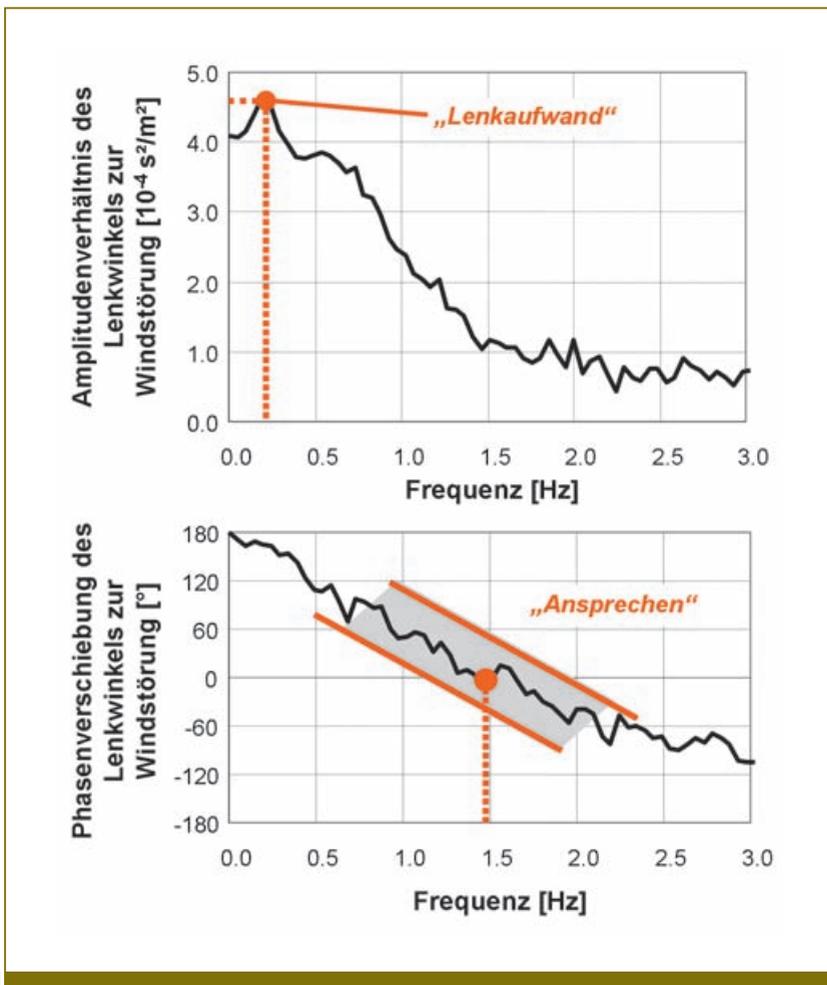


Simulativ ermitteltes Fahrzeug-Ranking.



03

Gierantwort des Fahrzeugs auf stochastischen Seitenwind mit und ohne Fahrereinfluss.



04

Amplitudenverhältnis und Phase des Fahrerlenkwinkels beim Ausregeln von Seitenwind.

ner Lenkeingriffe zur Kompensation der Windstörung (03).

Weitere objektive Kriterien, die bestimmte Teilaspekte des subjektiven Fahrerurteils wiedergeben, werden direkt anhand des Lenkverhaltens definiert, das der Fahrer bei der Bewältigung der Regelaufgabe zeigt (04). Hier wird zum einen der so genannte Lenkaufwand bestimmt, der angibt, wie stark und wie schnell gegengelenkt werden muss, und zum anderen wird betrachtet, wie schnell der Fahrer im geschlossenen Regelkreis auf die Windstörung effektiv reagiert.

Durch unterschiedliche Gewichtung dieser vier Einzelkriterien wird eine Gesamtbewertung erzeugt, die das Subjekturteil des Fahrers wiedergibt (05). Von besonderer Bedeutung ist dabei die effektive Reaktionsgeschwindigkeit des Fahrers. Fühlt er sich aufgrund der Fahrzeugeigenschaften zu besonders schnellen Reaktionen veranlasst, so wirkt sich dies zwar positiv auf die Spurhaltung aus und hilft bei der Bewältigung der Regelaufgabe, der Fahrer bewertet die Notwendigkeit einer schnellen Reaktion jedoch als negativ. Er bevorzugt ein Fahrzeug, das es ihm ermöglicht, langsam zu reagieren und damit entspannter und bequemer zu fahren.

### 3. Das Fahrzeug – Technische Entwicklung in neuem Licht

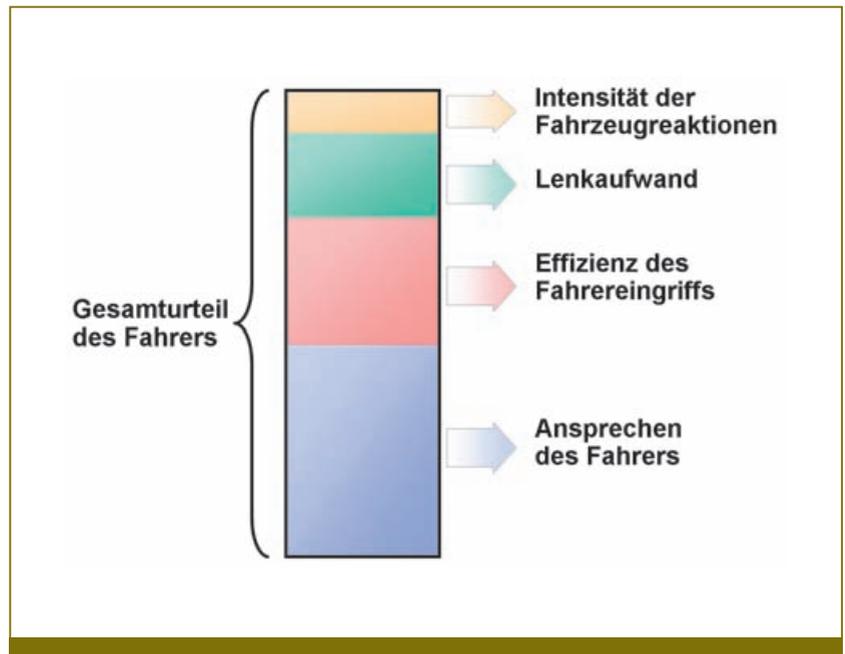
Die Möglichkeiten zur Untersuchung und Bewertung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug in der Simulation wirft ein neues Licht auf die technische Weiterentwicklung von Fahrzeugen. Bewährte Konzepte lassen sich weiter verbessern und gezielt aus Sicht des Fahrers optimieren. Neue technische Entwicklungen können frühzeitig bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Fahrerempfinden beurteilt werden. Die klassische Vorgehensweise bei der Entwicklung eines aktiven Systems besteht etwa darin, zunächst die Funktion darzustellen und anschließend im Fahrversuch zu überprüfen, ob die erreichte Verbesserung vom Fahrer auch als solche beurteilt wird, oder ob der aktive Eingriff gar als störend empfunden wird. Eine durchgängige Simulation und Bewertung des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug-Regelsystem ermöglicht es dagegen, die Funktionalität eines Systems sowie dessen Einfluss auf das Fahrerempfinden bereits in einem frühen Stadium des Entwicklungsprozesses paral-

lel und damit in enger Wechselwirkung zu betrachten. Dies führt schneller zum gewünschten Ziel bzw., in begrenzter Zeit, zu besseren Lösungen.

Auch eine Verbesserung des oben angesprochenen Seitenwindverhaltens von Fahrzeugen kann mit Hilfe aktiver Systeme erreicht werden. Zum Teil befinden sich solche Systeme bereits im Serieneinsatz, [3]. Wie zuvor angedeutet ist es im Sinne einer optimalen Energieeffizienz natürlich auch hier sinnvoll, zunächst das passive Fahrzeug optimal auszulegen. Entsprechende Potenziale ergeben sich wieder durch eine ganzheitliche Betrachtung des Systems Fahrer-Fahrzeug, sei es durch Neubewertung bisheriger Entwicklungsziele oder durch Verfeinerung der Untersuchungs- und Entwicklungsmethoden. Letzteres soll an einem Beispiel gezeigt werden, dass in engem Zusammenhang mit der Seitenwindproblematik steht, nämlich dem Einbezug instationärer aerodynamischer Phänomene in die Untersuchung des dynamischen Fahrzeugverhaltens.

Bei der aerodynamischen Optimierung eines Fahrzeugs liegt das Hauptaugenmerk auf dem Erreichen eines geringen Luftwiderstandsbeiwertes, da sich die Luftwiderstandskraft unmittelbar auf den Kraftstoffverbrauch und damit den  $\text{CO}_2$ -Ausstoß auswirkt. Daneben beeinflussen jedoch noch weitere Luftkräfte und -momente das Fahrzeugverhalten. In Bezug auf die Seitenwindempfindlichkeit von Kraftfahrzeugen sind dies insbesondere die Windseitenkraft und das Windgiermoment, welche eine Spurbabweichung und ein Herausdrehen des Fahrzeuges aus der gewünschten Fahrtrichtung bewirken.

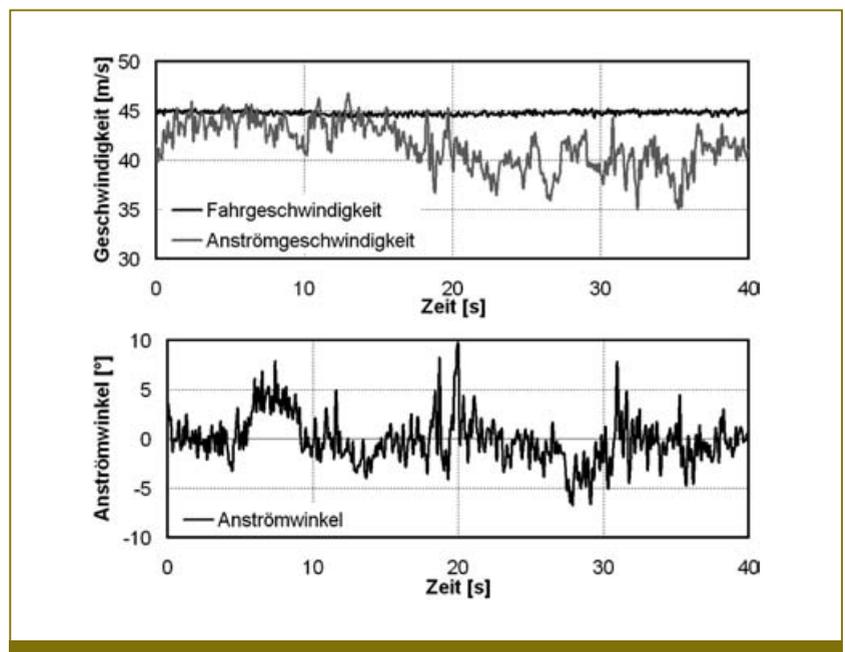
Üblicherweise werden die aerodynamischen Kräfte und Momente heute in Windkanälen bestimmt, die darauf ausgelegt sind, möglichst gleichmäßige und konstante Anströmbedingungen zu schaffen. Diese standardisierten Bedingungen ermöglichen eine gute Reproduzierbarkeit sowie Vergleichbarkeit der Messergebnisse untereinander. Die Anströmbedingungen, welche bei einer Fahrt auf öffentlichen Straßen auftreten, unterscheiden sich hiervon jedoch grundlegend. Vorausfahrende Fahrzeuge, insbesondere aber natürlicher Wind führen zu veränderlichen Windgeschwindigkeiten und Anströmwindeln (06), was zu einer permanent wechselnden Anströmsituation des Fahrzeuges führt.



05

*Gewichtung der Einzelkriterien zu einer Gesamtbewertung des Seitenwindverhaltens.*

Aktuelle Forschungsansätze erlauben es, die wesentlichen Aspekte der in der Realität herrschenden Anströmverhältnisse im Prüfstand nachzubilden. Hierzu kann etwa ein System zum Einsatz gelangen, wie es im Modellwindkanal des IVK zur Verfügung steht. Dort wird unmittelbar nach der Düse ein Böen-Generator eingebracht, der aus mehreren drehbar gelagerten Flügelprofilen besteht. Die einzelnen Flügel-



06

*Anströmsituation bei realer Straßenfahrt.*

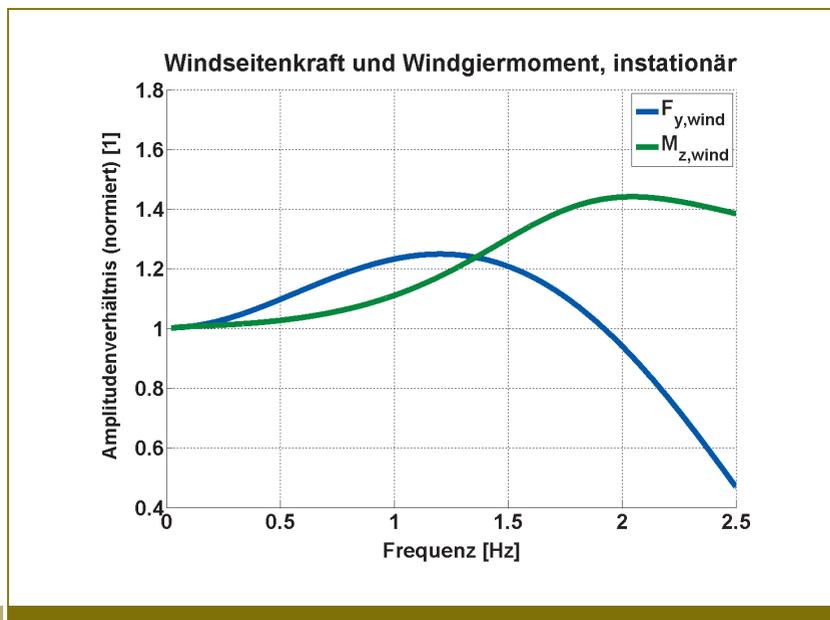


07

Böen-Generator im  
IVK Modellwindkanal.

profile werden synchron von Elektromotoren angetrieben, wodurch die Strömung zur einen oder zur anderen Seite ausgelenkt und eine nahezu beliebige Windanregung erzeugt werden kann (07).

Werden die Elektromotoren etwa mit einem stochastischen Signal angesteuert, welches vom Frequenzinhalt her der Charakteristik von natürlichem Seitenwind entspricht, so stellt man fest, dass die entstehenden aerodynamischen Kräfte und Momente eine Eigendynamik aufweisen, [4]. Bei schnell wechselnden Anströmverhältnissen werden im Mittel höhere Windseitenkräfte und Windgiermomente erreicht als bei



08

Beispielhafter Verlauf von  
Windseitenkraft und Windgiermoment  
über der Anregungsfrequenz bezogen  
auf den stationären Messwert.

Seitenwind, der konstant aus einer Richtung kommt (08).

Diese Frequenzabhängigkeit der Windkräfte und -momente wird in der heutigen Fahrzeugentwicklung noch in keiner Weise berücksichtigt. Mit Hilfe des dargestellten Böen-Generators lassen sich solche instationären aerodynamischen Effekte jedoch bestimmen und nahtlos in eine ganzheitliche Betrachtungsweise der Fahrzeugdynamik einbeziehen. So können diese Ergebnisse etwa direkt in das weiter oben beschriebene Verfahren zur Vorhersage und Bewertung des Seitenwindverhaltens einfließen. Hierzu wird das Fahrzeugmodell um die Beschreibung der frequenzabhängigen Windkräfte und -momente ergänzt. Ist man nun in der Lage, diese durch geeignete aerodynamische Maßnahmen zu verringern, so verringert sich die Gesamtreaktion des Systems Fahrer-Fahrzeug im entsprechenden Frequenzbereich ebenfalls (09). Dies wirkt sich positiv auf das subjektive Fahrerurteil aus, selbst dann wenn der Stationärwert, also bei 0 Hz, nicht verändert wird. Die Betrachtung der instationären Aerodynamik eröffnet somit Potenziale, die mit den klassischen Werkzeugen der Aerodynamikentwicklung bisher nicht ausgeschöpft werden konnten.

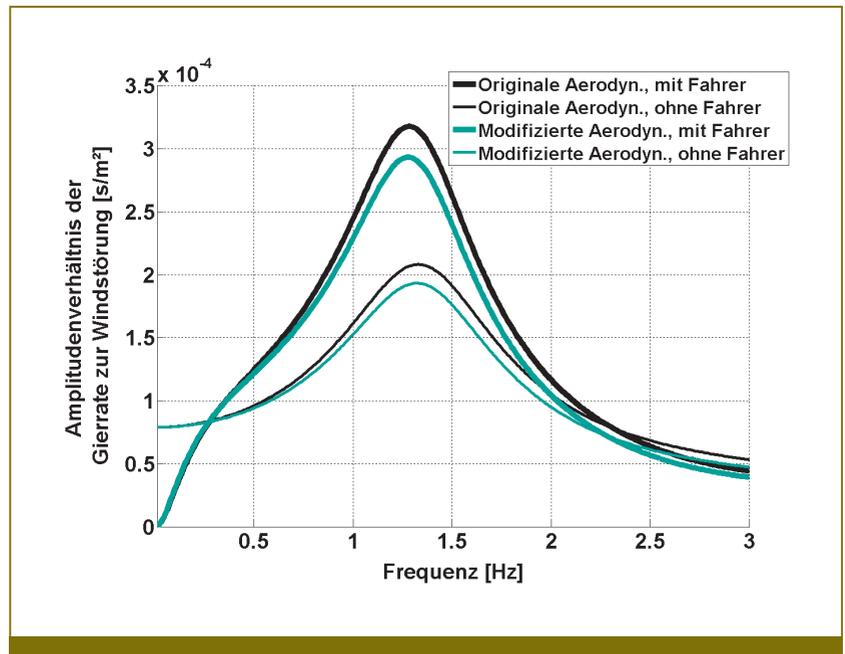
Die gezeigten Beispiele machen deutlich, dass eine disziplinenübergreifende, ganzheitliche Betrachtung der Fahrzeugdynamik, insbesondere unter Einbezug des Fahrers und seiner subjektiven Beurteilung, in der Fahrzeugentwicklung neue Wege eröffnen kann. Im Hinblick auf das Seitenwindverhalten von Fahrzeugen ist bereits heute eine durchgängige simulative Untersuchung und Bewertung des Systems Fahrer-Fahrzeug möglich. Wie gesagt stellt das Fahren unter Seitenwind allerdings nur eine von vielen Fahrsituation dar, die im Rahmen der Entwicklung der Fahrzeugdynamik zu berücksichtigen sind. Eine Übertragbarkeit der gefundenen Zusammenhänge auf andere Fahrsituationen wie etwa einer Fahrt auf unebener Fahrbahn, kurviger Fahrbahnverlauf etc. ist nicht ohne weiteres gegeben. Hierfür müssen erweiterte Simulations- und Bewertungsansätze gefunden werden.

Neben der Untersuchung des realen Systems Fahrer-Fahrzeug kommt hierfür auch die Nutzung eines leistungsfähigen Fahrersimulators mit Bewegungssimulation in Betracht, wie er am IVK/FKFS gerade entsteht. Hiermit sind zahlreiche Vorteile wie

beispielsweise hohe Verfügbarkeit, schnelle Erzeugung von Varianten oder Wetterunabhängigkeit der Fahrversuche verbunden. Tatsächlich kann ein Fahr Simulator im Hinblick auf die Fahrzeugentwicklung auf verschiedenen Ebenen zum Einsatz kommen. Zunächst kann etwa das reale System Fahrer-Fahrzeug durch die Kombination aus realem Fahrer und simuliertem Fahrzeug ersetzt werden. Bereits mit dieser Konfiguration können Veränderungen am Fahrzeug oder die Auswirkungen aktiver System auf das subjektive Fahrerempfinden untersucht und bewertet werden. In einem weiteren Schritt kann dann, analog zum Vorgehen hinsichtlich Seitenwind, versucht werden, den realen durch einen virtuellen Fahrer zu ersetzen. Hierdurch lassen sich dann wieder Aussagen machen, ohne dass physische Tests erforderlich werden. Für die Praxis wäre dann ein mögliches Szenario, dass in einem sehr frühen Stadium der Fahrzeugentwicklung rein simulative Ansätze Verwendung finden, um grundlegende Aussagen zu liefern.

Im fortschreitenden Entwicklungsprozess folgen dann Untersuchungen im Fahr Simulator und zuletzt, im Sinne eines letzten Feinschliffs, im realen Fahrzeug. Die Geschwindigkeit dieser Entwicklung hin zum digitalen Entwicklungsprozess unter Einbezug menschlichen Verhaltens lässt sich nicht genau vorhersagen, da aus heutiger Sicht noch zahlreiche Probleme zu lösen sind. Das Potenzial ist jedoch so groß, dass am IVK/FKFS auf jeden Fall weiter in diese Richtung geforscht werden wird. •

*Jochen Wiedemann, David Schröck  
und Werner Krantz*



*Einfluss einer Verbesserung der instationären Aerodynamik auf die Gierreaktion des Systems Fahrer-Fahrzeug.*

#### Literatur

- [1] Macadam, C.C.: Understanding and modeling the human driver. *Vehicle System Dynamics* 40 (2003) 1-3, pp. 101-134
- [2] Wagner A.: Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung des Fahrerhaltens bei Seitenwind. Dissertation, Universität Stuttgart, 2003
- [3] Keppler, D., Rau, M., Ammon, D., Kalkkuhl, J., Suissa, A., Walter, M., Maack, L., Hilf, K.-D., Däsch, C.: Realisierung einer Seitenwind-Assistenzfunktion für PKW. 11. Braunschweiger Symposium AAET, Braunschweig, 2010
- [4] Schröck, D., Krantz, W., Widdecke, N., Wiedemann, J.: Instationäre aerodynamische Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind. Haus der Technik, München, 2010

## DIE AUTOREN



### PROF. DR.-ING. JOCHEN WIEDEMANN

1972-1977 Studium des Allgemeinen Maschinenbaus an der Ruhr-Universität, Bochum. 1977-1978 Stipendium des Bundesministers der Verteidigung. Diploma Course am von Karman Institute for Fluid Dynamics in Rhode St. Genèse, Belgien. Abschluss mit VKI Diploma. 1978-1983 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermo- und Fluidodynamik der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Strömungslehre bei Prof. Dr.-Ing. K. Gersten. Juli 1983 Promotion zum Dr.-Ing. mit einer Dissertation zum Thema: „Einfluss von Ausblasen und Absaugen an durchlässigen Wänden auf Strömungen bei hohen Reynoldszahlen“. 1984 Eintritt in die AUDI AG, Abteilung Karosserietechnik/Aerodynamik. Aerodynamische und aeroakustische Entwicklung aller Baureihen. 1995- Juni 1998 Mitglied des Managements. Projektleiter für das Audi Windkanalzentrum bestehend aus Aero-Akustik Windkanal und Thermo-Windkanal. Juli 1998 Berufung als Leiter des Lehrstuhls Kraftfahrwesen am Institut für Verbrennungsmotoren und

Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart und Mitglied des Vorstands der Gemeinnützigen Stiftung FKFS (Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart). 2002 auf Beschluss der wissenschaftlichen Kommission des Chinesisch Deutschen Hochschul Kollegs (CDHK) der Tongji-Universität Shanghai Ernennung zum Professor des CDHK. 2009 Verleihung des Magnolia Silver Award der Stadt Shanghai für Verdienste um die soziale und wirtschaftliche Entwicklung Shanghais.



### DIPL.-ING. DAVID SCHRÖCK

studierte Maschinenwesen an der Universität Karlsruhe (TH) und der Universität Stuttgart. Von April 2005 bis März 2010 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Fahrzeugaerodynamik und Thermomanagement am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren (FKFS). Seit April 2010 ist er als Projektleiter im Windkanal am FKFS tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf dem Gebiet der instationären Aerodynamik.



### DIPL.-ING. WERNER KRANTZ

studierte Maschinenwesen an der Universität Stuttgart. Von Februar 1999 bis August 2003 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Seit September 2003 ist er am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart tätig. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf der Modellierung des Systems Fahrer-Fahrzeug sowie auf der Korrelation zwischen objektivem Fahrzeugverhalten und subjektiven Fahrerempfinden.

#### Kontakt

Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen  
 Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart  
 Tel. 0711/685-65601, Fax 0711/685-65632  
 E-Mail: [info@ivk.uni-stuttgart.de](mailto:info@ivk.uni-stuttgart.de), Internet: [www.ivk.uni-stuttgart.de](http://www.ivk.uni-stuttgart.de)

# The Learning Vehicle

**A virtual co-driver as trip companion?**



The self-learning route memory is a method for the automatic generation and continuous updating of a vehicle internal database containing information about road characteristics of a frequently driven route. In the following sections the function and the idea behind the “learning vehicle” together with a possible application – the virtual co-driver – will be described.

## 1. Targets for sustainable mobility

An efficient and flexible transport system is crucial for our economy and way of life, and as a result we see the number of vehicles sharing our roads increasing. This leads to a substantial and ever growing threat to our environment and the social and economic systems. To reach the worldwide targets of increased mileage, reduced pollution from the transport sector, and improved road safety, it is no longer sufficient only to look at improve-

ments regarding vehicle construction, i.e. engine and transmission technology, aerodynamics, lightweight material, and tire technology. Instead, also the operation of the vehicle has to be optimized; investigations have shown that the driver influences the fuel consumption with up to 50 percent. The average driver needs support and guiding to be able to operate the vehicle in an optimal way, both regarding safety and energy consumption. The above mentioned targets are also of prime importance for the OEMs as, aside from emission

legislation, high fuel efficiency, low emissions, and high safety standards are important sales arguments. Fulfilling these targets also moves the transport sector a step further towards a sustainable mobility.

Ever since ABS became available in the end of the seventies, a variety of assistance and vehicle control systems have been introduced. Several studies show that the already impressive function of many of the existing assistance systems is further improved with preview information, i.e. information about the characteristics of the road ahead. Examples are predictive gear shifting, predictive energy management, curve speed warning, and improved object tracking for better reliability of the adaptive cruise control to mention a few. A number of systems using predictive control has been proposed and developed, but so far not widely spread as the required preview information is not yet available.

With relevant information about the expected road and traffic regulatory characteristics the performance of electric (EV) and hybrid-electric (HEV) vehicles can be greatly improved. For these propulsion techniques the potential of preview information is logically even higher than for conventional propulsion systems. As the available cruising range is often pointed out as the main drawback and limitation of electric vehicles, an optimization here might help to improve the acceptance and to introduce these vehicles as a real alternative to conventional vehicles.

A further important benefit of predictive vehicle operation is also the possibility to systematically improve both component performance and lifetime. Based on the knowledge about the characteristics of the driven route, the load of various vehicle components can be controlled better to “spare” critical components, e.g. batteries. As a concrete example of the use of preview information, a contemporary issue is used to illustrate the benefits: The interest for introducing hybrid-electric busses for the local public transport is currently growing. Clearly, these busses are predestinated for preview information supplied by a learning system – the route is defined and the vehicles travel the same route over and over again. In this way not only the fuel efficiency, but also the environmental impacts such as noise and emissions can be improved.

## 2. Predictive driving

If the driver knows the road he is driving, he can use this memorized (i.e. preview) information together with the current or assumed activities of the other traffic participants to control the vehicle in a more predictive manner for improved safety and fuel economy. One of the greatest potentials for fuel savings lies in the avoidance of unnecessary acceleration and brake actuation and to keep the combustion engine in an optimal operating point. These actions are typical for so called “Eco Driving“, which is a specialized form of predictive driving. Generally, a predictive driving style is characterized through a rather defensive but very active way of driving.

A predictive driving style is however very tedious for the driver as it needs a lot of concentration and physical activity (mainly thinking and shifting!). It is therefore not realistic to expect this driving style from the driver at all times. But, by providing the driver with information about the upcoming road and traffic situations for a preview horizon extending the visual horizon, the driver is allowed more time to react and plan his driving. This information could also be given in form of a recommendation for a suitable control action via some adequate interface, i.e. optic, acoustic, or haptic.

### SUMMARY

*An efficient and flexible transport system has become crucial for our economic system and way of life. The current (intra-continental) transport system shows a substantial and ever growing threat to the environment and to our health. This article contributes with an alternative method for supplying various assistance and vehicle control systems with the preview information required for predictive driving strategies. Not only the fuel efficiency but also the function of comfort and safety systems can be greatly improved by information about the upcoming road, e.g. optimized gear shifting strategies, energy management in hybrid-electric and electric vehicles, curve light, and curve speed warning. The approach bases on the fact that many vehicles are repeatedly driven the same routes, e.g. every day to and from work. The system automatically identifies relevant driving situations and road characteristics along the road, describes these with a small number of attributes, and stores them in a vehicle internal database. The situation identification algorithms only require information from standard sensors fitted for the basic engine and drive train control and the vehicle stability system. By comparing newly identified situation descriptions with descriptions from earlier drives, the database is continuously extended and updated during each drive. The prototype implementation of the system in a driving simulator as well in a test vehicle realized with the special application „virtual co-driver“ has shown positive results during testing.*

## 2.1 Evolving assistance systems

As a result of the set targets for cleaner and safer transport, a lot of effort has been put into the research and development of driver assistance systems. A number of innovative functions, that just a couple of years ago seemed pioneering and futuristic, have today become more or less standard systems in many vehicle classes. These functions have, due to their considerable benefits, moved from being systems only available in upper class vehicles to be available also in the mid- and small class vehicle segment. This trend is also obvious within the (goods) transport sector.

Assistance systems can be divided into two main categories; active and passive systems. Active systems are directly controlling the vehicle operation, while passive systems are rather of informing, guiding or warning nature, partly leaving the final decision of action to the driver. Examples of systems in the safety and comfort categories are adaptive cruise control (ACC), lane departure warning (LDW), advanced front lighting (AFL), electronic stability, and curve speed warning. For energy purposes systems for intelligent gear selection can be mentioned. Typical for these systems is that their functionality usually bases on information from additional sensors installed in the vehicle and dedicated for each particular system. These sensors typically scan the vehicle's surrounding and together with information of the current vehicle state the systems can react appropriately.

Preview information provides a further basis for the decision-making in the control algorithms. Thus the control can be optimized with regard to the characteristics of the upcoming road, e.g. to turn the headlights before curve entrance, to select an appropriate gear depending on the road gradient, or to inform the driver about changing speed limits well in advance. The benefits of the extended functionality of the assistance systems, especially the ones regarding energy management, are currently thoroughly investigated. With suitable research platforms they can be analyzed in a qualitative as well as quantitative way. On the one hand, the focus is put on systems that influence the energy consumption directly by controlling the power train and the onboard electrical system. Examples are intelligent strategies

for gear selection or the control of the auxiliary consumers based on the actual and future demand. On the other hand, driver assistance and driver information systems, which indirectly lead to a reduction in energy use by supporting the driver to an energetically intelligent operation of the vehicle, are of particular interest.

## 2.2 Provision of preview information

The required preview information is usually assumed to be available either from enhanced digital maps or through communication with infrastructure or other vehicles. However, a great amount of this information is still lacking. The available in-vehicle sensors for scanning the nearest vehicle surrounding, e.g. cameras, radar, and laser, are still too expensive for use throughout all vehicle segments. Furthermore, the electronic horizon offered by the sensors' coverage range is limited and for many applications too short. A digital map offers a theoretically unlimited electronic horizon, but the digital maps available today do not contain the required information at all or with too little accuracy. The updating of the maps is also expensive and currently not frequent enough. Finally, the mentioned communication systems for information exchange (car-to-car, car-to-infrastructure) are dependent on a broad distribution or major (governmental) investments in the infrastructure for a proper functionality.

The *learning vehicle* offers an alternative approach for the provision of the required preview information. The system allows individual vehicles to "memorize" or to "learn" the characteristics of a driven route through repeated drives – just as an observant driver would do. With a *self-learning route memory* a database containing the required preview information of a frequently driven route can be automatically generated and continually updated in the vehicle during each drive. This approach bases on two facts: the travel behavior and the sensor infrastructure of the vehicles. It is a fact that most vehicles are moved on a very limited part of the road network, which is true not only for commuter, public transport, and commercial vehicles, but also for private traffic. It is also a fact that most vehicles are equipped with the necessary sensors for the required situati-

on detection algorithms, originally fitted for other purposes though. The aim is to generate a continuous up-to-date digital picture of the currently driven road.

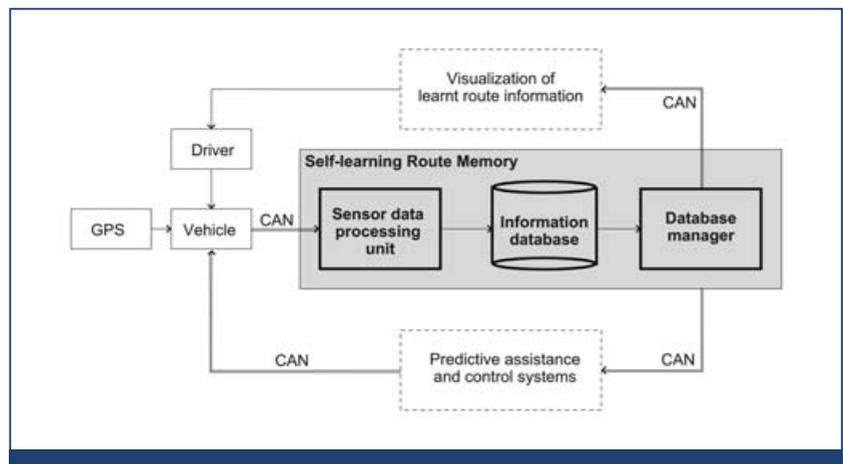
### 2.3 Advantages of self-learning

The „learning vehicle”-approach for collecting and managing the valuable preview information claims to be both cheaper and more flexible than other systems of this kind. One reason for this is that only sensors counting to the standard equipment in most modern vehicles are needed for the situation detection algorithms. Thus no further costs arise due to costly hardware (e.g. camera, radar). In contrast to digital maps that contain fairly basic information for a large geographical area, the route memory system will contain highly detailed information but for a small geographical area; the part of the road network where the vehicle is primarily moved. The proposed method is not dependent on road infrastructure or the system’s distribution in other vehicles, as is the case with the mentioned communication systems. With this method, the amount and type of data to be stored are limited to the truly relevant information for a particular vehicle/driver combination.

## 3. The learning vehicle

### 3.1 System setup

The relations between the system’s key processes are illustrated in **01**. The route memory system is connected to the vehicle via the real vehicle CAN network and has the ability to both receive and send data. During the drive data from various sensors, e.g. yaw rate, acceleration, and engine speed provide information about the vehicle’s movements and actual state. This data indirectly provide information about the characteristics of the driven road as well as the driver activity. The sensor data are analyzed online to identify relevant road properties, such as slopes, curves or speed limit changes. The identification algorithms are based on pattern recognition methods extracting and categorizing typical features of the data stream indicating a certain road property. With a positioning system each identified situation is also associated with a geographical position along the driven route. Each set of data



*Schematic illustration of the system setup for the prototype implementation of the self-learning route memory.*

specifying an identified situation is simplified and intelligently compressed to reduce the amount of data to be stored. The target is to describe each category, e.g. curves, with a simple set of parameters. The descriptions of the identified road properties are written to a vehicle individual on-board database and are thus available as preview information during the next drive along the same route. Based on their category and geographical position along the route, each recognized road property or situation is used to update, improve, and verify the description of earlier entries for this property already existing in the database. Finally, the database manager unit selects plausible situation information from the database and provides various assistance, control, or information systems in the vehicle with up-to-date predictive route information.

### 3.2 Situation detection

Today vehicles in all model ranges are equipped with a number of sensors necessary for the basic functionality of the vehicle, mainly for engine and transmission control, but ever more often also for passive and active safety as well as vehicle stability. One of the goals with this project was to use the unutilized potential of all these sensors and add functionality to the vehicle without adding further complexity through more sensors. Data analyses have shown that a number of situations relevant for predictive driving strategies can be identified using only the information already available in most of our vehicles – when combined in a proper way. This means that a number of already integrated sensors get a second use.

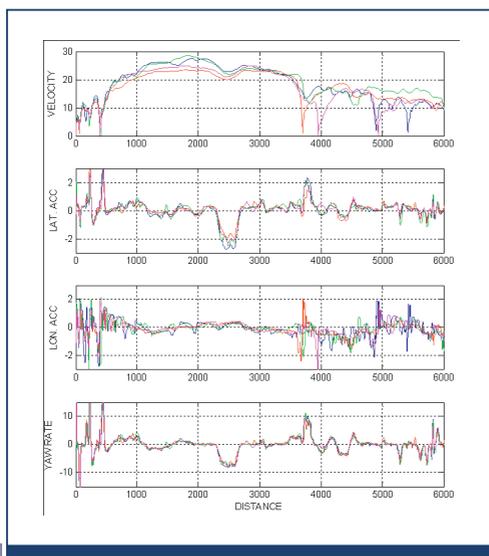
System	Signal	Situation identification
ABS	Wheel speed	Curve, Stop, Slope, Speed
ESC	Yaw rate	Curve
	Lateral acceleration	Curve
	Steering wheel angle	Curve
	Steering wheel angle velocity	Curve
Power train control	Engine speed	Slope, Stop
	Engine torque	Slope
	Clutch activation	Stop, Slope
	Brake pressure	Stop, Speed, Slope
	Accelerator pedal pressure	Stop, Speed
Navigation system	Geographical position	All
Clock	Date, Time	All

TO1

Minimum requirement of sensors and their original and potential use.

The only additional “sensor” not yet counting as standard equipment but necessary for the learning system is a positioning system for defining the geographical position of the identified situations. This requirement does not imply a critical shortcoming of the system looking at the increased availability of portable navigation devices today. The used sensors, their original designation, and the possible extended use are listed in **TO1**. With this minimum requirement and an intelligent numeric combination of the available signals, situations such as curves, slopes, speed limits, or stopping positions (i.e. traffic light or intersection) can be identified.

**02** shows some selected sensor signals from a number of independent test drive sessions along the same road section. The measurements show a high degree of conformity across the different drives even though they were conducted with different drivers at slightly different day times. This conformity is partly a result of the limited possibility to freely select speed and driving style due to applicable traffic regulations and other traffic participants. Consequently, with a statistical approach and pattern recognition methods it is possible to identify the characteristics



02

Selected sensor signals measured during four different drive sessions.

of the road and traffic conditions with a relatively high confidence.

The available sensor data are analyzed online in the vehicle during the drive and the features of each situation are recognized “on-the-fly”. Also, the filtered or derived versions of the measurement data can be used when the relative time delay due to filtering is accounted for by the evaluation. Pre-set limits defining each event are used as “flags” for starting and stopping the recording of the measurement data.

The curvature of the driven route can be determined directly with information from the yaw rate sensor together with the vehicle velocity. A curve is identified where the pre-defined values for minimum curvature and length are fulfilled, see **03**. These values are set to be velocity dependent to allow the identification of both long curves with large radius at high speed (typically freeway) and short curves with small radius at lower speed as often the case in urban areas.

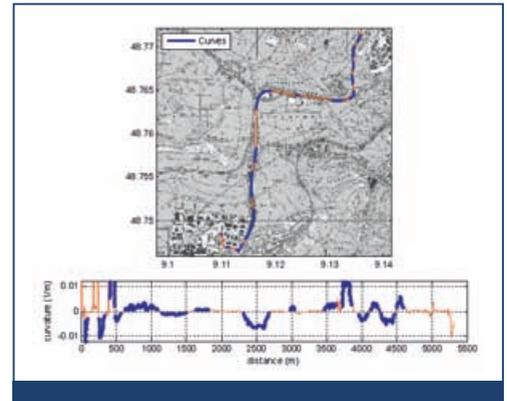
The easiest way of determining the longitudinal road gradient is with a high-resolution longitudinal acceleration sensor. As such sensors are usually not available as standard, methods based on e.g. estimations of vehicle output torque and vehicle acceleration, or observers of the road gradient must be used. In this case a method based on the vehicle output torque has shown functional. The selected method uses the engine output torque and road load to solve the equation of motion of the vehicle in the longitudinal direction, where the road load is the sum of the familiar driving resistances; rolling resistance, aerodynamic drag, and acceleration resistance.

The speed limit identification is a bit more complicated. First of all it must be decided if the identified speed should represent the valid speed limit as regulated by law or the speed selected by the driver based on his personal preferences or perhaps the traffic density. Without sensors identifying road signs, only an estimation of the speed limit can be made. Measurement data show larger velocity variations on freeways compared to urban roads, caused by the individual drivers, the traffic density as well as the traffic regulations. Therefore the speed limit identification algorithm needs to include both driver type (e.g. sportive, normal, or defensive) and road type classifications.

### 3.3 The memory concept

Each identified situation is described with a fixed set of parameters based on the situation category. Some of the attributes are common for all types of situations, others apply only for a specific situation type. The fields required for each situation category are illustrated in **TO2**. The format of the content of the field “Magnitude” is different depending on category. For curves and slopes, this field contains the specification of an approximation function and its coefficients. For speed and traffic light information on the other hand, a single value for velocity or standstill duration is sufficient. Additional to the geographical position, each identified situation is also stored with information about date and time. Especially for non-static situations, such as speed limits and stopping situations, this is important to be able to take time-dependent variations into account, e.g. traffic density. The field ID is important for reference purposes, to be able to associate each identified situation with the correct route. The routes can for example be denoted as “home-workplace” or “home-supermarket”. Similar fields as for the situation descriptions are used to specify each route, as shown in the last column in **TO2**. The route counter holds information about the number of times a certain route was driven and is used for plausibility checks. An identified situation is initially described through the extracted data features and

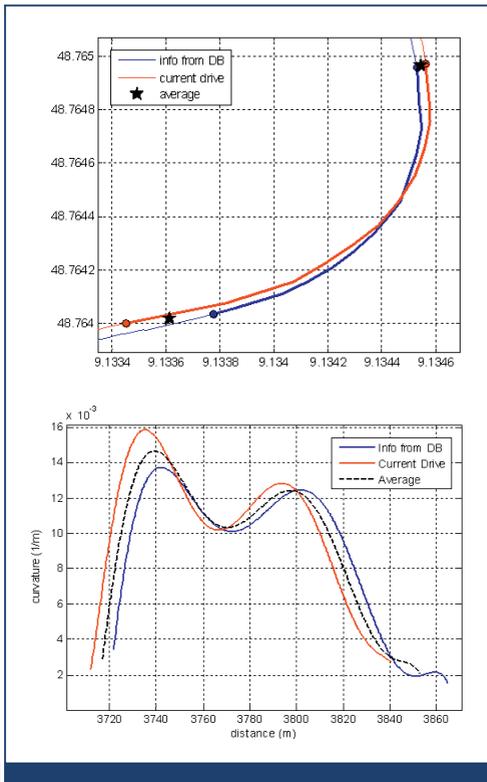
the position information. For example, the trace of a curve is specified with the geographical coordinates for the beginning and end positions together with the measured curvature. The gradient of a slope is described similarly, only with road gradient as specific magnitude. Unless this data is highly compressed the storage of the data would not be practicable, both with regard to storage and communication capacity. To achieve this, the measurement values for curvature and gradient are approximated with a (continuous) mathematical model. By means of curve fitting methods, a series of data points and possible other constraints can be described with a finite number of parameters, i.e. the coefficients of the approximating function. Firstly, an approximating model that relates the response data to the predicted data with one or more coefficients must be selected. The result of the fitting process is then an estimation of the unknown model parameters. These coefficients are obtained by using the least square method to minimize the squared sum of the residuals. The challenge, however, is not the solution of the resulting (over determined) equation system but the selection of an appropriate function model and its degree.



Graphical representation of the identified curvature of a driven path.

Fields	Situation Category				
	Curve	Slope	Speed	Traffic light	Route
Identity number (ID)	x	x	x	x	x
Geo. Coord. Beginning	x	x	x	x	x
Geo. Coord. End	x	x	x		x
Date	x	x	x	x	x
Time	x	x	x	x	x
Length	x	x	x		x
Heading	x				
Magnitude	Approx. Function + Coefficients	Approx. Function + Coefficients	Velocity	Duration	
Counter					x

Matrix showing the fields required for the description of each situation category.



04 Illustration of situation description comparison and data update.

Based on the knowledge about the origin of the sample data and statistical analyses, an iterative algorithm for the computerized selection of an adequate model and its degree has been developed. As a result, it can be shown that the curvature and the gradient can be sufficiently approximated with e.g. a linear model up to degree six. According to the above, each identified situation is specified with a finite (and relatively small) number of parameters before it is stored in the vehicle internal database. The situation descriptions are classified into single- or multi-valued quantities depending on the situation category; curvature or road gradient are due to the approximation function de-

noted as multi-valued quantities while speed limit and standing duration are single-valued quantities. As a consequence, also the memory requirement for the two categories is different: multi-valued situation descriptions require approximately 69 byte compared to the 12 byte required for single-valued descriptions.

The implemented database structure, i.e. the memory of the learning vehicle, has been configured to contain several separate situation descriptions of various categories for one specific route, as well as a number of different routes; one single route can contain many situations of various categories, as well as one specific situation can appear in more than one of the stored routes (in case some sections of the routes coincide). In this way, each situation description will exist only once in the database, but can still be associated with several routes. The information about the connection between situations and routes are tracked with IDs and stored separately in the memory together with information such as situation category, driven distance from route begin, and validity information. In comparison to an ordinary navigation system where the complete route trace is available, the parameter “driven distance from route begin” is necessary for this

method to be able to sequentially order the individual situations along the route. The described parameters and configuration serve for a clear structure and improved search performance of the database.

### 3.4 The learning process

All situations that are recognized during a drive are used to keep the database up to date and to improve the accuracy of the route characteristics recorded during previous drives. This is hence denoted as the *learning* process of the route memory system.

For the updating, the description of each situation identified during a drive is compared with similar situations in the database. As soon as a situation is recognized and completely recorded during a drive, a search algorithm is initiated to find all comparable events in the memory. The selection criteria are geographical position and situation category. Similar situation descriptions are extracted and a comparison algorithm is initiated. The newly recorded situation is individually compared with the extracted data. Depending on the outcome, the extracted data can be changed according to the new information. If no corresponding entries are found, or if the compared descriptions do not match, the new situation is added to the memory unit as a new event along the current route. For multi-valued situation descriptions the correlation coefficient between the two sets of (approximated) data is used as a measure for correspondence. Otherwise, the data values can be directly compared. For time-variant situations (i.e. traffic flow control) also the recorded daytime and week-day are taken into account by the comparison. This is done to differentiate between information collected during e.g. rush-hour and times with lower traffic density.

When the compared situation descriptions coincide within the tolerances, these two data sets must be combined into one. This is done with a weighted arithmetic mean to successively improve the description of the road features. Additionally, also a counter holding information about the number of times a certain situation was recognized is incremented. Finally the date and time information for the situation identification and database update is adju-

sted. For each drive along a certain route the route specific properties are modified if necessary, i.e. the counter parameter and date and time information.

Unlike the situation identification algorithms, which must be performed in real-time to avoid too large memory requirements, the comparison and update algorithms are not time critical during the current drive. This evaluation is, however, performed during the drive as well, but as a parallel process to leave the main CPU time for the situation detection algorithms. This basically means that the database is updated while waiting for the next situation to occur, i.e. on a straight leveled road section.

### 3.5 Situation selection

The identified, modified, and stored route information is now available as preview information during following drives. A selection algorithm is responsible for selecting correctly identified and learnt route information from the on-board memory and for passing this information on to various assistance, control, or information systems in the vehicle. By the selection the plausibility of the data is verified based on the counter values of the selected situation and its corresponding route. Depending on the target system, i.e. the intended use of the preview data, the amount and format of the retrieved information need to be customized. The required amount of data can be divided into three levels: a *simple* situation description (level 1), a *single* situation description (level 2), and *multiple* situation descriptions (level 3). A system for optimized gear selection or energy management in a hybrid-electric vehicle requires precise information about all upcoming slopes, speed limits, curves, stopping positions, etc. for the next 2-5 km to be able to make the necessary decisions, i.e. level 3. A curve light system only needs precise information about the next upcoming curve, i.e. level 2. The situation description for a driver information system on the other hand, must be reduced to an absolute minimum to prevent a driver information overload, hence level 1, containing only information about e.g. situation type and remaining distance, is sufficient.

Regularly obsolete entries are removed and separate situation descriptions that mutually (and coincidentally) approach each



Implementation of the "virtual co-driver" in a static driving simulator for functional testing.

other due to the successive updating are merged. This is important to always ensure free memory capacity and to improve query time and search algorithms.

## 4. System Realization

A prototype of the self-learning route memory presented here is implemented in C++-code featuring a direct interface for reading the CAN-bus of the host vehicle. The identified road characteristics are stored in a database based on MySQL. For the communication between the route memory system and for example a driving strategy unit, an interface for Ethernet communication has been implemented. The ambition is to develop a system capable of real-time application and independent of platform. The development of the system algorithms, in particular the algorithms for the situation detection, bases on real measurement data collected during test drives over several thousands of kilometers.

One possible application for the learning system is for the display of route information in order to inform the driver about special situations ahead; for example, a changed speed limit or a narrow curve. Such information can help the driver to decelerate appropriately, i.e. optimized regarding energy, safety, and comfort. Well-timed information about the grade of upcoming slopes is useful especially for heavy vehicles in order to select the optimum gear.

### 4.1 Driving simulator

As a first step towards implementation in a real vehicle, a *virtual co-driver* has been rea-

lized in a real-time driving simulator. This is a convenient step in order to functionally test and optimize the software under realistic conditions. One major challenge within the development of situation detection algorithms is the variety of drivers and driving styles. An example is the infinite number of possible trajectories for driving through a certain curve in the road. A further example is the continuously changing vehicle speed. For such a learning system it is important that the situation detection is performed in a robust and deterministic manner. A driving simulator is a cost-efficient and time saving tool for the verification and optimization of situation detection algorithms because it allows quick variations of the test tracks or vehicle parameters in a safe and reproducible environment. Hence it is possible to evaluate the identification algorithms and assistance systems even in driving conditions close to the physical limits or under other unfavorable conditions.

The static driving simulator used for this implementation features a stereoscopic surround projection of the driving scene on three screens. A vehicle mockup is installed in the center of this projection facility. The mockup is equipped with a seat, pedals, a gear shift lever, and a high-performance force-feedback steering wheel drive. The steering drive enables dynamic feedback of the steering torque to the “driver” and hence a realistic feeling. The heart of the simulation is a vehicle dynamics model which calculates the motion of the vehicle body, the chassis, and the wheels using a multi-body system (MBS) approach. For realistic behavior of the interactive driving simulation it has to be ensured that the output of the vehicle simulation model is plausible in all imaginable driving states, e.g. in high-speed cornering on road surfaces with low friction coefficient or in reverse driving situations. The used model contains a fully nonlinear tire/surface model which covers all possible combinations of longitudinal slip, side slip, and vertical forces. The driving simulator is equipped with “virtual sensors”, which calculate the longitudinal and lateral accelerations, yaw rate, position information (GPS emulator) as well as other sensor signals. This information is transmitted to the virtual co-driver via a real CAN network with communication parameters identical with an existing vehicle. This setup ensures that

the virtual co-driver can be easily transferred from the driving simulator environment into a real test vehicle.

A short-coming of the static driving simulator is the lack of motion for a realistic reproduction of the real driver environment. This often results in motion sickness due to the discrepancy between the motions insinuated through the graphics and lack of motions actually perceived by the driver. Hence such a simulator is not appropriate for investigating driver activity, system acceptance issues, or the actual potential of developed systems. To be able to investigate these topics, a large dynamic driving simulator is currently under construction at the University of Stuttgart. This simulator is technically and systematically seen as an extension of the static simulator. The simulation setup is similar, only that the calculated motions of the vehicle body are transmitted to a powerful motion system translating these signals into real movements exerted on a platform. On the platform a real vehicle is installed compared to the vehicle mockup in the static driving simulator. The real vehicle increases the impression of reality by the test drivers and it also allows the evaluation of the tested system in the original vehicle environment, with the original control and display interfaces.

#### 4.2 Real vehicle

The implemented configuration and setup of the virtual co-driver, as a special use of the learning system, allows an easy transfer to a real vehicle. A prototype of the co-driver for the use in a real vehicle has been realized on a Car-PC featuring hard- and software interfaces for a direct communication with the vehicle CAN. This permits an easy logging of the relevant sensor values for the situation identification algorithms. For the vehicle implementation also an alternative communication interface over Ethernet has been realized. In the prototype system this data format is preferred over standard CAN-communication because of the amount of data that needs to be transferred during the system verification process. This alternative communication method is available as the complete control strategy of the test vehicle is realized on an advanced rapid prototyping system offering the most common data and communication interfaces.

The various algorithms of the learning system have hence been subject to verification and validation tests under real driving conditions, in real traffic situations with real drivers. The results of these test drives are highly satisfactory.

## 5. ... and then?

To achieve the worldwide goals for reduced emissions from the traffic and less severe and fatal accidents on our roads a wide-spread adoption of systems for predictive driving is necessary. This can only be achieved if the systems are cheap, immediately available, easy to implement, reliable, and highly beneficial from the first system on the market. The main problem for a wide-spread use of such systems is currently the lack of the required preview information. The system introduced in this article presents an alternative solution of this problem.

However, the preview information is rather useless unless the route can be predicted. A simple route prediction algorithm as implemented for the virtual co-driver takes parameters such as day time, day, driver, situation sequence, etc. into account to determine which route the vehicle is traveling. Only based on this prediction, the correct preview information can be supplied. However, also the smallest deviation from the main route, e.g. a detour to the gas station or for picking someone up, would in this case distort the positioning of the situation prediction.

Today, there exist only a few observations for realized route selection prediction systems as route prediction is a complex topic. Especially within the research around traffic flow management route prediction is handled as a separate topic. Further, the proposed system shows a minimum requirement of sensors. Of course, the more sensors available, the more situations can be detected with higher precision. As a further improvement of the system, a data sharing system providing an interface for the exchange of collected route information would add functionality to the method. Hence each individual database can be filled and updated quicker – which is relevant especially for vehicle fleets.

Thus, the current state is far from the final destination but the first step is made. As a conclusion, predictive road information is required to achieve the desired improve-

ments in direct controlling of the vehicle systems and driver support for an optimized vehicle operation. Consequently, there is an increasing demand for an alternative approach for the provision of the necessary preview information that meets the conditions mentioned above. •

*Anne Piegsa und Hans-Christian Reuss*

## Acknowledgement

This work has evolved through funding from two foundations; the Geschwister-Heine Foundation, Fellbach, and the Friedrich-und-Elisabeth-Boysen Foundation, Stuttgart.

## References

- Back, M., “Praediktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen“, PhD Thesis, University of Karlsruhe, Germany, 2005.
- Dorrer, C., “Effizienzbestimmung von Fahrweisen und Fahrerassistenz zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs unter Nutzung von telematischen Informationen“, PhD Thesis, University of Stuttgart, Germany, 2003.
- Grein, F.G.; Wiedemann, J., “Prospects of foresight in driver assistance systems”, 5th International Stuttgart Symposium. Expert-Verlag Renningen-Malmsheim, p. 628-642, 2003.
- Abel, B.; Labahn, N., “Praedikative Steuerung dynamischen Kurvenlichtsysteme”, VDI-Bericht: Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Verlag Duesseldorf, no. 1547, 2000.
- Schraut, M., “Umgebungserfassung auf Basis lernender digitaler Karten zur vorausschauenden Konditionierung von Fahrerassistenzsystemen“, PhD Thesis. University of Munich, Germany, 2000.
- Carlsson, A.; Baumann, G.; Reuss, H.-C., “Implementation of a Self-Learning Route Memory for Forward-Looking Driving”, SAE World Congress. Detroit, USA, 2008.
- Riemer, T.; Mauk, T.; Reuss, H.-C., “Determination of saving potential for a parallelhybrid powertrain using preview information”, 8th International Stuttgart Symposium. Stuttgart, Germany, 2008
- Carlsson, A.; “A system for the provision and management of route characteristic information to facilitate predictive driving strategies”, PhD Thesis, Universität Stuttgart, Germany, 2008

## THE AUTHORS

**DR.-ING. ANNE PIEGSA**

*is employed at the Chair of Automotive Mechatronics since September 2003 with the work focus on assistance systems for improved fuel efficiency. Since 2008 she is managing the VALIDATE project at the institute. In 2008, Anne Piegsa received her PhD and has, as a native Swede, studied Engineering Physics at University of Uppsala, Sweden.*

**PROF. DR.-ING. HANS-CHRISTIAN REUSS**

*see page 6 – Intelligente Fahrzeuge – Einleitung*

**Contact**

*Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK)*

*Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 12, 70569 Stuttgart, Tel. 0711/685-68501, Fax 0711/685-68533*

*E-Mail: [hans-christian.reuss@ivk.uni-stuttgart.de](mailto:hans-christian.reuss@ivk.uni-stuttgart.de), <http://www.ivk.uni-stuttgart.de/IVK/>, <http://www.fkfs.de>*

# Positionsbestimmung von Fahrzeugen



GPS II-R Satellit.

In der heutigen Gesellschaft ist eine Vielzahl von Handlungen und Entscheidungen an die aktuelle räumliche Position des Handelnden gebunden. Dies kann auf verschiedenen Ebenen eine Rolle spielen: zum Beispiel ist es entscheidend, ob man es sich leistet, eine Immobilie in Bremerhaven oder Stuttgart zu erwerben. Auf der anderen Seite sind natürlich die aktuelle Position und eventuell auch Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit von Bedeutung, wenn es darum geht, das nächstgelegene Kino aufzusuchen. Hier sind die aktuelle

Position der Nutzer und die gewünschte Zielposition mittels eines Routing-Algorithmus in Verbindung gebracht worden. Positionen und ergänzende geometrisch-temporale und damit als kinematisch zu bezeichnende Elemente haben eine elementare Bedeutung für Intelligente Automobile.

## 1. Einleitung

Seit langem bekannt sind Navigationssysteme, die die aktuelle Position und den navigierten Weg auf einem vorgegeben digitalen Straßennetz als Daten benötigen. Zurzeit werden die Forschungsarbeiten an Fahrerassistenzsystemen vorangetrieben. Hier werden die Position, die Geschwindigkeit, die Querneigung und vieles mehr eingesetzt, um den Fahrer zu informieren oder zu warnen. Die geometrischen oder kinematischen Informationen sind Grund-

lage der Warnung und sollen zukünftig auch für aktive Sicherheitssysteme und zum automatisierten Fahren herangezogen werden. In den letzten beiden Fällen werden die geometrischen Informationen in geschlossene Regelkreise integriert. Automatisiertes Fahren ist, neben der prototypischen Realisierung im Straßenverkehr, für langsame Bewegungen in abgegrenzten Bereichen bereits umgesetzt, z.B. für die Regelung von Asphaltfertigern auf Baustellen im Zentimeter-Bereich. Die genannten Anwendungen erfordern vor

allem Informationen bezüglich der eigenen Position und eventuell variabler Positionen benachbarter Fahrzeuge.

Eine völlig andere Anwendung ist eng mit den zu Beginn angesprochenen Navigationssystemen verknüpft. Momentan sind für Autofahrer Informationen bezüglich Staus und zählfließendem Verkehr besonders wichtig. Diese Hinweise können durch sich ändernde oder nicht ändernde Positionen von Fahrzeugclustern repräsentiert werden. Verkehrslagenerfassung und -vorhersage basieren folglich auch auf Positionsbestimmungen.

All diesen Anwendungen, auch der digitalen navigierbaren Verkehrskarte, ist es gemein, dass sie auf Koordinatensystemen aufbauen. Koordinatensysteme müssen definiert, in die Realität umgesetzt und durchgängig qualitätsgeprüft werden. Fachleute für diese Grundlagen sind die Geodäten, die sich seit Jahrhunderten mit widerspruchsfreien Systemdefinitionen, der messtechnischen Erfassung geometrischer und kinematischer Größen und deren anwendungsbezogener Auswertung befassen. In den letzten Jahren zählt hierzu auch die für intelligente Automobile an Bedeutung gewinnende Entwicklung und Bereitstellung hochgenauer, zum Teil aktiver Infrastruktur zur Positionsbestimmung.

## 2. Infrastruktur zur Positionsbestimmung

Infrastruktur – hierunter werden im Allgemeinen Basiseinrichtungen personeller, materieller oder *institutioneller* Art verstanden, die das Funktionieren einer arbeitsteiligen *Volkswirtschaft* beziehungsweise eines Staates garantieren. Dabei denkt man zunächst in der Regel an Verkehrsinfrastruktur wie Straßen und Schienen oder Kliniken, Schulen und vieles mehr. Auch die Positionsbestimmung setzt eine gewisse Infrastruktur voraus, zumindest, wenn die Positionen jederzeit für jedermann zur Verfügung stehen sollen. Die wesentlichste Neuerung war zweifelsohne die Einführung des satellitenbasierten Global Positioning System (GPS), das seit 1995 im Einsatz ist. Die weltweite Verfügbarkeit dreidimensionaler Koordinaten außerhalb von Gebäuden schuf neue Möglichkeiten der Navigation. Als weltweite Infrastruktur sind hier die nominell 24 Satelliten und die Kontrollzentren zu verstehen.

Diese bereits sehr erfolgreiche Infrastruktur wird durch neue oder reaktivierte zusätzliche Global Navigation Satellite Systems (GNSS) weiter in ihrer Verfügbarkeit gestärkt: Das russische Glonass wird 2011 erneut operabel werden, das europäische Galileo und noch stärker das chinesische Compass System sind im Aufbau. Die Anzahl der vorhandenen Navigationssatelliten wird in etwa drei bis fünf Jahren bei über 100 liegen. Trotz erhöhter Verfügbarkeit wird bei der Bestimmung absoluter Koordinaten nur eine Genauigkeit von einigen Metern mittels ausgleichendem dreidimensionalem Bogenschnitt erreicht. Möglichkeiten zur Verbesserung liefern zum einen die Nutzung relativer Messungen und zum anderen die erheblich genaueren Trägerphasen zur Positionsbestimmung. Relatives GPS oder GNSS, das so genannte DGPS/DGNSS, wird zukünftig in den Sub-Meter-Bereich vordringen können. Dessen Kombination mit der Trägerphasenmessung – man spricht dann von präzisiertem DGPS oder DGNSS, abgekürzt PDGPS oder PDGNSS – erlaubt prinzipiell eine Genauigkeit im Zentimeter- bis Millimeter-Bereich, setzt aber auch ungestörten Empfang der Satellitensignale voraus. Zur weltweiten oder zumindest landesweiten Sicherstellung der beiden relativen GNSS-Moden sind Dienstanbieter einzubinden, die die notwendigen Referenzstationen vorhalten sowie die Messungen zur Verfügung stellen. Zum einen existieren weltweite Anbieter wie beispielsweise OmniSTAR der Fugro-Gruppe, die DGNSS-

### SUMMARY

*Die Positionsbestimmung spielt für das Intelligente Automobil eine essentielle Rolle. Sowohl für die Navigation als auch für Fahrerassistenzsysteme, aktive Sicherheitssysteme und das automatisierte Fahren sind die aktuelle Position sowie zum Teil weitere geometrisch-temporale Informationen des Fahrzeugs unverzichtbar. Für die Erfassung der Verkehrslage dagegen muss eine Vielzahl von Fahrzeugen mit ihren Positionen erfasst werden. In diesem Beitrag wird eine Übersicht über die Positionsbestimmungsmethoden auf unterschiedlichen Genauigkeitsniveaus, die hierfür notwendige Sensorik und Positionsinfrastruktur sowie deren Potenzial für verschiedene Applikationen gegeben.*

*Positioning plays an important part for the intelligent automobile. For navigation, advanced driver assistance systems and automated driving, the current position and partly additional geometry-temporal information regarding the vehicle are absolutely essential. For the acquisition of the traffic state, however, a huge number of vehicles has to be positioned. In this article an overview will be given on the positioning methods on different accuracy levels, the required sensors and position infrastructure as well as the potential for various applications.*

Dienste standardmäßig zur Verfügung stellen, zum anderen gibt es nationale Anbieter, die zusätzlich PDGNSS anbieten. In Deutschland – und das ist tatsächlich einmalig – konkurrieren drei Anbieter um die Gunst des Kunden: die deutschen Landesvermessungen mit SAPOS, die AXIO-Net GmbH mit ASCOS und die Trimble GmbH mit Trimble VRS Now. Weltweit stehen diese Referenzstationennetze im Fokus von Forschung und Entwicklung. Die hochgenauen dreidimensionalen virtuellen Festpunkte ersetzen zunehmend die Grundlagenpunkte der Landesvermessung in den Ländern der entwickelten Staaten. Sie bilden somit auch die neue Grundlage für alle Karten eines Landes und damit auch einer immer enger zusammenrückenden mobilen Welt.

Von besonderer Bedeutung sind für Autofahrer darüber hinaus naturgemäß die digitalen Straßenkarten. Bezogen auf ein absolutes Koordinatensystem kann die Genauigkeit dieser Karten heutzutage häufig nur mit wenigen Zehner-Metern angegeben werden. Die entscheidende Eigenschaft dieser Karten ist ihre Fähigkeit, ein Routing zuzulassen und somit ihre Navigierbarkeit. Karten dieser Genauigkeitsklasse stehen heute standardmäßig zur Verfügung. Die Forschung beschäftigt sich zur Zeit mit der spurgenaue Modellierung digitaler Karten und ihrer Verbesserung hinsichtlich Genauigkeit und Korrektheit. Damit können die Karten dann tatsächlich als Grundlage von Warnhinweisen bei Fahrerassistenzsystemen oder sogar bei aktiven Sicherheitssystemen zuverlässig eingesetzt werden.

Neben den GNSS-Referenzstationen rücken zurzeit weitere Positions-Infrastrukturen in den Mittelpunkt des Interesses. Hier sind, wie später noch näher diskutiert werden wird, vor allem die Mobilfunksysteme inklusive der kompletten mobil- und hardwareseitigen Hard- und Software zu nennen. Zukunftsweisend sind außerdem Ortungsverfahren, die sich beispielsweise der W-LAN- oder Bluetooth-„Infrastruktur“ zur Positionsbestimmung für Verkehrsanwendungen bedienen.

### 3. Positionsbestimmung zur Navigation

Die Navigationssysteme sind heutzutage sowohl im Fahrzeug als auch bei der Nutzung anderer Verkehrsmittel bereits als

Standardanwendung anzusehen. Um den Weg zum geographischen Ziel auf einer digitalen Karte bestimmen zu können, ist selbstverständlich die Ermittlung der aktuellen Position eines Fahrzeuges erforderlich. Hierzu werden heute in der Regel zwei Verfahren eingesetzt: Das eine nutzt nur das GPS bzw. die GNSS; das zweite, aufwändigere und zuverlässigere, nutzt zusätzliche Sensoren, die die Richtungsänderung und die gefahrene Strecke messtechnisch erfassen. Auf diese Weise werden die GNSS-Messungen durch unabhängige relative Sensoren gestützt. Das ist insbesondere bei GNSS-Ausfällen und bei starker Verfälschung der Signale durch Reflektionen an Gebäuden, den Mehrwegeeffekten in so genannten Urban Canyons, von Bedeutung. Um die gemessenen Koordinatenfolgen auf die digitale Karte zu referenzieren, sind Map-Matching-Algorithmen erforderlich. Diese Algorithmen vergleichen die absoluten Koordinaten oder die relativen Koordinaten der Positionsfolgen mit der digitalen Karte. Die relativen Koordinaten können als Formbeschreibung der Trajektorie aufgefasst werden. Der Formvergleich mittels Korrelationsanalyse führt dann zur Identifikation des korrekten, aktuell befahrenen Straßenabschnitts.

Die Forschung im Navigationsbereich konzentriert sich zurzeit auf die spurgenaue Kartenmodellierung und Positionsbestimmung sowie auf die dynamische Navigation, die zeitlich variable Hindernisse wie Baustellen oder Staus bei der Routenberechnung berücksichtigt. Die spurgenaue Positionsbestimmung erfordert die Integration verschiedener Sensoren in Filteralgorithmen, wie beispielsweise erweiterte Kalman-Filter, die die Kinematik und eventuell auch die Dynamik des Fahrzeugs berücksichtigen. Die Adaption deterministischer und stochastischer Modelle, um zuverlässig Genauigkeiten im Meter- oder Sub-Meter-Bereich zu erreichen, befindet sich zum Teil in der Entwicklung.

### 4. Positionsbestimmung für Fahrerassistenzsysteme

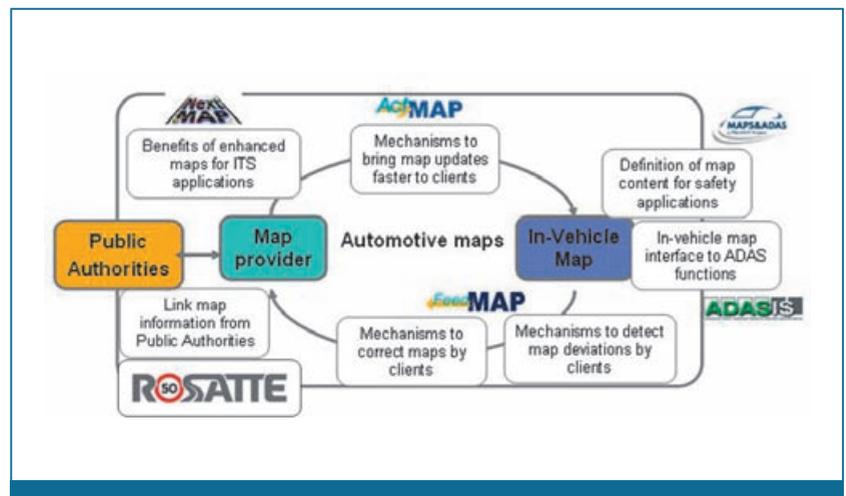
Völlig andere Anforderungen an die Positionsbestimmung stellt ihre Nutzung in Fahrerassistenzsystemen: und zwar hinsichtlich der Genauigkeit, aber auch hinsichtlich der Zuverlässigkeit und der Verfügbarkeit der Positionen. Während eine

ungenau, inkorrekte oder nicht verfügbare Position bei der Navigation natürlich unangenehme, aber keine schwerwiegenden oder gar katastrophalen Folgen hat, sieht das in der Fahrerassistenz schon ganz anders aus. Insbesondere für aktive Sicherheitsfunktionen wie z.B. der Active Break Assist (ABS) kann eine nicht verfügbare oder inkorrekte Position katastrophale und sogar tödliche Folgen haben. Daher liegt hier der Schwerpunkt auf einer zuverlässig und korrekt bekannten Geometrie. Das gilt sowohl für die Positionsbestimmung, die durchgängig mit redundanter Sensorik arbeitet, als auch für die Kartengrundlage.

Zukünftig wird daher der Schwerpunkt auf der Erstellung genauer, korrekter und vor allem aktueller Karten liegen. In diesem Zusammenhang wird sowohl auf europäischer Ebene als auch innerhalb deutscher Förderprogramme intensiv geforscht.

**02** zeigt die unterschiedlichen Projekte in einer Zusammenstellung auf. Im EU-Projekt ROSATTE (ROad Safety ATTributes exchange infrastructure in Europe) wird die Schnittstelle zwischen der originalen Datenerfassung – in der Regel geleistet durch die Straßenbehörden – und den Kartenanbietern entwickelt und standardisiert. Der Fokus liegt dabei auf der Übertragung von Karten-Updates der Straßenbehörden zu den Kartenanbietern und der Integration dieser Updates in die Datenbanken der Kartenanbieter. Da alle Beteiligten auf unterschiedlichen Kartengrundlagen arbeiten, ist der Austausch schwieriger als man gemeinhin denken würde. Besondere Schwierigkeiten macht, trotz vorhandener Standards wie Agora-C, die Geo-Referenzierung der Updates in der aufnehmenden digitalen Karte. Hier setzt die aktuelle Forschung gegenwärtig auch an und muss dies zukünftig noch intensivieren.

Im genannten Projekt besteht eine der wichtigsten Aufgaben in der Beurteilung der Qualität der integrierten Updates. Insbesondere ist es natürlich von größter Bedeutung, dass beispielsweise eine Geschwindigkeitsbegrenzung (z.B. **03**) dem richtigen Straßenabschnitt zugeordnet ist. Bei inkorrekt Zuordnung werden z.B. überraschende Bremsmanöver ausgelöst oder es wird, im entgegengesetzten Fall, eine überhöhte Geschwindigkeit gefahren. Die qualitative Evaluierung dieser Integration steht zurzeit im Fokus der Forschung.



02

Digitale Straßenkarte für Fahrerassistenzsysteme – Schnittstellen und Projekte (Quelle: <http://www.ertico.com/about-rosatte/>).

Fast jedem sind heutzutage die zuvor angesprochenen Fahrerassistenzsysteme bekannt, zum Teil werden sie bereits von einer Vielzahl von Fahrern selbst genutzt. Weniger bekannt sind dagegen Fahrerassistenzsysteme für fahrende Maschinen in der Landwirtschaft oder im Bauwesen. Diese Systeme werden nur anders bezeichnet: Man spricht hier von Maschinensteuerung. Im Bauwesen werden dabei häufig so genannte Anzeige- oder Indikatorsysteme eingesetzt, die, wie auch viele Assistenzsysteme, dem Maschinenführer Informationen zur Verfügung stellen, an denen er sein Fahr- beziehungsweise Bauverhalten ausrichtet. Soll beispielsweise ein Bagger (**04**) eine Grube mit vorgegebener Tiefe ausheben, so wird die aktuell erreichte Tiefe inklusive Informationen zur Korrektur dem Maschinenführer an die Hand gegeben. Er selbst fällt aber die Entscheidungen und führt eigenverantwortlich die Maschine.

Im Gegensatz zu Fahrerassistenzsystemen werden hier weit geringere Geschwindigkeiten gefahren (bspw. 0,6 km/h für einen Asphaltfertiger). Auf der anderen Seite ist die zu erreichende Genauigkeit auch deutlich höher. Für Baumaschinen gehen die Anforderungen bis in den Sub-Zentimeter-Bereich. Zu beachten ist dabei, dass sich die Genauigkeitsangaben nicht auf die gemessene Position, sondern auf das bewegte oder eingebaute Material beziehen.



03

Exemplarische Geschwindigkeitsbegrenzung (Quelle: „Projektsergebnisse EuroRoadS und Ausblick ROSATTE“, OBB München, 16.04.2008).



04

Bagger mit GNSS gestütztem Maschinensteuerungssystem.

## 5. Positionsbestimmung zum automatisierten Fahren

Die letzte Ausbaustufe der Fahrerassistenzsysteme ist das automatisierte Fahren. In diesem Bereich wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl von Projekten angestoßen und umgesetzt. Aktuell wird am ersten automatisierten Fahren im realen Stadtverkehr im Forschungsprojekt „Stadtpilot“ gearbeitet. Die meisten Realisierungen verblieben bisher jedoch im Prototyp-Status. Zwar wurde prinzipiell die technische Machbarkeit immer wieder aufgezeigt, es verblieben jedoch rechtliche Probleme wie die Klärung der Schuldfrage bei einem Unfall. Außerdem muss eine extrem hohe Sicherheit und damit Zuverlässigkeit und Integrität des Gesamtsystems gewährleistet werden, so dass die zukünftig realisierten Lösungen sich zunächst nicht mit dem komplett automatisierten Fahren beschäftigen. Es werden zunächst kombinierte Lösungen angestrebt, wie z.B. im Projekt KONVOI ein Lastwagenkonvoi, bei dem der vorderste Lastwagen wie üblich manuell gelenkt wird, und die nachfolgenden LKWs vollständig automatisiert folgen. Zwar ist auch hier nur ein Prototyp realisiert, aber die Projektidee könnte in näherer Zukunft konkrete Gestalt annehmen.

Vollständig anders sieht es dagegen bei der zuvor angesprochenen Maschinensteue-

rung aus. Hier gibt es sowohl in der Landwirtschaft als auch im Bauwesen bereits vollautomatisierte Systeme, die die Maschinen auf vorgegebenen Trajektorien führen und den Fahrer nur noch aus Sicherheits- und Haftungsgründen mitfahren lassen. Häufig werden zur Positionsbestimmung dabei GNSS-Systeme eingesetzt. Diese können bei freier Sicht zu den Satelliten unter Nutzung der Positionsinfrastruktur der PDGNSS-Dienste dreidimensionale Koordinaten im Genauigkeitsniveau einiger Zentimeter liefern. Für eine Vielzahl von Anwendungen, insbesondere in der Landwirtschaft, reicht dies völlig aus. Forschungspotenzial ergibt sich hier durch die Kombination mit ergänzender Sensorik wie z.B. Kreiseln, Korrelationsgeschwindigkeitsmessern oder Inertialmesssystemen, um zuverlässige und hochgenaue Positionen zur Verfügung zu stellen. Dies ist z.B. bei der Parallelsaart von Zuckerrüben von Bedeutung, da die Pflanzen hier mit einer Genauigkeit von zwei Zentimetern eingesät und bearbeitet werden müssen. Grund hierfür ist die mechanische Unkrautbekämpfung, die den Einsatz der mechanischen Hacke in zwei zueinander senkrechten Fahrtrichtungen auf dem Feld bedingt.

Große Bedeutung hat aber auch die vollautomatische Baumaschinensteuerung, die beispielsweise im Verkehrswegebau für Asphalt- und Gleitschalungsfertiger dreidimensional realisiert ist. Im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Anwendung spielen neben der Position auch andere Parameter wie die Quer- und Längsneigung eine entscheidende Rolle. Ein GNSS-Empfänger ist daher fast durchgängig durch weitere GNSS-Empfänger oder zusätzliche Sensoren wie Kreisel, Neigungsmesser und Ultraschall-Sensoren zu ergänzen, damit die jeweilige Fahrbahnoberfläche direkt eingebaut werden kann. Auch hier müssen die Satellitenempfänger grundsätzlich im PDGNSS-Modus eingesetzt werden. Die aktive Positionsinfrastruktur kann wiederum gewinnbringend angewandt werden. Im Gegensatz zu agrartechnischen Anwendungen sind zum Teil die Genauigkeitsanforderungen mit bis zu fünf Millimetern höher und außerdem die Messbedingungen auf einer Baustelle weniger ideal als beispielsweise auf einem Feld. Diese beiden Restriktionen führen dazu, dass GNSS nicht für alle Aufgaben eingesetzt werden kann. Häufig werden elektronische Tachy-

meter zur Positionsbestimmung verwendet. Hier liegt das Genauigkeitspotenzial bei einigen Millimetern und eine Sichtverbindung zu den Satelliten ist naturgemäß nicht erforderlich. Der zweite Vorteil wird insbesondere in urbanen Baustellen oder bewaldeten Gebieten oder Alleen bedeutsam, da GNSS in diesen Fällen keine oder in ihrer Zuverlässigkeit deutlich reduzierte Ergebnisse liefert.

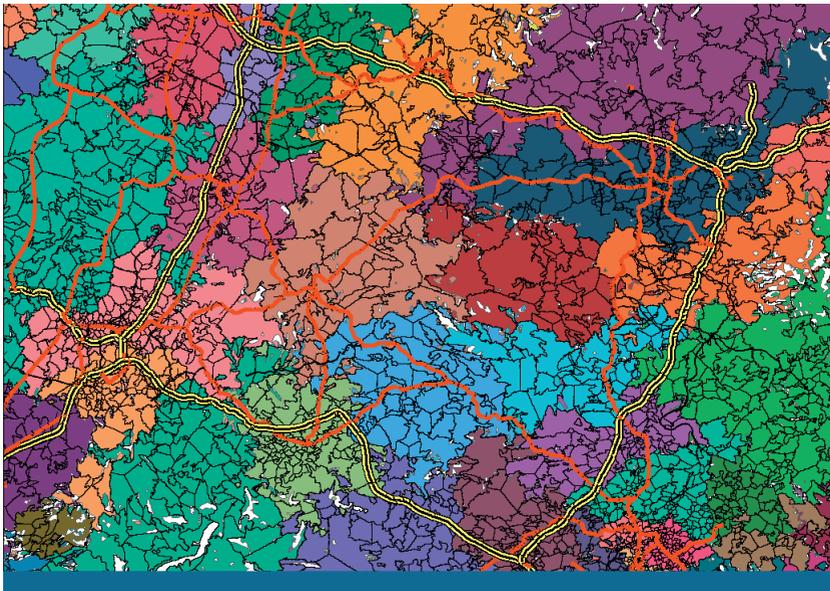
Ein relevantes Beispiel für den Einbau mit 5-Millimeter-Genauigkeit sind Bordsteinfertiger, die in Nordamerika eine erhebliche Bedeutung haben und auch in Europa zunehmend eingesetzt werden. Charakteristisch für diese Anwendung sind eine Geschwindigkeit von 0,3 km/h und sehr enge Radien im Sub-Meter-Bereich. Prinzipiell können hier nur Tachymeter zur Positionsbestimmung und damit auch zur dreidimensionalen Regelung eingesetzt werden. Die Forschungen konzentrieren sich auf das Zusammenspiel von Messtechnik, Filtertechnik und Regelungstechnik, um das anvisierte Genauigkeitsniveau zu erreichen. Mess- und filtertechnisch sind Ausreißerpositionen des Tachymeters zu eliminieren und eine Glättung der streuenden Rohpositionen durchzuführen. Diese Glättung kann gemeinsam mit der Prädiktion in einem Filter erfolgen. Dabei wird das Fahrzeugmodell in die Prädiktion eingespeist und diese dann mit den jeweils aktuellen Messwerten kombiniert. Das hierfür entwickelte, erweiterte nicht-lineare Kalman-Filter führt die Integration von Modell- und Messgrößen in optimaler Weise aus.

Ein verbleibendes Problem, insbesondere für die Regelung in Echtzeit, stellen die Latenzzeiten der ermittelten Positionen dar. Während die Positionen gemessen, übertragen und weiterverarbeitet werden, fährt der Fertiger weiter. Das ist bei Geradeausfahrten zumindest für die Querregelung ohne Bedeutung. Bei Kurvenfahrten stellt sich jedoch standardmäßig ein verzögerter Lenkeinschlag ein. Aus diesem Grund konzentrieren sich aktuelle Forschungen auf die Integration der vorgegebenen Einbautrajektorie in die Auswertung. Zum einen wird dabei die Trajektorieninformation in das Filter integriert, zum anderen muss dafür Sorge getragen werden, dass diese Information dem Regelalgorithmus zur Verfügung steht, bevor die Maschine die Kurve beziehungsweise die Richtungsänderung erreicht. Man

spricht von antizipatorischer Vorsteuerung: Die Information zur Richtungsänderung wird in Abhängigkeit von vorab bestimmter Latenzzeit und aktueller Geschwindigkeit neben der Regelabweichung in den Algorithmus eingespeist.

Am Institut für Ingenieurgeodäsie (IIG) wird ein solcher Algorithmus im Zusammenspiel mit PI, PD und PID-Reglern eingehend untersucht. Hierfür wurde ein In-Door-Simulator (05) mit einem Lastwagenmodell im Maßstab 1:14 im Messkeller des Instituts aufgebaut. Bestandteile sind neben dem fernsteuerbaren Modell-LKW ein Steuerrechner und ein Tachymeter als positionsgebender Sensor. Auf den Modell-LKW wurde zusätzlich ein 360°-Prisma aufgesetzt, damit das Modell aus jeder Richtung anzielbar ist. Das Modell kann zurzeit auf verschiedenen gegebenen Trajektorien mit einer Regelgüte von unter zwei Millimetern gehalten werden; jedoch bisher nur unter „Laborbedingungen“. Um die Umgebungsbedingungen der Realität anzunähern, wird für den Modell-LKW ein Out-Door-Simulator erstellt, der die Baustellenrealität durch den Einsatz von Beton oder Sand andeutet





Location-Areas (eingefärbt) und Zellen (mit Linien gekennzeichnet) des Mobilfunknetzes sowie Hauptstraßennetz für das Viereck Stuttgart-Heilbronn-Mannheim-Karlsruhe.

und zum anderen auch den direkten Vergleich mit GNSS-Positionen erlaubt, da die Sichtbarkeit zu den Satelliten gewährleistet sein wird.

## 6. Positionsbestimmungen zur Vorhersage der Verkehrslage

Wer im Stau steht oder nur im Schnecken-tempo vorwärtskommt, interessiert sich nicht für die Position und Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs – dazu hat man häufig nahezu unbegrenzt Zeit – sondern von Interesse sind hier, insbesondere im Vorfeld, die Positionen und Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer. Wenn diese bedarfsgerecht zur Verfügung gestellt werden, kann die Navigation eventuelle Hindernisse umgehen und somit eine störungsfreie oder zumindest störungsreduzierte Verkehrsführung erlauben.

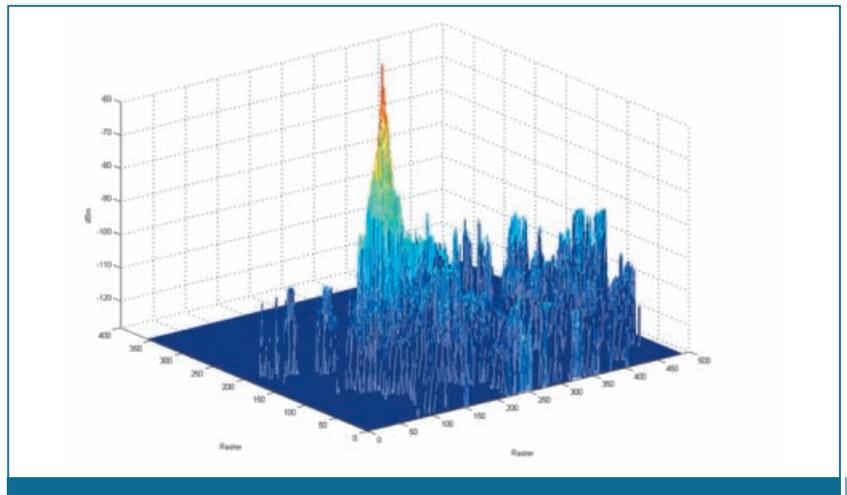
Aus diesem Grund spielt hier ein völlig anderer Ansatz zur Positionsbestimmung eine Rolle. Die geometrischen Informationen sind massenhaft zu erfassen, zu aggregieren und dann zu präzisieren. Endgültige Informationen sind die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit und der Verkehrsfluss oder, noch stärker aggregiert, der Level-of-Service. Bekannt sind Verkehrsnachrichten über die jeweiligen Radiosender oder durch Verkehrsdiensteanbieter, die bei der dynamischen Navigation in das Routing integriert werden. Da diese Informationen nicht immer aktuell und zuverlässig sind, wird insbesondere auf nationaler Ebene die Forschung vorangetrieben,

um durch den integrativen Einsatz verschiedener verteilter Sensorensysteme die Verkehrslage zu erfassen. Die Nutzung stationärer Sensoren wie z.B. Infrarot-Kameras oder Induktionsschleifen ist am weitesten verbreitet, aber aus Kostengründen nicht beliebig in der Fläche verdichtbar. Aus diesem Grund wird neben der Verkehrslageerfassung aus der Luft oder dem All vor allem an der massenhaften kinematischen Erfassung der fahrenden Automobile geforscht. Hier liegt das Augenmerk zurzeit auf zwei Positionsbestimmungsmethoden: dem bereits erwähnten GNSS sowie der Ortung mittels Mobiltelefonen. Das erste Verfahren wird Floating Car Data (FCD) genannt und hat den Vorteil der Genauigkeit im Mehrere-Meter-Bereich, weist aber das Problem der geringen Durchdringung in der Fahrzeugflotte auf. In der Regel scheuen nur Autobesitzer der Komfortklasse nicht die hohen Kommunikationskosten. Die stationären Sensoren erfassen folglich nahezu alle Verkehrsteilnehmer an ausgewiesenen geographischen Orten. Die FCD-Methode erfasst im Gegensatz dazu in guter räumlicher Verteilung nur ausgewiesene Fahrzeugklassen.

Aus diesem Grund wird die Mobilfunkortung als Verfahren der reduzierten Positionsgenauigkeit von einigen 100 Metern mit dem Vorteil der Einsparung einer expliziten Positionsinfrastruktur sowie zusätzlicher Kommunikationskosten vorangetrieben. Der an der Universität Stuttgart entwickelte Ansatz greift dabei auf Mobilfunkdaten zurück, die im Mobilfunknetz des Anbieters vorhanden sind. Für eine grobe Auflösung können Zell-Kennnummern (Cell-ID) oder so genannte Location-Area-Codes, die jeweils mehrere Zellen umfassen, herangezogen werden, wenn das Mobiltelefon inaktiv ist (06). Erfolgversprechender, weil detaillierter auflösbar, sind Informationen während des Gesprächs. Mit zwei Hertz stehen die Cell-ID, eine auf etwa 500 Meter auflösbare Entfernungsinformation, und gemessene Signalstärken von bis zu sieben empfangbaren Mobilfunkantennen im Mobilfunknetz zur Verfügung.

Zur Bestimmung der sich verändernden Positionen werden die gemessenen Signalstärken mit Referenzwerten verglichen. Die maximale Übereinstimmung zwischen Messung und Planung (07) als Referenz liefert die Position in 0,5-Sekunden-Abtastung. Die Kinematik der Fahrzeuge wird in

einem Kalman-Filter berücksichtigt, so dass die gefilterte Positionsfolge genauere und zuverlässigere Messwerte enthält. Abschließend sind die Positionsfolgen auf die digitale Karte zu referenzieren. Da die Positionsbestimmungsgenauigkeit im Gegensatz etwa zur Navigation deutlich herabgesetzt ist, kann kein strenger Map-Matching-Algorithmus implementiert werden, da die Form der möglichen Straßenabschnitte nicht ausreichend genau gemessen werden kann. Aus diesem Grund kommt ein neu entwickeltes Map-Aiding-Verfahren zum Einsatz, das von den möglichen Fahrstrecken die wahrscheinlichste auswählt. Das Kriterium ist dabei die Standardabweichung auf Basis der Querabweichungen. Mit diesem Algorithmus können bei etwa zwei bis drei Minuten langen Telefonaten etwa 90 Prozent der Fahrten korrekt zugeordnet werden. Schwierigkeiten gibt es auch hier mit der Durchdringung, weil eine Vielzahl von Messungen auf Grund von Kurztelefonaten und der damit bedingten geringen Länge der Positions-



Signalstärkenkarte des GSM-Netzes.

folge nicht ausgewertet werden kann. Hier besteht zurzeit weiterer Forschungsbedarf. Neuere Entwicklungen arbeiten außerdem auf Basis von W-LAN oder Bluetooth. Auch hier spielen fast durchgängig Signalstärkenmessungen eine große Rolle. •

Volker Schwieger

## DER AUTOR

### PROF. DR.-ING. HABIL. VOLKER SCHWIEGER

hat an der Universität Hannover Geodäsie studiert und am Geodätischen Institut Hannover zum Thema „GPS – Überwachungsmessungen“ promoviert. Nach einer zweijährigen Forschungstätigkeit am GeoForschungsZentrum Potsdam wechselte er an das Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen der Universität Stuttgart. Dort leitete er die Arbeitsgruppe Geodätische Messtechnik und habilitierte sich mit einem Thema zur „Nicht-linearen Sensitivitätsanalyse“. Zum 1. April 2010 wurde er auf die Professur „Ingenieurgeodäsie und Geodätische Messtechnik“ an die Universität Stuttgart berufen. Das Institut für Anwendungen der Geodäsie im Bauwesen wurde in der Folge in „Institut für Ingenieurgeodäsie“ umbenannt.



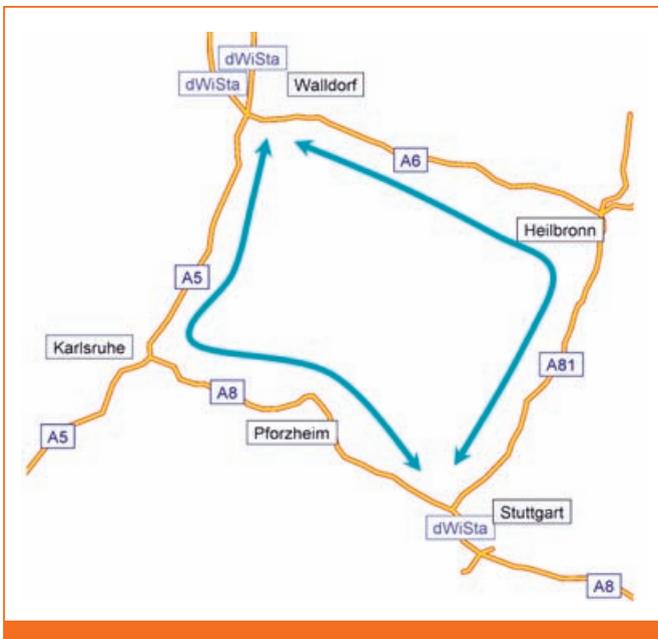
#### Kontakt

Institut für Ingenieurgeodäsie (IIG)

Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart

Tel. 0711/685-84041, Fax 0711/685-84044, E-Mail: sekretariat@ingeo.uni-stuttgart.de, Internet: www.uni-stuttgart.de/ingeo

# Verkehrslage, Verkehrsbeeinflussung und Routenwahl



Eine hoch belastete Autobahn wie die A8 bei Stuttgart wird heute von etwa 130.000 Fahrzeugen am Tag befahren, die B10 bei Untertürkheim von 70.000 Fahrzeugen. Diese Verkehrsstärken führen zu einer hohen Belastung des Straßennetzes und zu einer hohen Wahrscheinlichkeit von Verkehrsstörungen. Um den Verkehrsablauf auf einem Netzabschnitt zu verbessern und die Wahrscheinlichkeit von Störungen zu reduzieren, kann man entweder die Kapazität erhöhen oder die Nachfrage reduzieren. Mit Hilfe von Maßnahmen des Angebots- und des Nachfragemanagements ist es möglich, diese zu beeinflussen. Dabei besitzt die richtige Routenwahl sowohl in räumlicher als zeitlicher Hinsicht eine besondere Funktion.

## 1. Mobilität und Verkehr

Jeder Mensch in Deutschland macht pro Tag durchschnittlich 3,4 Wege und legt dabei etwa 40 km zurück. Bevorzugtes Verkehrsmittel ist der Pkw. 43 Prozent aller Wege werden als Pkw-Selbstfahrer zurückgelegt, 15 Prozent als Pkw-Mitfahrer. Bezogen auf die Fahrtweite beträgt der Anteil sogar 55 bzw. 24 Prozent. Pro Einwohner ergibt sich so eine tägliche Pkw-Fahrleistung von 21 km. Dazu kommen noch rund 3,5 Lkw-Kilometer, die bezogen auf einen Einwohner täglich gefahren werden. Diese Mobili-

tät der Menschen und Güter führt zu Verkehr im Straßennetz. Für einen Autobahnquerschnitt ergibt sich eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke von etwa 50.000 Kfz, für eine Bundesstraße von 7.500 Kfz. Diese Verkehrsstärken variieren räumlich und zeitlich deutlich. Die Verkehrslage beschreibt den Zustand im Straßennetz zu einem Zeitpunkt bzw. in einem Zeitraum. Sie wird u.a. durch folgende Kenngrößen quantifiziert:

- absolute Verlustzeit: Verlustzeit aller Fahrzeuge auf einem Netzabschnitt [Fahrzeugstunden]

- normierte Verlustzeit: Verlustzeit pro Kilometer [Sekunden/km]
- Fahrzeitindex: Quotient aus aktueller Fahrzeit und einer Sollfahrzeit, d.h. die Fahrzeitverlängerung gegenüber einem Soll-Zustand.

Maßnahmen des Angebotsmanagements und des Nachfragemanagements helfen, den Verkehrsablauf auf einem Netzabschnitt zu verbessern und die Wahrscheinlichkeit von Störungen zu reduzieren, entweder durch Kapazitätserhöhung oder Nachfragereduzierung.

#### Verkehrsangebotsmanagement:

Das Angebotsmanagement verändert die verfügbaren Kapazitäten im Verkehrsnetz. Das kann zum Beispiel langfristig durch den Neubau, Ausbau aber auch durch den Rückbau von Verkehrswegen (z.B. in Ortsdurchfahrten), mittel- und kurzfristig durch das Angebot von Fahrten im öffentlichen Verkehr und kurzfristig durch kapazitätsbeeinflussende Maßnahmen aus dem Bereich der Verkehrsleittechnik (z.B. temporäre Seitenstreifenfreigabe, Baustellenmanagement, verkehrabhängig gesteuerte Lichtsignalanlagen) erfolgen. Das Verhalten der Verkehrsteilnehmer wird dabei dadurch beeinflusst, dass zusätzliche Handlungsoptionen (z.B. eine neue Straße, eine zusätzliche ÖV-Verbindung, ein weiterer Fahrstreifen oder mehr Grünzeit) zur Verfügung gestellt werden.

#### Verkehrsnachfragemanagement:

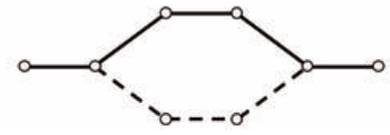
Das Nachfragemanagement beeinflusst das Verhalten der Verkehrsteilnehmer so, dass es zu einer modalen, räumlichen oder zeitlichen Verlagerung kommt. Eine Beeinflussung des Verkehrsverhaltens kann durch Information (z.B. Verkehrsfunk, Internet, Navigationsgeräte, Wechselwegweisung, Marketing), über Preise (z.B. Straßenbenutzungsgebühren, Parkgebühren) und Anreize (Job Ticket) oder durch Regeln (z.B. Beeinflussung der Geschwindigkeit über Streckenbeeinflussungsanlagen) erfolgen. Das Nachfragemanagement verändert keine Kapazitäten und wirkt allein durch eine bessere Verteilung der Nachfrage und damit durch eine bessere Nutzung der vorhandenen Kapazität.

Die Kenntnis der Routenwahl ist sowohl für die langfristige Verkehrsplanung als auch für die kurzfristige Steuerung von Straßennetzen von besonderer Bedeutung. Bei der Planung von Straßennetzen geht es darum, die Wirksamkeit einer geplanten Straßenbaumaßnahme zu beurteilen. Dazu

#### Verkehrsplanung:

Wie viele Verkehrsteilnehmer verändern ihre Route, wenn Maßnahmen im Netz durchgeführt werden?

→ Netzbelastungen für einen Planungshorizont



#### Verkehrssteuerung:

Welche Routen wählen die Verkehrsteilnehmer bei der aktuellen Verkehrslage und wie wirken Steuerungsmaßnahmen?

→ Netzbelastung für eine Kurzfristprognose



Bedeutung der Routenwahl für die Planung und die Steuerung des Verkehrs in Straßennetzen.

werden die Verkehrsnachfrage und die Routenwahl für den geplanten Zustand mit Modellen prognostiziert. Bei der Verkehrssteuerung stehen die Wirkungen besonderer Nachfragesituationen (Hauptverkehrszeit, erster Ferientag, Großveranstaltung), aktueller Baustellen und verfügbarer Steuerungsmaßnahmen im Vordergrund. Hierbei ist es wichtig zu wissen, wie die Verkehrsteilnehmer auf Verkehrsinformationen reagieren.

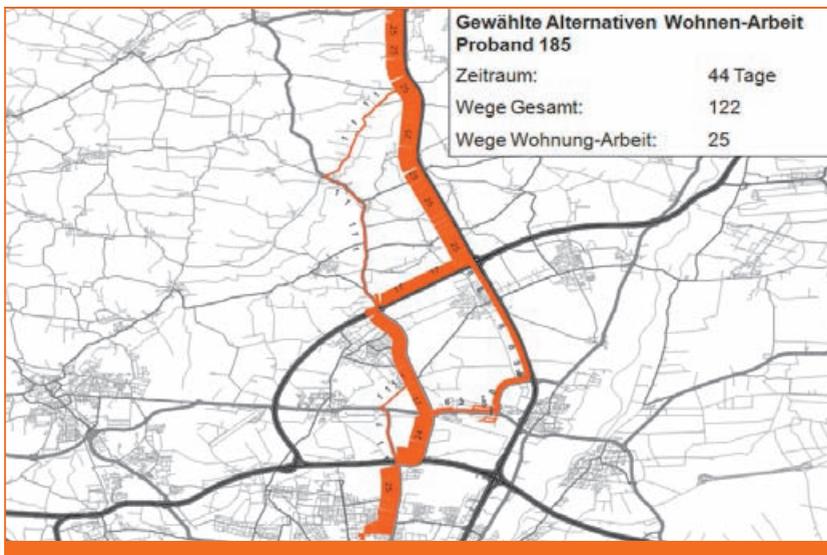
## 2. Erfassung der Verkehrslage und der Routenwahl

Über realisiertes Routenwahlverhalten in Straßennetzen liegen bisher nur wenige Beobachtungen vor, da das Routenwahlverhalten sehr aufwändig zu erheben ist. Auch exakte Fahrzeiten sind in der Regel nicht bekannt. Um das Routenwahlverhalten

### SUMMARY

Die Kenntnis der Routenwahl ist sowohl für die langfristige Verkehrsplanung als auch für die kurzfristige Steuerung von Straßennetzen von Bedeutung. Neue Erhebungsmethoden ermöglichen es erstmalig das Routenwahlverhalten über längere Zeiträume zu erfassen und statistisch zu analysieren. Mit den Daten lassen sich die Parameter von Routenwahlmodellen schätzen und die Wirksamkeit von Verkehrsfunkmeldungen und Wechselwegweisungen im Hinblick auf die Routenwahl quantifizieren. Die Daten ermöglichen es außerdem, allgemeine Hypothesen über das Routenwahlverhalten zu testen. Im vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Erhebungsergebnisse und Annahmen für die Modellierung der Routenwahl in Verkehrsnachfragemodellen dargestellt.

Information on route choice is important for the long term transport planning and the short term traffic control of road networks. New surveying techniques permit for the first time longer observations of route choice behavior. The survey data can be used to estimate parameters of route choice models and to quantify the impacts of radio traffic messages and corridor control systems on route choice. General hypotheses on route choice behavior may also be tested. The paper presents some results of route choice observations and explains common assumptions for modeling route choice in travel demand models.



02 *Beobachtete Routenwahl einer Person für die Fahrt von der Wohnung zur Arbeit über einen Zeitraum von 44 Tagen.*

ten der Verkehrsteilnehmer im Straßennetz analysieren zu können, sind idealerweise folgende Informationen für eine Ortsveränderung verfügbar: Start- und Zielort mit Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt, räumlicher Verlauf der Route als Folge von Knoten oder Strecken in einer digitalen Karte, zeitlicher Verlauf einer Route als Zeit-Weg-Diagramm, alternative Routen mit erwarteten Fahrzeiten im Netz im Zeitraum der Fahrt, netzweite Verkehrszustände und Schaltzustände im Zeitraum der Fahrt und die Kenntnis, ob der Verkehrsteilnehmer ein Navigationssystem mit aktuellen Verkehrsmeldungen benutzt hat. Um Verfälschungen in der Routenanalyse zu vermeiden, ist es wünschenswert, die Verkehrsteilnehmer verdeckt beobachten zu können, d. h. es ist anzustreben, dass die Verkehrsteilnehmer nicht über den genauen Untersuchungszweck informiert sind.

Diesen Anforderungen einer Routenanalyse stehen die realisierbaren Erhebungsmöglichkeiten gegenüber. Grundsätzlich stehen heute folgende Erhebungsmethoden zur Verfügung, die bis jetzt jedoch nur in wenigen Anwendungen zum Einsatz kommen:

#### **GPS – Daten:**

Bei dieser Erhebungsmethode wird eine Anzahl von Probanden rekrutiert und mit Erhebungsgeräten ausgestattet. Die Erhebungsgeräte protokollieren die Ortsveränderungen der Personen oder Fahrzeuge mit Hilfe von GPS. Nach Abschluss einer oder mehrerer Ortsveränderungen werden die Daten gesammelt übertragen und aus-

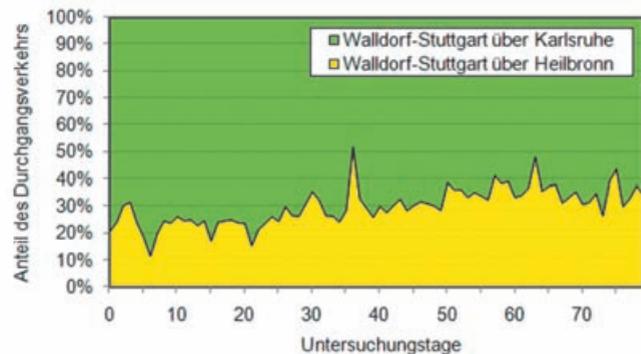
gewertet. Diese Methode ist aufwändig und eignet sich nur für zeitlich befristete Erhebungen. Der Vorteil der Methode liegt darin, dass die soziodemographischen Eigenschaften der Probanden und der Kontext einer Fahrt (z.B. der Fahrtzweck) bekannt sind.

#### **Floating Car Daten (FCD):**

Floating Car Daten liefern den Ort, an dem sich ein Fahrzeug zu einem Zeitpunkt befindet. Diese Daten werden direkt aus den Navigationssystemen besonders ausgestatteter Fahrzeugflotten an eine Zentrale übermittelt. Für eine Routenanalyse sind FCD dann verwendbar, wenn für jedes erfasste Fahrzeug kontinuierliche Positionsdaten verfügbar sind. Über eine derartige Datenquelle verfügen insbesondere die Hersteller von Navigationssystemen, die ihre Geräte mit einer SIM-Karte ausrüsten. TomTom verfügt in Deutschland vermutlich über die größte derartig ausgerüstete Fahrzeugflotte.

#### **Floating Phone Daten (FPD):**

Für den Betrieb eines Mobilfunknetzes ist es notwendig, selbst von Mobilfunkgeräten im Standby-Modus die ungefähre Position zu kennen. Aus diesem Grund bieten sich Mobilfunkdaten als Datenquelle für verkehrstechnische und verkehrsplanerische Anwendungen an. Daten aus Mobilfunkgeräten werden als Floating Phone Data (FPD) oder als Net-FCD bezeichnet. Bei der FPD-Methode können Trajektorien von Mobilfunkteilnehmern aus den im Mobilfunknetz ohnehin anfallenden Protokoll-daten erfasst werden. Art und Umfang der Protokoll-daten variieren, je nachdem ob ein Mobiltelefon lediglich im Netz eingebucht ist (Standby-Mode) oder ob gerade eine aktive Gesprächs- oder Datenverbindung besteht (Dedicated-Mode). Der Vorteil von FPD liegt in der Quantität der Daten, da sich Mobilfunkgeräte in den letzten Jahren zu stetigen Begleitern der meisten Menschen in Deutschland und in der ganzen Welt entwickelt haben. Die Qualität der Daten hängt von der Fahrtweite ab. Bei kurzen Fahrten können das gewählte Verkehrsmittel und die gewählte Route nicht eindeutig bestimmt werden. Erfahrungen aus dem Pilotprojekt Do-iT [2] zeigen, dass die Datenqualität von FPD ausreichend für eine Erfassung von Fahrzeiten und Routen im Autobahnnetz ist. TomTom hat unter der Bezeichnung „HD Traffic“ einen kommerziellen Dienst auf den Markt gebracht, der Verkehrsinforma-



03

tionen u.a. aus Mobilaten generiert, die Vodafone bereitstellt.

#### Fahrzeugwiedererkennung über Kennzeichenerfassungssysteme:

Ein Kennzeichenerfassungssystem (ANPR = Automated Number Plate Recognition) besteht im Allgemeinen aus zwei Komponenten: einer Infrarot-Kamera, die vorbeifahrende Fahrzeuge erfasst und kontinuierlich Bilder an einen Computer sendet und einer Software, die in den empfangenen Bildern Kennzeichen erkennt und verschlüsselt in eine Datenbank mit dem Erfassungszeitpunkt schreibt. Werden ANPR-Systeme an mindestens zwei Messstellen entlang eines Streckenzugs aufgestellt, können durch den Kennzeichenvergleich exakte Fahrzeiten von allen Fahrzeugen erfasst werden, die diesen Streckenzug durchfahren. Bei geeigneter Anordnung der Messstellen ist es auch möglich, das Routenwahlverhalten zu beobachten. Derartige Systeme werden in England seit mehreren Jahren zur Verkehrslageerfassung auf Autobahnen eingesetzt ([www.trafficengland.com](http://www.trafficengland.com)). In Deutschland betreibt die Autobahndirektion Südbayern seit 2007 rund 30 Kamerasysteme. Die Landeshauptstadt Stuttgart installiert gerade auf einer städtischen Einfallstraße (B27 Degerloch - Stadtmitte) ein System mit vier Messstellen und neun Kameras.

#### Fahrzeugwiedererkennung mit Bluetooth:

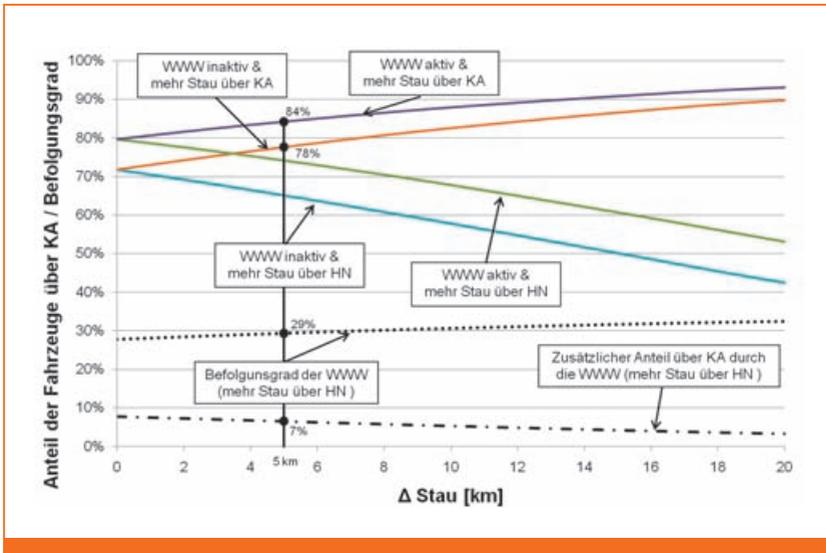
Bluetooth dient der Funkvernetzung von mobilen Geräten über kurze Distanz. Will ein mobiles Gerät mit anderen Geräten in

Kontakt treten, sendet es vor Aufbau der Datenverbindung fortlaufend seine eindeutige MAC-Adresse. Beispiel für mobile Geräte im Pkw sind Mobilfunkgeräte mit einer Freisprecheinrichtung. Über die MAC-Adresse können – ähnlich wie bei ANPR-Systemen – Fahrzeuge an unterschiedlichen Stellen im Netz wiedererkannt werden. Bluetooth-Systeme sind deutlich preiswerter als ANPR-Systeme, können aber weniger Fahrzeuge detektieren.

### 3. Analyse der Routenwahl

Im Folgenden werden Ergebnisse einer Erfassung des Routenwahlverhaltens mit Mobilfunkdaten dargestellt (SCHLAICH [3]). Untersuchungsgebiet ist das baden-württembergische Autobahnviereck Leonberg – Karlsruhe – Walldorf – Heilbronn (05). In dieser Netzmasche stehen dem Durchgangsverkehr aus Richtung Mannheim in Richtung München zwei Routen zur Verfügung. Die Standardroute über Heilbronn (A6 & A81) und die Route über Karlsruhe (A5 & A8). Bei Störungen auf der Standardroute wird die Route über Karlsruhe (A5/A8) auf dynamischen Wegweisern mit integrierten Stauinformationen (dWiSta) empfohlen. Mit sogenannten Maximum-Likelihood-Schätzungen kann untersucht werden, welche Kenngrößen (Verkehrsmeldungen, Wechselwegweisung etc.) die Routenwahl überhaupt beeinflussen und, wenn ja, welche Gewichtung die einzelnen Kenngrößen haben. Als Eingang für die Schätzungen stehen über eine Million be-

*Routenwahl zwischen Walldorf und Stuttgart über einen Zeitraum von 80 Tagen.*



04

Grafische Darstellung der Routenwahl für die Richtung Stuttgart → Walldorf (SCHLAICH).

obachtete Routenwahlentscheidungen zur Verfügung, die in einem Zeitraum von 80 Tagen auf den beiden Diagonalen Stuttgart ↔ Walldorf und Heilbronn ↔ Karlsruhe aus Mobildaten abgeleitet wurden.

Mit diesen Daten können für die Netzmasche die Parameter eines statistisch abgesicherten Routenwahlmodells geschätzt werden. Die Ergebnisse können grafisch dargestellt werden, so dass für jeden Zustand die zu erwartende Aufteilung abgelesen werden kann. So kann aus 04 zum Beispiel abgelesen werden, dass bei fünf Kilometer mehr gemeldetem Stau über Heilbronn als über Karlsruhe bei inaktiver Wechselwegweisung (WWW) ca. 78 Prozent des Durchgangsverkehrs die Route über Karlsruhe wählen. Eine aktive Wechselwegweisung bewirkt einen zusätzlichen Anteil von sechs Prozent, was einem Befolgungsgrad von ca. 29 Prozent entspricht.

#### 4. Modellierung der Routenwahl

Ein Verkehrsnachfragemodell ist ein Modell, das alle relevanten Entscheidungsprozesse der Menschen nachbildet, die zu Ortsveränderungen führen. Verkehrsnachfragemodelle verwenden als Input Daten zum Mobilitätsverhalten, zum Verkehrsangebot sowie zur Siedlungs- und Bevölkerungsstruktur. Als Ergebnis liefern sie Nachfragematrizen, Verkehrsstärken für einzelne Netzelemente und Kenngrößen zur Beurteilung des Verkehrsangebots. Im Personenverkehr umfassen diese Entscheidungen die Aktivitätenwahl (welche Akti-

vitäten führt eine Person durch?), die Zielwahl (wo finden die Aktivitäten statt?), die Verkehrsmittelwahl (mit welchem Verkehrsmittel fährt die Person zum Ziel?), die Abfahrtszeitwahl (wann beginnt die Fahrt?) und die Routenwahl (auf welchen Verkehrswegen bewegt sich die Person?).

In einem Verkehrsnachfragemodell ist die Routenwahl in ein sogenanntes Umlegungsmodell integriert. Bei der Umlegung werden die Fahrten der Personen bzw. der Kraftfahrzeuge auf das Netz umgelegt, d.h. den Strecken und Knotenpunkten zugeordnet. Diese Umlegungsaufgabe lässt sich in drei Teilaufgaben gliedern.

- In einem ersten Schritt müssen alle geeigneten Routen für eine Ortsveränderung ermittelt werden. Dazu wird eine *Routensuche* durchgeführt.
- Der zweite Schritt modelliert das eigentliche Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer. Dazu wird ein *Routenwahlmodell* eingesetzt.
- Im letzten Schritt wird dann die aus der gegebenen Verkehrsbelastung resultierende Fahrzeit ermittelt. Hierfür kommen einfache auslastungsabhängige Fahrzeitfunktionen oder komplexe *Verkehrsflussmodelle* zum Einsatz.

Umlegungsverfahren für die Verkehrsplanung basieren auf drei grundlegenden Annahmen:

- Die Verkehrsteilnehmer bewerten den Nutzen einer Route. Der Nutzen einer Route ergibt sich aus verschiedenen Komponenten. Sie umfassen neben der Fahrzeit üblicherweise die Länge und die Kosten der Route. Da die Raumüberwindung Zeit und Geld kostet, ist der Nutzen einer Route negativ. Deshalb werden anstelle des Nutzens auch die Begriffe Widerstand oder generalisierte Kosten verwendet.
- Alle Verkehrsteilnehmer wählen die Route, die den höchsten Nutzen bzw. den geringsten Widerstand aufweist. Da die Routenwahl die Verteilung der Nachfrage im Netz bestimmt, beeinflusst sie gleichzeitig die Fahrzeiten und damit die Widerstände im Netz. Aus diesem Grund ist eine Rückkopplung zwischen den drei oben beschriebenen Teilmodellen erforderlich.
- Die Verkehrsnachfrage und das Straßennetz befinden sich über einen längeren Zeitraum in einem stationären Zustand. Diese Annahme unterstellt, dass die Verkehrsteilnehmer über die zu erwartende Verkehrslage im Netz informiert sind und ihre Routenwahl so anpassen, dass sich

das System in einem Gleichgewichtszustand befindet. In diesem Zustand wechseln die Verkehrsteilnehmer ihre Routen nicht mehr und die Fahrzeiten bleiben konstant.

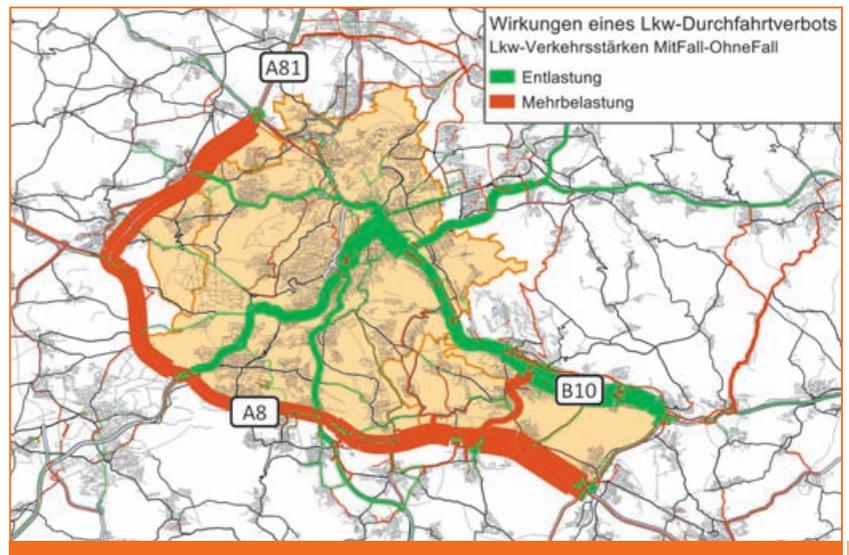
Für den Gleichgewichtszustand existieren zwei Hypothesen, die zu unterschiedlichen Modellen führen:

- **Deterministisches Nutzergleichgewicht:** Das sogenannte deterministische Nutzergleichgewicht (Deterministic User Equilibrium DUE) unterstellt, dass alle Verkehrsteilnehmer die gleiche perfekte Information über den Widerstand im Straßennetz haben. Das führt zu einem Zustand, bei dem sich die Verkehrsteilnehmer so auf die Routen verteilen, dass der Widerstand auf allen alternativen Routen gleich ist und jeder Wechsel auf eine andere Route den persönlichen Widerstand erhöhen würde (Wardrop [4]). Für alle benutzten alternativen Routen  $R$  (Verkehrsstärke  $q > 0$ ) muss also folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{w_i}{w_j} = 1, \forall j = 1 \dots R \text{ und } q_i > 0 \text{ bzw. } q_j > 0$$

- **Stochastisches Nutzergleichgewicht:** Der Ansatz des deterministischen Nutzergleichgewichts kann auf ein stochastisches Nutzergleichgewicht (Stochastic User Equilibrium SUE) erweitert werden, bei dem die Verkehrsteilnehmer über keine vollständigen Informationen verfügen und ihre subjektive empfundene Fahrdauer optimieren. Beim stochastischen Nutzergleichgewicht wird die Nachfrage abhängig vom Widerstand der Routen mit einem ökonomischen Entscheidungsmodell auf die Alternativen verteilt.

Offensichtlich ist die Annahme perfekter Information im deterministischen Nutzergleichgewicht in der Realität angesichts der stochastischen Prozesse im Straßenverkehr nicht wirklichkeitsnah. Aufgrund seiner mathematischen Eigenschaften bietet sich dieses Modell trotzdem für die Analyse und Bewertung konkurrierender Maßnahmen im Rahmen der Straßennetzplanung an. Für die kurzfristige Prognose der Routenwahl im Rahmen der Verkehrssteuerung ist dagegen das stochastische Nutzergleichgewicht ein geeignetes Modell. In diesem Modell kann auch das Verhalten unterschiedlicher Nutzerklassen mit spezifischer Informationsverfügbarkeit nachgebildet werden. Neben diesen beiden Gleichgewichtszuständen gibt es einen



Wirkungen eines Lkw-Durchfahrtsverbots durch Stuttgart in Verbindung mit einem Tempolimit auf der B 10.

dritten Zustand, der als Systemoptimum bezeichnet wird:

$$\sum_i^R q_i \cdot w_i \stackrel{!}{=} \min$$

- Im Fall des Systemoptimums (SO) werden die Fahrten so auf die Menge der Routen  $R$  aufgeteilt, dass das Produkt aus Widerstand  $w$  und Verkehrsstärke  $q$  über alle Routen minimal ist.

Damit wird ein Zustand erreicht, bei dem der Aufwand im gesamten Netz in der Summe über alle Verkehrsteilnehmer am kleinsten ist. Um diesen systemoptimalen Zustand zu erreichen, müssen einzelne Verkehrsteilnehmer bereit sein, zugunsten anderer eine für sie ungünstigere Route zu wählen. Das Systemoptimum ist insbesondere in Verbindung mit der Abfahrtszeitwahl ein interessanter Zustand für ein zukünftiges Verkehrsmanagement. In den meisten Fällen verfügt das Straßennetz außerhalb der Hauptverkehrszeit über freie Kapazitäten. Im Sinne eines Systemoptimums wäre es also wünschenswert, Fahrten aus der Hauptverkehrszeit in benachbarte Zeiträume geringerer Nachfrage zu verlagern. Im Gesamtergebnis würde das zu höheren Geschwindigkeiten im Netz führen. Ein derartiges altruistisches Verhalten ist im Straßenverkehr jedoch von den Verkehrsteilnehmern kaum zu erwarten. Um sich trotzdem dem Zustand eines Systemoptimums zu nähern, bieten sich tageszeit- bzw. nachfrageabhängige Straßenbenutzungsgebühren an. Die Gebühren müssten auf Strecken und zu Zeiten hoher Nach-

## DER AUTOR


**PROF. DR.-ING.  
MARKUS FRIEDRICH**

leitet seit Juli 2003 den Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik an der Universität Stuttgart. Von 1995 bis 2003 war er bei der PTV AG in Karlsruhe verantwortlich für den Bereich Planungssysteme Verkehr. Er studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München und promovierte hier über Entwurfsverfahren für den öffentlichen Verkehr.

**Kontakt**

Institut für Straßen- und Verkehrswesen  
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik  
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart  
Tel. 0711/685-82480, Fax 0711/685-82484  
E-Mail: [vuv@isv.uni-stuttgart.de](mailto:vuv@isv.uni-stuttgart.de), <http://www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/>

frage teuer und in der Nebenverkehrszeit vergleichsweise preiswert sein. Die so erzielten Erlöse können entweder zur Finanzierung des Verkehrsangebots verwendet werden oder direkt an die Bürger – nicht an die Autofahrer – ausgezahlt werden.

Routenwahl- bzw. Umlegungsmodelle werden derzeit in Deutschland auch zur Analyse der Wirkungen von Lkw-Durchfahrtsverboten herangezogen. Mit diesen Durchfahrtsverboten soll der Transitverkehr durch dicht besiedelte Gebiete vermieden und die Lärm- und Luftverschmutzung reduziert werden. **os** zeigt Ergebnisse einer Verkehrsmodellierung für den Lkw-Verkehr in einer Differenzdarstellung.

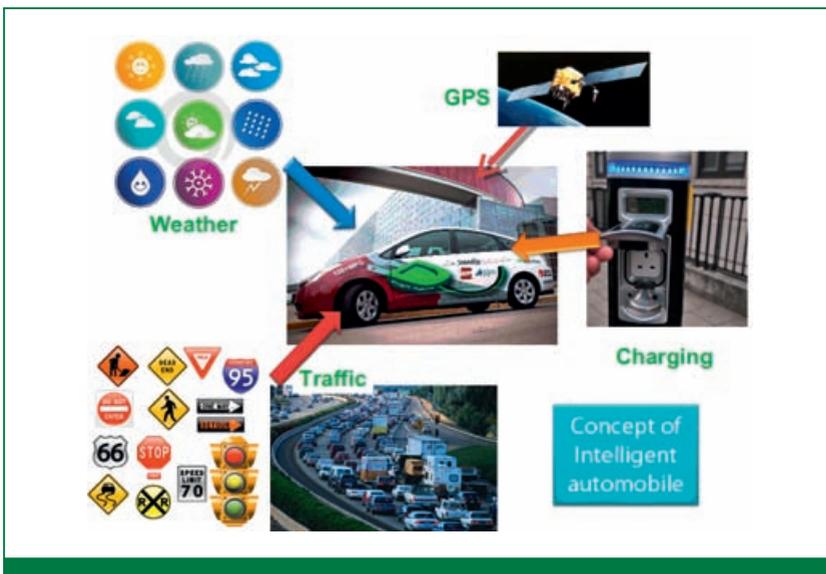
Grundlage sind zwei Verkehrsumlegungen: eine Umlegung für den Zustand ohne Durchfahrtsverbot und eine Umlegung für den Zustand mit Verkehrsumlegung. Auch wenn nur die Verkehrsstärken im Lkw-Verkehr dargestellt sind, berücksichtigt das Modell sowohl Pkw- als auch Lkw-Fahrten. Da Pkw und Lkw das gleiche Straßennetz benutzen, beeinflussen Maßnahmen im Lkw-Verkehr auch die Routenwahl im Pkw-Verkehr. • Markus Friedrich

**Literatur**

- [1] Mandir, E., Pillat, J., Friedrich, M., Schiller, C. (2010): Choice Set Generation and Model Identification for Route Choice Using GPS-Data from Smart Phones, Proceedings of the Conference on Innovations in Travel Modeling of the Transportation Research Board, Tempe, Arizona.
- [2] Schlaich, J., Otterstätter, T., Friedrich, M. (2010): Generating Trajectories from Mobile Phone Data, Compendium of Papers DVD of 89th Annual TRB Meeting, Transport Research Board, Washington D.C.
- [3] Schlaich, J. (2010): Analyses of Route Choice Behavior using Mobile Phone Trajectories, Compendium of Papers DVD of 89th Annual TRB Meeting, Transport Research Board, Washington D.C.
- [4] Wardrop, J.G.: Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings, Institute of Civil Engineers, PART II, Vol.1, pp. 325-378., London, 1952.

# Intelligent Energy Management

of Plug-In Electric Vehicles with environment and traffic awareness



## 1. Introduction

Public awareness of climate change and of the importance of energy savings is increasing and governments are encouraging the use of renewable energy. A clear correlation can be observed between vehicle density (cars per 1000 inhabitants) and a country's GDP (gross domestic product); this suggests that as densely populated countries such as China, India, and Brazil achieve higher economic status, it can be expected that the demand for personal transportation will increase accordingly. Today, this demand can be directly translated into increased demand for petroleum, a fact that is hardly compatible with current data on oil production.

Plug-In Electric Vehicles (PEVs, whether hybrid or battery-only) are receiving a great deal of interest in the United States due to their energy efficiency, convenient and low-cost recharging capabilities and

reduced use of petroleum. Recent improvements in lithium batteries technology are making PHEVs (plug-in hybrids) in particular a viable solution to reduce cost, petroleum consumption and emissions from the transportation sector. PHEVs aim at bridging the gap between pure electric vehicles and conventional vehicles using a hybrid electric powertrain [1]. Similar to a hybrid electric vehicle (HEV), a PHEV is powered by two energy sources, gasoline and electricity. In a HEV, the battery is charged using the engine and regenerative braking and the battery state of charge is maintained around a constant value throughout the driving cycle. The improvement in fuel economy of HEV is achieved by the optimization of power split between battery and engine. A PHEV has greater battery capacity than a HEV and the ability to charge the battery from external sources such as the power grid, solar power, etc. The external charging ability allows the PHEV battery to be depleted during the vehicle operation and be charged when the vehicle is plugged-in, thus using electrical energy as a transportation fuel and displacing gasoline.

01 shows that a typical U.S. driver may benefit from a 50 percent reduction in total yearly operation costs [2]. In 01, D1, D2 and D3 represent typical driving days for a U.S. driver, wherein D1 represents a typical commute to work; D2 represents a commuting day plus evening errands; D3 mimics a weekend trip, and the entire year is comprised of a suitably balanced mix of these representatives driving patterns.

In addition to fuel consumption and cost of operation, another important factor for a PHEV is the combined CO<sub>2</sub> emissions from vehicles and electric power plants. The total CO<sub>2</sub> emissions depend on the genera-

tion mix used to charge the PEV and therefore any results will depend on the regional power generation mix.

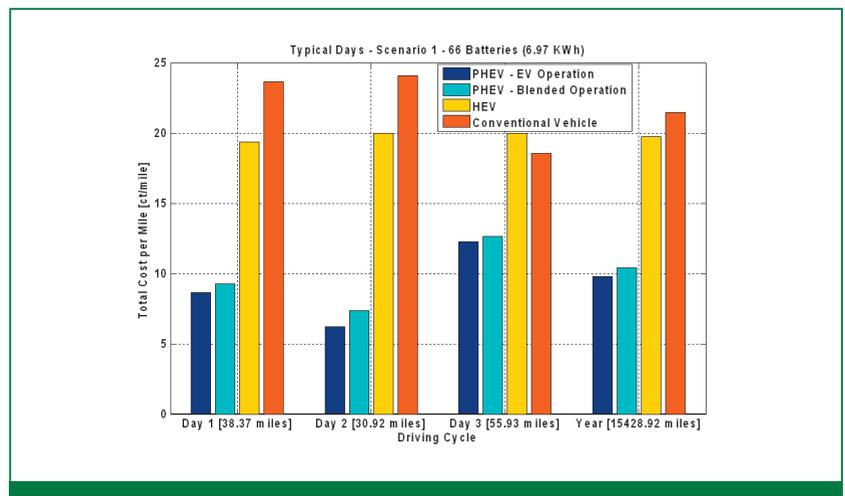
**02** shows that CO<sub>2</sub> emissions related to the automotive sector could be decreased by PHEV and HEV use, in particular using a low-carbon source of energy (such as nuclear or renewable) to recharge PHEVs batteries, CO<sub>2</sub> emissions could be drastically reduced.

**03** shows the impact of different generation mix on total CO<sub>2</sub> emissions, comparing annual per vehicle CO<sub>2</sub> emissions of a PHEV charged with different countries' energy mix, e.g. in Switzerland the electricity is produced using hydroelectric and nuclear plants without emitting GHG therefore a PHEV will not produce pollutants emissions to recharge its batteries [3].

## 2. Energy management of PHEVs

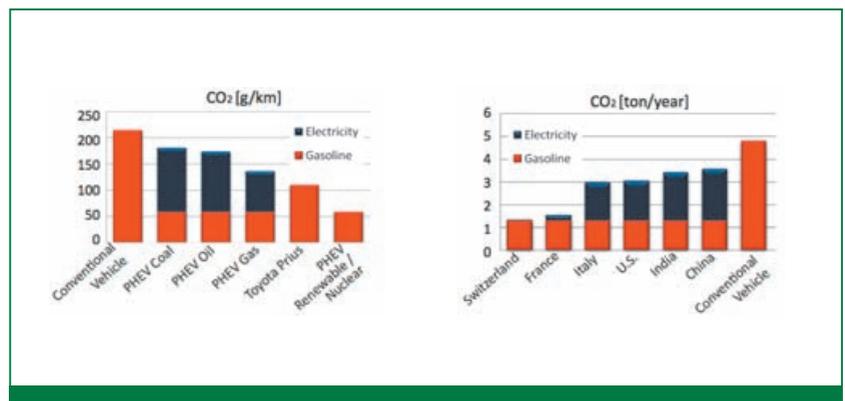
Energy management algorithms for PHEVs are crucial for vehicle performance. Energy management strategies in a PHEV are similar to those employed in HEVs, with the additional degree of freedom corresponding to the ability to deplete the battery pack to obtain electric tractive power in significant quantities, coupled to the possibility of recharging the pack [4].

A heuristic comparison of different energy management strategies with respect to online implementation and information requirements is graphically shown in **04**. Dynamic Programming (DP) is a numerical optimization methodology that can compute the optimal solution, but that it is practically impossible to implement on a vehicle since it requires complete information of the future driving cycle. DP also requires a large amount of memory and computational power to perform the optimization. Other algorithms, such as rule-based algorithms, or other online optimization methods like Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS) [5] and stochastic dynamic programming [6], can on the other hand be implemented on board of a vehicle. These algorithms do require some information to perform offline optimization or tuning of the parameters but it is typically less than that required by dynamic programming. As one might imagine, there is a trade-off between information requirements and algorithm performance. For instance, the EV mode control is a simple method with two stages – charge depleting



Comparison of PHEV with HEV and conventional vehicle based on operating cost for typical US driver.

01



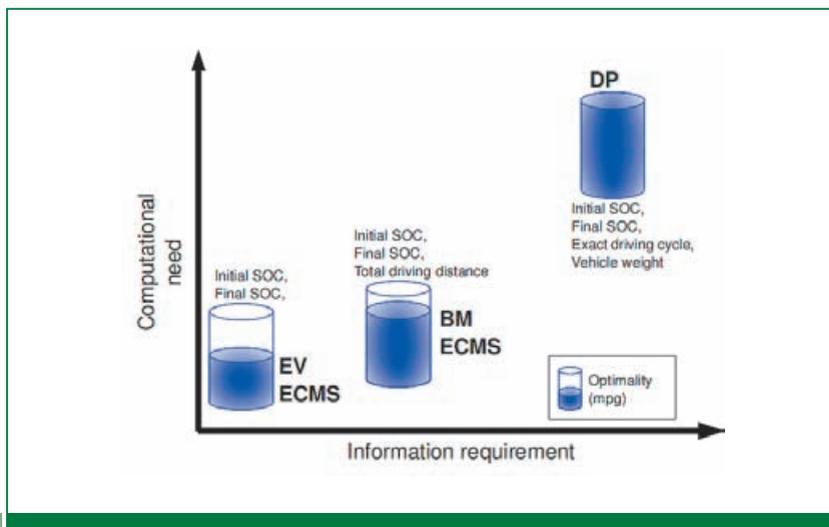
Vehicles CO<sub>2</sub> emissions comparison.

Effect of generation mix on CO<sub>2</sub> emissions.

02/03

## SUMMARY

The desire to reduce carbon emissions due to transportation sources has led over the past decade to the development of new propulsion technologies, focused on vehicle electrification (including hybrid, plug-in hybrid and battery electric vehicles). These propulsion technologies, along with advances in telecommunication and computing power, have the potential of making passenger and commercial vehicles more energy efficient and environment friendly. In particular, energy management algorithms are an integral part of plug-in vehicles and are very important for achieving the performance benefits. The optimal performance of energy management algorithms depends strongly on the ability to forecast energy demand from the vehicle. Information available about environment – temperature, humidity, wind, road grade etc., and traffic – traffic density, traffic lights etc., is very important in operating a vehicle at optimal efficiency. This article outlines some current technologies that can help achieve this optimum efficiency goal. In addition to information available from telematic and geographical information systems, knowledge of projected vehicle charging demand on the power grid is necessary to build an intelligent energy management controller for future plug-in hybrid and electric vehicles. The impact of charging millions of vehicles from the power grid could be significant, in the form of increased loading of power plants, transmission and distribution lines, emissions, and economics. Therefore this effect should be considered in an intelligent way by controlling/scheduling the charging through a communication based distributed control.



04

Comparison of the control strategies.  
 DP: Dynamic Programming,  
 BM ECMS: Blended Mode control  
 using ECMS, EV ECMS: EV mode  
 using ECMS. (ECMS: equivalent  
 consumption minimization strategy).

(all electric) and charge sustaining. The control algorithm selects only the electric motor as long as the battery state of charge (SOC) is greater than a threshold value. Once the SOC reduces below this value, the control algorithm switches to charge sustaining (PHEV behaving like a HEV). In blended mode control, the objective is to achieve lower limit of SOC only at the end of trip. The battery SOC is reduced slowly throughout the trip, and the SOC profile followed in this control can be optimally selected by principles from optimization theory, like dynamic programming. This method can provide better fuel economy, but at the cost of higher information requirement.

ECMS is based on the fact that in general a hybrid vehicle the energy consumption from the battery is replenished by running the engine. Therefore, battery discharging at any time is equivalent to some fuel consumption in the future. For PHEV applications, the ECMS needs to consider also the energy coming from the grid: this effective fuel consumption is used as the objective function for control optimization while the input to the ECMS algorithm is total power demand. The ECMS searches the best combination between the engine and motor power, which minimizes the effective fuel consumption.

### 3. Information requirement

Driving cycles and velocity profiles have great impact on PHEV performance in terms of overall energy consumption, fuel economy and emissions. Many researchers

have suggested that road type and traffic condition, driving habits, and vehicle operation modes have various degrees of impacts on vehicle fuel consumptions. In addition, incorporating knowledge derived from intelligent transportation systems about online driving pattern recognition and traffic and geographical information in control strategies is another path towards the optimization of PHEV energy management.

The performance of the energy management algorithm is closely related to the power demand throughout the driving trip. The power demand depends on the road, weather conditions and velocity profile, which in turn is dependent on traffic and geography. The performance of energy management can be improved if it is optimized for the driving conditions and weather pattern. Therefore, information about the driving route, a weather forecast, and traffic conditions, are very important in guaranteeing optimal performance of the energy management strategy. Intelligent Transportation Systems (ITS) allow the vehicle to communicate with other vehicles and the infrastructure to collect information about surrounding and expected events in the future, e.g. traffic condition, turns, road grade, rain, snow, temperature, etc. Such information is useful for the energy management algorithm optimization and plays crucial role in the fuel economy and battery utilization, as it can assist in designing algorithms such as stochastic dynamic programming, model predictive control, etc. ITS information can be utilized for long-term trip forecast as well as short-term velocity and power profile prediction. Static and dynamic information including road grade and road surface conditions, speed limits, traffic light locations and timing, and real-time traffic flow speeds can be used to build a long term forecast of the overall trip to the destination. At the same time, information about the immediate surroundings, such as lane changing and turning decisions of the host and surrounding vehicles, and estimation of waiting time for turning on red, left turns and stop sign queuing, is helpful for refining short term prediction of future driving profile. ITS information can improve vehicle energy efficiency and mobility with route planning. Road static information, real-time traffic flow, battery charging station locations and real-time

prices and other information is useful in determining an optimal route for energy efficiency and short travel time. 05 shows a concept of such an intelligent energy management algorithm and its integration with ITS data.

An intelligent energy management algorithm will have access to GPS location of the vehicle along with expected route information, traffic conditions, current temperature, and driving history of the vehicle. Based on this information the vehicle energy management algorithm will forecast the traffic condition, and power demand from the vehicle. The algorithm will then optimize its decisions to optimally select battery usage and reduce fuel consumption, emissions, etc. In this way an intelligent energy management strategy will adapt itself to the changing weather and traffic conditions to give best performance.

It is worth noting that the future information about the weather, velocity profile and PHEV charging is not exact and complete i.e. it is not possible to predict exact velocity profile for complete driving trip, but it is possible to predict the velocity profile in statistical sense i.e. prediction of average velocity, average acceleration, idle time, stop time etc. It is also possible to predict the availability of charging station, cost of electricity etc. to control the battery state of charge and charging. Such quantities can be calculated from trip information, GPS, communication with the infrastructure etc.; also many conditions can be predicted for weather, e.g. temperature, rain, snow etc. The task of predicting all such quantities and use them to perform energy management optimization is clearly overwhelming. One objective of this article is to suggest the most important factors that affect the performance of the energy management system. For example, the velocity profile depends on the road events and traffic conditions such as a traffic light, stop sign, pedestrian crossings, etc. Similarly, the initial SOC is a function of charging habits and infrastructure availability. We call the systematic analysis of these conditions Impact Factor Analysis, and describe it in the next section.

#### 4. Impact factor analysis

The research described here is centered on real world driving data from a PHEV fleet

operated by Center for Automotive Research at The Ohio State University. This database currently contains more than 100,000 miles of vehicle data throughout the year with many different variables such as longitude, latitude and altitude from GPS, vehicle velocity, coolant temperature, fuel consumption, battery SOC, current etc. from vehicle CAN bus, along with time and date. The GPS data is sufficiently accurate so that it can be used to exactly locate the vehicle on the road and also determine the lane. This data is used in this analysis to find the velocity traces during road events and then perform the statistical analysis.

In this process, an Impact Factor Knowledge Base has been constructed, with important information on which factors have the largest impact on performance, and which factors are most important for subsequent development of energy management strategies in optimizing fuel economy. Using these tools, a generalized sensitivity analysis will be conducted to delineate and prioritize variables, configuration/sizing and control parameters, usage pattern, etc. according to performance benefits. The initial part of this task is to intelligently reconstruct a real world dynamic transportation map from both the static data (GPS, GIS, Mapping, etc.) and dynamic data (V2I, V2V information exchange/broadcast) for the purpose of PEV energy management optimization. The critical task is to identify what information can be used to improve fuel economy and to determine the requirements on this information.

Different events are defined for weather, road, driving and charging conditions e.g., traffic lights, stop signs, turns, lane changing, driving in snow, rain, temperature effect, charging availability, charging power, etc. A more elaborate list is given in Table 1. Initially, the impact of the single events on the velocity profile is analyzed. The goal is to determine how such events affect velocity profile of the vehicle and how this information can be used to optimize the PHEV energy management strategy. Next, a specific route is consid-



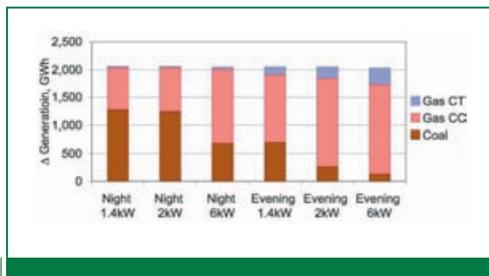
Concept of intelligent energy management for a PHEV.

Weather conditions	Road and traffic	Charging
Snow	Intersections (Stop signs, Yield signs, Turns)	Availability (At home, Workplace)
Rain	Road grade	Policy (Controlled, Uncontrolled)
Fog	Traffic light (Numbers, Stop time, Distance between lights, Synchronized?)	Charging power (Level I, Level II)
Wind	Traffic density	Electricity cost
Ice	Pedestrian crossing	
Temperature	Ramps	
	Speed limits	

TO1

Impact Factors.

ered to find the important velocity statistics e.g., average velocity, maximum acceleration, stop time, etc. which have large impact on the fuel consumption. Similarly, the effects of ambient temperature, humidity, and air density on PHEV energy utilization and fuel economy are analyzed.



06

Effect of charging time on generation mix [7].

## 5. PHEV charging

Local distribution grid load pattern may change and some power lines, substations can become overload quickly. The charging load can increase the emissions from the power generators based on the generation mix of the power grid. The

increase can be very high that that the net emission (tailpipe + power grid) could be larger than that of the conventional vehicles.

PHEV charging is performed when the vehicle is stopped. So the charging time and duration is dependent on the user. Vehicle charging is reflected as a load or demand on the grid, so it is necessary to study the effect of vehicle on the grid and the effect of different level of market penetration of PHEVs into the automotive sector. As the number of vehicles increase the charging demand may exceed the grid capacity or may cause severe constraints on its operation. The time and location of the vehicles determine whether the effect of the PHEV charging will be on local grid or regional power system. PHEV charging may require

more generation capacity, more transmission and distribution capacity to meet the electrical power demand. One possible behavior, which could be rewarded by appropriate electricity pricing policies, would see PHEVs being charged primarily at night, with reduced effects on the grid. But in general, charging time during the daytime is a very important factor in determining the fuel consumption, emissions and cost of electricity for a PHEV, as illustrated in **06. 06** shows the result of a study performed using the ORCED model for generation dispatch in the Virginia-Carolina control region [7]. The time of charging decides which generators will be used to satisfy the increased demand; for example, evening charging would increase natural gas combined-cycle generation while night time charging would increase coal-fired power generation, with clear implications with respect to cost and emissions.

Thus, time-of-charging can have a significant impact on the emissions and the generation associated with electricity used as a transportation fuel. From the figure, it is clear that in most cases the power plants used to satisfy incremental loads in the early evening are gas combined cycle and gas turbine power plants. The evening scenarios have the majority of the generation coming from these plants, while in the nighttime charging scenarios most of the added generation comes from coal. Although night charging will result in minor impact on the grid, it is worth noting that the energy mix for night charging has a higher coal-fired plant content.

Therefore, apart from the optimization of energy management of PHEVs, it is also important to intelligently control the charging behavior. If all vehicle controllers independently decided to charge without any external signal, grid stability could be compromised. Therefore it is necessary to provide a centralized charge-enabling control to each vehicle. This control could be provided by the grid operator (e.g.: an Independent System Operator, or ISO). The concept of 'Smart Charging' relies on communication interface between the power grid and the vehicle to control the charging time and avoid diverse effect on the power grid. Each vehicle is equipped with a communication interface, either a wireless link, internet connection etc. This interface provides the commands to the

vehicle and also it sends signals back to ISO. The signals may include power availability in the vehicle battery, power usage history, power absorbed from and supplied to the grid etc.

## 6. PHEV impact on transformer

The characteristics of electric power generation, transmission and distribution in the U.S. are such that experts have clearly identified local distribution as the most likely component of the chain to be adversely affected by unregulated PEV charging. This section presents one study performed to find the impact of PEV charging on the local distribution transformer. The findings of this study may assist in determining the most suitable local/regional charging strategies for PEVs. Currently, in the U.S. electric power to single-occupancy home residence is provided by a transformer that typically feeds several units (4-10 houses depending on the transformer size), as shown in 07. Based on the existing design, the total power load is less than the maximum limit of the transformer, which means that the transformers can work safely, without overheating, and meet their intended design life of at least 20 years. However, with more and more PEVs to be used in the future, will residential transformers still be able to meet the new load demand without undue reduction in their life? Currently, there are three levels of charging rates for PEVs: level I to level III. For the purpose of illustration, we consider level-II charging, which delivers approximately 4 kW at 240 V.

Transformer life is a complicated function of electrical load and ambient temperature. Generally, heat is the biggest enemy of transformer life. One simple rule of transformer safe use of to set a limit to peak load duration, based on some empirical tables or maps, such that during a day the transformer load cannot exceed some value, which is determined by the preload level.

08 takes a 25-kVA transformer for example. In this case, we assume that four PHEVs are charged at night with Level II charging. A simple estimate shows that the average preload for the 25-kW transformers is about 75 percent. Based typical industry guidelines, to meet its design life goals, peak load (about 37.5 kW) should not

exceed 3 hours for the transformer. Obviously a PEV without any intelligent control cannot guarantee that the transformer will not be overloaded for an excessive period of time. It should be expected that in the future intelligent PEVs will have access to this information from the utility companies via a communication link, and will be able to make decisions about charging time and power considering the limitations of the local distribution system.

## 7. Closure

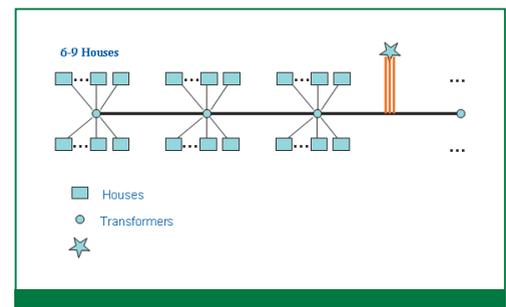
Advances in GPS, telecommunication, and portable computing devices will change many aspects of vehicle energy management. This article suggests that in the future we will see fuel-efficient, environment- and traffic-aware vehicles that integrate ITS and telematic systems with electrified propulsion technology to achieve optimal energy management.

Further, the impact of PEVs on the power grid cannot be neglected when large numbers of these vehicles are introduced in the market; thus, consideration of increased electric power demand and of the timing of vehicle charging must be included in the control/optimization process. In the future it will become necessary to analyze information in real time to quantify the effects of infrastructure, environment, and traffic flow on vehicle fuel economy and emissions, and to permit the application of forecasting and optimization methods for the energy management of plug-in electric and hybrid vehicles.

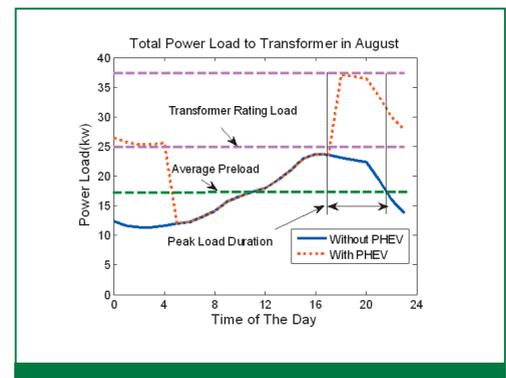
## Acknowledgments

This work has been supported in part by the Ford Motor Company and the Ohio State University CAR Industrial Consortium (<http://www.car.osu.edu/Consortium>).

Giorgio Rizzoni, Vincenzo Marano,  
Pinak Tulpule and Qiuming Gong



Topology of power grid and houses.



PHEV load on the transformer. Red dotted line shows increased demand from PHEV charging.

## References

- Stockar, S., Tulpule, P., Marano, V. and Rizzoni, G., "Energy, economical and environmental analysis of plug-in hybrid electric vehicle based on common driving cycles", SAE International Journal of Engines, Vol. 2, No. 2, pp.467–476, 2010.
- Tulpule, P., Marano, V. and Rizzoni, G. "Effects of different PEV control strategy on vehicle performance", American Control Conference (ACC 2009), St Louis, Missouri, 2009.
- Sioshansi, R., Marano, V. and Fagiani, R., 'Cost and Emissions Impacts of Plug-In Hybrid Vehicles (PEVs) on the Electric Power Grid', SEEP2010 Conference Proceedings, Bari, Italy, 2010.
- Karbowski, D., Rousseau, A., Pagerit, S. and Sharer, P. "Plug-in vehicle control strategy: from global optimization to real-time application," 22nd Electric Vehicle Symposium, EVS22, Yokohama, Japan, 2006.
- Tulpule, P., Marano, V. and Rizzoni, G. "Energy management for plug-in hybrid electric vehicles using equivalent consumption minimization strategy", International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, Volume 2, Number 4, 2010.
- Moura, S., Callaway, D., Fahty, H. and Stein, J. "Tradeoffs between battery energy capacity and stochastic optimal power management in plug-in hybrid electric vehicles," Journal of Power Sources, Vol. 195, pp.2979–2988, 2010.
- Hadley, S., "Evaluating the Impact of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Electricity Supplies," iREP Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control - VII, Revitalizing Operational Reliability, Charleston, SC, US, 2007.

## THE AUTHORS

**DR. GIORGIO RIZZONI**

*the Ford Motor Company Chair in ElectroMechanical Systems, is a Professor of Mechanical and Electric Engineering, and an Adjunct Professor of Industrial Design at The Ohio State University. He received his B.S. (ECE) in 1980, his M.S. (ECE) in 1982, his Ph.D. (ECE) in 1986, all from the University of Michigan (UM). Between 1986 and 1990 he was a post-doctoral fellow, assistant research scientist and lecturer at UM. He joined the Ohio State University Department of Mechanical Engineering in 1990. He has held visiting positions at the Universita' di Bologna, Italy, the Swiss Federal Politechnic Institute (ETH), Zürich, Switzerland, Politecnico di Milano, and Politecnico di Torino. Since 1999 he has been the director of the Ohio State University Center for Automotive Research (CAR), an interdisciplinary university research center in the college of engineering. CAR conducts research on advanced automotive and transportation technologies and systems engineering, focusing on sustainable mobility, advanced propulsion systems, human safety and the environment. Dr. Rizzoni's research interests are in system dynamics, measurements, control and fault diagnosis with application to automotives systems. He has a special interest in future ground vehicle propulsion systems, including advanced Diesel engines, electric and hybrid-electric drivetrains, and fuel cell systems.*

**DR. VINCENZO MARANO**

*is a Senior Research Associate at The Ohio State University Center for Automotive Research (CAR). He received his B.S./M.S. in Mechanical Engineering in 2003 and his Ph.D. in Mechanical Engineering in 2007, all from the University of Salerno (Italy). He started his collaboration with CAR in 2005 while working on his Ph.D. and then was appointed as Postdoctoral Research Fellow in 2007. His research interests are in the areas of energy systems and alternative vehicles. Dr. Marano coordinates and conducts research on plug-in hybrid electric vehicles, energy storage, energy management, control strategies for PHEVs, their interaction with renewable energy sources and the grid, macroeconomics and energy policy. Dr. Marano is currently involved with Oak Ridge National Laboratory (ORNL), General Electric (GE), Electric Power Research Institute (EPRI), in a Department of Energy (DOE) program aiming at studying benefits, barriers, opportunities, and challenges of grid-connected, plug-in hybrid vehicles (PHEV) in order to establish potential value propositions that will lead to commercially viable PHEVs. Since 2008, Dr. Marano has served as program manager of the SMART@CAR consortium, a collaborative research program of The Ohio State University – Center for Automotive Research with participation of major automotive OEMs and electric power companies.*

**PINAK TULPULE**

*is a Ph.D. student at the Electrical and Computer Engineering Department at The Ohio State University, US. He is a graduate research assistant at the Center for Automotive Research. He completed his bachelor's degree from Pune University, India, in 2004, and master's degree from West Virginia University, US, in Power Systems, in 2007. He has worked on multi-agent energy management systems for power grid during his master's degree. His current research includes energy management of plug-in hybrid vehicles and solar powered charging infrastructure for PHEVs and EVs. He is interested in renewable energy integration with transportation and power sector.*

**QIUMING GONG**

*is currently a Ph.D. student in Mechanical Engineering at the Center for Automotive Research, The Ohio State University. He got his B.S. in Automotive Engineering from Jilin University in China, 2003, and M.S. in Mechanical Engineering from University of Wisconsin-Milwaukee, 2007. His research interests are control and optimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicles.*

**Contact**

Center for Automotive Research – The Ohio State University  
930 Columbus OH 43212, U.S.A., <http://car.eng.ohio-state.edu/>