

ATZ/MTZ-Fachbuch

Wolfgang Siebenpfeiffer *Hrsg.*

# Energieeffiziente Antriebstechnologien

Hybridisierung - Downsizing - Software  
und IT

 Springer Vieweg

---

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

---

Wolfgang Siebenpfeiffer (Hrsg.)

# Energieeffiziente Antriebstechnologien

Hybridisierung – Downsizing –  
Software und IT

Mit 238 Abbildungen und 16 Tabellen

 Springer Vieweg

*Herausgeber*  
Wolfgang Siebenpfeiffer  
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-00789-8  
DOI 10.1007/978-3-658-00790-4

ISBN 978-3-658-00790-4 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg  
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist ein Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Vorwort

Die Fahrzeug- und Motorenentwicklung hat in der zweiten Dekade dieses Jahrhunderts infolge gesetzlich verordneter CO<sub>2</sub>-Senkungsmaßnahmen bisher ungewöhnliche Fortschritte erreicht. Daher sieht es der Verlag Springer Vieweg als seine Pflicht an, die in den Fachmedien ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, MTZ Motortechnische Zeitschrift und ATZ-elektronik aktuell dokumentierten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit diesem ATZ/MTZ-Fachbuch einem größeren und interessierten Publikum in einer Auswahl vorzustellen.

Mit dieser fundierten Übersicht erhalten Sie einen Einblick in alle Teilgebiete des Kraftfahrzeugbaus, die einen entscheidenden Einfluss auf die Reduzierung des Energieverbrauchs ausüben und damit zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Schwerpunkte bilden neue Fahrzeug- und Motorisierungskonzepte mit dem Ziel, durch intelligenten Leichtbau und effizientere Verbrennungsmotoren weitere Potenziale zu nutzen. Alternative Antriebssysteme, wie Hybrid- und batterieelektrische Antriebe, kommen zunehmend in

den Fokus und werden durch Ökobilanzen betrachtet. Der Einfluss der Elektronik auf die Komponenten- und Gesamtfahrzeugentwicklung hat stark zugenommen. Umso mehr ist der Umgang mit der Komplexität der einzelnen Systeme derzeit und zukünftig eine große Herausforderung.

Wer sich ein Bild über die Entwicklungstrends für die Mobilität auf unseren Straßen verschaffen möchte, der wird aus der Lektüre dieses ATZ/MTZ-Fachbuches vielfachen Nutzen ziehen können. Eine weltweit steigende Nachfrage nach angemessenen Mobilitätslösungen wird den Wettbewerb unter den Antriebssystemen weiter anheizen. Eine Antwort auf die Frage, welche Systeme sich durchsetzen und wie die Zukunft des Verkehrs aussehen könnte, wird Ihnen jedenfalls nach der Betrachtung der Inhalte dieses Fachbuchs nicht mehr schwerfallen.

Stuttgart, Dezember 2012

*Wolfgang Siebenpfeiffer*

# Autorenverzeichnis

## „Bilanzen müssen vergleichbar werden“

### Interview mit Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp hat die Leitung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der TU München. Zudem leitet er dort das Wissenschaftszentrum Elektromobilität. Prof. Lienkamp ist wissenschaftlicher Berater des TUM-Create-Forschungsprojekts „Electromobility in Megacities“ in Singapur.  
Interview: Stefan Schlott  
Fotos: Matthias Haslauer

## Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen

Dr. Jens Warsen ist zuständig für Umweltbilanzen und Umweltprädikate in der Abteilung Umwelt Produkt der Volkswagen-Konzernforschung in Wolfsburg.

Dr. Stephan Krinke ist Leiter der Abteilung Umwelt Produkt bei der Volkswagen-Konzernforschung in Wolfsburg.

## Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben

Dr. Willibald Prestl ist Teamleiter Energie für nachhaltige Mobilität im Arbeitsgebiet Effiziente Dynamik bei der BMW AG in München.

Dr. Volkmar Wagner ist Teamleiter Nachhaltigkeit im Arbeitsgebiet Nachhaltigkeit, Werkstoffe und Betriebsfestigkeit bei der BMW AG in München.

## Benchmarking des Elektrofahrzeugs Mitsubishi i-MiEV

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein ist Leiter des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University.

Dipl.-Ing. René Göbbels ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Geschäftsbereich Karosserie des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University.

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Roland Wohlecker ist Teamleiter Strukturanalyse und Benchmarking der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen (fka) in Aachen.

## Entwicklung eines heckgetriebenen 800-V-Elektrofahrzeugs

Dr.-Ing. Armin Engstle ist Principal Engineer im Bereich Elektromobilität der AVL Software and Functions in Regensburg.

Dipl.-Ing. Mathias Deiml ist Leiter der Entwicklung VCU und E-Motor Controls bei der AVL Software and Functions in Regensburg.

Dipl.-Ing. Martin Schlecker ist Principal Engineer im Bereich Elektromobilität der AVL Software and Functions in Regensburg.

Dipl.-Ing. Anton Angermaier ist Segmentleiter des Bereichs Elektromobilität bei der AVL Software and Functions in Regensburg.

## Entwicklung eines CFK-Leichtbaurads mit integriertem Elektromotor

Dipl.-Ing. Nicole Schweizer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Kompetenzzentrum Betriebsfester Leichtbau des Fraunhofer LBF in Darmstadt.

Dipl.-Ing. Andreas Giessl war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzzentrum Betriebsfester Leichtbau des Fraunhofer LBF in Darmstadt und arbeitet jetzt bei Kayser Automotive Systems in Einbeck.

Dipl.-Ing. Oliver Schwarzhaupt  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzzentrum Betriebsfester Leichtbau des Fraunhofer LBF in Darmstadt.

### Elektrisches Hybridgetriebe für vielerlei Anwendungen

Dr.-Ing. Heinz Schäfer  
ist Geschäftsführer von Hofer Electronic Drive Systems in Würzburg.

### Das Siebengang-Mild-Hybrid-Getriebe 7HDT500

Dr.-Ing. Ingo Steinberg  
ist Plattform-Direktor für Doppelkupplungsgetriebe bei Getrag Ford Transmissions in Köln.

Dipl.-Ing. Erik Müller  
ist Senior-Manager Doppelkupplungsgetriebe bei Getrag Ford Transmissions in Köln.

Dipl.-Ing. Peter Dahl  
ist Senior-Manager Konstruktion bei Getrag Ford Transmissions in Köln.

### Optimiertes Klimaanlage für erhöhte Reichweite von Elektrofahrzeugen

Changwon Lee  
ist leitender Forschungsingenieur und Bauteilmanager im Bereich Thermal Management Systems bei Hyundai Motor Company in Seoul (Korea).

Jungho Kwon  
ist Forschungsingenieur im Bereich Thermal Management Systems bei Hyundai Motor Company in Seoul (Korea).

Youngrok Lee  
ist Forschungsingenieur im Bereich Thermal Management Systems bei Hyundai Motor Company in Seoul (Korea).

Jaehyun Park  
ist Forschungsingenieur im Bereich Thermal Management Systems bei Hyundai Motor Company in Seoul (Korea).

### Kann man mit dem Luftwiderstandsbeiwert die Batteriekosten senken?

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann  
ist Mitglied des Vorstands des Forschungsinstitut FKFS und leitet den Lehrstuhl Kraftfahrwesen des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart.

Dipl.-Ing. Andreas Wiesebrock  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Fahrzeugtechnik und Fahrodynamik am IVK der Universität Stuttgart.

Henrik Heidorn  
ist wissenschaftliche Hilfskraft am IVK der Universität Stuttgart.

### Elektrisch angetriebener Minibus für den ÖPNV

Dipl.-Ing. Felix Töpfer  
ist wissenschaftlicher Angestellter im Geschäftsbereich Antrieb am Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein  
ist Leiter des Instituts für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen.

Dipl.-Ing. Gerrit Geulen  
ist wissenschaftlicher Angestellter im Geschäftsbereich Elektronik am Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen.

Dipl.-Ing. Jérôme Homann  
ist wissenschaftlicher Angestellter und Teamleiter Konstruktion und Prototyping Antrieb bei der fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH.

### Energiemanagement für Nutzfahrzeuge der nächsten Generation

Tobias Töpfer, M. Sc.  
ist Entwicklungsingenieur im Fachbereich Nutzfahrzeuge mit dem Schwerpunkt Gesamtsysteme/Alternative Antriebe bei der IAV GmbH in Berlin.



Dr.-Ing. Lars Henning

ist Entwicklungsingenieur im Fachbereich Dieselentwicklung mit dem Schwerpunkt Antriebsmanagement bei der IAV GmbH in Berlin.

Dr.-Ing. Peter Eckert

ist Teamleiter für Thermodynamik/Analytik im Fachbereich Nutzfahrzeuge bei der IAV GmbH in Berlin.

Dr.-Ing. Jörn Seebode

ist Abteilungsleiter für Gesamtsysteme/Thermodynamik im Fachbereich Nutzfahrzeuge bei der IAV GmbH in Berlin.

### **Batteriepackage des E-Scooter-Konzepts von BMW Motorrad**

Dr. Christian Ebner

ist Fahrzeugprojektleiter im Bereich urbane Mobilität bei BMW Motorrad in München.

Kaspar Danzer

ist Baureihenleiter im Bereich urbane Mobilität bei BMW Motorrad in München.

Christoph Platz

ist Ingenieur für neue Fahrzeugkonzepte bei BMW Motorrad in München.

### **Dreizylinder-Ottomotor**

#### **mit Direkteinspritzung und Turboaufladung**

Rainer Friedfeldt

ist Leiter Motorenarchitekturen im Bereich Powertrain Research und Advanced bei der Ford-Werke GmbH in Köln.

Thomas Zenner

ist Leiter Dreizylinder-Eco-Boost-Motorsysteme und -integration bei der Ford-Werke GmbH in Köln.

Roland Ernst

ist Chief Program Engineer Dreizylinder-Ottomotoren bei der Ford-Werke GmbH in Dagenham (Großbritannien).

Andrew Fraser

ist Manager Entwicklung Ottomotoren bei der Ford Motor Company in Dunton (Großbritannien).

### **2,0-l-Biturbo-Dieselmotor von Opel mit Zweistufen-Ladeluftkühlung**

Dr.-Ing. Jens Wartha

ist Chefingenieur und Projektleiter 2,0-l-Dieselmotor bei GM Powertrain Europe in Turin (Italien).

Dr. Fredrik Westin

ist Senior-Freigabeingenieur für zweistufige Turbolader bei GM Powertrain Europe in Turin (Italien).

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Leu

ist Gruppenleiter Verbrennungskalibrierung bei der Adam Opel AG in Rüsselsheim.

Ing. Mirco de Marco

ist Systemingenieur 2,0-l-Dieselmotor bei GM Powertrain Europe in Turin (Italien).

### **Der neue 1,1-l-Dreizylinder-Dieselmotor von Hyundai**

Kyung Won Lee

ist Teilemanager für Pkw-Dieselmotoren im Engineering-Design-Team bei der Hyundai Motor Company in Seoul (Südkorea).

Kyoungh Ik Jang

ist Senior-Entwicklungsingenieur für Pkw-Dieselmotoren im Engineering-Design-Team, bei der Hyundai Motor Company in Seoul (Südkorea).

Jeong Jun Lee

ist Senior-Entwicklungsingenieur für Pkw-Dieselmotoren im Motortest-Team bei der Hyundai Motor Company in Seoul (Südkorea).

Dong Han Hur

ist Entwicklungsingenieur für Pkw-Dieselmotoren im Motortest-Team bei der Hyundai Motor Company in Seoul (Südkorea).

### **Der 1,4-L-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung**

Dr.-Ing. Hermann Middendorf

ist Leiter der Entwicklung EA111 Ottomotoren bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Dr.-Ing. Jörg Theobald  
ist Leiter der Vorentwicklung Ottomotoren bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Dipl.-Ing. Leonhard Lang  
ist Versuchsingenieur in der Applikation EA111 Ottomotoren bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Dipl.-Met. Kai Hartel  
ist Projektleiter für das Zylinderabschalt-Modul im Geschäftsfeld Komponente Motor bei der Volkswagen AG in Salzgitter.

### Elektrifizierung eines Downsizing-Ottomotors mit Aufladung

Jason King  
ist Chief Engineer Gasoline Engines and Hyboost bei Ricardo in Shoreham-by-Sea (Großbritannien).

Andrew Fraser  
ist Manager Gasoline Powertrain Development bei Ford in Dunton (Großbritannien).

Guy Morris  
ist Director Engineering and Chief Technical Officer bei Controlled Power Technologies in Laindon (Großbritannien).

David Durrieu  
ist Director Innovations bei Valeo Powertrain Systems in Cergy-Pontoise (Frankreich).

### Neue gießereitechnische Entwicklungen für Zylinderköpfe

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Stefan Scharf  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

### Grenzpoteziale der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Ottomotoren

#### Teil 1: Mechanische Verfahren

Prof. Dr.-Ing Rudolf Flierl  
ist Leiter des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Dipl.-Ing. Frederic Lauer  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Dipl.-Ing. Stephan Schmitt  
war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Prof. Dr.-Ing Ulrich Spicher  
ist Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

### Grenzpoteziale der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Ottomotoren

#### Teil 2: Entwicklung der Brennverfahren

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl  
ist Leiter des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Dipl.-Ing. Frederic Lauer  
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Dipl.-Ing. Stephan Schmitt  
war Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern.

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher  
ist Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

### Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz

#### Teil 1: Motor- und Abgasreinigungskonzept

Dr.-Ing. Hans-Otto Herrmann  
ist Bereichsleiter Entwicklung Medium-Duty-Motoren und Abgasnachbehandlungssysteme bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dipl.-Ing. (BA) Børge Nielsen  
ist Abteilungsleiter Mechanikerprobung OM 93x und war Entwicklungsprojektleiter für die neue Baureihe bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dipl.-Ing. (BA) Christian Gropp  
ist Abteilungsleiter Konstruktion OM 93x bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dipl.-Ing. Jürgen Lehmann  
ist Abteilungsleiter Thermodynamikentwicklung OM 93x bei der Daimler AG in Stuttgart.

### **Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz Teil 2: Applikation und Entwicklungsprozess**

Dipl.-Ing. (BA) Børge Nielsen  
ist Abteilungsleiter Mechanikerprobung OM 93x und war Entwicklungsprojektleiter für die neue Motorenbaureihe bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dipl.-Ing. Harald Huttenlocher  
ist Teamleiter FEM-Berechnung und war Teilprojektleiter CAE für den OM 93x bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dr.-Ing. Volker Schwarz  
ist Teamleiter Funktions- und Emissionsentwicklung Abgasnachbehandlungssysteme und Entwicklungsprojektleiter für die Euro-VI-AGN-Systeme OM 93x bei der Daimler AG in Stuttgart.

Dipl.-Ing. Markus Dietrich  
ist Teamleiter Konstruktion Grundmotor und Kreisläufe bei der Daimler AG in Stuttgart und zeichnete bereits für die ersten Konzeptentwürfe der neuen Baureihe verantwortlich.

### **„Die Kundenpreise in akzeptablen Größenordnungen halten“**

#### **Interview mit Dr.-Ing. Heinz-Jakob Neußer**

Dr.-Ing. Heinz-Jakob Neußer ist Leiter der Aggregateentwicklung bei Volkswagen in Wolfsburg.

Interview: Richard Backhaus

Fotos: Volkswagen

### **Pretended Networking**

#### **Migrationsfähiger Teilnetzbetrieb**

Jörg Speh  
arbeitet im Bereich E/E-Architektur bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Dr. Marcel Wille  
arbeitet im Bereich VW-Fahrzeugvernetzung und ist Autosar-Projektleiter für die Volkswagen AG in Wolfsburg.

### **Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug**

Dr.-Ing. Thomas Dörsam  
ist in Vorentwicklung Projektleiter für Bordnetzkonzepte bei der Daimler AG in Böblingen.

Dr.-Ing. Steffen Kehl  
ist Sachgebietsleiter verteilte Funktionen elektrische Energie und Verbrauch bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft in Weissach.

Dipl.-Ing. Andreas Klinkig  
ist Entwicklungsingenieur für Energiemanagement bei der Volkswagen AG in Wolfsburg.

Dipl.-Ing. André Radon  
ist Entwicklungsingenieur Bordnetzkonzepte und Energieeffizienz bei der Audi AG in Ingolstadt.

Ottmar Sirch  
ist Projektleiter Vorentwicklung Energiebordnetz bei der BMW Group in München.

### **Funktionen vereint Kombiinstrument, Infotainment und Flottenmanagement**

Philipp Hudelmaier  
ist Systems Engineer bei Fujitsu Semiconductor Europe in München.

### **Simulation hardwarespezifischer Komponenten von ECU-Software in der virtuellen Absicherung**

Dipl.-Ing. Markus Deicke  
ist Doktorand im Projekt Virtuelle Absicherungsplattform bei der BMW Group in München.

Prof. Dr. Wolfram Hardt  
ist Inhaber der Professur Technische Informatik und Leiter des Masterstudiengangs Automotive Software Engineering an der Technischen Universität Chemnitz.

Dr.-Ing. Marcus Martinus  
ist Projektleiter Virtuelle Absicherungsplattform  
bei der BMW Group in München.

### **Simuliertes GPS-Space-Segment und Sensorfusion zur spurgeauen Positionsbestimmung**

Dipl.-Ing. Tobias Butz  
ist Applikationsingenieur Testsysteme & Engineering  
bei IPG Automotive GmbH in Karlsruhe.

Dipl.-Ing. Uwe Wurster  
ist Leiter Testsysteme & Engineering bei IPG  
Automotive GmbH in Karlsruhe.

Prof. Dr.-Ing. Gert F. Trommer  
ist Professor am Institut für Theoretische  
Elektrotechnik und Systemoptimierung des  
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).

Dipl.-Ing. Matthias Wankerl  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für  
Theoretische Elektrotechnik und Systemoptimie-  
rung des Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).

### **IT-Sicherheit in der Elektromobilität**

Prof. Dr.-Ing. Christof Paar  
führt den Lehrstuhl Eingebettete Sicherheit an  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informati-  
onstechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Dr.-Ing. Marko Wolf  
ist Senior Security Engineer der Escrypte GmbH –  
Embedded Security in Bochum.

Dipl.-Ing. Ingo von Maurich  
ist Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Sichere Hardware  
an der Fakultät für Elektrotechnik und Informati-  
onstechnik der Ruhr-Universität Bochum.

### **Vollautomatische Kamera-zu-Fahrzeug- Kalibrierung**

Dipl.-Inf. Juri Platonov  
ist Systemberater Computer Vision bei ESG in  
München.

Pawel Kaczmarczyk (M.Sc.)  
ist Systemingenieur Computer Vision bei ESG  
in München.

Dipl.-Ing. Thomas Gebauer  
ist Systemingenieur Computer Vision bei ESG  
in München.

### **Standardisierung von HV-Bordnetzen aus Sicht der Leistungselektronik**

Univ.-Prof. Dr. Rik W. De Doncker  
ist Leiter des ISEA – Institut für Stromrichtertechnik  
und Elektrische Antriebe an der RWTH Aachen  
University.

Dipl.-Ing. Maurice Kowal  
ist Wissenschaftlicher Angestellter am ISEA –  
Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische  
Antriebe an der RWTH Aachen University.

Dipl.-Ing. Matthias Biskoping  
ist Wissenschaftlicher Angestellter am ISEA –  
Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische  
Antriebe an der RWTH Aachen University.

### **ISO 26262 – Muss das Rad neu erfunden werden?**

Dr. Matthias Klauda  
ist Leiter der Zentralabteilung Systemintegration  
Kraftfahrzeugtechnik bei der Robert Bosch GmbH  
in Abstatt.

Dr.-Ing. Reinhold Hamann  
bearbeitet den Themenschwerpunkt „Safety“ in der  
Zentralabteilung Systemintegration Kraftfahrzeug-  
technik bei der Robert Bosch GmbH in Abstatt.

Stefan Kriso  
ist Leiter des Center of Competence „Functional  
Safety“ und koordiniert konzernweit die Aktivitäten  
zur ISO 26262 bei der Robert Bosch GmbH in  
Abstatt.

### Verfahren zur Validierung der Dauerhaltbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Batteriesystemen

Klaus Denkmayr  
leitet die Abteilung Zuverlässigkeit und Risikomanagement im Geschäftsbereich Powertrain Engineering der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

Peter Gollob  
ist Projektleiter im Global Battery Competence Team der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

Johannes Schauer  
ist Technischer Statistiker Zuverlässigkeit und Risikomanagement bei der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

Uwe Wiedemann  
ist Product Manager im Global Battery Competence Team der AVL List GmbH in Graz (Österreich).

### Lithium-Ionen-Batterien

#### Elektrolyt ist die Schlüsselkomponente

Dr. Michael Schmidt  
leitet die Forschung und Entwicklung Batteriematerialien bei Merck in Darmstadt.

Dr. Mark Neuschütz  
verantwortet das Business Development Batteriematerialien bei Merck in Darmstadt.

### Wasser im Wein der Elektronikbegeisterung

#### Interview

Dr. Thilo Weichert ist Landesbeauftragter für Datenschutz in Schleswig-Holstein am unabhängigen Landeszentrum für Datenschutz in Kiel.

### „Wir wollen den elektrischen Stromverbrauch halbieren“

#### Interview mit Elmar Frickenstein

Elmar Frickenstein leitet den Bereich Elektrik/Elektronik und Fahrerarbeitsplatz bei der BMW Group in München und trägt die Gesamtverantwortung für die E/E-Prozesskette.

Interview: Markus Schöttle

Fotos: Matthias Haslauer

# Inhaltsverzeichnis

## Teil A

### Zukunftsmobilität, Hybridisierung und Elektrofahrzeuge

#### „Bilanzen müssen vergleichbar werden“

<b>Interview</b> .....	4
<b>Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen</b> .....	8
Motivation .....	9
Einbindung und Anwendung .....	9
Umweltstrategie und Ziele .....	9
Integrationsarbeit .....	10
Angemessener Zeitbedarf .....	10
Sichere und messbare Ziele .....	11
Kommunikationsstrategie .....	11
Beispiel intelligenter Leichtbau .....	12
Beispiel Warmumformen .....	13
Nachhaltige Antriebskonzepte .....	13
Schlussfolgerungen .....	14
<b>Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben</b> .....	16
Umfeld .....	17
Energiebedarf .....	17
Energie- und Kraftstoffversorgung .....	18
CO <sub>2</sub> -Bilanz im Fahrbetrieb .....	18
Nachhaltigkeitsbewertung über den gesamten Lebenszyklus .....	20
Zusammenfassung .....	21
<b>Benchmarking des Elektrofahrzeugs Mitsubishi i-MiEV</b> .....	22
Motivation .....	23
Gegenstand des Benchmarkings .....	23
Ergebnisse des Design-Benchmarkings .....	24
Ergebnisse der Karosserieanalyse .....	26
Ergebnisse der Antriebsanalyse .....	26
Ergebnisse der Fahrwerksanalyse .....	27
Ergebnisse hinsichtlich der Akustik .....	29
Zusammenfassung .....	29
<b>Entwicklung eines heckgetriebenen 800-V-Elektrofahrzeugs</b> .....	30
Motivation .....	31
Elektrisches Fahrzeugkonzept .....	31
Bordnetzentwicklung .....	33
Elektrischer Antriebsstrang .....	33
Traktionsmotor mit Direktfluidkühlung der Statorwicklung .....	33

Leistungselektronik .....	34
HV-Batterie .....	35
Zusammenfassung .....	35
<b>Entwicklung eines CFK-Leichtbaurads mit integriertem Elektromotor .....</b>	<b>36</b>
Motivation .....	37
CFK-Leichtbaurad mit integriertem Elektroantrieb .....	37
Konstruktion .....	38
Fertigung .....	39
Zusammenfassung und Ausblick .....	40
<b>Elektrisches Hybridgetriebe für vielerlei Anwendungen .....</b>	<b>42</b>
Motivation .....	43
Aufbau .....	43
Mögliche Betriebsarten .....	44
Zusammenfassung .....	47
<b>Das Siebengang-Mild-Hybrid-Getriebe 7HDT500 .....</b>	<b>48</b>
Motivation .....	49
Konstruktion .....	49
Systemauslegung .....	50
Simulationsergebnisse und Fahrzeugmessungen .....	51
Zusammenfassung und Ausblick .....	53
<b>Optimiertes Klimaanlage</b>	
<b>für erhöhte Reichweite von Elektrofahrzeugen .....</b>	<b>54</b>
Motivation .....	55
Grundprinzipien .....	55
Hardwaremodifikationen .....	55
Regelalgorithmus .....	56
Bewertung der Temperaturregelung .....	57
Bewertung der Energieeinsparung .....	58
Fazit .....	58
<b>Kann man mit dem Luftwiderstandsbeiwert die Batteriekosten senken? .....</b>	<b>60</b>
Fahrwiderstände und Batteriekosten .....	61
Reduzierung der Batteriekosten .....	61
Ergebnisse .....	63
Aerodynamik stärker gewichten .....	64
<b>Elektrisch angetriebener Minibus für den ÖPNV .....</b>	<b>66</b>
Motivation .....	67
Versuchsfahrzeug .....	67
Testfahrten im Realverkehr .....	69
Zusammenfassung .....	71

<b>Energiemanagement für Nutzfahrzeuge der nächsten Generation</b> .....	72
Anforderungen an künftige Nutzfahrzeuge .....	73
Der Energiehaushalt und seine Teilnehmer .....	73
Anwendungsspezifische Lösungsansätze .....	73
Entwicklungsmethodik mit ganzheitlichem Ansatz .....	75
Energiemanagement mit Weitblick .....	76
Zusammenfassung und Ausblick .....	77

<b>Batteriepackage des E-Scooter-Konzepts von BMW Motorrad</b> .....	78
Definition der Praxisreichweite .....	79
Batteriegehäuse als tragendes Element .....	79
Hochvoltsicherheit .....	80
Funktionssicherheit .....	80
Kühlung .....	81
Crash .....	81
Steifigkeit .....	82
Zusammenfassung und Ausblick .....	83

## **Teil B**

### **Downsizing und neue Verbrennungskonzepte**

#### **Dreizylinder-Ottomotor**

<b>mit Direkteinspritzung und Turboaufladung</b> .....	86
Downsizing-Motorfamilie .....	87
Entwicklungsziele und Konzeptdefinition .....	87
Brennverfahren .....	89
Zylinderblock .....	89
Kurbeltrieb .....	90
Integrierter Abgaskrümmter .....	91
Wärmemanagement .....	91
Schmiersystem .....	93
Motorbetrieb und Kraftstoffverbrauch .....	93
Zusammenfassung .....	93

#### **2,0-l-Biturbo-Dieselmotor von Opel**

<b>mit Zweistufen-Ladeluftkühlung</b> .....	94
Entwicklungsziele .....	95
Angepasster Zylinderkopf .....	95
Optimierte Kolben .....	96
Verbessertes Einspritzsystem .....	96
Zweistufige Turboaufladung .....	97
Zweistufige Ladeluftkühlung .....	98
Reibungslose Zusammenarbeit .....	99
Closed-loop-Verbrennungsregelung .....	99
Zusammenfassung .....	101



<b>Der neue 1,1-l-Dreizylinder-Dieselmotor von Hyundai</b> .....	102
Konkurrenzfähigkeit zukünftiger Dieselmotoren .....	103
Entwicklungskonzept .....	103
Leistungsdaten .....	103
Hauptmerkmale des Motors .....	104
Optimierter Brennraum .....	104
Einspritzsystem .....	105
Abgasrückführung und -nachbehandlung .....	106
Motordaten .....	106
Akustikauslegung .....	109
Fahrleistung und Kraftstoffeffizienz .....	109
Zusammenfassung .....	109
<b>Der 1,4-L-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung</b> .....	110
Strategie und Motorauswahl .....	111
Verbrauchspotenzial und Herausforderungen .....	111
Konstruktive Umsetzung und Funktionsweise .....	112
Intelligente Ladungsregelung .....	113
Motorsteuerung und Fahrverhaltensabstimmung .....	114
Zusammenfassung .....	115
<b>Elektrifizierung eines Downsizing-Ottomotors mit Aufladung</b> .....	116
Downsizing und Mikrohybridtechnik .....	117
Definition des Forschungsprojekts .....	117
Projektfahrzeug und -motor .....	117
Ergänzung der Antriebsstrangarchitektur .....	118
Mikrohybridsystem .....	119
Energierückgewinnung und -speicherung .....	120
Kombination von Kompressor- und Turboaufladung .....	121
Beitrag zur Kraftstoffeinsparung .....	123
Zusammenfassung und Ausblick .....	123
<b>Neue gießereitechnische Entwicklungen für Zylinderköpfe</b> .....	126
Problembeschreibung .....	127
Gestaltung des Zylinderkopfes .....	127
Entwickelte Lösungsvarianten .....	129
Homogener Zylinderkopf .....	132
Zylinderkopf mit eingegossenen Funktionselementen .....	133
Gradientenguss .....	133
Heterogene Mischbauweise .....	134
Fazit .....	135
<b>Grenzpoteziale der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Ottomotoren</b>	
<b>Teil 1: Mechanische Verfahren</b> .....	136
Motivation .....	137
Ausgangslage .....	137
Ventilhubumschaltung .....	137

Drosselfreie Laststeuerung durch mechanisch vollvariable Ventiltriebe .....	139
Mechanisch vollvariabler Ventiltrieb auf der Ein- und Auslassseite .....	141
Mechanisch vollvariabler Ventiltrieb und Zylinderabschaltung .....	141
Variable Verdichtung und mechanisch vollvariabler Ventiltrieb .....	141
Zusammenfassung Teil 1 .....	141

## Grenzpoteziale der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Ottomotoren

<b>Teil 2: Entwicklung der Brennverfahren</b> .....	144
Motivation .....	145
Vollvariabler Ventiltrieb und homogene Abmagerung .....	145
Vollvariabler Ventiltrieb und Lambda-Split-Verfahren .....	146
Strahlgeführte Benzindirekteinspritzung .....	146
Homogene Kompressionszündung .....	148
Zusammenfassung und Ausblick .....	150

## Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz

<b>Teil 1: Motor- und Abgasreinigungskonzept</b> .....	152
Strategische Zielsetzungen .....	153
Brennverfahren und Kraftstoffeinspritzung .....	153
Luftmanagement .....	154
Zylinderkopf und Steuerung .....	155
Zylinderkurbelgehäuse und Triebwerk .....	155
Motorbremssystem .....	156
Packaging .....	157
Konzeptmerkmale des Abgasnachbehandlungssystems .....	158
Produkteigenschaften .....	159
Zusammenfassung und Ausblick .....	161

## Mittelschwerer Nfz-Motor von Mercedes-Benz

<b>Teil 2: Applikation und Entwicklungsprozess</b> .....	162
Erfüllung der Euro-VI-Anforderungen .....	163
Regelungskonzept von Motor und Abgasnachbehandlung .....	163
On-Board-Diagnose .....	164
Regeneration des Dieselpartikelfilters .....	164
Entwicklungsprozess .....	166
A-Musterphase .....	166
B-Musterphase .....	166
C-Musterphase .....	166
D-Musterphase .....	166
Entwicklung des Motorbremssystems .....	167
Kühlkonzept und Lebensdauer des Zylinderkopfs .....	168
Datensatzapplikation .....	170
Zusammenfassung .....	171

## „Die Kundenpreise in akzeptablen Größenordnungen halten“

<b>Interview</b> .....	172
------------------------	-----

## Teil C Elektrik-|Elektronik, Software und IT|Kommunikation

### Pretended Networking

<b>Migrationsfähiger Teilnetzbetrieb</b> .....	178
Konzept und Umsetzung .....	179
Messergebnisse .....	181
Ausblick .....	183

<b>Die neue Spannungsebene 48 V im Kraftfahrzeug</b> .....	184
Historie .....	185
Randbedingungen für die Definition des Spannungsbereichs .....	185
Spannungsbereich .....	186
Prüfungen und Prüfbedingungen .....	186
Vorgehensweise .....	186
Ausblick .....	187

### Funktionen vereint

<b>Kombiinstrument, Infotainment und Flottenmanagement</b> .....	190
Motivation .....	191
Das LKW-Cockpit von heute .....	191
Mangelnde Flexibilität bremsst Integration von Innovationen .....	191
Anforderungen an die nächste HMI-Generation .....	192
Lösungsansatz – Aufhebung der Barrieren im HMI-Design .....	192
Die neue Architektur .....	193
Fazit .....	194

<b>Simulation hardwarespezifischer Komponenten von ECU-Software in der virtuellen Absicherung</b> .....	196
Motivation .....	197
Virtuelle Absicherungsplattform .....	197
Hardwareabhängige Komponenten .....	198
Simulationskonzept .....	198
Automatisierte Erzeugung der Simulation .....	199
Zusammenfassung .....	200

<b>Simuliertes GPS-Space-Segment und Sensorfusion zur spurgenaue Positionsbestimmung</b> .....	202
Motivation .....	203
Funktion und Erzeugung des Space-Segment-Modells .....	204
Nachbildung realer Fehler und Störeinflüsse .....	204
Modellierte GPS-Fehler .....	205
Modellierte Inertialsensoren-Fehler .....	205
Anwendungsbeispiele .....	206
Fazit .....	206

<b>IT-Sicherheit in der Elektromobilität</b> .....	208
Riskante Sicherheitslücke .....	209
Große Gefahr von Missbrauch .....	209
Ohne sichere IT keine sichere Elektromobilität .....	210
Geschäftsmodelle auf Basis von SecMobil .....	211
Projektziele .....	212
Projektsäule 1: Sichere digitale Stromerfassung (eMetering) .....	212
Projektsäule 2: Sichere Infrastruktur .....	212
Projektsäule 3: Sichere Dienste .....	213
Fazit .....	213
<b>Vollautomatische Kamera-zu-Fahrzeug-Kalibrierung</b> .....	214
Warum können Kamerasysteme nicht exakt funktionieren? .....	215
Online-Kalibrierung heute .....	215
So kann künftig präzise kalibriert werden .....	215
Bildvorverarbeitung .....	216
Optischer Fluss .....	216
Visuelle Bewegungsschätzung .....	216
Online-Kalibrierung .....	216
Testmethoden .....	216
Ergebnisse .....	217
Fazit und Ausblick .....	217
<b>Standardisierung von HV-Bordnetzen aus Sicht der Leistungselektronik</b> .....	218
Sicherheit .....	219
Grundidee: Verteilte 60-V-Akkumulatoren .....	219
Niedrigere Systemspannung .....	219
Komponenten und die Chance zu Standardisierungen .....	220
Variabilität .....	220
Betriebsstrategien .....	221
Skalierung und Konfektionierung .....	222
Fahrzyklen-Simulation .....	223
Halbleiter .....	223
<b>ISO 26262 – Muss das Rad neu erfunden werden?</b> .....	224
Motivation .....	225
Abstrakte und visionäre Anforderungen der ISO 26262 .....	225
Änderungen an bestehenden Produkten .....	225
Bestätigungsmaßnahmen und Unabhängigkeit .....	226
Zusammenfassung .....	227
<b>Verfahren zur Validierung der Dauerhaltbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Batteriesystemen</b> .....	228
Fehlende Reife .....	229
DVP- und Load-Matrix-Prozess .....	229
Systemanalyse .....	230
Applikation und Zielwerte .....	230
Testprogramm und Belastungsanalyse .....	231

Auswertung und Optimierung ..... 231  
Optimiertes Testprogramm ..... 233

**Lithium-Ionen-Batterien**

**Elektrolyt ist die Schlüsselkomponente** ..... 234  
Batteriematerialien-Entwicklung ..... 235  
Schlüsselkomponente Elektrolyt ..... 235  
Intelligente Mixturen – Additive als „Meisterspucke“ ..... 236  
Grenzfläche zwischen Elektrode und Elektrolyt ..... 237  
Allianzen und Strategien für weltweite Märkte ..... 238  
Chancen für die europäische Industrie ..... 239  
Es bleibt bei Lithium-Ionen-Technik ..... 239

**Wasser im Wein der Elektronikbegeisterung**

**Interview** ..... 240

**„Wir wollen den elektrischen Stromverbrauch halbieren“**

**Interview** ..... 242

**Teil A**

---

**Zukunftsmobilität,  
Hybridisierung und  
Elektrofahrzeuge**

---

# Inhaltsübersicht

„Bilanzen müssen vergleichbar werden“ Interview .....	4
Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen .....	8
Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben .....	16
Benchmarking des Elektrofahrzeugs Mitsubishi i-MiEV .....	22
Entwicklung eines heckgetriebenen 800-V-Elektrofahrzeugs .....	30
Entwicklung eines CFK-Leichtbaurads mit integriertem Elektromotor .....	36
Elektrisches Hybridgetriebe für vielerlei Anwendungen .....	42
Das Siebengang-Mild-Hybrid-Getriebe 7HDT500 .....	48
Optimiertes Klimaanlage für erhöhte Reichweite von Elektrofahrzeugen .....	54
Kann man mit dem Luftwiderstandsbeiwert die Batteriekosten senken? .....	60
Elektrisch angetriebener Minibus für den ÖPNV .....	66
Energiemanagement für Nutzfahrzeuge der nächsten Generation .....	72
Batteriepackage des E-Scooter-Konzepts von BMW Motorrad .....	78

# „Bilanzen müssen vergleichbar werden“

## Interview



Die intensive Auseinandersetzung mit alternativen Antrieben von Kraftfahrzeugen macht einmal mehr deutlich, wie wenig aussagekräftig Ökobilanzen sein können. Der Grund sind zu viele Variablen, für die es keine definierte Basis gibt. Im Interview mit der ATZ erklärt Professor Markus Lienkamp, Inhaber des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der TU München, was sich ändern müsste.

Interview: Stefan Schlott  
Fotos: Matthias Haslauer



**Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp**, Jahrgang 1967, studierte Maschinenbau an der TU Darmstadt und der Cornell University, USA. 1992 promovierte er im Bereich Materialwissenschaft an der TU Darmstadt zum Thema „Festigkeitsverhalten von Langfaserverbundwerkstoffen“. 1995 startete Lienkamp seine berufliche Karriere im internationalen Traineeprogramm des VW-Werks Kassel. Von 1996 bis 1998 leitete er das SET Chassis and Variability Reduction Team Powertrain bei AutoEuropa in Portugal. Zurück in Deutschland war Lienkamp zunächst Unterabteilungsleiter „Versuch Bremse, Betätigung“ und Projektteamleiter „Chassis VW Caddy“ bei VW Nutzfahrzeuge. Es folgten zahlreiche Stationen in der Volkswagen-Konzernforschung, so als Abteilungsleiter „Fahrerlebnis und Komfort“, als Abteilungsleiter „Fahrzeugdynamik“ sowie als Hauptabteilungsleiter „Forschung Fahrzeug“. Zuletzt bekleidete Lienkamp die Position eines Hauptabteilungsleiters Elektronik und Fahrzeug. Seit November 2009 hat er die Leitung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik an der TU München inne. Zudem leitet er dort das Wissenschaftszentrum Elektromobilität. Darüber hinaus ist Professor Lienkamp wissenschaftlicher Berater des TUM-Create-Forschungsprojekts „Electromobility in Megacities“ in Singapur.

**ATZ \_ Herr Professor Lienkamp, durch die verbesserten Verbrauchswerte von Kraftfahrzeugen nimmt der Anteil der Produktion an den CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus zu. Werden die aktuellen Umweltbilanzen dieser Verschiebung gerecht?**

Lienkamp \_ Vom Prinzip werden in einer Lebenszyklus-Emissionsbetrachtung die Emissionen des Betriebs genauso berücksichtigt wie die der Produktion und des Recyclings. Allerdings nutzt jeder OEM für die Produktionsphase eigene, interne Berechnungen. Ein Vergleich zwischen einzelnen Fahrzeugen ist aufgrund dieser nicht ausreichend standardisierten Vorgehensweisen jedoch für eine Bewertung ungeeignet. Für die Produktion eines Fahrzeugs beispielsweise ausschließlich emissionsfreie Wasserkraft zu berücksichtigen, während für ein anderes Fahrzeug ein realistischer Strommix des Produktionslandes herangezogen wird, ist unfair und macht aus einer ganzheitlichen, ökologischen Betrachtungsweise keinen Sinn. Leider spielen die Lebenszyklus-Emissionsbetrachtungen für den Käufer heute keine Rolle. Diese sind für die Verbraucher oft nicht verständlich oder gar nicht erst zugänglich und sind eher in Expertenkreisen relevant. Dazu kommt ein weiterer Punkt. Bei genauerer Betrachtung stellt sich nämlich die Frage,

wie aussagekräftig Umweltbilanzen überhaupt sind, da Fahrzyklen und Berechnungsmethoden zu sehr streuenden Ergebnissen kommen. Die einschlägige EN ISO 14044 gibt eine Handlungsempfehlung für das Erstellen von Ökobilanzen. Allerdings lässt die Norm so viel Spielraum, dass ein direkter Produktvergleich nur dann vorgenommen werden kann, wenn eine lange Liste an Betrachtungsumfängen und Annahmen identisch sind. In der Praxis ist ein Vergleich von Ökobilanzen verschiedener Parteien nicht möglich, da ein Automobilhersteller heute kein Interesse daran hat, seine Bilanz bis ins letzte Detail offenzulegen.

**Wie aussagekräftig ist vor diesem Hintergrund das Abstellen auf die Emissionen in der Betriebsphase?**

Die öffentliche Diskussion dreht sich ausschließlich um den Energieverbrauch und die Emissionen beim Betrieb der Fahrzeuge. Der Betrieb alleine ist aber nur die halbe Wahrheit. Produktion und Recycling müs-

„Der Betrieb allein ist nur die halbe Wahrheit.“

sen genauso berücksichtigt werden und führen häufig zu erstaunlichen Ergebnissen. So erfordert der Werkstoff Stahl einen vergleichsweise geringen Energieeinsatz und lässt sich sehr gut recyceln. Bei Aluminium ist der Energieeinsatz höher, dafür ist das Recycling energetisch günstig. Bei Carbon-Werkstoffen ist der erforderliche Energieeinsatz am höchsten und ein Recycling nur mit Qualitätseinbußen möglich. Wenn man diese Eigenschaften über die komplette Wert-

Professor Markus Lienkamp (rechts) im Gespräch mit ATZ-Chefkorrespondent Stefan Schlott





Professor Markus Lienkamp sorgt sich um die Aussagekraft von Umweltbilanzen

schöpfungskette berücksichtigt, müsste Stahl für Fahrzeuge mit niedriger Laufleistung, sprich Stadtfahrzeuge, und Aluminium für Fahrzeuge mit mittlerer Laufleistung, beispielsweise im Flottenbetrieb, eingesetzt werden. Für Carbonfaser-Werkstoffe wären vor allem Fahrzeuge mit hoher Laufleistung wie Taxis oder Lkw geeignet. Die Realität auf den Straßen und in den Entwicklungsabteilungen sieht jedoch anders aus.

#### **Sehen Sie dabei Unterschiede zwischen verbrennungsmotorisch und elektromotorisch angetriebenen Fahrzeugen?**

Konventionelle, verbrennungsmotorisch betriebene Fahrzeuge haben einen Anteil von etwa 10 Prozent Energieeinsatz bei der Produktion und 90 Prozent im Betrieb. Durch den Einsatz sparsamer Motoren verschiebt sich diese Relation in Richtung Produktion. Bei Elektrofahrzeugen liegt das Verhältnis eher im Bereich 50/50. Daraus ergibt sich, dass Analysen über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs immer wichtiger werden. Gleichzeitig müssen wir auch über langlebigere Produkte nachdenken. Fahrzeuge, die energetisch aufwendig produziert werden, müssen schlicht länger halten und eine höhere Laufleistung bieten.

#### **Wie müsste eine Umweltbilanz aufgebaut sein, um einen fairen Vergleich zwischen den verschiedenen Antriebsarten zu ermöglichen?**

Zuerst einmal müssen wir die Bewertungsverfahren hinsichtlich der Annahmen, also den Emissionswerten für die jeweiligen Werkstoffe unabhängig von Produktionsort und der Zusammensetzung des

Stroms, standardisieren, um einen fairen Vergleich zu ermöglichen. Darüber hinaus müssen unter anderem die Laufleistungen im Betrieb vergleichbar gemacht werden. Beispielsweise durch Einführung von drei Klassen mit niedriger, mittlerer und hoher Laufleistung mit jeweils konkreten Kilometerangaben. Eine Oberklasselimosine wird mehr Kilometer zurücklegen als ein kleines Stadtauto. Da kann man sich die Umweltbilanzen leicht schönrechnen.

#### **Wie relativiert sich bei einem solchen Ansatz die Auswirkung des Leichtbaus?**

Leichtbaumaßnahmen führen aufgrund der Werkstoffe und Produktionsprozesse häufig zu höheren Emissionen in der Produktion. Diese müssen durch einen geringeren Betriebsverbrauch erst einmal amortisiert werden. Als Faustregel gelten bei Aluminium 40.000 km Laufleistung und bei Carbonfaserwerkstoffen 100.000 km Laufleistung als Amortisierungszeit. Wenn die Laufleistung kombiniert mit der Produktion berücksichtigt wird, kann man den Nutzen von Leichtbaumaßnahmen besser bewerten – auch dabei unterscheiden sich Oberklasselimosinen von kleinen Stadtfahrzeugen.

#### **Ist der aktuelle Hype um Carbon Composites bei einer solch ganzheitlichen Betrachtung gerechtfertigt?**

Das hängt sehr vom Einsatzzweck ab. Bei einer hohen Laufleistung, zum Beispiel einem Taxi oder Lkw, lohnen sich die energieaufwendigen Carbonwerkstoffe eher als bei einem kleinen Stadtfahrzeug – da sollte man schon genau hinschauen. Auf jeden Fall muss man bei der Bewertung ehrlich sein. Ein nach wie vor ungelöstes Problem stellt das Recycling von solchen Verbundwerkstoffen dar.

#### **Ihr Lehrstuhl hat für das Leichtbaukonzept „Mute“ eine detaillierte Analyse der Lebenszyklus-Emissionen durchgeführt. Wie lauten die gewonnenen Eckdaten?**

Der Mute hat einen Lebenszyklus-CO<sub>2</sub>-Ausstoß von ungefähr 9300 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent, wenn man den deutschen Strommix zugrunde legt und eine Fahrleistung von 120.000 km annimmt. Die Emissionen verteilen sich dabei zwischen Produktion und Recycling einerseits und Betrieb andererseits ungefähr 50/50. Mit den Gesamtemissionen liegt der Mute rund 30 Prozent niedriger als ein Kleinwagen mit Dieselmotor in einer energieeffizienten Sonderausstattung, beziehungsweise rund 60 Prozent niedriger als ein zu einem Elektrofahrzeug umgerüstetes Verbrennerfahr-

zeug. Betrachtet man nur den Betrieb, verursacht der Mute globale CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen von 42 g CO<sub>2</sub>/km bei dem deutschen Strommix. Dies entspricht einem Benzinverbrauch von circa 1,8 l/100 km. Bei Betrieb des Mute mit Strom aus regenerativen Energiequellen sinken die Lebenszyklus-Emissionen sogar auf unter 5000 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Die Emissionen verteilen sich dann auf Produktion und Recycling und den Betrieb 80/20. Ein direkter Vergleich mit anderen Fahrzeugen ist jedoch aufgrund der fehlenden Standardisierung bei den Grundannahmen schwierig.

#### **Welche Ableitungen ergeben sich aus diesen Erkenntnissen?**

Elektrofahrzeuge können, wenn sie effizient und leicht ausgelegt werden, in einer Lebenszyklus-Emissionsbewertung deutlich besser als herkömmliche Verbrennerfahrzeuge sein. Ein niedriges Gewicht hat dabei zwei positive Effekte: Es hilft zum einen den Verbrauch im Betrieb zu senken, zum anderen lässt sich so der Materialeinsatz für die Produktion redu-

„Fahrzeuge, die energetisch aufwendig produziert werden, müssen länger halten.“

zieren. Das Beispiel des Betriebs mit Strom aus regenerativen Energiequellen zeigt die Bedeutung von Produktion und Recycling für die Emissionen von Elektrofahrzeugen. Diese beiden Lebensphasen sind für den überwiegenden Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich.

#### **Wie lauten vor diesem Hintergrund Ihre Empfehlungen an Politik und Automobilindustrie?**

Es reicht nicht, nur die Emissionen im Betrieb zu betrachten und anhand dieser Kennzahlen auf die Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeugs zu schließen. Politik und Industrie müssen sich auf einheitliche Standards für eine Lebenszyklus-Emissionsbewertung einigen, sodass ein direkter Fahrzeugvergleich möglich ist. Entsprechende Kennwerte müssen transparent für den Kunden zugänglich sein und zum Beispiel zu der gesetzlich verpflichtenden Angabe der Verbrauchswerte mit aufgenommen werden. Ein erster Schritt dazu wäre eine Einigung darauf, mit welchen Emissionen Werk- und Betriebsstoffe anzusetzen sind, egal woher sie stammen. So wäre auch der Möglichkeit, elektrischen Strom „grün zu waschen“ ein Riegel vorgeschoben.

#### **Generell gesprochen: Ist ein Elektrofahrzeug per se ein ökologischeres Fortbewegungsmittel als ein klassisches Automobil?**

Per se definitiv nein. Elektrofahrzeuge machen Sinn für bestimmte Fahrprofile und Einsatzszenarien. Bei dem heutigen Stand der Technik zu versuchen, für jedes Fahrzeugkonzept eine elektrifizierte Variante auf den Markt zu bringen, ist nicht sinnvoll. Bei einem höheren Anteil von erneuerbaren Energien am Strommix verschiebt sich der Emissionsvorteil mehr zu Elektrofahrzeugen.

**Herr Professor Lienkamp, herzlichen Dank für das Gespräch.**