

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

Vorwort

Die Fahrzeug- und Motorenentwicklung hat in der zweiten Dekade dieses Jahrhunderts infolge gesetzlich verordneter CO₂-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 CO₂-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).

Kyoung 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 CO₂-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 CO₂-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 Teilprojekt-
leiter CAE für den OM 93x bei der Daimler AG in
Stuttgart.

Dr.-Ing. Volker Schwarz
ist Teamleiter Funktions- und Emissions-
entwicklung 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 Bordnetzkon-
zepte 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 Absicherungs-
plattform bei der BMW Group in München.

Prof. Dr. Wolfram Hardt
ist Inhaber der Professur Technische Informatik
und Leiter des Masterstudiengangs Automotive Soft-
ware 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“

Interview	4
Das Lebenszyklus-Konzept von Volkswagen	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
Energie- und Nachhaltigkeitsaspekte von Antrieben	16
Umfeld	17
Energiebedarf	17
Energie- und Kraftstoffversorgung	18
CO ₂ -Bilanz im Fahrbetrieb	18
Nachhaltigkeitsbewertung über den gesamten Lebenszyklus	20
Zusammenfassung	21
Benchmarking des Elektrofahrzeugs Mitsubishi i-MiEV	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
Entwicklung eines heckgetriebenen 800-V-Elektrofahrzeugs	30
Motivation	31
Elektrisches Fahrzeugkonzept	31
Bordnetzentwicklung	33
Elektrischer Antriebsstrang	33
Traktionsmotor mit Direktfluidkühlung der Statorwicklung	33

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

Energiemanagement für Nutzfahrzeuge der nächsten Generation	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

Batteriepackage des E-Scooter-Konzepts von BMW Motorrad	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

mit Direkteinspritzung und Turboaufladung	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

mit Zweistufen-Ladeluftkühlung	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

Der neue 1,1-l-Dreizylinder-Dieselmotor von Hyundai	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
Der 1,4-L-TSI-Ottomotor mit Zylinderabschaltung	110
Strategie und Motorauswahl	111
Verbrauchspotenzial und Herausforderungen	111
Konstruktive Umsetzung und Funktionsweise	112
Intelligente Ladungsregelung	113
Motorsteuerung und Fahrverhaltensabstimmung	114
Zusammenfassung	115
Elektrifizierung eines Downsizing-Ottomotors mit Aufladung	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
Neue gießereitechnische Entwicklungen für Zylinderköpfe	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
Grenzpoteziale der CO₂-Emissionen von Ottomotoren	
Teil 1: Mechanische Verfahren	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 CO₂-Emissionen von Ottomotoren

Teil 2: Entwicklung der Brennverfahren	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

Teil 1: Motor- und Abgasreinigungskonzept	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

Teil 2: Applikation und Entwicklungsprozess	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“

Interview	172
------------------------	-----

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

Pretended Networking

Migrationsfähiger Teilnetzbetrieb	178
Konzept und Umsetzung	179
Messergebnisse	181
Ausblick	183

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

Funktionen vereint

Kombiinstrument, Infotainment und Flottenmanagement	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

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

Simuliertes GPS-Space-Segment und Sensorfusion zur spurgenaue Positionsbestimmung	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

IT-Sicherheit in der Elektromobilität	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
Vollautomatische Kamera-zu-Fahrzeug-Kalibrierung	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
Standardisierung von HV-Bordnetzen aus Sicht der Leistungselektronik	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
ISO 26262 – Muss das Rad neu erfunden werden?	224
Motivation	225
Abstrakte und visionäre Anforderungen der ISO 26262	225
Änderungen an bestehenden Produkten	225
Bestätigungsmaßnahmen und Unabhängigkeit	226
Zusammenfassung	227
Verfahren zur Validierung der Dauerhaltbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit von Batteriesystemen	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-System 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 CO₂-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-CO₂-Ausstoß von ungefähr 9300 kg CO₂-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 CO₂-äquivalente Emissionen von 42 g CO₂/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 CO₂-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 CO₂-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.