



ATZ/MTZ-Fachbuch

Richard van Basshuysen Hrsg.

Ottomotor mit Direkteinspritzung

Verfahren · Systeme · Entwicklung · Potenzial

3. Auflage



BOSCH
Technik fürs Leben



Springer Vieweg



ATZ/MTZ-Fachbuch

Richard van Basshuysen *Hrsg.*

Ottomotor mit Direkteinspritzung

Verfahren · Systeme · Entwicklung · Potenzial

3. Auflage



BOSCH
Technik fürs Leben



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.

Richard van Basshuysen
Herausgeber

Ottomotor mit Direkteinspritzung

Verfahren, Systeme, Entwicklung, Potenzial

3. aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 399 Abbildungen

Ulrich Spicher und 24 Mitautoren

 Springer Vieweg

Herausgeber

Dr. Richard van Basshuysen
Bad Wimpfen, Deutschland

ISBN 978-3-658-01407-0
DOI 10.1007/978-3-658-01408-7

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2007, 2008, 2013

Dieses 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 Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 3. Auflage

Für die 3. Auflage wurde das Werk überarbeitet und auf den neuesten Stand gebracht. Es wurde ein Abschnitt zur Vorentflammung und Flammenausbreitung bei Homogenbetrieb ergänzt.

Bad Wimpfen
Im April 2013

Richard van Basshuysen, VDI

Vorwort zur 2. Auflage

Nachdem die erste Auflage bereits nach 16 Monaten vergriffen war, ist nun die zweite Auflage erschienen.

Einige Kapitel wurden zum Teil stark überarbeitet und aktualisiert. Neu ist das Kapitel „Neue Wege zur Schadstoffreduzierung“.

Bad Wimpfen
Im August 2008

Richard van Basshuysen, VDI

Vorwort zur 1. Auflage

Mobilität verbindet.

Mobilität zu gewinnen und den Aktionskreis zu erweitern, andere Kontinente zu erforschen, ja das Weltall zu erobern: Das ist seit langer Zeit ein Menschheitstraum. Zunächst diente das Pferd zur Überwindung von Zeit und Raum. Boote und Schiffe eroberten die Weltmeere und die entferntesten Länder. Dann wurde das Rad erfunden. Schließlich der motorisierte Verkehr.

Diese Erfindung ist nicht unumstritten, da sie das ganze Leben auf unserem Planeten in nie dagewesener Weise veränderte, revolutionierte. Die Folgen sind unübersehbar. Wichtig Ökosysteme sind aus dem Gleichgewicht geraten und die Umweltverträglichkeit wurde an vielen Stellen bis heute nicht wieder hergestellt. Nicht nur Raubbau an der Natur lässt die Erde verarmen, sondern die Umweltzerstörung durch zum Beispiel riesigen Flächenverbrauch und Verschmutzung von Boden, Wasser und Luft drohen den angestammten Platz für alles Lebende zu gefährden.

Wir Ingenieure, die für den Segen und den Fluch dieser Entwicklung in starkem Maße verantwortlich sind und den heutigen Zustand maßgeblich mit zu verantworten haben, besitzen nun auch die Pflicht, die Umweltverträglichkeit dort wieder herzustellen, wo sie verloren gegangen ist. Einen kleinen Beitrag dazu soll dieses Buch leisten. Wie können wir den Recourcenverbrauch und die Schadstoffemissionen unserer Kraftfahrzeuge drastisch verringern? Welche geräuschkindernden Maßnahmen sind in unserer überlauten Welt zu ergreifen?

Diese und andere Fragestellungen soll dieses Buch behandeln und richtungsweisende Entwicklungen für den Ottomotor aufzeigen. Zum Abschluss wird ein Vergleich mit alternativen Antrieben gewagt.

Das Buch richtet sich vor allem an die Produktentwickler und Fertigungsverantwortlichen der Automobil- und Zuliefererindustrie und an deren Dienstleister. Wissenschaft, Forschung und Lehre soll es ein wichtiger Ratgeber sein.

Für den Inhalt dieses Buches dankt der Herausgeber in erster Linie den Mitautoren und stellvertretend für sie Herrn Prof. Ulrich Spicher und Mitarbeitern, die den größten Anteil dazu beigetragen haben. Alle Autoren und Ihre Firmen oder Institutionen sind im Vorspann aufgeführt. Sie haben mit unbestechlicher Fachkompetenz und Ernsthaftigkeit nicht nur den neuesten Stand des Wissens wiedergegeben, sondern auch immer wieder Prognosen in die Zukunft gewagt. Cirka 400 Bilder sorgen für anschauliche Inhalte und 427 Literaturstellen laden zu erweiterndem Studium ein.

Dank gilt auch der Robert Bosch GmbH. Ohne ihre fachliche und materielle Unterstützung wäre das Werk so nicht möglich gewesen.

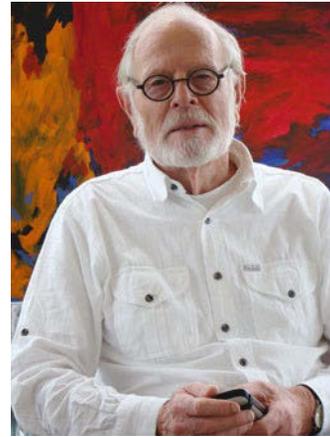
Schließlich ist es dem Vieweg Verlag und hier dem Lektorat gelungen, in kürzester Zeit überzeugende Arbeit zu leisten, weshalb das Buch aktueller nicht hätte sein können. Auch dafür möchte ich meinen Dank aussprechen.

Und nun wünsche ich dem Werk die verdiente Aufmerksamkeit.

Der Herausgeber

Dr.-Ing. E. h. **Richard van Basshuysen**, VDI, wurde 1932 in Bingen/Rhein geboren. Nach einer Lehre mit Abschluss als Kfz-Schlosser studierte er an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel von 1953 bis 1955 mit Abschluss als Ingenieur für Maschinenbau. 1982 wurde ihm der Hochschulgrad Diplom-Ingenieur verliehen. Von 1955 bis 1965 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter der Aral AG in Bochum.

1965 wechselte er zur NSU AG, wo er die Versuchsleitung der Motor- und Getriebeentwicklung einschließlich der Wankelmotorentwicklung übernahm und zum stellvertretenden Leiter des Fahrzeugversuchs berufen wurde. In dieser Funktion war er mitverantwortlich für die Entwicklung der Fahrzeuge Prinz 4, NSU 1000 und 1200, RO 80 und K 70. 1969 wurde die NSU AG von



der heutigen Audi AG übernommen. Bei der Audi AG war er dann Entwicklungsleiter der Fahrzeugkomfortklasse und Leiter der Motoren- und Getriebeentwicklung und parallel dazu Aufsichtsratsmitglied der Audi AG als gewählter Vertreter der leitenden Angestellten. Seine bedeutendste Entwicklung war die des weltweit ersten abgasentgifteten Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung und Turboaufladung, die er gegen große Widerstände auch im eigenen Hause im VW-Konzern durchsetzte. Da dieser Motor 20% weniger Kraftstoff als sein Vorgänger als Kammermotor verbraucht und ein Motor mit hoher Leistung und Drehmoment ist, hat er sich weltweit durchgesetzt. In Europa wuchs sein Marktanteil von circa 12% im Jahr 1989 bis über 50% im Jahr 2008. Nach seiner aktiven Laufbahn in der Automobilindustrie gründete Richard van Basshuysen 1992 ein Ingenieurbüro, das er bis heute leitet. Seine Aufgaben sind: Beratung internationaler Automobilhersteller und Ingenieurdienstleister und Autor und Herausgeber technisch-wissenschaftlicher Fachbücher, die auch ins Englische sowie ins Chinesische übersetzt wurden und werden. Außerdem ist er seit 2006 zusammen mit Prof. Dr.-Ing. Fred Schäfer Herausgeber und Mitautor des Internetportals www.motorlexikon.de. Darüber hinaus ist er Beiratsmitglied und Mitglied des Vorstandes in verschiedenen Gremien wie zum Beispiel dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und dem Österreichischen Verein für Kraftfahrzeugtechnik. Insgesamt ist er Autor und Mitautor von über 60 technisch-wissenschaftlichen Publikationen. Seine Editorials in ATZ und MTZ erschienen von 1991 bis 2011. Im Jahr 2001 erhielt er für die Entwicklung des zukunftsweisenden Dieselmotors mit Direkteinspritzung den hochdotierten Ernst-Blickle-Preis 2000 und die BENZ-DAIMLER-MAYBACH-EHRENMEDAILLE des VDI für „seine herausragende Ingenieurleistung bei der Entwicklung des Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung sowie seine langjährigen Engagements als Herausgeber der ATZ/MTZ und als Beiratsmitglied der VDI-Gesellschaft „Fahrzeug- und Verkehrstechnik“. Für sein Lebenswerk wurde ihm 2004 von der Universität Magdeburg die Ehrendoktorwürde verliehen.

Autorenverzeichnis

Baretzky, Ulrich, Dipl.-Ing.	AUDI AG, Neckarsulm www.audi.de
Baron, Ulrich	Aral Forschung, Bochum www.aral.de
Clade, Michael	CATEM GmbH & Co. KG, Herxheim www.catem.com
Dörmer, Wolfgang	Aral Forschung, Bochum www.aral.de
Eichlseder, Helmut, Univ.-Prof. Dr.	Technische Universität Graz www.portal.tugraz.at
Elsaesser, Alfred, Dr.-Ing.	MAHLE International GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Häntsche, Jan Patrick, Dipl.-Ing.	Deutsche Industrie- und Handelskammer in Peru
Hatz, Wolfgang, Dipl.-Ing.	Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach www.porsche.de
Heidenreich, Thomas, Dipl.-Ing.	ADA-Abgaszentrum der Automobilindustrie, Weissach www.abgaszentrum.de
Holz, Oswald, Dipl.-Ing.	EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar www.emitec.com
Hurdemann, Bernhard, Dr.-Ing.	Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg www.man-hummel.com
Ißler, Wolfgang, Dr.-Ing.	MAHLE International GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Kubach, Heiko, Dr.-Ing.	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) www.kit.edu
Maus, Wolfgang, Dipl.-Ing.	EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar www.emitec.com
Meinig, Uwe, Dr.-Ing.	SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried www.shw.de

Münz, Stefan, Dr.	BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, Kirchheimbolanden www.turbos.bwauto.com
Puck, Alexander, Dipl.-Ing.	MAHLE GmbH, Stuttgart www.mahle.com
Scharnhorst, Christian, Dipl.-Betriebsw.	Robert Bosch, GmbH, Stuttgart www.bosch.de
Schmalzl, Hans Peter, Prof. Dr.-Ing.	Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim www.pankl-apc.com
Schöpke, Manuel, Dr.-Ing.	Robert Bosch GmbH, Stuttgart
Seiffert, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.	Technische Universität Braunschweig www.tu-braunschweig.de
Spicher, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.	MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Karlsruhe
Stoffels, Harald, Dr.	Ford-Werke GmbH, Köln www.ford.de
van Basshuysen, Richard, Dr.-Ing. E. h.	Herausgeber und Autor, Bad Wimpfen
Wild, Stephan, Dr.-Ing.	Alfred Kärcher GmbH & Co. KG www.kaercher.de
Xander, Benedikt, Dr.-Ing.	Audi AG, Neckarsulm www.audi.de

Firmen- und Institutionenverzeichnis

Firmen

AUDI AG, Neckarsulm	Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz Dr.-Ing. Benedikt Xander
BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, Kirchheimbolanden	Dr. Stefan Münz
BP Europe SE, Hamburg	Wolfgang Dörmer Ulrich Baron
CATEM GmbH & Co. KG, Herxheim	Michael Clade
EMITEC Gesellschaft für Emissionstechnologie mbH, Lohmar	Dipl.-Ing. Wolfgang Maus Dipl.-Ing. Oswald Holz
Ford-Werke GmbH, Köln	Dr. Harald Stoffels
Alfred Kärcher GmbH & Co. KG, Winnenden	Dr.-Ing. Stephan Wild
MAHLE International GmbH, Stuttgart	Dr.-Ing. Wolfgang Ißler Dr.-Ing. Alfred Elsaesser
MAHLE GmbH, Stuttgart	Dipl.-Ing. Alexander Puck
Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg	Dr.-Ing. Bernhard Huurdemann
Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim	Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl
Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach	Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz
Robert Bosch GmbH, Stuttgart	Dipl.-Betriebsw. Christian Scharnhorst Dr.-Ing. Manuel Schöpke
SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried	Dr.-Ing. Uwe Meinig

Institutionen

ADA-Abgaszentrum der Automobilindustrie, Weissach	Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich
Deutsche Industrie- und Handelskammer in Peru	Dipl.-Ing. Jan Patrick Häntsche
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Dr.-Ing. Heiko Kubach
MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Karlsruhe	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Technische Universität Braunschweig	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert
Technische Universität Graz	Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichseder

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

- | | |
|---|---|
| 1 Einleitung | Dr.-Ing. E. h. Richard van Basshuysen |
| 2 Geschichte der Benzin-Direkteinspritzung | Dr.-Ing. Uwe Meinig |
| 3 Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich |
| 3.1 Grundlagen der Gemischbildung | Dr.-Ing. Benedikt Xander |
| 3.2 Direkteinspritzung mit homogenem Gemisch | |
| 3.3 Direkteinspritzung mit geschichtetem Gemisch | |
| 3.4 Zündung und Verbrennung | |
| 3.5 Benzin-Direkteinspritzung bei homogen kompressionsgezündeter Verbrennung | |
| 3.5.5 Akustik | Dr. Harald Stoffels |
| 3.6 Kombiniertes Diesel/Otto-Verbrennungsverfahren | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |
| 4 Einspritzsysteme und Systemübersicht | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dipl.-Ing. Jan Patrick Häntsche
Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich |
| 5 Leistung und Drehmoment | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |
| 6 Aufladung | |
| 6.1 Mechanische Aufladung | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr.-Ing. Benedikt Xander |
| 6.2 Abgasturboaufladung | Dr. Stefan Münz
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl |
| 6.3 Synergien zwischen Abgasturboaufladung und der Direkteinspritzung bei Ottomotoren | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr. Stefan Münz
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl |
| 6.4 Hochaufladung durch elektrisch angetriebenen Lader | Dr. Stefan Münz
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl |
| 6.5 Komplexe Aufladesysteme | Dr.-Ing. Benedikt Xander
Dr. Stefan Münz
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl |
| 7 Kraftstoffverbrauch | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |

- | | |
|---|--|
| 8 Downsizing und Downspeeding | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |
| 9 Abgasemissionen und Schadstoffreduzierung | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dipl.-Ing. Thomas Heidenreich |
| 9.1 Schadstoffentstehung beim Motorprozess | |
| 9.2 Gesetzliche Vorschriften | |
| 9.3 Schadstoffreduzierung einschließlich Partikel | |
| 9.4 Neue Wege der Schadstoffreduzierung | Dipl.-Ing. Wolfgang Maus
Dipl.-Ing. Oswald Holz |
| 10 Geräuschemissionen | Dr. Harald Stoffels |
| 11 Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-Einzelsysteme | |
| 11.1 Zündsysteme | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr.-Ing. Benedikt Xander |
| 11.2 Kolben | Dr.-Ing. Wolfgang Ifßler |
| 11.3 Ventile, Ventilsitzringe, Ventilführungen | Dipl.-Ing. Alexander Puck |
| 11.4 Luftansaugsysteme moderner Ottomotoren | Dr.-Ing. Stephan Wild
Dr.-Ing. Bernhard Huurdemann |
| 11.5 Kurbelgehäuseentlüftung | Dr.-Ing. Uwe Meinig |
| 11.6 Lufttaktventil | Dr.-Ing. Alfred Elsaesser |
| 11.7 Tankentlüftung | Dr.-Ing. Uwe Meinig |
| 11.8 Zuheizmaßnahmen für den Fahrzeuginnenraum | Michael Clade |
| 12 Direkteinspritzung im Hybridverbund | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert |
| 13 Betriebsstoffe | |
| 13.1 Ottokraftstoffe | Wolfgang Dörmer |
| 13.2 Schmierstoffe für Ottomotoren | Ulrich Baron |
| 14 Motorkonzepte | |
| 14.1 Serienkonzepte | Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher
Dr.-Ing. Heiko Kubach |
| 14.2 Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung | Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky
Dipl.-Ing. Wolfgang Hatz |
| 14.3 Zweitaktmotoren mit Direkteinspritzung | Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichseder |
| 15 Marktentwicklung der Benzin-Direkteinspritzung | Dipl.-Betriebsw. Christian Scharnhorst
Dr.-Ing. Manuel Schöpke |
| 16 Ausblick | Dr.-Ing. E. h. Richard van Basshuysen
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher |