

ATZ/MTZ-Fachbuch

Richard van Basshuysen *Hrsg.*

Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung

Ottokraftstoffe · Erdgas · Methan · Wasserstoff

4. Auflage



BOSCH
Technik fürs Leben



Springer Vieweg

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Antriebsstränge 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 Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, anwendungsorientiert und aktuell zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Ingenieure der Kraftfahrzeugentwicklung und Antriebstechnik sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Fahrzeug- und Antriebstechnik. 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 und Direkteinblasung

Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff

4. überarbeitete und erweiterte Auflage

Ulrich Spicher und 30 Mitautoren

 Springer Vieweg

Herausgeber
Richard van Basshuysen
Bad Wimpfen, Deutschland

ATZ/MTZ-Fachbuch
ISBN 978-3-658-12214-0 ISBN 978-3-658-12215-7 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-12215-7

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

„Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung“ wurde bis zur 3. Auflage unter dem Titel „Ottomotor mit Direkteinspritzung“ veröffentlicht.

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2007, 2008, 2013, 2017

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. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Vorwort zur 4. 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. Wichtige 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 Ressourcenverbrauch und die Schadstoffemissionen unserer Kraftfahrzeuge drastisch verringern? Welche geräuschmindernden 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, der den größten Anteil dazu beigetragen hat. 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. Circa 564 Bilder sorgen für anschauliche Inhalte und 617 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 Verlag Springer Vieweg und hier Frau Lange gelungen, in kurzer 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.

Bad Wimpfen, im Jahr 2017

Richard van Basshuysen, VDI

Über den Herausgeber



Dr. Richard van Basshuysen gilt seit seiner Industrietätigkeit bei Audi als Vater des Dieselmotors mit Direkteinspritzung. Unter seiner Verantwortung als Entwicklungsleiter der Fahrzeug-Komfortklasse und der Motor- und Getriebeentwicklung entstand der erste abgasentgiftete Pkw-Dieselmotor mit Direkteinspritzung und Turboaufladung. Damit revolutionierte er weltweit den Dieselmotor in Richtung drastischer Verbrauchsreduzierung bei gleichzeitigem Leistungs- und Drehmomentenanstieg.

Seine langjährigen fachwissenschaftlichen Arbeiten als Autor und Herausgeber ließen ihn als visionären Vordenker der Antriebstechnik mit Verbrennungsmotoren erkennen.

Über viele Jahre hin verbinden ihn seine Arbeiten bis zum heutigen Tag auch mit den Verlagen FranckKosmos, Vieweg, Springer, SAE International Text Books und China Machine Press. Ihm wurden u. a. die Benz-Daimler-Maybach-Ehrenmedaille 2001 des VDI für die Serieneinführung des Pkw-Dieselmotors mit Direkteinspritzung verliehen sowie der hochdotierte Ernst-Blickle-Preis 2000. Außerdem wurde er mit der Ehrendoktorwürde der Universität Magdeburg für sein Lebenswerk geehrt.

Er zeigt immer wieder sein Gespür für die klimaneutrale Mobilität. Mit diesem Buch stellt er unter Beweis, dass schadstoff- und verbrauchsarmes Fahren mit heutiger Großserientechnik bereits möglich ist und ein signifikanter Beitrag für die Nachhaltigkeit in der Mobilität sein kann.

Autorenverzeichnis

Baretzky, Ulrich, Dipl.-Ing.

AUDI AG, Neckarsulm

www.audi.de

Baron, Ulrich

BP Europa SE, GB Aral,

Forschung Bochum (vormals)

www.aral-forschung.de

Bühl, Heinz, Dipl.-Ing. (FH)

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,

www.mann-hummel.com

Clade, Michael

Eberspächer catem GmbH & Co. KG

www.eberspaecher.com

Dörmer, Wolfgang

BP Europa SE, GB Aral, Forschung Bochum

www.aral-forschung.de

Eichlseder, Helmut, Prof. Dr.

Technische Universität Graz

www.ivt.tugraz.at

Flierl, Rudolf, Prof. Dr.-Ing.

TU Kaiserslautern

www.uni-kl.de

Goll, Ralph, Dipl.-Ing. (FH)

Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen

www.bosch.de

Grabner, Peter, Dr.

Technische Universität Graz

www.ivt.tugraz.at

Hörhammer, Christoph, Dipl.-Ing.

TU Kaiserslautern

www.uni-kl.de

Hofherr, Thomas, Dr.

Technische Universität Wien

www.ifa.tuwien.ac.at

Hofmann, Peter, Assoc.Prof. Dr.

Technische Universität Wien

www.ifa.tuwien.ac.at

Holz, Oswald, Dipl.-Ing.

Continental Emitec GmbH, Lohmar

www.emitec.com

Holzer, Alexander, Dipl.-Ing.

TU Kaiserslautern

www.uni-kl.de

Issler, Wolfgang, Dr.-Ing.

MAHLE International GmbH, Stuttgart

www.mahle.com

Korn, Alexander, Dipl.-Ing. (FH)

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,

www.mann-hummel.com

Maus, Wolfgang, Dipl.-Ing.

WM Engineering & Consulting, 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

Nagel, Thomas, Dipl.-Ing.

Continental Emitec GmbH, Lohmar
www.emitec.com

Neugaertner, Joerg, M. Sc.

TU Kaiserslautern
www.uni-kl.de

Puck, Alexander, Dipl.-Ing.

MAHLE GmbH, Stuttgart
www.mahle.com

Schmalzl, Hans Peter, Prof. Dr.-Ing.

Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim
www.pankl-apc.com

Schoch, Marcel, B. Eng.

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,
www.mann-hummel.com

Schurr, Anton, Dipl.-Ing.

TU Kaiserslautern
www.uni-kl.de

Seiffert, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.

Technische Universität Braunschweig
www.tu-braunschweig.de

Spicher, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.

Herxheim

Stoffels, Harald, Dr.-Ing.

Ford-Werke GmbH, Köln
www.ford.de

van Basshuysen, Richard, Dr.-Ing. E. h.

Herausgeber und Autor, Bad Wimpfen

Werth, Christoph, Dr.-Ing.

BorgWarner Turbo Systems GmbH
www.turbos.borgwarner.com/

Woike, David, Dipl.-Ing.

TU Kaiserslautern
www.uni-kl.de

Firmen- und Institutionenverzeichnis

Firmen

AUDI AG, Neckarsulm
Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky

BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH, Kirchheimbolanden
Dr. Stefan Münz
Dr.-Ing. Christoph Werth

BP Europa SE, GB Aral, Forschung Bochum
Wolfgang Dörmer
Ulrich Baron

Eberspächer catem GmbH & Co. KG, Herxheim
Michael Clade

Continental Emitec GmbH, Lohmar
Dipl.-Ing. Oswald Holz
Dipl.-Ing. Thomas Nagel

Ford-Werke GmbH, Köln
Dr. Harald Stoffels

MAHLE International GmbH, Stuttgart
Dr.-Ing. Wolfgang Issler

MAHLE GmbH, Stuttgart
Dipl.-Ing. Alexander Puck

Mann + Hummel GmbH, Ludwigsburg
Dipl.-Ing. (FH) Heinz Bühl
Dipl.-Ing. (FH) Alexander Korn
B. Eng. Marcel Schoch

Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl

Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen
Dipl.-Ing. (FH) Ralph Goll

SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried
Dr.-Ing. Uwe Meinig

WM Engineering & Consulting, Lohmar
Dipl.-Ing. Wolfgang Maus

Institutionen

MOT Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft für Motorentechnik, Optik und Thermodynamik mbH, Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Seiffert

TU Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl
Dipl.-Ing. Alexander Holzer
Dipl.-Ing. David Woike
Dipl.-Ing. Christoph Hörhammer
Dipl.-Ing. Anton Schurr
M. Sc Joerg Neugaertner

Technische Universität Graz
Prof. Dr. Helmut Eichlseder
Dr. Peter Grabner

Technische Universität Wien
Dr. Thomas Hofherr
Assoc.Prof. Dr. Peter Hofmann

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

A Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung

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

3.1 Grundlagen der Gemischbildung

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

5 Leistung und Drehmoment

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

6 Aufladung

6.1 Mechanische Aufladung

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

6.2 Abgasturboaufladung

Dr. Stefan Münz

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmalzl

6.3 Synergien zwischen der 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. 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

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

Dipl.-Ing. Thomas Nagel

10 Geräuschemissionen

Dr. Harald Stoffels

11 Einflüsse der Benzin-Direkteinspritzung auf weitere Motor-Einzelsysteme

11.1 Zündsysteme

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

11.2 Kolben

Dr.-Ing. Wolfgang Issler

11.3 Ventile, Ventilsitzringe, Ventilführungen

Dipl.-Ing. Alexander Puck

11.4 Saugrohre

Dipl.-Ing. (FH) Heinz Bühl

Dipl.-Ing. (FH) Alexander Korn

B. Eng. Marcel Schoch

11.5 Kurbelgehäuseentlüftung

Dr.-Ing. Uwe Meinig

11.6 Tankentlüftung

Dr.-Ing. Uwe Meinig

11.7 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

14.2 Konzepte für den Motorsport und Impulse für die Serienentwicklung

Dipl.-Ing. Ulrich Baretzky

14.3 Zweitaktmotoren mit Direkteinspritzung

Prof. Dr. Helmut Eichlseder

15 Marktentwicklung der Benzin-Direkteinspritzung

Dipl.-Ing. (FH) Ralph Goll

16 Ausblick

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

B Ottomotor mit Gas-Direkteinblasung**17 Direkteinblasung von gasförmigen Kraftstoffen**

17.1 Einleitung

*Prof. Dr. Helmut Eichlseder**Dr. Peter Grabner**Dr. Thomas Hofherr**Assoc.Prof. Dr. Peter Hofmann*

17.2 Anwendung von gasförmigen Kraftstoffen im Verbrennungsmotor

*Prof. Dr. Helmut Eichlseder**Dr. Peter Grabner**Dr. Thomas Hofherr**Assoc.Prof. Dr. Peter Hofmann*

17.3 Wasserstoff-Direkteinblasung

*Prof. Dr. Helmut Eichlseder**Dr. Peter Grabner*

17.4 Erdgas-Direkteinblasung

*Dr. Thomas Hofherr**Assoc.Prof. Dr. Peter Hofmann*

17.5 LPG-Direkteinspritzung

*Prof. Dr. Helmut Eichlseder**Dr. Peter Grabner*

17.6 Erdgas-Diesel-Dual-Fuel-Brennverfahren mit Direkteinblasung

*Prof. Dr. Helmut Eichlseder**Dr. Peter Grabner***C Methan-Benzin Zweistoffverbrennung****18 Ottomotoren mit einer Methan-Benzin Zweistoffverbrennung***Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl**Dr.-Ing. Christoph Werth**Dipl.-Ing. Alexander Holzer**Dipl.-Ing. David Woike**Dipl.-Ing. Christoph Hörhammer**Dipl.-Ing. Anton Schurr**M. Sc Joerg Neugaertner*