

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

*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](http://www.audi.de)

**Baron, Ulrich**

BP Europa SE, GB Aral,  
Forschung Bochum (vormals)  
[www.aral-forschung.de](http://www.aral-forschung.de)

**Bühl, Heinz, Dipl.-Ing. (FH)**

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,  
[www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com)

**Clade, Michael**

Eberspächer catem GmbH & Co. KG  
[www.eberspaecher.com](http://www.eberspaecher.com)

**Dörmer, Wolfgang**

BP Europa SE, GB Aral, Forschung Bochum  
[www.aral-forschung.de](http://www.aral-forschung.de)

**Eichseder, Helmut, Prof. Dr.**

Technische Universität Graz  
[www.ivt.tugraz.at](http://www.ivt.tugraz.at)

**Flierl, Rudolf, Prof. Dr.-Ing.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

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

Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen  
[www.bosch.de](http://www.bosch.de)

**Grabner, Peter, Dr.**

Technische Universität Graz  
[www.ivt.tugraz.at](http://www.ivt.tugraz.at)

**Hörhammer, Christoph, Dipl.-Ing.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

**Hofherr, Thomas, Dr.**

Technische Universität Wien  
[www.ifa.tuwien.ac.at](http://www.ifa.tuwien.ac.at)

**Hofmann, Peter, Assoc.Prof. Dr.**

Technische Universität Wien  
[www.ifa.tuwien.ac.at](http://www.ifa.tuwien.ac.at)

**Holz, Oswald, Dipl.-Ing.**

Continental Emitec GmbH, Lohmar  
[www.emitec.com](http://www.emitec.com)

**Holzer, Alexander, Dipl.-Ing.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

**Issler, Wolfgang, Dr.-Ing.**

MAHLE International GmbH, Stuttgart  
[www.mahle.com](http://www.mahle.com)

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

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,  
[www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com)

**Maus, Wolfgang, Dipl.-Ing.**

WM Engineering & Consulting, Lohmar  
[www.emitec.com](http://www.emitec.com)

**Meinig, Uwe, Dr.-Ing.**

SHW Automotive GmbH, Bad Schussenried  
[www.shw.de](http://www.shw.de)

**Münz, Stefan, Dr.**

BorgWarner Turbo Systems Engineering  
GmbH, Kirchheimbolanden  
[www.turbos.bwauto.com](http://www.turbos.bwauto.com)

**Nagel, Thomas, Dipl.-Ing.**

Continental Emitec GmbH, Lohmar  
[www.emitec.com](http://www.emitec.com)

**Neugaertner, Joerg, M. Sc.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

**Puck, Alexander, Dipl.-Ing.**

MAHLE GmbH, Stuttgart  
[www.mahle.com](http://www.mahle.com)

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

Pankl APC Turbosystems GmbH, Mannheim  
[www.pankl-apc.com](http://www.pankl-apc.com)

**Schoch, Marcel, B. Eng.**

MANN + HUMMEL GmbH, Ludwigsburg,  
[www.mann-hummel.com](http://www.mann-hummel.com)

**Schurr, Anton, Dipl.-Ing.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://www.uni-kl.de)

**Seiffert, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.**

Technische Universität Braunschweig  
[www.tu-braunschweig.de](http://www.tu-braunschweig.de)

**Spicher, Ulrich, Prof. Dr.-Ing.**

Herxheim

**Stoffels, Harald, Dr.-Ing.**

Ford-Werke GmbH, Köln  
[www.ford.de](http://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/](http://www.turbos.borgwarner.com/)

**Woike, David, Dipl.-Ing.**

TU Kaiserslautern  
[www.uni-kl.de](http://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*