

Günter P. Merker | Christian Schwarz | Rüdiger Teichmann (Hrsg.)

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion

herausgegeben von H. Burg und A. Moser

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

von H. Eichlseder und M. Klell

Fahrwerkhandbuch

herausgegeben von B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies

Verbrennungsmotoren

von E. Köhler und R. Flierl

Lenkungshandbuch

herausgegeben von P. Pfeffer und M. Harrer

Bosch Autoelektrik und Autoelektronik

herausgegeben von K. Reif

Rennwagentechnik

von M. Trzesniowski

Handbuch Fahrerassistenzsysteme

herausgegeben von H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf

Handbuch Fahrzeugakustik

herausgegeben von P. Zeller

Günter P. Merker | Christian Schwarz |
Rüdiger Teichmann (Hrsg.)

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Funktionsweise, Simulation, Messtechnik

5., vollständig überarbeitete, aktualisierte
und erweiterte Auflage

Mit 575 Abbildungen und 43 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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

Bis zur 3. Auflage erschien dieses Werk unter dem Titel „Verbrennungsmotoren“ von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Merker
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch
Dr. rer. nat. Frank Otto

1. Auflage 2001
2. Auflage 2004
- 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2006
- 4., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2009
- 5., vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Gabriele McLemore, Wiesbaden

Satz: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1393-0

Vorwort zur 5. Auflage

Heute werden als Standard in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung kommerziell zur Verfügung stehende Rechenprogramme zur Simulation des transienten Verhaltens von Fahrzeugen oder des kompletten Antriebsstranges, aber auch der hochgradig instationären Prozessabläufe im Brennraum eines Motors eingesetzt. Weil aber für diese Rechenprogramme in der Regel der Quellcode nicht zur Verfügung steht und in der Dokumentation oft Querverweise zu Grundlagen fehlen, haben die Anwender oft nur eine unzureichende Kenntnis über die physikalischen und chemischen Inhalte der in diesen Programmen verwendeten Modellansätze. Deshalb ist es uns ein besonderes Anliegen, unterschiedliche physikalische und chemische Ansätze deutlich zu machen und Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Modelle aufzuzeigen. Aufgrund der Fülle an Informationen mussten wir uns in diesem Buch auf die Vorgänge in Verbrennungsmotoren beschränken, so dass damit der Schwerpunkt des Buches eindeutig auf den thermodynamischen, strömungsmechanischen und chemischen Grundlagen der Modellierung motorischer Prozessabläufe liegt.

Für die vorliegende fünfte Auflage wurde der Inhalt entsprechend dem Untertitel Funktionsweise, Simulation, Messtechnik neu gegliedert, vollständig überarbeitet, aktualisiert und erweitert. Insbesondere stehen dabei Abschnitte zur Schadstoffreduktion bei Ottomotoren, Abgasnachbehandlung und die Simulation dreidimensionaler Strömungsfelder im Mittelpunkt. Das Buch ist in fünf Teile gegliedert.

Teil A mit den Kapiteln 2 bis 4 beschreibt die Funktionsweise, Aufladeverfahren und die thermodynamischen Grundlagen von Verbrennungsmotoren.

Teil B mit den Kapiteln 5 bis 8 ist den physikalischen und chemischen Grundlagen sowie der Messung und Analyse der Verbrennung, der Schadstoffbildung und der Emissionsmesstechnik gewidmet.

Teil C beinhaltet die Kapitel 9 bis 13 und beschreibt die 0D- und 1D-Simulation sowohl verschiedener Teilprozesse als auch des Gesamtprozesses.

In *Teil D* mit den Kapiteln 14 bis 17 wird die 3D-Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse behandelt.

Der fünfte *Teil E* schließt den Bogen mit Systembetrachtungen und Aussagen zur Zukunft des Verbrennungsmotors.

Wir hoffen, dass uns mit diesem Werk eine verständliche und aktuelle Darstellung der Simulation motorischer Prozesse gelungen ist und wir würden uns sehr freuen, wenn dieses Buch für alle Anwender in Wissenschaft und Technik von möglichst großem Nutzen ist.

Wir danken allen Autoren für ihre konstruktive und engagierte Mitarbeit. Alle Autoren und ihre Firmen oder Institutionen sowie ihre Beiträge sind im Vorspann aufgeführt. Unser besonderer Dank gilt der AVL LIST GmbH für die fachliche und materielle Unterstützung bei Erstellung dieses Buches. Aufbau und Inhalt des Buches haben wir mit vielen Kollegen diskutiert, unser besonderer Dank gilt dabei Gerhard Haussmann. Herrn Ewald Schmitt und Frau Gabriele McLemore vom Vieweg + Teubner Verlag danken wir für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit.

Tettnang/München im April 2011

Günter P. Merker
Rüdiger Teichmann

Geleitwort

Die Bücher „Verbrennungsmotoren“ – maßgeblich verantwortet von Prof. G. P. Merker richteten sich in der Vergangenheit hauptsächlich an Mitarbeiter von Berechnungsabteilungen und entwickelten sich dort zu anerkannten Informationsquellen. Die Trennlinie zwischen Simulation und Versuch ist aber heute fließender denn je, ja man kann fast sagen, jeder simuliert ein bisschen oder muss Ergebnisse von Berechnungen einschätzen. Gleichzeitig ist die Wissens- und Erfahrungsbasis bei jedem unterschiedlich. Von diesen unterschiedlichen Standpunkten kommend, Brücken zu schlagen, wurde das Buch kontinuierlich erweitert –es entstand „Grundlagen Verbrennungsmotoren“.

Das Buch liegt nun in einer deutlich erweiterten Auflage vor und spannt den Bogen von der Funktionsweise von Verbrennungsmotoren über die Simulation von Prozessen in Verbrennungsmotoren bis hin zur Messtechnik. Trotz der Breite der Themen werden einige Fachgebiete in einer solchen Tiefe behandelt, die für das Gesamtverständnis hilfreich ist. Aber dieses Fachbuch enthält noch mehr und das ist mir gerade heute ein persönliches Anliegen:

Neben einer Betrachtung des Gesamtsystems Antrieb, wird versucht, die Diskussion über den optimalen Motor mit technischen Argumenten zu unterlegen, um somit dem Leser entsprechend seiner Randbedingungen zielführende Entscheidungen zu ermöglichen.

Für dieses Werk konnte eine gute Kombination aus wissenschaftlichen und praktisch orientierten Autoren gewonnen werden, so dass es als Lehrbuch für Studenten, als Weiterbildung oder einfach nur zum Nachschlagen bei täglichen Fragen gut geeignet ist. Ich weiß auch, dass für die Erstellung der Beiträge viel Freizeit aufgewendet wurde und möchte mich für den Einsatz bei allen, die zum Gelingen dieses Buches beigetragen haben, bedanken.

Graz, im Juli 2011

Helmut List

Die Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

wurde 1942 in Augsburg geboren. Von 1964 bis 1969 studierte er an der Technischen Hochschule München Maschinenbau. Anschließend war er wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Thermodynamik tätig, 1974 erfolgte die Promotion, 1978 habilitierte er sich. Von 1978 bis 1980 war er bei der MTU-München GmbH tätig. 1980 nahm er einen Ruf auf die C3-Professur für Kältetechnik an der Universität Karlsruhe an. 1986 trat er in die MTU-Friedrichshafen GmbH ein und leitete dort die Hauptabteilung Analytik/Motorenberechnung. 1994 folgte er dem Ruf auf die C4-Professur für Verbrennungsmotoren an die Universität Hannover an und leitete bis zu seiner Emeritierung 2005 das Institut für Technische Verbrennung. In dieser Zeit hat er sich insbesondere mit der experimentellen und theoretischen Untersuchung der Verbrennung in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren beschäftigt. Insgesamt hat er 43 Doktoranden zur Promotion und vier zur Habilitation geführt. Er ist Autor und Mitautor von über 140 technisch-wissenschaftlichen Publikationen und sechs Fachbüchern auf den Gebieten Wärmeübertragung, Strömungsmechanik und Verbrennungsmotoren. Heute ist er als freier Berater für die Motorenindustrie tätig.

Apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz

wurde 1964 in Regensburg geboren. Er studierte von 1983 bis 1988 an der Technischen Universität München Maschinenbau. Von 1989 bis 1997 war er wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität München und promovierte Anfang 1993 im Bereich der Motoren-Simulation. Im Anschluss daran bereitete er seine Habilitation mit dem Titel „Theorie und Simulation aufgeladener Verbrennungsmotoren“ vor. Nach deren Abschluss Ende 1998 an der Universität Hannover erhielt er die *venia legendi* für das Fach Verbrennungsmotoren. Seither unterrichtet er dort das Fach „Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse“. Im Jahr 1997 wechselte er zur BMW AG. Seit 2004 verantwortet er in der Serienentwicklung die Brennverfahrensentwicklung und die Ladungswechselauslegung aller Serien-Ottomotoren und seit 2010 zusätzlich die Entwicklung der Aufladung und der Abgassysteme. Er betreute mehrere Dissertationen auf dem Gebiet Verbrennungsmotoren. Ferner ist er Autor und Mitautor zahlreicher Veröffentlichungen und Vorträge im Themengebiet Brennverfahren und Aufladung von Verbrennungsmotoren und ist Mitautor eines Fachbuches aus diesem Bereich.

Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann

wurde 1960 in Nordhausen geboren. Er studierte Maschinenbau mit der Spezialisierung „Kraftfahrzeugtechnik“ an der Technischen Universität Dresden von 1982 bis 1987. Danach wurde er an der gleichen Einrichtung Forschungsstudent und wissenschaftlicher Assistent bis 1990. 1991 promovierte er zu einem Thema der Verbrennungsverfahrenentwicklung an LKW-Dieselmotoren.

Im gleichen Jahr begann er seine berufliche Laufbahn in der Vorentwicklung für Antriebsentwicklung der BMW AG in München. Im Rahmen seiner Spezialgebiete Thermodynamik, Verbrennungsentwicklung, Ladungswechsel und der Kalibrierung dieser Vorgänge war er in verschiedenen Themen bis zur Serienentwicklung tätig. 1999 wurde er Leiter des Produktmanagement der gesamten Indizieretechnik bei der AVL List GmbH in Graz. Nach drei Jahren übernahm er die Verantwortung als Segmentleiter für Indizieretechnik, welche ab 2005 die Fachgebiete für optische Messtechnik und Forschungsmotoren als Global Segment Manager Verbrennungsmesstechnik einschließt. Seit 2007 koordiniert er zusätzlich die Fahrzeugmesstechnikaktivitäten der AVL. Dr. Teichmann ist Autor und Koautor zahlreicher Publikationen und Betreuer von Diplomarbeiten.

Autorenverzeichnis

Beidl, Christian, Univ.-Prof. Dr.	Technische Universität Darmstadt www.tu-darmstadt.de
Bergmann, Alexander, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Dinkelacker, Friedrich, Univ.-Prof. Dr.	Leibniz Universität Hannover www.uni-hannover.de
Durst, Bodo, Dr.-Ing.	BMW AG, München www.bmw.de
Eckert, Peter, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin www.iav.de
Eichlseder, Helmut, Univ.-Prof. Dr.	Technische Universität Graz www.tugraz.at
Engeljehring, Kurt	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Fraidl, Günter, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Gottschalk, Wolfram, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin www.iav.de
Kasper, Werner	MTU Friedrichshafen GmbH www.mtu-online.de
Kapus, Paul, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Koegeler, Hans-Michael, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Krüger, Christian, Dr.-Ing.	Daimler AG, Stuttgart www.daimler.de
Merker, Günter P., Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.	Leibniz Universität Hannover www.uni-hannover.de
Mohr, Hinrich, Dr.-Ing.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Otto, Frank, Dr.rer.nat.	Daimler AG, Stuttgart www.daimler.de

Rakowski, Sebastian, Dr.-Ing.	WABCO Development GmbH, Hannover www.wabco.de
Reulein, Claus, Dr.-Ing.	BMW AG, München www.bmw.de
Schwarz, Christian, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	BMW AG, München www.bmw.de
Spicher, Ulrich, Univ.-Prof. Dr.-Ing.	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) www.kit.edu
Stiesch, Gunnar, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	MAN Diesel & Turbo SE, Augsburg www.mandieselturbo.com
Tatschl, Reinhard, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Teichmann, Rüdiger, Dr.-Ing.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Wimmer, Andreas, Ao. Univ.-Prof. Dr. techn.	Technische Universität Graz www.tugraz.at
Winklhofer, Ernst, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com
Wintruff, Ingo, Dr.-Ing.	MTU Friedrichshafen GmbH www.mtu-online.de
Witt, Andreas, Prof. Dr. techn.	BMW AG, München www.bmw.de
Wurzenberger, Johann, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria www.avl.com

Firmen- und Hochschulverzeichnis

Firmen

AVL LIST GmbH, Graz, Austria

Dr. Alexander Bergmann
Kurt Engeljehringer
Dr. Günter Fraidl
Dr. Paul Kapus
Dr. Hans-Michael Koegeler
Dr. Hinrich Mohr
Dr. Reinhard Tatschl
Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann
Dr. Ernst Winklhofer
Dr. Johann Wurzenberger

BMW AG, München

Dr.-Ing. Bodo Durst
Dr.-Ing. Claus Reulein
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
Prof. Dr. techn. Andreas Witt

Daimler AG, Stuttgart

Dr.-Ing. Christian Krüger
Dr. rer. nat. Frank Otto

IAV GmbH, Berlin

Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Wolfram Gottschalk

MAN Diesel SE, Augsburg

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch

MTU Friedrichshafen GmbH,
Friedrichshafen

Werner Kasper
Dr.-Ing. Ingo Wintruff

WABCO Development GmbH,
Hannover

Dr.-Ing. Sebastian Rakowski

Hochschulen

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

Leibniz Universität Hannover

Univ.-Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

Technische Universität Darmstadt

Univ.-Prof. Dr. Christian Beidl

Technische Universität Graz, Austria

Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder
Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

1 Einleitung Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

Teil A: Der Hubkolbenmotor

2 Funktionsweise des Verbrennungsmotors Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Wolfram Gottschalk
Dr.-Ing. Hinrich Mohr
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski
Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer
Prof. Dr. techn. Andreas Witt

3 Thermodynamik des Verbrennungsmotors Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker

4 Aufladung von Verbrennungsmotoren Dipl.-Ing. Werner Kasper
Dr.-Ing. Claus Reulein
Dr.-Ing. Ingo Wintruff

Teil B: Verbrennung, Schadstoffbildung, Emissionsmesstechnik

5 Reaktionskinetik Dr.-Ing. Peter Eckert
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch

6 Schadstoffbildung Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski

7 Emissionsmesstechnik Dr. Alexander Bergmann
Kurt Engeljehring
Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann

8 Verbrennungsdiagnostik apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann
Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer
Dr. Ernst Winklhofer

Teil C: 0D- und 1D-Simulation des Gesamtprozesses

- 9 Reale Arbeitsprozessrechnung** Dr.-Ing. Sebastian Rakowski
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
- 10 Phänomenologische Verbrennungsmodelle** Univ.-Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker
Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch
- 11 Abgasnachbehandlungssysteme** Dr. Reinhard Tatschl
Dr. Johann Wurzenberger
- 12 Analyse des Gesamtprozesses** apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
- 13 Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse** Univ.-Prof. Dr. Christian Beidl
Dr. Hans-Michael Koegeler

Teil D: 3D-Simulation des Arbeitsprozesses

- 14 Dreidimensionale Strömungsfelder** Dr.-Ing. Christian Krüger
Dr. rer. nat. Frank Otto
- 15 3D-Simulation der Aufladung** Dr.-Ing. Bodo Durst
- 16 Simulation von Einspritzprozessen** Dr.-Ing. Christian Krüger
Dr. rer. nat. Frank Otto
- 17 Simulation der Verbrennung** Dr.-Ing. Christian Krüger
Dr. rer. nat. Frank Otto

Teil E: Systembetrachtungen und Ausblick

- 18 Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebstranges** Dr. Günter Fraidl
Dr. Paul Kapus
Dr. Reinhard Tatschl
Dr. Johann C. Wurzenberger
- 19 Die Zukunft des Verbrennungsmotors** Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichseder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage	V
Geleitwort	VI
Die Herausgeber	VII
Autorenverzeichnis	IX
Firmen- und Hochschulverzeichnis	XI
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter	XIII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Modellbildung und Simulation	2
1.3 Verbrennungsdiagnostik	5
1.4 Möglichkeiten und Grenzen	5
Literatur	7
Teil A: Hubkolbenmotor	9
2 Motorische Verbrennung	11
2.1 Brennstoffe	11
2.1.1 Kohlenwasserstoffe	11
2.1.2 Benzin und Ottobrennstoffe	16
2.1.3 Dieselmotoren	17
2.1.4 Brennstoffe für Marineanwendungen	18
2.1.5 Alternative Brennstoffe	19
2.1.6 Klassifikation von Verbrennungsmotoren	21
2.2 Dieselmotoren	22
2.2.1 Einspritzverfahren und -systeme	22
2.2.2 Gemischbildung	29
2.2.3 Selbstzündung und Verbrennungsablauf	31
2.2.4 Rohemissionen des Dieselmotors	36
2.2.5 Potenzial des Dieselmotors	47
2.3 Ottomotoren	48
2.3.1 Vorgemischte Flammen und Diffusionsverbrennung	48
2.3.2 Zündung	49
2.3.3 Flammenfrontentwicklung, Einfluss der Turbulenz	52
2.3.4 Verbrennungsgeschwindigkeit und Brennverlauf	55
2.3.5 Irreguläre Verbrennung	55
2.3.6 Brennverfahren, Gemischbildung, Betriebsarten	60
2.3.7 Rohemissionen und innermotorische Schadstoffreduktion	72
2.3.8 Potenziale des Ottomotors	98

2.4	Groß-Gasmotoren	100
2.4.1	Allgemeine Grundlagen	102
2.4.2	Großgas-Ottomotoren	108
2.5	Groß-Dieselmotoren	132
2.5.1	Allgemeine Grundlagen	132
2.5.2	Zwei-Takt Langsamläufer	137
2.5.3	Vier-Takt Mittelschnellläufer	141
2.5.4	Vier-Takt Schnellläufer	146
	Literatur	149
3	Thermodynamik des Verbrennungsmotors	153
3.1	Energiewandlung	153
3.2	Kinematik des Kurbeltriebs	154
3.3	Kreisprozesse	158
3.3.1	Grundlagen	158
3.3.2	Geschlossene Kreisprozesse	163
3.3.3	Offene Vergleichsprozesse	169
3.4	Realer Motorprozess	171
3.4.1	Kenngrößen und Kennwerte	172
3.4.2	Ottomotoren	175
3.4.3	Dieselmotoren	176
3.4.4	Hybridmotoren	177
	Literatur	178
4	Aufladung von Verbrennungsmotoren	179
4.1	Aufladeverfahren	179
4.1.1	Druckwellenaufladung	179
4.1.2	Mechanische Aufladung	183
4.1.3	Einstufige Abgasturboaufladung	188
4.1.4	Ladedruckregelung	193
4.1.5	Zweistufige Abgasturboaufladung	197
4.1.6	Verbundaufladung (Turbocompound)	202
4.2	Simulation von Komponenten der Aufladung	203
4.2.1	Strömungsverdichter	204
4.2.2	Verdrängerlader	213
4.2.3	Strömungsturbine	214
4.2.4	Abgasturbolader	228
4.2.5	Ladeluftkühlung	231
	Literatur	236
	Teil B: Verbrennung, Schadstoffbildung, Emissionsmesstechnik	237
5	Reaktionskinetik	239
5.1	Grundlagen	239
5.1.1	Chemisches Gleichgewicht	239
5.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit	242
5.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität	243

5.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen	245
5.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	245
5.2.2	Zündvorgänge	248
5.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation	252
	Literatur	258
6	Schadstoffbildung	259
6.1	Abgaszusammensetzung	259
6.2	Kohlenmonoxid (CO)	260
6.3	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)	261
6.3.1	Quellen von HC-Emissionen	262
6.3.2	Nicht limitierte Schadstoffkomponenten	265
6.4	Partikelemission beim Dieselmotor	269
6.4.1	Einführung	269
6.4.2	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	272
6.4.3	Entstehung von Ruß	273
6.4.4	Modellierung der Partikelemission	275
6.5	Stickoxide	278
6.5.1	Thermisches NO	278
6.5.2	Prompt-NO	282
6.5.3	Über N2O-Mechanismus erzeugtes NO	283
6.5.4	Brennstoff-Stickstoff	284
6.5.5	Reaktionen zu NO2	284
	Literatur	284
7	Emissionsmesstechnik	287
7.1	Einführung	287
7.2	Messgasaufbereitung	287
7.2.1	Messgasaufbereitung für Abgas-Messanlagen (AMA)	288
7.2.2	Messgasaufbereitung durch Verdünnung	291
7.3	Messung gasförmiger Bestandteile	293
7.3.1	NDIR – Nichtdispersiver Infrarot Detektor	293
7.3.2	FID – Flame Ionisation Detektor	295
7.3.3	CLD – Chemolumineszenz Detektor	295
7.3.4	PMD – Paramagnetischer Detektor	296
7.3.5	FTIR – Fourier Transform Infrarot Spektroskopie	297
7.3.6	LDS – Laser Dioden Spektroskopie	298
7.4	Messung fester Bestandteile	299
7.4.1	Messung der Partikel entsprechend gesetzlicher Vorgaben	299
7.4.2	Bestimmung von Partikeleigenschaften im Abgas mit alternativen Verfahren	302
	Literatur	307
8	Verbrennungsdiagnostik	309
8.1	Druckindizierung	309
8.1.1	Allgemeines	309
8.1.2	Die Indiziermesskette	312

8.1.3	Einflüsse auf die Messgenauigkeit	328
8.1.4	Kennwerte infolge von äußeren Einflüssen auf den Sensor	335
8.1.5	Varianten für die Sensoradaptierung	340
8.1.6	Elektrische Drift am Ladungsverstärker	345
8.1.7	Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem	346
8.2	Druckverlaufsanalyse	348
8.2.1	Bestimmung des Brennverlaufes	348
8.2.2	Verlustteilung	351
8.2.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren	354
8.3	Optische Messverfahren	356
8.3.1	Einleitung	356
8.3.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick	356
8.3.3	Anwendungsbeispiele optischer Methoden	358
8.3.4	Dieselmotoren	358
8.3.5	Ottomotoren	363
8.3.6	Lasermesstechniken	375
8.4	Ausblick Verbrennungsdiagnostik	376
	Literatur	377

Teil C: 0D- und 1D-Simulation des Gesamtprozesses 379

9	Reale Arbeitsprozessrechnung	381
9.1	Ein-Zonen-Zylinder-Modell	382
9.1.1	Grundlagen	382
9.1.2	Ermittlung des Massenstroms durch die Ventile/Ventilhubkurven	384
9.1.3	Wärmeübergang	386
9.1.4	Brennverlauf	398
9.1.5	Klopfende Verbrennung	410
9.1.6	Innere Energie	413
9.2	Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	421
9.2.1	Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum	421
9.2.2	Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider	424
9.2.3	Modellierung des Ladungswechsels beim 2-Takt-Motor	428
9.3	Modellierung des Gaspfades	430
9.3.1	Modellierung peripherer Komponenten	430
9.3.2	Modellbildung	432
9.3.3	Integrationsverfahren	433
9.4	Gasdynamik	434
9.4.1	Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	434
9.4.2	Numerische Lösungsverfahren	438
9.4.3	Randbedingungen	440
9.5	Hydraulische Simulation	445
9.5.1	Modellierung der Grundkomponenten	446
9.5.2	Anwendungsbeispiel	449
	Literatur	450

10 Phänomenologische Verbrennungsmodelle	453
10.1 Dieselmotorische Verbrennung	454
10.1.1 Nulldimensionale Brennverlaufsfunction	454
10.1.2 Stationärer Gasstrahl	456
10.1.3 Paket-Modelle	460
10.1.4 Zeitskalen Modelle	467
10.2 Ottomotorische Verbrennung	471
10.2.1 Laminare und turbulente Flammengeschwindigkeit	471
10.2.2 Wärmefreisetzung	473
10.2.3 Zündung	475
10.2.4 Klopfen	476
Literatur	477
11 Abgasnachbehandlungssysteme	479
11.1 Methoden der Abgasnachbehandlung	479
11.2 Modellbildung und Simulation	481
11.3 Abgaskatalysatoren	481
11.3.1 Grundgleichungen	482
11.3.2 Katalysator-Typen	485
11.4 Dieselpartikelfilter	490
11.4.1 Grundgleichungen	490
11.4.2 Beladung und Druckverlust	494
11.4.3 Regeneration und Temperaturverteilung	495
11.5 Dosiereinheiten	496
11.6 Gesamtsystem	497
Literatur	498
12 Gesamtprozessanalyse	499
12.1 Allgemeines	499
12.2 Thermisches Motorverhalten	499
12.2.1 Grundlagen	499
12.2.2 Kühlkreislauf	500
12.2.3 Ölkreislauf	501
12.3 Motorreibung	502
12.3.1 Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor	502
12.3.2 Reibungsansatz für den Warmlauf	503
12.4 Stationäre Simulationsergebnisse	505
12.5 Transiente Simulationsergebnisse	511
Literatur	515
13 Beherrschung komplexer Entwicklungsprozesse	517
13.1 Notwendigkeit von Optimierungsstrategien	518
13.2 Modellstrukturierung	519
13.3 Modellansätze für die Optimierung	525
13.4 Anwendungsbeispiele für Optimierungsaufgaben	527
13.4.1 Emissionsoptimierung Diesel PKW	527
13.4.2 Volllastoptimierung Ottomotor	533

13.4.3	Variantenauslegung von Arbeitsmaschinen	536
13.4.4	Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten	541
13.5	Funktionsbedatung	544
13.6	Zusammenfassung	548
	Literatur	549
Teil D:	3D-Simulation des Arbeitsprozesses	551
14	Dreidimensionale Strömungsfelder	553
14.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen	555
14.1.1	Massen- und Impulstransport	555
14.1.2	Transport von innerer Energie und Spezies	558
14.1.3	Passive Skalare und Mischungsbruch	559
14.1.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen	560
14.2	Turbulenz und Turbulenzmodelle	560
14.2.1	Phänomenologie der Turbulenz	560
14.2.2	Modellierung der Turbulenz	562
14.2.3	Turbulentes Wandgesetz	565
14.2.4	Modellierung des turbulenten Mischungszustandes	567
14.2.5	Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze	570
14.3	Numerik	574
14.3.1	Finites-Volumen-Verfahren	574
14.3.2	Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen	575
14.3.3	Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema	576
14.3.4	Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema	578
14.3.5	Diskretisierung des Quellterms	579
14.3.6	Operator-Split-Verfahren	580
14.3.7	Diskretisierung und numerische Lösung der Impuls-Gleichung ...	580
14.4	Rechnetzeze	581
14.5	Beispiele	583
14.5.1	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor	583
14.5.2	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor ...	584
14.5.3	Düseninnenströmung	586
	Literatur	590
15	3D-Simulation der Aufladung	591
15.1	Allgemeines	591
15.2	Grundlagen der 3D-CFD-Simulation von Turbomaschinen	592
15.2.1	Behandlung unterschiedlicher und bewegter Koordinatensysteme	592
15.2.2	Gittergenerierung für Turbomaschinen	594
15.2.3	Aufbau von Berechnungsmodellen und Randbedingungen	596
15.3	Postprocessing: Ergebnisanalyse und -darstellung	598
15.4	Anwendungsbeispiele	600
15.4.1	Analyse des Verdichterverhaltens	600
15.4.2	Untersuchung von Turbinenvarianten	602

16	Simulation von Einspritzprozessen	603
16.1	Einzeltröpfchenprozesse	603
16.1.1	Impulsaustausch	603
16.1.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell)	604
16.1.3	Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponentenmodellierung)	607
16.1.4	Flashboiling	611
16.2	Strahlstatistik	612
16.2.1	Boltzmann-Williams-Gleichung	613
16.2.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung: Das Standardmodell (Lagrange-Formulierung)	614
16.2.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen	616
16.2.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt	618
16.2.5	Modellierung von Zerfallsprozessen	619
16.2.6	Modellierung von Stoßprozessen	623
16.2.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell ...	624
16.2.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker-Planck-Gleichung	625
16.2.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung	630
16.2.10	Probleme des Standard-Strahlmodells	633
16.2.11	Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit nach außen öffnendem Piezo-Injektor	636
16.3	Euler-Strahlmodelle	639
16.3.1	Lokal homogene Strömung	641
16.3.2	Einbettungen von 1-D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen ..	643
16.3.3	3D-Euler-Verfahren	646
	Literatur	649
17	Simulation der Verbrennung	651
17.1	Verbrennungsregimes	651
17.2	Allgemeines Vorgehen	653
17.3	Diesel-Verbrennung	655
17.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung	655
17.3.2	Zündung	662
17.3.3	NO _x -Bildung	662
17.3.4	Rußbildung	664
17.3.5	HC- und CO-Emissionen	665
17.4	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung)	665
17.4.1	Zweiphasenproblematik	666
17.4.2	Magnussen-Modell	669
17.4.3	Flammenflächenmodelle (auch Coherent Flame Models)	673
17.4.4	G-Gleichung	676
17.4.5	Diffusive G-Gleichung	679
17.4.6	Zündung	680
17.4.7	Klopfen	681
17.4.8	Schadstoffbildung	681

17.5	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen) ..	681
17.6	Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick	686
17.6.1	Netzbewegung	687
17.6.2	Numerik	687
17.6.3	Turbulenz	688
17.6.4	Modellierung der Einspritzprozesse	688
17.6.5	Modellierung der Verbrennung	691
	Literatur	692
Teil E: Systembetrachtungen und Ausblick		695
18	Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebsstrangs	697
18.1	Zukünftige Entwicklungsziele der Verbrennungsmotoren	697
18.1.1	Einführung	697
18.1.2	Konfiguration des optimalen Antriebssystems	699
18.1.3	Technologieelemente künftiger Antriebsstrang-Konfigurationen ..	700
18.1.4	Vorauslegung	702
18.1.5	Entwicklungsphase	708
18.1.6	Antriebsstrangkonfigurationen – Beispiele	710
18.2	Ansätze zur simulationsgestützten Motorauslegung	715
18.2.1	Simulation im Motorentwicklungsprozess	716
18.2.2	Skalierbare Motor- und Gesamtsystemmodellierung	719
18.2.3	Ausgewählte Anwendungen	725
18.2.4	Ausblick	731
	Literatur	732
19	Zukunft des Verbrennungsmotors	735
19.1	Einleitung	735
19.2	Die Rolle der Verbrennungsmotoren für die Mobilität der Zukunft	736
19.3	Verbrennungsmotoren – Gestern, Heute, Morgen	743
19.3.1	Alternative Konzepte	743
19.3.2	Entwicklungspotenzial des Verbrennungsmotors	751
19.4	Zukünftige Kraftstoffe	766
19.4.1	Anforderungen	766
19.4.2	Bio-Kraftstoffe	770
19.4.3	Synthetische Kraftstoffe (<i>SynFuel</i>)	772
19.4.4	Wasserstoff	772
19.5	Zusammenfassung/Ausblick	774
	Literatur	776
Sachwortverzeichnis		779

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungen

AG	Arbeitsgas
AGR	Abgasrückführung
AMA	Abgasmessanlage
ATL	Abgasturbolader
AV	Auslassventil
BMEP	break mean effective pressure (effektiver Mitteldruck)
BV	Brennverlauf
CAI	Controlled Auto Ignition
CCR	Combustion Chamber Recirculation
CFD	Computational Fluid Dynamics
CI	Compression Ignition
CLD	Chemolumineszenz Detektor
CNG	Compressed Natural Gas
CPC	Condensation Particle Counting
CR	Common Rail
CVS	Constant Volume Sampler
DI	Direct Injection
DME	Dimethylether
DRV	Druckregelventil
DZ	Dammköhler-Zahl
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPR	Exhaust Port Recirculation
EV	Einspritzverlauf/Einlassventil
EWA	Energiewandlungsanlage
FAME17	Fetty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
FID	Flame Ionisation Detektor
FTIR	Fourier Transform Infrarot Spektroskopie
GDI	Gasoline Direct Injection
Gz	Graetz-Zahl
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HD	Hochdruck
HE	Hydro-Erosiv
HFO	Heavy Fuel Oil
IMEP	indizierter Mitteldruck
IR	Infrarot
LDA	Laser Doppler Anemometrie
LDS	Laser Dioden Spektroskopie
LET	Low End Torque
LIF	Laser Induced Fluorescence
LLK	Ladeluftkühler
LNG	Liquified Natural Gas

LPG	Liquified Petroleum Gas
LWOT	Ladungswechsel-OT
MDO	Marine Diesel Oil
MOZ	Motor-Oktanzahl
MTU	Motoren- und Turbinen-Union
ND	Niederdruck
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot Detektor
NT	Nutzturbine
Nu	Nußelt-Zahl
OT	oberer Totpunkt
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	polyzyklische Biphenyle
PCT	polyzyklische Terphenyle
PCV	Pressure Control Valve (Druckregelventil)
PD	Pumpe-Düse
PDA	Phase Doppler Anemometrie
PIV	Particle Image Velocimetry
PLD	Pumpe-Leitung-Düse
PMD	Paramagnetischer Detektor
Pr	Prandtl-Zahl
Re	Reynolds-Zahl
RG	Restgas
RHR	Rate of Heat Release
RME	Rapsmethylester
ROZ	Research-Oktan-Zahl
Sc	Schmidt-Zahl
SCR	Selective Catalytic Reduction
SI	Sparc Ignition
TC	turbocharged
UT	unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett
VTG	verstellbare Turbinengeometrie
V-Soot	Rußkennzahl
ZOT	Zünd-OT
ZV	Zündverzug
ZZP	Zündzeitpunkt

Formelzeichen

a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
A	Flammenfrontfläche [m ²]
[A]	Spezieskonzentration [mol/mol]
b _e	spezifischer Brennstoffverbrauch [g/kWh]
B _m	Modellkonstante
c	Geschwindigkeit [m/s]
C _d	Durchflussbeiwert
c _m	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m/s]

C, c	Konstanten
c_v	spezifische Wärme bei konstantem Volumen [J/kg]
c_p	spezifische Wärme bei konstantem Druck [J/kg]
d_{hyd}	hydraulischer Durchmesser [m]
D	Kolbendurchmesser [m]
D	Diffusionskoeffizient
E	Energie [J]
E	Elastizitätsmodul [N/m ²]
E_A	Aktivierungsenergie [J]
e	spezifische Energie [J/kg]
e	Exzentrizität [m]
f	Reibbeiwert
G	freie Enthalpie [J]
\underline{g}	spezifische freie Enthalpie [J/kg]
\tilde{g}	molare freie Enthalpie [J/mol]
H	Enthalpie [J]
H_u	unterer Heizwert [J/kg]
\underline{h}	spezifische Enthalpie [J/kg]
\tilde{h}	molare Enthalpie [J/kg]
\tilde{h}°	Standard-Bildungsenthalpie [J/mol]
h	Höhe [m]
I	Impuls [kg m/s]
J	Jakobimatrix
K	Gleichgewichtskonstante
K	Kavitationszahl
k	Geschwindigkeitskonstante
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
l_L	integrales Längenmaß [m]
l_T	Taylor-Längenmaß [m]
l_K	Kolmogorovlänge [m]
l	Pleuellänge [m]
M	Moment [Nm]
m	Masse [kg]
m	Vibe-Parameter
N	Partikelanzahl
n_i	Stoffmenge [mol]
p	Druck [bar]
p_m	Mitteldruck [bar]
P	Leistung [W]
Q	Wärmemenge [J]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
q	spezifische Wärmemenge [J/kg]
\dot{q}	Wärmestromdichte [W/m ²]
q*	Parameter

R	Gaskonstante
r	Luftgehalt
r	Radius [m]
r	Reaktionsrate
s	spezifische Entropie [J/kg K]
s	Flammengeschwindigkeit [m/s]
s	Kolbenweg [m]
s	Länge [m]
T	Temperatur [K]
t	Zeit [s]
U	innere Energie [J]
u	spezifische innere Energie [J/kg]
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten [m/s]
V	Volumen [m ³]
v	spezifisches Volumen [m ³ /kg]
W	Leistung [W]
x'	Verhältnis
x, y, z	Längenkoordination [m]
z	Zylinderzahl

Indizes

0	Ruhe- oder Referenzzustand
1	Austritt
1	ein
2	aus
a	Austritt
ab	abgeführt
ad	adiabat
AG	Arbeitsgas
Arr	Arrhenius
B	Brennstoff
b	Brennstoff
BB	Blow By
Beh	Behälter
bez	bezogene Größe
c	Carnotprozess
c	Compression
ch	chemisch
D	Drossel
dampf	Dampfdruck
diff	diffusiv
e	effektiv
e	Eintritt
g	Gasphase
geo	geometrisch

ges	gesamt
i	Spezies i
i	innere
irr	irreversible
is	isentrop
j	Spezies j
K	Kraftstoff
k, l, m, n	Summationsindex
komp	Kompression
krit	kritisch
l	laminar
l	rückwärts (links)
LL	Ladeluft
max	maximal
min	minimal
n. V.	nach Verdichter
n. T.	nach Turbine
p	isobar
R	Reaktion
r	Reibung
r	vorwärts (rechts)
s	isentrop
Sys	System
t	technisch
t	total
t	turbulent
tats	tatsächlich
th	thermisch
theo	theoretisch
T	Turbine
TL	Turbolader
uv	unverbrannt
v	verbrannt
V	Verdichter
Verbr	Verbrennung, verbrannt
vp	Seiligerprozess
v. T.	vor Turbine
v. V.	vor Verdichter
w	Wand
w ^l	turbulente Schwankungsgröße
\tilde{w}	molare Größe
\bar{w}	Mittelwert
zu	zugeführt
Zyl	Zylinder

Griechische Symbole

α	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
β	Stoffübergangskoeffizient [m ³ /s]
Γ	freie Oberfläche [m ²]
Δ	Differenz
δ	Differenz
Δh	Reaktionsenthalpie [J/kg]
Δp	Druckverlust [bar]
ε	Verdichtungsverhältnis
ε	Kühlziffer
ε	Fehler
Θ	Trägheitsmoment [Nm]
ζ	Reibbeiwert
ζ	Kontraktionszahl
η	dynamische Viskosität [Pa · s]
η_v	Umsetzungsgrad
κ	Isentropenkoeffizient
λ	Luftverhältnis
λ	Reibungszahl
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mk]
λ_S	Schubstangenverhältnis
μ	chemisches Potenzial [J/mol]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
ν_i	stöchiometrischer Koeffizient
ξ	Atomzahlverhältnis
ξ	Verhältnis
δ	chemisches Potenzial [J/kg]
π	Druckverhältnis
ρ	Dichte [kg/m ³]
τ	charakteristische Zeit [s]
φ	Kurbelwinkel [° KW]
ψ	Ausflussfunktion
ω	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Der Verbrennungsmotor hat in den letzten hundert Jahren als Antriebsaggregat für Land- und Wasserfahrzeuge aber auch als Stationärmotor zum Antrieb von Arbeitsmaschinen und Generatoren eine weltweite Verbreitung gefunden und damit letztendlich die heutige Mobilität erst ermöglicht. Personen- und Nutzfahrzeuge werden überwiegend durch Otto- bzw. Dieselmotoren angetrieben. Der Otto- bzw. Benzinmotor geht auf Nikolaus August Otto und auf Gottlieb Daimler mit Wilhelm Maybach und damit auf die Jahre 1876 und 1886 zurück. Rudolf Diesel hat die Thermodynamik und die Konstruktion seines Dieselmotors in seinem Buch im Detail beschrieben (Diesel 1893). Im gleichen Jahr lief auch sein erster Versuchsmotor.

Otto- und Dieselmotoren haben in den folgenden Jahren vielfältige Entwicklungsschritte erfahren, der Grundaufbau des Triebwerks und das Arbeitsprinzip sind jedoch gleich geblieben. Die Motoren sind mit der Zeit insbesondere leichter, kleiner oder größer, leistungsstärker, betriebssicherer aber technisch wesentlich aufwändiger und trotzdem kostengünstiger geworden. Wesentliche Fortschritte erfolgten in den letzten 30 Jahren durch die Erfüllung der vom Gesetzgeber schrittweise eingeführten Absenkung der Grenzwerte für die Schadstoffemissionen. Durch die Einführung von Hochdruck- und Common-Rail Einspritzsystemen, ein- und zweistufiger Abgasturboaufladung sowie Downsizing und -speeding, um nur einige Schlagworte zu nennen, konnten der Brennstoffverbrauch, die Schadstoffemissionen und das Gewicht deutlich gesenkt und die Leistung wesentlich gesteigert werden.

Eine detaillierte Darlegung der historischen Entwicklung des Verbrennungsmotors würde den Rahmen dieses Buches sprengen. Der interessierte Leser sei auf van Basshuysen und Schäfer (2010), Heywood (1989), Cummins (1993) und Diesel (1893) und die dort zitierte Literatur verwiesen.

Das Buch behandelt schwerpunktmäßig thermodynamische, strömungsmechanische und reaktionskinetische Prozessabläufe in Verbrennungsmotoren und alle diesbezüglichen Vorgänge im Luft- und Abgassystem einschließlich der Aufladung, der Brennstoffeinspritzung, der Verbrennung und Schadstoffbildung im Brennraum sowie der Abgasnachbehandlung. Darüber hinaus wird die erforderliche Abgasmesstechnik zur qualitativen und quantitativen Erfassung der Prozessdaten beschrieben. Des Weiteren werden mathematische Verfahren zu Prozessoptimierung erläutert sowie ein Ausblick auf die Zukunft des Verbrennungsmotors gegeben. Nichtbetrachtet werden die Motorkonstruktion, die Motormechnik, Festigkeits- und dynamische Probleme sowie tribologische Fragestellungen. Diese Themen werden ausführlich von Köhler und Flierl (2009) und Eifler et al. (2009) behandelt.

Der Inhalt des Buches ist in fünf Teile gegliedert. Teil A umfasst die Kapitel 2 bis 4 und erläutert die Funktionsweise des Verbrennungsmotors und seiner wesentlichen Komponenten entsprechend der Frage: „Wie funktioniert was?“ Dann folgen die thermodynamischen Grundlagen des Verbrennungsmotors und schließlich Aufladeverfahren und ihre wesentlichen Bauteile. Dieser Teil entspricht etwa dem Inhalt einer Vorlesung über Verbrennungsmotoren.

Teil B ist der Beschreibung der Verbrennung, Schadstoffbildung und der erforderlichen Messtechnik gewidmet und umfasst die Kapitel 5 bis 8. Nach den Grundlagen der Reaktionskinetik, der Schadstoffbildung, der Druckindizierung und der Druckverlaufsanalyse wird die Messtechnik zur Erfassung gasförmiger und fester Bestandteile im Abgas erläutert. Im Rahmen der Verbrennungsdiagnostik werden optischen Messverfahren ausführlich beschrieben. Dieser Teil beinhaltet den Stoff einer Vorlesung über motorische Verbrennung.

Im Teil C mit den Kapiteln 9 bis 11 werden sowohl 0D- und 1D- Modelle zur Simulation des Gesamtprozesses als auch des gesamten Antriebstrangs bzw. Fahrzeugs ausführlich beschrieben. Die folgenden phänomenologischen Multizonenmodelle, häufig auch als quasidimensionale Modelle bezeichnet, sind im Grunde eine Weiterentwicklung des einfachen Zweizonenmodells. Dabei wird jedoch der Brennraum statt in zwei in beliebig viele Zonen unterteilt, aber jede Zone immer noch als thermodynamisch ideal gerührt betrachtet wird. Im Weiteren werden Vorgänge in Abgasnachbehandlungssystemen behandelt und anschließend Simulationsergebnisse für das Gesamtsystem Motor bzw. Antriebstrang dargelegt sowie Strategien zur Optimierung von Entwicklungsprozessen vorgestellt. Dieser Teil könnte der Inhalt einer Vorlesung über Motorsimulation sein.

Teil D mit den Kapiteln 14 bis 17 ist der 3D-Simulation des Arbeitsprozesses gewidmet und beschreibt die Grundlagen der 3D-CFD-Strömungsmechanik, Strömungsvorgänge in Aufladeaggregaten, die Simulation von Einspritzvorgängen und schließlich die 3D-Simulation des Verbrennungsablaufs. Wegen des nicht unerheblichen numerischen Aufwands werden mit diesen 3D-Modellen bzw. mit den kommerziell verfügbaren Simulationsprogrammen in der Regel nur sehr spezielle Fragestellungen bearbeitet. Die verwendeten Modelle selbst sind darüber hinaus Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben. Aber unabhängig von diesen Einschränkungen wird die 3D-CFD Simulation in der Zukunft einen noch wesentlich breiteren Eingang in die Motorenentwicklung finden.

In Teil E mit den Kapiteln 18 und 19 werden abschließend der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebstrangs betrachtet, Möglichkeiten zur Systemoptimierung aufgezeigt und ein Ausblick auf die Zukunft des Verbrennungsmotors gegeben. Hierbei werden aktuelle Fragestellungen wie dieselektrische Antriebe, Hybrid- und Wasserstoffmotoren aufgegriffen und kritisch diskutiert.

Insgesamt spannt das Buch damit einen Bogen von der Beschreibung grundlegender Zusammenhänge über einfache Simulationsverfahren bis hin zu komplexen 3D-Modellen. Die einzelnen Kapitel können weitgehend unabhängig voneinander gelesen werden.

1.2 Modellbildung und Simulation

Eine wesentliche Aufgabe der Ingenieurwissenschaften ist die möglichst exakte Beschreibung technischer Prozesse mit dem Ziel, das dynamische Verhalten komplexer Systeme zu verstehen, Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und damit zuverlässige Aussagen über das künftige Verhalten dieser Systeme zu ermöglichen. Als System kann je nach Fragestellung nur der Brennraum allein, der vollständige Verbrennungsmotor oder das gesamte Fahrzeug betrachtet werden. Im Hinblick auf Umweltgesichtspunkte beim Einsatz von Verbrennungsmotoren als Antriebssysteme für Land-, Wasser- und Luftfahrzeuge, für Dauer- und Notstromaggregate, sowie für Klima- und Kälteanlagen, kommt dabei der Gesamtprozessanalyse zunehmend eine besondere Bedeutung zu.

Auch was heute fast alltägliches Werkzeug in der Entwicklung von Motoren oder gesamter Systeme ist, hat eine geschichtliche Entwicklung, die in den 60er Jahren mit einem Modell für die Kreisprozess-Simulation von Großdieselmotoren, der Füll- und Entleermethode, beginnt. Die damals zur Verfügung stehenden Rechanlagen waren aber im Vergleich zu heutigen extrem langsam und ihre Speicherkapazität sehr begrenzt. Deshalb konnte nur mit einfachen, nulldimensionalen Modellen gerechnet werden, die zudem noch in kleinere Programmabschnitte aufgeteilt werden mussten. Näheres dazu findet sich bei Woschni (1965,1967) und Ramos (1989).

Grundsätzlich galt und gilt als Voraussetzung für die numerische Simulation, die Erstellung eines den technischen Prozess beschreibenden Modells. Unter dieser Modellbildung versteht man eine zielorientierte Vereinfachung der Realität durch Abstraktion. Dazu muss der reale Prozess in einzelne Prozessabschnitte zerlegt und damit in Teilprobleme aufgespaltet werden und diese Teilprobleme müssen dann physikalisch beschreibbar und mathematisch formulierbar sein. An das resultierende Modell müssen eine Reihe von Forderungen gestellt werden:

- Das Modell muss formal richtig, d.h. widerspruchsfrei sein. Zur Frage „richtig oder falsch“ wäre anzumerken, dass Modelle zwar formal richtig sein können, aber nicht den zu untersuchenden Prozess beschreiben, bzw. auf diesen nicht anwendbar sind. Es gibt auch Fälle, in denen das Modell physikalisch zwar nicht korrekt ist, aber trotzdem den Prozess hinreichend genau beschreibt; dies trifft z. B. auf stark vereinfachte nulldimensionale Modelle zu.
- Das Modell muss die Realität möglichst genau beschreiben und auch mathematisch lösbar sein. Man sollte sich immer bewusst sein, dass jedes Modell nur eine Annäherung an die Realität ist und deshalb niemals mit der Realität vollkommen übereinstimmen kann.
- Der für die Lösung des Modells erforderliche numerische Aufwand muss im Rahmen der Aufgabenstellung vertretbar sein.
- Im Hinblick auf die Modelltiefe gilt die Forderung: So einfach wie möglich und so komplex wie nötig. So genannte Universal-Modelle sind mit Vorsicht zu betrachten.

Im Folgenden werden nur parametrische, mathematische Modelle betrachtet. Parametrische Modelle sind mathematische Formalismen zur Beschreibung des Systemverhaltens, welche auf physikalischen und chemischen Grundgesetzen beruhen und nur relativ wenige experimentell zu bestimmende Parameter aufweisen. Diese Modelle werden typischerweise durch einen Satz von partiellen oder gewöhnlichen Differentialgleichungen beschrieben. Die Vorteile dieses Vorgehens sind eine drastische Reduzierung des Versuchsaufwands und damit eine deutliche Zeiteinsparung bei Entwicklungsaufgaben, vgl. Kuder und Kruse (2000).

Für die Erstellung von mathematischen Modellen zur Simulation der zeitlich- und räumlich veränderlichen Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsfelder mit chemischen Reaktionen, ist die Kenntnis der Grundlagen der Thermodynamik, der Strömungsmechanik, der Wärme- und Stoffübertragung und der chemischen Reaktionskinetik eine wesentliche Voraussetzung.

Bei der Simulation von Strömungsfeldern mit chemischen Reaktionen ist zu beachten, dass physikalische und chemische Prozesse auf sehr unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen ablaufen können. Chemische Reaktionen laufen in der Regel sehr schnell ab, physikalische Mischungsprozesse dagegen meist relativ langsam. Die Modellierung dieser Prozessabläufe ist meist einfacher, wenn die Zeitskalen sehr unterschiedlich sind, weil