

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

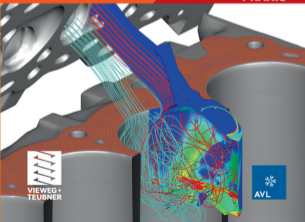
Grundlagen Verbrennungsmotoren

Funktionsweise, Simulation, Messtechnik

6. Auflage

MTZ

PRAXIS



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

Grundlagen Verbrennungsmotoren

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

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Funktionsweise, Simulation, Messtechnik

6., ergänzte Auflage

Mit 575 Abbildungen und 43 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



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
- 6., ergänzte Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

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 978-3-8348-1987-1

Vorwort zur 6. 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 Antriebstranges, 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 sechste 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.

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 November 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 Verbrennungsverfahrensentwicklung 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 Indizier-technik bei der AVL List GmbH in Graz. Nach drei Jahren übernahm er die Verantwortung als Segmentleiter für Indizier-technik, 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 Engeljehringler
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 Eichl seder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. 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	131
2.5.1	Allgemeine Grundlagen	131
2.5.2	Zwei-Takt Langsamläufer	135
2.5.3	Vier-Takt Mittelschnellläufer	140
2.5.4	Vier-Takt Schnellläufer	144
	Literatur	147
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	Kenngößen 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