

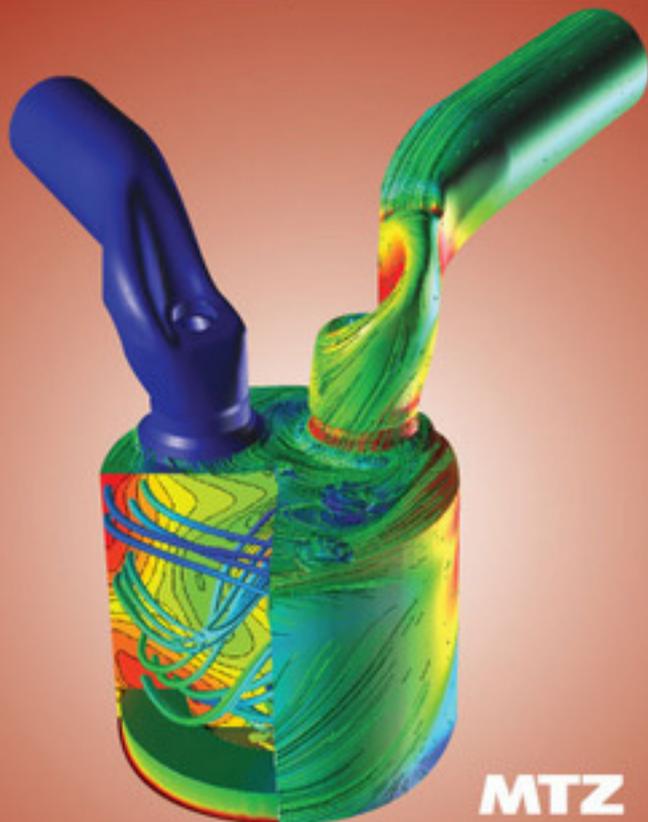
Günter P. Merker | Christian Schwarz (Hrsg.)

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Simulation der Gemischbildung, Verbrennung,
Schadstoffbildung und Aufladung

4. Auflage

PRAXIS



MTZ



Günter P. Merker | Christian Schwarz (Hrsg.)

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Günter P. Merker | Christian Schwarz (Hrsg.)

Grundlagen Verbrennungsmotoren

Simulation der Gemischbildung, Verbrennung,
Schadstoffbildung und Aufladung

4., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 345 Abbildungen und 31 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

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Ewald Schmitt | Gabriele McLemore

Vieweg+Teubner 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

Satz: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Ten Brink, Meppel

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in the Netherlands

ISBN 978-3-8348-0740-3

Vorwort zur 4. Auflage

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 werden heute als Standard in der Motoren- und Fahrzeugentwicklung eingesetzt. Weil aber für diese Rechenprogramme in der Regel der Quellcode nicht zur Verfügung steht und für das Studium der entsprechenden Beschreibungen häufig die Zeit fehlt, haben die Anwender oft nur eine unzureichende Kenntnis über die physikalischen und chemischen Inhalte der diesen Programmen zu Grunde liegenden Modellansätze. Wir konnten diese Tatsache in Gesprächen mit Mitarbeitern und in kritischen Diskussionen der vorgestellten Simulationsergebnisse immer wieder feststellen. Deshalb ist es uns ein besonderes Anliegen, unterschiedliche physikalische und chemische Ansätze deutlich zu machen und Möglichkeiten und Grenzen der verwendeten Modelle aufzuzeigen.

Für die vorliegende vierte Auflage wurde der Inhalt vollständig überarbeitet, aktualisiert und wesentlich erweitert. Der Schwerpunkt liegt jetzt noch deutlicher auf den Grundlagen, was durch die Änderung des Titels, insbesondere auch durch die Mitarbeit weiterer Autoren und die Aufnahme zusätzlicher Kapitel deutlich wird. So wurde Kapitel 3, das sich eingehend mit der Indizierung, der darauf aufbauenden Druckverlaufsanalyse und Verlustteilung sowie mit optischen Messverfahren zur Verbrennungsdiagnostik beschäftigt, neu aufgenommen. Bei der motorischen Verbrennung in Kapitel 4 wurden die den Diesel- und Ottomotoren gewidmeten Abschnitte neu verfasst und die Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen in Kapitel 5 erheblich erweitert. Das Kapitel 8 über Aufladung wurde vollständig neu geschrieben, darin werden auch neue Verfahren zur Interpolation in Verdichter-Kennfeldern beschrieben. Kapitel 9 über Abgasnachbehandlungssysteme wurde wegen der zunehmenden Bedeutung dieser Problematik neu aufgenommen. Die Gesamtprozess-Simulation in Kapitel 10 wurde gegenüber der dritten Auflage drastisch gekürzt, das grundsätzliche Vorgehen wird jetzt nur noch an wenigen Beispielen erläutert. Die Beschreibung der phänomenologischen Modelle für Ottomotoren in Kapitel 11 wurde vollständig neu verfasst. Die der 3D-Simulation von Strömungsfeldern, Einspritzung, Gemischbildung und Verbrennung gewidmeten Kapitel 12, 13 und 14 wurden ebenfalls vollständig neu verfasst. Neu hinzugekommen ist das Unterkapitel 14.6, das einen Überblick über offene Fragen und noch zu lösende Probleme bei der 3D-CRFD-Simulation von Prozessabläufen in Verbrennungsmotoren gibt. Kapitel 15 über die 3D-CFD-Simulation von Aufladeaggregaten, insbesondere die Berechnung von Kennfeldern für Verdichter, wurde wegen der in den letzten Jahren erzielten erheblichen Fortschritte zusätzlich aufgenommen.

Wir hoffen, dass uns mit dieser Auflage 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 ihre fachliche und materielle Unterstützung bei Erstellung dieses Buches, ohne deren Mithilfe das Werk so nicht möglich gewesen wäre. Dem Vieweg und Teubner Verlag danken wir für die stets angenehme und gute Zusammenarbeit.

Tettnang/München im August 2009

Günter P. Merker
Christian Schwarz

Die Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. Günter P. Merker wurde 1942 in Augsburg geboren. Nach einer Lehre mit Abschluss als Werkzeugmacher studierte er von 1960 bis 1964 am Rudolf-Diesel-Polytechnikum in Augsburg, heute Fachhochschule Augsburg, mit Abschluss Ingenieur für Maschinenbau. Im Anschluss daran studierte er bis 1969 an der Technischen Hochschule München Maschinenbau mit Abschluss Diplom-Ingenieur. Von 1969 bis 1978 war er wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Thermodynamik, 1974 wurde er mit einer Dissertation über freie Konvektion promoviert. Von 1975 bis 1976 arbeitete er als Research Fellow am California Institute of Technology in Pasadena/Kalifornien über Probleme der theoretischen Analyse von freien Konvektionsströmungen in flachen Gewässern. Nach seiner Rückkehr an die Technische Hochschule München habilitierte er sich 1978 mit einer Arbeit über Stabilitätsprobleme bei freier Konvektion, wurde zum Privat-Dozenten ernannt und erhielt die *venia legendi* für das Fach Thermodynamik. Anschließend war er von 1978 bis 1980 bei der MTU München GmbH als Fachreferent für Wärmetauscher tätig. 1980 nahm er einen Ruf auf die C3-Professur für Kältetechnik am Institut für Thermodynamik und Kältetechnik an der Universität Karlsruhe an und leitete während dieser Zeit die Prüfstelle für Haushalts-, Kühl- und Gefriergeräte des Instituts. 1986 trat er in die MTU-Friedrichshafen GmbH ein und leitete dort die Hauptabteilung Analytik/Motorenberechnung mit den Abteilungen: Motorthermodynamik, Auslegung von Abgasturboladern und Abstimmung Motor/ATL, Gesamtprozesssimulation, Bauteilfestigkeit und Schwingungsmechanik. 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-Diesel-Motoren beschäftigt und dafür ein piezogesteuertes Twin-Pressure-Common-Rail-Einspritzsystem mit weitgehend frei wählbarem Einspritzverlauf entwickelt. 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. Er ist Mitglied der Braunschweigischen wissenschaftlichen Gesellschaft, sowie Mitglied und Beiratsmitglied in verschiedenen technischen Gremien. Darüber hinaus ist er als freier Berater für die Motorenindustrie und Ingenieurdienstleister 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 1993 war er wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge der Technischen Universität München unter der Leitung von Prof. Woschni. Während dieser Zeit beschäftigte er sich mit der instationären, 0-dimensionalen Arbeitsprozessrechnung für aufgeladene schnell laufende Dieselmotoren und promovierte Anfang 1993 mit dem Thema „Simulation des transienten Betriebsverhaltens aufgeladener Dieselmotoren“. Von 1993 bis 1997 leitete er am gleichen Lehrstuhl ein

Teilprojekt des EU- Forschungsvorhabens „Hybrid Zero Emission Mobility“ und bereitete seine Habilitation mit dem Titel „Theorie und Simulation aufgeladener Verbrennungsmotoren“ vor. Nach deren Abschluss Ende 1998 wurde er von der Universität Hannover 1999 zum Privatdozenten ernannt und erhielt die *venia legendi* für das Fach Verbrennungsmotoren. Seither unterrichtet er dort das Fach „Simulation verbrennungsmotorischer Prozesse“. Anfang 2004 wurde ihm der Titel „apl. Prof.“ an der Universität Hannover verliehen.

Im Jahr 1997 wechselte er in die Vorentwicklung für Verbrennungsmotoren der BMW AG. 2001 wurde er Abteilungsleiter in der Vorentwicklung und war zuständig für die Entwicklung von neuen ottomotorischen Brennverfahren – unter anderem auch Wasserstoff-Direkteinspritzung – und von Konzepten für aufgeladene Ottomotoren. Seit 2004 verantwortet er in der Serienentwicklung die Brennverfahrensentwicklung und die Ladungswechselauslegung aller Serien-Ottomotoren. 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 Mitautor eines Fachbuches aus diesem Bereich. In der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen leitet er die Planungsgruppe Gesamtprozesse und ist dort auch im wissenschaftlichen Beirat tätig.

Autorenverzeichnis

Durst, Bodo, Dr.-Ing.	BMW AG, München www.bmw.de
Eckert, Peter, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin www.iav.de
Krüger, Christian, Dr.-Ing.	Daimler AG, Stuttgart www.daimler.de
Merker, Günter P., Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.	Leibnitz Universität Hannover www.uni-hannover.de
Otto, Frank, Dr. rer. nat.	Daimler AG, Stuttgart www.daimler.de
Rakowski, Sebastian, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin www.iav.de
Reulein, Claus, Dr.-Ing.	BMW AG, München www.bmw.de
Schwarz, Christian, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	BMW AG, München www.bmw.de
Stiesch, Gunnar, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	MAN Diesel SE, Augsburg www.mandiesel.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
Witt, Andreas. 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.-Ing. Rüdiger Teichmann Dr. Ernst Winklhofer
BMW AG, München	Dr.-Ing. Bodo Durst Dr.-Ing. Claus Reulein apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz 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. Sebastian Rakowski
MAN Diesel SE, Augsburg	apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch

Hochschulen

Leibniz Universität Hannover	Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker
Technische Universität Graz, Austria	Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer

Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter

- | | |
|--|---|
| 1 Einleitung | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker |
| 2 Der Hubkolbenmotor | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker |
| 3 Verbrennungsdiagnostik | |
| 3.1 Grundlagen der Druckindizierung | Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer
Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann |
| 3.2 Druckverlaufsanalyse | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz |
| 3.3 Optische Messverfahren | Dr. Ernst Winklhofer
Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann |
| 4 Motorische Verbrennung | |
| 4.1 Brennstoffe | Dr.-Ing. Sebastian Rakowski |
| 4.2 Dieselmotoren | Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski |
| 4.3 Ottomotoren | Dr. techn. Andreas Witt |
| 5 Reaktionskinetik | |
| 5.1 Grundlagen | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch |
| 5.2 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen | Dr.-Ing. Peter Eckert
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch |
| 6 Schadstoffbildung | Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski |
| 7 Arbeitsprozessrechnung | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz |
| 8 Aufladung von Verbrennungsmotoren | Dr.-Ing. Claus Reulein |
| 9 Abgasnachbehandlungssysteme | Dr. Reinhard Tatschl
Dr. Johann Wurzenberger |

- 10 Gesamtprozessanalyse** apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz
- 11 Phänomenologische Verbrennungsmodelle**
- 11.1 Dieselmotorische Verbrennung apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch
- 11.2 Ottomotorische Verbrennung Dr.-Ing. Peter Eckert
Dr.-Ing. Sebastian Rakowski
- 12 Dreidimensionale Strömungsfelder** Dr. rer. nat. Frank Otto
Dr.-Ing. Christian Krüger
- 13 Simulation von Einspritzprozessen** Dr. rer. nat. Frank Otto
Dr.-Ing. Christian Krüger
- 14 Simulation der Verbrennung** Dr. rer. nat. Frank Otto
Dr.-Ing. Christian Krüger
- 15 3D- Simulation der Aufladung** Dr.-Ing. Bodo Durst

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 4. Auflage	V
Die Herausgeber	VII
Autorenverzeichnis	IX
Firmen- und Hochschulverzeichnis	XI
Kapitel, Beiträge und Mitarbeiter	XIII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	3
1.1 Vorbemerkungen	3
1.2 Modellbildung	3
1.3 Simulation	5
<i>Literatur</i>	8
2 Der Hubkolbenmotor	9
2.1 Energiewandlung	9
2.2 Geometrie des Kurbeltriebs	10
2.3 Thermodynamik des Verbrennungsmotors	15
2.3.1 Grundlagen	15
2.3.2 Geschlossene Kreisprozesse	20
2.3.3 Offene Vergleichsprozesse	27
2.4 Kenngrößen und Kennwerte	31
2.5 Motorenkennfelder	34
2.5.1 Ottomotoren	34
2.5.2 Dieselmotoren	36
<i>Literatur</i>	37
3 Verbrennungsdiagnostik	39
3.1 Grundlagen der Druckindizierung	39
3.1.1 Allgemeines	39
3.1.2 Die piezoelektrische Druckmesskette	42
3.1.3 Einbauvarianten	59
3.1.4 Wahl der Messstelle	63
3.1.5 Bestimmung des Druckniveaus	65
3.1.6 Absolutdruckmessende Verfahren	68
3.1.7 Winkel- und Triggermarkierung	70
3.1.8 OT-Zuordnung	73
3.1.9 Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem	77
3.1.10 Datenerfassung	79
3.2 Druckverlaufsanalyse	80
3.2.1 Bestimmung des Brennverlaufs	80

3.2.2	Verlustteilung	84
3.2.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren	87
3.3	Optische Messverfahren	90
3.3.1	Einleitung	90
3.3.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick	90
3.3.3	Anwendungsbeispiele optischer Methoden	92
3.3.4	Dieselmotoren	92
3.3.5	Ottomotoren	98
3.3.6	Lasermesstechniken	111
3.3.7	Ausblick Verbrennungsdiagnostik – optische Messverfahren	112
	<i>Literatur</i>	113
4	Motorische Verbrennung	115
4.1	Brennstoffe	115
4.1.1	Benzin und Ottobrennstoffe	120
4.1.2	Dieselmotoren	121
4.1.3	Alternative Brennstoffe	122
4.2	Dieselmotoren	124
4.2.1	Einspritzverfahren und -systeme	125
4.2.2	Gemischbildung	132
4.2.3	Selbstzündung und Verbrennungsablauf	135
4.3	Ottomotoren	140
4.3.1	Unterschiede zwischen der vorgemischten Flamme und der Diffusionsverbrennung	140
4.3.2	Zündung	141
4.3.3	Flammenfrontentwicklung nach der Zündung, Einfluss der Turbulenz	144
4.3.4	Aussagen über die Verbrennungsgeschwindigkeit durch den Brennverlauf	147
4.3.5	Irreguläre Verbrennung	148
4.3.6	Brennverfahren, Gemischbildung, Betriebsarten	152
	<i>Literatur</i>	165
5	Reaktionskinetik	167
5.1	Grundlagen	167
5.1.1	Chemisches Gleichgewicht	167
5.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit	170
5.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasi-Stationarität	171
5.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen	174
5.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	174
5.2.2	Zündvorgänge	176
5.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation	182
	<i>Literatur</i>	188

6	Schadstoffbildung	189
6.1	Abgaszusammensetzung	189
6.2	Kohlenmonoxid (CO)	191
6.3	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC)	192
6.3.1	Quellen von HC-Emissionen	192
6.3.2	Nicht limitierte Schadstoffkomponenten	196
6.4	Partikelemission beim Dieselmotor	201
6.4.1	Einführung	201
6.4.2	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	203
6.4.3	Entstehung von Ruß	205
6.4.4	Modellierung der Partikelemission	207
6.5	Stickoxide	210
6.5.1	Thermisches NO	210
6.5.2	Prompt-NO	214
6.5.3	Über N ₂ O-Mechanismus erzeugtes NO	216
6.5.4	Brennstoff-Stickstoff	216
6.5.5	Reaktionen zu NO ₂	217
	<i>Literatur</i>	217
7	Reale Arbeitsprozessrechnung	223
7.1	Ein-Zonen-Zylinder-Modell	224
7.1.1	Grundlagen	224
7.1.2	Mechanische Arbeit	226
7.1.3	Ermittlung des Massenstroms durch die Ventile/Ventilhubkurven	226
7.1.4	Wärmeübergang im Zylinder	229
7.1.5	Wärmeübergang im Auslasskrümmer	238
7.1.6	Wandtemperaturmodelle	239
7.1.7	Brennverlauf	242
7.1.8	Klopfende Verbrennung	256
7.1.9	Innere Energie	260
7.2	Zwei-Zonen-Zylinder-Modell	269
7.2.1	Modellierung des Hochdruckteiles nach Hohlbaum	269
7.2.2	Modellierung des Hochdruckteiles nach Heider	272
7.2.3	Ergebnisse der NO _x -Berechnung mit Zwei-Zonen-Modellen	275
7.2.4	Modellierung des Ladungswechsels beim 2-Takt-Motor	277
7.3	Modellierung des Gaspfades	280
7.3.1	Modellierung peripherer Komponenten	280
7.3.2	Modellbildung	281
7.3.3	Integrationsverfahren	282
7.4	Gasdynamik	284
7.4.1	Grundgleichungen der eindimensionalen Gasdynamik	284
7.4.2	Numerische Lösungsverfahren	288
7.4.3	Randbedingungen	291