

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](http://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 <a href="http://www.bmw.de">www.bmw.de</a>
Eckert, Peter, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin <a href="http://www.iav.de">www.iav.de</a>
Krüger, Christian, Dr.-Ing.	Daimler AG, Stuttgart <a href="http://www.daimler.de">www.daimler.de</a>
Merker, Günter P., Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.	Leibnitz Universität Hannover <a href="http://www.uni-hannover.de">www.uni-hannover.de</a>
Otto, Frank, Dr. rer. nat.	Daimler AG, Stuttgart <a href="http://www.daimler.de">www.daimler.de</a>
Rakowski, Sebastian, Dr.-Ing.	IAV GmbH, Berlin <a href="http://www.iav.de">www.iav.de</a>
Reulein, Claus, Dr.-Ing.	BMW AG, München <a href="http://www.bmw.de">www.bmw.de</a>
Schwarz, Christian, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	BMW AG, München <a href="http://www.bmw.de">www.bmw.de</a>
Stiesch, Gunnar, apl. Prof. Dr.-Ing. habil.	MAN Diesel SE, Augsburg <a href="http://www.mandiesel.com">www.mandiesel.com</a>
Tatschl, Reinhard, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria <a href="http://www.avl.com">www.avl.com</a>
Teichmann, Rüdiger, Dr.-Ing.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria <a href="http://www.avl.com">www.avl.com</a>
Wimmer, Andreas, Ao. Univ.-Prof. Dr. techn.	Technische Universität Graz <a href="http://www.tugraz.at">www.tugraz.at</a>
Winklhofer, Ernst, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria <a href="http://www.avl.com">www.avl.com</a>
Witt, Andreas. Dr. techn.	BMW AG, München <a href="http://www.bmw.de">www.bmw.de</a>
Wurzenberger, Johann, Dr.	AVL LIST GmbH, Graz, Austria <a href="http://www.avl.com">www.avl.com</a>

## **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

- |  |   |
|--|---|
| <b>1 Einleitung</b>                          | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker                            |
| <b>2 Der Hubkolbenmotor</b>                  | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter P. Merker                            |
| <b>3 Verbrennungsdiagnostik</b>              |   |
| 3.1 Grundlagen der Druckindizierung          | Ao. Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas Wimmer<br>Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann |
| 3.2 Druckverlaufsanalyse                     | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz                            |
| 3.3 Optische Messverfahren                   | Dr. Ernst Winklhofer<br>Dr.-Ing. Rüdiger Teichmann                      |
| <b>4 Motorische Verbrennung</b>              |   |
| 4.1 Brennstoffe                              | Dr.-Ing. Sebastian Rakowski   |
| 4.2 Dieselmotoren                            | Dr.-Ing. Peter Eckert<br>Dr.-Ing. Sebastian Rakowski                    |
| 4.3 Ottomotoren                              | Dr. techn. Andreas Witt   |
| <b>5 Reaktionskinetik</b>                    |   |
| 5.1 Grundlagen                               | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch                               |
| 5.2 Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen | Dr.-Ing. Peter Eckert<br>apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Gunnar Stiesch      |
| <b>6 Schadstoffbildung</b>                   | Dr.-Ing. Peter Eckert<br>Dr.-Ing. Sebastian Rakowski                    |
| <b>7 Arbeitsprozessrechnung</b>              | apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schwarz                            |
| <b>8 Aufladung von Verbrennungsmotoren</b>   | Dr.-Ing. Claus Reulein  |
| <b>9 Abgasnachbehandlungssysteme</b>         | Dr. Reinhard Tatschl<br>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
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
1.1 Vorbemerkungen .....	3
1.2 Modellbildung .....	3
1.3 Simulation .....	5
<i>Literatur</i> .....	8
<b>2 Der Hubkolbenmotor</b> .....	<b>9</b>
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
<b>3 Verbrennungsdiagnostik</b> .....	<b>39</b>
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
<b>4</b>	<b>Motorische Verbrennung</b> .....	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
<b>5</b>	<b>Reaktionskinetik</b> .....	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

<b>6</b>	<b>Schadstoffbildung</b> .....	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 <sub>2</sub> O-Mechanismus erzeugtes NO .....	216
6.5.4	Brennstoff-Stickstoff .....	216
6.5.5	Reaktionen zu NO <sub>2</sub> .....	217
	<i>Literatur</i> .....	217
<b>7</b>	<b>Reale Arbeitsprozessrechnung</b> .....	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 <sub>x</sub> -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

7.5	Hydraulische Simulation .....	298
7.5.1	Modellierung der Grundkomponenten .....	298
7.5.2	Anwendungsbeispiel .....	301
	<i>Literatur</i> .....	303
<b>8</b>	<b>Aufladung von Verbrennungsmotoren</b> .....	<b>307</b>
8.1	Aufladeverfahren .....	307
8.1.1	Druckwellenaufladung .....	307
8.1.2	Mechanische Aufladung .....	311
8.1.3	Abgasturboaufladung .....	318
8.2	Simulation der Aufladung .....	332
8.2.1	Strömungsverdichter .....	332
8.2.2	Verdrängerlader .....	341
8.2.3	Strömungsturbine .....	342
8.2.4	Abgasturbolader .....	353
8.2.5	Ladeluftkühlung .....	357
	<i>Literatur</i> .....	363
<b>9</b>	<b>Abgasnachbehandlungssysteme</b> .....	<b>365</b>
9.1	Modellbildung und Simulation .....	365
9.2	Abgaskatalysatoren .....	365
9.2.1	Grundgleichungen .....	366
9.2.2	Katalysator Typen .....	368
9.3	Dieselpartikelfilter .....	373
9.3.1	Grundgleichungen .....	373
9.3.2	Beladung und Druckverlust .....	377
9.3.3	Regeneration und Temperaturverteilung .....	379
9.4	Dosiereinheiten .....	380
9.5	Gesamtsystem .....	381
	<i>Literatur</i> .....	382
<b>10</b>	<b>Gesamtprozessanalyse</b> .....	<b>385</b>
10.1	Allgemeines .....	385
10.2	Thermisches Motorverhalten .....	385
10.2.1	Grundlagen .....	385
10.2.2	Kühlkreislauf .....	386
10.2.3	Ölkreislauf .....	388
10.3	Motorreibung .....	389
10.3.1	Reibungsansatz für den betriebswarmen Motor .....	389
10.3.2	Reibungsansatz für den Warmlauf .....	390
10.4	Stationäre Simulationsergebnisse (Parametervariationen) .....	393
10.4.1	Lastvariation beim gedrosselten Ottomotor .....	393
10.4.2	Einfluss von Zündung und Brenndauer .....	394
10.4.3	Variation von Verdichtungsverhältnis, Last und Spitzendruck am Großdieselmotor .....	396

10.4.4	Untersuchungen zu vollvariablen Ventiltrieben .....	397
10.4.5	Variation der Saugrohrlänge und der Ventilsteuerzeiten (Ottomotor, Volllast) .....	399
10.4.6	Abgasrückführung bei einem abgasturboaufgeladenen Pkw-Dieselmotor .....	400
10.5	Transiente Simulationsergebnisse .....	403
10.5.1	Beschleunigung eines NFZ von 0 auf 80 km/h .....	403
10.5.2	Eingriffsmöglichkeiten am Abgasturbolader .....	405
10.5.3	Teillast im ECE-Zyklus .....	407
10.5.4	Warmlauf im ECE-Zyklus .....	409
10.5.5	Volllast-Beschleunigung beim turboaufgeladenen Ottomotor .....	410
	<i>Literatur</i> .....	414
<b>11</b>	<b>Phänomenologische Verbrennungsmodelle</b> .....	<b>415</b>
11.1	Dieselmotorische Verbrennung .....	416
11.1.1	Nulldimensionale Brennverlaufsfunction .....	416
11.1.2	Stationärer Gasstrahl .....	418
11.1.3	Paket-Modelle .....	423
11.1.4	Zeitskalen Modelle .....	431
11.2	Ottomotorische Verbrennung .....	433
11.2.1	Laminare und turbulente Flammgeschwindigkeit .....	433
11.2.2	Wärmefreisetzung .....	435
11.2.3	Zündung .....	438
11.2.4	Klopfen .....	439
	<i>Literatur</i> .....	440
<b>12</b>	<b>Dreidimensionale Strömungsfelder</b> .....	<b>443</b>
12.1	Strömungsmechanische Grundgleichungen .....	443
12.1.1	Massen- und Impulstransport .....	443
12.1.2	Transport von innerer Energie und Spezies .....	446
12.1.3	Passive Skalare und Mischungsbruch .....	448
12.1.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen .....	449
12.2	Turbulenz und Turbulenzmodelle .....	449
12.2.1	Phänomenologie der Turbulenz .....	449
12.2.2	Modellierung der Turbulenz .....	451
12.2.3	Turbulentes Wandgesetz .....	454
12.2.4	Modellierung des turbulenten Mischungszustandes .....	457
12.2.5	Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze .....	460
12.3	Numerik .....	465
12.3.1	Finites-Volumen-Verfahren .....	465
12.3.2	Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen .....	466
12.3.3	Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema .....	467
12.3.4	Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema .....	469
12.3.5	Diskretisierung des Quellterms .....	470
12.3.6	Operator-Split-Verfahren .....	471
12.3.7	Diskretisierung und numerische Lösung der Impuls-Gleichung ...	471

12.4	Rechennetze .....	472
12.5	Beispiele.....	474
12.5.1	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor.....	474
12.5.2	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor ...	476
12.5.3	Düseninnenströmung .....	478
	<i>Literatur</i> .....	482
<b>13</b>	<b>Simulation von Einspritzprozessen</b> .....	<b>483</b>
13.1	Einzeltröpfchenprozesse .....	483
13.1.1	Impulsaustausch .....	483
13.1.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell) .....	484
13.1.3	Massen- und Wärmeaustausch in Mehrkomponentenmodellierung .....	488
13.1.4	Flashboiling .....	492
13.2	Strahlstatistik .....	493
13.2.1	Boltzmann-Williams-Gleichung .....	494
13.2.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung; das Standardmodell (Lagrange-Formulierung) .....	496
13.2.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen .....	498
13.2.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt .....	499
13.2.5	Modellierung von Zerfallsprozessen .....	500
13.2.6	Modellierung von Stoßprozessen .....	505
13.2.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell ....	506
13.2.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker-Planck-Gleichung .....	507
13.2.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung .....	513
13.2.10	Probleme des Standard-Strahlmodells .....	516
13.2.11	Applikationsbeispiel: Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit zentral angeordnetem nach außen öffnendem Piezo-Injektor .....	520
13.3	Euler-Strahlmodelle bzw. Formulierung der Strahldynamik über Observablen-Mittelwerte .....	522
13.3.1	Lokal homogene Strömung .....	524
13.3.2	Einbettungen von 1-D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen ....	526
13.3.3	3-D-Euler-Verfahren .....	529
	<i>Literatur</i> .....	533
<b>14</b>	<b>Simulation der Verbrennung</b> .....	<b>535</b>
14.1	Exkurs: Verbrennungsregimes .....	535
14.2	Allgemeines Vorgehen .....	537
14.3	Diesel-Verbrennung .....	539
14.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung .....	540
14.3.2	Zündung .....	547
14.3.3	NO <sub>x</sub> -Bildung .....	548
14.3.4	Rußbildung .....	549
14.3.5	HC- und CO-Emissionen .....	550

---

14.4	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung)	551
14.4.1	Zweiphasenproblematik	551
14.4.2	Magnussen-Modell	554
14.4.3	Flammenflächenmodelle	559
14.4.4	G-Gleichung	562
14.4.5	Diffusive G-Gleichung	565
14.4.6	Zündung	566
14.4.7	Klopfen	567
14.4.8	Schadstoffbildung	567
14.5	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen)	567
14.6	Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick	572
14.6.1	Netzbewegung	574
14.6.2	Numerik	574
14.6.3	Turbulenz	575
14.6.4	Modellierung der Einspritzprozesse	575
14.6.5	Modellierung der Verbrennung	578
	<i>Literatur</i>	579
<b>15</b>	<b>3-D-Simulation der Aufladung</b>	<b>581</b>
15.1	Allgemeines	581
15.2	Grundlagen der 3-D-CFD Simulation von Turbomaschinen	581
15.2.1	Behandlung unterschiedlicher und bewegter Koordinatensysteme	582
15.2.2	Gittergenerierung für Turbomaschinen	585
15.2.3	Aufbau von Berechnungsmodellen und Randbedingungen	587
15.3	Postprocessing: Ergebnisanalyse und -darstellung	589
15.4	Anwendungsbeispiele	592
15.4.1	Analyse des Verdichterverhaltens	592
15.4.2	Untersuchung von Turbinenvarianten	593
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>595</b>

---

## Abkürzungs- und Formelverzeichnis

### Abkürzungen

AG	Arbeitsgas
BMEP	effektiver Mitteldruck
BV	Brennverlauf
CNG	Compressed Natural Gas
CR	Common Rail
DI	direct injection
DME	Dimethylether
DRV	Druckregelventil
ED	Entflammungsdauer
EGR	exhaust gas recirculation
EV	Einspritzverlauf Einlassventil
FAME	Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
GDI	gasoline direct injection
HE	hydro-erosiv
IMEP	indizierter Mitteldruck
IR	Infrarot
LDA	Laser Doppler Anemometry
LIF	Laser induced Fluorescence
LPG	Liquified Petroleum Gas
MOZ	Motor-Oktananzahl
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCV	Pressure Control Valve (Druckregelventil)
PD	Pumpe-Düse
PDA	Phase Doppler Anemometry
$p_i$	indizierter Mitteldruck
PIV	Particle image velocimetry
RG	Restgas
RME	Rapsmethylester
RottR	rate of heat release
ROZ	Research-Oktananzahl
TC	turbo charged
UV	Ultraviolett
$V_{p_i}$	Variation des indizierten Mitteldrucks
V-Soot	Rußkennzahl aus Flammenanalyse bestimmt
ZZP	Zündzeitpunkt

## Formelzeichen

$\eta_v$	Durchflussbeiwert Einlassventil
$u'$	turbulente Schwankungsgröße [m / s]
$A$	Flammenfrontfläche [m <sup>2</sup> ]
$B_m, B_\lambda$	Modellkonstanten für laminare Flammgeschwindigkeit
$C$	Damköhlerkonstante
$c$	Konstante
$C_d$	Durchflussbeiwert
$c_{ED}$	Konstante zur Bestimmung der Entflammungsdauer
$c_L, c_T$	Konstanten zur Bestimmung des integralen Längenmaßes
$c_m$	mittlere Kolbengeschwindigkeit [m / s]
$E$	Elastizitätsmodul [N / m <sup>2</sup> ]
$E$	Energie [J]
$Ex$	Expansionsfaktor zur Beschreibung der Wärmefreisetzung (vorgemischt)
$f$	Luftverhältnis Fläche [m <sup>2</sup> ]
$h$	spezifische Enthalpie [J / kg]
$h_{BR}$	Kompressionshöhe [m]
$H_s$	spezifischer Heizwert [J / kg]
$H_U, H_u$	unterer Heizwert [J / kg]
$K$	Kavitationszahl
$k$	turbulente kinetische Energie [m <sup>2</sup> / s <sup>2</sup> ]
$Ki$	Kavitationsindex
$l_l$	integrales Längenmaß [m]
$l_T$	Taylor-Längenmaß [m]
$m$	Masse [kg]
$n$	allgemeiner Parameter
$p$	Druck [bar]
$p_{me}$	Mitteldruck [bar]
$Q$	Wärmefreisetzung [W]
$s$	Flammgeschwindigkeit [m/s]
$T$	Temperatur [K]
$t$	Zeit [s]
$V$	Volumen [m <sup>3</sup> ] Volumenstrom [m <sup>3</sup> / s]
$X_1, X_2, X_3$	Parameter für das Livengood-Wu Integral
$\tau_{fluid}, \tau_{chem}$	fluiddynamische und chemische Mischungszeit [s]

## Indizes

$0$	Ruhezustand, Referenz
ad	adiabat
AG	Arbeitsgas
$b$	Brennstoff
B	Brennstoff
D	Drossel
dampf	Dampfdruck (in Verbindung mit Druck)
dif	diffusiv

<i>e</i>	Eintritt
ED	Entflammungsdauer
<i>i</i>	inlet, Einlass
<i>iv</i>	inlet valve, Einlassventil
klopf	bei Eintritt eines Klopfereignisses
<i>l</i>	laminar
<i>m, M</i>	mittel
<i>R</i>	Restgas
RG	Restgas
<i>t</i>	turbulent
U	Umgebung
<i>u</i>	Umgebung. unverbrannt
verf	zur Verfügung stehend
vor	vorgemischt
ZZP	Zündzeitpunkt

### Griechische Symbole

$\alpha$	allgemeiner Parameter
$\beta$	allgemeiner Parameter
$\Phi$	Äquivalenzverhältnis
$\tau$	charakteristische Zeit [s]
$\rho$	Dichte [kg / m <sup>3</sup> ]
$\kappa$	Isentropenexponent
$\varphi$	Kurbelwinkel [°KW]
$\lambda$	Luftverhältnis
$\mu$	dynamische Viskosität
$\Gamma$	freie Oberfläche
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Gas- und Feststoffphase
$\mu$	erster Viskositätskoeffizient [Ns / m <sup>2</sup> ]
$\zeta$	Kontraktionszahl
$\zeta$	Reibbeiwert
$\delta_{ak}$	Aschekuchenhöhe
$\rho_g$	Dichte der Gasphase
$\varepsilon_g$	offene Frontfläche des Monolithen
$\lambda_g$	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase
$\rho_{g,n}$	Dichte im Kanal
$\Delta h_i$	Reaktionsenthalpie der i-ten Reaktion
$\nu_{i,j}$	stöchiometrischer Koeffizient der Spezies j in der Reaktion i
$\beta_j$	Stoffübergangskoeffizient der Spezies j
$\Delta p_{ak}$	Teildruckverlust durch die Schicht des Aschekuchens
$\Delta p_{rk}$	Teildruckverlust durch die Schicht der Rußtiefenfiltration
$\Delta p_{rk}$	Teildruckverlust durch die Schicht des Rußkuchens.

$\Delta p_w$	Teildruckverlust durch die Wand
$\delta_{rk}$	Rußkuchenhöhe
$\rho_s$	Dichte der Feststoffphase
$\lambda_s$	Wärmeleitfähigkeit der Wand
$A_{F,n}$	frei durchströmbare Fläche des Kanals
$a_{geo}$	geometrische Oberfläche des Monolithen
$c_g$	Gaszusammensetzung
$c_{j,g}$	Konzentration der Spezies j im Gasbulk
$c^L$	Oberflächenkonzentrationen der beteiligten Spezies
$c^L_j$	Konzentration der Spezies j an der reaktiven Oberfläche
$c_{p,s}$	Wärmekapazität der Feststoffphase
$d_l$	Durchmesser des Kanals
$D_{eff}$	effektiver Diffusionskoeffizient
$d_{hyd}$	hydraulischer Kanaldurchmesser
$F_n$	Reibbeiwert
$Gz_h$	dimensionslosen Grätz-Zahl des Wärmeübergangs
$Gz_m$	dimensionslose Grätz-Zahl des Stoffübergangs
$h_j$	Enthalpie der Spezies j in der Gasphase
$k_w, k_{rt} k_{ak} k_{rk}$	Permeabilitäten der jeweiligen Schichten
$MG_j$	molare Masse der Spezies j
$m_{russ,in}$	Einlassrußmassenstrom
$p_g$	Druck der Gasphase
$p_{g,n}$	Druck im Kanal
$P_{S,n}$	Kanalumfang
$r_i$	Reaktionsrate der Spezies j
$Sc$	dimensionslose Schmidt-Zahl
$S_{rk}$	Indikator für Kuchenfiltration
$S_{rt}$	Indikator für Tiefenfiltration
$t$	Zeit
$T_g$	Gastemperatur
$T_s$	Wandtemperatur
$v_g$	Geschwindigkeit der Gasphase
$v_{g,n}$	Geschwindigkeit im Kanal
$v_w$	Wandgeschwindigkeit
$v_{w,n}$	normierte Wandgeschwindigkeit
$v_{w,n}$	Strömungsgeschwindigkeit durch die poröse Wand
$w_{g,l}$	Wandgeschwindigkeit
$w_{j,g}$	Massenanteil Spezies j in der Gasphase
$x$	Ortskoordinate
$z$	Ortskoordinate
$Z_k$	Bedeckungsgrad der k-ten gespeicherten Spezies

Teil A

---

**Thermodynamische und  
chemische Grundlagen**

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorbemerkungen

Eine der zentralen Aufgaben 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. Im Hinblick auf Verbrennungsmotoren als Antriebssysteme für Land-, Wasser- und Luftfahrzeuge, für Dauer- und Notstromaggregate, sowie für Klima- und Kälteanlagen kommt dabei der Gesamtprozessanalyse bzw. -simulation eine besondere Bedeutung zu.

Bei der modellbasierten Parameteroptimierung wird das Motorverhalten durch ein mathematisches Modell beschrieben. Die Optimierung erfolgt also nicht am realen Motor, sondern an einem Modell, das alle für die konkrete Optimierungsaufgabe relevanten Effekte berücksichtigt. Die Vorteile dieses Vorhabens sind eine drastische Reduzierung des Versuchsaufwands und damit eine deutliche Zeiteinsparung bei Entwicklungsaufgaben, vgl. Kuder und Kruse (2000).

Voraussetzung für die Simulation sind mechanische, thermodynamische und chemische Modelle zur Beschreibung von technischen Prozessen, wobei für die Modellierung von motorischen Prozessen das Verständnis der Grundlagen der Thermodynamik und der chemischen Reaktionskinetik eine wesentliche Voraussetzung ist.

## 1.2 Modellbildung

Der erste Schritt bei der numerischen Simulation besteht in der Erstellung des den technischen Prozess beschreibenden Modells. Unter Modellbildung versteht man eine zielorientierte Vereinfachung der Realität durch Abstraktion. Voraussetzung dafür ist, dass der reale Prozess in einzelne Prozessabschnitte zerlegt und damit in Teilprobleme aufgespalten werden kann. 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 nicht korrekt ist, aber trotzdem den Prozess hinreichend genau beschreibt, z.B. das Ptolemäische Modell zur Simulation der Dynamik des Sonnensystems, d.h. Berechnung der Planeten- und der Mondbewegung.

- Das Modell muss die Realität möglichst genau beschreiben und es muss darüber hinaus auch mathematisch lösbar sein. Man sollte sich immer bewusst sein, dass jedes Modell eine Annäherung an die Realität ist und deshalb niemals mit der Realität vollkommen übereinstimmen kann.
- Der für die Lösung des Modells erforderliche Aufwand in Hinblick auf die Rechenzeit 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.

Erst mit Hilfe von Modellvorstellungen sind wir in der Lage, physikalische Abläufe wirklich zu verstehen.

Im Folgenden wird etwas näher auf die Arten von Modellen im Hinblick auf den Verbrennungsmotor eingegangen. Zunächst ist festzuhalten, dass sowohl der eigentliche thermodynamische Kreisprozess (insbesondere die Verbrennung) als auch die Laständerung des Motors instationäre Vorgänge sind. Selbst wenn der Motor in einem bestimmten Betriebszustand stationär betrieben wird (d.h. Last und Drehzahl sind konstant) läuft der thermodynamische Kreisprozess instationär ab. Damit wird erkennbar, dass es zwei Kategorien von Motormodellen gibt, nämlich solche, die den Betriebszustand des Motors (Gesamtprozessmodelle) und solche, die den eigentlichen Arbeitsprozess beschreiben (Verbrennungsmodelle).

Im Hinblick auf Modellarten unterscheidet man zwischen:

- *linguistischen Modellen*, d.h. auf empirisch gefundenen Regeln aufgebaute regelbasierte Verfahren, die nicht in mathematische Gleichungen erfasst sind, und
- *mathematischen Modellen*, d.h. auf einem mathematischen Formalismus beruhende Verfahren.

Linguistische Modelle sind in der letzten Zeit unter den Begriffen „Expertensysteme“ und „Fuzzy-logic-models“ bekannt geworden. Dabei ist aber zu beachten, dass regelbasierte Verfahren nur interpolieren und nicht extrapolieren können. Wir werden auf diese Art von Modellen nicht weiter eingehen.

Mathematische Modelle lassen sich in:

- parametrische und
- nichtparametrische

Modelle unterteilen.

*Parametrische Modelle* sind kompakte 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.

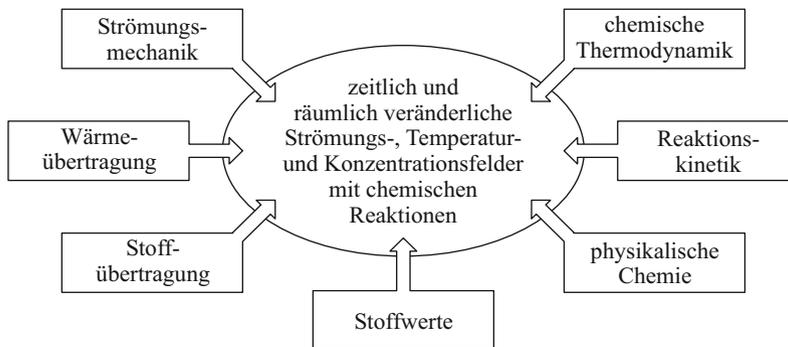
*Nichtparametrische Modelle* sind durch Tabellen gegeben, welche das Systemverhalten auf spezielle Testeingangssignale festhalten. Typische Vertreter dieser Art von Modellen

sind Sprungantworten oder Frequenzgänge. Mit Hilfe geeigneter mathematischer Verfahren, z. B. der Fouriertransformation kann das Verhalten des Systems auf beliebige Eingangssignale berechnet werden.

Nichtparametrische Modelle können wie auch die linguistischen Modelle nur interpolieren. Für die Simulation des motorischen Prozesses werden nur mathematische Modelle verwendet. Weil aber auch bei diesen Modellen die Modellparameter an experimentelle Messwerte angepasst werden müssen, sind diese Modelle grundsätzlich mit Fehlern behaftet. Bei der Analyse von Simulationsergebnissen sind diese Fehler kritisch zu bewerten. Auch damit wird nochmals deutlich, dass jedes Modell nur eine Approximation des betrachteten realen Systems darstellt.

### 1.3 Simulation

Für die Erstellung parametrischer mathematischer Modelle zur Simulation der zeitlich und räumlich veränderlichen Strömungs-, Temperatur- und Konzentrationsfelder mit chemischen Reaktionen ist die Kenntnis der Grundlagen der Thermodynamik, der Fluidodynamik und der Verbrennungstechnik eine wesentliche Voraussetzung, siehe **Abb. 1-1**.



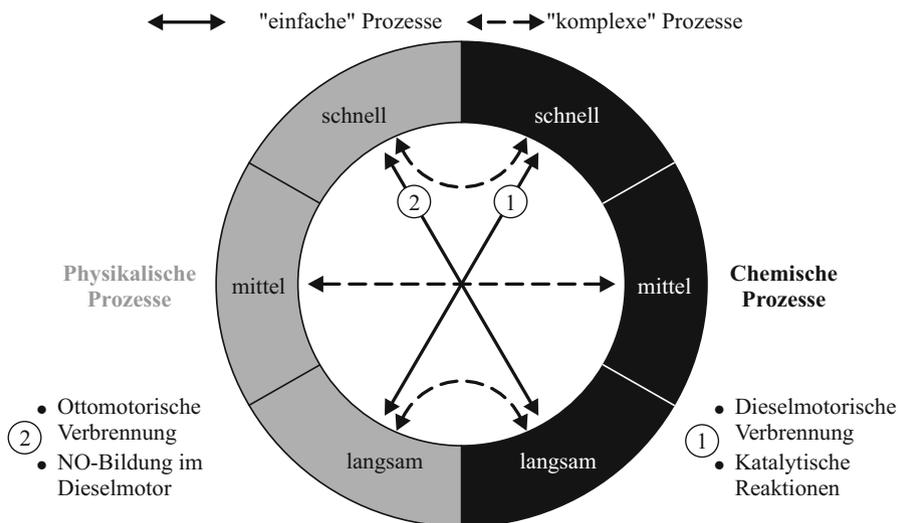
**Abb. 1-1:** Prozess-Simulation

Bei der Simulation von Strömungsfeldern mit chemischen Reaktionen ist zu beachten, dass physikalische und chemische Prozesse auf sehr unterschiedlichen Zeit- und Längenskalen ablaufen können. Die Beschreibung dieser Prozessabläufe ist meist einfacher, wenn die Zeitskalen sehr unterschiedlich sind, weil dann für den physikalischen oder chemischen Prozess vereinfachende Annahmen getroffen werden können, und sie ist in der Regel sehr komplex, wenn die Zeitskalen von gleicher Größenordnung sind. Dieser Sachverhalt wird durch die in **Abb. 1-2** angegebenen Beispiele verdeutlicht.

Darüber hinaus sind aber auch Kenntnisse über Modellierungsmethoden erforderlich. Obwohl sich dafür einige allgemein gültige Regeln angeben lassen, lässt dieser Schritt der Kreativität und dem Einfallsreichtum des Modellierers einen erheblichen Freiraum.

Im Wesentlichen lässt sich das Vorgehen bei der Prozess-Simulation in folgende Schritte unterteilen:

1. Schritt: Das System definieren und von der Umwelt abgrenzen, relevante Speicher sowie Massen- und Energieströme zwischen diesen festlegen.
2. Schritt: Bilanzgleichungen aufstellen nach dem einheitlichen Schema: zeitliche Änderung des Speichers ist gleich dem Zufluss minus dem Abfluss.
3. Schritt: Mit Hilfe von physikalischen Gesetzen die Massen- und Energieströme beschreiben.
4. Schritt: Das resultierende Modell ggf. durch Vernachlässigung von Nebeneinflüssen vereinfachen.
5. Schritt: Das Modell numerisch integrieren, d. h. Simulation durchführen.
6. Schritt: Das Modell validieren, berechnete Daten mit experimentell ermittelten vergleichen und das Modell ggf. modifizieren.



**Abb. 1-2:** Prozess-Simulation

Bei der Verwendung eines vorhandenen Simulations-Programms zur Lösung neuer Aufgabenstellungen sind stets die Voraussetzungen, die bei der Erstellung des Modells getroffen wurden, kritisch zu überprüfen. Dabei ist zu klären, ob und wie weit das vorhandene Programm zur Lösung des neuen Problems tatsächlich geeignet ist. Man sollte sich dabei immer der Tatsache bewusst sein, dass „schöne bunte Bilder“ eine enorme Suggestivkraft auf den „unkritischen“ Betrachter ausüben.

In der Motoren- und Fahrzeugentwicklung verwendet man je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Modelle für die Prozess-Simulation, wobei die im Brennraum ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse mehr oder weniger detailliert beschrieben werden.

Für die Simulation z. B. des Beschleunigungsverhaltens eines Fahrzeugs werden im Rahmen der Gesamtprozessanalyse *nulldimensionale Modelle* eingesetzt, wobei die Vorgänge im Brennraum selbst mit Ein- oder Mehrzonen- Modellen beschrieben werden. Diese rein thermodynamischen Modelle basieren auf der sog. Füll- und Entleermethode, die einzelnen Zonen werden als ideal durchmischt vorausgesetzt und das Strömungsfeld im Brennraum damit vollständig außer Betracht gelassen. Die Wärmefreisetzung durch die Verbrennung und der Wärmeübergang an den den Brennraum begrenzenden Oberflächen werden mit einfachen halbempirischen Ansätzen, Teilsysteme wie Regler oder Aufladaggregate entweder ebenfalls damit oder mittels Kennfeldern beschrieben. Für die Berechnung der Vorgänge in Ansaug- und Abgasstutzen wird häufig die eindimensionale Gasdynamik herangezogen.

Für die Untersuchung von Detailprozessen im Brennraum, wie die NO- oder Rußbildung werden dagegen sog. *phänomenologische Multizonen-Modelle* verwendet. Bei diesen Modellen wird der Brennraum in Hunderte von thermodynamisch ebenfalls als ideal durchmischt betrachtete Zellen unterteilt. Die Wärmefreisetzung durch die Verbrennung innerhalb und die Transportprozesse zwischen diesen einzelnen Zellen werden mit detaillierten physikalischen und chemischen Ansätzen beschrieben. Mit diesen Multizonen-Modellen können die Gemischbildung, die Wärmefreisetzung durch die Verbrennung und die Schadstoffbildung in vielen Fällen mit hinreichender Genauigkeit beschrieben werden. Sie lassen zwar das Strömungsfeld im Brennraum außer Betracht, sind aber bezüglich der Modellierungstiefe wesentlich aufwändiger als die einfacheren Mehrzonen-Modelle. Sie liegen damit zwischen den für die Gesamtprozessanalyse verwendeten Mehrzonen- und den nachfolgend beschriebenen 3D-CRFD-Modellen.

*CRFD-Modelle (Computational Reaction Fluid Dynamics)* werden für eine noch detailliertere Untersuchung der Vorgänge bei der Verbrennung eingesetzt, wobei dafür das Strömungsfeld im Brennraum berechnet werden muss. Hierfür stehen eine Reihe kommerzieller CFD-Codes zur Verfügung, die auf den Navier-Stokes-Gleichungen beruhen, aber um Modelle zur Beschreibung der Gemischbildung, Zündung, Verbrennung und Schadstoffbildung erweitert werden müssen. Diese Modelle sind jedoch wesentlich komplexer als diejenigen für die phänomenologischen Modelle. Die kontinuierliche Gasphase in der Eulerformulierung muss dabei mit der dispersen Phase in der Lagrangeformulierung für die flüssigen Brennstofftropfen gekoppelt werden. Diese Kopplung, die richtige Wahl des zu verwendenden Gitternetzes sowie die Wahl eines geeigneten Turbulenzmodells stellen enorme Herausforderungen im Hinblick auf Speicherplatzbedarf und Rechenzeit dar.

Auf noch wesentlich weiter detaillierte Modelle wie die *Large-Eddy-Simulation (LES)* oder die *Direkte-Numerische-Simulation (DNS)* wird in Teil C des Buches näher eingegangen. Diese Modelle spielen aber in der Motorenentwicklung nach wie vor eine untergeordnete Rolle.

Die numerische Simulation eröffnet ungeahnte Möglichkeiten. Wir bekommen eine Ahnung dessen, was uns auf diesem Gebiet in der Zukunft erwartet, wenn wir uns die stürmi-

sche Entwicklung auf dem Informationssektor vor Augen halten und den heutigen Stand von „E-Mail“ und „Internet“ mit dem in den 80er und 90er Jahren vergleichen.

Im Hinblick auf den technischen Fortschritt und die damit verbundenen ökologischen Perspektiven sei der interessierte Leser auf Jischa (1993) verwiesen. Einen interessanten Einblick in das Thema Simulation haben Kaufmann und Smarr (1994) gegeben.

### **Literatur**

Jischa, M. (1993): Herausforderung Zukunft: Technischer Fortschritt und ökologische Perspektiven, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg

Kaufmann, W. J., Smarr, L. L. (1994): Simulierte Welten, Spektrum-Verlag, Heidelberg

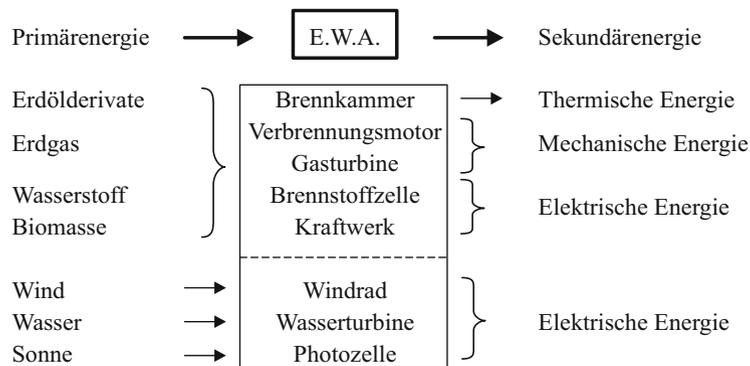
Kuder, J., Kruse, Th. (2000): Parameteroptimierung an Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Motor-technische Zeitschrift MTZ 61, 378–384, Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, Stuttgart

## 2 Der Hubkolbenmotor

### 2.1 Energiewandlung

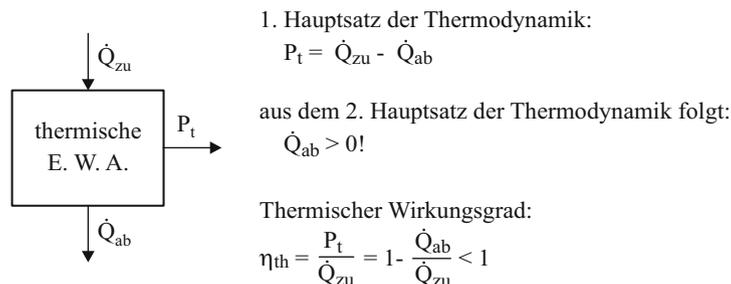
Bei der Energiewandlung kann man im Sinne einer hierarchischen Ordnung zwischen allgemeiner, thermischer und motorischer Energiewandlung unterscheiden.

Unter *allgemeiner Energiewandlung* wird dabei die Umsetzung von Primär- in Sekundärenergie durch einen technischen Prozess in einer Energiewandlungsanlage verstanden, siehe **Abb. 2-1**.



**Abb. 2-1:** Schema der allgemeinen Energiewandlung

Die *thermische Energiewandlung* unterliegt den Hauptsätzen der Thermodynamik und kann formal, wie in **Abb. 2-2** gezeigt, beschrieben werden.



**Abb. 2-2:** Schema der thermischen Energiewandlung