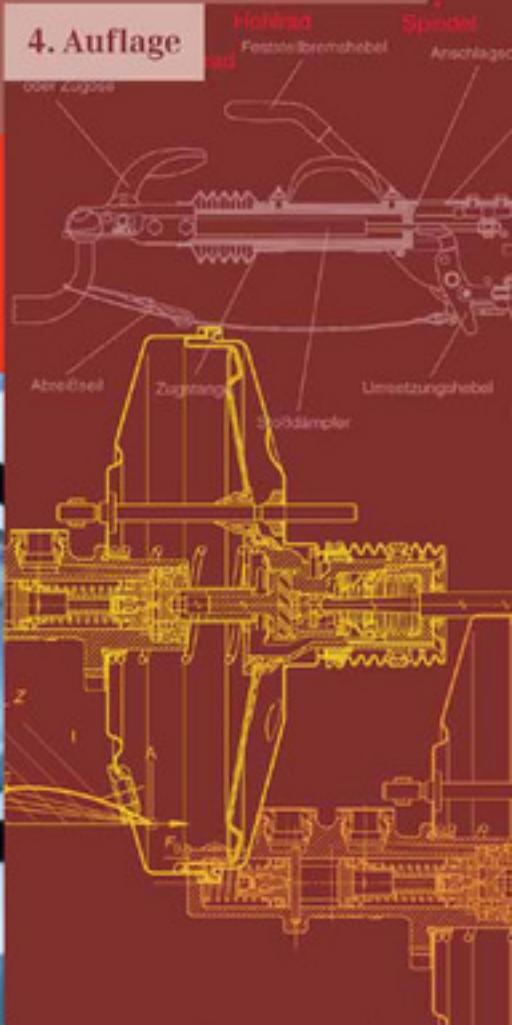


Eduard Köhler/Rudolf Flierl

# Verbrennungsmotoren

4. Auflage

Motormechanik,  
Berechnung und Auslegung  
des Hubkolbenmotors



ATZ/MTZ-Fachbuch

Eduard Köhler  
Rudolf Flierl

## **Verbrennungsmotoren**

## Aus dem Programm

### Kraftfahrzeugtechnik

#### **Handbuch Verbrennungsmotor**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

#### **Lexikon Motorentechnik**

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

#### **Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik**

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

#### **Bremsenhandbuch**

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

#### **Nutzfahrzeugtechnik**

herausgegeben von E. Hoepke und S. Breuer

#### **Aerodynamik des Automobils**

herausgegeben von W.-H. Hucho

#### **Automobilelektronik**

herausgegeben von K. Reif

#### **Automotive Software Engineering**

von J. Schäuffele und T. Zurawka

#### **Motorkolben**

von S. Zima

#### **Bussysteme in der Fahrzeugtechnik**

von W. Zimmermann und R. Schmidgall

Die BOSCH-Fachbuchreihe:

- **Ottomotor-Management**
- **Dieselmotor-Management**
- **Autoelektrik/Autoelektronik**
- **Fahrsicherheitssysteme**
- **Fachwörterbuch Kraftfahrzeugtechnik**
- **Kraftfahrtechnisches Taschenbuch**

herausgegeben von ROBERT BOSCH GmbH

**vieweg**

Eduard Köhler  
Rudolf Flierl

# **Verbrennungsmotoren**

**Motormechanik,  
Berechnung und Auslegung  
des Hubkolbenmotors**

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 280 Abbildungen

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.

Das Werk entstand mit freundlicher Unterstützung der Kolbenschmidt Pierburg Gruppe.

1. Auflage 1998
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, März 2001
- 3., verbesserte Auflage Dezember 2002
- 4., aktualisierte und erweiterte Auflage September 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Ewald Schmitt

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen der Springer Science+Business Media.

[www.vieweg.de](http://www.vieweg.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.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, [www.CorporateDesignGroup.de](http://www.CorporateDesignGroup.de)

Satz: Fromm MediaDesign GmbH, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Wilhelm & Adam, Heusenstamm

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-528-43108-3

ISBN-13 978-3-528-43108-2

## Vorwort

Der Inhalt dieses Buches beruht auf meiner von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg im Jahr 1996 angenommenen Habilitationsschrift „Berechnung und Auslegung der Motormechanik schnelllaufender Hubkolbenmotoren“. Mein herzlicher Dank gilt der dortigen Fakultät für Maschinenbau und insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Tschöke vom Lehrstuhl für Kolbenmaschinen, der mir umfangreiche Unterstützung gewährte. Zu großem Dank verpflichtet bin ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Essers, Universität Stuttgart, und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Pucher, Technische Universität Berlin. Herr Prof. Essers steht mir seit meiner Studienzeit mit Rat und Tat zur Verfügung und hat mich auch bei diesem Schritt begleitet. Er gab mir, ebenso wie Herr Prof. Pucher, viele wertvolle Hinweise.

Im Rahmen meiner beruflichen Beschäftigung mit mechanischen Motorkomponenten und der Übernahme der Funktionsverantwortung für diese begann ich ab 1988 damit, meine persönlichen, im Umgang damit erworbenen Erfahrungen schriftlich festzuhalten. In dieser Zeit vollzog sich ein Wandel hin zur weitgehend routinemäßig praktizierten, rechnergestützten Bauteilauslegung. Dies erweiterte die Möglichkeiten, ein besseres Verständnis von Zuständen und Abläufen zu gewinnen. Andererseits ergab sich der Zwang, sich mit neuen Methoden näher auseinanderzusetzen. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei meinem Arbeitgeber, der Kolbenschmidt Pierburg AG, für eine fachlich sehr interessante berufliche Tätigkeit bedanken. Dieser Dank schließt zahlreiche, hier nicht genannte Kollegen und Mitarbeiter von Kunden mit ein, die mir durch ihre Fachveröffentlichungen oder im persönlichen Gespräch immer wieder wertvolle Anregungen gegeben haben.

Aus dem bis 1993 angesammelten Fundus entstand die erwähnte Habilitationsschrift. Die Gelegenheit, diese dank des Verlags Vieweg als Buch veröffentlichen zu können, gab Anlass für eine umfassende Überarbeitung. Es handelt sich hier um kein streng methodisch aufbereitetes Lehrbuch, sondern eher um eine Informationsquelle mit vielen Hinweisen und hoffentlich praktischem Nutzen. Das Buch eignet sich aber sicherlich auch gut als ergänzende Literatur im zweiten Studienabschnitt.

Bei der 1. Auflage des Buches wurden zwecks Begrenzung des Gesamtumfangs thematische Schwerpunkte – z. B. das relativ junge Fachgebiet Motorakustik – gesetzt. Manche Leser empfanden es allerdings trotz insgesamt sehr positiver Resonanz als Mangel, dass der Massenausgleich des Hubkolbenmotors zunächst ausgespart wurde. So regte insbesondere Herr Prof. Tschöke eine Ergänzung des Buches an. Er entsprach damit auch einem Anliegen des Autors. Die Auseinandersetzung mit dem Massenausgleich gewinnt angesichts stetig steigender Geräusch- und Komfortanforderungen wieder an aktueller Bedeutung. International ist in diesem Zusammenhang die Abkürzung „NVH“ = noise, vibration, harshness geprägt worden. Massenwirkungen sind maßgeblich an der vom Antrieb ausgehenden niederfrequenten Geräusch- und Vibration beteiligt.

Mit der inhaltlich erweiterten 2. Auflage lag nun ein fachlich abgerundetes Buch vor. Bei der Aufbereitung des Kapitels über den Massenausgleich des Hubkolbenmotors durfte der Autor wiederum die tatkräftige Unterstützung von Herrn Prof. Tschöke und einem seiner Mitarbeiter vom IMKO, Herrn Dr. Blodig, erfahren, denen hier herzlich gedankt sei.

Der Autor wurde von der Nachricht des Verlags, dass sich die 2. Auflage anhaltend gut verkauft und bereits eine 3. Auflage in Angriff genommen werden soll, etwas, wenn auch angenehm, überrascht. So erscheint die 3. Auflage im Bewusstsein, dass die Aktualität bei Büchern stets eine spezifische Problematik darstellt, ohne eine weitere fachliche Ergänzung bzw. fachliche Überarbeitung einzelner Kapitel. Dagegen wurde die Gelegenheit wahrgenommen, sich der Bilder anzunehmen. Der Verlag hatte bereits bei der Vorbereitung der 2. Auflage in dankenswerter Weise diese redaktionell überarbeitet und die Bildbeschriftungen vereinheitlicht. Die Bemühungen des Autors galten nun insbesondere der Behebung verschiedener Mängel und der Verbesserung der Bildqualität. In diesem Zusammenhang wurden zahlreiche Bilder ausgetauscht. Gewisse, die Bildqualität betreffende Defizite dürften nunmehr weitgehend behoben sein.

Seit einigen Jahren verbindet den Autor mit dem Verlag Vieweg, Wiesbaden, eine kontinuierliche, bis zum heutigen Tag hervorragende Zusammenarbeit. Anlässlich des Erscheinens der 3. Auflage sei dem Verlag dafür nochmals ausdrücklich gedankt.

Im Herbst 2006 erscheint bereits die 4. Auflage dieses Buches. Das bezeugt trotz kleiner Auflage ein gewisses anhaltendes Interesse an der Motormechanik. Tritt diese in der publizistischen Darstellung des Verbrennungsmotors gegenüber der Motorthermodynamik, -mechatronik und -elektronik zuweilen doch etwas in den Hintergrund. Mit jeder neuen Auflage drängt sich dem Autor aber zunehmend die Frage auf, ob das Buch dem Stand der Technik noch gerecht wird. Angesichts der stürmischen Entwicklung der Motorteknik bedarf Letzteres eigentlich der stetigen Überarbeitung bestimmter Kapitel. Diese Aufgabe ist von einer einzigen, beruflich ausgefüllten Person immer schwieriger zu leisten. Hier freut sich der Autor außerordentlich, dass Herr Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl, Technische Universität Kaiserslautern, als Mitautor für die 4. Auflage gewonnen werden konnte. Herr Prof. Flierl hat dankenswerterweise das Kapitel Ventiltrieb grundsätzlich überarbeitet und um viel aktuelles Wissen über moderne Ventiltriebssysteme und den von diesen zu steuernden Ladungswechsel bereichert. Darüber hinaus schien es dringend geboten, im Kapitel Kolben aktuellen Entwicklungen – vor allem auf Seite der Pkw-DI-Dieselmotoren – Rechnung zu tragen.

Die Autoren danken dem Verlag Vieweg für die wie immer sehr gute Zusammenarbeit auch bei der Vorbereitung dieser 4. Auflage. Hervorgehoben seien die wertvollen Anregungen zur Aktualisierung des Buches. Die Autoren geben der Hoffnung Ausdruck, mit der Überarbeitung der genannten Kapitel sowie weiterer kleiner Korrekturen dem geeigneten Leser wieder ein interessantes Fachbuch anbieten zu können.

Kaiserslautern, im Juli 2006

Heilbronn, im Juli 2006

*Rudolf Flierl*

*Eduard Köhler*

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Formelzeichen .....	XV
<b>1 Vorbemerkung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Bedeutung der Berechnung im Entwicklungsprozess .....	3
2.2 Abgrenzung zwischen Mechanik und Thermodynamik .....	4
2.3 Anmerkungen zum ausgewählten Stoff und zur Vertiefung .....	4
<b>3 Kriterien bei der Motorauslegung .....</b>	<b>7</b>
3.1 Zur Veränderlichkeit von Motorkenndaten .....	7
3.2 Definition wichtiger Motorkenndaten .....	8
3.2.1 Hubvolumen (Hubraum) .....	8
3.2.2 Leistung und Drehmoment .....	8
3.2.3 Spezifische Leistung .....	9
3.3 Festlegung der Hauptabmessungen in Verbindung mit der Triebwerksauslegung .....	9
3.3.1 Hub-Bohrungs-Verhältnis .....	9
3.3.2 Pleuelstangenverhältnis und Pleuellänge .....	11
3.3.3 Blockhöhe (Zylinderdeckhöhe) .....	11
3.3.4 Kolbendurchmesser und Kolbenmasse .....	12
3.3.5 Kompressionshöhe des Kolbens .....	13
3.3.6 Hub, Bohrung und Zylinderzahl .....	15
3.3.7 Zylinderlänge, untere Kolbenschaftlänge, Austausch des Kolbens ....	16
3.3.8 Kurbelwellenfreigang und Kolbenschaftlänge .....	17
3.3.9 Weitere Kolbenhauptabmessungen .....	23
3.4 Weitere Motorhauptabmessungen .....	24
3.4.1 Zylinderabstand und Stegbreite .....	24
3.4.2 Zylinderbankversatz bei V-Motoren, Auswirkungen auf Zylinderabstand und Stegbreite .....	27
3.5 Betrachtungen zum optimalen Pleuelstangenverhältnis .....	29
3.6 Betrachtungen zum Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Brennraums .....	32
3.7 Zusätzliche Begriffe und Definitionen .....	34
3.8 Mittlerer effektiver Druck bzw. spezifische Arbeit .....	37
<b>4 Berechnung und Auslegung von Bauteilen .....</b>	<b>39</b>
4.1 Das Pleuel .....	39
4.1.1 Funktion, Anforderungen und Gestaltung .....	39
4.1.2 Beanspruchung des Pleuels .....	41
4.1.2.1 Art und Ort der Beanspruchung, Schwachstellen .....	41
4.1.2.2 Äußere Kräfte und Momente (Pleuelbelastung) .....	43



4.1.3	Gestaltfestigkeit des Pleuels – konventionelle Berechnungsverfahren .	45
4.1.3.1	Ersatzmodelle zur Ermittlung des Biegemoment-, Normalkraft- und Querkraftverlaufs im Pleuelkopf- bzw. Pleuelaugenquerschnitt .....	45
4.1.3.2	Wirklichkeitsnahe Lastverteilung im Pleuellagerdeckel bzw. Pleuelauge .....	46
4.1.3.3	Schnittkräfte und -momente im Pleuelkopf bzw. Pleuelaugenquerschnitt .....	46
4.1.3.4	Betriebskraft der Pleuelkopfverschraubung .....	49
4.1.3.5	Festigkeitsberechnung des Pleuels .....	51
4.1.3.6	Anmerkungen zur rechnergestützten Pleuelberechnung .....	52
4.1.4	Konventionelle Berechnungsverfahren zur Auslegung der Pleuelkopfverschraubung .....	54
4.1.4.1	Allgemeine Anmerkungen zur Pleuelkopfverschraubung .....	54
4.1.4.2	Berechnung der Pleuelverschraubung nach VDI-Richtlinie 2230 .....	54
4.1.4.2.1	Vorgaben für die Berechnung .....	54
4.1.4.2.2	Elastische Nachgiebigkeiten der Schrauben- verbindung .....	55
4.1.4.2.3	Verspannungsschaubild der Pleuelkopf- verschraubung .....	58
4.1.4.2.4	Mindestklemmkraft, Klemmkraftverlust und Vorspannkraft .....	60
4.1.4.2.5	Schraubendimensionierung .....	63
4.1.4.2.6	Dynamische Schraubenberechnung, Dauerfestigkeit .....	65
4.1.4.2.7	Ergänzungen zur Pleuelkopfverschraubung .....	66
4.2	Der Kolben .....	67
4.2.1	Vorbemerkung zur Kolbenberechnung .....	67
4.2.2	Funktion und Anforderungen .....	67
4.2.3	Beanspruchung des Kolbens .....	69
4.2.3.1	Art und Ort der Beanspruchung, hoch beanspruchte Bereiche des Kolbens .....	69
4.2.3.2	Kräfte im Kurbeltrieb .....	72
4.2.3.3	Kolbenweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung .....	75
4.2.4	Konventionelle Berechnung des Kolbens .....	80
4.2.4.1	Bauarten von Kolben für Otto- und Dieselmotoren, Einsatzgrenzen .....	80
4.2.4.1.1	Kolben für Ottomotoren .....	80
4.2.4.1.2	Kolben für Pkw-Dieselmotoren .....	82
4.2.4.1.3	Kolben für Nkw-Dieselmotoren .....	84
4.2.4.2	Kolbenbolzenberechnung .....	85
4.2.4.2.1	Art der Bolzenlagerung (nach [C24]) .....	85
4.2.4.2.2	Einfaches Ersatzmodell für die Bolzenberechnung nach [C30] .....	86
4.2.4.2.3	Flächenpressung in der Bolzennabe .....	88
4.2.4.2.4	Ovalverformung des Kolbenbolzens .....	90

4.2.4.2.5	Durchbiegung des Kolbenbolzens .....	91
4.2.4.2.6	Beanspruchung des Kolbenbolzenwerkstoffs .....	92
4.2.4.3	Ergänzungen zur Kolbenbolzenberechnung .....	96
4.2.4.3.1	Auslegungszünddruck .....	96
4.2.4.3.2	Maßgebliche Drehzahl für die Kolbenbolzen- berechnung .....	98
4.2.4.3.3	Drehzahlgrenze der Kolbenbolzensicherung .....	99
4.2.4.3.4	Zusätzliche Beanspruchung des Kolbenbolzens bei Klemmpleuel, Vergleichsspannung (zwei- und dreiachsig) .....	103
4.2.4.4	Berechnung der Kolbenmasse .....	104
4.2.4.5	Festlegung der Kolbenaußenkontur .....	106
4.2.4.5.1	Einbauspiel, Laufspiel, Ovalität und Tragbildkorrektur .....	106
4.2.4.5.2	Kolbenschaftelastizität, -ovalität, Tragbildbreite und plastische Verformung .....	109
4.2.5	Berechnung der Kolbensekundärbewegung .....	110
4.2.6	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung des Kolbens .....	113
4.2.6.1	Allgemeine Beschreibung der FEM-Berechnung des Kolbens .....	113
4.2.6.2	Thermische Beanspruchung des Kolbens .....	116
4.2.6.3	Mechanische Beanspruchung des Kolbens und Gesamtbeanspruchung durch Überlagerung der thermischen Beanspruchung .....	119
4.2.6.4	Ergänzungen zur FEM-Berechnung des Kolbens .....	120
4.2.6.4.1	Berechnung der Bolzennabe mit Berücksichtigung des Schmierfilms .....	120
4.2.6.4.2	Berechnung der wirklichkeitsnahen Verformung des Kolbenbolzens .....	122
4.2.6.4.3	CAE-Systeme für die Kolbenauslegung .....	122
4.3	Die Kolbenringe .....	123
4.3.1	Vorbemerkung zu den Berechnungsmöglichkeiten des Kolbenringverhaltens .....	123
4.3.2	Funktion und Anforderungen .....	124
4.3.3	Auf den Kolbenring wirkende Kräfte .....	126
4.3.4	Elastomechanik des Kolbenrings .....	132
4.3.4.1	Tangentialkraft und radiale Pressung .....	132
4.3.4.2	Maulweite, Tangentialkraft und Kolbenringparameter $k_{Ri}$ ....	133
4.3.4.3	Einbauspannung, Überstreifspannung, Elastizitäts-Modul und plastische Verformung des Kolbenrings .....	134
4.3.4.4	Stoßspielvergrößerung .....	134
4.3.4.5	Kolbenringtorsion („Ringtwist“) .....	135
4.3.5	Rechnerische Simulation der Kolbenringfunktion .....	136
4.3.5.1	Vorbemerkung zu den bekannten Rechenmodellen .....	136
4.3.5.2	Simulation der Kolbenringbewegung .....	137

4.3.5.3	Simulation der Gasströmung der durchblasenden Verbrennungsgase (Blow-by) .....	139
4.3.5.4	Simulation der Kolbenringhydromechanik(-dynamik) .....	143
4.4	Die Kurbelwelle .....	146
4.4.1	Funktion und Anforderungen .....	146
4.4.2	Beanspruchung der Kurbelwelle .....	147
4.4.2.1	Die Kurbelwelle belastende Kräfte und Momente .....	147
4.4.2.2	Zeitlicher Beanspruchungsverlauf der Kurbelwelle .....	148
4.4.2.3	Betrachtungen zur statischen Unbestimmtheit der Kurbelwelle .....	148
4.4.2.4	Einkröpfungsmodell, Biege- und Torsionsmomente, Nennspannungen .....	151
4.4.2.5	Maximale Beanspruchung der Kurbelwelle .....	158
4.4.2.5.1	Hochbeanspruchte Bereiche, Spannungszustand ...	158
4.4.2.5.2	Formzahlen für Biegung und Torsion .....	158
4.4.3	Gestaltfestigkeit der Kurbelwelle .....	162
4.4.3.1	Anmerkung zu den Auslegungsvorschriften von Kurbelwellen für Schiffsmotoren .....	162
4.4.3.2	Formzahl und Kerbwirkungszahl .....	162
4.4.3.3	Dynamische Festigkeit der Kurbelwellenwerkstoffe, Sicherheit gegen Dauerbruch .....	163
4.4.4	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung der Kurbelwelle .....	165
4.4.4.1	Anwendung der FEM bzw. BEM auf die Kurbelwelle .....	165
4.4.4.2	Berechnungsablauf und aktuelle Trends .....	167
4.5	Das Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) .....	169
4.5.1	ZKG-Konzepte .....	169
4.5.1.1	ZKG-Konstruktion/-Bauweise .....	169
4.5.1.1.1	Monolithisches und heterogenes (Büchsen-)ZKG-Konzept .....	169
4.5.1.1.2	Open- und Closed-deck-Bauweise .....	171
4.5.1.1.3	Wasserdurchtritt zwischen den Zylindern bzw. zusammengegossene Zylinder, Wassermantel .....	173
4.5.1.1.4	Schürzen- bzw. zweiteilige ZKG-Konstruktion .....	177
4.5.1.2	ZKG-Werkstoffe .....	181
4.5.1.3	Zylinderlaufflächen-Technologien .....	182
4.5.1.3.1	Grauguss-Zylinderlauffläche .....	182
4.5.1.3.2	Übereutektische Aluminium-Silizium-Legierung ..	184
4.5.1.3.3	Nickel-Siliziumkarbid-beschichtete Zylinderlauffläche .....	185
4.5.1.3.4	Verbundwerkstofftechnik zur lokalen Erzeugung von Al-Zylinderlaufflächen .....	187
4.5.1.4	ZKG-Gießverfahren .....	188
4.5.1.5	ZKG-Konzeptvergleich, Entwicklungstrend bei Pkw .....	188
4.5.2	Beanspruchung des ZKG, allgemeiner konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale .....	190

4.5.3	ZKG-Leichtbau .....	196
4.5.3.1	Massenreduzierungs-Potenzial .....	196
4.5.3.2	Werkstoffeigenschaften von Grauguss und Aluminium im Vergleich .....	197
4.5.4	ZKG-Berechnung .....	200
4.5.4.1	Berechnung des ZKG mittels FEM .....	200
4.5.4.1.1	Zur Berechnung des Temperaturfelds .....	204
4.5.4.1.2	Zur Berechnung der Verformung .....	205
4.5.4.1.3	Spannungsberechnung .....	206
4.5.4.2	Anmerkungen zur Hauptlagerverschraubung .....	206
4.5.4.3	Anmerkungen zur Zylinderkopfverschraubung .....	207
4.5.4.4	Mathematische Beschreibung des Zylinderverzugs .....	214
4.5.5	Zylinderlaufbüchsen .....	217
4.5.5.1	Nasse Büchsen .....	218
4.5.5.1.1	Konstruktive Gestaltung von nassen Büchsen .....	218
4.5.5.1.2	Hinweise zur Dimensionierung und Auslegung nasser Büchsen .....	221
4.5.5.2	Trockene Büchsen .....	224
4.5.5.2.1	Schrumpfspannungen (Montagezustand) .....	225
4.5.5.2.2	Überdeckung und daraus resultierende Pressung ...	226
4.5.5.2.3	Wärmespannungen in der Zylinderwand .....	229
4.5.5.2.4	Dynamische Beanspruchung unter Zünddruck, Vergleichsspannung .....	232
4.5.6	Zylinderverschleiß .....	234
4.6	Der Zylinderkopf (ZK) .....	235
4.6.1	Konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale des ZK .....	235
4.6.2	Die besondere Problematik der thermischen ZK-Beanspruchung .....	240
4.6.2.1	Wärmeübergang im Brennraum .....	240
4.6.2.1.1	„Globale“ Ansätze .....	240
4.6.2.1.2	Erweiterte Ansätze für den Wärmeübergang .....	244
4.6.2.1.3	Wärmeübertragung durch die Bauteilwand .....	245
4.6.2.2	Wärmespannungen im ZK .....	247
4.6.2.3	Kühlmittelführung im ZK .....	250
4.6.3	ZK-Werkstoffe und -Gießverfahren .....	251
4.6.4	Ladungswechselkanäle, Ventilwinkel, Brennraumgeometrie und ZK-Bauhöhe .....	254
4.6.4.1	Ladungswechselkanäle .....	254
4.6.4.1.1	Kurze Anmerkungen zur Kanalgeometrie und Strömungsbeeinflussung .....	254
4.6.4.1.2	Durchflusszahl für die Drosselverluste .....	258
4.6.4.2	Ventilwinkel, Brennraumgeometrie und Bauhöhe .....	264
4.6.5	Berechnung des ZK mittels FEM .....	266
4.7	Die Zylinderkopfdichtung .....	268

<b>5</b>	<b>Berechnung und Auslegung von Baugruppen</b>	273
5.1	Ladungswechsel	273
5.1.1	Eindimensionale Simulation des Ladungswechsels (nach [I82])	279
5.1.2	Ladungswechsel mit starrem Ventiltrieb	283
5.1.2.1	Anzahl der Ventile	285
5.1.2.2	Steuerelemente des starren Ventiltriebes	288
5.1.2.3	Hydraulische Ausgleichselemente	291
5.1.2.4	Das Ventil	291
5.1.2.5	Nocken	295
5.1.2.5.1	Definition der Nockenform	295
5.1.2.5.2	Auslegungsprogramme	301
5.1.2.6	Ventilfedern	302
5.1.2.6.1	Erforderliche Ventilfederkraft	302
5.1.2.6.2	Berechnung der Ventilfeder	303
5.1.2.7	Nockenwelle	305
5.1.2.7.1	Anmerkungen zu Nockenwellenwerkstoffen, -herstellung und -lagerung	305
5.1.3	Ladungswechsel mit variabler Steuerzeit	305
5.1.4	Ausführungsformen	308
5.1.4.1	Zweipunktversteller	308
5.1.4.2	Kettenversteller	308
5.1.4.3	Schwenkmotoren	310
5.1.5	Ladungswechsel mit variabler Ventilhubumschaltung	311
5.1.6	Ladungswechsel mit variablem Ventilhub – drosselfreie Laststeuerung	314
5.1.6.1	Ausführungsformen	317
5.1.6.1.1	BMW-VALVETRONIC	317
5.1.6.1.2	UniValve-System	319
5.1.6.1.3	Elektromechanischer Ventiltrieb	321
5.1.7	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Ventiltrieben	323
5.1.7.1	Anmerkungen zur Ventiltriebsreibung, zum Ventiltriebs- geräusch und zur Dynamik des Gesamtsystems	326
5.1.7.2	Berechnung der Ventiltriebsdynamik mit Mehrkörpersimulation	328
5.2	Der Kurbeltrieb	329
5.2.1	Massenausgleich des Hubkolbenmotors	329
5.2.1.1	Massenausgleich des Einzylindertriebwerks	330
5.2.1.1.1	Massenkräfte 1. Ordnung	330
5.2.1.1.2	Ausgleichsmöglichkeiten durch Gegengewichte beim Einzylindertriebwerk	333
5.2.1.2	Massenausgleich des Mehrzylindertriebwerks mit Hilfe von Gegengewichten	342
5.2.1.2.1	Ausgleich der freien Massenkräfte beim Reihenmotor	342
5.2.1.2.2	Ausgleich der freien Massenkräfte beim V2-Triebwerk	343

5.2.1.2.3	Ausgleich der freien Massenmomente .....	350
5.2.1.2.4	Massenumlaufmoment .....	384
5.2.1.3	Massenausgleich mit Hilfe von Ausgleichswellen .....	386
5.2.1.3.1	Ausgleich von Massenkräften durch Ausgleichswellen; Möglichkeiten und Anwendungen .....	389
5.2.1.3.2	Rollmoment .....	393
5.2.1.3.3	Ausgleich von Massenmomenten durch Ausgleichswellen; Anwendungsbeispiele .....	397
5.2.2	Anmerkungen zu Triebwerksschwingungen .....	400
<b>6</b>	<b>Motorgeräusch</b> .....	<b>401</b>
6.1	Motorgeräusch und Fahrgeräusch – gesetzliche Vorschriften .....	401
6.2	Motorgeräusch – Teilschallquellen und Geräuschursachen .....	403
6.3	Indirekt erzeugtes Motorgeräusch – Entstehung, Übertragung und Abstrahlung .....	406
6.4	Zylinderdruckverlauf und resultierendes Zylinderdruckspektrum .....	413
6.5	Vorausberechnung des akustischen Verhaltens der Motorstruktur .....	415
6.5.1	Schwingungsverhalten der Motorstruktur .....	415
6.5.2	Geräuschreduzierende Strukturveränderungen am Zylinderkurbelgehäuse (Motorblock) und deren physikalischer Hintergrund .....	418
6.5.3	Akustische Betrachtungen zur Kurbelwelle, deren Lagerung und das Verhalten des Schmierfilms im Zusammenhang mit dem „inneren“ Körperschallleitweg .....	423
6.5.4	Berechnung der Luftschallabstrahlung von der schwingenden Motorstruktur .....	428
6.5.4.1	Anmerkungen zum Berechnungsablauf .....	428
6.5.4.2	Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung .....	429
6.6	Bemerkung zu weiteren Geräuschquellen am Motor .....	432
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>433</b>
<b>Anhang</b>	.....	<b>437</b>
I	Anmerkungen zu den Grundlagen der Finite-Element-Methode (FEM) .....	437
II	Zur Matrizen-Theorie der Statik – Verschiebungsmethode .....	440
III	Lösung von Differenzialgleichungen mit Hilfe der FEM .....	446
IV	Anmerkungen zur Finite-Differenzen-Methode (FDM) .....	451
V	Anmerkungen zur Boundary-Element-Methode (BEM) .....	452
VI	Anmerkungen zum „modalen Modell“ (Modal-Analyse) .....	453
<b>Literaturverzeichnis</b>	.....	<b>457</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>	.....	<b>473</b>

## Formelzeichen

(Ein \* anstelle einer Dimension steht bei den Formelzeichen, deren Dimension fallspezifisch ist.)

<b>a, A</b>			$b_{KWW}$	mm	Kurbelwangenbreite
$a$	mm	große Ellipsen-Hauptachse	$b'_{KWW}$	–	auf Außendurchmesser
	m/s	Schallgeschwindigkeit			Hubzapfen bezogene
$a^*$	m/s	Schallgeschwindigkeit bei kritischen Bedingungen			Kurbelwangenbreite
$a_{Gg}, a_{Ggi}$	mm	Gegengewichtsabstände	$b_{Pl}$	mm	Pleuelbreite
$a_{No}$	mm	Abstand Einstichpunkte Grundkreis-/Nockenspitzenradius	$b_{Ri}$	mm	radiale Kolbenringabmessung
			$\Delta b_{Ri}$	mm, $\mu\text{m}$	Kolbenringlaufflächenverschleiß
$a_{Pl}$	m/s <sup>2</sup>	Pleuelquerbeschleunigung	$b_{Sa}$	mm	halbe Breite Kolbenschaftausparung
$a_Z$	mm	Zylinderabstand	$b_Z$	mm	Bankversatz beim V-Motor
$\Delta a_Z$	mm	Stegbreite zwischen den Zylindern	$b_{ZKD}$	mm	radiale Abmessung der Brennraumeinfassung der Zylinderkopfdichtung
$\Delta a'_Z$	mm	Zylinderbankversatz			
$A$	mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	Fläche, Oberfläche, Querschnitt, Strömungsquerschnitt	$B$	kg/h	Kraftstoffverbrauch
			$B'$	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$	Biegesteifigkeit pro Querschnittsbreite
$A_0$	mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	Bezugsfläche	$B_i$	*	Fourier-Koeffizienten
$A_1$	mm <sup>2</sup>	Querschnitt vor Drosselstelle	$B_{100km}$	l/100 km	Kraftstoffstreckenverbrauch
$A_2$	mm <sup>2</sup>	Querschnitt nach Drosselstelle	<b>c, C</b>		
$A_5$	%	Bruchdehnung	$c$	N/mm	Steifigkeit, Federsteifigkeit
$A_A$	mm <sup>2</sup>	Auslassquerschnitt	$c_1, c_2$	Nmm/mm	Drehsteifigkeiten bzw. Axialsteifigkeiten
$A_{eq}$	mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	Ersatzquerschnitt		N/mm	Ersatzsteifigkeit (des Ventiltriebs)
$A_E$	mm <sup>2</sup>	Einlassquerschnitt	$c_{Ers}$	N/mm	Federkonstante, Federsteifigkeit
$A_i$	mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	$i$ -te Teiloberfläche	$c_F$	N/mm	verschiedene Konstanten
	*	auch allg. für Fourier-Koeffizienten verwendet	$c_{ij}$	*	Schallgeschwindigkeit in Luft (in der Akustik wird meist $c$ statt $a$ verwendet)
$A_{ij}$	mm <sup>2</sup> , m <sup>2</sup>	Durchflussquerschnitt zwischen Volumen $i$ und $j$	$c_L$	m/s	Anlenkhebellänge des Nebenpleuels
$A_K$	cm <sup>2</sup> , mm <sup>2</sup>	Kolbenfläche	$c_N$	mm	Ölfilmsteifigkeit
$A_{Pl}$	mm <sup>2</sup>	(mittlerer) Pleuelstangenquerschnitt	$c_{\text{öF}}$	N/mm	spezifische Wärme bei konstantem Druck
$A_S$	mm <sup>2</sup>	Schraubenschaftquerschnitt (Spannungsquerschnitt)	$c_p$	kJ/kgK	Konstante, mathematischer Term
$A_{Tf}$	mm <sup>2</sup>	Trennfugenquerschnitt	$C$	*	Konstanten, Integrationskonstanten
$A_{Ve}$	mm <sup>2</sup>	Ventilquerschnittsfläche, Ventilöffnungsfläche	$C_1, C_2$	*	
<b>b, B</b>			<b>d, D</b>		
$b$	mm, m	Breite, kleine Ellipsen-Hauptachse auch: Abstand	$d$	mm, m	Durchmesser
$b_B$	mm	radialer Abstand Angriffspunkt Abstützkraft/Innenrand der Zylinderbohrung	$\Delta d$	mm	Durchmesserüberdeckung, Durchmesservergrößerung infolge Wärmeausdehnung
$b_e$	g/kWh	spezifischer Kraftstoffverbrauch			
$b_{FR}$	mm	radiale Abmessung des Feuerrings			