

Eduard Köhler | Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Motormechanik, Berechnung
und Auslegung des Hubkolbenmotors

5. Auflage

PRAXIS



**KOLBENSCHMIDT
PIERBURG**

MTZ

Eduard Köhler | Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Lexikon Motorentchnik

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Ottomotor mit Direkteinspritzung

herausgegeben von R. van Basshuysen

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

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

Automobildesign und Technik

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

Bremsenhandbuch

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion

herausgegeben von H. Burg und A. Moser

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

von H. Eichlseder und M. Klell

Umweltschutz in der Automobilindustrie

von D. Gruden

Fahrwerkhandbuch

herausgegeben von B. Heißing und M. Ersoy

Nutzfahrzeugtechnik

herausgegeben von E. Hoepke und S. Breuer

Automobilelektronik

herausgegeben von K. Reif

Automotive Software Engineering

von J. Schäuffele und T. Zurawka

Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz

herausgegeben von U. Seiffert und G. Rainer

Motorradtechnik

von J. Stoffregen

Rennwagentechnik

von M. Trzesniowski

Handbuch Kraftfahrzeugelektronik

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

Bussysteme in der Fahrzeugtechnik

von W. Zimmermann und R. Schmidgall

Eduard Köhler | Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Motormechanik, Berechnung
und Auslegung des Hubkolbenmotors

5., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 313 Abbildungen und 25 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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

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
- 5., überarbeitete und erweiterte 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: MercedesDruck, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0490-7

Vorwort zur 5. Auflage

Die Autoren freuen sich, zusammen mit dem Verlag Vieweg+Teubner nunmehr die 5. Auflage des Buches „Verbrennungsmotoren“ vorlegen zu können. Darin kommt zunächst zum Ausdruck, dass sich das Buch etablieren konnte und auf nachhaltiges Interesse in Fachkreisen auch an der Motormechanik stößt. Diese tritt ja angesichts der politischen Dimension der Abgasemissionen des Verbrennungsmotors gegenüber der Motorthermodynamik zuweilen doch etwas in den Hintergrund. Es unterstreicht aber auch, dass die Autoren seit einigen Jahren eine kontinuierliche und bis zum heutigen Tag hervorragende Zusammenarbeit mit dem Verlag Vieweg – jetzt Vieweg+Teubner – verbindet. Anlässlich des Erscheinens der 5. Auflage sei dafür besonders herzlich gedankt.

Der Inhalt dieses Buches beruht ursprünglich auf einer Habilitationsschrift „Berechnung und Auslegung der Motormechanik schnelllaufender Hubkolbenmotoren“ eines der beiden heutigen Autoren, Eduard Köhler. Diese wurde von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg im Jahr 1996 angenommen. Ein herzlicher Dank gilt der dortigen Fakultät Maschinenbau und insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Tschöke vom Lehrstuhl für Kolbenmaschinen, der umfangreiche Unterstützung gewährte. Verpflichtung zu großem Dank besteht zudem gegenüber Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Pucher, Technische Universität Berlin, und Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Ulf Essers, Universität Stuttgart. Beide gaben viele wertvolle Hinweise zum Gelingen der Arbeit. Der Kontakt zu Herrn Prof. Essers geht auf die Studienzeit zurück. Er hat sich seither immer wieder mit Rat und Tat zur Verfügung gestellt. Seit einigen Jahren darf der genannte Autor einem Lehrauftrag am Lehrstuhl von Prof. Tschöke nachkommen, wobei Inhalte dieses Buches Berücksichtigung finden.

Die Funktionsverantwortung für mechanische Motorkomponenten im Rahmen der Berufstätigkeit des Autors gab ab 1988 Anlass, persönliche Erfahrungen schriftlich festzuhalten. Es war insbesondere auch eine Zeit des Umbruchs. Die rechnergestützte Bauteilauslegung ersetzte mehr und mehr herkömmliche Berechnungsverfahren. Hier sei auch dem Arbeitgeber, der heutigen Kolbenschmidt Pierburg AG bzw. der KS Aluminium-Technologie AG, für eine fachlich herausfordernde, interessante berufliche Tätigkeit gedankt. Dieser Dank schließt Kollegen, Mitarbeiter und Vertreter der Kundenseite mit ein, die sich immer wieder als Gesprächspartner zur Verfügung gestellt und wertvolle Anregungen gegeben haben.

Die Gelegenheit, die Habilitationsschrift in Buchform publizieren zu können, gab Anlass zur ersten größeren Überarbeitung. Manche Leser empfanden es als Mangel, dass ein zentrales Thema – der Massenausgleich des Hubkolbenmotors – zunächst ausgespart wurde. So regte vor allem Herr Prof. Tschöke eine entsprechende Ergänzung des Buches an und entsprach damit auch einem Anliegen des Autors. Mit der inhaltlich erweiterten 2. Auflage, bei der Herr Prof. Tschöke und Mitarbeiter beratend zur Seite standen, lag nun ein fachlich abgerundetes Buch vor.

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. Die Vorbereitungszeit reichte damals für eine fachliche Überarbeitung bzw. Aktualisierung – Letzteres ohnehin eine Problematik speziell von Fach-

büchern – nicht aus. Dagegen wurde die vom Verlag in dankenswerter Weise bereits mit der 2. Auflage begonnene redaktionelle Überarbeitung einschließlich Mängelbeseitigung fortgesetzt.

Im Herbst 2004 erschien die 4. Auflage des Buches. Vor einer weiteren Auflage drängte sich zunehmend die Frage auf, ob das Buch dem Stand der Technik noch gerecht wird. Auch wenn ein Fachbuch primär Grundlagen vermitteln soll, kann es sich der stürmischen Entwicklung der Motorentechnik nicht ganz entziehen. Der beruflich stark eingespannte Autor war allerdings kaum mehr in der Lage, die erforderliche Überarbeitung alleine zu leisten. Hier war es sicherlich ein glücklicher Umstand, dass Herr Prof. Dr.-Ing. Rudolf Flierl, Technische Universität Kaiserslautern, als Mitautor für die 4. Auflage gewonnen werden konnte. Herr Prof. Flierl hatte zunächst dankenswerterweise das Kapitel Ventiltrieb grundsätzlich neu überarbeitet und um viel aktuelles Wissen über moderne Ventiltriebssysteme und den von diesen zu steuernden Ladungswechsel bereichert. Darüber hinaus war es dringend geboten, im Kapitel Kolben aktuellen Entwicklungen – vor allem auf Seite der Pkw-DI-Dieselmotoren – Rechnung zu tragen.

Mit der 4. Auflage wurde die Aktualisierung des Buches angegangen. Diese wurde nun konsequent fortgesetzt. Mit der 5. Auflage legen die Autoren eine Überarbeitung insbesondere des sich mit der Bauteilauslegung befassenden Kapitels 4 und damit zugleich eines ansehnlichen Teils des Buches vor. Hier lag stets die Absicht zugrunde, den Grundlagen neueres Wissen gegenüberzustellen. So werden z. B. die Fortschritte bei der Kurbelwellenberechnung ausführlich dargestellt sowie neue Bauteilkonzepte von Pkw-Zylinderkurbelgehäusen erläutert. Es wird z. B. auch auf die Werkstoffproblematik beim Zylinderkopf tiefer eingegangen und versucht, einen Überblick über neue Zylinderkopfdichtungskonzepte zu geben. Gerade letzteres Bauteil erfährt eine rasante Weiterentwicklung. Kleinere Veränderungen in den restlichen Kapiteln 2, 3 und 5 und das Bemühen um die Beseitigung verbliebener kleiner Mängel runden die 5. Auflage ab.

Die Autoren danken dem Verlag Vieweg+Teubner für die traditionell gute Zusammenarbeit, so auch bei der Vorbereitung dieser 5. Auflage. Schließlich ging vom Verlag auch der Anstoß für diese umfangreiche Aktualisierung aus. Eine Fortsetzung dieses Bemühens mag – sollten die Voraussetzungen dann gegeben sein – einer weiteren Auflage vorbehalten sein. Die Autoren geben der Hoffnung Ausdruck, das Buch wieder auf den aktuellen Stand der Technik gehoben zu haben, und damit beim geeigneten Leser entsprechende Resonanz zu finden.

Kaiserslautern, im Juli 2008

Rudolf Flierl

Heilbronn, im Juli 2008

Eduard Köhler

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage	V
Formelzeichen	XIV
1 Vorbemerkung	1
2 Einleitung	3
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
2.4 Ziele bei der Neu- und Weiterentwicklung eines Motors	5
3 Kriterien bei der Motorauslegung	9
3.1 Zur Veränderlichkeit von Motorkenndaten	9
3.2 Definition wichtiger Motorkenndaten	10
3.2.1 Hubvolumen (Hubraum)	10
3.2.2 Leistung und Drehmoment	10
3.2.3 Spezifische Leistung	11
3.3 Festlegung der Hauptabmessungen in Verbindung mit der Triebwerksauslegung	11
3.3.1 Hub-Bohrungs-Verhältnis	11
3.3.2 Pleuelstangenverhältnis und Pleuellänge	13
3.3.3 Blockhöhe (Zylinderdeckhöhe)	13
3.3.4 Kolbendurchmesser und Kolbenmasse	14
3.3.5 Kompressionshöhe des Kolbens	15
3.3.6 Hub, Bohrung und Zylinderzahl	17
3.3.7 Zylinderlänge, untere Kolbenschaftlänge, Austausch des Kolbens	18
3.3.8 Kurbelwellenfreigang und Kolbenschaftlänge	19
3.3.9 Weitere Kolbenhauptabmessungen	25
3.4 Weitere Motorhauptabmessungen	26
3.4.1 Zylinderabstand und Stegbreite	26
3.4.2 Zylinderbankversatz bei V-Motoren, Auswirkungen auf Zylinderabstand und Stegbreite	30
3.5 Betrachtungen zum optimalen Pleuelstangenverhältnis	32
3.6 Betrachtungen zum Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Brennraums	35
3.7 Zusätzliche Begriffe und Definitionen	37
3.8 Mittlerer effektiver Druck bzw. spezifische Arbeit	40
4 Berechnung und Auslegung von Bauteilen	45
4.1 Das Pleuel	45
4.1.1 Funktion, Anforderungen und Gestaltung	45
4.1.2 Beanspruchung des Pleuels	48
4.1.2.1 Art und Ort der Beanspruchung, Schwachstellen	48
4.1.2.2 Äußere Kräfte und Momente (Pleuelbelastung)	50

4.1.3	Gestaltfestigkeit des Pleuels – konventionelle Berechnungsverfahren	52
4.1.3.1	Ersatzmodelle zur Ermittlung des Biegemoment-, Normalkraft- und Querkraftverlaufs im Pleuelkopf- bzw. Pleuelaugenquerschnitt	52
4.1.3.2	Wirklichkeitsnahe Lastverteilung im Pleuellagerdeckel bzw. Pleuelauge	53
4.1.3.3	Schnittkräfte und -momente im Pleuelkopf bzw. Pleuelaugenquerschnitt	53
4.1.3.4	Betriebskraft der Pleuelkopfverschraubung	56
4.1.3.5	Festigkeitsberechnung des Pleuels	58
4.1.3.6	Anmerkungen zur rechnergestützten Pleuelberechnung	59
4.1.4	Konventionelle Berechnungsverfahren zur Auslegung der Pleuelkopfverschraubung	62
4.1.4.1	Allgemeine Anmerkungen zur Pleuelkopfverschraubung	62
4.1.4.2	Berechnung der Pleuelverschraubung nach VDI-Richtlinie 2230 [C21]	62
4.1.4.2.1	Vorgaben für die Berechnung	62
4.1.4.2.2	Elastische Nachgiebigkeiten der Schraubenverbindung	63
4.1.4.2.3	Verspannungsschaubild der Pleuelkopfverschraubung	66
4.1.4.2.4	Mindestklemmkraft, Klemmkraftverlust und Vorspannkraft	68
4.1.4.2.5	Schraubendimensionierung	71
4.1.4.2.6	Dynamische Schraubenberechnung, Dauerfestigkeit	73
4.1.4.2.7	Ergänzungen zur Pleuelkopfverschraubung	74
4.2	Der Kolben	75
4.2.1	Vorbemerkung zur Kolbenberechnung	75
4.2.2	Funktion und Anforderungen	76
4.2.3	Beanspruchung des Kolbens	78
4.2.3.1	Art und Ort der Beanspruchung, hoch beanspruchte Bereiche des Kolbens	78
4.2.3.2	Kräfte im Kurbeltrieb	81
4.2.3.3	Kolbenweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung	84
4.2.4	Konventionelle Berechnung des Kolbens	89
4.2.4.1	Bauarten von Kolben für Otto- und Dieselmotoren, Einsatzgrenzen	89
4.2.4.1.1	Kolben für Ottomotoren	89
4.2.4.1.2	Kolben für Pkw-Dieselmotoren	92
4.2.4.1.3	Kolben für Nkw-Dieselmotoren	94
4.2.4.1.4	Großkolben	96
4.2.4.2	Kolbenbolzenberechnung	96
4.2.4.2.1	Art der Bolzenlagerung	97
4.2.4.2.2	Einfaches Ersatzmodell für die Bolzenberechnung nach [C42]	98

4.2.4.2.3	Flächenpressung in der Bolzennabe	100
4.2.4.2.4	Ovalverformung des Kolbenbolzens	102
4.2.4.2.5	Durchbiegung des Kolbenbolzens	103
4.2.4.2.6	Beanspruchung des Kolbenbolzenwerkstoffs	104
4.2.4.2.7	Beanspruchung der Bolzennabe, Steigerung der Nabenbelastbarkeit	107
4.2.4.3	Ergänzungen zur Kolbenbolzenberechnung	108
4.2.4.3.1	Auslegungszünddruck	108
4.2.4.3.2	Maßgebliche Drehzahl für die Kolbenbolzen- berechnung	112
4.2.4.3.3	Drehzahlgrenze der Kolbenbolzensicherung	113
4.2.4.3.4	Zusätzliche Beanspruchung des Kolbenbolzens bei Klemmpleuel, Vergleichsspannung (zwei- und dreiachsig)	116
4.2.4.4	Berechnung der Kolbenmasse	118
4.2.4.5	Festlegung der Kolbenaußenkontur	119
4.2.4.5.1	Einbauspiel, Laufspiel, Ovalität und Tragbildkorrektur	119
4.2.4.5.2	Kolbenschaftelastizität, -ovalität, Tragbildbreite und plastische Verformung	122
4.2.5	Berechnung der Kolbensekundärbewegung	123
4.2.6	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung des Kolbens	126
4.2.6.1	Allgemeine Beschreibung der FEM-Berechnung des Kolbens	126
4.2.6.2	Thermische Beanspruchung des Kolbens	129
4.2.6.3	Mechanische Beanspruchung des Kolbens und Gesamtbeanspruchung durch Überlagerung der thermischen Beanspruchung	133
4.2.6.4	Ergänzungen zur FEM-Berechnung des Kolbens	135
4.2.6.4.1	Berechnung der Bolzennabe mit Berücksichtigung des Schmierfilms	135
4.2.6.4.2	Berechnung der wirklichkeitsnahen Verformung des Kolbenbolzens	136
4.2.6.4.3	CAE-Systeme für die Kolbenauslegung	137
4.3	Die Kolbenringe	138
4.3.1	Vorbemerkung zu den Berechnungsmöglichkeiten des Kolbenringverhaltens	138
4.3.2	Funktion und Anforderungen	139
4.3.3	Auf den Kolbenring wirkende Kräfte	142
4.3.4	Elastomechanik des Kolbenrings	147
4.3.4.1	Tangentialkraft und radiale Pressung	147
4.3.4.2	Maulweite, Tangentialkraft und Kolbenringparameter k_{Rj}	148
4.3.4.3	Einbauspannung, Überstreifspannung, Elastizitäts-Modul und plastische Verformung des Kolbenrings	150
4.3.4.4	Stoßspielvergrößerung	151
4.3.4.5	Kolbenringtorsion („Ring-Twist“)	151

4.3.5	Rechnerische Simulation der Kolbenringfunktion	152
4.3.5.1	Vorbemerkung zu den bekannten Rechenmodellen	152
4.3.5.2	Simulation der Kolbenringbewegung	154
4.3.5.3	Simulation der Gasströmung der durchblasenden Verbrennungsgase (Blow-by)	156
4.3.5.4	Simulation der Kolbenringhydromechanik(-dynamik)	160
4.4	Die Kurbelwelle	164
4.4.1	Funktion und Anforderungen	164
4.4.2	Beanspruchung der Kurbelwelle	165
4.4.2.1	Die Kurbelwelle belastende Kräfte und Momente	165
4.4.2.2	Zeitlicher Beanspruchungsverlauf der Kurbelwelle	166
4.4.2.3	Betrachtungen zur statischen Unbestimmtheit der Kurbelwelle	167
4.4.2.4	Einkröpfungsmodell, Biege- und Torsionsmomente, Nennspannungen	170
4.4.2.5	Maximale Beanspruchung der Kurbelwelle	177
4.4.2.5.1	Hochbeanspruchte Bereiche, Spannungszustand ...	177
4.4.2.5.2	Formzahlen für Biegung und Torsion	177
4.4.3	Gestaltfestigkeit der Kurbelwelle	181
4.4.3.1	Anmerkung zu den Auslegungsvorschriften von Kurbelwellen für Schiffsmotoren	181
4.4.3.2	Formzahl und Kerbwirkungszahl	181
4.4.3.3	Dynamische Festigkeit der Kurbelwellenwerkstoffe, Sicherheit gegen Dauerbruch	182
4.4.3.4	Kurbelwellenwerkstoffe und -herstellung	184
4.4.4	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung der Kurbelwelle	185
4.4.4.1	Konzept- und Lay-out-Phase bei der Kurbelwellenauslegung	185
4.4.4.2	Komplexe Berechnungsmodelle für die dynamische Kurbelwellenberechnung	186
4.4.4.3	Ergänzungen zur rechnergestützten Festigkeitsberechnung der Kurbelwelle, zur Betriebsfestigkeit und zu Auslegungskriterien	191
4.5	Das Zylinderkurbelgehäuse (ZKG)	193
4.5.1	Zylinderkurbelgehäuse-(ZKG-)Konzepte	195
4.5.1.1	ZKG-Konstruktion/-Bauweise	195
4.5.1.1.1	Monolithisches und heterogenes (Büchsen-)ZKG-Konzept	196
4.5.1.1.2	Open- und Closed-deck-Bauweise	200
4.5.1.1.3	Wasserdurchtritt zwischen den Zylindern bzw. zusammengegossene Zylinder, Wassermantel	203
4.5.1.1.4	Schürzen- bzw. zweiteilige ZKG-Konstruktion	206
4.5.1.2	ZKG-Werkstoffe	211
4.5.1.3	Zylinderlaufflächen-Technologien	212
4.5.1.3.1	Grauguss-Zylinderlauffläche	213
4.5.1.3.2	Übereutektische Aluminium-Silizium-Legierung ..	215

4.5.1.3.3	Nickel-Siliziumkarbid-beschichtete Zylinderlauffläche	216
4.5.1.3.4	Verbundwerkstofftechnik zur lokalen Erzeugung von Al-Zylinderlaufflächen	217
4.5.1.4	ZKG-Gießverfahren	218
4.5.1.5	ZKG-Konzeptvergleich, Entwicklungstrend bei Pkw	219
4.5.2	Beanspruchung des ZKG, allgemeiner konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale	222
4.5.3	ZKG-Leichtbau	227
4.5.3.1	Massenreduzierungs-Potenzial	227
4.5.3.2	Werkstoffeigenschaften von Grauguss und Aluminium im Vergleich	229
4.5.4	ZKG-Berechnung	232
4.5.4.1	Berechnung des ZKG mittels FEM	232
4.5.4.1.1	Zur Berechnung des Temperaturfelds	236
4.5.4.1.2	Zur Berechnung der Verformung	237
4.5.4.1.3	Spannungsberechnung	238
4.5.4.2	Anmerkungen zur Hauptlagerverschraubung	238
4.5.4.3	Anmerkungen zur Zylinderkopfverschraubung	239
4.5.4.4	Mathematische Beschreibung des Zylinderverzugs	246
4.5.5	Zylinderlaufbüchsen	249
4.5.5.1	Nasse Büchsen	250
4.5.5.1.1	Konstruktive Gestaltung von nassen Büchsen	250
4.5.5.1.2	Hinweise zur Dimensionierung und Auslegung nasser Büchsen	253
4.5.5.2	Trockene Büchsen	256
4.5.5.2.1	Schrumpfspannungen (Montagezustand)	257
4.5.5.2.2	Überdeckung und daraus resultierende Pressung ...	258
4.5.5.2.3	Wärmespannungen in der Zylinderwand	261
4.5.5.2.4	Dynamische Beanspruchung unter Zünddruck, Vergleichsspannung	264
4.5.6	Zylinderverschleiß	266
4.6	Der Zylinderkopf (ZK)	268
4.6.1	Konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale des ZK	268
4.6.2	Die besondere Problematik der thermischen ZK-Beanspruchung	275
4.6.2.1	Wärmeübergang im Brennraum	275
4.6.2.1.1	„Globale“ Ansätze	275
4.6.2.1.2	Erweiterte Ansätze für den Wärmeübergang	279
4.6.2.1.3	Wärmeübertragung durch die Bauteilwand	280
4.6.2.2	Wärmespannungen im ZK	282
4.6.2.3	Kühlmittelführung im ZK	285
4.6.3	ZK-Werkstoffe und -Gießverfahren	287
4.6.4	Ladungswechselkanäle, Ventilwinkel, Brennraumgeometrie und ZK-Bauhöhe	292
4.6.4.1	Ladungswechselkanäle	292
4.6.4.1.1	Kanalgeometrie und Strömungsbeeinflussung	293
4.6.4.1.2	Durchflusszahl für die Drosselverluste	299
4.6.4.2	Ventilwinkel, Brennraumgeometrie und Bauhöhe	305

4.6.5	Rechnergestützte Berechnung des ZK	306
4.7	Die Zylinderkopfdichtung	312
4.7.1	Funktion und Anforderungen	312
4.7.2	ZKD-Bauarten im Wandel der Zeit	313
4.7.3	Moderne ZKD-Dichtungstechnik	314
4.7.3.1	Veränderte Einsatzbedingungen	314
4.7.3.2	Metalllagen-Dichtungen	315
5	Berechnung und Auslegung von Baugruppen	323
5.1	Ladungswechsel	323
5.1.1	Eindimensionale Simulation des Ladungswechsels (nach [16])	329
5.1.2	Ladungswechsel mit starrem Ventiltrieb	333
5.1.2.1	Anzahl der Ventile	335
5.1.2.2	Steuerelemente des starren Ventiltriebes	338
5.1.2.3	Hydraulische Ausgleichselemente	341
5.1.2.4	Ventile	341
5.1.2.5	Nocken	345
5.1.2.5.1	Definition der Nockenform	345
5.1.2.5.2	Auslegungsprogramme	351
5.1.2.6	Ventilfedern	352
5.1.2.6.1	Erforderliche Ventilfederkraft	352
5.1.2.6.2	Berechnung der Ventilfeder	353
5.1.2.7	Nockenwelle	355
5.1.2.7.1	Anmerkungen zu Nockenwellenwerkstoffen, -herstellung und -lagerung	355
5.1.3	Ladungswechsel mit variabler Steuerzeit	355
5.1.4	Ausführungsformen	358
5.1.4.1	Zweipunktversteller	358
5.1.4.2	Kettenversteller	358
5.1.4.3	Schwenkmotoren	360
5.1.5	Ladungswechsel mit variabler Ventilhubumschaltung	361
5.1.6	Ladungswechsel mit variablem Ventilhub – drosselfreie Laststeuerung	364
5.1.6.1	Ausführungsformen	367
5.1.6.1.1	BMW-VALVETRONIC	367
5.1.6.1.2	UniValve-System	369
5.1.6.1.3	Elektromechanischer Ventiltrieb	371
5.1.7	Berechnung des dynamischen Verhaltens von Ventiltrieben	373
5.1.7.1	Anmerkungen zur Ventiltriebsreibung, zum Ventiltriebs- geräusch und zur Dynamik des Gesamtsystems	376
5.1.7.2	Berechnung der Ventiltriebsdynamik mit Mehrkörpersimulation	378
5.2	Der Kurbeltrieb	379
5.2.1	Massenausgleich des Hubkolbenmotors	379
5.2.1.1	Massenausgleich des Einzylindertriebwerks	380
5.2.1.1.1	Massenkräfte 1. Ordnung	380
5.2.1.1.2	Ausgleichsmöglichkeiten durch Gegengewichte beim Einzylindertriebwerk	383

5.2.1.2	Massenausgleich des Mehrzylindertriebwerks mit Hilfe von Gegengewichten	392
5.2.1.2.1	Ausgleich der freien Massenkräfte beim Reihenmotor	392
5.2.1.2.2	Ausgleich der freien Massenkräfte beim V2-Triebwerk	393
5.2.1.2.3	Ausgleich der freien Massenmomente	400
5.2.1.2.4	Massenumlaufmoment	434
5.2.1.3	Massenausgleich mit Hilfe von Ausgleichswellen	436
5.2.1.3.1	Ausgleich von Massenkräften durch Ausgleichswellen; Möglichkeiten und Anwendungen	439
5.2.1.3.2	Rollmoment	443
5.2.1.3.3	Ausgleich von Massenmomenten durch Ausgleichswellen; Anwendungsbeispiele	447
5.2.2	Anmerkungen zu Triebwerksschwingungen	450
6	Motorgeräusch	451
6.1	Motorgeräusch und Fahrgeräusch – gesetzliche Vorschriften	451
6.2	Motorgeräusch – Teilschallquellen und Geräuschursachen	454
6.3	Indirekt erzeugtes Motorgeräusch – Entstehung, Übertragung und Abstrahlung	457
6.4	Zylinderdruckverlauf und resultierendes Zylinderdruckspektrum	464
6.5	Vorausberechnung des akustischen Verhaltens der Motorstruktur	466
6.5.1	Schwingungsverhalten der Motorstruktur	466
6.5.2	Geräuschreduzierende Strukturveränderungen am Zylinderkurbelgehäuse (Motorblock) und deren physikalischer Hintergrund ...	468
6.5.3	Akustische Betrachtungen zur Kurbelwelle, deren Lagerung und das Verhalten des Schmierfilms im Zusammenhang mit dem „inneren“ Körperschallleitweg	474
6.5.4	Berechnung der Luftschallabstrahlung von der schwingenden Motorstruktur	479
6.5.4.1	Anmerkungen zum Berechnungsablauf	479
6.5.4.2	Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung	480
6.6	Bemerkung zu weiteren Geräuschquellen am Motor	483
7	Zusammenfassung und Ausblick	485
Anhang	489
I	Anmerkungen zu den Grundlagen der Finite-Element-Methode (FEM)	489
II	Zur Matrizen-Theorie der Statik – Verschiebungsmethode	492
III	Lösung von Differenzialgleichungen mit Hilfe der FEM	498
IV	Anmerkungen zur Finite-Differenzen-Methode (FDM)	503
V	Anmerkungen zur Boundary-Element-Methode (BEM)	504
VI	Anmerkungen zum „modalen Modell“ (Modal-Analyse)	505
	Literaturverzeichnis	509
	Sachwortverzeichnis	527

Formelzeichen

(Ein * anstelle einer Dimension steht bei den Formelzeichen, deren Dimension fall-spezifisch ist.)

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

d_1	mm	Durchmesser, Nenndurchmesser der Kolbenbolzensicherung (z. B. Sprengring)	Δd_U	μm	Durchmesservergrößerung der Futterbohrung des Zylinderkurbelgehäuses infolge Überdeckung
d_2	mm	Sprengringdrahtdurchmesser	d_{Ve}	mm	Ventiltellerdurchmesser
d_3	mm	Sprengringdurchmesser ungespannt	ΔD	$\mu\text{m}, \text{mm}$	durchmesserbezogene Änderung der Kolbenovalität unter einem bestimmten Winkel
d_4	mm	Sprengringdurchmesser gespannt (Einbauzustand)	D_{Ba}	mm	Bund-Außendurchmesser
d_a	mm	Außendurchmesser	D_F	mm	mittlerer Schraubenfederdurchmesser
d_B	mm	Kolbenbolzendurchmesser	D_i	–	modale Dämpfung des i -ten Freiheitsgrads
d_B^*	mm	Durchmesser der Kolbenbolzenfreidrehung	D_K	mm, cm	Kolbendurchmesser
Δd_B	$\mu\text{m}, \text{mm}$	Ovalverformung des Kolbenbolzens, Durchmesserverkleinerung der Zylinderlaufbüchse wegen Überdeckung	ΔD_K	$\mu\text{m}, \text{mm}$	durchmesserbezogene Ovalität des Kolbens
d_{Bi}	mm	Innendurchmesser des Kolbenbolzens	ΔD_{K1}	$\mu\text{m}, \text{mm}$	durchmesserbezogener Betrag der „einfachen“ Ovalität des Kolbens
d_{Bi1}	mm	aufgeweiteter Innendurchmesser des Innenkonusbolzens	ΔD_{K2}	$\mu\text{m}, \text{mm}$	durchmesserbezogener Betrag der überlagerten „doppelten“ Ovalität des Kolbens (Zusatzindex „alt“ = vor, „neu“ = nach Ovalitätskorrektur)
d_{Bi2}	mm	Innendurchmesser des Innenkonusbolzens im zylindrischen Bereich	D_Z	mm, cm	Zylinderdurchmesser
d_F	mm	Federdrahtdurchmesser	e, E	–	auf Pleuellänge bezogene Kurbeltriebsdesachsierung und/oder -schränkung
d_i	mm	Innendurchmesser, Innendurchmesser des Ein- bzw. Auslasskanals	e	–	
d_{KWG}	mm	Durchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_F	mm	Hebelarm der exzentrisch eingeleiteten Schraubetriebskraft
d_{KWGi}	mm	Innendurchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_{F1}, e_{F2}	mm	Hebelarme der exzentrisch eingeleiteten Schraubetriebskraft bei schräg geteiltem Pleuel
d_{KWG}	–	auf Außendurchmesser des Hubzapfens bezogener Innendurchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_S	mm	Schwerpunktsabstand
d_{KWH}	mm	Außendurchmesser des Kurbelwellenhubzapfens	E	N/mm^2	Elastizitäts-Modul
d_{KWHi}	mm	Innendurchmesser des Kurbelwellenhubzapfens	E_{Al}	N/mm^2	Elastizitäts-Modul von Aluminium
d_{KWH}^*	–	auf Außendurchmesser bezogener Innendurchmesser des Kurbelwellenhubzapfens	E_{GJL}	N/mm^2	Elastizitäts-Modul von Grauguss
d_{Ri}	mm	Kolbenringaußendurchmesser	f, F		
$d_{Ri1,2}$	mm	orthogonal im Spannband gemessener Kolbenringaußendurchmesser	f	Hz, kHz	Frequenz
d_S	mm	Schraubenschaftdurchmesser (Durchmesser des Spannungsquerschnitts)	Δf	Hz, kHz	Frequenzband
d_{S1}	mm	Flankendurchmesser des Schraubengewindes	f_{abt}	Hz, kHz	Abtastrfrequenz
d_{S2}	mm	Reibungsdurchmesser des Schraubenkopfes	f_c	Hz, kHz	Eckfrequenz („Cut-off“-Frequenz)
			f_e	Hz, kHz	Eigenfrequenz
			f_g	Hz, kHz	Grenzfrequenz
			f_i	–	Einflussfaktoren auf Biegeformzahl der Kurbelwellenkröpfung
				Hz, kHz	diskrete Frequenzen
				Hz, kHz	i -te Eigenfrequenz

F	N	Kraft	F_{KNy-DS}	N	Querkomponente der druckseitigen Normalkraft
$F_I^{(1)}, F_{II}$	N	Massenkräfte			(= Kolbenseitenkraft)
$F_I^{(2)}$		(abgekürzte Schreibweise)			gegendruckseitige
ΔF	N	Kraftänderung	F_{KN-GDS}	N	Kolbennormalkraft
F_{ax}	N	Axialkraft			(= Kolbenseitenkraft)
F_B	N	Betriebskraft	F_{KWHL}	N	Hauptlagerkraft der Kurbelwelle
F_{Bi}	N	Betriebskraft bezogen auf verschiedene Stellen i	F_i	N	Längskraft
F_E	N	Erregerkraft	F_{ii}	N	Längskraft bezogen auf verschiedene Stellen i
F_{E0}	N	Erregerkraft-Amplitude	F_m	N	Massenkraft
F_F	N	Federkraft	F_{mK}	N	Massenkraft des Komplettkolbens (mit Bolzen, Bolzensicherung und Kolbenringen)
F_{Fred}	N	reduzierte Federkraft	F_{mK}^*	N	Massenkraft des Kolbens ohne Kolbenbolzen
F_{FV}	N	Federvorspannkraft	F_{mKWrot}	N	Massenkraft der rotierenden Kurbelwellenmasse
F_G	N	Gewichtskraft, Schwerkraft	F_{mosz}	N	oszillierende Massenkraft
F_{Gas}	N	Gaskraft	$F_{mosz}^{(1)}$	N	oszillierende Massenkraft 1. Ordnung
$F_{Gas1,2}$	N	oberhalb und unterhalb des Kolbenrings wirkende Gaskraft	$F_{mosz}^{(2)}$	N	oszillierende Massenkraft 2. Ordnung
ΔF_{Gas}	N	Gaskraftdifferenz oberhalb und unterhalb des Kolbenrings	F_{moszN}	N	oszillierende Massenkraft des Nebenpleuels
F_{Gasrad}	N	im Kolbenringrücken radial wirkende Gaskraft	$F_{mosz-OT}$	N	oszillierende Massenkraft in OT-Stellung
F_{Gg}, F_{Ggi}	N	Gegengewichtskraft	$F_{mosz-Ref}$	N	oszillierende Massenkraft (Bezugswert)
F_{Ggl}, F_{Ggli}	N	bestimmte Gegengewichtskräfte	F_{mPlk}	N	Massenkraftbelastung des Pleuelkopfes
F_{Ggx}	N	x-Komponente der Gegengewichtskraft	F_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuellmassenteils
F_{Ggy}	N	y-Komponente der Gegengewichtskraft	F'_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuellmassenteils ohne Pleuellagerdeckel
F_{hydax}	N	axiale Auftriebskraft im Schmierfilm zwischen Ringnut und Kolbenringflanke	$F_{mPlrotN}$	N	rotierender Anteil der Massenkraft des Nebenpleuels
F_{hydrad}	N	radiale Auftriebskraft im Schmierfilm der Kolbenringlauffläche	F_{mRest}	N	nicht ausgeglichene Massenkraft
F_i	N	verschiedene durch Index i unterschiedene Kräfte, Schnittkräfte	F_{mrot}	N	rotierende Massenkraft
F_K	N	Kolbenkraft	$F_{mrotges}$	N	gesamte rotierende Massenkraft
F_K^*	N	Kolbenkraft ohne Berücksichtigung der Kolbenbolzenmasse	F_N	N	Normalkraft
F_{KI}	N	Klemmkraft	F_{No}	N	auf Nocken wirkende Kraft
F_{Klmin}	N	Mindestklemmkraft	F_{Nx}, F_{Ny}	N	x- und y-Komponente der Normalkraft
F_{Klmin1}	N	Mindestklemmkraft gegen Querverschiebung	F_{Pl}	N	Pleuelstangenkraft
F_{Klmin2}	N	Mindestklemmkraft bei Betriebskraft	F_{PlKZ}	N	Pleuelkopftlastung im Klemmlängenbereich
F_{Klmin3}	N	Mindestklemmkraft zur Kompensation der Lagerüberdeckung	F_{PIL}	N	Pleuellager- bzw. Hubzapfenkraft
F_{KN}	N	Kolbenseitenkraft	F_q	N	Querkraft
F_{KN-DS}	N	druckseitige Kolbennormalkraft (am Zylinderende) mit ausgetauchtem Schaftende	F_{qi}	N	Querkraft bezogen auf verschiedene Stellen i
F_{KNx-DS}	N	Längskomponente der druckseitigen Normalkraft			

F_{rad}	N	Radialkraft (in verschiedenem Zusammenhang gebraucht)	g, G	m/s^2	Erdbeschleunigung (9,81 m/s^2)
F_{radx}, F_{rady}	N	x- und y-Komponente der Radialkraft	G	N/mm^2	Schubmodul
F_{Rax}	N	axiale Reibkraft an der Kolbenringlauffläche	h, H		
F_{R-DS}	N	druckseitige Reibkraft am Kolbenschaft	h	mm, m	Höhe, Querschnittshöhe, Abstand, Schmierpalthehöhe, Gewindesteigung
F_{res}	N	resultierende Kraft		kJ/kg	spezifische Enthalpie
F_{Rrad}	N	radiale Reibkraft zwischen Ringnut- und Kolbenringflanke	h_0	mm	Vornockenhöhe (Ventilspiel)
F_{Rx-GDS}	N	x-Komponente der gegen-druckseitigen Reibkraft am Kolbenschaft	h_{Al}	mm	auf Aluminium angepasste Querschnittshöhe
F_{Ry-GDS}	N	y-Komponente der gegen-druckseitigen Reibkraft am Kolbenschaft	h_B	mm	Bundhöhe
F_S	N	Schraubenkraft	h_{GG}	mm	auf Grauguss angepasste Querschnittshöhe
F_{So}	N	Reaktionskraft im oberen Schaftbereich	h_i	mm	verschiedene Querschnittshöhen
F_{Su}	N	Reaktionskraft im unteren Schaftbereich		mm	verschiedene Höhenmaße im Bereich der Kolbenkompressionshöhe
F_{SZ}	N	Schraubenzusatzkraft	h_{Kb}	mm	Kolbenbodendicke
F_t	N	Tangentialkraft	h_{KWW}	mm	Kurbelwangendicke
F_{tGas}	N	gaskraftbedingte Tangentialkraft	h'_{KWW}	–	auf den Außendurchmesser des Hubzapfens bezogene Kurbelwangendicke
F_{ti}	N	Tangentialkraft an der Kröpfung i	h_{KWZW}	mm	Dicke der Kurbelwellen-zwischenwange
F_{tmosz}	N	Tangentialkraft der oszillierenden Massenkraft	h_{No}	mm	Nockenhub
F_V	N	Vorspannkraft (in verschiedenem Zusammenhang gebraucht)	h_{Ri}	mm	axiale Kolbenringhöhe bzw. -laufflächenhöhe
$F_{V1,2}$	N	Vorspannkraften bezogen auf unterschiedliche Verhältnisse	h_{Sa}	mm	Schaftausparungshöhe des Kolbens
ΔF_V	N	Vorspannkraftverlust, Erhöhung der Vorspannkraft	h_{ZKD}	mm	Dicke der Zylinderkopfdichtung
F_{Vmax}	N	maximale Vorspannkraft	H	m/N	Übertragungsfunktion
F_{Vmin}	N	minimale Vorspannkraft	ΔH	m/N	Veränderung der Übertragungsfunktion
F_x	N	x-Komponente der Kraft F	H_0	m/N	Anfangswert der Übertragungsfunktion
$F_x^{(1)}$	N	Längskraft 1. Ordnung	H_{ges}	m^{-2}	Übertragungsfunktion der Motorstruktur
$F_x^{(2)}$	N	Längskraft 2. Ordnung	H_K	mm	Kompressionshöhe des Kolbens
F_{xi}	N	Längskräfte	ΔH_K	mm	Änderung der Kompressionshöhe des Kolbens
F_{xres}	N	x-Komponente der resultierenden Kraft	H_u	kJ/kg	unterer Heizwert
$F_{xRest}^{(1)}$	N	Restlängskraft 1. Ordnung	H_{uGem}	kJ/m^3	unterer Gemischheizwert
F_y	N	y-Komponente der Kraft F	i, I		
F_{yi}	N	Querkräfte	i	–	ganze Zahl, Zähler, Faktor, Windungszahl, Übersetzungsverhältnis, Ordnungszahl
F_{yres}	N	y-Komponente der resultierenden Kraft			
F_{yRest}	N	Restquerkraft			
F_z	N	z-Komponente der Kraft F , Axialkraft	i_k	–	Faktor für innere Kerbwirkung
			I	mm^4	axiales Flächenträgheitsmoment

I_i	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment bezogen auf verschiedene Stellen i	l_{Auf}	mm	Auflagelänge des Kolbenbolzens
I_b	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment bezüglich Biegung	l_B	mm	Länge des Kolbenbolzens
I_{eq}	mm ⁴	Ersatzflächenträgheitsmoment	l_{B1}	mm	Länge des Innenkonusbolzens
I_{Ov}	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment bezüglich Ovalverformung	l_{B2}	mm	Länge des zylindrischen Bereichs der Innenform des Innenkonusbolzens
I_{Tfj}	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment bezogen auf den Trennfugenquerschnitt des Pleuelkopfes	l_{Fase}	mm	Länge der Fase am Kolbenbolzenaußen
j, J			l_i	mm	Abstand der i -ten Ersatzmasse der Kurbelwellenkröpfung
j	–	ganze Zahl, Zähler, $\sqrt{-1}$ (imaginäre Größe)	l_K	mm	Kolbenbauhöhe (Kolbengesamthöhe)
J	kgm ²	Massenträgheitsmoment	l_{Kl}	mm	Klemmlänge der Schraubenverbindung
J_K	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Kolbens	l_{Kli}	mm	Längenanteil i der Klemmlänge
J_{SPi}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Pleuels bezogen auf den Schwerpunkt	l_{KWG}	mm	Länge des Kurbelwellengrundzapfens
k, K			l_{KWH}	mm	Länge des Kurbelwellenhubzapfens
k	–	ganze Zahl, Zähler	l_{Pl}	mm	Pleuellänge
	Ns/m	Dämpfungskonstante	l_{Pl1}	mm	Abstand Pleuelschwerpunkt/großes Pleuelauge
	g/cm ³	„ k -Faktor“ (Pseudo-Dichte) des Kolbens	l_{Pl2}	mm	Abstand Pleuelschwerpunkt/kleines Pleuelauge
	W/m ² K	Wärmedurchgangszahl	l_{PIN}	mm	Augenabstand des Nebenpleuels
	m ² /s ²	turbulente spezifische kinetische Energie	l_{PIN1}	mm	Massenschwerpunkt- abstand des Nebenpleuels
k_D	Ns/m	Dämpfungskonstante	l_S	mm	Kolbenschaftlänge, Schraubenlänge
k_{Di}	Ns/m	verschiedene Dämpfungskonstanten	Δl_S	mm	Austauschmaß des Kolbenschafts
k_{KW}	mm ²	Trägheitsradius der Kurbelwelle	l_{So}	mm	obere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmitte aufwärts)
k_{Pl}	mm ²	Trägheitsradius des Pleuels	l_{Su}	mm	untere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmitte abwärts)
k_{Plosz}	mm ²	Trägheitsradius des oszillierenden Pleuelmassenteils	Δl_V	mm	Setzbetrag der Schraubenverbindung
k_{Plrot}	mm ²	Trägheitsradius des rotierenden Pleuelmassenteils	l_Z	mm	Zylinderlänge
k_{Ri}	–	Kolbenringparameter	l_{ZK}	mm	Klemmlänge der Zylinderkopf-Schraubenverbindung
l, L			Δl_{ZK}	mm	relative Verkürzung der Klemmlänge der Zylinderkopf-Schraubenverbindung
l	mm...km	Länge, Streckenlänge, Bogenlänge, Abstand, Tragbreite	l_{ZKD}	mm	Klemmlänge des Zylinderkurbelgehäuses
Δl	mm	Längenänderung	L_{A-Am}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruckpegel des Auspuffmündungsgeräusches
l_1	mm	Stützkraftabstand der Kolbenbolzennabe, bestimmter Abstand (= b_{Pl}) Pleuelbreite, bestimmter Abstand	L_{AMot}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruckpegel des Motorgeräusches
l_2	mm	bestimmte Längenänderungen			
$\Delta l_1, \Delta l_2$	mm	bestimmte Längenänderungen			
l_{AA}	mm	Augenabstand der Kolbenbolzennabe			

L_{AR}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruck- pegel des Reifenabroll- geräusches	m_{oszN}	kg	oszillierende Masse des Nebenpleuels
$L_{A\Sigma}$	dB(A)	A-bewerteter Summen- schalldruckpegel	m_{Pl}	g, kg	Pleuelmasse
L_{Bl}	mm	Höhe des Zylinderkurbel- gehäuses („Blockhöhe“)	m_{PlLd}	g, kg	Masse des Pleuellager- deckels
ΔL_K	dB	Pegeldifferenz der Körperschallschnelle	m_{PlN}	kg	Masse des Nebenpleuels
L_v	dB	Schnellepegel	m_{Plosz}	g, kg	oszillierender Anteil der Pleuelmasse
m, M			$m_{P\text{rot}}$	g, kg	rotierender Anteil der Pleuelmasse
m	–	ganze Zahl, Zähler	$m_{P\text{rot}N}$	kg	rotierende Masse des Nebenpleuels
m	kg	Masse	m_{Ri}	g, kg	Kolbenringmasse
Δm	kg	Massendifferenz	m_{rot}	g, kg	rotierende Masse
m_1	g, kg	Stößelmasse	m_{th}	g, kg	theoretische Masse
m_2	g, kg	Stoßstangenmasse	m_{Vered}	g, kg	auf das Ventil reduzierte Masse der Ventilbetäti- gungsorgane
m_3	g, kg	Ventilmasse mit Feder und Teller	m_Z	g, kg	nach Ladungswechsel im Zylinder vorhandene, momentan im Zylinder befindliche Gasmasse
m_A	g, kg	ausströmende Masse	M	Nm	Drehmoment
m_B	g, kg	Kolbenbolzenmasse	Ma	–	Mach-Zahl
m_E	g, kg	einströmende Masse	M_i	Nm	Biegemoment bezogen auf die Stelle i
m_{Ers}	g, kg	schwingende Ersatzmasse (des Ventiltriebs)	M_b	Nm	Biegemoment
m_F	g, kg	Federmasse	$M_{b1...VI}$	Nm	Biegemoment in verschie- denen Kurbelkröpfungs- abschnitten
m_{Gem}	g, kg	Gemischmasse	M_{bPl}	Nm	Biegemoment im Pleuelschaft
m_{Gg}	kg	Gegengewichtsmasse	M_{bPlKZ}	Nm	zusätzlicher Biegemoment- anteil im Klemmlängen- bereich des Pleuelkopfes
Δm_{Gg}	kg	Gegengewichtsmassen- differenz	M_{bSZ}	Nm	zusätzlicher Biegemoment- anteil im Schraubenschaft
m_i	g, kg	verschiedene Massen	M_{bZ}	Nm	zusätzliches Biegemoment
$m_{i,j}$	g, kg	vom Volumen i zum Volumen j strömende Menge (Masse)	M_D	Nm	hydrodynamisches Dämpfungsmoment des Kolbenschafts
m_{0i}	g, kg	Ausgangsmasse im Volumen i	M_{max}	Nm	maximales Moment
m_K	g, kg	Kolbenmasse ohne Kolbenzubehör („nackt“)	M_{mrot}	kgm	rotierendes „Massen- moment“
m_K^*	g, kg	Kolbengesamtmasse ohne Kolbenbolzen	M'_{rad}	N	auf den Umfang bezogenes radiales Moment
m_{Kges}	g, kg	Kolbengesamtmasse	M_{RB}	Nm	Bolzenreibungsmoment
m_{Kr}	g, kg	Kraftstoffmenge	M_{Rest}	Nm	Restmoment
m_{KW0}	kg	Kurbelwellenmasse ohne Gegengewichte	M'_i	N	auf den Umfang bezogenes tangenciales Moment
m_{KWrot}	g, kg	rotierende Kurbelwellen- masse auch: reduzierte Kurbel- wellenmasse	M_T	Nm	Torsionsmoment
m_{KWroti}	g, kg	Anteile i der rotierenden Kurbelwellenmasse	M_{Ti}	Nm	Torsionsmoment der Kröpfung i
m_L	g, kg	Luftmenge(-masse)	$M_{T1...III}$	Nm	Torsionsmoment in ver- schiedenen Kurbel- kröpfungsabschnitten
m_{Mot}	kg	Motormasse	M_{TS}	Nm	Schraubenanzugs- drehmoment
m'_{Lmin}	kg/kg	stöchiometrische kraftstoff- mengenbezogene Luft- menge	M_{TS1}	Nm	Gewindereibungsmoment
m_{Nored}	g, kg	auf den Nocken reduzierte Masse der Ventil- betätigungsorgane			
m_{osz}	g, kg	oszillierende Triebwerksmasse			

M_{TS2}	Nm	Schraubenkopffreibungs- moment	p_E	bar, Pa	Druck im gedachten „Einlassbehälter“
M_x	Nm	Moment um die x -Achse (Längsmoment, wenn Motorhochachse)	p_{E0}	bar, Pa	Gesamtdruck im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
M_{xres}	Nm	x -Komponente des resultierenden Moments	p_{hyd}	bar, Pa	hydrodynamischer Schmierfilmdruck
M_{xRest}	Nm	Restlängsmoment	p_i	bar, Pa	verschiedene durch Index i unterschiedene Drücke
M_y	Nm	Moment um die y -Achse (Kippmoment, wenn Motorquerachse)	p_{max}	bar, Pa	maximale Flächenpressung (auch in N/mm^2)
$M_y^{(1)}$	Nm	Kippmoment 1. Ordnung	p_{me}	bar, Pa	mittlerer effektiver Druck, spezifische Arbeit
M_{yres}	Nm	y -Komponente des resultierenden Moments	p_{mi}	bar, Pa	mittlerer innerer oder indi- zierter Druck, spezifische Arbeit
M_{yRest}	Nm	Restkippmoment	p_{min}	bar, Pa	Mindestflächenpressung (auch in N/mm^2)
M_z	Nm	Moment um die z -Achse (Motorlängsachse)	p_{rad}	bar, Pa	radiale Pressungsverteilung (auch in N/mm^2)
n, N			p_{tGas}	bar, Pa	Tangentialdruck der Gaskraft
n	–	ganze Zahl, Zähler	p_{imosz}	bar, Pa	Tangentialdruck der oszillierenden Massenkraft
n	min^{-1}	Drehzahl	p_U	bar, Pa	Umgebungsdruck (an anderer Stelle auch p_0)
n_e	min^{-1}	Drehzahl entsprechend der Eigenfrequenz	$p_{\bar{U}}$	%	Überlebenswahr- scheinlichkeit
n_i	–	Lastwechsel einer Stufe des Belastungskollektivs	p_Z, p_{Zmax}	bar, Pa	Zylinderdruck, Zünddruck
n_g	min^{-1}	Grenzdrehzahl	p_{Z0}	bar, Pa	Druck im Zylinder (Gesamtzustandswert)
\bar{N}	–	Lastwechsel, Lebensdauer	p_{Z1}	bar, Pa	Gesamtdruck im Zylinder bei Einlassschluss
N_i	–	Bruchlastspielzahl auf Laststufenniveau	p_{ZFA}	bar, Pa	Zylinderdruck bei fremd- angetriebenem Motor
Nu	–	Nußelt-Zahl	p_{zul}	bar, Pa	zulässige Flächenpressung (auch in N/mm^2)
o, O			P	pW	Schalleistung
o_k	–	Oberflächenfaktor	P_0	pW	Bezugsschalleistung
p, P			P_e	kW	effektive Leistung
p	bar, Pa	Druck, Flächenpressung (auch in N/mm^2)	Pr	–	Prandtl-Zahl
	$\mu\text{bar, Pa}$	Schalldruck	q, Q		
Δp	bar, Pa	Änderung der Flächen- pressung (auch in N/mm^2)	q	kJ/kg	spezifische Wärmemenge
p^*	bar, Pa	kritischer Druck	Q	kJ	Wärmemenge
\bar{p}	bar, Pa	mittlere Flächenpressung (auch in N/mm^2)	Q_{ab}	kJ	abgeführte Wärmemenge, Energie
p_0	bar, Pa	Bezugsdruck, Druck bei Umgebungsbedingungen, Ausgangswert (Gesamt- zustandswert), Druck bezogen auf ungestörtes Medium	Q_{Kr}	kJ	Kraftstoffenergieinhalt
p_{01}	bar, Pa	Gesamtdruck vor der Drosselstelle (Gesamt- zustandswert)	Q_W	kJ	Wandwärmeverluste
p_{0i}	bar, Pa	Ausgangsdruck im Volumen i	Q_{zu}	kJ	zugeführte Wärmemenge, Energie
p_1	bar, Pa	statischer Druck vor der Drosselstelle	r, R		
p_2	bar, Pa	statischer Druck hinter der Drosselstelle	r	mm	Radius, Kurbelradius
p_A	bar, Pa	Druck im gedachten „Auslassbehälter“	r^*	mm	Ersatzkerbradius
			r_1, r_2	mm	bestimmte Radien
			r_1, r_{10}	mm	Massenschwerpunktsradius der Kurbelwelle
			r_a	mm	Außenradius

r_{Gg}	mm	Gegengewichtsradius (Konturradius)	s^*	*	Standardabweichung
Δr_{Gg}	mm	Kurbelwellenfreigang (Gegengewichte)		mm	Hub des desachtierten und/oder geschränkten Triebwerks
r_i	mm	verschiedene durch Index i unterschiedene Schwerpunktsradien, Innenradius	s_1, s_2	mm	bestimmte Wanddicken
r_{KWG}	mm	Hohlkehlenradius des Kurbelwellengrundzapfens	s_N	mm	Nabenwanddicke der Kolbenbolzennabe im unteren Scheitel
r_{KWH}	mm	Hohlkehlenradius des Kurbelwellenhubzapfens	Δs_N	mm	Zunahme der Nabenwanddicke der Kolbenbolzennabe in Bolzenlängsrichtung (infolge Auszugsschräge)
r'_{KWH}	–	auf Hubzapfendurchmesser bezogener Hohlkehlenradius am Hubzapfenübergang der Kurbelwelle	s_{Ve}	mm	Ventilhub
			s_W	mm	Wanddicke (z. T. auch ohne Index verwendet)
r_m	mm	mittlerer Radius, Flächenschwerpunktsradius, radialer Abstand der neutralen Faser	$s_{Zü}$	mm	Zapfenüberschneidung der Kurbelwelle
			$s'_{Zü}$	–	auf den Hubzapfendurchmesser bezogene Zapfenüberschneidung der Kurbelwelle
r_m^*	mm	radialer Abstand der neutralen Faser	S	–	Sicherheitsfaktor
r_{Sa}	mm	Schaftausparungsradius des Kolbens	S_D	–	Sicherheit gegen Dauerbruch
R	mm	Radius, Nockengrundkreisradius, Kolbenbolzenradius am Übergang Zylinder- zu Stirnfläche	t, T		
			t	s, h	Zeit
			Δt	s	Zeitschritt (Diskretisierung von dt)
			t_{Kr}	s, h	Kraftstoffdurchflusszeit
ΔR	mm	spezifische Gaskonstante	T	K	Temperatur
R_0	mm	radiale Abweichung	ΔT	K	Temperaturdifferenz
				s	Schwingungsperiode, Periodendauer
Re	–	Nockenkrümmungsradius im Vornockenbereich	T^*	K	kritische Temperatur
R_E	kJ/kgK	Reynolds-Zahl	T_0	K	Bezugstemperatur, Temperatur bei Umgebungsbedingungen, Ausgangstemperatur (Gesamtzustandswert)
					Temperatur (Gesamtzustandswert)
R_{Fl}	mm	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“	T_E	K	Temperatur im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“
R_G	mm	Krümmungsradius der Nockenflanke			Temperatur im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
ΔR_i	mm	Nockengrundkreisradius	T_{E0}	K	Temperatur im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
R_K	mm	bestimmte radiale Abweichungen			Gesamtdrehimpuls
R_m	N/mm ²	Krümmungsradius, Kolben-Ersatzkrümmungsradius	T_{ges}	kgm ² s ⁻¹	verschiedene durch Index i unterschiedene Temperaturen
R_t	µm	Zugfestigkeit	T_i	K	
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Rautiefe			Drehimpuls des Kolbens
R_{Sp}	mm	Streckgrenze	T_{KW}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls der Kurbelwelle
R_{St}	mm	Nockenspitzenradius			Temperatur des Kühlmittels
R_Z	kJ/kgK	Stößelradius	ΔT_{Km}	K	Temperaturerhöhung des Kühlmittels
					Wanddicke
s, S					
s	mm	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Zylinder			
	mm	Zylinderradius			
	mm	Hub; Index „alt“ = vor, „neu“ = nach Änderung			
	mm	Wanddicke			

T_{KmA}	K	Kühlmittel-Austritts-temperatur	v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Dralls
T_{K_mE}	K	Kühlmittel-Eintritts-temperatur	V	l, m ³	Volumen
T_{Plosz}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls des oszillierenden Pleuelmassenanteils	V_C	cm ³	Kompressionsvolumen
T_{Plrot}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls des rotierenden Pleuelmassenanteils	ΔV_C	cm ³	Änderung des Kompressionsvolumens, Kompressionsvolumentoleranz
ΔT_S	K	Temperaturerhöhung der Schraube im Betrieb	V_{Gem}	l, m ³	Gemischvolumen
T_W	K	Brennraumwandtemperatur	V_h	l, cm ³	Zylinderhubvolumen, Zylinderhubraum
ΔT_W	K	Wandtemperaturdifferenz kühlmittelseitige	V_H	l, cm ³	Motorhubvolumen, Hubraum
T_{Wa}	K	Wandtemperatur	V_i	l, m ³	verschiedene durch Index i unterschiedene Volumina
T_{Wi}	K	Wandtemperatur der i -ten Teiloberfläche des Brennraums	V_{Kr}	l, cm ³	Kraftstoffvolumen
T_{Wm}	K	mittlere Wandtemperatur	V_Z	l, cm ³	Zylindervolumen, Brennraumvolumen
T_Z	K	Temperatur im Zylinder	V_{Z1}	l, cm ³	Zylindervolumen bei Einlassschluss
T_{Z0}	K	Temperatur im Zylinder (Gesamtzustandswert)	w, W		
T_{Z1}	K	Temperatur im Zylinder bei Einlassschluss	w	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
ΔT_{ZK}	K	Temperaturerhöhung des Zylinderkopfes im Betrieb	w^*	m/s	kritische Strömungsgeschwindigkeit
T_{Zm}	K	repräsentative Temperatur im Zylinder	w_m	m/s	mittlere Einlassströmungsgeschwindigkeit
u, U			W_b	mm ³	Widerstandsmoment bezüglich Biegung
u	kJ/kg	spezifische innere Energie	W_{bS}	mm ³	Widerstandsmoment des Schraubenschafts
u_E	kJ/kg	spezifische innere Energie im gedachten „Einlassbehälter“	W_i	J, kJ	innere Arbeit
u_Z	kJ/kg	spezifische innere Energie der im Zylinder befindlichen Gasmasse	W_{Kr}	kJ	Kraftstoffenergieinhalt
U	m/s	axiale Kolbenringgeschwindigkeit ($U = \dot{x}_K + \dot{x}_{Ri ax}$)	W_{Ov}	mm ³	Widerstandsmoment bezüglich Ovalverformung
	mm, m	Umfang	W_{TS}	mm ³	Widerstandsmoment des Schraubenschafts gegen Torsion
v, V			W_u	J, kJ	überschüssige Energie
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit, Schallschnelle	x, X		
\bar{v}	m ³ /kg	spezifisches Volumen	x	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
\bar{v}	m/s	Durchschnittsgeschwindigkeit, über schallabstrahlende Oberfläche gemittelte Schallschnelle	Δx	mm	Maulweite des Sprengrings
v_0	m/s	Bezugsschallschnelle		mm, m	Verschiebung, Längenänderung, Maulweitenänderung von Kolbenring und Kolbenbolzensicherung (Sprengring), Dickenänderung
v_1, v_2	m/s	Körperschallschnelle an der Stelle der Erregung und am Ort der Abstrahlung	x_0	mm, m	besonders gekennzeichnete Punkt auf der x -Koordinate, Wegabschnitt
v_i	m/s	Schallschnelle des i -ten Freiheitsgrads	x_1, x_2	mm, m	Abstände
v_m	m/s	mittlere Kolben- geschwindigkeit	x_{1E}, x_{2E}	mm	bestimmte Anfangswerte
			x_A	mm, μ m	Ausgangsamplitude (Resonanzamplitude)
			x_i	mm	verschiedene durch Index i unterschiedene Wege bzw. Federwege

x_K	mm	Kolbenweg	y	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
x_{KN}	mm	Kolbenweg (Nebenpleuel)			
x_{No}	mm	Nockenhubfunktion		mm	Kolbenbolzendesachsierung
x_{Noi}	mm	Nockenhubfunktion in den Abschnitten i		μm , mm	Durchbiegung des Kolbenbolzens
x_{OT}	mm	Kolbenweg bezogen auf OT-Stellung		mm	auch: Schränkung
$x_{Ri\text{ax}}$	mm	axiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung	y_1, y_2	mm, m	Abstände
$x_{Ri\text{rad}}$	mm	radiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung	y_K	μm , mm	Kolbenquerbewegung
x_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate	y_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate
x_{Sf1}	mm	Kolbenringstoßspiel im Neuzustand	z, Z		
x_{Sf2}	mm	Kolbenringstoßspiel bei Laufflächenverschleiß	z	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
x_{UT}	mm	Kolbenweg bezogen auf UT-Stellung		–	Zylinderzahl
x_{Ve}	mm	Ventilerhebung	Z	–	Faktor
			Z_0	kg/m ² s	Schallkennimpedanz
			Z_A	kg/m ² s	Abstrahlmaß
			Z_E	kg/s	Eingangsimpedanz
			Z_S	kg/m ² s	Schallimpedanz
			Z_U	–	Übertragungsfaktor

y, Y

Griechische Formelzeichen

α

α	°, rad K ⁻¹	Winkel, Formzahl Wärmeausdehnungs- koeffizient
α_1, α_2	K ⁻¹	bestimmte Wärme- ausdehnungskoeffizienten
α_{AlSi12}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient der eutektischen Kolbenlegierung AlSi12CuMgNi
α_{AlSi18}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient der übereutektischen Kolbenlegierung AlSi18CuMgNi
α_b	–	Formzahl bezüglich Biegung
α_D	–	Durchflussziffer, Durchflusszahl
α_{DA}	–	Durchflusszahl der Auslassventilöffnung(en)
α_{DE}	–	Durchflusszahl der Einlassventilöffnung(en)
α_{Di}	–	verschiedene durch Index i unterschiedene Durchflusszahlen
α_{Dij}	–	Durchflussziffer für den Strömungsquerschnitt zwi- schen den Volumina i und j
α_{GJL}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient von Grauguss

α_q	–	Formzahl bezüglich Querkraft
α_S	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Schraubenwerkstoffs
α_{Su}	°	Umfangswinkel des „geraden“ Schaftendes
α_T	–	Formzahl bezüglich Torsion
α_V	°, rad	V-Winkel
α_{Ve}	°	Ventilsitzwinkel
$\alpha_W(\alpha_{Wl})$	kJ/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient der Brennraumwände
α_{Wa}	kJ/m ² K	kühlmittelseitiger Wärmeübergangskoeffizient
α_{Wm}	kJ/m ² K	zeitlich gemittelter Wärme- übergangskoeffizient der Brennraumwände
α_{ZK}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Zylinderkopfwerkstoffs

β

β	°, rad	Winkel, Kolbenkippwinkel
	–	Kerbwirkungszahl
β, β_i	°, rad	auch: Phasenwinkel
β_{Plk}	N ⁻¹ m ⁻¹	Biegenachgiebigkeit des Pleuelkopfes im Klemmlängenbereich
β_S	N ⁻¹ m ⁻¹	Biegenachgiebigkeit des Schraubenschafts

γ	$^{\circ}, \text{rad}$	Winkel, Neigungswinkel	ζ	–	Faktor (Reduzierung
γ	–	Faktor (z. B. bei Kolbenbolzendurchbiegung)	ζ	–	der Klemmlänge einer Schraubenverbindung bei Betriebskrafteinleitung innerhalb der verspannten Teile)
γ_N	$^{\circ}, \text{rad}$	Anlenkwinkel des Nebenpleuels			
δ			η		
δ	mm/N	Nachgiebigkeit, Kehrwert der Steifigkeit	η	Ns/m ²	dynamische Viskosität
	$^{\circ}, \text{rad}$	auch: Pleuelversatzwinkel	η_a	–	Durchmesser Verhältnis
δ_{Ers}	mm/N	Ersatznachgiebigkeit	η_e	–	effektiver oder Gesamtwirkungsgrad
δ_i	mm/N	Nachgiebigkeit verschiedener durch Index i gekennzeichnete Querschnitte	η_i	–	innerer oder indizierter Wirkungsgrad, Durchmesser Verhältnis
δ_{Plk}	mm/N	Pleuelkopfnachgiebigkeit im Bereich der Verschraubung	η_{Kerb}	–	Kerbempfindlichkeitsziffer
δ_{Plk}^*	mm/N	auf Schraubenkraft bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	η_{Kr-zu}	–	Wirkungsgrad der Kraftstoffzufuhr
δ_{Plk}^{**}	mm/N	auf Betriebskraft bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	η_{mec}	–	mechanischer Wirkungsgrad
δ_S	mm/N	Schraubennachgiebigkeit	η_v	–	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors
δ_U	–	Ungleichförmigkeitsgrad	θ, Θ		
δ_{ZK}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkopfes	θ	$^{\circ}$	Nockenwinkel im Flanken- und Spitzenbereich
δ_{ZKD}	mm/N	Nachgiebigkeit der Zylinderkopfdichtung	θ_0	$^{\circ}$	Vornockenwinkelbereich
δ_{ZKG}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkurbelgehäuses	θ_{Fl}	$^{\circ}$	Nockenflankenwinkel
			θ_{Flmax}	$^{\circ}$	gesamter Nockenflankenwinkelbereich
ε			θ_i	$^{\circ}$	einzelne Nockenwinkelabschnitte
ε	–	Dehnung	$\theta_{NW}, \theta_{NW_i}$	$^{\circ}$	Nockenwinkel, Nockenwellendrehwinkel
	–	Verdichtungsverhältnis	θ_{Sp}	$^{\circ}$	Nockenspitzenwinkel
	m ² /s ³	Dissipationsrate der turbulenten spezifischen kinetischen Energie	θ_{Spmax}	$^{\circ}$	gesamter Nockenspitzenwinkelbereich
$\Delta\varepsilon$	–	Änderung des Verdichtungsverhältnisses, Verdichtungsverhältnistoleranz	Θ	$^{\circ}$	Abstrahlwinkel
ε_1	–	Dehnung in Hauptspannungsrichtung σ_1	Θ_{ges}	kgm ²	gesamtes Massenträgheitsmoment
ε_{el}	–	elastische Dehnung	Θ_{KW}	kgm ²	Massenträgheitsmoment der Kurbelwelle
ε_{ges}	–	Gesamtdehnung	Θ_{Kwges}	kgm ²	Gesamtmassenträgheitsmoment der Kurbelwelle
ε_{pl}	–	plastische Dehnung	Θ_{Plosz}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des oszillierenden Pleuelmassenanteils
ε_t	–	tangentiale Dehnung	Θ_{Plrot}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des rotierenden Pleuelmassenanteils
$\varepsilon_{t,1,2}$	–	verschiedene durch Index gekennzeichnete tangentielle Dehnungswerte	Θ_{redi}	kgm ²	reduzierte Massenträgheitsmomente
ε_{tB}	–	tangentiale Dehnung der Zylinderlaufbüchse	Θ_{Schw}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Schwungrads
ε_{tU}	–	tangentiale Dehnung der Futterbohrung des Zylinderkurbelgehäuses	κ		
			κ	–	Isentropenexponent
			κ	–	auch: Verhältnis

κ_A	–	Isentropenexponent bei Bedingungen im Auslasskanal	ρ_{Al}	g/cm ³	Dichte von Aluminium
κ_E	–	Isentropenexponent bei Bedingungen im Einlasskanal	ρ_E	g/m ³	Gasdichte im gedachten „Einlassbehälter“
λ	–	Luftverhältnis	ρ_{E0}	g/m ³	Gasdichte bei Bedingungen im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
λ	–	Wärmeleitzahl	ρ_{Gem}	g/m ³	Gemischdichte
λ_A	–	Frischgas- bzw. Luftaufwand	ρ_{GJL}	g/cm ³	Dichte von Grauguss
λ_B	m	Biegewellenlänge	ρ_{Kr}	g/cm ³	Kraftstoffdichte
λ_L	–	Liefergrad	ρ_{Kr0}	g/cm ³	Kraftstoffdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugswert für Kraftstoffdichte
λ_{PI}	–	Pleuelstangenverhältnis	ρ_L	g/m ³	Luftdichte
λ_{PIN}	–	Pleuelstangenverhältnis des Nebenpleuels	ρ_{L0}	g/m ³	Luftdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugswert für Luftdichte
μ	–	Reibungskoeffizient, Massenfaktor in Verbindung mit reduzierter Ventildfedermasse, Querkontraktionszahl	ρ_N	–	Anlenkungsverhältnis
$\mu_{1,2}$	–	verschiedene durch Index gekennzeichnete Querkontraktionszahlen	ρ_{Pl}	g/cm ³	Pleuelwerkstoffdichte
μ_{Al}	–	Querkontraktionszahl von Aluminium	ρ_Z	g/m ³	Gasdichte im Zylinder
μ_{ax}	–	axialer Reibungskoeffizient	ρ_{Z0}	g/m ³	Gasdichte im Zylinder (Gesamtzustandswert)
μ_{GJL}	–	Querkontraktionszahl von Grauguss	σ, Σ		
μ_{rad}	–	radialer Reibungskoeffizient	σ	N/mm ²	Spannung
ξ	–	Korrekturfaktor für die Spannungserhöhung am Innendurchmesser der Schraubenfeder	–	–	Abstrahlgrad
ξ_S	–	Ausnutzungsgrad der Schraubenstreckgrenze	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	N/mm ²	Hauptspannungen bei dreiaxsigem Spannungszustand
π	–	3,141593...	σ_a	N/mm ²	Wechselspannungsamplitude
ρ	g/cm ³	Dichte	σ_{ax}	N/mm ²	Axialspannung
ρ_0	g/m ³	Dichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugsdichte, Dichte bezogen auf ungestörtes Medium, Ausgangswert (Gesamtzustandswert)	σ_b	N/mm ²	Biegespannung
ρ_{01}	g/m ³	Dichte (Gesamtzustandswert)	σ_{ba}	N/mm ²	Biegewechselspannungsamplitude
			σ_{bGas}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle/im Kolbenbolzen infolge Gaskraft
			σ_{bGOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle im GOT
			σ_{bKWrot}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle infolge rotierender Massen
			σ_{bm}	N/mm ²	Biegemittelspannung
			σ_{bmas}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle/im Kolbenbolzen infolge Massenkraft
			σ_{bmasOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle infolge Massenkraft im OT
			σ_{bmax}	N/mm ²	maximale Biegespannung
			σ_{bn}	N/mm ²	Biegeennspannung
			σ_{bw}	N/mm ²	Biegewechselspannung
			σ_{bw}^*	N/mm ²	bauteilbezogene Biegewechselsefestigkeit
			σ_{bw10}	N/mm ²	Biegewechselsefestigkeit des glatten Probestabs mit 10 mm Durchmesser

σ_{bwAl}	N/mm ²	Biegewechselfestigkeit von Aluminium	σ_v	N/mm ²	Vergleichsspannung
σ_{bwGG}	N/mm ²	Biegewechselfestigkeit von Grauguss	σ_{va}	N/mm ²	Vergleichswechselspannungsamplitude
σ_{bZOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle im ZOT	σ_{vm}	N/mm ²	Vergleichsmittelspannung
σ_m	N/mm ²	Mittelspannung	σ_{vmax}	N/mm ²	maximale Vergleichsspannung
σ_{max}	N/mm ²	Maximalspannung	σ_w	N/mm ²	Wechselspannung
σ_{mec}	N/mm ²	mechanische Spannung	σ_y	N/mm ²	Spannung in y -Richtung
σ_{mec1}	N/mm ²	mechanische Spannung mit Unterscheidung zwischen gas- und massenkraftbestimmtem Kurbelwinkbereich	$\sigma_{y,SZ}$	N/mm ²	zusätzliche Schraubenbeanspruchung
σ_{mec2}			σ_{zdw}	N/mm ²	Zug-/Druckwechselfestigkeit
σ_N	N/mm ²	Normalspannung	Σ	–	Schadenssumme
σ_{Nn}	N/mm ²	Normalnennspannung	τ		
σ_{NS}	N/mm ²	Normalspannung (Zugspannung) im Schraubenschaft	τ	N/mm ²	Schubspannung
σ_o	N/mm ²	Oberspannung	τ_o	N/mm ²	Torsionsoberspannung
σ_{Ov}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung	τ_T	N/mm ²	Torsionsspannung
σ_{OvGas}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung durch Gaskraft	τ_{Ta}	N/mm ²	Torsionswechselspannungsamplitude
σ_{Ovmas}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung durch Massenkraft	τ_{Tm}	N/mm ²	Torsionsmittelspannung
σ_{rad}	N/mm ²	Radialspannung	τ_{Tmax}	N/mm ²	maximale Torsionsspannung
$\sigma_{rad1,2}$	N/mm ²	verschiedene durch Index gekennzeichnete Radialspannungen	τ_{Tn}	N/mm ²	Torsionsnennspannung
σ_{rada}	N/mm ²	Radialwechselspannungsamplitude	τ_{TS}	N/mm ²	Torsionsspannung im Schraubenschaft
σ_{radB}	N/mm ²	Radialspannung in der Zylinderlaufbüchse	τ_{TV}	N/mm ²	Torsionsspannung infolge Federvorspannung
σ_{radm}	N/mm ²	Radialmittelspannung	τ_u	N/mm ²	Torsionsunterspannung
σ_{radU}	N/mm ²	Radialspannung in der Futterbohrung der ZKG-Umgebung	φ, Φ		
σ_t	N/mm ²	Tangentialspannung	φ	°, rad	Winkel, Kurbelwinkel, Neigungswinkel
$\sigma_{t1,2}$	N/mm ²	verschiedene durch Index gekennzeichnete Tangentialspannungen	$\Delta\varphi$	°, rad	Winkeländerung
σ_{ta}	N/mm ²	Tangentialwechselspannungsamplitude	φ_A, φ_B	°, rad	Kurbelwinkel bezogen auf die beiden Zylinderbänke beim V-Motor
σ_{therm}	N/mm ²	Wärmespannung	φ_i	°, rad	bestimmte Winkel, Kurbelwinkel
σ_{im}	N/mm ²	Tangentialmittelspannung	$\varphi_k^{(i)}$	°, rad	ordnungsabhängiger „Kröpfungswinkel“ (Phasenwinkel)
σ_u	N/mm ²	Unterspannung	φ_{OT}	°, rad	Kurbelwinkel der OT-Stellung des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks
$\sigma_{ü}$	N/mm ²	Vorspannung infolge Überdeckung	φ_{UT}	°, rad	Kurbelwinkel der UT-Stellung des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks
$\sigma_{ürad}$	N/mm ²	Radialkomponente der Vorspannung infolge Überdeckung	Φ	–	Kraftverhältnis der Verschraubung
$\sigma_{üt}$	N/mm ²	Tangentialkomponente der Vorspannung infolge Überdeckung	χ		
			χ	mm ⁻¹ , m ⁻¹	bezogenes Spannungsgefälle

Ψ			ω, Ω		
ψ	°, rad	Pleuelschwenkwinkel, Kanalwinkel	ω	s ⁻¹	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit, „Drehgeschwindigkeit“
Ψ	–	Ausströmfunktion			
Ψ_A	–	Ausströmfunktion	ω_e	s ⁻¹	Eigenkreisfrequenz
Ψ_E	–	Einströmfunktion	ω_{eI}	s ⁻¹	Eigenkreisfrequenz <i>I</i> -ten Grades
$\Psi_{i,j}$	–	Durchflussfunktion für die Gasströmung von Volumen <i>i</i> nach Volumen <i>j</i>	ω_g	s ⁻¹	Grenzkreisfrequenz
			ω_{NW}	s ⁻¹	Nockenwellenkreis- frequenz
Ψ_{max}	–	Maximalwert der Ausström- funktion	Ω	–	Ausgleichsfaktor

Anmerkungen zu den angegebenen Dimensionen:

Die angegebenen Dimensionen sind diejenigen, die offiziell Verwendung finden dürfen. Wenn z. B. mm statt m angegeben ist, so wird damit nur die jeweilige Größenordnung nachempfunden. Bei Drücken in Pa wird dagegen auf eine Differenzierung hinsichtlich Pa, kPa oder MPa verzichtet.

Die Gleichungen sind, wenn nicht mit besonderer Anmerkung versehen, keine Dimensionsgleichungen. Sie beziehen sich auf die Dimensionen des MKS-Systems (m, kg und s).

1 Vorbemerkung

Dieses Buch befasst sich mit Berechnungsverfahren und der Auslegungspraxis im Bereich dessen, was heute als „Motor-Mechanik“ benannt wird. Im engeren Sinne beziehen sich die Ausführungen auf Kolbenmotoren mit innerer Verbrennung. Zur notwendigen Begrenzung des Gesamtumfangs sind thematische Einschränkungen nicht zu vermeiden. So werden primär schnell laufende Fahrzeugmotoren für Pkw und Nkw angesprochen – konkret Otto- und Diesel-Hubkolbenmotoren, die nach dem Viertaktverfahren arbeiten.

Mechanik und Thermodynamik beschreiben die Vorgänge im Kolbenmotor. Auch wenn die direkte Interaktion zwischen Mechanik und Thermodynamik das Prinzip des Kolbenmotors ausmacht, ist es sinnvoll, beide Gebiete getrennt voneinander zu behandeln. Die Überschneidung ist dort gegeben, wo die Randbedingungen von der jeweils anderen Disziplin vorgegeben werden. So ist die Triebwerksbeanspruchung – von Massenwirkungen einmal abgesehen – Folge der thermodynamischen Vorgänge im Brennraum. Die notwendige Vertiefung führt zu einer Konzentration auf einen dieser Bereiche.

Bei der Festlegung eines geeigneten Motorkonzepts wird zunächst von einfachen Abschätzungen ausgegangen. Im Entwurfsstadium kommen dann umfangreiche Berechnungen zur Voroptimierung der Motorkonstruktion hinzu. Nur so können die einzelnen Baugruppen in Einklang mit den Forderungen des Lastenhefts gebracht und letztendlich die Bauteile richtig dimensioniert werden. Zwangsläufig stellt sich dabei die Frage nach zweckmäßigen und effizienten Berechnungsverfahren.

Für den außenstehenden Beobachter scheinen komplexe, leistungsfähige Rechenprogramme mit großem Speicherbedarf und langen Rechenzeiten – möglicherweise nur noch von Spezialisten in entsprechenden Abteilungen anwendbar – die konventionellen Berechnungsverfahren abgelöst zu haben. Richtig ist, dass in diesem Zusammenhang dem Kosten-Nutzen-Aspekt gebührend Beachtung geschenkt werden muss. Nicht die verfügbaren Hilfsmittel, sondern Zweck und jeweils notwendige Genauigkeit entscheiden über den zu treibenden Aufwand, soll die Berechnung nicht Selbstzweck werden.

Von großer Bedeutung ist heute der Begriff „Simulation“, für den es aber keine feststehende Definition gibt. So ist die Grenze zwischen „konventioneller Berechnung“ und „Simulationsrechnung“ zwangsläufig fließend. Die wesentliche Rolle spielt vor allem der die Hilfsmittel betreffende Fortschritt (Hardware, Methoden, Software). Die Simulationmöglichkeiten verbessern sich dabei ständig. Die Annäherung an die Grenzen der Berechenbarkeit – möglichst genaue Simulation von realen Zuständen bzw. Vorgängen im zeitlichen Ablauf – ist ein für die Forschung stets anzustrebendes, für den Berechnungsingenieur in der Praxis meist nicht unbedingt notwendiges und somit sinnvolles Ziel. Dem wird hier im Hinblick auf die gesetzten Schwerpunkte Rechnung getragen.

Die folgenden Darstellungen können in Anbetracht des stofflich sehr breit angelegten Themas im Einzelfall ein weiter vertiefendes Studium nicht ersetzen. Ebenso muss sich die Darstellung auf Berechnungsansätze bzw. das Andeuten von Berechnungsabläufen beschränken, um den Rahmen nicht zu sprengen. Aus diesem Grund sind zahlreiche Hinweise zum Quellenstudium aufgenommen worden.

2 Einleitung

2.1 Bedeutung der Berechnung im Entwicklungsprozess

Konstruktion, Berechnung und Versuch stehen in einer gegenseitigen Abhängigkeit, wie sie z. B. in [A1] beschrieben wird. Die Entwicklungsbereiche, die im Wesentlichen in diese drei Organisationseinheiten unterteilt sind, sehen sich mehr und mehr dem Druck immer kürzerer Entwicklungszeiten ausgesetzt. Vorgehensweisen wie „Simultaneous Engineering“ o. Ä. gewinnen damit zunehmend an Bedeutung. Je leistungsfähiger die Beiträge der Berechnung sind, umso stärker kann sie in die Entwicklungsabläufe eingebunden werden. Entscheidend für die Wirksamkeit der Berechnung ist somit ihre Integration in den Entwicklungsprozess. Dies setzt bei anspruchsvollen Aufgaben problemorientierte Software, leistungsfähige Hardware und anwenderfreundliche Benutzeroberflächen voraus. Der eindeutige Vorteil der Berechnung (hier gleichzusetzen mit der Simulation) ist der, dass bereits lange vor der Verfügbarkeit von Prototypen eine Voroptimierung durchgeführt werden kann, wodurch sich die Anzahl der zu untersuchenden Versuchsvarianten auf ein Minimum reduziert. Somit ist ein erheblicher Einsparungs- und Beschleunigungseffekt zu verzeichnen. Insbesondere was die Parametervariation anbetrifft, kennt die Berechnung im Gegensatz zum Versuch keinerlei Einschränkungen, wenngleich auch bei der Erstellung von aufwändigen Rechenmodellen, wie schon erwähnt, die Wirtschaftlichkeit zu beachten ist. Die Berechnung leistet damit einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Senkung der Entwicklungskosten. Berechnung und Versuch ergänzen sich auch dort, wo einspuriges Vorgehen in den Möglichkeiten begrenzt und damit nicht zielführend ist (z. B. unverhältnismäßig hoher Messaufwand). Die Berechnung hilft darüber hinaus bei der Interpretation von Messergebnissen. Die jeweiligen Schwächen von Berechnung und Versuch sind in [A1] gegenübergestellt.

Die Nutzung des Potenzials technischer Berechnungen erfolgt heute unter dem Überbegriff CAE (Computer Aided Engineering). Dahinter verbergen sich Produkt- und Verfahrensentwicklung unterstützende Programmpakete mit Zugang zu Datenbanken, die mit Hilfe einer selbsterklärenden und übersichtlichen Benutzeroberfläche möglichst mit Plausibilitätsprüfung der Daten genutzt werden können. Der Anwender muss nicht mehr notwendigerweise ein Berechnungsexperte sein. Die einzelnen Bausteine eines CAE-Systems werden auch als „CAE-Tools“, also als Werkzeuge, bezeichnet. Je nach Ausbaustufe, gespeichertem Erfahrungsumfang und dessen logischer Verknüpfung ist auch der Begriff „Expertensystem“ eingeführt. Ziel des CAE ist es, dem Entwicklungsingenieur möglichst effiziente Mittel unter Nutzung eines produktspezifischen Erfahrungsschatzes an die Hand zu geben. CAE geht damit weit über die rechnergestützte technische Berechnung hinaus.

CAE ist ein wichtiges Bindeglied im CAD/CAM-Verbund mit dem Fernziel CIM (Computer Integrated Manufacturing). Mittels CAD werden z. B. Geometriedaten erzeugt. Diese werden über genormte Schnittstellen an ein CAE-System übergeben, das die Pro-