

Eduard Köhler | Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

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

Fahrwerkhandbuch

herausgegeben von B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies

Grundlagen Verbrennungsmotoren

herausgegeben von G. P. Merker, Chr. Schwarz und R. Teichmann

Lenkungshandbuch

herausgegeben von P. Pfeffer und M. Harrer

Bosch Autoelektrik und Autoelektronik

herausgegeben von K. Reif

Motorradtechnik

von J. Stoffregen

Rennwagentechnik

von M. Trzesniowski

Handbuch Kraftfahrzeugelektronik

herausgegeben von H. Wallentowitz und K. Reif

Elektrifizierung des Antriebsstrangs

von H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven

Handbuch Fahrerassistenzsysteme

herausgegeben von H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf

Handbuch Fahrzeugakustik

herausgegeben von P. Zeller

Eduard Köhler | Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Motormechanik, Berechnung
und Auslegung des Hubkolbenmotors

6., erweiterte Auflage

Mit 330 Abbildungen und 23 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 2001
- 3., verbesserte Auflage 2002
- 4., aktualisierte und erweiterte Auflage 2006
- 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2009
- 6., erweiterte Auflage 2011

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011

Lektorat: Ewald Schmitt | Elisabeth Lange

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Technische Redaktion: Gabriele McLemore, Wiesbaden

Satz: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: AZ Druck und Datentechnik, Berlin

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1486-9

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
Heilbronn, im Juli 2008

Rudolf Flierl
Eduard Köhler

Vorwort zur 6. Auflage

Mit der breiten Einführung der Turboaufladung bei Otto- und Dieselmotoren hat sich der technische Stand der Verbrennungsmotoren nochmals deutlich verändert. Die Bedeutung der Turboaufladung nimmt durch die Downsizing-Konzepte zur Reduzierung der CO₂-Emissionen einen neuen Stellenwert in den Fahrzeugantrieben ein und wird die Motorenkonzepte der Zukunft wesentlich beeinflussen. Um das Buch auf dem aktuellen Stand der Technik zu halten, wurde eine neue Auflage notwendig. Die Autoren danken dem Verlag Vieweg+Teubner für die vertrauensvolle und gute Zusammenarbeit bei der Vorbereitung dieser Auflage.

Der Autor Rudolf Flierl widmet diese 6. Auflage seinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Klaus Federn, der im Dezember 2010 seinen 100. Geburtstag feiern konnte. Seine Begeisterung für die Technik und sein analytisches Vorgehen haben mich wesentlich geprägt. Dafür möchte ich mich bei ihm auf diesem Wege bedanken und ihm und seiner Familie alles Gute wünschen.

Kaiserslautern, im Juli 2011

Heilbronn, im Juli 2011

Rudolf Flierl

Eduard Köhler

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Formelzeichen	XVII
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, Austauschen 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	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 Pleuelkopf- verschraubung	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_{Ri}	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. zusammengedossene 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 Ventiltriebsgeräusch und zur Dynamik des Gesamtsystems	376
5.1.7.2	Berechnung der Ventiltriebsdynamik mit Mehrkörpersimulation	378

5.1.8	Der Ladungswechsel von Turbomotoren	378
5.1.8.1	Der Ladungswechsel von Turbomotoren mit starrem Ventiltrieb	379
5.1.8.2	Der Ladungswechsel von Otto-Turbomotoren mit variabler Einlassspreizung	382
5.1.8.3	Der Ladungswechsel von Turbomotoren mit vollvariablem Einlassventiltrieb und variabler Auslassspreizung	384
5.1.8.4	Der Ladungswechsel mit vollvariablem Ventiltrieb auf Ein- und Auslassseite	389
5.2	Der Kurbeltrieb	392
5.2.1	Massenausgleich des Hubkolbenmotors	392
5.2.1.1	Massenausgleich des Einzylindertriebwerks	393
5.2.1.1.1	Massenkräfte 1. Ordnung	393
5.2.1.1.2	Ausgleichsmöglichkeiten durch Gegengewichte beim Einzylindertriebwerk	396
5.2.1.2	Massenausgleich des Mehrzylindertriebwerks mit Hilfe von Gegengewichten	405
5.2.1.2.1	Ausgleich der freien Massenkräfte beim Reihenmotor	405
5.2.1.2.2	Ausgleich der freien Massenkräfte beim V2-Triebwerk	406
5.2.1.2.3	Ausgleich der freien Massenmomente	413
5.2.1.2.4	Massenumlaufmoment	447
5.2.1.3	Massenausgleich mit Hilfe von Ausgleichswellen	449
5.2.1.3.1	Ausgleich von Massenkräften durch Ausgleichs- wellen; Möglichkeiten und Anwendungen	452
5.2.1.3.2	Rollmoment	456
5.2.1.3.3	Ausgleich von Massenmomenten durch Ausgleichswellen; Anwendungsbeispiele	460
5.2.2	Anmerkungen zu Triebwerksschwingungen	463
6	Motorgeräusch	465
6.1	Motorgeräusch und Fahrgeräusch – gesetzliche Vorschriften	465
6.2	Motorgeräusch – Teilschallquellen und Geräuschursachen	468
6.3	Indirekt erzeugtes Motorgeräusch – Entstehung, Übertragung und Abstrahlung	471
6.4	Zylinderdruckverlauf und resultierendes Zylinderdruckspektrum	478
6.5	Vorausberechnung des akustischen Verhaltens der Motorstruktur	480
6.5.1	Schwingungsverhalten der Motorstruktur	480
6.5.2	Geräuschreduzierende Strukturveränderungen am Zylinderkurbel- gehäuse (Motorblock) und deren physikalischer Hintergrund	482
6.5.3	Akustische Betrachtungen zur Kurbelwelle, deren Lagerung und das Verhalten des Schmierfilms im Zusammenhang mit dem „inneren“ Körperschallleitweg	488

6.5.4 Berechnung der Luftschallabstrahlung von der schwingenden Motorstruktur	493
6.5.4.1 Anmerkungen zum Berechnungsablauf	493
6.5.4.2 Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung	494
6.6 Bemerkung zu weiteren Geräuschquellen am Motor	497
7 Zusammenfassung und Ausblick	499
Anhang	503
I Anmerkungen zu den Grundlagen der Finite-Element-Methode (FEM)	503
II Zur Matrizen-Theorie der Statik – Verschiebungsmethode	506
III Lösung von Differenzialgleichungen mit Hilfe der FEM	512
IV Anmerkungen zur Finite-Differenzen-Methode (FDM)	517
V Anmerkungen zur Boundary-Element-Methode (BEM)	518
VI Anmerkungen zum „modalen Modell“ (Modal-Analyse)	519
Literaturverzeichnis	523
Sachwortverzeichnis	541

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 kritischen Bedingungen			Kurbelwangenbreite
a_{Gg}, a_{Ggi}	mm	Gegengewichtsabstände	b_{Pl}	mm	Pleuelbreite
a_{No}	mm	Abstand Einstichpunkte	b_{Ri}	mm	radiale Kolbenring-abmessung
		Grundkreis-/Nockenspitzenradius	Δb_{Ri}	mm, μm	Kolbenringlaufflächenverschleiß
a_{Pl}	m/s^2	Pleuelquerbeschleunigung	b_{Sa}	mm	halbe Breite Kolbenschaftausparung
a_Z	mm	Zylinderabstand	b_Z	mm	Bankversatz beim V-Motor
Δa_Z	mm	Stegbreite zwischen den Zylindern	b_{ZKD}	mm	radiale Abmessung der Brennraumeinfassung der Zylinderkopfdichtung
$\Delta a'_Z$	mm	Zylinderbankversatz	B	kg/h	Kraftstoffverbrauch
A	mm^2, m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnitt, Strömungsquerschnitt	B'	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$	Biegesteifigkeit pro Querschnittsbreite
A_0	mm^2, m^2	Bezugsfläche	B_i	*	Fourier-Koeffizienten
A_1	mm^2	Querschnitt vor Drosselstelle	B_{100km}	l/100 km	Kraftstoffstreckenverbrauch
A_2	mm^2	Querschnitt nach Drosselstelle	c, C		
A_5	%	Bruchdehnung	c	N/mm	Steifigkeit, Federsteifigkeit
A_A	mm^2	Auslassquerschnitt	c_1, c_2	Nnn/mm	Drehsteifigkeiten bzw. Axialsteifigkeiten
A_{eq}	mm^2, m^2	Ersatzquerschnitt	c_{Ers}	N/mm	Ersatzsteifigkeit (des Ventiltriebs)
A_E	mm^2	Einlassquerschnitt	c_F	N/mm	Federkonstante, Federsteifigkeit
A_i	mm^2, m^2	i -te Teiloberfläche	c_{ij}	*	verschiedene Konstanten
	*	auch allg. für Fourier-Koeffizienten verwendet	c_L	m/s	Schallgeschwindigkeit in Luft (in der Akustik wird meist c statt a verwendet)
A_{ij}	mm^2, m^2	Durchflussquerschnitt zwischen Volumen i und j	c_N	mm	Anlenkhebellänge des Nebenpleuels
A_K	cm^2, mm^2	Kolbenfläche	$c_{\text{ÖF}}$	N/mm	Ölfilmsteifigkeit
A_{Pl}	mm^2	(mittlerer) Pleuelstangenquerschnitt	c_p	kJ/kgK	spezifische Wärme bei konstantem Druck
A_S	mm^2	Schraubenschaftquerschnitt (Spannungsquerschnitt)	C	*	Konstante, mathematischer Term
A_{Tjf}	mm^2	Trennfugenquerschnitt	C_1, C_2	*	Konstanten, Integrationskonstanten
A_{Ve}	mm^2	Ventilquerschnittsfläche, Ventilöffnungsfläche	d, D		
b, B			d	mm, m	Durchmesser
b	mm, m	Breite, kleine Ellipsen-Hauptachse auch: Abstand	Δd	mm	Durchmesserüberdeckung, Durchmesservergrößerung infolge Wärmeausdehnung
b_B	mm	radialer Abstand Angriffspunkt Abstützkraft/Innenrand der Zylinderbohrung			
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		
d_i	mm	Innendurchmesser, Innendurchmesser des Ein- bzw. Auslasskanals	e	–	auf Pleuellänge bezogene Kurbeltriebsdesachsigung und/oder -schrägung
d_{KWG}	mm	Durchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_F	mm	Hebelarm der exzentrisch eingeleiteten Schraubentriebskraft
d_{KWG_i}	mm	Innendurchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_{F1}, e_{F2}	mm	Hebelarme der exzentrisch eingeleiteten Schraubentriebskraft 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_{KWH_i}	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	Abtastfrequenz
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 (= Kolbenseitenkraft)
$F_I^{(1)}, F_{II}$	N	Massenkräfte (abgekürzte Schreibweise)	F_{KN-GDS}	N	gedrucktseitige Kolbennormalkraft (= Kolbenseitenkraft)
$F_I^{(2)}$	N		F_{KWHL}	N	Hauptlagerkraft der Kurbelwelle
ΔF	N	Kraftänderung	F_l	N	Längskraft
F_{ax}	N	Axialkraft	F_{li}	N	Längskraft bezogen auf verschiedene Stellen i
F_B	N	Betriebskraft	F_m	N	Massenkraft
F_{Bi}	N	Betriebskraft bezogen auf verschiedene Stellen i	F_{mK}	N	Massenkraft des Komplettkolbens (mit Bolzen, Bolzensicherung und Kolbenringen)
F_E	N	Erregerkraft	F_{mK}^*	N	Massenkraft des Kolbens ohne Kolbenbolzen
F_{E0}	N	Erregerkraft-Amplitude	F_{mKWrot}	N	Massenkraft der rotierenden Kurbelwellenmasse
F_F	N	Federkraft	F_{mosz}	N	oszillierende Massenkraft
F_{Fred}	N	reduzierte Federkraft	$F_{mosz}^{(1)}$	N	oszillierende Massenkraft 1. Ordnung
F_{FV}	N	Federvorspannkraft	$F_{mosz}^{(2)}$	N	oszillierende Massenkraft 2. Ordnung
F_G	N	Gewichtskraft, Schwerkraft	F_{moszN}	N	oszillierende Massenkraft des Nebenpleuels
F_{Gas}	N	Gaskraft	$F_{mosz-OT}$	N	oszillierende Massenkraft in OT-Stellung
$F_{Gas1,2}$	N	oberhalb und unterhalb des Kolbenrings wirkende Gaskraft	$F_{mosz-Ref}$	N	oszillierende Massenkraft (Bezugswert)
ΔF_{Gas}	N	Gaskraftdifferenz oberhalb und unterhalb des Kolbenrings	F_{mPlk}	N	Massenkraftbelastung des Pleuelkopfes
F_{Gasrad}	N	im Kolbenringrücken radial wirkende Gaskraft	F_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuelmassenteils
F_{Gg}, F_{Ggi}	N	Gegengewichtskraft	F'_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuelmassenteils ohne Pleuellagerdeckel
F_{Ggt}, F_{Ggl}	N	bestimmte Gegengewichtskräfte	$F_{mPlrotN}$	N	rotierender Anteil der Massenkraft des Nebenpleuels
F_{Ggx}	N	x-Komponente der Gegengewichtskraft	F_{mRest}	N	nicht ausgeglichene Massenkraft
F_{Ggy}	N	y-Komponente der Gegengewichtskraft	F_{mrot}	N	rotierende Massenkraft
F_{hydx}	N	axiale Auftriebskraft im Schmierfilm zwischen Ringnut und Kolbenringflanke	$F_{mrotges}$	N	gesamte rotierende Massenkraft
F_{hydrad}	N	radiale Auftriebskraft im Schmierfilm der Kolbenringlauffläche	F_N	N	Normalkraft
F_i	N	verschiedene durch Index i unterschiedene Kräfte, Schnittkräfte	F_{No}	N	auf Nocken wirkende Kraft
F_K	N	Kolbenkraft	F_{Nx}, F_{Ny}	N	x- und y-Komponente der Normalkraft
F_K^*	N	Kolbenkraft ohne Berücksichtigung der Kolbenbolzenmasse	F_{Pl}	N	Pleuelstangenkraft
F_{Kl}	N	Klemmkraft	F_{PlKZ}	N	Pleuelkopfentlastung im Klemmlängenbereich
F_{Klmin}	N	Mindestklemmkraft	F_{PIL}	N	Pleuellager- bzw. Hubzapfenkraft
F_{Klmin1}	N	Mindestklemmkraft gegen Querverschiebung	F_q	N	Querkraft
F_{Klmin2}	N	Mindestklemmkraft bei Betriebskraft	F_{qi}	N	Querkraft bezogen auf verschiedene Stellen i
F_{Klmin3}	N	Mindestklemmkraft zur Kompensation der Lagerüberdeckung			
F_{KN}	N	Kolbenseitenkraft			
F_{KN-DS}	N	druckseitige Kolbennormalkraft (am Zylinderende) mit ausgetauchtem Schaftende			
F_{KNx-DS}	N	Längskomponente der druckseitigen Normalkraft			

F_{rad}	N	Radialkraft (in verschiedenem Zusammenhang gebraucht)	g, G		
F_{radx}, F_{rady}	N	x- und y-Komponente der Radialkraft	g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)
F_{Rax}	N	axiale Reibkraft an der Kolbenringlauffläche	G	N/mm ²	Schubmodul
F_{R-DS}	N	druckseitige Reibkraft am Kolbenschaft	h, H		
F_{res}	N	resultierende Kraft	h	mm, m	Höhe, Querschnittshöhe, Abstand, Schmierpalthe, Gewindesteigung
F_{Rrad}	N	radiale Reibkraft zwischen Ringnut- und Kolbenringflanke			spezifische Enthalpie
F_{Rx-GDS}	N	x-Komponente der gegen-druckseitigen Reibkraft am Kolbenschaft	h_0	mm	Vornockenhöhe (Ventilspiel)
F_{Ry-GDS}	N	y-Komponente der gegen-druckseitigen Reibkraft am Kolbenschaft	h_{Al}	mm	auf Aluminium angepasste Querschnittshöhe
F_S	N	Schraubenkraft	h_B	mm	Bundhöhe
F_{So}	N	Reaktionskraft im oberen Schaftbereich	h_{GG}	mm	auf Grauguss angepasste Querschnittshöhe
F_{Su}	N	Reaktionskraft im unteren Schaftbereich	h_i	mm	verschiedene Querschnittshöhen
F_{SZ}	N	Schraubenzusatzkraft			verschiedene Höhenmaße im Bereich der Kolbenkompressionshöhe
F_t	N	Tangentiale Kraft	h_{Kb}	mm	Kolbenbodendicke
F_{tGas}	N	gaskraftbedingte Tangentiale Kraft	h_{KWW}	mm	Kurbelwangendicke
F_{ti}	N	Tangentiale Kraft an der Kröpfung i	h_{KWW}	–	auf den Außendurchmesser des Hubzapfens bezogene Kurbelwangendicke
F_{imosz}	N	Tangentiale Kraft der oszillierenden Massenkraft	h_{KZW}	mm	Dicke der Kurbelwellen-zwischenwange
F_V	N	Vorspannkraft (in verschiedenem Zusammenhang gebraucht)	h_{No}	mm	Nockenhub
$F_{V1,2}$	N	Vorspannkraften bezogen auf unterschiedliche Verhältnisse	h_{Ri}	mm	axiale Kolbenringhöhe bzw. -laufflächenhöhe
ΔF_V	N	Vorspannkraftverlust, Erhöhung der Vorspannkraft	h_{Sa}	mm	Schaftausparungshöhe des Kolbens
F_{Vmax}	N	maximale Vorspannkraft	h_{ZKD}	mm	Dicke der Zylinderkopfdichtung
F_{Vmin}	N	minimale Vorspannkraft	H	m/N	Übertragungsfunktion
F_x	N	x-Komponente der Kraft F	ΔH	m/N	Veränderung der Übertragungsfunktion
$F_x^{(1)}$	N	Längskraft 1. Ordnung	H_0	m/N	Anfangswert der Übertragungsfunktion
$F_x^{(2)}$	N	Längskraft 2. Ordnung	H_{ges}	m ⁻²	Übertragungsfunktion der Motorstruktur
F_{xi}	N	Längskräfte	H_K	mm	Kompressionshöhe des Kolbens
F_{xres}	N	x-Komponente der resultierenden Kraft	ΔH_K	mm	Änderung der Kompressionshöhe des Kolbens
$F_{xRest}^{(1)}$	N	Restlängskraft 1. Ordnung	H_u	kJ/kg	unterer Heizwert
F_y	N	y-Komponente der Kraft F	H_{uGem}	kJ/m ³	unterer Gemischheizwert
F_{yi}	N	Querkräfte	i, I		
F_{yres}	N	y-Komponente der resultierenden Kraft	i	–	ganze Zahl, Zähler, Faktor, Windungszahl, Übersetzungsverhältnis, Ordnungszahl
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_{Aufl}	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_{Trf}	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment bezogen auf den Trennfugenquerschnitt des Pleuelkopfes	l_{Fase}	mm	Länge der Fase am Kolbenbolzenauge innen
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_{KI}	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_{P11}	mm	Abstand Pleuelschwerpunkt/großes Pleuelauge
	g/cm ³	„ k -Faktor“ (Pseudo-Dichte) des Kolbens	l_{P12}	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	Austauchmaß des Kolbenschafts
k_{KW}	mm ²	Trägheitsradius der Kurbelwelle	l_{So}	mm	obere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmitte aufwärts)
k_{PI}	mm ²	Trägheitsradius des Pleuels	l_{Su}	mm	untere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmitte abwärts)
k_{Plosz}	mm ²	Trägheitsradius des oszillierenden Pleuelmassenanteils	Δl_V	mm	Setzbetrag der Schraubenverbindung
k_{Pivot}	mm ²	Trägheitsradius des rotierenden Pleuelmassenanteils	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_{PI}) 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 Schalldruckpegel des Reifenabrollgeräusches	m_{oszN}	kg	oszillierende Masse des Nebenpleuels
$L_{A\Sigma}$	dB(A)	A-bewerteter Summenschalldruckpegel	m_{PI}	g, kg	Pleuelmasse
L_{Bl}	mm	Höhe des Zylinderkurbelgehäuses („Blockhöhe“)	m_{PIld}	g, kg	Masse des Pleuellagerdeckels
ΔL_K	dB	Pegeldifferenz der Körperschallschnelle	m_{PIN}	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 auf das Ventil reduzierte
m_2	g, kg	Stoßstangenmasse	m_{Vered}	g, kg	Masse der Ventilbetätigungsorgane
m_3	g, kg	Ventilmasse mit Feder und Teller			
m_A	g, kg	ausströmende Masse	m_Z	g, kg	nach Ladungswechsel im Zylinder vorhandene, momentan im Zylinder befindliche Gasmasse
m_B	g, kg	Kolbenbolzenmasse	M	Nm	Drehmoment
m_E	g, kg	einströmende Masse	Ma	–	Mach-Zahl
m_{Ers}	g, kg	schwingende Ersatzmasse (des Ventiltriebs)	M_i	Nm	Biegemoment bezogen auf die Stelle i
m_F	g, kg	Federmasse	M_b	Nm	Biegemoment
m_{Gem}	g, kg	Gemischmasse	$M_{bl...VI}$	Nm	Biegemoment in verschiedenen Kurbelkröpfungsabschnitten
m_{Gg}	kg	Gegengewichtsmasse	M_{bPI}	Nm	Biegemoment im Pleuelschaft
Δm_{Gg}	kg	Gegengewichtsmassendifferenz	M_{bPIKZ}	Nm	zusätzlicher Biegemomentanteil im Klemmlängenbereich des Pleuelkopfes
m_i	g, kg	verschiedene Massen vom Volumen i zum Volumen j strömende Menge (Masse)	M_{bSZ}	Nm	zusätzlicher Biegemomentanteil im Schraubenschaft
m_{0i}	g, kg	Ausgangsmasse im Volumen i	M_{bZ}	Nm	zusätzliches Biegemoment
m_K	g, kg	Kolbenmasse ohne Kolbenzubehör („nackt“)	M_D	Nm	hydrodynamisches Dämpfungsmoment des Kolbenschafts
m_K^*	g, kg	Kolbengesamtmasse ohne Kolbenbolzen	M_{max}	Nm	maximales Moment
m_{Kges}	g, kg	Kolbengesamtmasse	M_{mrot}	kgm	rotierendes „Massenmoment“
m_{Kr}	g, kg	Kraftstoffmenge	M'_{rad}	N	auf den Umfang bezogenes radiales Moment
m_{KW0}	kg	Kurbelwellenmasse ohne Gegengewichte	M_{RB}	Nm	Bolzenreibungsmoment
m_{KWrot}	g, kg	rotierende Kurbelwellenmasse	M_{Rest}	Nm	Restmoment
m_{KWroti}	g, kg	Anteile i der rotierenden Kurbelwellenmasse	M'_t	N	auf den Umfang bezogenes tangentiales Moment
m_L	g, kg	Luftmenge(-masse)	M_T	Nm	Torsionsmoment
m_{Mot}	kg	Motormasse	M_{Ti}	Nm	Torsionsmoment der Kröpfung i
m'_{Lmin}	kg/kg	stöchiometrische kraftstoffmengenbezogene Luftmenge	$M_{T1...III}$	Nm	Torsionsmoment in verschiedenen Kurbelkröpfungsabschnitten
m_{Nored}	g, kg	auf den Nocken reduzierte Masse der Ventilbetätigungsorgane	M_{TS}	Nm	Schraubenanzugsdrehmoment
m_{osz}	g, kg	oszillierende Triebwerksmasse	M_{TS1}	Nm	Gewindereibungsmoment

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 1. Ordnung	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_{rad}	bar, Pa	radiale Pressungsverteilung (auch in N/mm ²)
n	–	ganze Zahl, Zähler	p_{tGas}	bar, Pa	Tangentialdruck der Gaskraft
n	min ⁻¹	Drehzahl	p_{tmosz}	bar, Pa	Tangentialdruck der oszillierenden Massenkraft
n_e	min ⁻¹	Drehzahl entsprechend der Eigenfrequenz	p_U	bar, Pa	Umgebungsdruck (an anderer Stelle auch p_0)
n_i	–	Lastwechsel einer Stufe des Belastungskollektivs	$p_{\hat{U}}$	%	Überlebenswahr- scheinlichkeit
n_g	min ⁻¹	Grenzdrehzahl	p_Z, p_{Zmax}	bar, Pa	Zylinderdruck, Zünddruck
\hat{N}	–	Lastwechsel, Lebensdauer	p_{Z0}	bar, Pa	Druck im Zylinder (Gesamtzustandswert)
N_i	–	Bruchlastspielzahl auf Laststufenniveau	p_{Z1}	bar, Pa	Gesamtdruck im Zylinder bei Einlassschluss
Nu	–	Nußelt-Zahl	p_{ZFA}	bar, Pa	Zylinderdruck bei fremd- angetriebenem Motor
o, O			p_{zul}	bar, Pa	zulässige Flächenpressung (auch in N/mm ²)
o_k	–	Oberflächenfaktor	P	pW	Schalleistung
p, P			P_0	pW	Bezugsschalleistung
p	bar, Pa	Druck, Flächenpressung (auch in N/mm ²)	P_e	kW	effektive Leistung
	µbar, Pa	Schalldruck	Pr	–	Prandtl-Zahl
Δp	bar, Pa	Änderung der Flächen- pressung (auch in N/mm ²)	q, Q		
p^*	bar, Pa	kritischer Druck	q	kJ/kg	spezifische Wärmemenge
\bar{p}	bar, Pa	mittlere Flächenpressung (auch in N/mm ²)	Q	kJ	Wärmemenge
p_0	bar, Pa	Bezugsdruck, Druck bei Umgebungsbedingungen, Ausgangswert (Gesamt- zustandswert), Druck bezogen auf ungestörtes Medium	Q_{ab}	kJ	abgeführte Wärmemenge, Energie
p_{01}	bar, Pa	Gesamtdruck vor der Drosselstelle (Gesamt- zustandswert)	Q_{Kr}	kJ	Kraftstoffenergieinhalt
p_{0i}	bar, Pa	Ausgangsdruck im Volumen i	Q_W	kJ	Wandwärmeverluste
p_1	bar, Pa	statischer Druck vor der Drosselstelle	Q_{zu}	kJ	zugeführte Wärmemenge, Energie
p_2	bar, Pa	statischer Druck hinter der Drosselstelle	r, R		
p_A	bar, Pa	Druck im gedachten „Auslassbehälter“	r	mm	Radius, Kurbelradius
			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 desachsierten 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	Ventillhub
			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)
	kJ/kgK	spezifische Gaskonstante	t_{Kr}	s, h	Kraftstoffdurchflusszeit
ΔR	mm	radiale Abweichung	T	K	Temperatur
R_0	mm	Nockenkrümmungsradius im Vornockenbereich	ΔT	K	Temperaturdifferenz
Re	–	Reynolds-Zahl		s	Schwingungsperiode, Periodendauer
R_E	kJ/kgK	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“	T^*	K	kritische Temperatur
			T_0	K	Bezugstemperatur, Temperatur bei Umgebungsbedingungen, Ausgangstemperatur (Gesamtzustandswert)
R_{Fl}	mm	Krümmungsradius der Nockenflanke			Temperatur (Gesamtzustandswert)
R_G	mm	Nockengrundkreisradius	T_{01}	K	Temperatur (Gesamtzustandswert)
ΔR_i	mm	bestimmte radiale Abweichungen	T_E	K	Temperatur im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“
R_K	mm	Krümmungsradius, Kolben-Ersatzkrümmungsradius	T_{E0}	K	Temperatur im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit	T_{ges}	kgm ² s ⁻¹	Gesamtdrehimpuls
R_r	µm	Rautiefe	T_i	K	verschiedene durch Index i unterschiedene Temperaturen
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze			Drehimpuls des Kolbens
R_{Sp}	mm	Nockenspitzenradius	T_{KW}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls der Kurbelwelle
R_{St}	mm	Stößelradius			Temperatur des Kühlmittels
R_Z	kJ/kgK	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Zylinder	ΔT_{Km}	K	Temperaturerhöhung des Kühlmittels
	mm	Zylinderradius			
s, S					
s	mm	Hub; Index „alt“ = vor, „neu“ = nach Änderung			
	mm	Wanddicke			

T_{KmA}	K	Kühlmittel-Austritts-temperatur	v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Dralls
T_{KmE}	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_{Pilot}	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	V_H	l, cm ³	Motorhubvolumen, Hubraum
T_{Wa}	K	kühlmittelseitige 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 gegen Biegung
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			$W_{ü}$	J, kJ	überschüssige Energie
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit, Schallschnelle	x, X		
	m ³ /kg	spezifisches Volumen	x	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
\bar{v}	m/s	Durchschnittsgeschwindigkeit, über schallabstrahlende Oberfläche gemittelte Schallschnelle		mm	Maulweite des Sprengrings
v_0	m/s	Bezugsschallschnelle	Δx	mm, m	Verschiebung, Längenänderung, Maulweitenänderung von Kolbenring und Kolbenbolzensicherung (Sprengring), Dickenänderung
$v_{1, 2}$	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
$x_{Ri\alpha x}$	mm	axiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung	y_1, y_2	mm, m	Abstände
$x_{Ri\alpha r}$	mm	radiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung	y_K	μm , mm	Kolbenquerbewegung
x_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate	y_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate
x_{S1}	mm	Kolbenringstoßspiel im Neuzustand	z, Z		
x_{S2}	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
			$Z_{\hat{U}}$	–	Übertragungsfaktor

y, Y**Griechische Formelzeichen** **α**

α	$^\circ$, rad K ⁻¹	Winkel, Formzahl Wärmeausdehnungs- koeffizient	α_q	–	Formzahl bezüglich Querkraft
α_1, α_2	K ⁻¹	bestimmte Wärme- ausdehnungskoeffizienten	α_S	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Schraubenwerkstoffs
α_{AlSi12}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient der eutektischen Kolbenlegierung AlSi12CuMgNi	α_{Su}	$^\circ$	Umfangswinkel des „geraden“ Schaftendes
α_{AlSi18}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient der übereutektischen Kolbenlegierung AlSi18CuMgNi	α_T	–	Formzahl bezüglich Torsion
α_b	–	Formzahl bezüglich Biegung	α_V	$^\circ$, rad	V-Winkel
α_D	–	Durchflussziffer, Durchflusszahl	α_{Ve}	$^\circ$	Ventilsitzwinkel
α_{DA}	–	Durchflusszahl der Auslassventilöffnung(en)	$\alpha_W (\alpha_{Wi})$	kJ/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient der Brennraumwände
α_{DE}	–	Durchflusszahl der Einlassventilöffnung(en)	α_{Wa}	kJ/m ² K	kühlmittelseitiger Wärmeübergangskoeffizient
α_{Di}	–	verschiedene durch Index i unterschiedene Durchflusszahlen	α_{Wm}	kJ/m ² K	zeitlich gemittelter Wärme- übergangskoeffizient der Brennraumwände
$\alpha_{Di,j}$	–	Durchflussziffer für den Strömungsquerschnitt zwi- schen den Volumina i und j	α_{ZK}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Zylinderkopferwerkstoffs
α_{GJL}	K ⁻¹	Wärmeausdehnungs- koeffizient von Grauguss	β		
			β	$^\circ$, rad	Winkel, Kolbenkippwinkel
				–	Kerbwirkungszahl
			β, β_i	$^\circ$, rad	auch: Phasenwinkel
			β_{Plk}	N ⁻¹ m ⁻¹	Biegenachgiebigkeit des Pleuelkopfes im Klemmlängenbereich
			β_S	N ⁻¹ m ⁻¹	Biegenachgiebigkeit des Schraubenschafte

γ			ζ		
γ	°, rad –	Winkel, Neigungswinkel Faktor (z. B. bei Kolbenbolzendurchbiegung)	ζ	–	Faktor (Reduzierung der Klemmlänge einer Schraubenverbindung bei Betriebskrafteinleitung innerhalb der verspannten Teile)
γ_N	°, rad	Anlenkwinkel des Nebenpleuels			
δ			η		
δ	mm/N °, rad	Nachgiebigkeit, Kehrwert der Steifigkeit	η	Ns/m ²	dynamische Viskosität
δ_{Ers}	mm/N	auch: Pleuelversatzwinkel Ersatznachgiebigkeit	η_a	–	Durchmesserverhältnis
δ_i	mm/N	Nachgiebigkeit verschiedener durch Index <i>i</i> gekennzeichnete Querschnitte	η_e	–	effektiver oder Gesamtwirkungsgrad
δ_{Plk}	mm/N	Pleuelkopfnachgiebigkeit im Bereich der Verschraubung	η_i	–	innerer oder indizierter Wirkungsgrad, Durchmesserverhältnis
δ_{Plk}^*	mm/N	bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	η_{Kerb}	–	Kerbempfindlichkeitsziffer
δ_{Plk}^{**}	mm/N	auf Betriebskraft bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	η_{Kr-zu}	–	Wirkungsgrad der Kraftstoffzufuhr
δ_S	mm/N	Schraubennachgiebigkeit	η_{mec}	–	mechanischer Wirkungsgrad
δ_U	–	Ungleichförmigkeitsgrad	η_v	–	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors
δ_{ZK}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkopfes	θ, Θ		
δ_{ZKD}	mm/N	Nachgiebigkeit der Zylinderkopfdichtung	θ	°	Nockenwinkel im Flanken- und Spitzenbereich
δ_{ZKG}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkurbelgehäuses	θ_0	°	Vornockenwinkelbereich
			θ_{Fl}	°	Nockenflankenwinkel
			θ_{Flmax}	°	gesamter Nockenflankenwinkelbereich
			θ_i	°	einzelne Nockenwinkelabschnitte
ε			$\theta_{NW}, \theta_{NWi}$	°	Nockenwinkel, Nockenwellendrehwinkel
ε	–	Dehnung	θ_{Sp}	°	Nockenspitzenwinkel
	–	Verdichtungsverhältnis	θ_{Spmax}	°	gesamter Nockenspitzenwinkelbereich
	m ² /s ³	Dissipationsrate der turbulenten spezifischen kinetischen Energie	Θ	°	Abstrahlwinkel
$\Delta\varepsilon$	–	Änderung des Verdichtungsverhältnisses, Verdichtungsverhältnistoleranz	Θ_{ges}	kgm ²	gesamtes Massenträgheitsmoment
ε_1	–	Dehnung in Hauptspannungsrichtung σ_1	Θ_{KW}	kgm ²	Massenträgheitsmoment der Kurbelwelle
ε_{el}	–	elastische Dehnung	Θ_{Kwges}	kgm ²	Gesamtmassenträgheitsmoment der Kurbelwelle
ε_{ges}	–	Gesamtdehnung	Θ_{Plosz}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des oszillierenden Pleuelmassenanteils
ε_{pl}	–	plastische Dehnung	Θ_{Plrot}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des rotierenden Pleuelmassenanteils
ε_i	–	tangentiale Dehnung	Θ_{redi}	kgm ²	reduzierte Massenträgheitsmomente
$\varepsilon_{i,1,2}$	–	verschiedene durch Index gekennzeichnete tangentielle Dehnungswerte	Θ_{Schw}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Schwungrads
ε_{iB}	–	tangentiale Dehnung der Zylinderlaufbüchse			
ε_{iU}	–	tangentiale Dehnung der Futterbohrung des Zylinderkurbelgehäuses	κ		
			κ	–	Isentropenexponent
				–	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			ρ_{E0}	g/m ³	Gasdichte bei Bedingungen im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
λ	–	Luftverhältnis	ρ_{Gem}	g/m ³	Gemischdichte
	W/mK	Wärmeleitzahl	ρ_{GJL}	g/cm ³	Dichte von Grauguss
	m	Wellenlänge	ρ_{Kr}	g/cm ³	Kraftstoffdichte
λ_A	–	Frischgas- bzw. Luftaufwand	ρ_{Kr0}	g/cm ³	Kraftstoffdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugswert für Kraftstoffdichte
λ_B	m	Biegewellenlänge	ρ_L	g/m ³	Luftdichte
λ_L	–	Liefergrad	ρ_{L0}	g/m ³	Luftdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugswert für Luftdichte
λ_{Pl}	–	Pleuelstangenverhältnis	ρ_N	–	Anlenkungsverhältnis
λ_{PlN}	–	Pleuelstangenverhältnis des Nebenpleuels	ρ_{Pl}	g/cm ³	Pleuelwerkstoffdichte
			ρ_Z	g/m ³	Gasdichte im Zylinder
			ρ_{Z0}	g/m ³	Gasdichte im Zylinder (Gesamtzustandswert)
μ			σ, Σ		
μ	–	Reibungskoeffizient, Massenfaktor in Verbindung mit reduzierter Ventildedermasse, Querkontraktionszahl auch: Faktor (Größenverhältnis)	σ	N/mm ²	Spannung
	–	verschiedene durch Index gekennzeichnete Querkontraktionszahlen	–	–	Abstrahlgrad
$\mu_{1,2}$	–	axialer Reibungskoeffizient	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	N/mm ²	Hauptspannungen bei dreiaxsigem Spannungszustand
μ_{Al}	–	Querkontraktionszahl von Aluminium	σ_a	N/mm ²	Wechselspannungsamplitude
μ_{ax}	–	Querkontraktionszahl von Grauguss	σ_{ax}	N/mm ²	Axialspannung
μ_{GJL}	–	radialer Reibungskoeffizient	σ_b	N/mm ²	Biegespannung
μ_{rad}	–		σ_{ba}	N/mm ²	Biegewechselspannungsamplitude
			σ_{bGas}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle/im Kolbenbolzen infolge Gaskraft
ξ			σ_{bGOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle im GOT
ξ	–	Korrekturfaktor für die Spannungserhöhung am Innendurchmesser der Schraubenfeder	σ_{bKWrot}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle infolge rotierender Massen
ξ_S	–	Ausnutzungsgrad der Schraubenstreckgrenze	σ_{bm}	N/mm ²	Biegemittelspannung
			σ_{bmas}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle/im Kolbenbolzen infolge Massenkraft
π			σ_{bmasOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle infolge Massenkraft im OT
π	–	3,141593...	σ_{bmax}	N/mm ²	maximale Biegespannung
ρ			σ_{bn}	N/mm ²	Biegenennspannung
ρ	g/cm ³	Dichte	σ_{bw}	N/mm ²	Biegewechselspannung
ρ_0	g/m ³	Dichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugsdichte, Dichte bezogen auf ungestörtes Medium, Ausgangswert (Gesamtzustandswert)	σ_{bw}^*	N/mm ²	bauteilbezogene Biegewechselfestigkeit
			σ_{bw10}	N/mm ²	Biegewechselfestigkeit des glatten Probestabs mit 10 mm Durchmesser
ρ_{01}	g/m ³	Dichte (Gesamtzustandswert)			

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 Kurbelwinkelbereich	σ_{ySZ}	N/mm ²	zusätzliche Schraubenbeanspruchung
σ_{mec2}			σ_{zdv}	N/mm ²	Zug-/Druckwechsel- festigkeit
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	Torsionswechselspannungs- amplitude
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 Torsions- spannung
$\sigma_{rad1,2}$	N/mm ²	verschiedene durch Index gekennzeichnete Radialspannungen	τ_{Tn}	N/mm ²	Torsionsnennspannung
σ_{rada}	N/mm ²	Radialwechselspannungs- amplitude	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_m	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
$\sigma_{\ddot{u}}$	N/mm ²	Vorspannung infolge Überdeckung	φ_{UT}	°, rad	Kurbelwinkel der UT- Stellung des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks
$\sigma_{\ddot{u}rad}$	N/mm ²	Radialkomponente der Vorspannung infolge Überdeckung	Φ	–	Kraftverhältnis der Verschraubung
$\sigma_{\ddot{u}t}$	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_{el}	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 Simulationsmöglichkeiten 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.