

Eduard Köhler
Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

Aus dem Programm

Kraftfahrzeugtechnik

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Lexikon Motorentechnik

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

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

Bremsenhandbuch

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

Nutzfahrzeugtechnik

herausgegeben von E. Hoepke und S. Breuer

Aerodynamik des Automobils

herausgegeben von W.-H. Hucho

Automobilelektronik

herausgegeben von K. Reif

Automotive Software Engineering

von J. Schäuffele und T. Zurawka

Motorkolben

von S. Zima

Bussysteme in der Fahrzeugtechnik

von W. Zimmermann und R. Schmidgall

Die BOSCH-Fachbuchreihe:

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

herausgegeben von ROBERT BOSCH GmbH

vieweg

Eduard Köhler
Rudolf Flierl

Verbrennungsmotoren

**Motormechanik,
Berechnung und Auslegung
des Hubkolbenmotors**

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 280 Abbildungen

ATZ/MTZ-Fachbuch



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

Das Werk entstand mit freundlicher Unterstützung der Kolbenschmidt Pierburg Gruppe.

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

Alle Rechte vorbehalten

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

Lektorat: Ewald Schmitt

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

www.vieweg.de



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

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Satz: Fromm MediaDesign GmbH, Selters/Ts.

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Wilhelm & Adam, Heusenstamm

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-528-43108-3

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

Vorwort

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Kaiserslautern, im Juli 2006

Heilbronn, im Juli 2006

Rudolf Flierl

Eduard Köhler

Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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

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

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

Formelzeichen

(Ein * anstelle einer Dimension steht bei den Formelzeichen, deren Dimension fallspezifisch 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 Grundkreis-/Nockenspitzenradius	b_{Ri}	mm	radiale Kolbenringabmessung
			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			Kraftstoffverbrauch
A	mm ² , m ²	Fläche, Oberfläche, Querschnitt, Strömungsquerschnitt	B	kg/h	Biegesteifigkeit pro Querschnittsbreite
			B'	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$	
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	Nmm/mm	Drehsteifigkeiten bzw. Axialsteifigkeiten
A_{eq}	mm ² , m ²	Ersatzquerschnitt		N/mm	Ersatzsteifigkeit (des Ventiltriebs)
A_E	mm ²	Einlassquerschnitt	c_{Ers}	N/mm	Federkonstante, Federsteifigkeit
A_i	mm ² , m ²	i -te Teiloberfläche	c_F	N/mm	verschiedene Konstanten
	*	auch allg. für Fourier-Koeffizienten verwendet	c_{ij}	*	Schallgeschwindigkeit in Luft (in der Akustik wird meist c statt a verwendet)
A_{ij}	mm ² , m ²	Durchflussquerschnitt zwischen Volumen i und j	c_L	m/s	Anlenkhebellänge des Nebenpleuels
A_K	cm ² , mm ²	Kolbenfläche	c_N	mm	Ölfilmsteifigkeit
A_{Pl}	mm ²	(mittlerer) Pleuelstangenquerschnitt	$c_{\text{öF}}$	N/mm	spezifische Wärme bei konstantem Druck
A_S	mm ²	Schraubenschaftquerschnitt (Spannungsquerschnitt)	c_p	kJ/kgK	Konstante, mathematischer Term
A_{Tf}	mm ²	Trennfugenquerschnitt	C	*	Konstanten, Integrationskonstanten
A_{Ve}	mm ²	Ventilquerschnittsfläche, Ventilöffnungsfläche	C_1, C_2	*	
b, B			d, D		
b	mm, m	Breite, kleine Ellipsen-Hauptachse auch: Abstand	d	mm, m	Durchmesser
b_B	mm	radialer Abstand Angriffspunkt Abstützkraft/Innenrand der Zylinderbohrung	Δd	mm	Durchmesserüberdeckung, Durchmesservergrößerung 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 Schraubendribskraft
d_{KWGi}	mm	Innendurchmesser des Kurbelwellengrundzapfens	e_{F1}, e_{F2}	mm	Hebelarme der exzentrisch eingeleiteten Schraubendribskraft 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_{GG}	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	Schraubenschafidurchmesser (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 Kurbelwellenkörperung
				Hz, kHz	diskrete Frequenzen
				Hz, kHz	i -te Eigenfrequenz

F	N	Kraft	F_{KNy-DS}	N	Querkomponente der druckseitigen Normalkraft (= Kolbenseitenkraft)
$F_f^{(1)}, F_{II}$	N	Massenkräfte (abgekürzte Schreibweise)			
$F_f^{(2)}$	N		F_{KN-GDS}	N	gegendruckseitige Kolbennormalkraft (= Kolbenseitenkraft)
ΔF	N	Kraftänderung			
F_{ax}	N	Axialkraft	F_{KWHL}	N	Hauptlagerkraft der Kurbelwelle
F_B	N	Betriebskraft			
F_{Bi}	N	Betriebskraft bezogen auf verschiedene Stellen i	F_l	N	Längskraft
F_E	N	Erregerkraft	F_{li}	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_{Ggb}, F_{Ggll}	N	bestimmte Gegengewichtskräfte	F_{mPlk}	N	Massenkraftbelastung des Pleuelkopfes
F_{Ggx}	N	x-Komponente der Gegengewichtskraft	F_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuelmassenanteils
F_{Ggy}	N	y-Komponente der Gegengewichtskraft	F'_{mPlrot}	N	Massenkraft des rotierenden Pleuelmassenanteils 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_{Kl}	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		
			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, Schmierspalthöhe, Gewindesteigung
F_{res}	N	resultierende Kraft			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_{AI}	mm	auf Aluminium angepasste Querschnittshöhe
F_{Ry-GDS}	N	y-Komponente der gegen-druckseitigen Reibkraft am Kolbenschaft	h_B	mm	Bundhöhe
			h_{GG}	mm	auf Grauguss angepasste Querschnittshöhe
F_S	N	Schraubenkraft	h_i	mm	verschiedene Querschnittshöhen
F_{So}	N	Reaktionskraft im oberen Schaftbereich			verschiedene Höhenmaße im Bereich der Kolbenkompressionshöhe
F_{Su}	N	Reaktionskraft im unteren Schaftbereich	h_{Kb}	mm	Kolbenbodendicke
F_{SZ}	N	Schraubenzusatzkraft	h_{KWW}	mm	Kurbelwangendicke
F_t	N	Tangentialkraft	h'_{KWW}	–	Kurbelwangendicke auf den Außendurchmesser des Hubzapfens bezogene Kurbelwangendicke
F_{tGas}	N	gaskraftbedingte Tangentialkraft	h_{KWZW}	mm	Dicke der Kurbelwellen-zwischenwange
F_{ti}	N	Tangentialkraft an der Kröpfung i	h_{No}	mm	Nockenhub
F_{imosz}	N	Tangentialkraft der oszillierenden Massenkraft	h_{Ri}	mm	axiale Kolbenringhöhe bzw. -laufflächenhöhe
F_V	N	Vorspannkraft (in verschiedenem Zusammenhang gebraucht)	h_{Sa}	mm	Schaftausparungshöhe des Kolbens
$F_{V1,2}$	N	Vorspannkraft bezogen auf unterschiedliche Verhältnisse	h_{ZKD}	mm	Dicke der Zylinderkopfdichtung
ΔF_V	N	Vorspannkraftverlust, Erhöhung der Vorspannkraft	H	m/N	Übertragungsfunktion
F_{Vmax}	N	maximale Vorspannkraft	ΔH	m/N	Veränderung der Übertragungsfunktion
F_{Vmin}	N	minimale Vorspannkraft	H_0	m/N	Anfangswert der Übertragungsfunktion
F_x	N	x-Komponente der Kraft F	H_{ges}	m ⁻²	Übertragungsfunktion der Motorstruktur
$F_x^{(1)}$	N	Längskraft 1. Ordnung	H_K	mm	Kompressionshöhe des Kolbens
$F_x^{(2)}$	N	Längskraft 2. Ordnung	ΔH_K	mm	Änderung der Kompressionshöhe des Kolbens
F_{xi}	N	Längskräfte	H_u	kJ/kg	unterer Heizwert
F_{xres}	N	x-Komponente der resultierenden Kraft	H_{uGem}	kJ/m ³	unterer Gemischheizwert
$F_{xRest}^{(1)}$	N	Restlängskraft 1. Ordnung	i, I		
F_y	N	y-Komponente der Kraft F	i	–	ganze Zahl, Zähler, Faktor, Windungszahl, Übersetzungsverhältnis, Ordnungszahl
F_{yi}	N	Querkräfte			
F_{yres}	N	y-Komponente der resultierenden Kraft			
F_{yRest}	N	Restquerkraft	I	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment
F_z	N	z-Komponente der Kraft F , Axialkraft	I_i	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment bezogen auf verschiedene Stellen i

I_b	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment bezüglich Biegung	l_{B1}	mm	Länge des Innenkonusbolzens
I_{eq}	mm ⁴	Ersatzflächenträgheitsmoment	l_{B2}	mm	Länge des zylindrischen Bereichs der Innenform des Innenkonusbolzens
I_{Ov}	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment bezüglich Ovalverformung	l_{Fase}	mm	Länge der Fase am Kolbenbolzenauge innen
I_{Trf}	mm ⁴	axiales Flächenträgheitsmoment bezogen auf den Trennfugenquerschnitt des Pleuellkopfes	l_i	mm	Abstand der i -ten Ersatzmasse der Kurbelwellenkröpfung
j, J			l_K	mm	Kolbenbauhöhe (Kolbengesamthöhe)
j	–	ganze Zahl, Zähler, $\sqrt{-1}$ (imaginäre Größe)	l_{KI}	mm	Klemmlänge der Schraubenverbindung
J	kgm ²	Massenträgheitsmoment	l_{Kli}	mm	Längenanteil i der Klemmlänge
J_K	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Kolbens	l_{KWG}	mm	Länge des Kurbelwellengrundzapfens
J_{SPI}	kgm ²	Massenträgheitsmoment des Pleuels bezogen auf den Schwerpunkt	l_{KWH}	mm	Länge des Kurbelwellenhubzapfens
k, K			l_{PI}	mm	Pleuellänge
k	–	ganze Zahl, Zähler	l_{PI1}	mm	Abstand Pleuelschwerpunkt/großes Pleuelauge
	Ns/m	Dämpfungskonstante	l_{PI2}	mm	Abstand Pleuelschwerpunkt/kleines Pleuelauge
	g/cm ³	„ k -Faktor“ (Pseudo-Dichte) des Kolbens	l_{PIN}	mm	Augenabstand des Nebenpleuels
	W/m ² K	Wärmedurchgangszahl	l_{PIN1}	mm	Massenschwerpunkt- abstand des Nebenpleuels
	m ² /s ²	turbulente spezifische kinetische Energie	l_S	mm	Kolbenschaftlänge, Schraubenlänge
k_D	Ns/m	Dämpfungskonstante	Δl_S	mm	Austauschmaß des Kolbenschafts
k_{Di}	Ns/m	verschiedene Dämpfungs- konstanten	l_{So}	mm	obere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmittle aufwärts)
k_{KW}	mm ²	Trägheitsradius der Kurbelwelle	l_{Su}	mm	untere Kolbenschaftlänge (Bolzenbohrungsmittle abwärts)
k_{PI}	mm ²	Trägheitsradius des Pleuels	Δl_V	mm	Setzbetrag der Schrauben- verbindung
k_{Plosz}	mm ²	Trägheitsradius des oszillierenden Pleuelmassenteils	l_Z	mm	Zylinderlänge
k_{Prot}	mm ²	Trägheitsradius des rotierenden Pleuelmassenteils	l_{ZK}	mm	Klemmlänge der Zylinder- kopf-Schraubenverbindung
k_{Ri}	–	Kolbenringparameter	Δl_{ZK}	mm	relative Verkürzung der Klemmlänge der Zylinder- kopf-Schraubenverbindung
I, L			l_{ZKD}	mm	Klemmlänge des Zylinder- kurbelgehäuses
l	mm...km	Länge, Streckenlänge, Bogenlänge, Abstand, Tragbreite	L_{A-Am}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruck- pegel des Auspuff- mündungsgeräusches
Δl	mm	Längenänderung	L_{AMot}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruck- pegel des Motorgeräusches
l_1	mm	Stützkraftabstand der Kolbenbolzennabe, bestimmter Abstand	L_{AR}	dB(A)	A-bewerteter Schalldruck- pegel des Reifenabroll- geräusches
l_2	mm	(= b_{PI}) Pleuelbreite, bestimmter Abstand	$L_{A\Sigma}$	dB(A)	A-bewerteter Summen- schalldruckpegel
$\Delta l_1, \Delta l_2$	mm	bestimmte Längenänderungen			
l_{AA}	mm	Augenabstand der Kolben- bolzennabe			
l_{Auf}	mm	Auflagelänge des Kolben- bolzens			
l_B	mm	Länge des Kolbenbolzens			

L_{Bl}	mm	Höhe des Zylinderkurbelgehäuses („Blockhöhe“)	m_{plosz}	g, kg	oszillierender Anteil der Pleuelmasse
ΔL_K	dB	Pegeldifferenz der Körperschallschnelle	m_{Plrot}	g, kg	rotierender Anteil der Pleuelmasse
L_v	dB	Schnellepegel	m_{PlrotN}	kg	rotierende Masse des Nebenpleuels
m, M			m_{Ri}	g, kg	Kolbenringmasse
m	kg	Masse	m_{rot}	g, kg	rotierende Masse
Δm	kg	Massendifferenz	m_{th}	g, kg	theoretische Masse
m_1	g, kg	Stößelmasse	m_{Vered}	g, kg	auf das Ventil reduzierte
m_2	g, kg	Stoßstangenmasse			Masse der Ventilbetätigungsorgane
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	$M_{bl...VI}$	Nm	Biegemoment in verschiedenen Kurbelkröpfungsabschnitten
m_{Gem}	g, kg	Gemischmasse			
m_{Gg}	kg	Gegengewichtsmasse	M_{bPl}	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
$m_{i,j}$	g, kg		M_{bZ}	Nm	zusätzliches Biegemoment
m_{0i}	g, kg	Ausgangsmasse im Volumen i	M_D	Nm	hydrodynamisches Dämpfungsmoment des Kolbenschafts
m_K	g, kg	Kolbenmasse ohne Kolbenzubehör („nackt“)	M_{max}	Nm	maximales Moment
m_K^*	g, kg	Kolbengesamtmasse ohne Kolbenbolzen	M_{mrot}	kgm	rotierendes „Massenmoment“
m_{Kges}	g, kg	Kolbengesamtmasse	M'_{rad}	N	auf den Umfang bezogenes radiales Moment
m_{Kr}	g, kg	Kraftstoffmenge	M_{RB}	Nm	Bolzenreibungsmoment
m_{KW0}	kg	Kurbelwellenmasse ohne Gegengewichte	M_{Rest}	Nm	Restmoment
m_{KWrot}	g, kg	rotierende Kurbelwellenmasse auch: reduzierte Kurbelwellenmasse	M'_i	N	auf den Umfang bezogenes tangenciales Moment
m_{KWroti}	g, kg	Anteile i der rotierenden Kurbelwellenmasse	M_T	Nm	Torsionsmoment
m_L	g, kg	Luftmenge(-masse)	M_{Ti}	Nm	Torsionsmoment der Kröpfung i
m_{Mot}	kg	Motormasse	$M_{Tl...III}$	Nm	Torsionsmoment in verschiedenen Kurbelkröpfungsabschnitten
m'_{Lmin}	kg/kg	stöchiometrische kraftstoffmengenbezogene Luftmenge	M_{TS}	Nm	Schraubenanzugsdrehmoment
m_{Nored}	g, kg	auf den Nocken reduzierte Masse der Ventilbetätigungsorgane	M_{TS1}	Nm	Gewindereibungsmoment
m_{osz}	g, kg	oszillierende Triebwerksmasse	M_{TS2}	Nm	Schraubenkopfreibungsmoment
m_{oszN}	kg	oszillierende Masse des Nebenpleuels	M_x	Nm	Moment um die x -Achse (Längsmoment, wenn Motorhochachse)
m_{Pl}	g, kg	Pleuelmasse			
m_{PILd}	g, kg	Masse des Pleuellagerdeckels			
m_{PIN}	kg	Masse des Nebenpleuels			

M_{xres}	Nm	x -Komponente des resultierenden Moments	p_{me}	bar, Pa	mittlerer effektiver Druck, spezifische Arbeit
M_{xRest}	Nm	Restlängsmoment	p_{mi}	bar, Pa	mittlerer innerer oder indizierter Druck, spezifische Arbeit
M_y	Nm	Moment um die y -Achse (Kippmoment, wenn Motorquerachse)	p_{min}	bar, Pa	Mindestflächenpressung (auch in N/mm ²)
$M_y^{(1)}$	Nm	Kippmoment 1. Ordnung	p_{rad}	bar, Pa	radiale Pressungsverteilung (auch in N/mm ²)
M_{yres}	Nm	y -Komponente des resultierenden Moments	p_{tGas}	bar, Pa	Tangentialdruck der Gaskraft
M_{yRest}	Nm	Restkippmoment 1. Ordnung	p_{tmosz}	bar, Pa	Tangentialdruck der oszillierenden Massenkraft
M_z	Nm	Moment um die z -Achse (Motorlängsachse)	p_U	bar, Pa	Umgebungsdruck (an anderer Stelle auch p_0)
n, N			p_Z, p_{Zmax}	bar, Pa	Zylinderdruck, Zünddruck
n	–	ganze Zahl, Zähler	p_{Z0}	bar, Pa	Druck im Zylinder (Gesamtzustandswert)
	min ⁻¹	Drehzahl	p_{Z1}	bar, Pa	Gesamtdruck im Zylinder bei Einlassschluss
n_e	min ⁻¹	Drehzahl entsprechend der Eigenfrequenz	p_{ZFA}	bar, Pa	Zylinderdruck bei fremd-angetriebenem Motor
n_g	min ⁻¹	Grenzdrehzahl	p_{zul}	bar, Pa	zulässige Flächenpressung (auch in N/mm ²)
N_u	–	Nußelt-Zahl	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 Flächenpressung (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 (Gesamtzustandswert), Druck bezogen auf ungestörtes Medium	Q_{ab}	kJ	abgeführte Wärmemenge, Energie
p_{01}	bar, Pa	Gesamtdruck vor der Drosselstelle (Gesamtzustandswert)	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
p_E	bar, Pa	Druck im gedachten „Einlassbehälter“	r^*	mm	Ersatzkerbradius
p_{E0}	bar, Pa	Gesamtdruck im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)	r_1, r_2	mm	bestimmte Radien
p_{hyd}	bar, Pa	hydrodynamischer Schmierfilmdruck	r_1, r_{10}	mm	Massenschwerpunktsradius der Kurbelwelle
p_i	bar, Pa	verschiedene durch Index i unterschiedene Drücke	r_a	mm	Außenradius
p_{max}	bar, Pa	maximale Flächenpressung (auch in N/mm ²)	r_{Gg}	mm	Gegengewichtsradius (Konturradius)
			Δr_{Gg}	mm	Kurbelwellenfreigang (Gegengewichte)
			r_i	mm	verschiedene durch Index i unterschiedene Schwerpunktsradien, Innenradius
			r_{KWG}	mm	Hohlkehlenradius des Kurbelwellengrundzapfens
			r_{KWH}	mm	Hohlkehlenradius des Kurbelwellenhubzapfens

r'_{KWH}	–	auf Hubzapfendurchmesser bezogener Hohlkehlenradius am Hubzapfenübergang der Kurbelwelle	s_W	mm	Wanddicke (z. T. auch ohne Index verwendet)
			$s_{Zü}$	mm	Zapfenüberschneidung der Kurbelwelle
r_m	mm	mittlerer Radius, Flächenschwerpunktsradius, radialer Abstand der neutralen Faser	$s'_{Zü}$	–	auf den Hubzapfendurchmesser bezogene Zapfenüberschneidung der Kurbelwelle
r_m^*	mm	radialer Abstand der neutralen Faser	S_D	–	Sicherheit gegen Dauerbruch
r_{Sa}	mm	Schaftausparungsradius des Kolbens	t, T		
R	mm	Radius, Nockengrundkreisradius, Kolbenbolzenradius am Übergang Zylinder- zu Stirnfläche	t	s, h	Zeit
			Δt	s	Zeitschritt (Diskretisierung von dt)
			t_{Kr}	s, h	Kraftstoffdurchflusszeit
			T	K	Temperatur
			ΔT	K	Temperaturdifferenz
ΔR	mm	spezifische Gaskonstante radiale Abweichung		s	Schwingungsperiode, Periodendauer
R_0	mm	Nockenkrümmungsradius im Vornockenbereich	T^*	K	kritische Temperatur
Re	–	Reynolds-Zahl	T_0	K	Bezugstemperatur, Temperatur bei Umgebungsbedingungen, Ausgangstemperatur (Gesamtzustandswert)
R_E	kJ/kgK	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“			Temperatur
R_{Fl}	mm	Krümmungsradius der Nockenflanke	T_{01}	K	(Gesamtzustandswert)
R_G	mm	Nockengrundkreisradius	T_E	K	Temperatur im Einlasskanal oder im gedachten „Einlassbehälter“
ΔR_i	mm	bestimmte radiale Abweichungen	T_{E0}	K	Temperatur im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)
R_K	mm	Krümmungsradius, Kolben-Ersatzkrümmungsradius	T_{ges}	kgm ² s ⁻¹	Gesamtdrehimpuls
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit	T_i^*	K	verschiedene durch Index i unterschiedene Temperaturen
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze	T_K	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls des Kolbens
R_{Sp}	mm	Nockenspitzenradius	T_{KW}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls der Kurbelwelle
R_{St}	mm	Stößelradius	T_{Km}	K	Temperatur des Kühlmittels
R_Z	kJ/kgK	spezifische Gaskonstante bei Bedingungen im Zylinder	ΔT_{Km}	K	Temperaturerhöhung des Kühlmittels
	mm	Zylinderradius	T_{KmA}	K	Kühlmittel-Austrittstemperatur
s, S			T_{KmE}	K	Kühlmittel-Eintrittstemperatur
s	mm	Hub; Index „alt“ = vor, „neu“ = nach Änderung	T_{Plosz}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls des oszillierenden Pleuelmassenteils
	mm	Wanddicke	T_{Plrot}	kgm ² s ⁻¹	Drehimpuls des rotierenden Pleuelmassenteils
s^*	mm	Standardabweichung Hub des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks	ΔT_S	K	Temperaturerhöhung der Schraube im Betrieb
s_1, s_2	mm	bestimmte Wanddicken	T_W	K	Brennraumwandtemperatur
s_N	mm	Nabenwanddicke der Kolbenbolzennabe im unteren Scheitel	ΔT_W	K	Wandtemperaturdifferenz
Δs_N	mm	Zunahme der Nabenwanddicke der Kolbenbolzennabe in Bolzenlängsrichtung (infolge Auszugsschräge)	T_{Wa}	K	kühlmittelseitige Wandtemperatur
s_{Ve}	mm	Ventilhub			

T_{Wi}	K	Wandtemperatur der i -ten Teiloberfläche des Brennraums	V_Z	l, cm ³	Zylindervolumen, Brennraumvolumen
T_{Wm}	K	mittlere Wandtemperatur	V_{Z1}	l, cm ³	Zylindervolumen bei Einlassschluss
T_Z	K	Temperatur im Zylinder	w, W		
T_{Z0}	K	Temperatur im Zylinder (Gesamtzustandswert)	w	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
T_{Z1}	K	Temperatur im Zylinder bei Einlassschluss	w^*	m/s	kritische Strömungsgeschwindigkeit
ΔT_{ZK}	K	Temperaturerhöhung des Zylinderkopfes im Betrieb	w_m	m/s	mittlere Einlassströmungsgeschwindigkeit
T_{Zm}	K	repräsentative Temperatur im Zylinder	W_b	mm ³	Widerstandsmoment bezüglich Biegung
u, U			W_{bS}	mm ³	Widerstandsmoment des Schraubenschafts gegen Biegung
u	kJ/kg	spezifische innere Energie			innere Arbeit
u_E	kJ/kg	spezifische innere Energie im gedachten „Einlassbehälter“	W_i	J, kJ	Kraftstoffenergieinhalt
u_Z	kJ/kg	spezifische innere Energie der im Zylinder befindlichen Gasmasse	W_{Kr}	kJ	Widerstandsmoment bezüglich Ovalverformung
U	m/s	axiale Kolbenringgeschwindigkeit	W_{Ov}	mm ³	Widerstandsmoment des Schraubenschafts gegen Torsion
		($U = \dot{x}_K + \dot{x}_{Ri ax}$)	W_{TS}	mm ³	überschüssige Energie
	mm, m	Umfang	$W_{\ddot{u}}$	J, kJ	
v, V			x, X		
v	m/s, km/h	Geschwindigkeit, Schallschnelle	x	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
\bar{v}	m ³ /kg	spezifisches Volumen		mm	Maulweite des Sprengrings
\bar{v}	m/s	Durchschnittsgeschwindigkeit, über schallabstrahlende Oberfläche gemittelte Schallschnelle	Δx	mm, m	Verschiebung, Längenänderung, Maulweitenänderung von Kolbenring und Kolbenbolzensicherung (Sprengring), Dickenänderung
v_0	m/s	Bezugsschallschnelle	x_0	mm, m	besonders gekennzeichnete Punkt auf der x -Koordinate, Wegabschnitt
v_1, v_2	m/s	Körperschallschnelle an der Stelle der Erregung und am Ort der Abstrahlung	x_1, x_2	mm, m	Abstände
v_i	m/s	Schallschnelle des i -ten Freiheitsgrads	x_{1E}, x_{2E}	mm	bestimmte Anfangswerte
v_m	m/s	mittlere Kolben- geschwindigkeit	x_A	mm, μ m	Ausgangsamplitude (Resonanzamplitude)
v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Dralls	x_i	mm	verschiedene durch Index i unterschiedene Wege bzw. Federwege
V	l, m ³	Volumen	x_K	mm	Kolbenweg
V_C	cm ³	Kompressionsvolumen	x_{KN}	mm	Kolbenweg (Nebenpleuel)
ΔV_C	cm ³	Änderung des Kompressionsvolumens, Kompressionsvolumentoleranz	x_{No}	mm	Nockenhubfunktion
V_{Gem}	l, m ³	Gemischvolumen	x_{Noi}	mm	Nockenhubfunktion in den Abschnitten i
V_h	l, cm ³	Zylinderhubvolumen, Zylinderhubraum	x_{OT}	mm	Kolbenweg bezogen auf OT-Stellung
V_H	l, cm ³	Motorhubvolumen, Hubraum	$x_{Ri ax}$	mm	axiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung
V_i	l, m ³	verschiedene durch Index i unterschiedene Volumina	$x_{Ri rad}$	mm	radiale Wegkoordinate der Kolbenringbewegung
V_{Kr}	l, cm ³	Kraftstoffvolumen	x_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate
			x_{S1}	mm	Kolbenringstoßspiel im Neuzustand

x_{St}	mm	Kolbenringstoßspiel bei Laufflächenverschleiß	y_1, y_2	mm, m	Abstände
x_{UT}	mm	Kolbenweg bezogen auf UT-Stellung	y_K	$\mu\text{m}, \text{mm}$	Kolbenquerbewegung
x_{Ve}	mm	Ventilerhebung	y_S	mm	Schwerpunktsabstand, Schwerpunktskoordinate
y, Y			z, Z		
y	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable	z	mm, m	kartesische Koordinate, Abstandsvariable
	mm	Kolbenbolzendesachsierung	Z_0	–	Zylinderzahl
	$\mu\text{m}, \text{mm}$	Durchbiegung des Kolbenbolzens	Z_A	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$	Schallkennimpedanz
	mm	auch: Schränkung	Z_E	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$	Abstrahlmaß
			Z_E	kg/s	Eingangsimpedanz
			Z_S	$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$	Schallimpedanz
			$Z_{\bar{U}}$	–	Übertragungsfaktor

Griechische Formelzeichen

α

α	$^\circ, \text{rad}$ K^{-1}	Winkel, Formzahl Wärmeausdehnungs- koeffizient	α_V	$^\circ, \text{rad}$	V-Winkel
α_1, α_2	K^{-1}	bestimmte Wärme- ausdehnungskoeffizienten	α_{Ve}	$^\circ$	Ventilsitzwinkel
α_{AlSi12}	K^{-1}	Wärmeausdehnungs- koeffizient der eutektischen Kolbenlegierung AlSi12CuMgNi	$\alpha_W (\alpha_{W_i})$	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$	Wärmeübergangskoeffizient der Brennraumwände
α_{AlSi18}	K^{-1}	Wärmeausdehnungs- koeffizient der übereutektischen Kolbenlegierung AlSi18CuMgNi	α_{Wa}	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$	kühlmittelseitiger Wärmeübergangskoeffizient
α_b	–	Formzahl bezüglich Biegung	α_{Wm}	$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$	zeitlich gemittelter Wärme- übergangskoeffizient der Brennraumwände
α_D	–	Durchflussziffer, Durchflusszahl	α_{ZK}	K^{-1}	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Zylinderkopfwerkstoffs
α_{DA}	–	Durchflusszahl der Auslassventilöffnung(en)	β		
α_{DE}	–	Durchflusszahl der Einlassventilöffnung(en)	β	$^\circ, \text{rad}$	Winkel, Kolbenkippwinkel
α_{Di}	–	verschiedene durch Index i unterschiedene Durchflusszahlen	–	–	Kerbwirkungszahl
α_{Dij}	–	Durchflussziffer für den Strömungsquerschnitt zwi- schen den Volumina i und j	β, β_i	$^\circ, \text{rad}$	auch: Phasenwinkel
α_{GG}	K^{-1}	Wärmeausdehnungs- koeffizient von Grauguss	β_{Plk}	$\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$	Biegenachgiebigkeit des Pleuelkopfes im Klemmlängenbereich
α_q	–	Formzahl bezüglich Querkraft	β_S	$\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$	Biegenachgiebigkeit des Schraubenschafts
α_S	K^{-1}	Wärmeausdehnungs- koeffizient des Schraubenwerkstoffs	γ		
α_{Su}	$^\circ$	Umfangswinkel des „geraden“ Schaftendes	γ	$^\circ, \text{rad}$	Winkel, Neigungswinkel
α_T	–	Formzahl bezüglich Torsion	–	–	Faktor (z. B. bei Kolben- bolzendurchbiegung)
			γ_N	$^\circ, \text{rad}$	Anlenkwinkel des Neben- pleuels
			δ		
			δ	mm/N	Nachgiebigkeit, Kehrwert der Steifigkeit
			δ_{Ers}	$^\circ, \text{rad}$	auch: Pleuelversatzwinkel
			δ_i	mm/N	Ersatznachgiebigkeit
				mm/N	Nachgiebigkeit verschiede- ner durch Index i gekenn- zeichneter Querschnitte

δ_{Plk}	mm/N	Pleuelkopfnachgiebigkeit im Bereich der Verschraubung	η_{Kerb}	–	Kerbpmpfindlichkeitsziffer
δ_{Plk}^*	mm/N	auf Schraubenkraft bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	η_{mec}	–	mechanischer Wirkungsgrad
δ_{Plk}^{**}	mm/N	auf Betriebskraft bezogene Nachgiebigkeit des Pleuelkopfes	θ, Θ		
δ_S	mm/N	Schraubennachgiebigkeit	θ	°	Nockenwinkel im Flanken- und Spitzenbereich
δ_U	–	Ungleichförmigkeitsgrad	θ_0	°	Vornockenwinkelbereich
δ_{ZK}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkopfes	θ_{Fl}	°	Nockenflankenwinkel
δ_{ZKD}	mm/N	Nachgiebigkeit der Zylinderkopfdichtung	θ_{Fmax}	°	gesamter Nockenflankenwinkelbereich
δ_{ZKG}	mm/N	Nachgiebigkeit des Zylinderkurbelgehäuses	θ_i	°	einzelne Nockenwinkelabschnitte
ϵ	–	Dehnung	$\theta_{NW}, \theta_{NW_i}$	°	Nockenwinkel, Nockenwellendrehwinkel
ε	–	Verdichtungsverhältnis	θ_{Sp}	°	Nockenspitzenwinkel
	m ² /s ³	Dissipationsrate der turbulenten spezifischen kinetischen Energie	θ_{Spmax}	°	gesamter Nockenspitzenwinkelbereich
$\Delta\varepsilon$	–	Änderung des Verdichtungsverhältnisses, Verdichtungsverhältnistoleranz	Θ	°	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
$\varepsilon_{t1,2}$	–	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		
ζ	–	Faktor (Reduzierung der Klemmlänge einer Schraubenverbindung bei Betriebskrafteinleitung innerhalb der verspannten Teile)	κ	–	Isentropenexponent auch: Verhältnis
η	Ns/m ²	dynamische Viskosität	κ_A	–	Isentropenexponent bei Bedingungen im Auslasskanal
η_a	–	Durchmesserverhältnis	κ_E	–	Isentropenexponent bei Bedingungen im Einlasskanal
η_e	–	effektiver oder Gesamtwirkungsgrad	λ		
η_i	–	innerer oder indizierter Wirkungsgrad, Durchmesserverhältnis	λ	–	Luftverhältnis
				W/mK	Wärmeleitzahl
				m	Wellenlänge
			λ_B	m	Biegewellenlänge
			λ_L	–	Liefergrad
				m	Luftschallwellenlänge
			λ_{Pl}	–	Pleuelstangenverhältnis
			λ_{PlN}	–	Pleuelstangenverhältnis des Nebenpleuels

μ			σ		
μ	–	Reibungskoeffizient, Massenfaktor in Verbindung mit reduzierter Ventildfedermasse, Querkontraktionszahl auch: Faktor (Größenverhältnis)	σ	N/mm ²	Spannung
	–			–	Abstrahlgrad
$\mu_{1,2}$	–	verschiedene durch Index gekennzeichnete Querkontraktionszahlen	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	N/mm ²	Hauptspannungen bei dreiachsigem Spannungszustand
μ_{Al}	–	Querkontraktionszahl von Aluminium	σ_a	N/mm ²	Wechselspannungsamplitude
μ_{ax}	–	axialer Reibungskoeffizient	σ_{ax}	N/mm ²	Axialspannung
μ_{GG}	–	Querkontraktionszahl von Grauguss	σ_b	N/mm ²	Biegespannung
μ_{rad}	–	radialer Reibungskoeffizient	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
			σ_{bm}	N/mm ²	Biegemittelspannung
ξ_S	–	Ausnutzungsgrad der Schraubenstreckgrenze	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
ρ_{Al}	g/cm ³	Dichte von Aluminium	σ_{bwGG}	N/mm ²	Biegewechselfestigkeit von Grauguss
ρ_E	g/m ³	Gasdichte im gedachten „Einlassbehälter“	σ_{bZOT}	N/mm ²	Biegespannung in der Kurbelwelle im ZOT
ρ_{E0}	g/m ³	Gasdichte bei Bedingungen im Einlasskanal (Gesamtzustandswert)	σ_m	N/mm ²	Mittelspannung
ρ_{Gem}	g/m ³	Gemischdichte	σ_{mec}	N/mm ²	mechanische Spannung
ρ_{GG}	g/cm ³	Dichte von Grauguss	σ_{mec1}	N/mm ²	mechanische Spannung mit Unterscheidung zwischen gas- und massenkraftbestimmtem Kurbelwinkelbereich
ρ_{Kr}	g/cm ³	Kraftstoffdichte	σ_{mec2}		
ρ_{Kr0}	g/cm ³	Kraftstoffdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugs- wert für Kraftstoffdichte	σ_N	N/mm ²	Normalspannung
ρ_L	g/m ³	Luftdichte	σ_{Nn}	N/mm ²	Normalnennspannung
ρ_{L0}	g/m ³	Luftdichte bei Umgebungsbedingungen, Bezugs- wert für Luftdichte	σ_{NS}	N/mm ²	Normalspannung (Zugspannung) im Schraubenschaft
ρ_N	–	Anlenkungsverhältnis	σ_o	N/mm ²	Oberspannung
ρ_{Pl}	g/cm ³	Pleuelwerkstoffdichte	σ_{Ov}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung
ρ_Z	g/m ³	Gasdichte im Zylinder			
ρ_{Z0}	g/m ³	Gasdichte im Zylinder (Gesamtzustandswert)			

σ_{OvGas}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung durch Gaskraft	τ_{Tmax}	N/mm ²	maximale Torsionsspannung
σ_{Ovmass}	N/mm ²	Spannung infolge Ovalverformung durch Massenkraft	τ_{Tn}	N/mm ²	Torsionsnennspannung
σ_{rad}	N/mm ²	Radialspannung	τ_{TS}	N/mm ²	Torsionsspannung im Schraubenschaft
$\sigma_{rad1,2}$	N/mm ²	verschiedene durch Index gekennzeichnete Radialspannungen	τ_{TV}	N/mm ²	Torsionsspannung infolge Federvorspannung
σ_{rada}	N/mm ²	Radialwechselspannungsamplitude	τ_u	N/mm ²	Torsionsunterspannung
σ_{radB}	N/mm ²	Radialspannung in der Zylinderlaufbüchse	φ, Φ		
σ_{radm}	N/mm ²	Radialmittelspannung	φ	°, rad	Winkel, Kurbelwinkel, Neigungswinkel
σ_{radU}	N/mm ²	Radialspannung in der Futterbohrung der ZKG-Umgebung	$\Delta\varphi$	°, rad	Winkeländerung
σ_t	N/mm ²	Tangentialspannung	φ_A, φ_B	°, rad	Kurbelwinkel bezogen auf die beiden Zylinderbänke beim V-Motor
$\sigma_{t1,2}$	N/mm ²	verschiedene durch Index gekennzeichnete Tangentialspannungen	φ_i	°, rad	bestimmte Winkel, Kurbelwinkel
σ_{ta}	N/mm ²	Tangentialwechselspannungsamplitude	$\varphi_k^{(i)}$	°, rad	ordnungsabhängiger „Kröpfungswinkel“ (Phasenwinkel)
σ_{therm}	N/mm ²	Wärmespannung	φ_{OT}	°, rad	Kurbelwinkel der OT-Stellung des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks
σ_{tm}	N/mm ²	Tangentialmittelspannung	φ_{UT}	°, rad	Kurbelwinkel der UT-Stellung des desachsierten und/oder geschränkten Triebwerks
σ_u	N/mm ²	Unterspannung	Φ	–	Kraftverhältnis der Verschraubung
$\sigma_{\bar{u}}$	N/mm ²	Vorspannung infolge Überdeckung	χ		
$\sigma_{\bar{u}rad}$	N/mm ²	Radialkomponente der Vorspannung infolge Überdeckung	χ	mm ⁻¹ , m ⁻¹	bezogenes Spannungsgefälle
$\sigma_{\bar{u}t}$	N/mm ²	Tangentialkomponente der Vorspannung infolge Überdeckung	ψ		
σ_v	N/mm ²	Vergleichsspannung	ψ	°, rad	Pleuelschwenkwinkel, Kanalwinkel
σ_{va}	N/mm ²	Vergleichswechselspannungsamplitude	Ψ	–	Ausströmfunktion
σ_{vm}	N/mm ²	Vergleichsmittelspannung	Ψ_A	–	Ausströmfunktion
σ_{vmax}	N/mm ²	maximale Vergleichsspannung	Ψ_E	–	Einströmfunktion
σ_w	N/mm ²	Wechselspannung	$\Psi_{i,j}$	–	Durchflussfunktion für die Gasströmung von Volumen <i>i</i> nach Volumen <i>j</i>
σ_y	N/mm ²	Spannung in <i>y</i> -Richtung	Ψ_{max}	–	Maximalwert der Ausströmfunktion
σ_{ySZ}	N/mm ²	zusätzliche Schraubenbeanspruchung	ω, Ω		
σ_{zdw}	N/mm ²	Zug-/Druckwechselfestigkeit	ω	s ⁻¹	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit, „Drehgeschwindigkeit“
τ			ω_e	s ⁻¹	Eigenkreisfrequenz
τ	N/mm ²	Schubspannung	ω_{el}	s ⁻¹	Eigenkreisfrequenz <i>l</i> -ten Grades
τ_o	N/mm ²	Torsionsoberspannung	ω_g	s ⁻¹	Grenzkreisfrequenz
τ_T	N/mm ²	Torsionsspannung	ω_{NW}	s ⁻¹	Nockenwellenkreisfrequenz
τ_{Ta}	N/mm ²	Torsionswechselspannungsamplitude	Ω	–	Ausgleichsfaktor
τ_{Tm}	N/mm ²	Torsionsmittelspannung			

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, wengleich 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-

duktoptimierung vornimmt. Die optimierte Geometrie wird an das CAD-System zurückgegeben und dort für die CAD/CAM-Nutzung aufbereitet. Auf diese Weise entstehen CNC-Bearbeitungsprogramme, die, um an den einzelnen Bearbeitungsmaschinen Verwendung finden zu können, noch einem „Post-Processing“ unterzogen werden müssen. Möglichst während des Fertigungsprozesses (SPC, Statistical Process Control), aber auch danach können Solldaten nochmals im Rahmen des CAQ (Computer Aided Quality Assurance, auch ein Bestandteil von CIM) für die Qualitätssicherung herangezogen werden. In diesem Zusammenhang soll nicht unerwähnt bleiben, dass das eigentliche Ziel der Qualitätsbemühungen nicht das der optimal überwachten, sondern das der beherrschten Prozesse ist, die innerhalb so enger Grenzen ablaufen, dass auf SPC verzichtet werden kann.

2.2 Abgrenzung zwischen Mechanik und Thermodynamik

Der Kolbenmotor (gemeint ist hier stets die konventionelle Bauart mit Hubkolben) setzt sich aus bewegten und unbewegten Bauteilen zusammen, wobei die letzteren die Reaktionen der zuerst genannten aufnehmen. Jedes Bauteil übernimmt eine spezifische Aufgabe. Die Bauteile lassen sich zu Baugruppen oder Funktionseinheiten zusammenfassen. Das statische und dynamische Verhalten der Bauteile bzw. Baugruppen folgt den Gesetzen der Mechanik. Darauf basieren die Berechnungsverfahren, die im Bereich der Motor-Mechanik angewandt werden.

Wie schon in Kapitel 1 erwähnt, ist damit auch die Abgrenzung des hier aufgearbeiteten Stoffes entsprechend eindeutig. So liefern die der Motor-Thermodynamik zuzuordnenden Gebiete Ladungswechsel und Verbrennung zwar mechanische und thermodynamische Randbedingungen in Form der Gaskraft und der Bauteiltemperaturen, die die Funktion und Lebensdauer erheblich beeinflussen, sie können jedoch im abgesteckten Rahmen keine Berücksichtigung finden. Dem z. B. an der „realen“ Prozessrechnung und anverwandten Gebieten interessierten Leser mögen [A2–A13] weiterhelfen.

2.3 Anmerkungen zum ausgewählten Stoff und zur Vertiefung

Neben der vorgenommenen Abgrenzung zu anderen Wissensgebieten ist es angebracht darzulegen, nach welchen Kriterien der Stoff innerhalb des identifizierten Gebiets ausgewählt wurde. Berücksichtigt werden die primär wichtigen Bauteile und Baugruppen bzw. Systeme der Motor-Mechanik. So wird zunächst auf allgemein bekannte Zusammenhänge eingegangen. Ein Anliegen ist dabei, ergänzende und dem Verständnis dienende Sachverhalte anstelle des gängigen Lehrstoffs in den Vordergrund zu stellen. Als Richtschnur dienen hier die Gesichtspunkte einer zeitgemäßen Motorauslegung. Verschiedene Themen können aus den genannten Gründen nicht erschöpfend behandelt werden.

Ein Schwerpunkt ist die Berechnung. Bekanntlich erfordert die explizite Lösung mathematisch-physikalischer Zusammenhänge in Form von Differenzial- und Integralgleichungen Vereinfachungen und Annahmen. Entsprechend idealisiert können dann die