

Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

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

4.6.5 Rechnergestützte Berechnung des ZK	306
4.7 Die Zylinderkopfdichtung	312
4.7.1 Funktion und Anforderungen	312
4.7.2 ZKD-Bauarten im Wandel der Zeit	313
4.7.3 Moderne ZKD-Dichtungstechnik	314
4.7.3.1 Veränderte Einsatzbedingungen	314
4.7.3.2 Metalllagen-Dichtungen	315
5 Berechnung und Auslegung von Baugruppen	323
5.1 Ladungswechsel	323
5.1.1 Eindimensionale Simulation des Ladungswechsels (nach [I6])	329
5.1.2 Ladungswechsel mit starrem Ventiltrieb	333
5.1.2.1 Anzahl der Ventile	335
5.1.2.2 Steuerelemente des starren Ventiltriebes	338
5.1.2.3 Hydraulische Ausgleichselemente	341
5.1.2.4 Ventile	341
5.1.2.5 Nocken	345
5.1.2.5.1 Definition der Nockenform	345
5.1.2.5.2 Auslegungsprogramme	351
5.1.2.6 Ventilfedern	352
5.1.2.6.1 Erforderliche Ventilfederkraft	352
5.1.2.6.2 Berechnung der Ventilfeder	353
5.1.2.7 Nockenwelle	355
5.1.2.7.1 Anmerkungen zu Nockenwellenwerkstoffen, -herstellung und -lagerung	355
5.1.3 Ladungswechsel mit variabler Steuerzeit	355
5.1.4 Ausführungsformen	358
5.1.4.1 Zweipunktversteller	358
5.1.4.2 Kettenversteller	358
5.1.4.3 Schwenkmotoren	360
5.1.5 Ladungswechsel mit variabler Ventilhubumschaltung	361
5.1.6 Ladungswechsel mit variablem Ventilhub – drosselfreie Laststeuerung	364
5.1.6.1 Ausführungsformen	367
5.1.6.1.1 BMW-VALVETRONIC	367
5.1.6.1.2 UniValve-System	369
5.1.6.1.3 Elektromechanischer Ventiltrieb	371
5.1.7 Berechnung des dynamischen Verhaltens von Ventiltrieben	373
5.1.7.1. Anmerkungen zur Ventiltriebsreibung, zum Ventiltriebs- geräusch und zur Dynamik des Gesamtsystems	376
5.1.7.2 Berechnung der Ventiltriebsdynamik mit Mehrkörpersimulation	378
5.2 Der Kurbeltrieb	379
5.2.1 Massenausgleich des Hubkolbenmotors	379
5.2.1.1 Massenausgleich des Einzylindertriebwerks	380
5.2.1.1.1 Massenkräfte 1. Ordnung	380
5.2.1.1.2 Ausgleichsmöglichkeiten durch Gegengewichte beim Einzylindertriebwerk	383

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