

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	V
Formelzeichen .....	XVII
<b>1 Vorbemerkung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Bedeutung der Berechnung im Entwicklungsprozess .....	3
2.2 Abgrenzung zwischen Mechanik und Thermodynamik .....	4
2.3 Anmerkungen zum ausgewählten Stoff und zur Vertiefung .....	4
2.4 Ziele bei der Neu- und Weiterentwicklung eines Motors .....	5
<b>3 Kriterien bei der Motorauslegung .....</b>	<b>9</b>
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 Kolbenschaftslänge, Austauchen des Kolbens ....	18
3.3.8 Kurbelwellenfreigang und Kolbenschaftslänge .....	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
<b>4 Berechnung und Auslegung von Bauteilen .....</b>	<b>45</b>
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 Kolbenbolzenberechnung .....	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 Kolbenaußengrenzkurve .....	119
4.2.4.5.1	Einbauspur, 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 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
4.6.2.2.3 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
<b>5</b>	<b>Berechnung und Auslegung von Baugruppen .....</b>	<b>323</b>
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 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 vollvariablen Einlassventiltrieb und variabler Auslassspreizung .....	384
5.1.8.4	Der Ladungswechsel mit vollvariablen 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 Ausgleichswellen; 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	<b>Motorgeräusch .....</b>	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 Zylinderkurbelgehäuse (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 Lufschallabstrahlung von der schwingenden Motorstruktur .....	493
6.5.4.1 Anmerkungen zum Berechnungssablauf .....	493
6.5.4.2 Abschätzung der abgestrahlten Schallleistung .....	494
6.6 Bemerkung zu weiteren Geräuschquellen am Motor .....	497
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>499</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>503</b>
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
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>523</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>541</b>