

Eduard Köhler

Verbrennungsmotoren

**Motormechanik,
Berechnung und Auslegung
des Hubkolbenmotors**

Mit 241 Abbildungen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage



vieweg

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	IX
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-/Bohrungsverhältnis.....	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.....	14
3.3.6 Hub, Bohrung und Zylinderzahl.....	16
3.3.7 Zylinderlänge, untere Kolbenschaftlänge, Austausch des Kolbens	17
3.3.8 Kurbelwellenfreigang und Kolbenschaftlänge.....	18
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 Zylinder- abstand und Stegbreite.....	29
3.5 Betrachtungen zum optimalen Pleuelstangenverhältnis.....	30
3.6 Betrachtungen zum Oberflächen-/Volumenverhältnis des Brennraums.....	34
3.7 Zusätzliche Begriffe und Definitionen.....	36
3.8 Mittlerer effektiver Druck bzw. spezifische Arbeit.....	38
4 Berechnung und Auslegung von Bauteilen	41
4.1 Das Pleuel.....	41
4.1.1 Funktion, Anforderungen und Gestaltung.....	41
4.1.2 Beanspruchung des Pleuels.....	43
4.1.3 Gestaltfestigkeit des Pleuels - konventionelle Berechnungs- verfahren.....	47
4.1.4 Konventionelle Berechnungsverfahren zur Auslegung der Pleuelkopfschraubung.....	56
4.2 Der Kolben.....	69
4.2.1 Vorbemerkung zur Kolbenberechnung.....	69

4.2.2	Funktion und Anforderungen.....	69
4.2.3	*"Beanspruchung des Kolbens.....	71
4.2.4	Konventionelle Berechnung des Kolbens.....	82
4.2.5	Berechnung der Kolbensekundärbewegung.....	113
4.2.6	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung des Kolbens.....	116
4.3	Die Kolbenringe.....	127
4.3.1	Vorbemerkung zu den Berechnungsmöglichkeiten des Kolbenringverhaltens.....	127
4.3.2	Funktion und Anforderungen.....	127
4.3.3	Auf den Kolbenring wirkende Kräfte.....	129
4.3.4	Elastomechanik des Kolbenrings.....	135
4.3.5	Rechnerische Simulation der Kolbenringfunktion.....	139
4.4	Die Kurbelwelle.....	149
4.4.1	Funktion und Anforderungen.....	149
4.4.2	Beanspruchung der Kurbelwelle.....	150
4.4.3	Gestaltfestigkeit der Kurbelwelle.....	166
4.4.4	Rechnergestützte Festigkeitsberechnung der Kurbelwelle.....	169
4.5	Das Zylinderkurbelgehäuse (ZKG).....	173
4.5.1	ZKG-Konzepte.....	173
4.5.2	Beanspruchung des ZKG, allgemeiner konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale.....	195
4.5.3	ZKG-Leichtbau.....	200
4.5.4	ZKG-Berechnung.....	205
4.5.5	Zylinderlaufbüchsen.....	222
4.5.6	Zylinderverschleiß.....	238
4.6	Der Zylinderkopf (ZK).....	240
4.6.1	Konstruktiver Aufbau und Funktionsmerkmale des ZK.....	240
4.6.2	Die besondere Problematik der thermischen ZK-Beanspruchung..	244
4.6.3	ZK-Werkstoffe und -Gießverfahren.....	255
4.6.4	LadungsWechselkanäle, Ventilwinkel, Brennraumgeometrie und ZK-Bauhöhe.....	258
4.6.5	Berechnung des ZK mittels FEM.....	270
4.7	Die Zylinderkopfdichtung.....	272
5	Berechnung und Auslegung von Baugruppen.....	277
5.1	Der Ventiltrieb.....	277
5.1.1	Das Ventil.....	277
5.1.2	Anzahl der Ventile pro Zylinder.....	280
5.1.3	Variable Ventilsteuerung (WS).....	282
	5.1.3.1 Begriffe in Verbindung mit der Ventilsteuerung.....	282
	5.1.3.2 Entwicklungstendenzen der WS.....	285
5.1.4	Steuerelemente des Ventiltriebs.....	292
	5.1.4.1 Definition der Nockenform.....	292
	5.1.4.2 Ventilerhebung, -geschwindigkeit und -beschleunigung unter Berücksichtigung der Kinematik der Ventilbetätigung.....	296

	5.1.4.3	Die Ventildfeder.....	298
	5.1.5	Dynamik des Ventiltriebs.....	301
	5.1.5.1	Dynamisches Verhalten des Systems ohne Berücksichtigung der Elastizitäten.....	301
	5.1.5.2	Ventiltriebsschwingungen.....	301
	5.1.5.3	Anmerkungen zur Ventiltriebsreibung, zum Ventiltriebsgeräusch und zur Dynamik des Gesamtsystems.....	306
	5.1.6	Anmerkungen zu Nockenwellenwerkstoffen, -herstellung und -lagerung.....	308
5.2		Der Kurbeltrieb.....	310
	5.2.1	Massenausgleich des Hubkolbenmotors.....	310
	5.2.1.1	Massenausgleich des Einzylindertriebwerks.....	311
	5.2.1.1.1	Massenkräfte 1. Ordnung.....	311
	5.2.1.1.2	Ausgleichsmöglichkeiten durch Gegengewichte beim Einzylindertriebwerk.....	315
	5.2.1.2	Massenausgleich des Mehrzylindertriebwerks mit Hilfe von Gegengewichten.....	324
'''	5.2.1.2.1	Ausgleich der freien Massenkräfte beim Reihenmotor.....	324
	5.2.1.2.2	Ausgleich der freien Massenkräfte beim V2-Triebwerk.....	326
	5.2.1.2.3	Ausgleich der freien Massenmomente.....	334
	5.2.1.2.4	Massenumlaufmoment.....	368
y	5.2.1.3	Massenausgleich mit Hilfe von Ausgleichswellen.....	370
	5.2.1.3.1	Ausgleich von Massenkräften durch Ausgleichswellen; Möglichkeiten und Anwendungen.....	373
	5.2.1.3.2	Rollmoment.....	377
	5.2.1.3.3	Ausgleich von Massenmomenten durch Ausgleichswellen; Anwendungsbeispiele.....	381
6		Motorgeräusch.....	385
	6.1	Motorgeräusch und Fahrgeräusch - gesetzliche Vorschriften.....	385
	6.2	Motorgeräusch - Teilschallquellen und Geräuschursachen.....	388
	6.3	Indirekt erzeugtes Motorgeräusch - Entstehung, Übertragung und Abstrahlung.....	391
	6.4	Zylinderdruckverlauf und resultierendes Zylinderdruckspektrum.....	397
	6.5	Vorausberechnung des akustischen Verhaltens der Motorstruktur.....	400
	6.5.1	Schwingungsverhalten der Motorstruktur.....	400
	6.5.2	Geräuschreduzierende Strukturveränderungen am Zylinderkurbelgehäuse (Motorblock) und deren physikalischer Hintergrund.....	402

6.5.3	Akustische Betrachtungen zur Kurbelwelle, deren Lagerung und das Verhalten des Schmierfilms im Zusammenhang mit dem „inneren“ Körperschall-Leitweg.....	407
6.5.4	Berechnung der Lufschallabstrahlung von der schwingenden Motorstruktur.....	413
6.5.4.1	Anmerkungen zum Berechnungsablauf.....	413
6.5.4.2	Abschätzung der abgestrahlten Schalleistung.....	414
6.6	Bemerkung zu weiteren Geräuschquellen am Motor.....	416
7	Zusammenfassung und Ausblick	417
Anhang	421
I	Anmerkungen zu den Grundlagen der Finite-Element-Methode (FEM).....	421
II	Zur Matrizen-Theorie der Statik - Verschiebungsmethode.....	424
III	Lösung von Differentialgleichungen mit Hilfe der FEM.....	430
IV	Anmerkungen zur Finite-Differenzen-Methode (FDM).....	435
V	Anmerkungen zur Boundary-Element-Methode (BEM).....	436
VI	Anmerkungen zum „modalen Modell“ (Modal-Analyse).....	437
	Literaturverzeichnis	441
	Sachwortverzeichnis	455