

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorwort | 5 |
| 1 Merkmale und Besonderheiten von Verbrennungsmotoren im Zusammenhang mit der Anwendung als Antrieb von Maschinen bzw. Fahrzeugen (WERNER HOFFMANN) | 19 |
| <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | 34 |
| 2 Grundlagen (HORST SCHÄDLICH) | 37 |
| 2.1 Begriffe und Einteilung | 37 |
| 2.2 Hauptabmessungen | 49 |
| 2.2.1 Zylindergeometrie | 49 |
| 2.2.2 Schnellläufigkeit | 53 |
| 2.2.3 Arbeitsfähigkeit | 60 |
| 2.2.4 Leistungsfähigkeit | 77 |
| 2.3 Auslegungsbeispiele | 79 |
| 2.3.1 Beispiel 1: Pkw-Motor | 80 |
| 2.3.2 Beispiel 2: Nkw-Motor | 85 |
| 2.4 Verdichtungsverhältnis | 86 |
| 2.5 Pleuelstangenverhältnis | 88 |
| 2.6 Kraftstoff- und Luftverbrauch | 89 |
| 2.7 Motormasse und Einbaumaße | 92 |
| 2.8 Leistungsangaben und Bezugszustand | 96 |
| 2.9 Kennlinien und Kennfelder | 101 |
| <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | 107 |
| 3 Thermodynamik der Verbrennungsmotoren (STEFFEN ZWAHR) | 111 |
| 3.1 Einleitung | 111 |
| 3.2 Vereinbarungen und thermodynamische Grundlagen | 114 |
| 3.3 Praktische Grenzen der Kreisprozesse und Grenzprozesse | 122 |
| 3.4 Auswirkungen der Anordnung der Wärmezufuhr | 132 |
| 3.4.1 Konstantes Verdichtungsverhältnis | 132 |
| 3.4.2 Konstantes Druckverhältnis | 139 |
| 3.5 Teillastverfahren | 141 |
| 3.5.1 Qualitätsregulierung | 141 |
| 3.5.2 Quantitätsregulierung | 143 |
| 3.5.2.1 Drosselregulierung | 144 |
| 3.5.2.2 Alternatives Verfahren – «Frühes Einlass Schließt» (FES) | 151 |
| 3.6 Aufladung | 156 |
| 3.6.1 Abgas-Turboaufladung | 157 |
| 3.6.2 Mechanische Aufladung | 164 |
| 3.7 Prozess des vollkommenen Motors | 167 |
| 3.8 Reale Arbeitsprozessrechnung | 169 |
| 3.8.1 Modellansätze | 169 |

| | | |
|---------|---|------------|
| 3.8.2 | Einzonenmodell | 171 |
| 3.8.2.1 | Berechnungsgrundlagen | 171 |
| 3.8.2.2 | Ausgewählte Ergebnisse der Simulation | 177 |
| 3.9 | Prozessanalyse | 184 |
| 3.9.1 | Indizieren und Analyse des Druckverlaufs | 184 |
| 3.9.2 | Heizverlauf und Brennverlauf | 187 |
| 3.9.3 | Approximation des Brennverlaufs mit einer Vibefunktion | 192 |
| 3.9.4 | Detallierte Verlustanalyse | 193 |
| | Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | 199 |
| 4 | Gemischbildung und Verbrennung (WERNER HOFFMANN) | 203 |
| 4.1 | Allgemeine Verbrennungstheorie | 203 |
| 4.1.1 | Elementare Formen des Verbrennungsprozesses | 204 |
| 4.1.2 | Einleitung der Verbrennung, Reaktionsgeschwindigkeit, Kettenreaktion .. | 207 |
| 4.1.2.1 | Selbstzündungsvorgang | 208 |
| 4.1.2.2 | Kettenreaktion | 210 |
| 4.1.2.3 | Flammenfront | 211 |
| 4.1.2.4 | Fremdzündung | 214 |
| 4.1.2.5 | Diffusionsverbrennung | 214 |
| 4.2 | Kraftstoff und chemische Grundlagen der Verbrennungsprozesse | 215 |
| 4.2.1 | Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren | 215 |
| 4.2.1.1 | Aliphatische bzw. kettenförmige Kohlenwasserstoffe | 215 |
| 4.2.1.2 | Ringförmige Kohlenwasserstoffe | 217 |
| 4.2.1.3 | Organische Sauerstoffverbindungen | 219 |
| 4.2.1.4 | Alternative Kraftstoffe | 221 |
| 4.2.2 | Verbrennung, Mindestluftbedarf, Heizwert | 222 |
| 4.2.2.1 | Verbrennungsreaktionen und Mindestluftbedarf, Luftverhältnis | 222 |
| 4.2.2.2 | Heizwert | 228 |
| 4.2.2.3 | Abgaszusammensetzung und Verbrennungsluftverhältnis | 234 |
| 4.3 | Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor | 236 |
| 4.3.1 | Entwicklung der Theorien zur Verbrennung im Dieselmotor | 236 |
| 4.3.2 | Kraftstoffstrahl | 238 |
| 4.3.2.1 | Strahlausbreitung und Zerstäubung | 238 |
| 4.3.2.2 | Tropfenverdampfung und Einleitung der Zündung | 243 |
| 4.3.3 | Gemischbildungs- und Verbrennungsverfahren | 245 |
| 4.3.3.1 | Erforderlicher Verbrennungsablauf | 245 |
| 4.3.3.2 | Beeinflussung des Verbrennungsablaufs | 247 |
| 4.3.3.3 | Brennräume | 249 |
| 4.3.3.4 | Luftbewegung | 252 |
| 4.3.4 | Abgaszusammensetzung bei Dieselmotoren und Maßnahmen zu deren Beeinflussung (WERNER HOFFMANN, MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK) | 263 |
| 4.4 | Dieseleinspritzanlagen | 275 |
| 4.4.1 | Aufbau und Funktion kantengesteuerter Einspritzanlagen | 276 |
| 4.4.2 | Auslegung kantengesteuerter Einspritzanlagen | 280 |
| 4.4.3 | Beeinflussung von Einspritzzeitpunkt und Einspritzmenge | 295 |
| 4.4.3.1 | Spritzversteller | 295 |
| 4.4.3.2 | Regler | 296 |
| 4.4.4 | Zeitgesteuerte Dieseleinspritzsysteme | 302 |
| 4.4.4.1 | Elektronisch gesteuerte Verteilerpumpen | 302 |
| 4.4.4.2 | Zeitgesteuerte Unit-Injector- und Unit-Pump-Systeme | 305 |
| 4.4.4.3 | Common-Rail-System – Speichereinspritzsystem | 308 |
| 4.4.4.4 | Piezo-Common-Rail-System | 318 |
| 4.5 | Gemischbildung und Verbrennung im Ottomotor | 329 |
| 4.5.1 | Allgemeines | 329 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 4.5.2 | Verbrennungsablauf | 331 |
| 4.5.2.1 | Normale und anomale Verbrennung | 332 |
| 4.5.2.2 | Gestaltung klopf- und glühzündungsunempfindlicher Brennräume | 338 |
| 4.5.3 | Vergasermotor | 344 |
| 4.5.3.1 | Wirkungsweise des Vergasers und Vergasergrobausbauung | 347 |
| 4.5.3.2 | Vergaserbauarten | 354 |
| 4.5.4 | Saugrohrgestaltung und Gemischverteilung | 357 |
| 4.5.4.1 | Kraftstoffzerstäubung und -verdampfung | 357 |
| 4.5.4.2 | Saugrohrgestaltung | 359 |
| 4.5.5 | Benzineinspritzung | 363 |
| 4.5.5.1 | Art der Kraftstoffeinspritzung | 365 |
| 4.5.5.2 | Mechanische Einspritzanlagen | 366 |
| 4.5.5.3 | Elektronische Motorsteuerungen | 367 |
| 4.5.5.4 | Elektronisch gesteuerte Saugrohr-Benzineinspritzanlagen | 369 |
| 4.5.5.5 | Elektronisch gesteuerte Benzin-Direkteinspritzanlagen | 373 |
| 4.5.6 | Zündung und Zündanlage (MATTHIAS THEIN) | 386 |
| 4.5.6.1 | Motorische Anforderungen an die Zündanlage | 388 |
| 4.5.6.2 | Hochspannungserzeugung und Funkenentladung | 393 |
| 4.5.6.3 | Komponenten | 416 |
| 4.5.6.4 | Motormanagementsystem – Zündwinkelgrad | 426 |
| 4.5.7 | Emissionen der Fahrzeuge mit Ottomotor (WERNER HOFFMANN, MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK) | 428 |
| 4.6 | Gesetzliche Anforderungen zu Emissionen von Verbrennungsmotoren (MATTHIAS KRATZSCH, ANDREAS ROSENEK) | 435 |
| 4.6.1 | Einführung | 435 |
| 4.6.2 | Abgasgesetzgebung in den USA | 436 |
| 4.6.2.1 | Fahrzeugzulassung | 436 |
| 4.6.2.2 | Emissionsstandards der EPA – Tier 2 | 437 |
| 4.6.2.2.1 | Abgastestprozeduren der EPA | 437 |
| 4.6.2.2.2 | Nachweis der Dauerhaltbarkeit emissionsbeeinflussender Bauteile | 440 |
| 4.6.2.2.3 | Emissionsgrenzwerte der EPA | 440 |
| 4.6.2.2.4 | OBD-Anforderungen der EPA | 442 |
| 4.6.2.3 | Emissionsstandards der CARB | 443 |
| 4.6.2.3.1 | Emissionsgrenzwerte der CARB – LEV-2-Programm | 444 |
| 4.6.2.3.2 | OBD-Anforderungen der CARB | 445 |
| 4.6.2.3.3 | Emissionsgrenzwerte der CARB – LEV-3-Programm | 446 |
| 4.6.3 | Abgasgesetzgebung in der europäischen Union | 447 |
| 4.6.3.1 | Fahrzeugzulassung | 447 |
| 4.6.3.2 | Neuer Europäischer Fahrzyklus NEFZ2000 | 447 |
| 4.6.3.3 | Grenzwerte in der Europäischen Union | 448 |
| 4.6.3.4 | Dauerhaltbarkeitsnachweis, Verschlechterungsfaktoren | 450 |
| 4.6.3.5 | On-Board-Diagnose (OBD) | 452 |
| 4.6.3.6 | CO ₂ -Flottenverbrauch | 453 |
| 4.6.4 | Abgasrollenprüfstand | 454 |
| 4.6.5 | Prüfverfahren auf dem Motorenprüfstand – Leistungsprüfung | 454 |
| | Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | 458 |
| 5 | Ladungswchsel (WERNER HOFFMANN) | 467 |
| 5.1 | Aufgaben und Bewertung des Ladungswechsels | 467 |
| 5.2 | Ladungswchselsteuerung und Steuerquerschnitte | 480 |
| 5.3 | Ventilsteuerungen und Merkmale der konstruktiven Ausführung | 490 |
| 5.4 | Kinematik des Nockentriebs und der Ventilsteuerung | 495 |
| 5.4.1 | Kreisbogennocken mit Stößelrolle | 500 |
| 5.4.2 | Tangentennocken mit Stößelrolle | 506 |
| 5.4.3 | Kreisbogennocken mit Flachstößel | 507 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.5 | 5.4.4 Kinematische Eigenschaften unterschiedlicher Nocken- bzw. Ventiltriebe | 509 |
| | 5.5.1 Berechnung und Auslegung von Ventilsteuerungen | 517 |
| | 5.5.2 Bewegungsfunktionen am Stößel | 517 |
| | 5.5.3 Kräfte und Kraftwirkungen an den Bauteilen der Ventilsteuerung | 519 |
| | 5.5.3 Auslegung von Ventilfedern | 539 |
| 5.6 | 5.6 Konstruktion von Ventilsteuerungen und deren Bauteile | 558 |
| | 5.6.1 Ventilfedern | 559 |
| | 5.6.2 Ventile | 562 |
| | 5.6.3 Ventilsitzringe | 564 |
| | 5.6.4 Ventilschaftführungen | 565 |
| | 5.6.5 Verbindung Federteller und Ventil - Ventildrehung und Ventildrehvorrichtungen | 566 |
| | 5.6.6 Kipp- bzw. Schlepphebel | 569 |
| | 5.6.7 Stößelstangen | 569 |
| | 5.6.8 Stößel, Nocken und Nockenwellen | 570 |
| | 5.6.9 Automatischer Spielausgleich | 576 |
| | 5.6.10 Einfluss von Elastizität und Masse der Ventiltriebbauteile auf Bewegungsablauf und Schwingungseigenschaften der Ventiltriebe | 579 |
| 5.7 | 5.7 Steuertrieb | 581 |
| | 5.7.1 Zahnradsteuertrieb | 586 |
| | 5.7.2 Zugmittelsteuertriebe | 587 |
| 5.8 | 5.8 Instationäre Strömungsvorgänge beim Ladungswechsel der Motoren | 603 |
| | 5.8.1 Mathematische Grundlagen | 603 |
| | 5.8.2 Theorie kleiner Wellen | 604 |
| | 5.8.3 Schwingungstheorie | 614 |
| | 5.8.4 Abstimmung des Ladungswechsels von Viertaktmotoren nach der Schwingungstheorie | 619 |
| | 5.8.5 Ähnlichkeitsbeziehungen beim Viertaktmotor | 622 |
| 5.9 | 5.9 Variable Motorsteuerung und Ladungswechselanlagen von Viertaktmotoren | 628 |
| | 5.9.1 Variable Motorsteuerung | 628 |
| | 5.9.2 Zusammenwirken von Ladungswechselanlage und Motorsteuerung | 644 |
| 5.10 | 5.10 Auslegung des Ladungswechsels von Zweitaktmotoren | 654 |
| | 5.10.1 Steuerung des Zweitaktmotors | 654 |
| | 5.10.2 Spülung | 657 |
| | 5.10.3 Abstimmung des Ladungswechsels von Zweitaktmotoren mit Kurbelkastenspülung und Schlitzsteuerung | 660 |
| | 5.10.3.1 Bemessung der Steuerquerschnitte | 661 |
| | 5.10.3.2 Auslegung des Ansaugrohrs | 667 |
| | 5.10.3.3 Auslegung der Auspuffanlage | 669 |
| | Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | 673 |
| 6 | 6 Aufladung (STEFFEN ZWAHR) | 687 |
| 6.1 | 6.1 Aufgaben und Anliegen | 687 |
| 6.2 | 6.2 Stationäre und dynamische Eigenschaften des aufgeladenen Motors | 688 |
| 6.3 | 6.3 Laderbauarten | 695 |
| | 6.3.1 Lader nach Verdrängerbauart | 695 |
| | 6.3.2 Lader nach Strömungsbauart | 701 |
| 6.4 | 6.4 Mechanische Aufladung | 703 |
| | 6.4.1 Grundlagen | 703 |
| | 6.4.2 Beispiel zur Laderanpassung | 707 |
| 6.5 | 6.5 Abgas-Turboaufladung | 712 |
| | 6.5.1 Abgas-Turbolader | 712 |
| | 6.5.2 Stau- und Stoßaufladung | 715 |
| | 6.5.3 Anpassung des Laders – Hauptgleichungen der Abgas-Turboaufladung | 717 |
| | 6.5.4 Beispiel zur Laderauswahl | 721 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.5.5 | Ladedruckregelung | 728 |
| 6.5.6 | Besonderheiten bei Ottomotoren | 731 |
| 6.6 | Ladeluftkühlung | 735 |
| 6.7 | Ausgewählte Sonderverfahren | 739 |
| 6.7.1 | Druckwellenlader | 740 |
| 6.7.2 | Modifikationen der Abgas-Turboaufladung | 742 |
| 6.8 | Möglichkeiten zur Verbrauchs- und Schadstoffverringerung an Otto- und Dieselmotoren | 746 |
| | <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | 749 |
| 7 | Motorakustik (WOLFGANG FOKEN) | 753 |
| 7.1 | Motorgeräusch und gesetzliche Vorschriften | 754 |
| 7.2 | Akustische Mess- und Auswertetechnik | 755 |
| 7.2.1 | Messgrößen des Schallfeldes | 755 |
| 7.2.2 | Auswertung von Schallsignalen | 755 |
| 7.2.3 | Messverfahren und Messräume | 757 |
| 7.3 | Geräuschentstehung, Weiterleitung und Abstrahlung | 759 |
| 7.3.1 | Teilschallquellen und Entstehungsmechanismen | 759 |
| 7.3.2 | Weiterleitung und Abstrahlung | 761 |
| 7.4 | Maßnahmen zur Geräuschrückbildung | 763 |
| 7.4.1 | Direkte Schallquellen | 763 |
| 7.4.2 | Indirekte Schallquellen | 765 |
| 7.5 | Berechnungsverfahren zur Simulation | 768 |
| 7.6 | Psychoakustik und Sound-Design | 770 |
| 7.7 | Entwicklungstendenzen | 773 |
| | <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | 774 |
| 8 | Kühlsystem (MIRKO SIERAKOWSKI) | 777 |
| 8.1 | Strömungstechnische Grundlagen | 778 |
| 8.1.1 | Druckgleichung nach Bernoulli | 778 |
| 8.1.2 | Druckverlust und Strömungswiderstand | 779 |
| 8.1.3 | Strömungswiderstände von geraden Rohrleitungen, Krümmern, Querschnittsveränderungen und Verzweigungen | 782 |
| 8.1.4 | Kühlmittelstoffwerte | 783 |
| 8.1.4.1 | Wasser | 783 |
| 8.1.4.2 | Kühlmittelgemische | 783 |
| 8.1.4.3 | Luft | 787 |
| 8.2 | Wärmebilanz des Kühlsystems | 787 |
| 8.2.1 | Wärmestrom des Motors | 787 |
| 8.2.2 | Wärmestromverteilung im Kühlkreislauf | 790 |
| 8.3 | Flüssigkeitskühlung | 791 |
| 8.3.1 | Kühlungarten | 791 |
| 8.3.1.1 | Pumpenumlaufkühlung | 791 |
| 8.3.1.2 | Druckkühlung | 793 |
| 8.3.1.3 | Thermosiphonkühlung | 794 |
| 8.3.1.4 | Verdampfungskühlung | 795 |
| 8.3.1.5 | Kühlung mit unterschiedlichem Temperaturniveau | 796 |
| 8.3.2 | Kühlmittelpumpen | 797 |
| 8.3.2.1 | Aufbau und Arten von Kfz-Kühlmittelpumpen | 797 |
| 8.3.2.2 | Kühlmittelseitige Abdichtung der Kühlmittelpumpe | 799 |
| 8.3.2.3 | Auslegung, Berechnung und Kennwerte von Kühlmittelpumpen | 801 |
| 8.3.2.4 | Kavitationsuntersuchungen an Kühlmittelpumpen | 805 |
| 8.3.2.5 | Regelbare Kühlmittelpumpen | 807 |
| 8.3.3 | Flüssigkeitskühler | 809 |
| 8.3.3.1 | Allgemeines | 809 |

| | | |
|---|---|-----|
| • 8.3.3.2 | Rippenrohrkühler | 810 |
| 8.3.3.3 | Lamellenkühler | 811 |
| 8.3.3.4 | Kühlerwerkstoffe | 811 |
| 8.3.3.5 | Spezifische Kühlleistung und Wärmedurchgangszahl | 812 |
| 8.3.3.6 | Kühlluftseitiger Strömungswiderstand | 816 |
| 8.3.3.7 | Kühlmittelseitiger Strömungswiderstand | 817 |
| 8.3.4 | Öl-Kühlmittel-Wärmetauscher | 819 |
| 8.3.5 | Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung | 820 |
| 8.3.5.1 | Charakteristik der Kühlkreislauf-Strömungswiderstände | 820 |
| 8.3.5.2 | Grundlagen zur Verkettung von Kühlkreislaufwiderständen | 822 |
| 8.3.5.3 | Numerische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung | 826 |
| 8.3.5.4 | Rechentechnische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung .. | 828 |
| 8.3.5.5 | Grafische Ermittlung der Volumenstrom- und Druckverteilung | 828 |
| 8.3.6 | Regelung des Kühlsystems – Wärmemanagement | 830 |
| 8.3.6.1 | Allgemeines | 830 |
| 8.3.6.2 | Kühlmittelseitige Regelung | 831 |
| 8.3.6.3 | Luftseitige Kühlsystemregelung | 833 |
| 8.3.7 | Auslegung von Kfz-Kühlsystemen | 837 |
| 8.3.7.1 | Allgemeines | 837 |
| 8.3.7.2 | Temperaturen im Kfz-Kühlsystem | 837 |
| 8.3.7.3 | Druckverteilung im Kühlkreislauf und Druckaufbau im Ausgleichbehälter | 840 |
| 8.3.7.4 | Vernetzung und Wärmebilanz des Kühlsystems | 843 |
| 8.3.7.5 | Ermittlung der erforderlichen Volumenströme | 843 |
| 8.3.7.6 | Festlegung der kühlmittelseitigen Strömungswiderstände | 843 |
| 8.3.7.7 | Auswahl der Kühlmittelpumpe | 845 |
| 8.3.7.8 | Kavitationsuntersuchungen an Kühlkreislaufbauteilen | 845 |
| 8.3.7.9 | Simulierter Motorbetrieb | 847 |
| 8.3.7.10 | Prüfstandsuntersuchungen bei Motorbetrieb | 848 |
| 8.3.7.11 | Luftseitige Auslegung von Kühler und Heizungswärmetauscher | 849 |
| 8.3.7.12 | Ermittlung des Kühlstroms und der Kühlerabmessung | 849 |
| 8.3.7.13 | Ermittlung der kühlluftseitigen Strömungswiderstände | 851 |
| 8.3.7.14 | Auswahl des Kühllüfters unter Berücksichtigung des Stauseinflusses | 851 |
| 8.3.7.15 | Auswahl der Lüfterregeleinrichtung | 854 |
| 8.3.7.16 | Simulierter kühlluftseitiger Motorbetrieb | 854 |
| 8.3.7.17 | Windkanal und Fahrversuche | 855 |
| 8.4 | Luftkühlung | 856 |
| 8.4.1 | Vergleich von Flüssigkeits- und Luftkühlung | 856 |
| 8.4.2 | Wärmeübergang von Brenngasen zur Kühlluft | 856 |
| 8.4.3 | Verrippungsprobleme | 860 |
| 8.4.3.1 | Wärmeübergang | 860 |
| 8.4.3.2 | Erwärmung der Kühlluft im Rippenkanal | 861 |
| 8.4.4 | Strömungsverhältnisse | 863 |
| 8.4.4.1 | Strömung der Kühlluft im Rippenkanal | 863 |
| 8.4.4.2 | Einfluss der Kühlluftführung am Zylinder | 866 |
| 8.4.4.3 | Kühlluftwiderstände, Leistungsbedarf, Lüfteranordnung | 866 |
| 8.4.5 | Auswahl des Kühlüfters | 868 |
| Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | | 869 |
| 9 | Filtration (MICHAEL DURST, GUNNAR-MARCEL KLEIN, NIKOLAUS MOSER) | 873 |
| 9.1 | Einleitung | 873 |
| 9.2 | Grundlagen der Filtration in Kraftfahrzeugen | 878 |
| 9.2.1 | Systematik der mechanischen Trenntechnik | 878 |
| 9.2.2 | Beschreibung von dispersen Partikelsystemen | 879 |

| | | |
|--|---|------|
| 9.2.3 | Trenngrad, Fraktionsabscheidegrad und Filterfeinheit | 881 |
| 9.2.4 | Filterstandzeit und Schmutzkapazität | 884 |
| 9.2.5 | Quellen und Beschreibung der abzutrennenden Partikel | 884 |
| 9.2.6 | Abscheidemechanismen | 885 |
| 9.3 | Filtration von Motoransaugluft | 892 |
| 9.3.1 | Aufgaben der Motoransaugluft-Filtration | 892 |
| 9.3.2 | Methoden zur Untersuchung von Luftfiltermedien | 900 |
| 9.3.3 | Luftfiltermedien | 905 |
| 9.3.4 | Auslegungskriterien für Luftfilterelemente | 910 |
| 9.3.5 | Luftfilterbauformen | 913 |
| 9.4 | Abscheidung von Öltröpfchen aus Blow-by-Gasen | 922 |
| 9.4.1 | Aufgaben der Kurbelgehäuseentlüftung | 923 |
| 9.4.2 | Abscheideverfahren und ausgeführte Beispiele | 924 |
| 9.5 | Filtration von Motorenöl | 928 |
| 9.5.1 | Aufgaben der Ölfiltration und Einfluss auf den Verschleiß | 928 |
| 9.5.2 | Filtermedien zur Schmierölfiltration – Filterfeinheit und chemische Beständigkeit | 933 |
| 9.5.3 | Hauptstromölfiltration | 941 |
| 9.5.4 | Nebenstromölfiltration | 944 |
| 9.5.5 | Ölfiltermodule | 947 |
| 9.6 | Filtration von Kraftstoff | 950 |
| 9.6.1 | Aufgaben der Kraftstofffiltration – Schutz des Einspritzsystems | 950 |
| 9.6.2 | Prüfverfahren und Spezifikationen für Kraftstofffilter | 957 |
| 9.6.3 | Filtermedien und Filterelemente | 970 |
| 9.6.4 | Kraftstofffilter und Kraftstofffiltermodule – Übersicht und Bauformen .. | 977 |
| <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | | 984 |
| 10 | Kurbeltrieb (WERNER HOFFMANN) | 987 |
| 10.1 | Beschreibung der Bewegungsvorgänge | 988 |
| 10.2 | Kräfte und Kraftwirkungen im Kurbeltrieb | 999 |
| 10.2.1 | Kräfte am Kolben | 1002 |
| 10.2.2 | Kräfte und Kraftwirkungen der Pleuelstange | 1006 |
| 10.2.3 | Kräfte am Kolbenbolzen | 1021 |
| 10.2.4 | Kräfte und Kraftwirkungen am Kurbelzapfen | 1026 |
| 10.2.5 | Kräfte an den Wellenzapfen (Grundlagerkräfte) | 1033 |
| 10.3 | Massenkräfte und Massenkraftwirkungen am Motor | 1037 |
| 10.3.1 | Massenkräfte beim Einzylindermotor | 1037 |
| 10.3.2 | Bewertung des natürlichen Massenausgleichs bei Mehrzylindermotoren .. | 1048 |
| 10.4 | Belastungen und Beanspruchungen der Kurbelwelle | 1064 |
| 10.5 | Ungleichförmigkeitsgrad und Schwungrad | 1071 |
| 10.6 | Schwingungsvorgänge | 1079 |
| 10.6.1 | Grundlagen | 1081 |
| 10.6.2 | Drehschwingungsprobleme | 1098 |
| 10.6.2.1 | Drehschwingungersatzsystem | 1098 |
| 10.6.2.2 | Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen | 1112 |
| 10.6.2.3 | Erregende Kräfte | 1119 |
| 10.6.2.4 | Resonanzdrehzahlen | 1124 |
| 10.6.2.5 | Resonanzausschläge | 1125 |
| 10.6.3 | Maßnahmen gegen Drehschwingungen | 1138 |
| 10.6.3.1 | Natürliche Maßnahmen | 1139 |
| 10.6.3.2 | Zusatzeinrichtungen | 1141 |
| 10.6.3.3 | Vermeiden von Drehschwingungen an Motorenprüfständen und bei Aggregaten | 1149 |
| <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | | 1153 |

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 11 | Triebwerkslagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren (HEINZ GLÄSER) | 1165 |
| 11.1 | Aufgabe und Wirkungsweise von Lagerungen | 1165 |
| 11.2 | Arten der Lager im Verbrennungsmotor und ihre Belastung | 1168 |
| 11.3 | Hydrodynamische Berechnung der Radialgleitlager | 1171 |
| 11.3.1 | Theoretische Grundlagen | 1171 |
| 11.3.1.1 | Begriffsbestimmung | 1171 |
| 11.3.1.2 | Hydrodynamischer Druckaufbau | 1171 |
| 11.3.2 | Berechnung der Wellenverlagerungsbahn | 1180 |
| 11.3.3 | Berechnung der Reibungsleistung | 1189 |
| 11.3.4 | Berechnung der Öldurchsatzmenge | 1195 |
| 11.3.5 | Wärmebilanz | 1206 |
| 11.3.6 | Maximaler Schmierschichtdruck | 1209 |
| 11.3.7 | Umwandlung der raumfesten in körperfeste Koordinaten | 1215 |
| 11.3.7.1 | Grundlager | 1215 |
| 11.3.7.2 | Pleuellager | 1216 |
| 11.3.7.3 | Kolbenbolzenlager | 1217 |
| 11.3.8 | Winkelgeschwindigkeiten der Lager eines Kurbeltriebes | 1217 |
| 11.4 | Auslegung von Verbrennungsmotoren-Gleitlagern | 1218 |
| 11.4.1 | Bedeutung und Möglichkeiten der Lagerauslegung | 1218 |
| 11.4.2 | Rechenprogramme zur Auslegung dynamisch beanspruchter Radialgleitlager | 1222 |
| 11.4.2.1 | Einfache und komplexe Rechenprogramme, EHD- und TEHD-Berechnung | 1222 |
| 11.4.2.2 | Programminhalt und Leistungsumfang des Rechenprogramms LAGER95 | 1225 |
| 11.4.3 | Einflussgrößen bei der Lagerauslegung | 1230 |
| 11.4.3.1 | Einfluss des Betriebszustandes | 1230 |
| 11.4.3.2 | Einfluss des Schmierstoffes und des relativen Lagerspiels | 1235 |
| 11.4.3.3 | Einfluss von Ölzuführungstemperatur und Ölzführungsdruck | 1237 |
| 11.4.3.4 | Art und Lage der Ölzführung | 1242 |
| 11.4.3.5 | Steifigkeit von Welle, Lager und lagerumgebenden Bauteilen | 1246 |
| 11.4.3.6 | Einfluss der Kurbelwellengestaltung (Massenausgleich) | 1248 |
| 11.4.4 | Schlussfolgerungen für die Lagerauslegung aus der Anwendung von Rechenprogrammen | 1250 |
| 11.4.5 | Konstruktive Gestaltung der Lager von Motoren | 1252 |
| 11.5 | Werkstoffe und Konstruktionsgrundsätze für Kfz-Motoren-Gleitlager | 1260 |
| 11.5.1 | Anforderungen, Eigenschaften und Werkstoffgruppen | 1260 |
| 11.5.2 | Herstellung und Bauformen dünnwandiger einbaufertiger Lagerschalen und Buchsen | 1264 |
| 11.5.3 | Konstruktive Grundsätze bei der Anwendung dünnwandiger einbaufertiger Lagerschalen | 1274 |
| 11.5.3.1 | Gehäusebohrung, Lagerspiel, Spreizung, Freiräumung | 1274 |
| 11.5.3.2 | Pressitz der Lagerschalen in der Gehäusebohrung und Lagerspielveränderung im Betriebsbereich des Motors | 1277 |
| 11.6 | Schmierstoffe für Kraftfahrzeugmotoren | 1283 |
| 11.6.1 | Aufgaben und Klassifikation der Motorenöle | 1284 |
| 11.6.2 | Viskosität von Ölen | 1291 |
| 11.6.3 | Additive | 1293 |
| 11.6.4 | Ölprüfung, Ölwechsel, Ölverbrauch | 1295 |
| 11.7 | Axiallagerung | 1297 |
| 11.8 | Wälzgelagertes Triebwerk | 1299 |
| 11.9 | Schmiersystem | 1304 |
| 11.9.1 | Funktion, Bestandteile und grundsätzliche Wirkungsweise | 1304 |
| 11.9.2 | Schmierstoffbehälter, Ansaugen und Rückführung des Öls | 1305 |

| | | |
|-----------|--|------|
| 11.9.3 | Schmierstoffkühlung | 1306 |
| 11.9.4 | Schmierstoffförderung, Versorgung der Schmierstellen | 1307 |
| 11.9.5 | Zweitaktmotoren-Schmierung | 1311 |
| 11.10 | Schäden und Veränderungen an Verbrennungsmotoren-Gleitlagern | 1312 |
| 11.10.1 | Schäden und Veränderungen am Lagermetall oder an der Drittschicht | 1313 |
| 11.10.1.1 | Verschleiß | 1313 |
| 11.10.1.2 | Verschmutzung | 1318 |
| 11.10.1.3 | Überhitzung | 1319 |
| 11.10.1.4 | Ermüdung | 1320 |
| 11.10.1.5 | Erosion | 1322 |
| 11.10.1.6 | Kavitation | 1322 |
| 11.10.1.7 | Tribochemische Reaktion, Korrosion | 1325 |
| 11.10.1.8 | Einbaufehler | 1327 |
| 11.10.1.9 | Fehler des Lagerherstellers | 1328 |
| 11.10.2 | Schäden an der Stahlstützschale | 1329 |
| 11.10.2.1 | Reiboxidation am Schalenrücken | 1329 |
| 11.10.2.2 | Stürzschalenbruch | 1330 |
| 11.10.2.3 | Stoßflächenbeschädigung | 1331 |
| 11.10.2.4 | Spreizungsverlust | 1331 |
| 11.10.3 | Austausch von Lagern | 1331 |
| | <i>Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen</i> | 1332 |
| 12 | Konstruktion von Verbrennungsmotoren und deren Bauteilen (WERNER HOFFMANN) | 1337 |
| 12.1 | Zylinderkopf (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER) | 1357 |
| 12.1.1 | Aspekte der funktionell-konstruktiven Gestaltung | 1357 |
| 12.1.2 | Werkstoffe | 1370 |
| 12.1.3 | Gießverfahren und Herstellung von Zylinderköpfen | 1372 |
| 12.1.4 | Belastungen und Beanspruchungen bei Zylinderköpfen | 1375 |
| 12.1.5 | Auslegung und Gestaltung der Ladungswechselkanäle | 1381 |
| 12.2 | Zylinder und Kurbelgehäuse (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER) | 1401 |
| 12.2.1 | Grundsätzliche Aufgaben, Funktionen und Anforderungen | 1401 |
| 12.2.2 | Ausführungsformen von Zylinder, Kurbelgehäuse und Lagerung Kurbelwelle | 1405 |
| 12.2.3 | Einfluss der Kurbelgehäusegestaltung auf Steifigkeit, Belastbarkeit, Deformationen und Montagebedingungen | 1414 |
| 12.2.4 | Werkstoffe | 1421 |
| 12.2.5 | Gießverfahren, Gestaltungsmerkmale und Besonderheiten von Zylinderkurbelgehäusen | 1423 |
| 12.2.6 | Ausgewählte konstruktive Details und Lösungen | 1426 |
| 12.2.7 | Entwicklung stark belastbarer massearmer Kurbelgehäuse | 1451 |
| 12.3 | Zylinderkopfdichtung (WERNER HOFFMANN, HEIKO NEUKIRCHNER, PIERRE MIRAN, Dr. ANDRÉ SIMONNEAU, ALAIN SCHMITT, JEAN MARC CHERIERE) | 1454 |
| 12.3.1 | Dichtungskonzepte | 1455 |
| 12.3.2 | Rechnerische Auslegung einer Abdichtung mit Verschraubungen | 1464 |
| 12.4 | Kolben (UWE MOHR, HORST SCHÄDLICH) | 1476 |
| 12.4.1 | Aufgaben und Anforderungen | 1476 |
| 12.4.1.1 | Einführung und Begriffe | 1476 |
| 12.4.1.2 | Kolbenbelastung | 1478 |
| 12.4.1.3 | Kolbenbeanspruchung | 1487 |
| 12.4.2 | Hauptabmessungen und Gestaltung | 1496 |
| 12.4.3 | Werkstoffe und Herstellung | 1504 |
| 12.4.3.1 | Aluminiumlegierungen | 1504 |
| 12.4.3.2 | Gusseisenlegierungen | 1506 |
| 12.4.3.3 | Stähle | 1506 |

| | | |
|------------|--|------|
| • 12.4.3.4 | Alternative Kolbenwerkstoffe | 1506 |
| 12.4.4 | Kolbenaußenkontur | 1506 |
| 12.4.5 | Kolbenkühlung | 1509 |
| 12.4.6 | Kolbenringe | 1512 |
| 12.4.6.1 | Aufgaben und Anforderungen | 1512 |
| 12.4.6.2 | Funktion | 1513 |
| 12.4.6.3 | Klassifizierung und Ausführungsformen | 1515 |
| 12.4.6.4 | Bewertungskenngrößen | 1517 |
| 12.4.6.5 | Werkstoffe | 1524 |
| 12.4.6.6 | Herstellung | 1525 |
| 12.4.7 | Kolbenbolzen | 1526 |
| 12.4.7.1 | Funktion und Anforderungen | 1526 |
| 12.4.7.2 | Hauptabmessungen und Gestaltung | 1527 |
| 12.4.7.3 | Berechnung | 1529 |
| 12.4.7.4 | Werkstoffe und Herstellung | 1537 |
| 12.4.8 | Kolbenbolzensicherungen | 1539 |
| 12.5 | Pleuel (WERNER HOFFMANN) | 1541 |
| 12.5.1 | Aspekte der funktionell-konstruktiven Gestaltung | 1541 |
| 12.5.2 | Ausgewählte Werkstoffe, Herstellung von Rohteilen und fertigen Pleueln | 1551 |
| 12.5.3 | Auslegung von Pleuelstangen (WERNER HOFFMANN, BERND HÄNEL) | 1555 |
| 12.6 | Kurbelwelle (WERNER HOFFMANN) | 1581 |
| 12.6.1 | Aufgaben, Funktion und Anforderungen | 1581 |
| 12.6.2 | Motorspezifische Ausführungsformen | 1582 |
| 12.6.3 | Kurbelwellendesign – Entwurf und Hauptabmessungen | 1587 |
| 12.6.4 | Werkstoffe und Herstellung von Kurbelwellen-Rohteilen | 1589 |
| 12.6.5 | Bearbeitung von Kurbelwellen-Rohteilen zu Fertigteilen | 1592 |
| 12.6.6 | Rechnerischer Dauerfestigkeitsnachweis für Kurbelwellen (BERND HÄNEL, WERNER HOFFMANN) | 1596 |
| 12.6.6.1 | Belastungen an einer Kurbelkröpfung | 1596 |
| 12.6.6.2 | Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Nennspannungskonzept für die Hohlkehle zwischen Kurbelzapfen und Kurbelwange | 1605 |
| 12.6.6.3 | Dauerfestigkeitsnachweis nach dem örtlichen Spannungskonzept für die Hohlkehle zwischen Kurbelzapfen und Kurbelwange | 1614 |
| 12.6.6.4 | Dauerfestigkeitsnachweis nach dem Nennspannungskonzept für die Ölbohrung des Kurbelzapfens | 1618 |
| 12.6.6.5 | Dauerfestigkeitsnachweis nach dem örtlichen Spannungskonzept für die Ölbohrung des Kurbelzapfens | 1623 |
| 12.6.7 | Bewertung der Auslegungskonzepte und Ergänzungen zum Auslegungsbeispiel (WERNER HOFFMANN) | 1626 |
| 12.6.8 | Experimentelle Dauerfestigkeitserprobung | 1631 |
| | Verwendete Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen | 1633 |
| 13 | Virtuelle Produktentwicklung (ERNST BEUTNER, HEIKO NEUKIRCHNER) | 1651 |
| 13.1 | Vorbemerkungen | 1651 |
| 13.2 | Der Produktentwicklungsprozess im Wandel | 1651 |
| 13.2.1 | Von technischen Berechnungen zur virtuellen Bauteilentwicklung | 1651 |
| 13.2.2 | Vom hardwareorientierten zum simulationsgestützten Entwicklungsprozess | 1652 |
| 13.3 | Produktbezogene Daten | 1654 |
| 13.3.1 | Datenmodelle | 1654 |
| 13.3.2 | Generierung der Produktmodelle | 1656 |
| 13.3.2.1 | Direkte Geometriemodellierung | 1656 |
| 13.3.2.2 | Reverse Engineering | 1659 |

| | | |
|----------|---|------|
| 13.3.3 | Datenmanagement | 1660 |
| 13.3.4 | Digital Mock-Up (DMU)/Virtual Reality (VR) | 1662 |
| 13.4 | Simulationsgestützte Bauteilentwicklung | 1665 |
| 13.4.1 | Allgemeines | 1665 |
| 13.4.2 | Methoden der Berechnung und Simulation | 1665 |
| 13.4.2.1 | Mehrkörpersysteme (MKS) | 1667 |
| 13.4.2.2 | Finite-Elemente-Methoden (FEM) | 1668 |
| 13.4.2.3 | Strömungssimulation | 1670 |
| 13.4.3 | Funktionsorientierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung | 1673 |
| 13.4.3.1 | Grundmechanik | 1673 |
| 13.4.3.2 | Ladungswechsel, Arbeitsprozess | 1680 |
| 13.4.3.3 | Gemischbildung, Verbrennung, Abgasnachbehandlung | 1683 |
| 13.4.3.4 | Festigkeit, Lebensdauer | 1686 |
| 13.4.3.5 | Akustik | 1689 |
| 13.4.3.6 | Öl-/Kühlmittelkreisläufe, Kraftstoffsysteme | 1691 |
| 13.4.3.7 | Motorsimulation | 1694 |
| 13.4.4 | Fertigungsorientierte simulationsgestützte Bauteilentwicklung | 1695 |
| 13.4.4.1 | Toleranzmanagement | 1696 |
| 13.4.4.2 | Gießsimulation | 1697 |
| 13.4.4.3 | Einbau- und Montagesimulation | 1699 |
| 13.5 | Rapid Prototyping (RP) | 1700 |
| 13.6 | Wissensmanagement | 1701 |
| 13.7 | Infrastruktur der Informationstechnologie (IT) | 1704 |
| | <i>Verwendete Abkürzungen</i> | 1705 |
| | <i>Literaturverzeichnis</i> | 1708 |
| | <i>Stichwortverzeichnis</i> | 1755 |