

Richard van Basshuysen/
Fred Schäfer (Hrsg.)

Handbuch Verbrennungsmotor

Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven

3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 1436 Abbildungen

ATZ/MTZ Fachbuch



Inhaltsverzeichnis

1	Geschichtlicher Rückblick	1
2	Definition und Einteilung der Hubkolbenmotoren	9
2.1	Definitionen	9
2.2	Möglichkeiten der Einteilung	10
2.2.1	Verbrennungsverfahren	10
2.2.2	Kraftstoff	10
2.2.3	Arbeitsverfahren	10
2.2.4	Gemischbildung	11
2.2.5	Ladungswechselsteuerung	11
2.2.6	Ladungseinbringung	11
2.2.7	Bauform	11
2.2.8	Zündung	12
2.2.9	Kühlung	12
2.2.10	Lastregelung	13
2.2.11	Einsatzzweck	13
2.2.12	Drehzahl- und Leistungsabstufung	14
3	Kenngrößen	15
3.1	Hubvolumen	15
3.2	Verdichtungsverhältnis	16
3.3	Drehzahl und Kolbengeschwindigkeit	17
3.4	Drehmoment und Leistung	18
3.5	Kraftstoffverbrauch	19
3.6	Gasarbeit und Mitteldruck	20
3.7	Wirkungsgrad	23
3.8	Luftdurchsatz und Zylinderfüllung	23
3.9	Luft-Kraftstoff-Verhältnis	24
4	Kennfelder	27
4.1	Verbrauchskennfelder	28
4.2	Emissionskennfelder	29
4.3	Zündungs- und Einspritzkennfelder	32
4.4	Abgastemperaturkennfelder	33
5	Thermodynamische Grundlagen	35
5.1	Kreisprozesse	35
5.2	Vergleichsprozesse	37
5.2.1	Einfache Modellprozesse	37
5.2.1.1	Der Gleichraumprozess	37
5.2.1.2	Gleichdruckprozess	37
5.2.1.3	Seiliger Prozess	39
5.2.1.4	Vergleichende Betrachtung der Kreisprozesse	39
5.2.2	Exergieverluste	39
5.3	Offene Vergleichsprozesse	40
5.3.1	Arbeitsprozess des vollkommenen Motors	40
5.3.1.1	Grundlagen der Berechnung	40
5.3.1.2	Arbeit des vollkommenen Motors	42
5.3.1.3	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors	42
5.3.1.4	Exergieverlust beim vollkommenen Prozess	43
5.3.2	Annäherung an den realen Arbeitsprozess	43
5.3.2.1	Nulldimensionale Modelle	43
5.3.2.2	Mehrdimensionale Modelle	45
5.4	Wirkungsgrade	46
5.5	Energiebilanz am Motor	47
5.5.1	Bilanzgleichung	47

6	Triebwerk	49
6.1	Kurbeltrieb	49
6.1.1	Aufbau und Funktion	49
6.1.2	Kräfte am Kurbeltrieb	53
6.1.3	Tangentialkraftverlauf und mittlere Tangentialkraft	59
6.1.4	Massenkräfte	61
6.1.4.1	Massenkräfte am Einzylinder-Triebwerk	62
6.1.4.2	Massenkräfte am 2-Zylinder-V-Triebwerk	63
6.1.4.3	Massenkräfte und Massenmomente bei Mehrzylinder-Triebwerken	66
6.1.4.4	Beispiel	66
6.1.5	Massenausgleich	68
6.1.5.1	Ausgleich am Einzylinder-Triebwerk	68
6.1.5.2	Ausgleich am Mehrzylinder-Triebwerk	69
6.1.6	Innere Momente	71
6.1.7	Kröpfungs- und Zündfolgen	72
6.2	Drehschwingungen	73
6.2.1	Grundlagen	73
6.2.2	Reduktion der Maschinenanlage	74
6.2.3	Eigenschwingungszahlen (Eigenfrequenzen) und Eigenschwingungsformen	75
6.2.4	Erregerkräfte und Erregerarbeit	76
6.2.5	Maßnahmen zur Verringerung der Kurbelwellenausschläge	78
6.2.6	Zweimassenschwungräder	79
6.3	Variabilität von Verdichtung und Hubvolumen	81
6.3.1	Variables Hubvolumen	81
6.3.2	Variable Verdichtung	81
7	Motorkomponenten	84
7.1	Kolben/Kolbenbolzen/Kolbenbolzensicherung	84
7.1.1	Kolben	84
7.1.1.1	Anforderungen und Funktion	84
7.1.1.2	Konstruktive Gestaltung	84
7.1.1.3	Desachsierung der Nabenbohrung	86
7.1.1.4	Einbau- und Laufspiele	87
7.1.1.5	Kolbenmassen	87
7.1.1.6	Betriebstemperaturen	88
7.1.1.7	Kolbenkühlung	88
7.1.1.8	Kolbenbauarten	89
7.1.1.9	Kolbenherstellung	93
7.1.1.10	Laufflächenschutz/Oberflächenschutz	94
7.1.1.11	Kolbenwerkstoffe	95
7.1.2	Kolbenbolzen	96
7.1.2.1	Funktion	96
7.1.2.2	Bauarten	97
7.1.2.3	Anforderung und Dimensionierung	97
7.1.2.4	Werkstoffe	98
7.1.3	Kolbenbolzensicherungen	98
7.2	Pleuel	99
7.2.1	Aufbau des Pleuels	99
7.2.2	Belastung	100
7.2.3	Pleuelverschraubung	101
7.2.4	Gestaltung	101
7.2.4.1	Pleuelstangenverhältnis	102
7.2.5	Pleulfertigung	102
7.2.5.1	Rohteileherstellung	102
7.2.5.2	Bearbeitung	103
7.2.6	Pleuel-Werkstoffe	104
7.3	Kolbenringe	105
7.3.1	Ausführungsformen	106
7.3.1.1	Verdichtungsringe	106
7.3.1.2	Ölabstreifringe	107
7.3.2	Ringbestückungen	109
7.3.3	Kenngrößen	109

7.3.4	Herstellung.....	111
7.3.4.1	Formgebung.....	111
7.3.4.2	Verschleißschutzschichten.....	112
7.3.4.3	Oberflächenbehandlungen.....	113
7.3.4.4	Werkstoffe für Kolbenringe.....	113
7.3.5	Beanspruchung, Schäden, Verschleiß, Reibung.....	113
7.4	Kurbelgehäuse.....	114
7.4.1	Aufgaben und Funktionen.....	114
7.4.2	Gestaltung von Zylinderkurbelgehäusen.....	116
7.4.2.1	Kurbelgehäusebauart.....	116
7.4.3	Optimierung der Akustik.....	121
7.4.4	Minimierung der Kurbelgehäusemasse.....	122
7.4.5	Gießverfahren für Kurbelgehäuse.....	124
7.4.5.1	Druckguss.....	124
7.4.5.2	Kokillenguss.....	124
7.4.5.3	Lost-Foam-Verfahren.....	125
7.4.5.4	Sandguss.....	125
7.4.5.5	Squeeze Casting.....	125
7.5	Zylinder.....	126
7.5.1	Gestaltung von Zylindern.....	126
7.5.1.1	Monometall-Bauart.....	126
7.5.1.2	Einsatztechnik.....	127
7.5.1.3	Verbundtechnik.....	128
7.5.2	Bearbeitung von Zylinderlaufflächen.....	129
7.5.2.1	Bearbeitungsverfahren.....	129
7.5.3	Zylinderkühlung.....	131
7.5.3.1	Flüssigkeitskühlung.....	131
7.5.3.2	Luftkühlung.....	131
7.6	Ölwanne.....	132
7.6.1	Ölwannenbauart.....	133
7.7	Kurbelgehäuseentlüftung.....	133
7.7.1	Gesetzliche Randbedingungen.....	133
7.7.2	Technische Anforderungen.....	134
7.7.3	Systemaufbau aktueller Kurbelgehäuseentlüftungssysteme.....	137
7.7.4	Ölnebelabscheidung.....	137
7.7.5	Kurbelgehäusedruckregelung.....	141
7.7.6	Module und Ventilhaubenintegration.....	143
7.8	Zylinderkopf.....	144
7.8.1	Grundauslegung des Zylinderkopfes.....	144
7.8.1.1	Auslegung der Grundgeometrie.....	144
7.8.1.2	Festlegung der Fertigungsverfahren.....	145
7.8.1.3	Auslegung der Gaswechsellorgane.....	145
7.8.1.4	Variable Ventilsteuerungen.....	146
7.8.2	Die Konstruktion des Zylinderkopfes.....	146
7.8.2.1	Auslegung der Grobabmessungen.....	146
7.8.2.2	Brennraum- und Kanalauslegung.....	147
7.8.2.3	Ventiltriebsauslegung.....	149
7.8.2.4	Kühlkonzepte.....	150
7.8.2.5	Ölhaushalt.....	150
7.8.2.6	Konstruktive Detailauslegungen.....	151
7.8.2.7	Konstruktion in Baustufen.....	151
7.8.2.8	CAD-Einsatz in der Konstruktion.....	152
7.8.2.9	Rechnergestützte Auslegung.....	152
7.8.3	Gießverfahren.....	155
7.8.3.1	Sandguss.....	155
7.8.3.2	Kokillenguss.....	157
7.8.3.3	Lost Foam-Verfahren (Vollform-Verfahren).....	158
7.8.3.4	Druckgussverfahren.....	159
7.8.4	Modell- und Formenbau.....	159
7.8.5	Mechanische Bearbeitung und Qualitätssicherung.....	160
7.8.5.1	Großserienfertigung.....	160
7.8.5.2	Prototypenfertigung.....	161
7.8.5.3	Qualitätssicherung der Zylinderköpfe.....	161

7.8.6	Ausgeführte Bauformen von Zylinderköpfen	161
7.8.6.1	Zylinderköpfe an Ottomotoren	161
7.8.6.2	Zylinderköpfe an Dieselmotoren	164
7.8.6.3	Sonderbauformen von Zylinderköpfen	165
7.8.7	Perspektiven in der Zylinderkopftechnik	167
7.9	Kurbelwellen	168
7.9.1	Funktion im Fahrzeug	168
7.9.1.1	Kurbelwellen im Hubkolbenmotor	168
7.9.1.2	Anforderungen	168
7.9.2	Herstellung und Eigenschaften	169
7.9.2.1	Verfahren und Werkstoffe	169
7.9.2.2	Werkstoffliche Eigenschaften von Kurbelwellen	171
7.9.3	Leichtbau und Verfahren zur Steigerung der Festigkeit	171
7.9.3.1	Hohlgegossene Kurbelwellen	172
7.9.3.2	ADI Austempered Ductil Iron	172
7.9.3.3	Erhöhung der Bauteilfestigkeit durch Nachbehandlung	172
7.9.4	Berechnung von Kurbelwellen	173
7.10	Ventiltriebskomponenten	175
7.10.1	Standard Ventiltrieb	175
7.10.1.1	Ventiltriebe mit direktem Antrieb	175
7.10.1.2	Ventiltriebe mit indirektem Antrieb	176
7.10.1.3	Hydraulischer Ventilspielausgleich	178
7.10.1.4	Mechanische Ventilspieleinstellung	179
7.10.1.5	Variable Ventiltriebe	179
7.10.2	Riemenspannsysteme, Spann- und Umlenkrollen	186
7.10.2.1	Einführung	186
7.10.2.2	Automatische Riemenspannsysteme für Zahnriementriebe	186
7.10.2.3	Spann- und Umlenkrollen für Zahnriementriebe	187
7.10.2.4	Ausblick	187
7.10.3	Kettenspann- und Führungssysteme	188
7.10.3.1	Einführung	188
7.10.3.2	Kettenspannelement	188
7.10.3.3	Spann- und Führungsschienen	189
7.10.3.4	Kettenräder	190
7.11	Ventile	190
7.11.1	Funktion und Begriffserklärungen	190
7.11.2	Ventilarten und Fertigungsmethoden	191
7.11.2.1	Monometallventile	191
7.11.2.2	Bimetallventile	191
7.11.2.3	Hohlventile	191
7.11.3	Ausführungsformen	192
7.11.3.1	Ventilkopf	192
7.11.3.2	Ventilsitz	193
7.11.3.3	Ventilschaft	193
7.11.4	Ventilwerkstoffe	194
7.11.4.1	Wärmebehandlung	194
7.11.4.2	Oberflächenveredelung	194
7.11.5	Sonder-Ventilausführungen	194
7.11.5.1	Abgassteuerventile	195
7.11.6	Ventilkegelstücke	195
7.11.6.1	Aufgabe und Funktion	195
7.11.6.2	Fertigungsmethoden	196
7.11.7	Ventildrehvorrichtungen	196
7.11.7.1	Aufgabe	196
7.11.7.2	Bauarten und Funktion	196
7.12	Ventilfedern	197
7.13	Ventilsitzringe	200
7.13.1	Einleitung	200
7.13.2	Anforderungen an Ventilsitzringe	201
7.13.2.1	Ventilsitzbeanspruchungen	201
7.13.2.2	Werkstoffe und Eigenschaften	202
7.13.2.3	Geometrie und Toleranzen	205
7.13.2.4	Zylinderkopfgeometrie und -montage	207

7.14	Ventilführungen	208
7.14.1	Anforderungen an Ventilführungen	208
7.14.1.1	Ventilführungsbeanspruchungen	208
7.14.2	Werkstoffe und Eigenschaften	210
7.14.2.1	Werkstoffe	210
7.14.2.2	Werkstoffeigenschaften	211
7.14.3	Geometrie Ventilführung	214
7.14.4	Zylinderkopfmontage	215
7.15	Ölpumpe	215
7.15.1	Übersicht Ölpumpensysteme	216
7.15.1.1	Innenzahnradpumpe	216
7.15.1.2	Außenzahnradpumpe	218
7.15.1.3	Flügelzellenpumpe	219
7.15.1.4	Vor- und Nachteile der einzelnen Pumpensysteme	219
7.15.2	Regelprinzipien	221
7.15.2.1	Direkte Regelung	221
7.15.2.2	Indirekte Regelung	222
7.15.2.3	Reinölseitige Abregelung	222
7.15.2.4	Zwei- oder Mehrstufenregelung	222
7.15.2.5	Registerregelpumpe	222
7.15.3	Volumenstrom – Regelumpen	223
7.15.3.1	Innenzahnrad Regelpumpe (Volumenstromvariable Zahnringpumpe)	223
7.15.3.2	Außenzahnrad Volumenstrom Regelpumpe	224
7.15.3.3	Flügelzellenpumpe	224
7.15.4	Konstruktionsgrundlage	224
7.15.4.1	Kurbelwellenpumpe	225
7.15.4.2	Sumpfpumpe	226
7.15.4.3	Ölpumpenkennwerte aus der Praxis	227
7.15.4.4	Vergleich zwischen Kurbelwelle und Sumpfpumpe	227
7.15.4.5	Kavitation und Geräuschemission	229
7.15.5	Berechnung	231
7.15.5.1	Numerische Strömungssimulation CFD	231
7.15.5.2	Eindimensionale Simulation von Strömungsnetzwerken	233
7.16	Nockenwelle	233
7.16.1	Aufgaben der Nockenwelle	233
7.16.2	Ventiltriebkonfigurationen	234
7.16.3	Aufbau einer Nockenwelle	235
7.16.4	Technologien und Werkstoffe	236
7.16.4.1	Gussnockenwelle	236
7.16.4.2	Gebaute Nockenwelle	237
7.16.4.3	Stahlnockenwelle	237
7.16.4.4	Werkstoffeigenschaften und empfohlene Paarungen	237
7.16.5	Massereduktion	238
7.16.6	Einflussfaktoren für Nockenwellenbelastung	239
7.16.7	Auslegung von Nockenprofilen	239
7.16.8	Kinematikrechnung	241
7.16.9	Dynamikrechnung	241
7.16.10	Nockenwellenverstellungssysteme	242
7.17	Kettentrieb	245
7.17.1	Kettenbauformen	246
7.17.2	Kettenkennwerte	247
7.17.3	Kettenräder	248
7.17.4	Kettenführungselemente	248
7.18	Riementriebe	249
7.18.1	Zahnriementriebe zum Antrieb von Nockenwellen	249
7.18.1.1	Antriebsselement Zahnriemen	250
7.18.1.2	Antriebssystem Zahnriemen	252
7.18.1.3	Zahnriementriebsdynamik	253
7.18.1.4	Anwendungsbeispiele	254
7.18.2	Keilrippenriementriebe zum Antrieb von Nebenaggregaten	254
7.18.2.1	Antriebsselement Micro V [®] -Riemen	255
7.18.2.2	Antriebssystem Nebenaggregatetrieb	256
7.18.2.3	Anwendungsbeispiele	257

7.19	Lager in Verbrennungsmotoren.....	257
7.19.1	Grundlagen	258
7.19.1.1	Radiallager	258
7.19.1.2	Axiallager	259
7.19.2	Berechnung und Dimensionierung von Motorlagern	260
7.19.2.1	Belastung	260
7.19.2.2	Zapfenverlagerungsbahn	261
7.19.2.3	Elastohydrodynamische Berechnung	261
7.19.2.4	Hauptdimensionen: Durchmesser, Breite	262
7.19.2.5	Ölführungsgeometrie	262
7.19.2.6	Feindimensionen	263
7.19.3	Lagerwerkstoffe	265
7.19.3.1	Lagermetalle	265
7.19.3.2	Laufschichten	267
7.19.4	Lagerbauarten – Aufbau, Belastbarkeit, Anwendung	269
7.19.4.1	Massivlager	269
7.19.4.2	Zweistofflager	270
7.19.4.3	Dreistoff-Lager	271
7.19.4.4	Miba-Rillenlager	271
7.19.4.5	Sputterlager	271
7.19.5	Lagerversagen	273
7.19.5.1	Hergang eines Schadens	273
7.19.5.2	Arten von Lagerschäden	273
7.19.6	Ausblick	274
7.20	Ansaugsysteme	275
7.20.1	Thermodynamik von Luftansaugsystemen	275
7.20.2	Akustik	278
7.21	Dichtsysteme	282
7.21.1	Zylinderkopfdichtungssysteme	282
7.21.1.1	Ferrolastic-Weichstoff-Zylinderkopfdichtungen	282
7.21.1.2	Metall-Elastomer-Zylinderkopfdichtungen	283
7.21.1.3	Metalllagen-Zylinderkopfdichtungen Metaloflex®	283
7.21.1.4	Ausblick	287
7.21.2	Spezialdichtungen	287
7.21.2.1	Funktionsbeschreibung der Flachdichtung	287
7.21.2.2	Weichstoffdichtungen	287
7.21.2.3	Metall-Weichstoff-Dichtungen	288
7.21.2.4	Spezialdichtungen aus Metaloseal®	288
7.21.2.5	Ausblick	291
7.21.3	Elastomer-Dichtsysteme	291
7.21.3.1	Elastomerdichtungen	292
7.21.3.2	Metall-Elastomer-Dichtungen	292
7.21.3.3	Module	293
7.21.4	Entwicklungsmethoden	294
7.21.4.1	Finite-Elemente-Analyse	295
7.21.4.2	Simulation im Labor – Funktions- und Lebensdauerprüfung	297
7.22	Verschraubungen am Motor	299
7.22.1	Hochfeste Schraubenverbindungen	299
7.22.2	Qualitätsanforderungen	299
7.22.3	Schraubverbindungen	300
7.22.3.1	Zylinderkopfschraube	300
7.22.3.2	Hauptlagerdeckelschraube	301
7.22.3.3	Pleuelschraube	302
7.22.3.4	Riemenscheibenschraube	304
7.22.3.5	Schwungradschraube	305
7.22.3.6	Nockenwellen-Lagerdeckelschraube	305
7.22.3.7	Ölwannenbefestigungsschraube	305
7.22.4	Verschrauben in Magnesiumbauteilen	306
7.22.5	Schraubenanziehverfahren	306
7.22.5.1	Drehmomentgesteuertes Anziehen	306
7.22.5.2	Drehwinkelgesteuertes Anziehen	307
7.22.5.3	Streckgrenzgesteuertes Anziehverfahren	308
7.23	Abgaskrümmen	308

7.23.1	Ablauf einer Krümmerentwicklung	310
7.23.2	Krümmer als Einzelkomponente	310
7.23.2.1	Gusskrümmer	310
7.23.2.2	Rohrkrümmer	311
7.23.2.3	Einfachwandige Halbschalenkrümmer	311
7.23.2.4	Luftspaltisolierte Krümmer (LSI-Krümmer)	312
7.23.3	Krümmer als Teilmodul	312
7.23.3.1	Krümmer und Katalysator integriert	312
7.23.3.2	Krümmer und Turbolader integriert	313
7.23.4	Krümmer-Komponenten	313
7.24	Kühlmittelpumpen für Verbrennungsmotoren	314
7.24.1	Anforderungen, Bauarten und konstruktiver Aufbau	314
7.24.2	Flügelrad und Spiralkanal	315
7.24.3	Gleitringdichtung	316
7.24.4	Kennfeld und Ähnlichkeitsbeziehungen der Kühlmittelpumpe	317
7.24.5	Kavitation	319
7.24.6	Drehzahleregelte Kühlmittelpumpen	320
7.25	Steuerorgane des Zweitaktmotors	321
8	Motoren	325
8.1	Aktuelle Motoren	325
8.8.1	Allgemeine Entwicklungstendenzen	325
8.8.2	Ausgeführte Motoren	326
8.1.2.1	Dieselmotoren	326
8.1.2.2	Ottomotoren	330
8.2	Kreiskolbenmotor	338
8.2.1	Historie	338
8.2.2	Generelle Funktionsweise eines Kreiskolbenmotor	340
8.2.3	Das Viertaktprinzip	341
8.2.4	Der Kreiskolbenmotor Renesis	341
8.2.4.1	Der Seitenauslass	342
8.2.4.2	Variable Ansaugsteuerung und elektrische Drosselklappe	343
8.2.5	Der Wasserstoff-Kreiskolbenmotor	344
9	Tribologie	346
9.1	Reibung	346
9.1.1	Kenngrößen	346
9.1.2	Reibungszustände	346
9.1.3	Verfahren zur Reibungsmessung	347
9.1.4	Einfluss des Betriebszustandes und der Randbedingungen	349
9.1.4.1	Einlaufzustand des Verbrennungsmotors	349
9.1.4.2	Ölviskosität	349
9.1.4.3	Temperatureinfluss	349
9.1.4.4	Motorbetriebspunkt	350
9.1.5	Einfluss der Reibung auf den Kraftstoffverbrauch	350
9.1.6	Reibungsverhalten ausgeführter Verbrennungsmotoren	351
9.1.6.1	Reibungsaufteilung	351
9.1.6.2	Triebwerk	353
9.1.6.2.1	Kurbelwelle	353
9.1.6.2.2	Pleuellager und Kolbengruppe	354
9.1.6.2.3	Massenausgleich	354
9.1.6.3	Ventilsteuerung (Ventil- und Steuertrieb)	355
9.1.6.4	Nebenaggregate	356
9.1.6.4.1	Ölpumpe	356
9.1.6.4.2	Kühlmittelpumpe	358
9.1.6.4.3	Generator	358
9.1.6.4.4	Einspritzpumpe	359
9.1.6.4.5	Klimakompressor	359
9.1.6.4.6	Kühlerventilator	360
9.1.6.4.7	Servolenkungpumpe	360
9.1.6.4.8	Vakuumpumpe	361

9.2	Schmierung.....	361
9.2.1	Tribologische Grundlagen.....	361
9.2.1.1	Reibung.....	362
9.2.1.2	Verschleiß.....	363
9.2.2	Schmiersystem.....	364
9.2.2.1	Schmierung.....	364
9.2.2.2	Bauteile und Funktion.....	364
10	Ladungswechsel.....	371
10.1	Gaswechseinrichtungen beim 4-Takt-Motor.....	371
10.1.1	Bauformen des Ventiltriebs.....	372
10.1.2	Bauelemente des Ventiltriebs.....	374
10.1.3	Kinematik und Dynamik des Ventiltriebes.....	379
10.1.4	Auslegung der Gaswechseinrichtungen bei 4-Takt-Motoren.....	381
10.2	Ladungswechselrechnung.....	394
10.3	Gaswechsel bei Zweitaktmotoren.....	397
10.3.1	Spülverfahren.....	397
10.3.2	Gaswechselorgane.....	399
10.3.3	Spülluftversorgung.....	400
10.4	Variable Ventilsteuerungen.....	403
10.4.1	Nockenwellenversteller.....	405
10.4.1.1	Überblick zu Funktionsprinzipien von Nockenwellenverstellern.....	405
10.4.1.2	Motorische Auswirkungen durch Nockenwellenversteller.....	407
10.4.1.3	Nockenwellenversteller an Serienmotoren.....	409
10.4.1.4	Perspektiven von Nockenwellenverstellern.....	411
10.4.2	Systeme mit stufenweiser Ventilhub- oder Öffnungsdauervariation.....	413
10.4.3	Vollvariable Ventilsteuerungen.....	416
10.4.3.1	Rückblick auf die Entwicklung vollvariabler mechanischer Ventilsteuerung.....	416
10.4.3.2	Mechanische Systeme in Serie.....	418
10.4.3.3	Mechanische Systeme in Entwicklung.....	423
10.4.3.4	Hydraulisch betätigte Systeme.....	427
10.4.3.5	Elektromechanische Systeme.....	428
10.4.4	Perspektiven des variablen Ventiltriebs.....	431
10.5	Impulsaufladung und Laststeuerung von Hubkolbenmotoren durch ein Lufttaktventil.....	433
10.5.1	Einleitung.....	433
10.5.2	Idee und Funktionsweise des Lufttaktventils.....	434
10.5.3	Möglichkeiten der Ladungswechselbeeinflussung.....	435
10.5.3.1	Dynamische Aufladung am Saugmotor (Impulsaufladung).....	435
10.5.3.2	Drosselfreie Laststeuerung.....	436
10.5.3.3	AGR-Steuerung.....	436
10.5.3.4	Wärmeladung.....	437
10.5.3.5	Kälteladung aufgeladener Motoren.....	438
10.5.3.6	Zylinderabschaltung.....	438
10.5.4	Konzeption des MAHLE Lufttaktventils.....	438
10.5.5	Erprobung des MAHLE Lufttaktventils.....	438
10.5.5.1	Versuchsergebnisse am 1-Zylinder-Otto-DI.....	438
10.5.5.2	Versuchsergebnisse am 4-Zylinder-Otto-DI.....	440
10.5.5.3	Versuchsergebnisse am aufgeladenen Common Rail-Dieselmotor.....	441
10.5.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	442
10.5.7	Impulsaufladung mit steuerbaren Ansaugluft-Ventilen.....	443
10.5.7.1	Einleitung.....	443
10.5.7.2	Anforderungen an die Komponenten für den Serieneinsatz.....	444
10.5.7.3	Elektrische Systemintegration.....	446
10.5.7.4	Mechanische Systemintegration.....	446
10.5.7.5	Ausblick.....	447
11	Aufladung von Verbrennungsmotoren.....	448
11.1	Mechanische Aufladung.....	448
11.2	Abgasurboaufladung.....	449
11.3	Ladeluftkühlung.....	451
11.4	Zusammenwirken von Motor und Verdichter.....	452
11.4.1	Viertaktmotor im Verdichterkernfeld.....	452
11.4.2	Mechanische Aufladung.....	454
11.4.3	Abgasurboaufladung.....	454

11.5	Dynamisches Verhalten	459
11.6	Zusatzmaßnahmen bei aufgeladenen Verbrennungsmotoren.....	463
11.6.1	Ottomotoren	463
11.6.2	Dieselmotoren	464
11.7	Leistungsexplosion durch Register- und zweistufige Aufladung bei Personenkraftwagen	465
11.7.1	Historie und Evolution der zweistufigen Aufladeverfahren (Stufenaufladung).....	465
11.7.2	Thermodynamik der zweistufigen Aufladung.....	466
11.7.3	Registeraufladung und zweistufige Aufladekonzepte/-systeme.....	467
11.7.3.1	Registeraufladung	467
11.7.3.2	Zweistufige Aufladung.....	467
11.7.4	Einsatzgebiete	469
12	Gemischbildungsverfahren und -systeme	471
12.1	Innere Gemischbildung	471
12.2	Äußere Gemischbildung.....	471
12.3	Gemischbildung mittels Vergaser	471
12.3.1	Arbeitsweise des Vergasers.....	471
12.3.2	Bauarten	472
12.3.2.1	Anzahl der Ansaugluftkanäle	472
12.3.2.2	Lage der Ansaugluftkanäle.....	474
12.3.2.3	Bauarten für Sonderanwendungen	474
12.3.3	Wichtige Systeme an Vergasern	474
12.3.4	Elektronisch geregelter Vergaser	476
12.3.5	Gleichdruckvergaser	477
12.3.6	Betriebsverhalten	478
12.3.7	Lambda-Regelung	479
12.3.8	Gemischbildung mittels Benzineinspritzung	480
12.3.8.1	Saugrohrinspritzsysteme.....	480
12.3.8.2	Systeme für Direkteinspritzung.....	482
12.4	Gemischbildung bei Dieselmotoren	490
12.4.1	Einspritzsysteme – Überblick	491
12.4.2	Systeme mit einspritzsynchrone Druckerzeugung	495
12.4.2.1	Einzelpumpensysteme mit Leitung	496
12.4.2.2	Reiheneinspritzpumpe	497
12.4.2.3	Verteilereinspritzpumpe	499
12.4.2.4	Pumpe-Düse-System	502
12.4.3	Systeme mit zentralem Druckspeicher	504
12.4.3.1	Hochdruckpumpe	504
12.4.3.2	Rail und Leitungen	505
12.4.3.3	Injektor	506
12.4.3.4	Einspritzdüse	508
12.4.3.5	Elektronik.....	508
12.4.3.6	Entwicklungstrends	510
12.4.4	Einspritzdüsen und Düsenhalter.....	510
12.4.5	Anpassung des Einspritzsystems an den Motor	514
12.5	Kraftstoffversorgungssystem	518
12.5.1	Kraftstoffbehälter	518
12.5.1.1	Diesekraftstofftank.....	519
12.5.1.2	Ottokraftstofftank	519
12.5.2	Das Tankenlüftungssystem	519
12.5.3	Anforderungen an ein Kraftstofffördersystem	520
12.5.3.1	Dieselfördersystem.....	520
12.5.3.2	Ottokraftstofffördersystem	523
12.5.4	Die Füllstandsmessung	526
12.5.4.1	Anforderung an die Füllstandsmessung	526
12.5.4.2	Hebelgeber	527
12.5.4.3	Magnetic Passive Position Sensor.....	527
13	Zündung.....	528
13.1	Ottomotor	528
13.1.1	Einleitung der Zündung	528
13.1.2	Anforderungen an das Zündsystem.....	528

13.1.3	Mindestzündenergien	528
13.1.4	Grundlagen der Funkenzündung	528
13.1.4.1	Phasen des Funkens	528
13.1.4.2	Energieübertragungswirkungsgrad	529
13.1.5	Spulenzündsystem (induktiv)	529
13.1.6	Weitere Zündsysteme	532
13.1.7	Zusammenfassung/Ausblick	532
13.1.8	Zündkerzen	533
13.1.8.1	Anforderungen an Zündkerzen	533
13.1.8.2	Aufbau	533
13.1.8.3	Wärmewert	534
13.1.8.4	Zündspannungsbedarf	535
13.1.8.5	Zündefeuchtigkeit und Gemischentflammung	536
13.1.8.6	Verschleiß	537
13.1.8.7	Applikation	583
13.2	Dieselmotor	539
13.2.1	Selbstzündung und Verbrennung	539
13.2.2	Kaltstart Dieselmotor	539
13.2.2.1	Wichtige Einflussparameter	539
13.2.2.2	Startbewertungskriterien	541
13.2.3	Komponenten zur Kaltstartunterstützung	542
13.2.3.1	Glühsystem	542
13.2.3.2	Heizflansch	545
13.2.4	Ausblick	546
13.2.4.1	Kombinierte Systeme	546
13.2.4.2	Ionenstrommessung	547
13.2.4.3	Geregelte Glühsysteme	547
14	Verbrennung	549
14.1	Kraftstoffe	549
14.2	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	550
14.3	Selbstzündung	552
14.3.1	Das H_2-O_2 System	552
14.3.2	Zündung von Kohlenwasserstoffen	553
14.3.3	Schnelle Kompressionsmaschine	554
14.3.4	Dieselmotor	554
14.3.5	HCCI-Motor	554
14.3.6	Motorklopfen	554
14.3.7	Modellierung der Selbstzündung	555
14.3.7.1	Einschritt-Mechanismus	555
14.3.7.2	Shell-Modell	556
14.4	Flammenausbreitung	556
14.4.1	Turbulente Skalen	556
14.4.2	Flammentypen	557
14.4.2.1	Vorgemischte Flammen	557
14.4.2.2	Nicht-vorgemischte Flammen	558
14.4.2.3	Partiell-vorgemischte Flammen	558
14.5	Modellbildung und Simulation	559
14.5.1	Klassifizierung von Verbrennungsmodellen	560
14.5.2	Ersatzbrennverläufe	560
14.5.3	Wärmeübergangsmodelle	562
15	Verbrennungsverfahren	565
15.1	Verbrennungsverfahren für Dieselmotoren	565
15.1.1	Dieselvebrennung	565
15.1.2	Diesel-Viertakt-Verbrennungsverfahren	571
15.1.2.1	Verfahren mit indirekter Kraftstoffeinspritzung (IDI)	572
15.1.2.2	Verfahren mit direkter Kraftstoffeinspritzung (DI)	574
15.1.2.3	Gegenüberstellung der Verbrennungsverfahren	576
15.1.2.4	Entwicklungsrichtungen	578
15.1.2.5	Sonderverfahren und Besonderheiten	581
15.2	Ottomotoren	583
15.2.1	Brennverfahren von Port-Fuel-Injection-(PFI)-Motoren	583
15.2.2	Brennverfahren von Direct-Injection-Spark-Ignition-(DISI)-Motoren	591

15.3	Zweitakt Dieselmotor.....	600
15.4	Zweitakt Totmotor.....	602
16	Elektronik und Mechanik	606
16.1	Umweltanforderungen.....	606
16.2	Standalone Produkte (Wegbau Geräte).....	607
16.3	Verbindungstechnik.....	608
16.4	Integrierte Produkte (MTM = Mechatronic Transmission Module).....	609
16.5	Elektronischer Aufbau, Strukturen und Bauelemente.....	611
16.5.1	Grundstruktur.....	611
16.5.2	Elektronische Bauelemente.....	611
16.5.2.1	Eingangsfiterbaustein Klopff-IC.....	611
16.5.2.2	Endstufenbaustein.....	611
16.5.2.3	Mikrocontroller.....	611
16.5.2.4	Spannungsregler.....	611
16.5.2.5	DC/DC Converter.....	611
16.6	Steuergeräteelektronik.....	612
16.6.1	Allgemeine Beschreibung.....	612
16.6.2	Signalaufbereitung.....	612
16.6.3	Signalauswertung.....	613
16.6.4	Signalausgabe.....	616
16.6.5	Spannungsversorgung.....	617
16.6.6	Schnittstellen.....	617
16.6.6.1	CAN-Bus Schnittstelle.....	617
16.6.6.2	LIN-Bus Schnittstellen.....	617
16.6.7	Elektronik für Getriebesteuergeräte.....	617
16.7	Software-Strukturen.....	618
16.7.1	Aufgabe der Software bei der Steuerung von Motoren.....	618
16.7.2	Anforderungen an die Software.....	618
16.7.3	Das Schichtenkonzept der Software.....	619
16.7.4	Der Software-Entwicklungsprozess.....	620
16.8	Drehmomentbasierte Funktionsstruktur für Motorsteuerung.....	620
16.8.1	Modellbasierte Funktionen am Beispiel des Saugrohrfüllungsmodells.....	623
16.9	Funktionen.....	625
16.9.1	λ -Regelung.....	625
16.9.2	Antiruckelfunktion.....	627
16.9.3	Drosselklappenregelung.....	629
16.9.4	Klopffregelung.....	630
16.9.5	„On Board“-Diagnose (OBD).....	633
16.9.5.1	Aufgaben der Eigendiagnose.....	633
16.9.5.2	Überwachung des Katalysators.....	634
16.9.6	Sicherheitskonzepte.....	636
17	System Antriebsstrang	638
17.1	Antriebsstrang-Architektur.....	638
17.2	Längsdynamik des Kraftfahrzeuges.....	638
17.3	Getriebetypen.....	639
17.4	Leistungsebene und Signalverarbeitungsebene.....	640
17.5	Getriebesteuerung.....	641
17.5.1	Funktionen.....	641
17.5.1.1	Überblick.....	641
17.5.1.2	Fahr- oder Schaltstrategie.....	642
17.5.1.3	Automatgetriebe mit Planetenradsätzen und Drehmomentwandler.....	643
17.5.1.4	Automatisiertes Handschaltgetriebe.....	643
17.5.1.5	Stufenlosgetriebe (CVT).....	644
17.6	Integriertes Antriebsstrangmanagement (IPM [®]).....	644
17.7	Integrierter Starter-Generator (ISG).....	646
17.7.1	Systemüberblick ISG.....	646
17.7.1.1	Drehmoment Struktur in einem Kraftfahrzeug.....	646
17.7.1.2	Starter-Generator-Struktur.....	646
17.7.1.3	Beschreibung der wichtigsten Betriebsarten des Starter-Generators.....	647
17.7.2	Umrichter (Antriebssteuerung und Spannungswandler).....	647
17.7.2.1	Anforderungen an die Elektronik aus Systemsicht.....	647

17.7.2.2	Funktionsblöcke und Auslegungskriterien	648
17.7.2.3	Kühlung	648
17.7.2.4	Klassifizierung der Leistungselektronik des Umrichters	649
17.7.2.5	DC/DC-Wandler	649
17.7.3	Elektrische Maschine	650
17.7.3.1	Auslegungskriterien	650
17.7.3.2	Simulationswerkzeuge	650
17.7.3.3	Thermische Simulation	650
17.7.3.4	Mechanische Festigkeiten	651
17.7.3.5	Anforderungen an die elektrische Maschine	651
17.7.4	Die Serienentwicklung	651
18	Sensoren	653
18.1	Temperatursensoren	653
18.2	Füllstandssensoren	653
18.3	Klopfsensoren	653
18.4	Abgassensoren	655
18.4.1	Lambdasensoren	655
18.4.2	NO _x -Sensoren	655
18.5	Drucksensoren	656
18.5.1	Normaldrucksensoren	657
18.5.1.1	Piezoresistives Messprinzip	657
18.5.1.2	Kapazitives Messprinzip	657
18.5.2	Mitteldrucksensoren	658
18.5.3	Hochdrucksensoren	658
18.5.4	Druckschalter	658
18.6	Luftmassensensoren	659
18.6.1	Messprinzip	659
18.6.2	Mass Airflow Sensor	659
18.6.3	Sekundär Luftmassensensoren (SAF)	660
18.7	Drehzahlsensoren	660
18.7.1	Passive Drehzahlsensoren	660
18.7.2	Aktive Sensoren	661
18.8	Brennraumdrucksensoren für Dieselmotoren	661
19	Aktuatorik	664
19.1	Antriebe	664
19.1.1	Pneumatische Antriebe	664
19.1.2	Elektrische Antriebe	664
19.1.2.1	Schrittmotor	664
19.1.2.2	DC-Motor	665
19.1.2.3	Torque-Motor	665
19.1.3	Kommunikation mit der Motorsteuerelektronik	665
19.1.3.1	Gesteuerte Stellglieder	665
19.1.3.2	Extern geregelte Stellglieder	666
19.1.3.3	Intern geregelte Stellglieder (smarte Aktuatoren)	666
19.2	Drosselklappenstellglieder	666
19.2.1	Kernfunktion Otto-Motor	666
19.2.2	Kernfunktion Diesel-Motor	666
19.2.3	Zusätzliche Funktionen	667
19.2.3.1	Leerlaufregelung Ottomotor	667
19.2.3.2	Positionssignal	667
19.2.3.3	Dash-pot Funktion	667
19.2.3.4	Tempomatfunktion	667
19.2.4	„Drive by wire“/E-Gas	667
19.2.5	West-gate Funktion	668
19.2.6	Unterdruck/Vordrosselstellglieder	668
19.3	Drall- und Tumbleklappen/Resonanzaufladung	669
19.3.1	Port-Deactivation	669
19.3.2	Schichtladung	669
19.4	Turbolader mit variabler Turbinengeometrie	670
19.5	Abgasrückführventile	671
19.6	Verdunstungsemission, Komponenten	673
19.6.1	Tankentlüftungsventile	673

19.6.2	Diagnose Verdunstungsemission	674
19.6.2.1	Tankdiagnose mit Überdruck	675
19.6.2.2	Tankdiagnose mit Unterdruck	676
20	Kühlung von Verbrennungsmotoren	677
20.1	Allgemeines	677
20.2	Anforderungen an das Kühlsystem	677
20.3	Berechnungsgrundlagen und Simulations-Tools	677
20.4	Subsysteme der Motorkühlung	679
20.4.1	Kühlmittelkühlung	679
20.4.1.1	Kühlerschutzmittel	680
20.4.2	Ladeluftkühlung	682
20.4.3	Abgaskühlung	683
20.4.4	Ölkühlung	683
20.4.5	Lüfter und Lüfterantriebe	684
20.5	Kühlmodule	685
20.6	Gesamtsystem Motorkühlung	685
21	Abgasemissionen	688
21.1	Gesetzliche Vorschriften	688
21.1.1	Europa	688
21.1.2	USA, Kalifornien	689
21.1.3	Japan	691
21.1.4	Harmonisierung der Abgasvorschriften	692
21.2	Abgasmessstechnik	692
21.2.1	Messtechnik für die Zertifizierung von Kraftfahrzeugen	692
21.2.2	Messtechnik für die Motorenentwicklung	693
21.3	Schadstoffe und ihre Entstehung	697
21.3.1	Ottomotor	698
21.3.1.1	Limitierte Abgaskomponenten	698
21.3.1.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten	700
21.3.2	Dieselmotor	700
21.3.2.1	Limitierte Abgaskomponenten	700
21.3.2.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten	701
21.4	Minderung von Schadstoffen	702
21.4.1	Motorische Maßnahmen	702
21.4.1.1	Ottomotor	702
21.4.1.2	Dieselmotor	704
21.5	Abgasnachbehandlung Ottomotor	707
21.5.1	Katalysatoraufbau und chemische Reaktionen	707
21.5.2	Katalysatorkonzepte stöchiometrisch betriebener Motoren	708
21.5.2.1	Dreiwegekatalysator	708
21.5.2.2	Der Sauerstoffspeicher	709
21.5.2.3	Kaltstartstrategien	710
21.5.2.4	Deaktivierungseffekte und ihre Auswirkung	711
21.5.3	Katalysatorkonzepte für Magermotoren	714
21.5.3.1	Möglichkeiten zur NO _x -Reduktion in magerem Abgas	715
21.5.3.2	Der NO _x -Speicherkatalysator	717
21.5.3.3	System mit Vorkatalysator und NO _x -Adsorber	723
21.5.4	Metallische Katalysatorträger	723
21.6	Abgasnachbehandlung Dieselmotor	729
21.6.1	Diesel-Oxidations Katalysatoren	729
21.6.1.1	Schadstoffe im Diesel-Abgas	729
21.6.1.2	Charakteristika von Diesel Oxidationskatalysatoren	729
21.6.1.3	Deaktivierung der Katalysator-Oberfläche	730
21.6.1.4	Beurteilung von Diesel-Oxidationskatalysatoren	732
21.6.2	NO _x Adsorber für Diesel-Pkw	733
21.6.2.1	Arbeitsbereich des Speicherkatalysators	733
21.6.2.2	Entschwefelung	734
21.6.2.3	Regenerationsmethoden	735
21.6.3	Partikel/Partikelfilter	736
21.6.3.1	Partikeldefinitionen und Partikeleigenschaften	736
21.6.3.2	Zielsetzungen für die Partikelfiltration	738

21.6.3.3	Anforderungen an Filtermedien, technische Lösungen.....	739
21.6.3.4	Abscheidung und Haftung	741
21.6.3.5	Regeneration und periodische Reinigung	744
21.6.3.6	Emissionen während Regeneration und Sekundäremissionen	748
21.6.3.7	Druckverlust.....	749
21.6.3.8	Bauraum und Systemintegration	751
21.6.3.9	Schadensmechanismen / Erfahrungen.....	751
21.6.3.10	Qualitätskriterien.....	752
21.6.3.11	Eignungstest, Typenprüfung, OBD, Feldkontrolle	752
21.6.3.12	Partikelmesstechnik	753
21.6.3.13	Katalytischer Partikelfilter	755
22	Betriebsstoffe	759
22.1	Kraftstoffe	759
22.1.1	Dieselmotor (DK)	760
22.1.1.1	DK-Komponenten und Zusammensetzung	760
22.1.1.2	Kennwerte und Eigenschaften	761
22.1.1.3	Additive für DK	767
22.1.1.4	Alternative Dieselmotoren	768
22.1.2	Ottomotor (OK)	772
22.1.2.1	OK-Komponenten und Zusammensetzung	773
22.1.2.2	Kennwerte und Eigenschaften	775
22.1.2.3	Alternative Ottomotoren	788
22.2	Schmierstoffe	796
22.2.1	Schmierstoffarten	796
22.2.2	Aufgabe der Schmierstoffe	796
22.2.3	Arten der Schmierstoffe	796
22.2.4	Anforderungen an die Schmierstoffe	796
22.2.5	Viskosität/Viskositäts-Index (V.I.)	798
22.2.5.1	Einfluss der Temperatur auf die Viskosität.....	798
22.2.5.2	Einfluss des Drucks auf die Viskosität.....	799
22.2.5.3	Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität	799
22.2.6	Basisflüssigkeiten.....	800
22.2.6.1	Basisflüssigkeiten aus Mineralöl	800
22.2.6.2	Synthetische Basisflüssigkeiten	801
22.2.7	Additive für Schmierstoffe	801
22.2.7.1	V.I.-Verbesserer	802
22.2.7.2	Detergents/Dispersants	802
22.2.7.3	Antioxidantien und Korrosionsinhibitoren	804
22.2.7.4	Reibungs- und Verschleißminderer (EP/AW-Additive)	804
22.2.7.5	Schauminhibitoren	804
22.2.8	Motoröle für Viertaktmotoren	804
22.2.8.1	SAE-Viskositätsklassen für Motoröle.....	805
22.2.8.2	Einbereichsöle.....	805
22.2.8.3	Mehrbereichsöle.....	806
22.2.8.4	Leichtlauföle	806
22.2.8.5	Einlauföle	807
22.2.8.6	Gasmotoröle.....	807
22.2.8.7	Methanolmotoröle.....	807
22.2.8.8	Wasserstoffmotoröle	807
22.2.8.9	Leistungsklassen	808
22.2.8.10	Gebrauchtsölbeurteilung.....	817
22.2.8.11	Rennmotoröle.....	820
22.2.8.12	Wankelmotoröle.....	820
22.2.9	Motoröle für Zweitaktmotoren	820
22.2.9.1	Leistungsklassen	821
22.2.9.2	Prüfverfahren	821
22.3	Kühlmittel.....	821
22.3.1	Gefrierschutz	822
22.3.2	Korrosionsschutz.....	823
22.3.3	Spezifikationen.....	824

23 Filtration von Betriebsstoffen	826
23.1 Luftfilter	826
23.1.1 Bedeutung der Luftfiltration für Verbrennungsmotoren	826
23.1.2 Verunreinigung der Motoransaugluft	826
23.1.3 Kenngrößen zur Beurteilung von Luftfiltermedien	826
23.1.4 Messmethoden und Auswertung	827
23.1.5 Anforderungen an moderne Luftfiltersysteme	828
23.1.6 Auslegungskriterien für Motorluftfilterelemente	828
23.1.7 Filtergehäuse	829
23.1.7.1 Konstruktive Auslegung von Filtergehäusen	829
23.2 Kraftstofffilter	829
23.2.1 Ottokraftstofffilter	830
23.2.2 Diesekraftstofffilter	831
23.2.3 Leistungsdaten von Kraftstofffiltern	833
23.3 Filtration von Motoröl	834
23.3.1 Verschleiß und Filtration	834
23.3.2 Hauptstromölfilter	835
23.3.3 Abscheidegrad und Filterfeinheit	835
23.3.4 Nebenstromölfiltration	837
24 Berechnung und Simulation	839
24.1 Festigkeits- und Schwingungsberechnung	839
24.1.1 Verfahren und Methoden	839
24.1.2 Ausgewählte Anwendungsbeispiele	841
24.1.3 Kolbenberechnungen	844
24.2 Strömungsberechnung	852
24.2.1 Ein- und Quasidimensionale Verfahren	852
24.2.2 Dreidimensionale Strömungsberechnung	854
24.2.3 Ausgewählte Anwendungsbeispiele	856
25 Verbrennungsdiagnostik – Indizieren und Visualisieren in der Verbrennungsentwicklung	864
25.1 Themenstellung	864
25.2 Indizieren	864
25.2.1 Messtechnik	866
25.2.2 Qualitätskriterien	867
25.2.3 Indizieren – Ausblick	868
25.2.4 Zyklusgenaue signal- und modellbasierte Motorsteuerung	868
25.2.4.1 Sensoren, Signale und Signalverarbeitung	868
25.3 Visualisieren	868
25.3.1 Aufgaben- und Themenstellung	868
25.3.2 Visualisieren im realen Motorbetrieb	869
25.3.2.1 Strahlungseigenschaften von Gas-, Benzin- und Dieselmotoren	869
25.3.2.2 Flammenspektroskopie	870
25.3.2.3 Flammenausbreitung in vorgemischter Ladung bei Fremdzündung	870
25.3.2.4 Flammenausbreitung bei Diffusionsverbrennung im Dieselmotor	871
25.3.3 Visualisieren der Verbrennung im realen Motorbetrieb durch das Eigenleuchten der Flamme	871
25.3.3.1 Technische Umsetzung: Flammenausbreitung	872
25.3.3.2 Messgeräte – Messsysteme	876
25.3.4 Visualisieren beleuchteter Vorgänge	876
25.3.4.1 Visualisieren der Gemischverteilung	877
25.3.4.2 Visualisieren von Geschwindigkeiten	877
25.3.5 Visualisieren – Ausblick	877
26 Kraftstoffverbrauch	879
26.1 Allgemeine Einflussgrößen	879
26.1.1 Luftwiderstand	879
26.1.2 Gewicht	880
26.1.3 Radwiderstand	881
26.1.4 Kraftstoffverbrauch	881
26.2 Motorische Maßnahmen	882
26.2.1 Downsizing	883
26.2.2 Dieselmotor	884
26.2.3 Ottomotor	884

26.2.3.1	Magerkonzept, Direkteinspritzung	884
26.2.3.2	Variabler Ventiltrieb.....	886
26.2.3.3	Zündung	886
26.2.4	Zylinderabschaltung	887
26.2.4.1	Konzept zur Verbrauchsreduzierung	888
26.2.4.2	Verbrauchsvorteile im Teillastgebiet.....	888
26.3	Getriebeübersetzungen	889
26.3.1	Auswahl des direkten Ganges	889
26.3.2	Auswahl der Gesamtübersetzung im größten Gang	889
26.4	Fahrerverhalten.....	891
26.5	CO ₂ -Emissionen	891
26.5.1	CO ₂ -Emission und Kraftstoffverbrauch	892
26.5.2	Motorapplikationseinfluss auf die CO ₂ -Emission	892
26.5.3	Entwicklung der globalen CO ₂ -Emission.....	893
27	Geräuschemissionen.....	895
27.1	Physikalische Grundlagen und Begriffe.....	895
27.2	Gesetzliche Außengeräuschvorschriften	898
27.2.1	Außengeräusch-Messverfahren	898
27.2.2	Kritische Betrachtung der Aussagefähigkeit des Außengeräusch-Messverfahrens.....	898
27.2.3	Außengeräusch-Grenzwerte, Gesetzgebung international, Zukunftstendenzen	899
27.3	Geräuschquellen des Außengeräusches.....	899
27.4	Maßnahmen zur Außengeräuschminderung.....	900
27.4.1	Motorseitige Maßnahmen.....	900
27.4.2	Fahrzeugseitige Maßnahmen.....	900
27.5	Motorgeräusch im Innenraum	902
27.6	Akustische Leitlinien für den Motorkonstrukteur	903
27.7	Messtechniken und Analysemethoden	905
27.8	Psychoakustik.....	907
27.9	Sound-Engineering.....	908
27.10	Simulationswerkzeuge.....	909
27.11	Anti-Noise-Systeme: Geräuschminderung durch Gegenschall	910
28	Motorenmesstechnik.....	912
29	Alternative Fahrzeugantriebe und APU (Auxiliary Power Unit)	926
29.1	Gründe für Alternativen	926
29.2	Elektroantrieb	927
29.3	Hybridantrieb	929
29.3.1	Speichersysteme	932
29.4	Stirlingmotor	933
29.5	Gasturbine	934
29.6	Dampfmotor	934
29.7	Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb.....	935
29.7.1	Aufbau der PEM-Brennstoffzelle.....	936
29.7.2	Wasserstoff als Kraftstoff.....	937
29.7.3	Methanol als Kraftstoff	937
29.7.4	Otto-Kraftstoff.....	938
29.7.5	Die Brennstoffzelle im Fahrzeug	938
29.7.6	Bewertung der Brennstoffzelle im Vergleich zu anderen Antrieben.....	938
29.8	Zusammenfassung.....	938
29.9	Stromerzeugung durch APU.....	941
29.9.1	Dampfmotor als APU.....	941
29.9.2	Die Brennstoffzelle als APU.....	941
29.9.3	Brennkraftmaschine in Kombination mit einem Lineargenerator	943
30	Ausblick	945
	Sachwortverzeichnis	949