

Richard van Basshuysen | Fred Schäfer (Hrsg.)

# Handbuch Verbrennungsmotor

Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven  
5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage  
Mit 1793 Abbildungen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



**VIEWEG+**  
**TEUBNER**

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Geschichtlicher Rückblick</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Definition und Einteilung der Hubkolbenmotoren</b> .....	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
<b>3</b>	<b>Kenngrößen</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Kennfelder</b> .....	27
4.1	Verbrauchskennfelder .....	28
4.2	Emissionskennfelder .....	29
4.3	Zündungs- und Einspritzkennfelder .....	32
4.4	Abgastemperaturkennfelder .....	33
<b>5</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b> .....	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

<b>6</b>	<b>Triebwerk</b> .....	49
6.1	Kurbeltrieb .....	49
6.1.1	Aufbau und Funktion .....	49
6.1.2	Kräfte am Kurbeltrieb .....	52
6.1.3	Tangentialkraftverlauf und mittlere Tangentialkraft .....	58
6.1.4	Massenkräfte .....	60
6.1.4.1	Massenkräfte am Einzylinder-Triebwerk .....	61
6.1.4.2	Massenkräfte am 2-Zylinder-V-Triebwerk .....	61
6.1.4.3	Massenkräfte und Massenmomente bei Mehrzylinder-Triebwerken .....	64
6.1.4.4	Beispiel .....	65
6.1.5	Massenausgleich .....	66
6.1.5.1	Ausgleich am Einzylinder-Triebwerk .....	66
6.1.5.2	Ausgleich am Mehrzylinder-Triebwerk .....	67
6.1.6	Innere Momente .....	70
6.1.7	Kröpfungs- und Zündfolgen .....	71
6.2	Drehschwingungen .....	72
6.2.1	Grundlagen .....	72
6.2.2	Reduktion der Maschinenanlage .....	73
6.2.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen .....	73
6.2.4	Erregerkräfte, -arbeit und -amplituden .....	75
6.2.5	Maßnahmen zur Verringerung der Kurbelwellenausschläge .....	77
6.2.6	Zweimassenschwungräder .....	78
6.3	Variabilität von Verdichtung und Hubvolumen .....	79
6.3.1	Variables Hubvolumen .....	79
6.3.2	Variable Verdichtung .....	80
<b>7</b>	<b>Motorkomponenten</b> .....	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	Pleuefertigung .....	103
7.2.5.1	Rohteileherstellung .....	103
7.2.5.2	Bearbeitung .....	104
7.2.6	Pleuel-Werkstoffe .....	105
7.3	Kolbenringe .....	106
7.3.1	Ausführungsformen .....	107
7.3.1.1	Verdichtungsringe .....	107
7.3.1.2	Ölabstreifringe .....	108
7.3.2	Ringbestückungen .....	109
7.3.3	Kenngößen .....	110

7.3.4	Herstellung.....	112
7.3.4.1	Formgebung .....	112
7.3.4.2	Verschleißschutzschichten .....	112
7.3.4.3	Oberflächenbehandlungen .....	113
7.3.4.4	Werkstoffe für Kolbenringe .....	114
7.3.5	Beanspruchung, Schäden, Verschleiß, Reibung .....	114
7.4	Kurbelgehäuse.....	115
7.4.1	Aufgaben und Funktionen .....	115
7.4.2	Gestaltung von Zylinderkurbelgehäusen .....	117
7.4.2.1	Kurbelgehäusebauart.....	117
7.4.3	Optimierung der Akustik .....	122
7.4.4	Minimierung der Kurbelgehäusemasse .....	123
7.4.5	Gießverfahren für Kurbelgehäuse .....	124
7.4.5.1	Druckguss .....	124
7.4.5.2	Kokillenguss.....	125
7.4.5.3	Lost-Foam-Verfahren .....	125
7.4.5.4	Sandguss .....	125
7.4.5.5	Squeeze Casting .....	126
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 .....	129
7.5.2	Bearbeitung von Zylinderlaufflächen .....	130
7.5.2.1	Bearbeitungsverfahren .....	130
7.5.3	Zylinderkühlung .....	131
7.5.3.1	Flüssigkeitskühlung .....	131
7.5.3.2	Luftkühlung.....	132
7.6	Ölwanne .....	133
7.6.1	Ölwannenbauart.....	133
7.7	Kurbelgehäuseentlüftung .....	134
7.7.1	Gesetzliche Randbedingungen .....	136
7.7.2	Technische Anforderungen .....	136
7.7.3	Systemaufbau aktueller Kurbelgehäuseentlüftungssysteme .....	138
7.7.4	Ölnebelabscheidung .....	138
7.7.5	Kurbelgehäusedruckregelung .....	143
7.7.6	Module und Ventilhaubenintegration .....	146
7.8	Zylinderkopf.....	147
7.8.1	Grundausslegung des Zylinderkopfes .....	147
7.8.1.1	Auslegung der Grundgeometrie .....	147
7.8.1.2	Festlegung der Fertigungsverfahren .....	148
7.8.1.3	Auslegung der Gaswechselorgane .....	148
7.8.1.4	Variable Ventilsteuerungen .....	149
7.8.2	Die Konstruktion des Zylinderkopfes .....	149
7.8.2.1	Auslegung der Grobmessungen.....	149
7.8.2.2	Brennraum- und Kanalauslegung .....	150
7.8.2.3	Ventiltriebsauslegung.....	152
7.8.2.4	Kühlkonzepte .....	153
7.8.2.5	Ölhaushalt .....	153
7.8.2.6	Konstruktive Detailauslegungen .....	154
7.8.2.7	Konstruktion in Baustufen .....	154
7.8.2.8	CAD-Einsatz in der Konstruktion .....	155
7.8.2.9	Rechnergestützte Auslegung .....	155
7.8.3	Gießverfahren .....	158
7.8.3.1	Sandguss .....	158
7.8.3.2	Kokillenguss .....	160
7.8.3.3	Lost Foam-Verfahren (Vollform-Verfahren) .....	161
7.8.3.4	Druckgussverfahren .....	162
7.8.4	Modell- und Formenbau .....	162
7.8.5	Mechanische Bearbeitung und Qualitätssicherung .....	163
7.8.5.1	Großserienfertigung .....	163
7.8.5.2	Prototypenfertigung .....	164
7.8.5.3	Qualitätssicherung der Zylinderköpfe .....	164

7.8.6	Ausgeführte Bauformen von Zylinderköpfen .....	164
7.8.6.1	Zylinderköpfe an Ottomotoren .....	164
7.8.6.2	Zylinderköpfe an Dieselmotoren .....	167
7.8.6.3	Sonderbauformen von Zylinderköpfen .....	168
7.8.7	Perspektiven in der Zylinderkopftechnologie .....	170
7.9	Kurbelwellen .....	171
7.9.1	Funktion im Fahrzeug .....	171
7.9.1.1	Kurbelwellen im Hubkolbenmotor .....	172
7.9.1.2	Anforderungen .....	172
7.9.2	Herstellung und Eigenschaften .....	172
7.9.2.1	Verfahren und Werkstoffe .....	172
7.9.2.2	Werkstoffliche Eigenschaften von Kurbelwellen .....	174
7.9.3	Leichtbau und Verfahren zur Steigerung der Festigkeit .....	175
7.9.3.1	Hohlgegossene Kurbelwellen .....	175
7.9.3.2	ADI Austempered Ductil Iron (ausferritisches Gusseisen) .....	175
7.9.3.3	Erhöhung der Bauteilfestigkeit durch Nachbehandlung .....	176
7.9.4	Berechnung von Kurbelwellen .....	176
7.10	Ventiltriebskomponenten .....	178
7.10.1	Standard Ventiltrieb .....	178
7.10.1.1	Ventiltriebe mit direktem Antrieb .....	178
7.10.1.2	Ventiltriebe mit indirektem Antrieb .....	179
7.10.1.3	Hydraulischer Ventilspielausgleich .....	182
7.10.1.4	Mechanische Ventilspieleinstellung .....	182
7.10.1.5	Variable Ventiltriebe .....	183
7.10.2	Riemenspannsysteme, Spann- und Umlenkrollen .....	188
7.10.2.1	Einführung .....	188
7.10.2.2	Automatische Riemenspannsysteme für Zahnriementriebe .....	189
7.10.2.3	Spann- und Umlenkrollen für Zahnriementriebe .....	190
7.10.2.4	INA Durability Drive .....	190
7.10.2.5	Ausblick .....	190
7.10.3	Kettenspann- und Führungssysteme .....	190
7.10.3.1	Einführung .....	190
7.10.3.2	Kette .....	191
7.10.3.3	Kettenspannelement .....	192
7.10.3.4	Spann- und Führungsschienen .....	193
7.10.3.4	Kettenräder .....	194
7.11	Ventile .....	194
7.11.1	Funktion und Begriffserklärungen .....	194
7.11.2	Fertigungsmethoden und Ventilarten .....	195
7.11.2.1	Monometallventile .....	195
7.11.2.2	Bimetallventile .....	195
7.11.2.3	Hohlventile .....	196
7.11.3	Ausführungsformen .....	197
7.11.3.1	Ventilkopf .....	197
7.11.3.2	Ventilsitz .....	197
7.11.3.3	Ventilschaft .....	197
7.11.4	Ventilwerkstoffe .....	198
7.11.4.1	Wärmebehandlung .....	199
7.11.4.2	Oberflächenveredelung .....	199
7.11.5	Sonder-Ventilausführungen .....	199
7.11.5.1	Ventile mit werkstofflich bedingt geringer Masse .....	199
7.11.5.2	Abgassteuerventile .....	199
7.11.6	Ventilkegelstücke .....	200
7.11.6.1	Aufgabe und Funktion .....	200
7.11.6.2	Fertigungsmethoden .....	200
7.11.7	Ventildrehvorrichtung .....	201
7.11.7.1	Aufgabe .....	201
7.11.7.2	Bauarten und Funktion .....	201
7.12	Ventilfedern .....	202
7.13	Ventilsitzringe .....	205
7.13.1	Einleitung .....	205
7.13.2	Anforderungen an Ventilsitzringe .....	206
7.13.2.1	Ventilsitzbeanspruchungen .....	206
7.13.2.2	Werkstoffe und Eigenschaften .....	208

	7.13.2.3	Geometrie und Toleranzen .....	211
	7.13.2.4	Zylinderkopfgeometrie und -montage .....	212
7.14		Ventilführungen .....	213
	7.14.1	Anforderungen an Ventilführungen .....	213
	7.14.1.1	Ventilführungsbeanspruchungen .....	213
	7.14.2	Werkstoffe und Eigenschaften .....	215
	7.14.2.1	Werkstoffe .....	215
	7.14.2.2	Werkstoffeigenschaften .....	216
	7.14.3	Geometrie Ventilführung .....	219
	7.14.4	Zylinderkopfmontage .....	220
7.15		Ölpumpe .....	220
	7.15.1	Übersicht über Ölpumpensysteme .....	221
	7.15.1.1	Innenzahnradpumpe .....	222
	7.15.1.2	Außenzahnradpumpe .....	224
	7.15.1.3	Flügelzellenpumpe .....	225
	7.15.1.4	Vor- und Nachteile der einzelnen Pumpensysteme .....	226
	7.15.2	Regelprinzipien .....	227
	7.15.2.1	Direkte Regelung .....	228
	7.15.2.2	Indirekte Regelung .....	228
	7.15.2.3	Rohöl- und reinölseitige Verstellung .....	229
	7.15.2.4	Zwei- oder Mehrstufenregelung .....	229
	7.15.2.5	Registerregelpumpe .....	230
	7.15.3	Volumenstrom-Regelpumpen .....	230
	7.15.3.1	Innenzahnrad Regelpumpe (Volumenstromvariable Zahnringpumpe) .....	232
	7.15.3.2	Außenzahnrad Volumenstrom Regelpumpe .....	232
	7.15.3.3	Flügelzellenpumpe .....	233
	7.15.4	Leistungseinsparung im NEFZ Zyklus .....	233
	7.15.5	Konstruktionsgrundlagen .....	236
	7.15.5.1	Kurbelwellenpumpe .....	236
	7.15.5.2	Sumpfpumpe .....	238
	7.15.5.3	Ölpumpenkennwerte aus der Praxis .....	238
	7.15.5.4	Vergleich zwischen Kurbelwellen und Sumpfpumpen .....	238
	7.15.6	Kavitation und Geräuschemission .....	241
	7.15.7	Berechnung .....	245
	7.15.7.1	Numerische Strömungssimulation CFD .....	245
	7.15.7.2	Eindimensionale Simulation von Strömungsnetzwerken .....	246
7.16		Nockenwelle .....	246
	7.16.1	Aufgaben der Nockenwelle .....	246
	7.16.2	Ventiltriebkonfigurationen .....	247
	7.16.3	Aufbau einer Nockenwelle .....	248
	7.16.4	Technologien und Werkstoffe .....	250
	7.16.4.1	Gussnockenwelle .....	250
	7.16.4.2	Gebaute Nockenwelle .....	250
	7.16.4.3	Stahlnockenwelle .....	251
	7.16.4.4	Sonderformen von Nockenwellen .....	252
	7.16.4.5	Werkstoffeigenschaften und empfohlene Paarungen .....	254
	7.16.5	Massereduktion .....	254
	7.16.6	Einflussfaktoren für Nockenwellenbelastung .....	255
	7.16.7	Auslegung von Nockenprofilen .....	256
	7.16.8	Kinematikrechnung .....	258
	7.16.9	Dynamikrechnung .....	258
	7.16.10	Nockenwellenverstellungssysteme .....	259
7.17		Kettentrieb .....	262
	7.17.1	Kettenbauformen .....	263
	7.17.2	Kettenkennwerte .....	264
	7.17.3	Kettenräder .....	264
	7.17.4	Kettenführungselemente .....	265
7.18		Riementriebe .....	266
	7.18.1	Zahnriementriebe zum Antrieb von Nockenwellen .....	266
	7.18.1.1	Antriebselement Zahnriemen .....	266
	7.18.1.2	Antriebssystem Zahnriemen .....	269
	7.18.1.3	Zahnriementriebdynamik .....	270
	7.18.1.4	Ovalradtechnologie .....	271
	7.18.1.5	Anwendungsbeispiele .....	272

7.18.2	Keilrippenriementriebe zum Antrieb von Nebenaggregaten .....	273
7.18.2.1	Antriebsselement Micro-V®-Riemen .....	273
7.18.2.2	Antriebssystem Nebenaggregatetrieb .....	274
7.18.2.3	Anwendungsbeispiele .....	275
7.18.2.4	Riemengetriebener Starter Generator (RSG/Start-Stopp System) .....	275
7.19	Lager in Verbrennungsmotoren .....	276
7.19.1	Grundlagen .....	276
7.19.1.1	Radiallager .....	276
7.19.1.2	Axiallager .....	278
7.19.2	Berechnung und Dimensionierung von Motorlagern .....	278
7.19.2.1	Belastung .....	278
7.19.2.2	Zapfenverlagerungsbahn .....	279
7.19.2.3	Elastohydrodynamische Berechnung .....	280
7.19.2.4	Hauptdimensionen: Durchmesser, Breite .....	281
7.19.2.5	Ölführungsgeometrie .....	281
7.19.2.6	Feindimensionen .....	281
7.19.3	Lagerwerkstoffe .....	283
7.19.3.1	Lagermetalle .....	284
7.19.3.2	Laufsichten .....	286
7.19.4	Lagerbauarten – Aufbau, Belastbarkeit, Anwendung .....	288
7.19.4.1	Massivlager .....	289
7.19.4.2	Zweistofflager .....	289
7.19.4.3	Dreistoff-Lager .....	290
7.19.4.4	Miba-Rillenlager .....	290
7.19.4.5	Sputterlager .....	290
7.19.5	Lagerversagen .....	292
7.19.5.1	Hergang eines Schadens .....	292
7.19.5.2	Arten von Lagerschäden .....	292
7.19.6	Ausblick .....	293
7.20	Ansaugsysteme .....	294
7.20.1	Thermodynamik von Luftansaugsystemen .....	294
7.20.2	Akustik .....	297
7.21	Dichtsysteme .....	301
7.21.1	Zylinderkopfdichtungssysteme .....	301
7.21.1.1	Ferrolastic-Weichstoff-Zylinderkopfdichtungen .....	301
7.21.1.2	Metall-Elastomer-Zylinderkopfdichtungen .....	302
7.21.1.3	Metalllagen-Zylinderkopfdichtungen Metalloflex® .....	302
7.21.1.4	Ausblick .....	307
7.21.2	Spezialdichtungen .....	307
7.21.2.1	Funktionsbeschreibung der Flachdichtung .....	307
7.21.2.2	Weichstoffdichtungen .....	307
7.21.2.3	Metall-Weichstoff-Dichtungen .....	308
7.21.2.4	Spezialdichtungen aus Metaloseal® .....	309
7.21.2.5	Ausblick .....	311
7.21.3	Elastomer-Dichtsysteme .....	312
7.21.3.1	Elastomerdichtungen .....	312
7.21.3.2	Metall-Elastomer-Dichtungen .....	313
7.21.3.3	Module .....	314
7.21.4	Entwicklungsmethoden .....	315
7.21.4.1	Finite-Elemente-Analyse .....	315
7.21.4.2	Simulation im Labor – Funktions- und Lebensdauerprüfung .....	317
7.22	Verschraubungen am Motor .....	319
7.22.1	Hochfeste Schraubenverbindungen .....	319
7.22.2	Qualitätsanforderungen .....	320
7.22.3	Schraubverbindungen .....	321
7.22.3.1	Zylinderkopfschraube .....	321
7.22.3.2	Hauptlagerdeckelschraube .....	322
7.22.3.3	Pleuelschraube .....	322
7.22.3.4	Riemenscheibenschraube .....	324
7.22.3.5	Schwungradschraube .....	325
7.22.3.6	Nockenwellen-Lagerdeckelschraube .....	325
7.22.3.7	Ölwannenbefestigungsschraube .....	325
7.22.4	Verschrauben in Magnesiumbauteilen .....	326

7.22.5	Schraubenanziehverfahren .....	326
7.22.5.1	Drehmomentgesteuertes Anziehen .....	326
7.22.5.2	Drehwinkelgesteuertes Anziehen .....	327
7.22.5.3	Streckgrenzgesteuertes Anziehverfahren .....	328
7.23	Abgaskrümmen .....	329
7.23.1	Ablauf einer Krümmerentwicklung .....	330
7.23.2	Krümmen als Einzelkomponente .....	331
7.23.2.1	Gusskrümmer .....	331
7.23.2.2	Rohrkrümmer .....	331
7.23.2.3	Einfachwandige Halbschalenkrümmer .....	332
7.23.2.4	Luftpaltisolierte Krümmer (LSI-Krümmer) .....	332
7.23.3	Krümmen als Teilmodul .....	333
7.23.3.1	Krümmer und Katalysator integriert .....	333
7.23.3.2	Krümmen und Turbolader integriert .....	333
7.23.4	Krümmen-Komponenten .....	333
7.24	Kühlmittelpumpen für Verbrennungsmotoren .....	334
7.24.1	Anforderungen, Bauarten und konstruktiver Aufbau .....	334
7.24.2	Flügelrad und Spiralkanal .....	335
7.24.3	Kühlmittelseitige Abdichtung .....	337
7.24.4	Kennfeld und Ähnlichkeitsbeziehungen der Kühlmittelpumpe .....	337
7.24.5	Kavitation .....	340
7.24.6	Elektrische Kühlmittelpumpe und schaltbare mechanische Kühlmittelpumpe .....	340
7.25	Steuerorgane des Zweitaktmotors .....	342
<b>8</b>	<b>Motoren .....</b>	<b>346</b>
8.1	Motorkonzepte .....	346
8.1.1	Motorbauarten .....	347
8.1.2	Unterscheidungsmerkmale von Motorkonzepten bezüglich des Grundmotors .....	350
8.1.3	Weitere Konzeptkriterien .....	352
8.1.4	Konzepte der Anordnung des Aggregates im Fahrzeug .....	352
8.2	Aktuelle Motoren .....	353
8.3	Motorradmotoren/Sondermotoren .....	369
8.3.1	Motorräder für die Straße (On road) .....	369
8.3.1.1	Einzylindermotoren .....	369
8.3.1.2	Zweizylindermotoren .....	370
8.3.1.3	Mehrzylindermotoren .....	375
8.3.1.4	Leistungsentwicklung .....	378
8.3.1.5	Hub-/Bohrungsverhältnis .....	380
8.3.1.6	Ventiltrieb .....	381
8.3.1.7	Getriebe .....	382
8.3.2	Motorräder für das Gelände (Off road) .....	384
8.3.2.1	Motocross .....	384
8.3.2.2	Enduro und Rallye .....	390
8.3.2.3	Trial .....	391
8.3.3	Gesetzgebung .....	392
8.3.3.1	Abgasemissionen .....	392
8.3.3.2	Geräuschemissionen .....	400
8.3.4	Rennmotoren .....	402
8.3.4.1	125 und 250 2T für GP .....	402
8.3.4.2	GPI .....	404
8.3.5	Sonderanwendungen .....	409
8.3.5.1	Schneemobil .....	409
8.3.5.2	Wassermotorräder oder PWC (Personal Water Craft) .....	409
8.4	Kreiskolbenmotor/Wankelmotor .....	415
8.4.1	Historie .....	415
8.4.2	Generelle Funktionsweise eines Kreiskolbenmotors .....	416
8.4.3	Das Viertaktprinzip .....	417
8.4.4	Der Kreiskolbenmotor des Pkw's Renesis .....	418
8.4.4.1	Der Seitenauslass .....	419
8.4.4.2	Variable Ansaugsteuerung und elektronische Drosselklappe .....	419
8.4.5	Der Wasserstoff-Kreiskolbenmotor .....	421

<b>9</b>	<b>Tribologie</b> .....	422
9.1	Reibung .....	422
9.1.1	Kenngrößen .....	422
9.1.2	Reibungszustände .....	422
9.1.3	Verfahren zur Reibungsmessung .....	423
9.1.4	Einfluss des Betriebszustandes und der Randbedingungen .....	425
9.1.4.1	Einlaufzustand des Verbrennungsmotors .....	425
9.1.4.2	Ölviskosität .....	425
9.1.4.3	Temperatureinfluss .....	425
9.1.4.4	Motorbetriebspunkt .....	426
9.1.5	Einfluss der Reibung auf den Kraftstoffverbrauch .....	426
9.1.6	Reibungsverhalten ausgeführter Verbrennungsmotoren .....	427
9.1.6.1	Reibungsaufteilung .....	427
9.1.6.2	Triebwerk .....	429
9.1.6.2.1	Kurbelwelle .....	429
9.1.6.2.2	Pleuellager und Kolbengruppe .....	430
9.1.6.2.3	Massenausgleich .....	430
9.1.6.3	Ventilsteuerung (Ventil- und Steuertrieb) .....	431
9.1.6.4	Nebenaggregate .....	432
9.1.6.4.1	Ölpumpe .....	432
9.1.6.4.2	Kühlmittelpumpe .....	434
9.1.6.4.3	Generator .....	434
9.1.6.4.4	Einspritzpumpe .....	435
9.1.6.4.5	Klimakompressor .....	435
9.1.6.4.6	Kühlerventilator .....	436
9.1.6.4.7	Servolenkungspumpe .....	436
9.1.6.4.8	Vakuumpumpe .....	437
9.1.7	Verfahren zur Reibungsberechnung am Beispiel der Kolbengruppe .....	437
9.2	Schmierung .....	438
9.2.1	Tribologische Grundlagen .....	438
9.2.1.1	Reibung .....	439
9.2.1.2	Verschleiß .....	440
9.2.2	Schmiersystem .....	441
9.2.2.1	Schmierung .....	441
9.2.2.2	Bauteile und Funktion .....	441
<b>10</b>	<b>Ladungswechsel</b> .....	448
10.1	Gaswechseleinrichtungen beim 4-Takt-Motor .....	448
10.1.1	Bauformen des Ventiltriebs .....	449
10.1.2	Bauelemente des Ventiltriebs .....	451
10.1.3	Kinematik und Dynamik des Ventiltriebs .....	456
10.1.4	Auslegung der Gaswechseleinrichtungen bei 4-Takt-Motoren .....	458
10.2	Ladungswechselrechnung .....	471
10.3	Gaswechsel bei Zweitaktmotoren .....	474
10.3.1	Spülverfahren .....	474
10.3.2	Gaswechselorgane .....	476
10.3.3	Spülluftversorgung .....	477
10.4	Variable Ventilsteuerungen .....	480
10.4.1	Nockenwellenversteller .....	482
10.4.1.1	Überblick zu Funktionsprinzipien von Nockenwellenverstellern .....	482
10.4.1.2	Motorische Auswirkungen durch Nockenwellenversteller .....	484
10.4.1.3	Nockenwellenversteller an Serienmotoren .....	486
10.4.1.4	Perspektiven von Nockenwellenverstellern .....	488
10.4.2	Systeme mit stufenweiser Ventilhub- oder -öffnungsauvervariation .....	490
10.4.3	Vollvariable Ventilsteuerungen .....	493
10.4.3.1	Rückblick auf die Entwicklung vollvariabler mechanischer Ventilsteuerungen .....	493
10.4.3.2	Mechanische Systeme in Serie .....	495
10.4.3.3	Mechanische Systeme in Entwicklung .....	500
10.4.3.4	Hydraulisch betätigte Systeme .....	504
10.4.3.5	Elektromechanische Systeme .....	505
10.4.4	Perspektiven des variablen Ventiltriebs .....	508

10.5	Impulsaufladung und Laststeuerung von Hubkolbenmotoren durch ein Lufttaktventil .....	510
10.5.1	Einleitung .....	510
10.5.2	Technologiebeschreibung .....	511
10.5.3	Bauprinzip und Randbedingungen .....	511
10.5.4	Thermodynamisches Potential .....	512
10.5.4.1	Entdrosselung zur Kraftstoffeinsparung beim Ottomotor .....	512
10.5.4.1.1	Funktionsweise der Entdrosselung .....	512
10.5.4.1.2	Ergebnisse am Vollmotor (Otto V8) .....	514
10.5.4.2	Saugseitige Zylinderabschaltung .....	514
10.5.4.3	Impulsaufladung bei niedrigen Drehzahlen („low-end torque“) .....	514
10.5.4.3.1	Funktionsweise der Impulsaufladung .....	514
10.5.4.3.2	Ergebnisse am Vollmotor (Otto V8) .....	515
10.5.4.3.3	Dynamik bei Lastsprüngen .....	517
10.5.4.4	Miller-Verfahren .....	517
10.5.5	Zusammenfassende Bewertung .....	518
10.5.6	Impulsaufladung mit steuerbaren Ansaugluft-Ventilen .....	520
10.5.6.1	Einleitung .....	520
10.5.6.2	Anforderungen an die Komponenten für den Serieneinsatz .....	521
10.5.6.3	Elektrische Systemintegration .....	523
10.5.6.4	Mechanische Systemintegration .....	523
10.5.6.5	Integriertes Impulsader-Saugmodul .....	523
10.5.6.6	Ausblick .....	524
<b>11</b>	<b>Aufladung von Verbrennungsmotoren .....</b>	<b>525</b>
11.1	Mechanische Aufladung .....	525
11.2	Abgasturboaufladung .....	526
11.3	Ladeluftkühlung .....	527
11.4	Zusammenwirken von Motor und Verdichter .....	529
11.4.1	Viertaktmotor im Verdichterkennfeld .....	529
11.4.2	Mechanische Aufladung .....	530
11.4.3	Abgasturboaufladung .....	530
11.5	Dynamisches Verhalten .....	536
11.6	Zusatzmaßnahmen bei aufgeladenen Verbrennungsmotoren .....	539
11.6.1	Ottomotoren .....	539
11.6.2	Dieselmotoren .....	540
11.7	Leistungsexplosion durch Register- und zweistufige Aufladung bei Personenkraftwagen (Hochaufladung) .....	540
11.7.1	Historie und Evolution der zweistufigen Aufladeverfahren (Stufenaufladung) .....	540
11.7.2	Thermodynamik der zweistufigen Aufladung .....	542
11.7.3	Registerraufladung und zweistufige Aufladekonzepte/-systeme .....	543
11.7.3.1	Registerraufladung .....	543
11.7.3.2	Zweistufige Aufladung .....	544
11.7.4	Einsatzgebiete .....	545
11.8	Ermittlung von Turboladerkennfeldern an Turboladerprüfständen .....	546
11.8.1	Prinzipieller Aufbau eines Turboladerprüfstands .....	546
11.8.2	Verdichter- und Turbinenkennfelder .....	547
11.8.3	Besonderheiten bei der Verwendung von Turboladerkennfeldern in der Motorprozesssimulation .....	549
<b>12</b>	<b>Gemischbildungsverfahren und -systeme .....</b>	<b>552</b>
12.1	Innere Gemischbildung .....	552
12.2	Äußere Gemischbildung .....	552
12.3	Gemischbildung bei Ottomotoren (Vergaser/Benzineinspritzung) .....	552
12.3.1	Arbeitsweise des Vergasers .....	552
12.3.2	Bauarten .....	553
12.3.2.1	Anzahl der Ansaugluftkanäle .....	553
12.3.2.2	Lage der Ansaugluftkanäle .....	555
12.3.2.3	Bauarten für Sonderanwendungen .....	555
12.3.3	Wichtige Systeme an Vergasern .....	555
12.3.4	Elektronisch geregelter Vergaser .....	557
12.3.5	Gleichdruckvergaser .....	558
12.3.6	Betriebsverhalten .....	559
12.3.7	Lambda-Regelung .....	560

12.3.8	Gemischbildung mittels Benzineinspritzung .....	561
12.3.8.1	Saugrohreinspritzsysteme .....	561
12.3.8.2	Systeme für Direkteinspritzung .....	563
12.4	Gemischbildung bei Dieselmotoren .....	571
12.4.1	Einspritzsysteme – Überblick .....	572
12.4.2	Systeme mit einspritzsynchrone Druckerzeugung .....	576
12.4.2.1	Einzelpumpensysteme mit Leitung .....	577
12.4.2.2	Reiheneinspritzpumpe .....	578
12.4.2.3	Verteilereinspritzpumpe .....	580
12.4.2.4	Pumpe-Düse-System .....	583
12.4.3	Systeme mit zentralem Druckspeicher .....	585
12.4.3.1	Hochdruckpumpe .....	585
12.4.3.2	Rail und Leitungen .....	587
12.4.3.3	Injektor .....	587
12.4.3.4	Einspritzdüse .....	589
12.4.3.5	Elektronik .....	589
12.4.3.6	Entwicklungstrends .....	591
12.4.4	Einspritzdüsen und Düsenhalter .....	591
12.4.5	Anpassung des Einspritzsystems an den Motor .....	595
12.5	Kraftstoffversorgungssystem .....	599
12.5.1	Kraftstoffbehälter .....	599
12.5.1.1	Diesekraftstofftank .....	600
12.5.1.2	Ottokraftstofftank .....	600
12.5.2	Das Tankentlüftungssystem .....	600
12.5.3	Anforderungen an ein Kraftstofffördersystem .....	601
12.5.3.1	Dieselfördersystem .....	601
12.5.3.2	Ottokraftstofffördersystem .....	604
12.5.4	Die Füllstandsmessung .....	607
12.5.4.1	Anforderung an die Füllstandsmessung .....	607
12.5.4.2	Hebelgeber .....	608
12.5.4.3	MAGnetic Passive Position Sensor .....	608
<b>13</b>	<b>Zündung .....</b>	<b>609</b>
13.1	Ottomotor .....	609
13.1.1	Einleitung der Zündung .....	609
13.1.2	Anforderungen an das Zündsystem .....	609
13.1.3	Mindestzündenergien .....	609
13.1.4	Grundlagen der Funkenzündung .....	609
13.1.4.1	Phasen des Funkens .....	609
13.1.4.2	Energieübertragungswirkungsgrad .....	610
13.1.5	Spulenzündsystem (induktiv) .....	610
13.1.6	Weitere Zündsysteme .....	613
13.1.7	Zusammenfassung/Ausblick .....	613
13.1.8	Zündkerzen .....	614
13.1.8.1	Anforderungen an Zündkerzen .....	614
13.1.8.2	Aufbau .....	614
13.1.8.3	Wärmewert .....	615
13.1.8.4	Zündspannungsbedarf .....	616
13.1.8.5	Zündeigenschaft (und Gemischentflammung) .....	617
13.1.8.6	Verschleiß .....	618
13.1.8.7	Applikation .....	619
13.2	Dieselmotor .....	620
13.2.1	Selbstzündung und Verbrennung .....	620
13.2.2	Kaltstart Dieselmotor .....	620
13.2.2.1	Wichtige Einflussparameter .....	620
13.2.2.2	Startbewertungskriterien .....	622
13.2.3	Komponenten zur Kaltstartunterstützung .....	623
13.2.3.1	Glühsystem .....	623
13.2.3.2	Heizflansch .....	626
13.2.4	Ausblick .....	627
13.2.4.1	Kombinierte Systeme .....	627
13.2.4.2	Ionenstrommessung .....	628
13.2.4.3	Geregelte Glühsysteme .....	628

<b>14</b>	<b>Verbrennung</b> .....	630
14.1	Kraftstoffe und Kraftstoffchemie .....	630
14.2	Oxidation von Kohlenwasserstoffen .....	631
14.3	Selbstzündung .....	633
14.3.1	Das H <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> System .....	634
14.3.2	Zündung von Kohlenwasserstoffen .....	634
14.3.3	Schnelle Kompressionsmaschine .....	635
14.3.4	Dieselmotor .....	635
14.3.5	HCCI-Motor .....	636
14.3.6	Motorklopfen .....	636
14.3.7	Modellierung der Selbstzündung .....	636
14.3.7.1	Einschritt-Mechanismus .....	637
14.3.7.2	Shell-Modell .....	637
14.4	Flammenausbreitung .....	637
14.4.1	Turbulente Skalen .....	637
14.4.2	Flammentypen .....	638
14.4.2.1	Vorgemischte Flammen .....	639
14.4.2.2	Nicht-vorgemischte Flammen .....	640
14.4.2.3	Partiell-vorgemischte Flammen .....	640
14.5	Modellbildung und Simulation .....	640
14.5.1	Klassifizierung von Verbrennungsmodellen .....	641
14.5.2	Nulldimensionale Modelle .....	642
14.5.2.1	Ersatzbrennverläufe .....	642
14.5.2.2	Wärmeübergangsmodelle .....	643
14.5.3	Phänomenologische Modelle .....	644
14.5.3.1	Ottomotorische Verbrennung .....	644
14.5.3.2	Dieselmotorische Verbrennung .....	645
14.5.4	D-CFD Modelle .....	646
<b>15</b>	<b>Verbrennungsverfahren</b> .....	649
15.1	Verbrennungsverfahren für Dieselmotoren .....	649
15.1.1	Dieselverbrennung .....	649
15.1.2	Diesel-Viertakt-Verbrennungsverfahren .....	655
15.1.2.1	Verfahren mit indirekter Kraftstoffeinspritzung (IDI) .....	656
15.1.2.2	Verfahren mit direkter Kraftstoffeinspritzung (DI) .....	658
15.1.2.3	Gegenüberstellung der Verbrennungsverfahren .....	660
15.1.2.4	Entwicklungsrichtungen .....	662
15.1.2.5	Sonderverfahren und Besonderheiten .....	665
15.2	Ottomotoren .....	667
15.2.1	Brennverfahren von Port-Fuel-Injection-(PFI)-Motoren .....	667
15.2.2	Brennverfahren von Direct-Injection-Spark-Ignition-(DISI)-Motoren .....	675
15.2.2.1	Betriebsarten eines Ottomotors mit Direkteinspritzung .....	679
15.2.2.2	Ausprägungen und Spezifika des ottomotorischen Brennverfahrens mit Direkteinspritzung sowie dessen Technologiebausteine und Technologiekombinationen .....	681
15.3	Zweitakt Dieselmotor .....	696
15.4	Zweitaktotomotor .....	697
<b>16</b>	<b>Elektronik und Mechanik für Motor- und Getriebesteuerung</b> .....	702
16.1	Umweltanforderungen .....	702
16.1.1	Einbauklassen .....	702
16.1.2	Thermisches Management .....	703
16.2	Standalone Produkte .....	706
16.3	Verbindungstechnik .....	709
16.4	Integrierte Produkte (MTM = Mechatronic Transmission Module) .....	709
16.5	Elektronischer Aufbau, Strukturen und Bauelemente .....	711
16.5.1	Grundstruktur .....	711
16.5.2	Elektronische Bauelemente .....	711
16.5.2.1	Eingangsfiterbaustein Klopff-IC .....	711
16.5.2.2	Endstufenbaustein .....	712
16.5.2.3	Microcontroller .....	715
16.5.2.4	Spannungsregler .....	715
16.5.2.5	DC/DC Converter .....	715

16.6	Steuergeräteelektronik .....	715
16.6.1	Allgemeine Beschreibung .....	715
16.6.2	Signalaufbereitung .....	715
16.6.3	Signalauswertung .....	718
16.6.4	Signalausgabe .....	718
16.6.5	Spannungsversorgung .....	718
16.6.6	Schnittstellen .....	719
16.6.6.1	CAN-Bus Schnittstelle .....	719
16.6.6.2	LIN-Bus Schnittstelle .....	719
16.6.6.3	FlexRay-Bus Schnittstelle .....	719
16.6.7	Elektronik für Getriebesteuergeräte .....	719
16.7	Software-Strukturen .....	723
16.7.1	Aufgabe der Software bei der Steuerung von Motoren .....	723
16.7.2	Anforderungen an die Software .....	723
16.7.3	Das Schichtenkonzept der Software .....	724
16.7.4	Der Software-Entwicklungsprozess .....	725
16.8	Drehmomentbasierte Funktionsstruktur für Motorsteuerung .....	726
16.8.1	Modellbasierte Funktionen am Beispiel des Saugrohrfüllungsmodells .....	728
16.9	Funktionen .....	730
16.9.1	$\lambda$ -Regelung .....	730
16.9.2	Antrückelfunktion .....	732
16.9.3	Drosselklappenregelung .....	734
16.9.4	Klopffregelung .....	735
16.9.5	„On Board“-Diagnose (OBD) .....	737
16.9.5.1	Aufgaben der Eigendiagnose .....	738
16.9.5.2	Überwachung des Katalysators .....	739
16.9.6	Sicherheitskonzepte .....	740
<b>17</b>	<b>System Antriebsstrang .....</b>	<b>743</b>
17.1	Antriebsstrang-Architektur .....	743
17.2	Längsdynamik des Kraftfahrzeuges .....	743
17.3	Getriebetypen .....	744
17.4	Leistungsebene und Signalverarbeitungsebene .....	745
17.5	Getriebesteuerung .....	746
17.5.1	Funktionen .....	746
17.5.1.1	Überblick .....	746
17.5.1.2	Fahr- oder Schaltstrategie .....	747
17.5.1.3	Automatgetriebe mit Planetenradsätzen und Drehmomentwandler .....	748
17.5.1.4	Automatisiertes Handschaltgetriebe .....	748
17.5.1.5	Stufenlosgetriebe (CVT) .....	749
17.6	Integriertes Antriebsstrangmanagement (IPM <sup>®</sup> ) .....	749
17.7	Komponenten für Antriebsstrangelektrifizierung .....	751
17.7.1	Überblick .....	751
17.7.2	Varianten Hybrid- und Elektroantrieb .....	751
17.7.2.1	Mikrohybrid .....	751
17.7.2.2	Mildhybrid .....	751
17.7.2.3	Vollhybrid .....	751
17.7.2.4	Plugin-Hybrid .....	752
17.7.2.5	Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge .....	752
17.7.3	Komponenten .....	752
17.7.4	Leistungselektronik .....	752
17.7.4.1	Drehstrom-Inverter .....	752
17.7.4.2	DC/DC Wandler .....	753
17.7.5	Elektromotor .....	754
17.7.5.1	Technologien .....	754
17.7.5.1.1	Asynchronmotor .....	754
17.7.5.1.2	Permanent erregter Synchronmotor .....	755
17.7.5.1.3	Fremderregter Synchronmotor .....	755
17.7.6	Energiespeicher .....	755
17.7.6.1	Überblick .....	755
17.7.6.2	Batteriesystem .....	756
17.7.6.2.1	Li-Ionen Zellen .....	757
17.7.6.2.2	Sicherheit .....	757
17.7.6.2.3	Ausblick .....	758

<b>18 Sensoren</b> .....	759
18.1 Temperatursensoren .....	759
18.2 Füllstandsensoren .....	759
18.3 Klopfensensoren .....	759
18.4 Abgassensoren .....	761
18.4.1 Lambdasensoren .....	761
18.4.2 NO <sub>x</sub> -Sensor .....	761
18.5 Drucksensoren .....	762
18.5.1 Normaldrucksensoren .....	763
18.5.1.1 Piezoresistives Messprinzip .....	763
18.5.1.2 Kapazitives Messprinzip .....	763
18.5.2 Mitteldrucksensoren .....	764
18.5.3 Hochdrucksensoren .....	764
18.5.4 Druckschalter .....	764
18.6 Luftmassensensor .....	765
18.6.1 Messprinzip .....	765
18.6.2 Mass Airflow Sensor .....	765
18.6.3 Sekundär Luftmassensensor (SAF = Secondary Air Flow) .....	766
18.7 Drehzahlsensoren .....	766
18.7.1 Passive Drehzahlsensoren .....	766
18.7.2 Aktive Sensoren .....	767
18.8 Brennraumdrucksensoren für Dieselmotoren .....	767
<b>19 Aktuatorik</b> .....	770
19.1 Antriebe .....	770
19.1.1 Pneumatische Antriebe .....	770
19.1.2 Elektrische Antriebe .....	770
19.1.2.1 Schrittmotor .....	770
19.1.2.2 DC-Motor .....	771
19.1.2.3 Torque-Motor .....	771
19.1.2.4 EC-Motor .....	771
19.1.3 Kommunikation mit der Motorsteuerelektronik .....	771
19.1.3.1 Gesteuerte Stellglieder .....	771
19.1.3.2 Extern geregelte Stellglieder .....	771
19.1.3.3 Intern geregelte Stellglieder (smarte Aktuatoren) .....	772
19.1.4 Rückstellung/Default-Position .....	772
19.2 Drosselklappenstellglieder .....	772
19.2.1 Kernfunktion Ottomotor .....	772
19.2.2 Kernfunktion Dieselmotor .....	772
19.2.3 Zusätzliche Funktionen .....	773
19.2.3.1 Leerlaufregelung Ottomotor .....	773
19.2.3.2 Positionssignal .....	773
19.2.3.3 Lastschlagdämpfung .....	773
19.2.3.4 Tempomatfunktion .....	773
19.2.4 „Drive-by-wire“/E-Gas .....	774
19.2.5 Wast-gate Funktion .....	775
19.2.6 Unterdruck/Vordrosselstellglieder .....	775
19.3 Drall- und Tumbleklappen/Resonanzaufladung .....	775
19.3.1 Port-Deactivation .....	775
19.3.2 Schichtladung .....	776
19.4 Turbolader mit variabler Turbinengeometrie .....	777
19.5 Abgasrückführventile .....	777
19.6 Verdunstungsemission, Komponenten .....	780
19.6.1 Tankentlüftungsventile .....	780
19.6.2 Diagnose Verdunstungsemission .....	780
19.6.2.1 Tankdiagnose mit Überdruck .....	781
19.6.2.2 Tankdiagnose mit Unterdruck .....	782
<b>20 Kühlung von Verbrennungsmotoren</b> .....	784
20.1 Allgemeines .....	784
20.2 Anforderungen an das Kühlsystem .....	784
20.3 Berechnungsgrundlagen und Simulations-Tools .....	784

20.4	Subsysteme der Motorkühlung .....	786
20.4.1	Kühlmittelkühlung .....	786
20.4.1.1	Kühlerschutzmittel .....	787
20.4.2	Ladeluftkühlung .....	789
20.4.3	Abgaskühlung .....	790
20.4.4	Ölkühlung .....	790
20.4.5	Lüfter und Lüfterantriebe .....	791
20.5	Kühlmodule .....	792
20.6	Gesamtsystem Motorkühlung .....	792
<b>21</b>	<b>Abgasemissionen .....</b>	<b>795</b>
21.1	Gesetzliche Vorschriften .....	795
21.1.1	Europa .....	795
21.1.2	Japan .....	796
21.1.3	Harmonisierung der Abgasvorschriften .....	796
21.2	Abgasmesstechnik .....	796
21.2.1	Messtechnik für die Zertifizierung von Kraftfahrzeugen .....	796
21.2.2	Messtechnik für die Motorenentwicklung .....	798
21.3	Schadstoffe und ihre Entstehung .....	802
21.3.1	Ottomotor .....	803
21.3.1.1	Limitierte Abgaskomponenten .....	803
21.3.1.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten .....	805
21.3.2	Dieselmotor .....	805
21.3.2.1	Limitierte Abgaskomponenten .....	805
21.3.2.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten .....	807
21.4	Minderung von Schadstoffen .....	807
21.4.1	Motorische Maßnahmen .....	807
21.4.1.1	Ottomotor .....	807
21.4.1.2	Dieselmotor .....	809
21.5	Abgasnachbehandlung Ottomotor .....	812
21.5.1	Katalysatoraufbau und chemische Reaktionen .....	812
21.5.2	Katalysatorkonzepte stöchiometrisch betriebener Motoren .....	813
21.5.2.1	Dreiwegekatalysator .....	813
21.5.2.2	Der Sauerstoffspeicher .....	814
21.5.2.3	Kaltstartstrategien .....	815
21.5.2.4	Deaktivierungseffekte und ihre Auswirkung .....	817
21.5.3	Katalysatorkonzepte für Magermotoren .....	819
21.5.3.1	Möglichkeiten zur NO <sub>x</sub> -Reduktion in magerem Abgas .....	820
21.5.3.2	Der NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator .....	822
21.5.3.3	System mit Vorkatalysator und NO <sub>x</sub> -Adsorber .....	828
21.5.4	Metallische Katalysatorträger .....	828
21.6	Abgasnachbehandlung Dieselmotor .....	835
21.6.1	Diesel-Oxidationskatalysatoren .....	835
21.6.1.1	Schadstoffe im Diesel-Abgas .....	835
21.6.1.2	Charakteristika von Diesel-Oxidationskatalysatoren .....	836
21.6.1.3	Deaktivierung der Katalysator-Oberfläche .....	836
21.6.1.4	Beurteilung von Diesel-Oxidationskatalysatoren .....	838
21.6.2	NO <sub>x</sub> Adsorber für Diesel-Pkw .....	840
21.6.2.1	Arbeitsbereich des Speicherkatalysators .....	840
21.6.2.2	Entschwefelung .....	841
21.6.2.3	Regenerationsmethoden .....	841
21.6.3	Partikel/Partikelfilter .....	842
21.6.3.1	Partikeldefinitionen und Partikeleigenschaften .....	842
21.6.3.2	Zielsetzungen für die Partikelfiltration .....	845
21.6.3.3	Anforderungen an Filtermedien, technische Lösungen .....	845
21.6.3.4	Abscheidung und Haftung .....	848
21.6.3.5	Regeneration und periodische Reinigung .....	851
21.6.3.6	Emissionen während Regenerationen und Sekundäremissionen .....	856
21.6.3.7	Druckverlust .....	857
21.6.3.8	Bauraum und Systemintegration .....	857
21.6.3.9	Schadensmechanismen/Erfahrungen .....	858
21.6.3.10	Qualitätskriterien .....	859
21.6.3.11	Eignungstest, Typenprüfung, OBD, Feldkontrolle .....	859

21.6.3.12	Partikelmesstechnik .....	860
21.6.3.13	Penetration oder Abscheidegrad .....	863
21.6.3.14	Global Warming durch Rußpartikel .....	863
21.6.3.15	Kosten/Nutzen-Betrachtung zur Nachrüstung von Partikelfiltern .....	863
21.6.3.16	Katalytischer Partikelfilter .....	863
<b>22</b>	<b>Betriebsstoffe</b> .....	<b>867</b>
22.1	Kraftstoffe .....	867
22.1.1	Dieseldieselkraftstoff (DK) .....	868
22.1.1.1	DK-Komponenten und Zusammensetzung .....	868
22.1.1.2	Kennwerte und Eigenschaften .....	869
22.1.1.3	Additive für DK .....	875
22.1.1.4	Alternative Dieseldieselkraftstoffe .....	877
22.1.2	Ottokraftstoff (OK) .....	880
22.1.2.1	OK-Komponenten und Zusammensetzung .....	881
22.1.2.2	Kennwerte und Eigenschaften .....	884
22.1.2.3	Alternative Ottokraftstoffe .....	896
22.2	Schmierstoffe .....	905
22.2.1	Schmierstoffarten .....	905
22.2.2	Aufgabe der Schmierung .....	905
22.2.3	Arten der Schmierung .....	905
22.2.4	Anforderungen an die Schmierung .....	905
22.2.5	Viskosität/Viskositäts-Index (V.I.) .....	907
22.2.5.1	Einfluss der Temperatur auf die Viskosität .....	907
22.2.5.2	Einfluss des Drucks auf die Viskosität .....	908
22.2.5.3	Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität .....	908
22.2.6	Basisflüssigkeiten .....	909
22.2.6.1	Basisflüssigkeiten aus Mineralöl .....	909
22.2.6.2	Synthetische Basisflüssigkeiten .....	910
22.2.7	Additive für Schmierstoffe .....	910
22.2.7.1	V.I.-Verbesserer .....	911
22.2.7.2	Detergents/Dispensants .....	911
22.2.7.3	Antioxidantien und Korrosionsinhibitoren .....	913
22.2.7.4	Reibungs- und Verschleißminderer (EP/AW-Additive) .....	913
22.2.7.5	Schauminhibitoren .....	913
22.2.8	Motoröle für Viertaktmotoren .....	914
22.2.8.1	SAE-Viskositätsklassen für Motoröle .....	914
22.2.8.2	Einbereichsöle .....	915
22.2.8.3	Mehrbereichsöle .....	915
22.2.8.4	Leichtlauföle .....	915
22.2.8.5	Einlauföle .....	916
22.2.8.6	Gasmotoröle .....	916
22.2.8.7	Wasserstoffmotoröle .....	916
22.2.8.8	Leistungsklassen .....	917
22.2.8.9	Gebrauchölbeurteilung .....	924
22.2.8.10	Rennmotoröle .....	928
22.2.8.11	Wankelmotoröle .....	928
22.2.9	Motoröle für Zweitaktmotoren .....	928
22.2.9.1	Leistungsklassen .....	929
22.2.9.2	Prüfverfahren .....	929
22.3	Kühlmittel .....	929
22.3.1	Gefrierschutz .....	930
22.3.2	Korrosionsschutz .....	931
22.3.3	Spezifikationen .....	932
<b>23</b>	<b>Filtration von Betriebsstoffen</b> .....	<b>933</b>
23.1	Luftfilter .....	933
23.1.1	Bedeutung der Luftfiltration für Verbrennungsmotoren .....	933
23.1.2	Verunreinigung der Motoransaugluft .....	933
23.1.3	Kenngrößen zur Beurteilung von Luftfiltermedien .....	933
23.1.4	Messmethoden und Auswertung .....	934
23.1.5	Anforderungen an moderne Luftfiltersysteme .....	935
23.1.6	Auslegungskriterien für Motorluftfilterelemente .....	935

23.1.7	Filtergehäuse .....	936
23.1.7.1	Konstruktive Auslegung von Filtergehäusen .....	936
23.2	Kraftstofffilter .....	936
23.2.1	Ottokraftstofffilter .....	937
23.2.2	Diesekraftstofffilter .....	938
23.2.3	Leistungsdaten von Kraftstofffiltern .....	940
23.3	Filtration von Motoröl .....	941
23.3.1	Verschleiß und Filtration .....	941
23.3.2	Hauptstromölfilter .....	941
23.3.3	Abscheidegrad und Filterfeinheit .....	943
23.3.4	Nebenstromölfiltration .....	944
<b>24</b>	<b>Berechnung und Simulation .....</b>	<b>946</b>
24.1	Festigkeits- und Schwingungsberechnung .....	946
24.1.1	Verfahren und Methoden .....	946
24.1.2	Ausgewählte Anwendungsbeispiele .....	948
24.1.3	Kolbenberechnungen .....	950
24.1.3.1	Überblick .....	950
24.1.3.2	Anforderungen an Kolbenwerkstoffe und deren Eigenschaften .....	952
24.1.3.3	Erstellung des Finite-Elemente Modells auf Basis der CAD-Geometrie .....	952
24.1.3.4	Thermodynamische Simulation zur Bestimmung der thermischen Randbedingung .....	953
24.1.3.5	FE-Berechnung des Temperaturfeldes .....	954
24.1.3.6	FE-Berechnung der Spannungen und Deformationen für jeden zu betrachteten Lastfall .....	955
24.1.3.7	Abschätzung der Betriebsfestigkeit .....	959
24.1.3.8	Auswertung der Berechnungsergebnisse .....	961
24.2	Strömungsberechnung .....	961
24.2.1	Ein- und Quasidimensionale Verfahren .....	961
24.2.2	Dreidimensionale Strömungsberechnung .....	964
24.2.3	Ausgewählte Anwendungsbeispiele .....	966
<b>25</b>	<b>Verbrennungsdiagnostik – Indizieren und Visualisieren in der Verbrennungsentwicklung .....</b>	<b>974</b>
25.1	Themenstellung .....	974
25.2	Indizieren .....	974
25.2.1	Messtechnik .....	977
25.2.2	Qualitätskriterien .....	977
25.2.3	Indizieren – Ausblick .....	978
25.2.4	Zyklusgenaue signal- und modellbasierte Motorsteuerung .....	978
25.3	Visualisieren .....	979
25.3.1	Aufgaben- und Themenstellung .....	979
25.3.2	Visualisieren im realen Motorbetrieb .....	979
25.3.2.1	Strahlungseigenschaften von Gas-, Benzin- und Dieselflammen .....	979
25.3.2.2	Flammenspektroskopie .....	980
25.3.2.3	Flammenausbreitung in vorgemischter Ladung bei Fremdzündung .....	981
25.3.2.4	Flammenausbreitung bei Diffusionsverbrennung im Dieselmotor .....	982
25.3.3	Visualisieren der Verbrennung im realen Motorbetrieb durch das Eigenleuchten der Flamme .....	982
25.3.3.1	Technische Umsetzung: Flammenausbreitung .....	982
25.3.3.2	Messgeräte – Messsysteme .....	987
25.3.4	Visualisieren beleuchteter Vorgänge .....	987
25.3.4.1	Visualisieren der Gemischverteilung .....	988
25.3.4.2	Visualisieren von Geschwindigkeitsfeldern .....	988
25.3.5	Visualisieren – Ausblick .....	989
<b>26</b>	<b>Kraftstoffverbrauch .....</b>	<b>991</b>
26.1	Allgemeine Einflussgrößen .....	991
26.1.1	Luftwiderstand .....	992
26.1.2	Gewicht .....	994
26.1.3	Radwiderstand .....	995
26.1.4	Kraftstoffverbrauch .....	995
26.2	Motorische Maßnahmen .....	996
26.2.1	Downsizing .....	997
26.2.2	Downspeeding .....	1000

26.2.3	Dieselmotor .....	1000
26.2.4	Ottomotor .....	1001
	26.2.4.1 Magerkonzept, Direkteinspritzung .....	1001
26.2.5	Brennverfahren HCCI .....	1003
26.2.6	Variabler Ventiltrieb .....	1003
	26.2.6.1 Zündung .....	1004
26.2.7	Zylinderabschaltung .....	1005
	26.2.7.1 Konzept zur Verbrauchsreduzierung .....	1005
	26.2.7.2 Verbrauchsvorteile im Teillastgebiet .....	1005
26.2.8	Nebenaggregate .....	1006
26.2.9	Wärmemanagementmaßnahmen zur Verbrauchsreduzierung .....	1007
26.2.10	Hybridkonzepte .....	1007
26.3	Getriebeübersetzungen .....	1011
26.3.1	Auswahl des direkten Ganges .....	1011
26.3.2	Auswahl der Gesamtübersetzung im größten Gang .....	1011
	26.3.2.1 Auslegung auf maximale Höchstgeschwindigkeit .....	1011
	26.3.2.2 Überdrehende Auslegung .....	1011
	26.3.2.3 Unterdrehende Auslegung .....	1012
	26.3.2.4 Wahl des verbrauchsgünstigsten Ganges .....	1012
26.4	Fahrerverhalten .....	1013
26.5	CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	1013
	26.5.1 CO <sub>2</sub> -Emission und Kraftstoffverbrauch .....	1015
	26.5.2 Motorapplikationseinfluss auf die CO <sub>2</sub> -Emission .....	1015
	26.5.3 Entwicklung der globalen CO <sub>2</sub> -Emission .....	1015
<b>27</b>	<b>Geräuschemissionen</b> .....	<b>1018</b>
27.1	Physikalische Grundlagen und Begriffe .....	1018
27.2	Gesetzliche Außengeräuschvorschriften .....	1021
	27.2.1 Außengeräusch-Messverfahren .....	1021
	27.2.2 Kritische Betrachtung der Aussagefähigkeit des bestehenden Außengeräusch-Messverfahrens .....	1021
	27.2.3 Zukünftiges Außengeräusch-Messverfahren und Grenzwerte .....	1022
27.3	Geräuschquellen des Außengeräusches .....	1022
27.4	Maßnahmen zur Außengeräuschminderung .....	1023
	27.4.1 Motorseitige Maßnahmen .....	1023
	27.4.2 Fahrzeugseitige Maßnahmen .....	1024
27.5	Motorgeräusch im Innenraum .....	1025
27.6	Akustische Leitlinien für den Motorkonstrukteur .....	1026
27.7	Messtechniken und Analysemethoden .....	1028
27.8	Psychoakustik .....	1031
27.9	Sound-Engineering .....	1031
27.10	Simulationswerkzeuge .....	1032
27.11	Anti-Noise-Systeme: Geräuschminderung durch Gegenschall .....	1033
<b>28</b>	<b>Motorenmesstechnik</b> .....	<b>1035</b>
<b>29</b>	<b>Hybridantriebe</b> .....	<b>1054</b>
29.1	Historie .....	1054
29.2	Grundlagen der Hybridantriebe (allgemeiner Überblick) .....	1058
	29.2.1 Prinzip .....	1059
	29.2.2 Komponenten .....	1059
	29.2.2.1 Verbrennungsmotor .....	1059
	29.2.2.2 E-Motor .....	1059
	29.2.2.3 Generator .....	1060
	29.2.2.4 Elektrischer Energiespeicher .....	1060
	29.2.2.5 Getriebe .....	1060
	29.2.2.6 Energiemanagement .....	1060
	29.2.2.7 Leistungselektronik .....	1060
	29.2.3 Funktionen .....	1060
	29.2.3.1 Start/Stopp (Stopp/Start) .....	1060
	29.2.3.2 Elektrisches Fahren .....	1060
	29.2.3.3 Lastpunktverschiebung .....	1060

	29.2.3.4	Boosten .....	1061
	29.2.3.5	Ausgleich von Drehmomentschwingungen .....	1061
	29.2.3.6	Bremsenergierekuperation .....	1061
	29.2.3.7	Elektrische Nebenaggregate .....	1062
	29.2.3.8	Automatisches Einparken .....	1062
29.3		Einteilung der Hybridantriebe .....	1062
	29.3.1	Arten .....	1062
	29.3.2	Leistungseinteilung .....	1063
29.4		Elektrische Antriebssysteme .....	1065
	29.4.1	E-Maschinen .....	1065
	29.4.2	Leistungsbereich .....	1072
	29.4.3	Steuerung .....	1072
	29.4.4	Leistungselektronik .....	1072
	29.4.5	Stromrichter .....	1073
29.5		Energiespeichersysteme .....	1074
	29.5.1	Blei-Säure Batterie .....	1075
	29.5.2	Nickel-Metallhydrid-Batterie .....	1076
	29.5.3	Natrium-Nickelchlorid-Batterie .....	1077
	29.5.4	Lithium-Ionen-Batterie .....	1077
	29.5.5	SuperCaps .....	1080
	29.5.6	Batteriemanagement .....	1080
29.6		Getriebe für Hybridantriebe .....	1083
	29.6.1	Getriebe ohne integrierte E-Maschine .....	1084
	29.6.2	Getriebe mit integrierter E-Maschine .....	1085
	29.6.3	Sonderbauformen von Getrieben .....	1088
29.7		Energiemanagement .....	1089
	29.7.1	Start/Stop .....	1090
	29.7.2	Regelung des Generators .....	1090
	29.7.3	Energierückgewinnung .....	1091
	29.7.4	Ladezustandsregelung .....	1092
	29.7.5	Energieverteilungsmanagement .....	1092
	29.7.6	Bordnetz .....	1092
29.8		Betriebsstrategien .....	1093
	29.8.1	Wirkungsgrade .....	1094
	29.8.2	Energiebilanz .....	1095
	29.8.3	Kraftstoffverbrauch .....	1096
	29.8.4	Abgasemissionen .....	1096
	29.8.5	Fahrleistungen .....	1096
	29.8.6	Ansätze zur Festlegung einer Betriebsstrategie .....	1096
29.9		Aktuelle Hybridfahrzeuge .....	1097
	29.9.1	Systeme .....	1097
	29.9.2	Fahrzeugaufbau .....	1101
29.10		Zukünftige Entwicklung .....	1103
	29.10.1	Ottohybridantrieb .....	1104
	29.10.2	Dieselybridantrieb .....	1105
	29.10.3	Reiner Elektroantrieb .....	1105
<b>30</b>		<b>Alternative Fahrzeugantriebe und APUs (Auxiliary Power Units) .....</b>	<b>1106</b>
	30.1	Gründe für Alternativen .....	1106
	30.2	Hybridfahrzeuge .....	1107
	30.3	Elektroantrieb .....	1114
	30.4	Speichersysteme .....	1116
	30.5	Stirlingmotor .....	1117
	30.6	Gasturbine .....	1118
	30.7	Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb .....	1119
	30.7.1	Der Aufbau der PEM-Brennstoffzelle .....	1120
	30.7.2	Die Brennstoffzelle im Fahrzeug .....	1120
	30.7.3	Bewertung der Brennstoffzelle im Vergleich zu anderen Antrieben .....	1123
	30.8	Zusammenfassende Bewertung der alternativen Energien und Antriebe .....	1124
	30.9	Stromerzeugung durch Auxiliary Power Unit = APU .....	1125
	30.9.1	Thermoelektrik .....	1125
	30.9.2	Die Brennstoffzelle als APU .....	1125
	30.9.3	Brennkraftmaschine in Kombination mit einem Lineargenerator (Freikolbenlineargenerator) .....	1128

---

<b>31 Energiemanagement in Motor und Fahrzeug</b> .....	1131
31.1 Verluste bei der Energieumwandlung .....	1132
31.2 Bedarfsorientiertes Energiemanagement .....	1133
31.3 Stromerzeugung im Fahrzeug .....	1134
31.3.1 Thermoelektrischer Generator (TEG) .....	1134
31.4 Wärmemanagement .....	1136
<b>32 Ausblick</b> .....	1139
<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	1143