

Inhaltverzeichnis

1	Geschichtlicher Rückblick	1
2	Definition und Einteilung der Hubkolbenmotoren	8
2.1	Definitionen	8
2.2	Möglichkeiten der Einteilung	9
2.2.1	Verbrennungsverfahren	9
2.2.2	Kraftstoff	9
2.2.3	Arbeitsverfahren	9
2.2.4	Gemischbildung	10
2.2.5	Ladungswechselsteuerung	10
2.2.6	Ladungseinbringung	10
2.2.7	Bauform	10
2.2.8	Zündung	11
2.2.9	Kühlung	12
2.2.10	Lastregelung	12
2.2.11	Einsatzzweck	13
2.2.12	Drehzahl- und Leistungsabstufung	13
3	Kenngrößen	14
3.1	Hubvolumen	14
3.2	Verdichtungsverhältnis	15
3.3	Drehzahl und Kolbengeschwindigkeit	16
3.4	Drehmoment und Leistung	17
3.5	Kraftstoffverbrauch	18
3.6	Gasarbeit und Mitteldruck	19
3.7	Wirkungsgrad	22
3.8	Luftdurchsatz und Zylinderfüllung	22
3.9	Luft-Kraftstoff-Verhältnis	23
4	Kennfelder	26
4.1	Verbrauchskennfelder	28
4.2	Emissionskennfelder	29
4.3	Zündungs- und Einspritzkennfelder	32
4.4	Abgastemperaturkennfelder	33
5	Thermodynamische Grundlagen	34
5.1	Kreisprozesse	34
5.2	Vergleichsprozesse	35
5.2.1	Einfache Modellprozesse	35
5.2.1.1	Der Gleichraumprozess	36
5.2.1.2	Gleichdruckprozess	36
5.2.1.3	Seiliger-Prozess	37
5.2.1.4	Vergleichende Betrachtung der Kreisprozesse	37
5.2.2	Exergieverluste	37

5.3	Offene Vergleichsprozesse	39
5.3.1	Arbeitsprozess des vollkommenen Motors	39
5.3.1.1	Grundlagen der Berechnung	39
5.3.1.2	Arbeit des vollkommenen Motors	41
5.3.1.3	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors	41
5.3.1.4	Exergieverlust beim vollkommenen Prozess	41
5.3.2	Annäherung an den realen Arbeitsprozess	42
5.3.2.1	Nulldimensionale Modelle	42
5.3.2.2	Mehrdimensionale Modelle	44
5.4	Wirkungsgrade	45
5.5	Energiebilanz am Motor	46
5.5.1	Bilanzgleichung	46
6	Triebwerk	48
6.1	Kurbeltrieb	48
6.1.1	Aufbau und Funktion	48
6.1.2	Kräfte am Kurbeltrieb	51
6.1.3	Tangentialkraftverlauf und mittlere Tangentialkraft	56
6.1.4	Massenkräfte	58
6.1.4.1	Massenkräfte am Einzylinder-Triebwerk	59
6.1.4.2	Massenkräfte am Zweizylinder-V-Triebwerk	59
6.1.4.3	Massenkräfte und Massenmomente bei Mehrzylinder-Triebwerken	61
6.1.4.4	Beispiel (Fünfzylinder-Reihenmotor)	62
6.1.5	Massenausgleich	64
6.1.5.1	Ausgleich am Einzylinder-Triebwerk	64
6.1.5.2	Ausgleich am Mehrzylinder-Triebwerk	65
6.1.6	Innere Momente	68
6.1.7	Kröpfungs- und Zündfolgen	68
6.2	Drehschwingungen	69
6.2.1	Grundlagen	69
6.2.2	Reduktion der Maschinenanlage	71
6.2.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	71
6.2.4	Erregerkräfte, -arbeit und -amplituden	71
6.2.5	Maßnahmen zur Verringerung der Kurbelwellenausschläge	73
6.2.6	Zweimassenschwungräder	74
6.3	Variabilität von Verdichtung und Hubvolumen	76
6.3.1	Variables Hubvolumen	76
6.3.2	Variable Verdichtung	76
7	Motorkomponenten	81
7.1	Kolben/Kolbenbolzen/Kolbenbolzensicherung	81
7.1.1	Kolben	81
7.1.1.1	Anforderungen und Funktion	81
7.1.1.2	Konstruktive Gestaltung	81
7.1.1.3	Desachsierung der Nabenbohrung	83
7.1.1.4	Einbau- und Laufspiele	84
7.1.1.5	Kolbenmassen	84
7.1.1.6	Betriebstemperaturen	85
7.1.1.7	Kolbenkühlung	85
7.1.1.8	Kolbenbauarten	86
7.1.1.9	Kolbenherstellung	90
7.1.1.10	Laufflächenschutz/Oberflächenschutz	91
7.1.1.11	Kolbenwerkstoffe	92

7.1.2	Kolbenbolzen	93
7.1.2.1	Funktion	93
7.1.2.2	Bauarten	94
7.1.2.3	Anforderung und Dimensionierung	94
7.1.2.4	Werkstoffe	95
7.1.3	Kolbenbolzensicherungen	96
7.2	Pleuel	96
7.2.1	Aufbau des Pleuels	96
7.2.2	Belastung	97
7.2.3	Pleuelverschraubung	98
7.2.4	Gestaltung	99
7.2.4.1	Pleuelstangenverhältnis	99
7.2.5	Pleulfertigung	100
7.2.5.1	Rohteileherstellung	100
7.2.5.2	Bearbeitung	100
7.2.6	Pleuel-Werkstoffe	102
7.3	Kolbenringe	103
7.3.1	Ausführungsformen	104
7.3.1.1	Verdichtungsringe	104
7.3.1.2	Ölabstreifringe	105
7.3.2	Ringbestückungen	106
7.3.3	Kenngößen	107
7.3.4	Kolbenringherstellung	109
7.3.4.1	Formgebung	109
7.3.4.2	Verschleißschutzschichten	109
7.3.4.3	Oberflächenbehandlungen	110
7.3.4.4	Werkstoffe für Kolbenringe	111
7.3.5	Beanspruchung, Schäden, Verschleiß, Reibung	111
7.4	Kurbelgehäuse	112
7.4.1	Aufgaben und Funktionen	112
7.4.2	Gestaltung von Zylinderkurbelgehäusen	114
7.4.2.1	Kurbelgehäusebauart	114
7.4.3	Optimierung der Akustik	119
7.4.4	Minimierung der Kurbelgehäusemasse	120
7.4.5	Gießverfahren für Kurbelgehäuse	122
7.4.5.1	Druckguss	122
7.4.5.2	Kokillenguss	122
7.4.5.3	Lost-Foam-Verfahren	122
7.4.5.4	Sandguss	123
7.4.5.5	Squeeze-Casting	123
7.5	Zylinder	123
7.5.1	Gestaltung von Zylindern	124
7.5.1.1	Monometall-Bauart	124
7.5.1.2	Einsatztechnik	125
7.5.1.3	Verbundtechnik	126
7.5.2	Bearbeitung von Zylinderlaufflächen	127
7.5.2.1	Bearbeitungsverfahren	128
7.5.3	Zylinderkühlung	129
7.5.3.1	Flüssigkeitskühlung	129
7.5.3.2	Luftkühlung	129
7.6	Ölwanne	130
7.6.1	Ölwannebauart	130
7.7	Kurbelgehäuseentlüftung	131
7.7.1	Gesetzliche Randbedingungen	131
7.7.2	Technische Anforderungen	132
7.7.3	Systemaufbau aktueller Kurbelgehäuseentlüftungssysteme	135

7.7.4	Ölabscheidung	135
	7.7.4.1 Grobölabscheidung	137
	7.7.4.2 Ölnebelabscheidung	137
7.7.5	Kurbelgehäusedruckregelung	141
	7.7.5.1 Druckregelventile	141
	7.7.5.2 Impaktor-Druckregelventile	142
7.7.6	Module und Ventilhaubenintegration	144
7.8	Zylinderkopf	145
7.8.1	Grundauslegung des Zylinderkopfes	145
	7.8.1.1 Auslegung der Grundgeometrie	146
	7.8.1.2 Festlegung der Fertigungsverfahren	147
	7.8.1.3 Auslegung der Gaswechsellorgane	147
	7.8.1.4 Variable Ventilsteuerungen	147
7.8.2	Die Konstruktion des Zylinderkopfes	147
	7.8.2.1 Auslegung der Grobmessungen	147
	7.8.2.2 Brennraum- und Kanalauslegung	148
	7.8.2.3 Ventiltriebsauslegung	151
	7.8.2.4 Kühlkonzepte	151
	7.8.2.5 Ölhaushalt	152
	7.8.2.6 Konstruktive Detailauslegungen	152
	7.8.2.7 Konstruktion in Baustufen	153
	7.8.2.8 CAD-Einsatz in der Konstruktion	153
	7.8.2.9 Rechnergestützte Auslegung	154
7.8.3	Gießverfahren	156
	7.8.3.1 Sandguss	157
	7.8.3.2 Kokillenguss	158
	7.8.3.3 Lost-Foam-Verfahren (Vollform-Verfahren)	159
	7.8.3.4 Druckgussverfahren	160
7.8.4	Modell- und Formenbau	161
7.8.5	Mechanische Bearbeitung und Qualitätssicherung	162
	7.8.5.1 Großserienfertigung	162
	7.8.5.2 Prototypenfertigung	162
	7.8.5.3 Qualitätssicherung der Zylinderköpfe	162
7.8.6	Ausgeführte Bauformen von Zylinderköpfen	163
	7.8.6.1 Zylinderköpfe an Ottomotoren	163
	7.8.6.2 Zylinderköpfe an Dieselmotoren	165
	7.8.6.3 Sonderbauformen von Zylinderköpfen	167
7.8.7	Perspektiven in der Zylinderkopftechnologie	169
7.9	Kurbelwellen	171
7.9.1	Funktion im Fahrzeug	171
	7.9.1.1 Kurbelwellen im Hubkolbenmotor	171
	7.9.1.2 Anforderungen	171
7.9.2	Herstellung und Eigenschaften	172
	7.9.2.1 Verfahren und Werkstoffe	172
	7.9.2.2 Werkstoffliche Eigenschaften von Kurbelwellen	173
7.9.3	Leichtbau und Verfahren zur Steigerung der Festigkeit	174
	7.9.3.1 Hohlgegossene Kurbelwellen	174
	7.9.3.2 ADI Austempered Ductil Iron (ausferritisches Gusseisen)	174
	7.9.3.3 Erhöhung der Bauteilfestigkeit durch Nachbehandlung	174
	7.9.3.4 Kombination Werkstoffentwicklung/optimiertes Festwalzen	175
7.9.4	Berechnung von Kurbelwellen	176
7.10	Ventiltriebskomponenten	177
7.10.1	Standard-Ventiltrieb	177
	7.10.1.1 Ventiltriebe mit direktem Antrieb	178
	7.10.1.2 Ventiltriebe mit indirektem Antrieb	179
	7.10.1.3 Hydraulischer Ventilspielausgleich	181
	7.10.1.4 Mechanische Ventilspieleinstellung	182
	7.10.1.5 Variable Ventiltriebe	182

7.10.2	Riemenspannsysteme, Spann- und Umlenkrollen	189
7.10.2.1	Einführung	189
7.10.2.2	Automatische Riemenspannsysteme für Zahnriementriebe	190
7.10.2.3	Spann- und Umlenkrollen für Zahnriementriebe	190
7.10.2.4	Zahnriementriebe in öliger Umgebung	191
7.10.2.5	Ausblick	191
7.10.3	Kettenspann- und Führungssysteme	191
7.10.3.1	Einführung	191
7.10.3.2	Kette	192
7.10.3.3	Kettenspannelement	192
7.10.3.4	Spann- und Führungsschienen	193
7.10.3.5	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
7.11.3.4	Ventilführung	198
7.11.4	Ventilwerkstoffe	198
7.11.4.1	Wärmebehandlung	198
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	199
7.11.6.1	Aufgabe und Funktion	199
7.11.6.2	Fertigungsmethoden	200
7.11.7	Ventildrehvorrichtung	200
7.11.7.1	Aufgabe	200
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	205
7.13.2.1	Ventilsitzbeanspruchungen	205
7.13.2.2	Werkstoffe und Eigenschaften	206
7.13.2.3	Geometrie und Toleranzen	210
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	218
7.14.4	Zylinderkopfmontage	220
7.15	Ölpumpe	220
7.15.1	Übersicht über Ölpumpensysteme	221
7.15.1.1	Innenzahnradpumpe	221
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	227
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	229
7.15.3	Volumenstrom-Regelpumpen	230
7.15.3.1	Innenzahnrad-Regelpumpe (Volumenstromvariable Zahnringpumpe)	231
7.15.3.2	Außenzahnrad-Volumenstrom-Regelpumpe	232
7.15.3.3	Flügelzellenpumpe	232
7.15.4	Leistungseinsparung im NEFZ- Zyklus	233
7.15.5	Konstruktionsgrundlagen	235
7.15.5.1	Kurbelwellenpumpe	236
7.15.5.2	Sumpfpumpe	237
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	244
7.15.7.1	Numerische Strömungssimulation CFD	244
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	249
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	251
7.16.4.5	Werkstoffeigenschaften und empfohlene Paarungen	254
7.16.5	Massereduktion	255
7.16.6	Einflussfaktoren für Nockenwellenbelastung	255
7.16.7	Auslegung von Nockenprofilen	256
7.16.8	Kinematikrechnung	257
7.16.9	Dynamikrechnung	258
7.16.10	Nockenwellenverstellungssysteme	258
7.17	Kettentrieb	262
7.17.1	Kettenbauformen	262
7.17.2	Kettenkennwerte	264
7.17.3	Kettenräder	264
7.17.4	Kettenführungselemente	265
7.17.5	Reibungsreduzierungskonzepte von Steuerekettentrieben	265
7.18	Riementriebe	267
7.18.1	Zahnriemtriebe zum Antrieb von Nockenwellen	267
7.18.1.1	Antriebselement Zahnriemen	267
7.18.1.2	Antriebssystem Zahnriemen	269
7.18.1.3	Zahnriementriebdynamik	271
7.18.1.4	Ovalradtechnologie	272
7.18.1.5	Anwendungsbeispiele	273
7.18.2	Keilrippenriemtriebe zum Antrieb von Nebenaggregaten	273
7.18.2.1	Antriebselement Micro-V®-Riemen	274
7.18.2.2	Antriebssystem Nebenaggregatetrieb	275
7.18.2.3	Anwendungsbeispiele	276
7.18.2.4	Riemengetriebener Starter-Generator (RSG/Start-Stopp-System)	276
7.19	Lager in Verbrennungsmotoren	277
7.19.1	Grundlagen	277
7.19.1.1	Radiallager	277
7.19.1.2	Axiallager	279

7.19.2	Berechnung und Dimensionierung von Motorlagern	279
7.19.2.1	Belastung	279
7.19.2.2	Zapfenverlagerungsbahn	280
7.19.2.3	Numerische Lösungen zur Lagerberechnung	281
7.19.2.4	Hauptdimensionen: Durchmesser, Breite	281
7.19.2.5	Ölführungsgeometrie	281
7.19.2.6	Feindimensionen	283
7.19.3	Lagerwerkstoffe	285
7.19.3.1	Lagermetalle	285
7.19.3.2	Laufschichten	288
7.19.4	Lagerbauarten – Aufbau, Belastbarkeit, Anwendung	289
7.19.4.1	Massivlager	290
7.19.4.2	Zweistofflager	290
7.19.4.3	Dreistofflager	291
7.19.4.4	Miba-Rillenlager	292
7.19.4.5	Sputterlager	292
7.19.5	Lagerversagen	292
7.19.5.1	Hergang eines Schadens	292
7.19.5.2	Arten von Lagerschäden	294
7.19.6	Ausblick	295
7.20	Ansaugsysteme	295
7.20.1	Komponenten des Ansaugsystems	296
7.20.2	Akustik	301
7.21	Dichtsysteme	305
7.21.1	Zylinderkopfdichtungssysteme	305
7.21.1.1	Ferrolastic-Weichstoff-Zylinderkopfdichtungen	305
7.21.1.2	Metall-Elastomer-Zylinderkopfdichtungen	306
7.21.1.3	Metalllagen-Zylinderkopfdichtungen Metaloflex®	306
7.21.1.4	Ausblick	310
7.21.2	Spezialdichtungen	311
7.21.2.1	Funktionsbeschreibung der Flachdichtung	311
7.21.2.2	Weichstoffdichtungen	311
7.21.2.3	Metall-Weichstoff-Dichtungen	311
7.21.2.4	Spezialdichtungen aus Metaloseal®	313
7.21.2.5	Ausblick	315
7.21.3	Elastomer-Dichtsysteme	315
7.21.3.1	Elastomerdichtungen	316
7.21.3.2	Metall-Elastomer-Dichtungen	317
7.21.3.3	Module	318
7.21.4	Entwicklungsmethoden	318
7.21.4.1	Finite-Elemente-Analyse	319
7.21.4.2	Simulation im Labor – Funktions- und Lebensdauerprüfung	321
7.22	Verschraubungen am Motor	323
7.22.1	Hochfeste Schraubenverbindungen	323
7.22.2	Qualitätsanforderungen	323
7.22.3	Schraubverbindungen	324
7.22.3.1	Zylinderkopfschraube	325
7.22.3.2	Hauptlagerdeckelschraube	325
7.22.3.3	Pleuelschraube	326
7.22.3.4	Riemenscheibenschraube	328
7.22.3.5	Schwungradschraube	329
7.22.3.6	Nockenwellen-Lagerdeckelschraube	330
7.22.3.7	Ölwannenbefestigungsschraube	330
7.22.4	Verschrauben in Leichtmetalle	330
7.22.5	Schraubenanziehverfahren	331
7.22.5.1	Drehmomentgesteuertes Anziehen	331
7.22.5.2	Drehwinkelgesteuertes Anziehen	332
7.22.5.3	Streckgrenzgesteuertes Anziehverfahren	333

7.23	Abgaskrümmen	333
7.23.1	Ablauf einer Krümmerentwicklung	335
7.23.2	Krümmen als Einzelkomponente	335
7.23.2.1	Gusskrümmer	335
7.23.2.2	Rohrkrümmer	336
7.23.2.3	Einfachwandige Halbschalenkrümmer	336
7.23.2.4	Luftspaltisolierte Krümmer (LSI-Krümmer)	336
7.23.3	Krümmen als Teilmodul	337
7.23.3.1	Krümmen und Katalysator integriert	337
7.23.3.2	Krümmen und Turbolader integriert	337
7.23.4	Krümmen-Komponenten	338
7.24	Kühlmittelpumpen für Verbrennungsmotoren	338
7.24.1	Anforderungen, Bauarten und konstruktiver Aufbau	338
7.24.2	Flügelrad und Spiralkanal	340
7.24.3	Kühlmittelseitige Abdichtung	342
7.24.4	Kennfeld und Ähnlichkeitsbeziehungen der Kühlmittelpumpe	342
7.24.5	Kavitation	345
7.24.6	Strömungssimulation, Strömungsanalyse, Festigkeitsnachweis und Optimierung	346
7.24.7	Schaltbare, regelbare und elektrische Kühlmittelpumpen	348
7.25	Steuerorgane des Zweitaktmotors	352
8	Motoren	355
8.1	Motorkonzepte	355
8.1.1	Motorbauarten	356
8.1.2	Unterscheidungsmerkmale von Motor Konzepten bezüglich des Grundmotors	359
8.1.3	Weitere Konzeptkriterien	361
8.1.4	Konzepte der Anordnung des Aggregates im Fahrzeug	361
8.2	Aktuelle Motoren	362
8.3	Motorradmotoren/Sondermotoren	378
8.3.1	Motorräder für die Straße (On road)	378
8.3.1.1	Einzylindermotoren	379
8.3.1.2	Zweizylindermotoren	379
8.3.1.3	Mehrzylindermotoren	385
8.3.1.4	Leistungsentwicklung	387
8.3.1.5	Hub-Bohrungs-Verhältnis	389
8.3.1.6	Ventiltrieb	390
8.3.1.7	Getriebe	391
8.3.2	Motorräder für das Gelände (Off road)	393
8.3.2.1	Motocross	393
8.3.2.2	Enduro und Rallye	399
8.3.2.3	Trial	400
8.3.3	Gesetzgebung	401
8.3.3.1	Abgasemissionen	401
8.3.3.2	Geräuschemissionen	409
8.3.4	Rennmotoren	411
8.3.4.1	125 und 250 2T für GP	411
8.3.4.2	GP1	413
8.3.5	Sonderanwendungen	418
8.3.5.1	Schneemobil	418
8.3.5.2	Wassermotorräder oder PWC (Personal Water Craft)	418
8.4	Kreiskolbenmotor/Wankelmotor	424
8.4.1	Historie	424
8.4.2	Generelle Funktionsweise eines Kreiskolbenmotors	425
8.4.3	Das Viertaktprinzip	426
8.4.4	Der Kreiskolbenmotor des Pkws Renesis	427
8.4.4.1	Der Seitenauslass	428
8.4.4.2	Variable Ansaugsteuerung und elektronische Drosselklappe	428
8.4.5	Der Wasserstoff-Kreiskolbenmotor	430

8.5	Kleinvolumige Motoren für handgeführte Arbeitsgeräte	431
8.5.1	Abgasgesetzgebung	431
8.5.2	Maßnahmen zur Reduzierung der Abgasemissionen	432
8.5.2.1	Viertaktmotor im Vergleich zum Zweitaktmotor	432
8.5.2.2	Katalysatoren	433
8.5.2.3	Resonanzaufladung	433
8.5.2.4	Ladungsschichtung	434
8.5.3	Gemischbildung und Motormanagement	436
9	Tribologie	439
9.1	Reibung	439
9.1.1	Kenngößen	439
9.1.2	Reibungszustände	439
9.1.3	Verfahren zur Reibungsmessung	440
9.1.4	Einfluss des Betriebszustandes und der Randbedingungen	442
9.1.4.1	Einlaufzustand des Verbrennungsmotors	442
9.1.4.2	Ölviskosität	442
9.1.4.3	Temperatureinfluss	442
9.1.4.4	Motorbetriebspunkt	443
9.1.5	Einfluss der Reibung auf den Kraftstoffverbrauch	443
9.1.6	Reibungsverhalten ausgeführter Verbrennungsmotoren	444
9.1.6.1	Reibungsaufteilung	444
9.1.6.2	Triebwerk	446
9.1.6.2.1	Kurbelwelle	446
9.1.6.2.2	Pleuellager und Kolbengruppe	447
9.1.6.2.3	Massenausgleich	447
9.1.6.3	Ventilsteuerung (Ventil- und Steuertrieb)	448
9.1.6.4	Nebenaggregate	449
9.1.6.4.1	Ölpumpe	449
9.1.6.4.2	Kühlmittelpumpe	451
9.1.6.4.3	Generator	451
9.1.6.4.4	Einspritzpumpe	452
9.1.6.4.5	Klimakompressor	452
9.1.6.4.6	Kühlerventilator	453
9.1.6.4.7	Servolenkungspumpe	453
9.1.6.4.8	Vakuumpumpe	454
9.1.7	Verfahren zur Reibungsberechnung am Beispiel der Kolbengruppe	454
9.2	Schmierung	455
9.2.1	Tribologische Grundlagen	455
9.2.1.1	Reibung	456
9.2.1.2	Verschleiß	457
9.2.2	Schmiersystem	458
9.2.2.1	Schmierung	458
9.2.2.2	Bauteile und Funktion	458
10	Ladungswechsel	465
10.1	Gaswechseleinrichtungen beim Viertaktmotor	465
10.1.1	Bauformen des Ventiltriebs	466
10.1.2	Bauelemente des Ventiltriebs	468
10.1.3	Kinematik und Dynamik des Ventiltriebs	473
10.1.4	Auslegung der Gaswechseleinrichtungen bei Viertaktmotoren	475
10.2	Ladungswechselrechnung	488
10.3	Gaswechsel bei Zweitaktmotoren	491
10.3.1	Spülverfahren	491
10.3.2	Gaswechselorgane	493
10.3.3	Spülluftversorgung	494

10.4	Variable Ventilsteuerungen	497
10.4.1	Nockenwellenversteller	499
10.4.1.1	Überblick zu Funktionsprinzipien von Nockenwellenverstellern	499
10.4.1.2	Motorische Auswirkungen durch Nockenwellenversteller	501
10.4.1.3	Nockenwellenversteller an Serienmotoren	503
10.4.1.4	Perspektiven von Nockenwellenverstellern	505
10.4.2	Systeme mit stufenweiser Ventilhub- oder -öffnungsauvariation	507
10.4.3	Vollvariable Ventilsteuerungen	510
10.4.3.1	Rückblick auf die Entwicklung vollvariabler mechanischer Ventilsteuerungen	510
10.4.3.2	Mechanische Systeme in Serie	512
10.4.3.3	Mechanische Systeme in Entwicklung	517
10.4.3.4	Hydraulisch betätigte Systeme	521
10.4.3.5	Elektromechanische Systeme	522
10.4.4	Perspektiven des variablen Ventiltriebs	525
10.5	Impulsaufladung mit steuerbaren Ansaugluft-Ventilen	527
10.5.1	Einleitung	527
10.5.2	Anforderungen an die Komponenten für den Serieneinsatz	529
10.5.3	Elektrische Systemintegration	531
10.5.4	Mechanische Systemintegration	531
10.5.5	Integriertes Impulslader-Saugmodul	531
10.5.6	Ausblick	531
11	Aufladung von Verbrennungsmotoren	533
11.1	Mechanische Aufladung	533
11.2	Abgasturboaufladung	534
11.3	Ladeluftkühlung	535
11.4	Zusammenwirken von Motor und Verdichter	537
11.4.1	Viertaktmotor im Verdichterkennfeld	537
11.4.2	Mechanische Aufladung	538
11.4.3	Abgasturboaufladung	538
11.5	Dynamisches Verhalten	544
11.6	Zusatzmaßnahmen bei aufgeladenen Verbrennungsmotoren	547
11.6.1	Ottomotoren	547
11.6.2	Dieselmotoren	548
11.7	Leistungsexplosion durch Register- und zweistufige Aufladung bei Personenkraftwagen (Hochaufladung)	548
11.7.1	Historie und Evolution der zweistufigen Aufladeverfahren (Stufenaufladung)	548
11.7.2	Thermodynamik der zweistufigen Aufladung	550
11.7.3	Registeraufladung und zweistufige Aufladekonzepte/-systeme	551
11.7.3.1	Registeraufladung	551
11.7.3.2	Zweistufige Aufladung	552
11.7.4	Einsatzgebiete	553
11.8	Ermittlung von Turboladerkennfeldern an Turboladerprüfständen	554
11.8.1	Prinzipieller Aufbau eines Turboladerprüfstands	554
11.8.2	Verdichter- und Turbinenkennfelder	555
11.8.3	Besonderheiten bei der Verwendung von Turboladerkennfeldern in der Motorprozesssimulation	557
12	Gemischbildungsverfahren und -systeme	560
12.1	Innere Gemischbildung	560
12.2	Äußere Gemischbildung	560
12.3	Gemischbildung bei Ottomotoren (Vergaser/Benzineinspritzung)	560
12.3.1	Arbeitsweise des Vergasers	560
12.3.2	Bauarten	561
12.3.2.1	Anzahl der Ansaugluftkanäle	561

12.3.2.2	Lage der Ansaugluftkanäle	563
12.3.2.3	Bauarten für Sonderanwendungen	563
12.3.3	Wichtige Systeme an Vergasern	563
12.3.4	Elektronisch geregelter Vergaser	565
12.3.5	Gleichdruckvergaser	566
12.3.6	Betriebsverhalten	567
12.3.7	Lambda-Regelung	568
12.3.8	Gemischbildung mittels Benzineinspritzung	568
12.3.8.1	Saugrohreinspritzsysteme	568
12.3.8.2	Systeme für Direkteinspritzung	570
12.4	Gemischbildung bei Dieselmotoren	578
12.4.1	Einspritzsysteme – Überblick	580
12.4.2	Systeme mit einspritzsynchrone Druckerzeugung	585
12.4.2.1	Einzelpumpensysteme mit Leitung	585
12.4.2.2	Reiheneinspritzpumpe	586
12.4.2.3	Verteilereinspritzpumpe	588
12.4.2.4	Pumpe-Düse-System	591
12.4.3	Systeme mit zentralem Druckspeicher	591
12.4.3.1	Hochdruckpumpe	593
12.4.3.3	Injektor	595
12.4.3.4	Einspritzdüse	597
12.4.3.5	Elektronik	597
12.4.3.6	Entwicklungstrends	598
12.4.4	Einspritzdüsen und Düsenhalter	599
12.4.5	Anpassung des Einspritzsystems an den Motor	603
12.5	Kraftstoffversorgungssystem	607
12.5.1	Kraftstoffbehälter	607
12.5.1.1	Diesekraftstofftank	607
12.5.1.2	Ottokraftstofftank	607
12.5.2	Das Tankentlüftungssystem	608
12.5.3	Anforderungen an ein Kraftstofffördersystem	609
12.5.3.1	Dieselfördersystem	609
12.5.3.2	Ottokraftstofffördersystem	611
12.5.4	Die Füllstandsmessung	615
12.5.4.1	Anforderung an die Füllstandsmessung	615
12.5.4.2	Hebelgeber	615
12.5.4.3	MAGnetic Passive Position Sensor	616
13	Zündung	617
13.1	Zündung – Ottomotor	617
13.1.1	Einleitung der Zündung	617
13.1.2	Anforderungen an das Zündsystem	617
13.1.3	Mindestzündenergien	617
13.1.4	Grundlagen der Funkenzündung	617
13.1.4.1	Phasen des Funkens	617
13.1.4.2	Energieübertragungswirkungsgrad	618
13.1.5	Spulenzündsystem (induktiv)	618
13.1.6	Weitere Zündsysteme	621
13.1.7	Gasmotoren	621
13.1.8	Zusammenfassung/Ausblick	621
13.2	Zündkerzen	622
13.2.1	Anforderungen an Zündkerzen	622
13.2.2	Aufbau	622
13.2.3	Wärmewert	623
13.2.4	Zündspannungsbedarf	624
13.2.5	Zündeigenschaft (und Gemischentflammung)	625
13.2.6	Verschleiß	626

13.2.7	Applikation	627
13.3	Zündung – Dieselmotor	628
13.3.1	Selbstzündung und Verbrennung	628
13.3.2	Kaltstart Dieselmotor	629
13.3.2.1	Wichtige Einflussparameter	629
13.3.2.2	Startbewertungskriterien	631
13.3.3	Komponenten zur Kaltstartunterstützung	631
13.3.3.1	Glühsystem	632
13.3.3.2	Heizflansch	634
13.3.4	Ausblick	636
13.3.4.1	Kombinierte Systeme	636
13.3.4.2	Ionenstrommessung	636
13.3.4.3	Geregelte Glühsysteme	637
14	Verbrennung	638
14.1	Kraftstoffe und Kraftstoffchemie	638
14.2	Oxidation von Kohlenwasserstoffen	640
14.3	Selbstzündung	642
14.3.1	Das H_2 - O_2 -System	642
14.3.2	Zündung von Kohlenwasserstoffen	643
14.3.3	Schnelle Kompressionsmaschine	644
14.3.4	Dieselmotor	644
14.3.5	HCCI-Motor	644
14.3.6	Motorklopfen	645
14.3.7	Modellierung der Selbstzündung	645
14.3.7.1	Einschritt-Mechanismus	645
14.3.7.2	Shell-Modell	646
14.4	Flammenausbreitung	646
14.4.1	Turbulente Skalen	646
14.4.2	Flammentypen	647
14.4.2.1	Vorgemischte Flammen	647
14.4.2.2	Nicht-vorgemischte Flammen	648
14.4.2.3	Partiell-vorgemischte Flammen	648
14.5	Modellbildung und Simulation	649
14.5.1	Klassifizierung von Verbrennungsmodellen	649
14.5.2	Nulldimensionale Modelle	650
14.5.2.1	Ersatzbrennverläufe	650
14.5.2.2	Wärmeübergangsmodelle	651
14.5.3	Phänomenologische Modelle	652
14.5.3.1	Ottomotorische Verbrennung	653
14.5.3.2	Dieselmotorische Verbrennung	653
14.5.4	3D-CFD-Modelle	654
15	Verbrennungsverfahren	657
15.1	Dieselmotoren	657
15.1.1	Dieselverbrennung	657
15.1.2	Diesel-Viertakt-Verbrennungsverfahren	663
15.1.2.1	Verfahren mit indirekter Kraftstoffeinspritzung (IDI)	664
15.1.2.2	Verfahren mit direkter Kraftstoffeinspritzung (DI)	666
15.1.2.3	Gegenüberstellung der Verbrennungsverfahren	668
15.1.2.4	Entwicklungsrichtungen	669
15.1.2.5	Sonderverfahren und Besonderheiten	673
15.2	Ottomotoren	675
15.2.1	Brennverfahren von Port-Fuel-Injection-(PFI)-Motoren	675
	Zylinderdruckverlauf, Innenwirkungsgrad und Flammenausbreitung	675
15.2.2	Brennverfahren von Direct- Injection-Spark-Ignition-(DISI)-Motoren	684

15.2.2.1	Betriebsarten eines Ottomotors mit Direkteinspritzung	687
15.2.2.2	Ausprägungen und Spezifika des ottomotorischen Brennverfahrens mit Direkteinspritzung sowie dessen Technologiebausteine und Technologiekombinationen	689
15.3	Zweitakt-Dieselmotor	704
15.4	Zweitakt-Ottomotor	705
16	Elektronik und Mechanik für Motor- und Getriebesteuerung	710
16.1	Umweltanforderungen	710
16.1.1	Einbauklassen	710
16.1.2	Thermisches Management	711
16.2	Standalone-Produkte	714
16.3	Verbindungstechnik	716
16.4	Getriebesteuergeräte	717
16.4.1	Systembeschreibung	718
16.4.2	Getriebesteuergerädetypen	718
16.4.3	Anwendungsbeispiele für „Mechatronische Transmission Modules“	722
16.4.4	Entscheidungskriterien für die Auswahl des „richtigen“ Steuergeräte-Typen	723
16.5	Elektronischer Aufbau, Strukturen und Bauelemente	724
16.5.1	Grundstruktur	724
16.5.2	Elektronische Bauelemente	724
16.5.2.1	Eingangfilterbaustein Klopf-IC	724
16.5.2.2	Endstufenbaustein	724
16.5.2.3	Mikrocontroller	725
16.5.2.4	Spannungsregler	725
16.5.2.5	DC/DC-Converter	728
16.6	Steuergeräteelektronik	731
16.6.1	Allgemeine Beschreibung	731
16.6.2	Signalaufbereitung	731
16.6.2.1	Klopfsignal	731
16.6.2.2	Lambdasensorsignal	732
16.6.2.3	Kurbelwellensignal	733
16.6.3	Signalauswertung	733
16.6.4	Signalausgabe	733
16.6.4.1	Magnetventil-Einspritzsignal für Direkteinspritzung	734
16.6.4.2	Einspritzsignal für Piezo-Direkteinspritzung	734
16.6.5	Spannungsversorgung	736
16.6.6	Schnittstellen	736
16.6.6.1	CAN-Bus-Schnittstelle	736
16.6.6.2	LIN-Bus-Schnittstelle	736
16.6.6.3	FlexRay-Bus-Schnittstelle	736
16.6.7	Elektronik für Getriebesteuergeräte	737
16.7	Software-Strukturen	741
16.7.1	Aufgabe der Software bei der Steuerung von Motoren	741
16.7.2	Anforderungen an die Software	741
16.7.3	Das Architekturkonzept der Software	742
16.7.4	Der Software-Entwicklungsprozess	743
16.8	Die Steuerung des Verbrennungsmotors	743
16.8.1	Fahrerwunsch und Fahrerassistenzsysteme	743
16.8.2	Antriebsstrangmanagement	743
16.8.3	Drehmomentbasierte Funktionsstruktur der Motorsteuerung	744
16.8.4	Modellbasierte Funktionen am Beispiel des Saugrohrfüllungsmodells	745
16.9	Funktionen	748
16.9.1	I-Regelung	748
16.9.2	Antiruckelfunktion	750
16.9.3	Drosselklappenregelung	752
16.9.4	Klopffregelung	753

16.9.5	„On-Board“-Diagnose (OBD)	754
16.9.5.1	Aufgaben der Eigendiagnose	756
16.9.5.2	Überwachung des Katalysators	757
16.9.6	Sicherheitskonzepte	758
16.10	Sicherheitskonzepte in Getriebesteuerungen	760
17	System Antriebsstrang	765
17.1	Antriebsstrang-Architektur	765
17.2	Längsdynamik des Kraftfahrzeuges	765
17.3	Getriebetypen	766
17.4	Leistungsebene und Signalverarbeitungsebene	767
17.5	Getriebesteuerung	768
17.5.1	Funktionen	768
17.5.1.1	Überblick	768
17.5.1.2	Fahr- oder Schaltstrategie	769
17.5.1.3	Automatgetriebe mit Planetenradsätzen und Drehmomentwandler	770
17.5.1.4	Automatisiertes Handschaltgetriebe	770
17.5.1.5	Stufenlosgetriebe (CVT)	771
17.6	Integriertes Antriebsstrangmanagement (IPM®)	771
17.7	Komponenten für Antriebsstrangelektrifizierung	773
17.7.1	Überblick	773
17.7.2	Varianten Hybrid- und Elektroantrieb	773
17.7.2.1	Mikrohybrid	773
17.7.2.2	Mildhybrid	773
17.7.2.3	Vollhybrid	773
17.7.2.4	Plug-in-Hybrid	774
17.7.2.5	Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge	774
17.7.3	Komponenten	774
17.7.4	Leistungselektronik	774
17.7.4.1	Drehstrom-Inverter	774
17.7.4.2	DC/DC-Wandler	775
17.7.5	Elektromotor	776
17.7.5.1	Technologien	776
17.7.6	Energiespeicher	777
17.7.6.1	Überblick	777
17.7.6.2	Batteriesystem	778
18	Sensoren	781
18.1	Temperatursensoren	781
18.2	Füllstandsensoren	781
18.3	Klopfsensoren	781
18.4	Abgassensoren	783
18.4.1	Lambda-Sensoren	783
18.4.2	NO _x -Sensor	783
18.5	Drucksensoren	784
18.5.1	Normaldrucksensoren	785
18.5.1.1	Piezoresistives Messprinzip	785
18.5.1.2	Kapazitives Messprinzip	785
18.5.2	Mitteldrucksensoren	786
18.5.3	Hochdrucksensoren	786
18.5.4	Druckschalter	786
18.6	Luftmassensensor	787
18.6.1	Messprinzip	787
18.6.2	Mass-Airflow-Sensor	787
18.6.3	Sekundär Luftmassensensor (SAF = Secondary Air Flow)	788

18.7	Drehzahlsensoren	788
18.7.1	Passive Drehzahlsensoren	788
18.7.2	Aktive Sensoren	789
18.8	Brennraumdrucksensoren für Dieselmotoren	789
19	Aktuatoren	792
19.1	Antriebe	792
19.1.1	Pneumatische Antriebe	792
19.1.2	Elektrische Antriebe	792
19.1.2.1	Schrittmotor	792
19.1.2.2	DC-Motor	793
19.1.2.3	Torque-Motor	793
19.1.2.4	EC-Motor	793
19.1.3	Kommunikation mit der Motorsteuerelektronik	793
19.1.3.1	Gesteuerte Stellglieder	793
19.1.3.2	Extern geregelte Stellglieder	793
19.1.3.3	Intern geregelte Stellglieder (smarte Aktuatoren)	794
19.1.4	Rückstellung/Default-Position	794
19.2	Drosselklappenstellglieder	794
19.2.1	Kernfunktion Ottomotor	794
19.2.2	Kernfunktion Dieselmotor	794
19.2.3	Zusätzliche Funktionen	795
19.2.3.1	Leerlaufregelung Ottomotor	795
19.2.3.2	Positionssignal	795
19.2.3.3	Lastschlagdämpfung	795
19.2.3.4	Tempomatfunktion	795
19.2.4	„Drive-by-Wire“/E-Gas	796
19.2.5	Waste-Gate-Funktion	797
19.2.6	Unterdruck/Vordrosselstellglieder	797
19.3	Drall- und Tumbleklappen/Resonanzaufladung	797
19.3.1	Port-Deactivation	797
19.3.2	Schichtladung	798
19.4	Turbolader mit variabler Turbinengeometrie	799
19.5	Abgasrückführventile	799
19.6	Verdunstungsemission, Komponenten	802
19.6.1	Tankentlüftungsventile	802
19.6.2	Diagnose Verdunstungsemission	802
19.6.2.1	Tankdiagnose mit Überdruck	803
19.6.2.2	Tankdiagnose mit Unterdruck	804
20	Kühlung von Verbrennungsmotoren	806
20.1	Allgemeines	806
20.2	Anforderungen an das Kühlsystem	806
20.3	Berechnungsgrundlagen und Simulations-Tools	806
20.4	Subsysteme der Motorkühlung	808
20.4.1	Kühlmittelkühlung	808
20.4.1.1	Kühlerschutzmittel	809
20.4.2	Ladeluftkühlung	811
20.4.3	Abgaskühlung	812
20.4.4	Ölkühlung	812
20.4.5	Lüfter und Lüfterantriebe	813
20.5	Kühlmodule	814
20.6	Gesamtsystem Motorkühlung	814

21	Abgasemissionen	817
21.1	Gesetzliche Vorschriften	817
21.1.1	Europa	817
21.1.2	Kalifornien und USA	818
21.1.3	Japan	819
21.1.4	Schwellenländer	819
21.1.5	Harmonisierung der Abgasvorschriften	819
21.2	Abgasmesstechnik	820
21.2.1	Messtechnik für die Zertifizierung von Kraftfahrzeugen	820
21.2.2	Messtechnik für die Motorenentwicklung	820
21.3	Schadstoffe und ihre Entstehung	825
21.3.1	Ottomotor	826
21.3.1.1	Limitierte Abgaskomponenten	826
21.3.1.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten	827
21.3.2	Dieselmotor	828
21.3.2.1	Limitierte Abgaskomponenten	828
21.3.2.2	Nichtlimitierte Abgaskomponenten	829
21.4	Minderung von Schadstoffen	830
21.4.1	Motorische Maßnahmen	830
21.4.1.1	Ottomotor	830
21.4.1.2	Dieselmotor	832
21.5	Abgasnachbehandlung Ottomotor	835
21.5.1	Katalysatoraufbau und chemische Reaktionen	835
21.5.2	Katalysatorkonzepte stöchiometrisch betriebener Motoren	836
21.5.2.1	Dreiwegekatalysator	836
21.5.2.2	Der Sauerstoffspeicher	837
21.5.2.3	Kaltstartstrategien	838
21.5.2.4	Deaktivierungseffekte und ihre Auswirkung	839
21.5.3	Katalysatorkonzepte für Magermotoren	842
21.5.3.1	Möglichkeiten zur NO _x -Reduktion in magerem Abgas	843
21.5.3.2	Der NO _x -Speicherkatalysator	845
21.5.3.3	System mit Vorkatalysator und NO _x -Adsorber	851
21.5.4	Metallische Katalysatorträger	851
21.6	Abgasnachbehandlung Dieselmotor	859
21.6.1	Diesel-Oxidationskatalysatoren	859
21.6.1.1	Schadstoffe im Diesel-Abgas	859
21.6.1.2	Charakteristika von Diesel-Oxidationskatalysatoren	859
21.6.1.3	Deaktivierung der Katalysator-Oberfläche	859
21.6.1.4	Beurteilung von Diesel-Oxidationskatalysatoren	861
21.6.2	NO _x -Adsorber für Diesel-Pkw	863
21.6.2.1	Arbeitsbereich des Speicherkatalysators	863
21.6.2.2	Entschwefelung	864
21.6.2.3	Regenerationsmethoden	865
21.6.3	Partikel/Partikelfilter	866
21.6.3.1	Partikeldefinitionen und Partikeleigenschaften	866
21.6.3.2	Zielsetzungen für die Partikelfiltration	868
21.6.3.3	Anforderungen an Filtermedien, technische Lösungen	869
21.6.3.4	Abscheidung und Haftung	872
21.6.3.5	Regeneration und periodische Reinigung	875
21.6.3.6	Emissionen während Regenerationen und Sekundäremissionen	880
21.6.3.7	Druckverlust	881
21.6.3.8	Bauraum und Systemintegration	883
21.6.3.9	Schadensmechanismen/Erfahrungen	883
21.6.3.10	Qualitätskriterien	884
21.6.3.11	Eignungstest, Typenprüfung, OBD, Feldkontrolle	884
21.6.3.12	Partikelmesstechnik	885

21.6.3.13	Penetration oder Abscheidegrad	887
21.6.3.14	Global Warming durch Rußpartikel	888
21.6.3.15	Kosten/Nutzen-Betrachtung zur Nachrüstung von Partikelfiltern	888
21.6.4	Katalytischer Partikelfilter	888
22	Betriebsstoffe	892
22.1	Kraftstoffe	892
22.1.1	Dieselmotoröl (DK)	893
22.1.1.1	DK-Komponenten und Zusammensetzung	893
22.1.1.2	Kennwerte und Eigenschaften	894
22.1.1.3	Additive für DK	900
22.1.1.4	Alternative Dieselmotoröle	902
22.1.2	Ottomotoröl (OK)	906
22.1.2.1	OK-Komponenten und Zusammensetzung	906
22.1.2.2	Kennwerte und Eigenschaften	909
22.1.2.3	Alternative Ottomotoröle	921
22.2	Schmierstoffe	929
22.2.1	Schmierstoffarten	930
22.2.2	Aufgabe der Schmierung	930
22.2.3	Arten der Schmierung	930
22.2.4	Anforderungen an die Schmierung	930
22.2.5	Viskosität/Viskositäts-Index (V.I.)	931
22.2.5.1	Einfluss der Temperatur auf die Viskosität	932
22.2.5.2	Einfluss des Drucks auf die Viskosität	933
22.2.5.3	Einfluss der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität	933
22.2.6	Basisflüssigkeiten	934
22.2.6.1	Basisflüssigkeiten aus Mineralöl	934
22.2.6.2	Synthetische Basisflüssigkeiten	934
22.2.7	Additive für Schmierstoffe	935
22.2.7.1	V.I.-Verbesserer	936
22.2.7.2	Detergents/Dispersants	937
22.2.7.3	Antioxidantien und Korrosionsinhibitoren	938
22.2.7.4	Reibungs- und Verschleißminderer (EP/AW-Additive)	938
22.2.7.5	Schauminhibitoren	938
22.2.8	Motoröle für Viertaktmotoren	938
22.2.8.1	SAE-Viskositätsklassen für Motoröle	939
22.2.8.2	Einbereichsöle	939
22.2.8.3	Mehrbereichsöle	939
22.2.8.4	Leichtlauföle	940
22.2.8.5	Einlauföle	940
22.2.8.6	Gasmotoröle	941
22.2.8.7	Wasserstoffmotoröle	941
22.2.8.8	Leistungsklassen	941
22.2.8.9	Gebrauchtsölbeurteilung	949
22.2.8.10	Rennmotoröle	952
22.2.8.11	Wankelmotoröle	953
22.2.9	Motoröle für Zweitaktmotoren	953
22.2.9.1	Leistungsklassen	953
22.2.9.2	Prüfverfahren	954
22.3	Kühlmittel	954
22.3.1	Gefrierschutz	955
22.3.2	Korrosionsschutz	956
22.3.3	Spezifikationen	957

23 Filtration von Betriebsstoffen	959
23.1 Luftfilter	959
23.1.1 Partikelgrößen und Partikelkonzentrationen in der Umgebungsluft	959
23.1.2 Kenngrößen zur Charakterisierung von Motorluftfiltern	959
23.1.3 Luftfiltermedien für den Einsatz am Verbrennungsmotor	960
23.1.4 Prüfung von Luftfilterelementen	962
23.1.5 Auslegung von Luftfilterelementen	963
23.1.6 Luftfiltersysteme für Fahrzeuganwendungen	964
23.2 Kraftstofffilter	965
23.2.1 Weltweite Anforderungen an Kraftstofffiltersysteme	965
23.2.2 Charakterisierung von Kraftstofffiltern	966
23.2.3 Filter und Filtermedien für Dieselmotorkraftstofffilter	966
23.2.4 Wasserabscheidung aus Dieselmotorkraftstoff	967
23.2.5 Filter und Filtermedien für Ottomotorkraftstofffilter	968
23.2.6 Kraftstofffiltersysteme für den Einsatz an Verbrennungsmotoren	969
23.3 Motorölfilter	970
23.3.1 Anforderungen an Motorölfilter	971
23.3.2 Charakterisierung von Ölfilterelementen und Ölfiltersystemen	972
23.3.3 Filtermedien für Ölfilter	972
23.3.4 Ölfiltersysteme und Bauformen von Motorölfiltern	974
23.3.5 Nebenstromfilter zur Rußseparation	976
24 Berechnung und Simulation	979
24.1 Festigkeits- und Schwingungsberechnung	979
24.1.1 Methoden	979
24.1.2 Ausgewählte Anwendungsbeispiele	981
24.1.3 Kolbenberechnungen	984
24.1.3.1 Überblick	984
24.1.3.2 Anforderungen an Kolbenwerkstoffe und deren Eigenschaften	986
24.1.3.3 Erstellung des Finite-Elemente-Modells auf Basis der CAD-Geometrie	987
24.1.3.4 Thermodynamische Simulation zur Bestimmung der thermischen Randbedingung	987
24.1.3.5 FE-Berechnung des Temperaturfeldes	988
24.1.3.6 FE-Berechnung der Spannungen und Deformationen für jeden zu betrachteten Lastfall	989
24.1.3.7 Abschätzung der Betriebsfestigkeit	993
25 Verbrennungsdiagnostik – Indizieren und Visualisieren in der Verbrennungsentwicklung	996
25.1 Themenstellung	996
25.2 Indizieren	996
25.2.1 Messtechnik	998
25.2.2 Qualitätskriterien	999
25.2.3 Indizieren – Ausblick	1000
25.2.4 Zyklusgenaue signal- und modellbasierte Motorsteuerung	1000
25.3 Visualisieren	1001
25.3.1 Aufgaben- und Themenstellung	1001
25.3.2 Visualisieren im realen Motorbetrieb	1001
25.3.2.1 Strahlungseigenschaften von Gas-, Benzin- und Dieselflammen	1001
25.3.2.2 Flammenspektroskopie	1001
25.3.2.3 Flammenausbreitung in vorgemischter Ladung bei Fremdzündung	1003
25.3.3 Visualisieren der Verbrennung im realen Motorbetrieb durch das Eigenleuchten der Flamme	1004
25.3.3.1 Technische Umsetzung: Flammenausbreitung	1004
25.3.3.2 Messgeräte – Messsysteme	1009

25.3.4	Visualisieren beleuchteter Vorgänge	1010
25.3.4.1	Visualisieren der Gemischverteilung	1010
25.3.4.2	Visualisieren von Geschwindigkeitsfeldern	1011
25.3.5	Visualisieren – Ausblick	1011
26	Kraftstoffverbrauch	1013
26.1	Allgemeine Einflussgrößen	1014
26.1.1	Luftwiderstand	1014
26.1.2	Gewicht	1015
26.1.3	Radwiderstand	1017
26.1.4	Kraftstoffverbrauch	1017
26.2	Motorische Maßnahmen	1018
26.2.1	Downsizing	1019
26.2.2	Downspeeding	1022
26.2.3	Dieselmotor	1022
26.2.4	Ottomotor	1023
26.2.4.1	Magerkonzept, Direkteinspritzung	1023
26.2.5	Brennverfahren HCCI	1025
26.2.6	Variabler Ventiltrieb	1025
26.2.6.1	Zündung	1027
26.2.7	Zylinderabschaltung	1028
26.2.7.1	Konzept zur Verbrauchsreduzierung	1028
26.2.7.2	Verbrauchsvorteile im Teillastgebiet	1028
26.2.8	Nebenaggregate	1029
26.2.9	Wärmemanagementmaßnahmen zur Verbrauchsreduzierung	1029
26.2.10	Hybridkonzepte	1030
26.3	Getriebeübersetzungen	1033
26.3.1	Auswahl des direkten Ganges	1033
26.3.2	Auswahl der Gesamtübersetzung im größten Gang	1033
26.3.2.1	Auslegung auf maximale Höchstgeschwindigkeit	1033
26.3.2.2	Überdrehende Auslegung	1033
26.3.2.3	Unterdrehende Auslegung	1033
26.4	Fahrerverhalten	1035
26.5	CO ₂ -Emissionen	1037
26.5.1	CO ₂ -Emission und Kraftstoffverbrauch	1037
26.5.2	Motorapplikationseinfluss auf die CO ₂ -Emission	1038
26.5.3	Entwicklung der globalen CO ₂ -Emission	1039
27	Geräuschemissionen	1042
27.1	Physikalische Grundlagen und Begriffe	1042
27.2	Gesetzliche Außengeräuschvorschriften	1045
27.2.1	Entwicklung der Außengeräuschvorschriften	1045
27.2.2	Das bestehende Außengeräusch-Messverfahren	1045
27.2.3	Das zukünftige Außengeräusch-Messverfahren	1046
27.2.4	Grenzwerte und Einsatztermine der neuen Regelung	1046
27.2.5	Auswirkungen auf die Reduzierung des Verkehrslärms	1047
27.3	Geräuschquellen des Außengeräusches	1048
27.4	Maßnahmen zur Außengeräuschminderung	1048
27.4.1	Motorseitige Maßnahmen	1048
27.4.2	Fahrerseitige Maßnahmen	1049
27.5	Motorgeräusch im Innenraum	1050
27.6	Akustische Leitlinien für den Motorkonstrukteur	1052
27.7	Messtechniken und Analysemethoden	1053
27.8	Psychoakustik	1056
27.9	Sound-Engineering	1056
27.10	Simulationswerkzeuge	1057
27.11	Anti-Noise-Systeme: Geräuschminderung durch Gegenschall	1058

28 Motorenmesstechnik	1060
29 Hybridantriebe	1080
29.1 Historie	1080
29.2 Grundlagen der Hybridantriebe (allgemeiner Überblick)	1084
29.2.1 Prinzip	1085
29.2.2 Komponenten	1085
29.2.2.1 Verbrennungsmotor	1085
29.2.2.2 E-Maschine	1085
29.2.2.3 Generator	1086
29.2.2.4 Elektrischer Energiespeicher	1086
29.2.2.5 Getriebe	1086
29.2.2.6 Energiemanagement	1086
29.2.2.7 Leistungselektronik	1086
29.2.3 Funktionen	1086
29.2.3.1 Start/Stopp (Stopp/Start)	1086
29.2.3.2 Elektrisches Fahren	1086
29.2.3.3 Lastpunktverschiebung	1086
29.2.3.4 Boosten	1087
29.2.3.5 Segeln	1087
29.2.3.6 Bremsenergierekuperation	1087
29.2.3.7 Elektrische Nebenaggregate	1087
29.2.3.8 Automatisches Einparken	1088
29.3 Einteilung der Hybridantriebe	1088
29.3.1 Arten	1088
29.3.2 Leistungseinteilung	1089
29.4 Elektrische Antriebssysteme	1091
29.4.1 E-Maschinen	1091
29.4.2 Leistungsbereich	1098
29.4.3 Steuerung	1098
29.4.4 Leistungselektronik	1098
29.4.5 Stromrichter	1099
29.5 Energiespeichersysteme	1100
29.5.1 Blei-Säure-Batterie	1101
29.5.2 Nickel-Metallhydrid-Batterie	1102
29.5.3 Natrium-Nickelchlorid-Batterie	1103
29.5.4 Lithium-Ionen-Batterie	1103
29.5.5 SuperCaps	1106
29.5.6 Batteriemangement	1106
29.6 Getriebe für Hybridantriebe	1109
29.6.1 Getriebe ohne integrierte E-Maschine	1110
29.6.2 Getriebe mit integrierter E-Maschine	1111
29.6.3 Sonderbauformen von Getrieben	1114
29.7 Energiemanagement	1115
29.7.1 Start/Stopp	1116
29.7.2 Regelung des Generators	1116
29.7.3 Energierückgewinnung	1117
29.7.4 Ladezustandsregelung	1118
29.7.5 Energieverteilungsmanagement	1119
29.7.6 Bordnetz	1119
29.8 Betriebsstrategien	1120
29.8.1 Wirkungsgrade	1120
29.8.2 Energiebilanz	1121
29.8.3 Kraftstoffverbrauch	1121
29.8.4 Abgasemissionen	1122
29.8.5 Fahrleistungen	1122
29.8.6 Ansätze zur Festlegung einer Betriebsstrategie	1123

29.9	Aktuelle Hybridfahrzeuge	1124
29.9.1	Systeme	1124
29.9.2	Fahrzeugaufbau	1128
29.10	Zukünftige Entwicklung	1130
29.10.1	Ottohybridantrieb	1131
29.10.2	Dieselhybridantrieb	1131
29.10.3	Reiner Elektroantrieb	1131
29.11	Range Extender	1132
29.11.1	Range Extender: Begriffserläuterung	1132
29.11.2	Motivation für ein Range-Extender-Modul	1132
29.11.2.1	Geringe batterieelektrische Reichweite	1133
29.11.2.2	Lange Ladezeiten der Batterie	1133
29.11.2.3	Erwartungen der Verbraucher an Elektromobilität	1133
29.11.3	Elektromobilität	1134
29.11.3.1	Mega-Citys und emissionsarmes Fahren	1134
29.11.3.2	Weltweite Beschränkung der CO ₂ -Emissionen durch die Gesetzgebung	1134
29.11.3.3	Einsparung von CO ₂ durch Elektromobilität	1134
29.11.4	Antriebsstrang	1136
29.11.4.1	Konventionelle, hybride und elektrische Antriebe	1136
29.11.4.2	Range Extender im seriellen Hybridantriebsstrang	1138
29.11.4.3	Komponenten des Range-Extender-Antriebsstrangs	1138
29.11.5	Range Extender	1138
29.11.5.1	Verbrennungsmotoren als Range Extender	1138
29.11.5.2	Kraftstoffauswahl	1140
29.11.5.3	Kraftstoffverbrauch von seriellem und parallelem Hybrid	1141
29.11.5.4	Abstimmung (NVH, Funktion)	1142
29.11.5.5	Betriebsstrategien	1144
29.11.6	Steuergeräte	1144
29.11.7	Generator	1144
29.11.7.1	Bauarten	1144
29.11.7.2	E-Maschine	1144
29.11.7.3	Seltene Erden	1150
29.11.8	Batterie	1150
29.11.8.1	Batterietechnologie	1150
29.11.8.2	Batterie als Schnittstelle	1150
29.11.9	Leistungselektronik	1152
29.11.10	Aufgaben bei der Fahrzeugintegration	1154
29.11.11	Anforderungen an ein Range-Extender-Modul	1155
29.11.11.1	Dauerhaltbarkeit	1155
29.11.11.2	Verbrauch	1155
29.11.11.3	Wartungskosten	1156
29.11.11.4	Bauraum/Gewicht	1156
29.11.11.5	Anschaffungskosten	1156
29.11.11.6	Attraktivität für den Automobilhersteller	1157
30	Alternative Fahrzeugantriebe und APUs (Auxiliary Power Units)	1159
30.1	Gründe für Alternativen	1159
30.2	Elektroantrieb	1160
30.2.1	Elektromotoren	1161
30.2.2	Traktionsbatterien	1161
30.2.3	Beispiele für Elektrofahrzeuge	1163
30.3	Stirlingmotor	1165
30.4	Gasturbine	1166
30.5	Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb	1167
30.5.1	Der Aufbau der PEM- Brennstoffzelle	1168
30.5.2	Die Brennstoffzelle im Fahrzeug	1168
30.5.3	Bewertung der Brennstoffzelle im Vergleich zu anderen Antrieben	1172

30.6	Zusammenfassende Bewertung der alternativen Energien und Antriebe	1173
30.7	Wasserstoff-Verbrennungsmotor	1173
30.8	Stromerzeugung durch eine Auxiliary Power Unit (APU)	1175
30.8.1	Die Brennstoffzelle als APU	1175
30.8.2	Brennkraftmaschine in Kombination mit einem Lineargenerator (Freikolbenlineargenerator)	1177
31	Energiemanagement in Motor und Fahrzeug	1179
31.1	Verluste bei der Energieumwandlung	1180
31.2	Bedarfsorientiertes Energiemanagement	1181
31.3	Stromerzeugung im Fahrzeug	1182
31.3.1	Thermoelektrischer Generator (TEG)	1183
31.4	Wärmemanagement	1184
32	Energien für Antriebe nach 2020	1187
32.1	Kriterien für optimale Antriebstechnologien nach 2020	1187
32.1.1	Randbedingungen für nachhaltige Energie und zukünftige Powertrain-Systeme	1187
32.1.2	GHG-Emissionen der Energiequellen (GHG = Greenhouse Gas)	1188
32.2	Emissionsziele und das Sub-Zero-Emissionspotenzial der Antriebe	1189
32.3	Potenziell nachhaltig verfügbare Designer-Kraftstoffe	1190
32.3.1	Methanol	1191
32.3.2	Synthetische C4-C10-Kraftstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis	1191
32.3.3	Oxymethylenether (OME)	1192
32.3.3.1	Monooxymethylenether (OME1)	1192
32.3.3.2	Höhermolekulare OMEs	1192
32.3.4	Toxizität und Umweltverträglichkeit von C1-Kraftstoffen	1193
32.4	Schlussfolgerungen und Ausblick	1194
33	Ausblick	1195
	Sachwortverzeichnis	1199