

Inhaltsverzeichnis

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

6 Triebwerk	49
6.1 Kurbeltrieb	49
6.1.1 Aufbau und Funktion	49
6.1.2 Kräfte am Kurbeltrieb	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
7 Motorkomponenten	84
7.1 Kolben/Kolbenbolzen/Kolbenbolzensicherung	84
7.1.1 Kolben	84
7.1.1.1 Anforderungen und Funktion	84
7.1.1.2 Konstruktive Gestaltung	84
7.1.1.3 Desachsierung der Nabenoberfläche	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 Lauffächenschutz/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 Pleuelfertigung	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 Ölabbreifringe	108
7.3.2 Ringbestückungen	109
7.3.3 Kenngrößen	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	Grundauslegung 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 Ventilsteuерungen	149
7.8.2	Die Konstruktion des Zylinderkopfes	149
7.8.2.1	Auslegung der Grobabbmessungen	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 Bautufen	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 Baiformen 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	Hohl gegossene Kurbelwellen	175
7.9.3.2	ADI Austempered Ductile 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	Riemenspannungssysteme, Spann- und Umlenkrollen	188
7.10.2.1	Einführung	188
7.10.2.2	Automatische Riemenspannungssysteme 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	Nockenwellenverstellsysteme	259
7.17	Kettentreib	262	
	7.17.1	Kettenbauformen	263
	7.17.2	Kettenkennwerte	264
	7.17.3	Kettenräder	264
	7.17.4	Kettenführungselemente	265
7.18	Riementreibe	266	
	7.18.1	Zahriementriebe zum Antrieb von Nockenwellen	266
	7.18.1.1	Antriebselement Zahriemen	266
	7.18.1.2	Antriebssystem Zahriemen	269
	7.18.1.3	Zahriementriebdynamik	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	Antriebselement Micro-V®-Riemen	273
7.18.2.2	Antriebssystem Nebenaggregatrieb	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	Laufschichten	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 Metaloflex®	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 Anzischen	326
7.22.5.2	Drehwinkelgesteuertes Anziehen.....	327
	7.22.5.3 Streckgrenzgesteuertes Anziehverfahren	328
7.23	Abgaskrümmer	329
7.23.1	Ablauf einer Krümmerentwicklung	330
7.23.2	Krümmer 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	Luftpaltisiolierte Krümmer (LSI-Krümmer)	332
7.23.3	Krümmer als Teilmodul	333
7.23.3.1	Krümmer und Katalysator integriert	333
7.23.3.2	Krümmer und Turbolader integriert.....	333
7.23.4	Krümmer-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
8	Motoren	346
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	GP1	404
8.3.5	Sonderanwendungen	409
8.3.5.1	Schnemobil	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

9 Tribologie	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 Ventilsteuering (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
10 Ladungswechsel	448
10.1 Gaswechseinrichtungen 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 Ventiltriebes	456
10.1.4 Auslegung der Gaswechseinrichtungen 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 Ventilsteuерungen	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 -öffnungsduervariation	490
10.4.3 Vollvariable Ventilsteuерungen	493
10.4.3.1 Rückblick auf die Entwicklung vollvariabler mechanischer Ventilsteuерungen	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 Impulsförderer-Saugmodul	523
10.5.6.6	Ausblick	524
11	Aufladung von Verbrennungsmotoren	525
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	Leistungsexploration 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	Registeraufladung und zweistufige Aufladekonzepte/-systeme	543
11.7.3.1	Registeraufladung	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
12	Gemischbildungsverfahren und -systeme	552
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	Gemischaufbereitung mittels Benzineinspritzung	561
12.3.8.1	Saugrohreinspritzsysteme.....	561
12.3.8.2	Systeme für Direkteinspritzung	563
12.4	Gemischaufbereitung 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 Kraftstoffförderersystem	601
12.5.3.1	Dieselfördersystem	601
12.5.3.2	Ottokraftstoffförderersystem	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
13	Zündung	609
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

14 Verbrennung	630
14.1 Kraftstoffe und Kraftstoffchemie	630
14.2 Oxidation von Kohlenwasserstoffen	631
14.3 Selbstzündung	633
14.3.1 Das H ₂ -O ₂ 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
15 Verbrennungsverfahren	649
15.1 Verbrennungsverfahren für Dieselmotoren	649
15.1.1 Dieselselbsterzeugung	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 Zweitaktdieselmotor	696
15.4 Zweitaktottomotor	697
16 Elektronik und Mechanik für Motor- und Getriebesteuerung	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 Eingangsfilterbaustein Klopf-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	λ -Regelung	730
16.9.2	Antirückelfunktion	732
16.9.3	Drosselklappenregelung	734
16.9.4	Klopfregelung	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
17	System Antriebsstrang	743
17.1	Antriebsstrang-Architektur	743
17.2	Längsdynamik des Kraftfahrzeugs	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®)	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

18 Sensoren	759
18.1 Temperatursensoren	759
18.2 Füllstandssensoren	759
18.3 Klopfsensoren	759
18.4 Abgassensoren	761
18.4.1 Lambdasensoren	761
18.4.2 NO _x -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 Drehzahlssensoren	766
18.7.1 Passive Drehzahlssensoren	766
18.7.2 Aktive Sensoren	767
18.8 Brennraumdrucksensoren für Dieselmotoren	767
19 Aktuatorik	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 Verdunstungsemision, Komponenten	780
19.6.1 Tankentlüftungsventile	780
19.6.2 Diagnose Verdunstungsemision	780
19.6.2.1 Tankdiagnose mit Überdruck	781
19.6.2.2 Tankdiagnose mit Unterdruck	782
20 Kühlung von Verbrennungsmotoren	784
20.1 Allgemeines	784
20.2 Anforderungen an das Kühlssystem	784
20.3 Berechnungsgrundlagen und Simulations-Tools	784

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
22 Betriebsstoffe		867
22.1 Kraftstoffe		867
22.1.1 Dieselkraftstoff (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 Dieselkraftstoffe		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/Dispersants		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 Gebrauchölbewertung		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
23 Filtration von Betriebsstoffen		933
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	Dieselkraftstofffilter	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
24	Berechnung und Simulation	946
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
25	Verbrennungsdagnostik – Indizieren und Visualisieren in der Verbrennungsentwicklung	974
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	Flammanausbreitung in vorgemischter Ladung bei Fremdzündung	981
25.3.2.4	Flammanausbreitung 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: Flammanausbreitung	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
26	Kraftstoffverbrauch	991
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 ₂ -Emissionen	1013
26.5.1	CO ₂ -Emission und Kraftstoffverbrauch	1015
26.5.2	Motorapplikationseinfluss auf die CO ₂ -Emission	1015
26.5.3	Entwicklung der globalen CO ₂ -Emission	1015
27	Geräuschemissionen	1018
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
28	Motorenmesstechnik	1035
29	Hybridantriebe	1054
29.1	Histrie	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	Bremsegerekuperation	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/Stopp	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	Dieselhybridantrieb	1105
29.10.3	Reiner Elektroantrieb	1105
30	Alternative Fahrzeugantriebe und APUs (Auxiliary Power Units)	1106
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

31 Energiemanagement in Motor und Fahrzeug	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
32 Ausblick	1139
Sachwortverzeichnis	1143