

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
	Günter P. Merker	
1.1	Vorbemerkungen .....	1
1.2	Modellbildung und Simulation .....	2
1.3	Verbrennungsdiagnostik .....	3
1.4	Möglichkeiten und Grenzen von Simulationsverfahren .....	4
	Literatur .....	5
 <b>Teil I Funktionsweise von Verbrennungsmotoren</b>		
<b>2</b>	<b>PKW-Ottomotoren</b> .....	9
	Wolfram Gottschalk	
2.1	Gesetzgebung und technologische Meilensteine .....	9
2.1.1	Emissionsgrenzwerte und Prüfzyklen .....	9
2.1.2	Entwicklungsschwerpunkte .....	13
2.2	Emissions-, Verbrauchs- und Leistungsziele .....	38
2.3	Potenzial des PKW-Ottomotors .....	41
	Literatur .....	44
<b>3</b>	<b>PKW-Dieselmotoren</b> .....	47
	Peter Eckert, Maximilian Brauer und Frank Bunar	
3.1	Gesetzgebung und technologische Meilensteine .....	47
3.1.1	Abgasgesetzgebung .....	47
3.1.2	Technologische Meilensteine .....	55
3.2	Wege zum Erreichen der Emissions-, Verbrauchs- und Leistungsziele	56
3.2.1	Grundmotor .....	57
3.2.2	Aufladesystem inklusive Abgasrückführstrecke .....	59
3.2.3	Einspritz- und Gemischbildungssystem .....	63
3.2.4	Abgasnachbehandlungssystem .....	67
	Literatur .....	72

<b>4</b>	<b>Downsizing bei PKW-Motoren</b> . . . . .	73
	Christian Eiglmeier und Axel Groenendijk	
4.1	Downsizing, Downspeeding und Rightsizing . . . . .	75
4.2	Schlüsseltechnologien beim Ottomotor . . . . .	83
4.3	Schlüsseltechnologien beim Dieselmotor . . . . .	87
	Literatur . . . . .	94
<b>5</b>	<b>Nutzfahrzeugdieselmotoren</b> . . . . .	97
	Heiko Lettmann und Karl Maderthaner	
5.1	Anforderungen, Einteilung, Entwicklung und Gesetzgebung . . . . .	97
5.1.1	Anforderungen und Einteilung . . . . .	97
5.1.2	Entwicklung seit 1970 . . . . .	99
5.2	Brennverfahren von Nutzfahrzeugdieselmotoren . . . . .	105
5.2.1	Heterogene Brennverfahren . . . . .	107
5.2.2	Homogene Brennverfahren . . . . .	111
5.2.3	Beispiele ausgeführter Nutzfahrzeugmotoren . . . . .	113
5.3	Kaltstartfähigkeit und Warmlaufverhalten . . . . .	116
5.4	Besonderheiten der Aufladung . . . . .	117
5.5	Mechanik des Nutzfahrzeugdieselmotors . . . . .	120
5.6	Motorbremssysteme . . . . .	122
5.7	Non-Road-Mobile-Machinery-Motoren . . . . .	126
5.8	Potenzial des Nutzfahrzeugdieselmotors . . . . .	128
	Literatur . . . . .	129
<b>6</b>	<b>Großdieselmotoren</b> . . . . .	131
	Hinrich Mohr	
6.1	Einführung und Gesetzgebung . . . . .	131
6.2	Systemintegration und -simulation bei Großmotoren . . . . .	143
6.3	Potenziale von Großdieselmotoren . . . . .	146
	Literatur . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Viertakt Schnellläufer</b> . . . . .	149
	Christoph Teetz und Gerhard Haußmann	
7.1	Allgemeines . . . . .	149
7.2	MTU-Baureihe 331/396 . . . . .	152
7.3	MTU-Baureihen 2000 und 4000 . . . . .	153
	Literatur . . . . .	157
<b>8</b>	<b>Mittelschnelllaufende Viertakt dieselmotoren</b> . . . . .	159
	Gunnar Stiesch	
8.1	Definition und Einordnung . . . . .	159
8.2	Einsatzbereiche und Anforderungen . . . . .	160
8.3	Thermodynamische Motoreigenschaften . . . . .	165

8.4	Konstruktive Besonderheiten . . . . .	169
8.5	Emissionsminderung . . . . .	173
<b>9</b>	<b>Auslegung von Viertaktmotoren . . . . .</b>	<b>179</b>
	Gerhard Haußmann	
9.1	Auslegungskriterien . . . . .	179
9.2	Personenkraftwagenmotoren . . . . .	183
9.3	Formel-1-Rennmotoren . . . . .	187
9.4	Nutzfahrzeugmotoren . . . . .	188
9.5	Schnelllaufende Hochleistungsdieselmotoren für Schiffsantriebe . . .	190
9.6	Zusammenfassung . . . . .	197
	Literatur . . . . .	198
<b>10</b>	<b>Zweitaktlangsamläufer . . . . .</b>	<b>199</b>
	Stefan Mayer	
10.1	Anwendung und genereller Aufbau . . . . .	199
10.2	Ladungswechsel . . . . .	202
10.3	Kraftstoffeinspritzung . . . . .	203
10.4	Aufladung . . . . .	204
10.5	Schmiersystem . . . . .	205
10.6	Abgasenergierückgewinnung . . . . .	206
10.7	Besonderheiten beim Betreiben von Langsamläufern . . . . .	206
10.8	Arbeitsprozess des Langsamläufers . . . . .	207
10.9	Emissionen . . . . .	208
10.10	Entwicklung . . . . .	208
	10.10.1 Reduktion von Emissionen . . . . .	209
	10.10.2 Dual-Fuel- und Gasbetrieb . . . . .	212
<b>11</b>	<b>Großgasmotoren . . . . .</b>	<b>213</b>
	Andreas Wimmer, Rainer Golloch und Matthias Auer	
11.1	Gasförmige Kraftstoffe . . . . .	217
11.2	Brennverfahren und Regelung . . . . .	221
11.3	Emissionen und Abgasgesetzgebung . . . . .	233
11.4	Vergleich Großgasmotor mit Großdieselmotor . . . . .	237
11.5	Anwendungen . . . . .	239
11.6	Entwicklungsmethodik . . . . .	241
	Literatur . . . . .	243

<b>12</b>	<b>Notwendigkeit von Optimierungsstrategien</b> . . . . .	245
	Christian Beidl, Hans-Michael Koegeler, Mats Ivarson und Andreas Rainer	
12.1	Einführung . . . . .	246
12.2	Modellstrukturierung . . . . .	248
12.3	Modellansätze für die Optimierung . . . . .	255
12.4	Beispiele für Optimierungsaufgaben . . . . .	258
12.4.1	Emissionsoptimierung Dieselpersonenkraftwagen . . . . .	258
12.4.2	Volllastoptimierung Ottomotor . . . . .	271
12.4.3	Variantauslegung von Arbeitsmaschinen . . . . .	274
	Literatur . . . . .	279
<b>13</b>	<b>Realfahrtsbezogene Funktions- und Korrekturbedatung</b> . . . . .	281
	Christian Beidl, Hans-Michael Koegeler, Mats Ivarson und Andreas Rainer	
13.1	Bedatung virtueller Sensoren . . . . .	281
13.2	Kaskadierte, modellbasierte Optimierung und Funktionsbedatung . . . . .	286
13.2.1	Antriebsstrangkonzeptauslegung mit Model-in-the-Loop . . . . .	287
13.2.2	Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten . . . . .	293
13.2.3	Beherrschung mehrschichtiger Optimierungsprobleme in Realfahrtszenarien . . . . .	297
13.2.4	Identifikation kritischer Bereiche im transienten Verhalten . . . . .	299
13.2.5	Transiente Korrektur . . . . .	301
13.3	Beispiel zur Höhenkorrektur am virtuellen Prüfstand . . . . .	304
13.4	Zusammenfassung . . . . .	308
	Literatur . . . . .	308

## Teil II Alternative Antriebssysteme

<b>14</b>	<b>Elektrifizierte Antriebssysteme</b> . . . . .	313
	Peter Fischer und Stefan Neunteufel	
14.1	Einleitung . . . . .	313
14.2	Übersicht unterschiedlicher Systeme . . . . .	314
14.2.1	Energiespeicher . . . . .	315
14.2.2	Maschinen und Komponenten . . . . .	317
14.2.3	Fahrzeug als Integrator . . . . .	319
14.3	Energiespeicher . . . . .	320
14.3.1	Lithiumionenbatterie . . . . .	321
14.3.2	Lademöglichkeiten und Ladeströme . . . . .	330
14.3.3	Superkondensatoren . . . . .	332
14.3.4	Hydropneumatische Speicher . . . . .	334
14.3.5	Schwungradspeicher und Kinetic-Energy-Recovery-System . . . . .	336

14.3.6	Vergleich der verschiedenen Energiespeicher . . . . .	338
14.4	Elektrische Maschinen . . . . .	340
14.4.1	Asynchronmaschine . . . . .	341
14.4.2	Permanenterregte Synchronmaschine . . . . .	343
14.4.3	Vergleich der verschiedenen elektrischen Maschinen . . . . .	345
14.5	Elektrische und elektronische Komponenten . . . . .	346
14.5.1	Bordnetz und Spannungslagen . . . . .	346
14.5.2	Power Distribution Unit . . . . .	348
14.5.3	Leistungselektronik, Inverter . . . . .	348
14.5.4	Steuergeräte und Bussysteme . . . . .	350
14.6	Getriebe für hybride und alternative Antriebsstränge . . . . .	351
14.6.1	Getriebe für P2-Parallelhybride . . . . .	351
14.6.2	Leistungsverzweigte Hybride . . . . .	355
14.6.3	Continuous Variable Transmission – Getriebe mit Erweiterung durch Elektromaschinen . . . . .	358
14.6.4	Elektrische Achsen . . . . .	360
14.7	Schlussfolgerung und Ausblick . . . . .	362
	Literatur . . . . .	362
<b>15</b>	<b>Hybridantriebe und Range Extender . . . . .</b>	<b>365</b>
	Helmut Tschöke	
15.1	Elektrifizierung des Antriebs . . . . .	365
15.2	Hybridantriebe . . . . .	368
15.2.1	Einteilung nach dem Hybridisierungs- oder Elektrifizierungsgrad . . . . .	371
15.2.2	Einteilung nach Energiefluss oder Antriebsarchitektur . . . . .	374
15.3	Range Extender . . . . .	377
15.3.1	Definition . . . . .	377
15.3.2	Anforderungen . . . . .	379
15.4	Auswirkungen auf den Verbrennungsmotor . . . . .	385
	Literatur . . . . .	389
<b>16</b>	<b>Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie . . . . .</b>	<b>391</b>
	Jürgen Rechberger	
16.1	Einführung . . . . .	391
16.2	Funktionsprinzip . . . . .	391
16.3	Brennstoffzellentypen . . . . .	392
16.3.1	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle . . . . .	394
16.3.2	Festoxidbrennstoffzelle . . . . .	394
16.4	Brennstoffzellen für automobiler Anwendungen . . . . .	395
16.4.1	Aufbau eines Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen- Stacks . . . . .	396

16.4.2	Funktionsweise eines automobilen Brennstoffzellensystems . . . . .	397
16.4.3	Antriebsarchitektur für ein Brennstoffzellenfahrzeug . . . . .	402
16.4.4	Brennstoffzellenserienfahrzeuge . . . . .	402
16.4.5	Wasserstoffspeicher . . . . .	404
16.4.6	Feststoffoxid-Brennstoffzellensysteme zur Reichweitenverlängerung . . . . .	406
16.5	Vergleich von batterieelektrischen und Brennstoffzellenfahrzeugen . . . . .	411
16.5.1	Energieeffizienz . . . . .	411
16.5.2	Kosten . . . . .	412
16.5.3	Lade- und Betankungsinfrastruktur . . . . .	413
16.5.4	Schlussfolgerungen . . . . .	415
16.5.5	Aufbau eines Feststoffoxid-Brennstoffzellen-Stacks . . . . .	418
16.5.6	Funktionsprinzip eines stationären Feststoffoxid- Brennstoffzellen-Systems . . . . .	420
	Literatur . . . . .	422
<b>17</b>	<b>Der Verbrennungsmotor als Teil des gesamten Antriebsstrangs . . . . .</b>	<b>425</b>
	Gunter Fraidl und Paul Kapus	
17.1	Anforderungen an den Antriebsstrang . . . . .	425
17.2	Zielwertfestlegungen auf Fahrzeugebene . . . . .	428
17.2.1	Benchmarking . . . . .	428
17.2.2	Attribute Engineering . . . . .	429
17.3	Einbindung des Verbrennungsmotors in das Fahrzeugesamtsystem . . . . .	430
17.3.1	Mechanisch-funktionale Integration des Verbrennungsmotors . . . . .	432
17.3.2	Energetische Integration des Verbrennungsmotors . . . . .	436
17.3.3	Integration des Verbrennungsmotors auf Software-/Datenebene . . . . .	441
	Literatur . . . . .	443
<b>18</b>	<b>Zukunft des Verbrennungsmotors . . . . .</b>	<b>445</b>
	Ulrich Spicher	
18.1	Einleitung . . . . .	445
18.2	Die Rolle der Verbrennungsmotoren für die Mobilität der Zukunft . . . . .	447
18.2.1	Gesetzgebung und Emissionsvorschriften . . . . .	450
18.2.2	Objektive Beurteilung von Antriebskonzepten . . . . .	454
18.2.3	CO <sub>2</sub> -Effizienz bei Lebenszyklusbetrachtungen . . . . .	469
18.3	Zusammenfassung . . . . .	475
	Literatur . . . . .	476
<b>19</b>	<b>Verbrennungsmotoren – gestern, heute, morgen . . . . .</b>	<b>479</b>
	Helmut Eichlseder	
19.1	Alternative Konzepte . . . . .	479

19.1.1	Stirlingmotor	479
19.1.2	Dampfmotor	482
19.1.3	Gasturbinen	483
19.1.4	Wankelmotor	484
19.1.5	Zweitaktmotor	485
19.1.6	Brennstoffzelle	487
19.2	Entwicklungspotenzial des Verbrennungsmotors	488
	Literatur	507

### Teil III Thermodynamische und chemische Grundlagen

<b>20</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b>	513
	Günter P. Merker	
20.1	Energiewandlung	513
20.2	Kinematik des Kurbeltriebs	514
20.3	Kreisprozesse	518
20.3.1	Grundlagen	518
20.3.2	Geschlossene Kreisprozesse	524
20.3.3	Offene Vergleichsprozesse	531
20.4	Vom Ideal- zum Realprozess	533
20.4.1	Verlustteilung	533
20.4.2	Kenngrößen und Kennwerte	534
20.4.3	Motorprozesse	537
	Literatur	540
<b>21</b>	<b>Brennstoffe</b>	541
	Peter Eckert, Helmut Eichseder, Sebastian Rakowski und Helmut Tschöke	
21.1	Konventionelle Brennstoffe	541
21.1.1	Gesetzgebung	541
21.1.2	Zusammensetzung	542
21.1.3	Weitere Bestandteile konventioneller Brennstoffe	545
21.1.4	Benzin- und Ottobrennstoffe	548
21.1.5	Dieselmotoren	549
21.1.6	Brennstoffe für Marineanwendungen	550
21.2	Zukünftige Brennstoffe	551
21.2.1	Ottobrennstoffe	554
21.2.2	Dieselmotoren	561
	Literatur	571
<b>22</b>	<b>Reaktionskinetik</b>	575
	Gunnar Stiesch und Peter Eckert	
22.1	Grundlagen	575

22.1.1	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	575
22.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	579
22.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasistationarität . . . . .	580
22.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen . . . . .	583
22.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen . . . . .	583
22.2.2	Zündvorgänge . . . . .	586
22.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation . . . . .	592
	Literatur . . . . .	597
<b>23</b>	<b>Benzinverbrennung . . . . .</b>	<b>599</b>
	Wolfram Gottschalk	
23.1	Gemischbildung . . . . .	599
23.1.1	Homogenbetrieb mit Saugrohreinspritzung . . . . .	601
23.1.2	Homogenbetrieb mit Direkteinspritzung . . . . .	602
23.1.3	Schichtbetrieb mit Direkteinspritzung . . . . .	602
23.1.4	Homogene Selbstzündung . . . . .	605
23.2	Zündung und Verbrennungsablauf . . . . .	607
23.2.1	Aufbau der elektrischen Zündanlage . . . . .	607
23.2.2	Bereitstellung der elektrischen Energie . . . . .	608
23.2.3	Verlauf der elektrischen Fremdzündung . . . . .	608
23.2.4	Auslenkung und Abriss des Zündfunkens, Nebenschluss . . . . .	609
23.2.5	Wärmewert, Selbstreinigungsfähigkeit und Elektrodenabstand . . . . .	609
23.2.6	Optimierte und alternative Zündsysteme . . . . .	610
23.2.7	Flammfrontentwicklung und Einfluss der Turbulenz . . . . .	611
23.2.8	Verbrennungsgeschwindigkeit und Heiz- bzw. Brennverlauf . . . . .	613
23.3	Irreguläre Verbrennungsphänomene . . . . .	614
23.3.1	Klopfende Verbrennung . . . . .	616
23.3.2	Reaktionskinetische Vorentflammung . . . . .	617
23.3.3	Fremdinduzierte Vorentflammung bzw. Glühzündung . . . . .	618
23.4	Rohemissionen und innermotorische Schadstoffreduktion . . . . .	619
23.4.1	Abhängigkeit der Emissionskomponenten von Luftverhältnis und Verbrennungstemperatur . . . . .	620
23.4.2	Verhältnis der Emissionskomponenten und Betriebspunktabhängigkeit . . . . .	620
23.4.3	Emissionsverhalten bei Variation von Einspritztiming und Raildruck . . . . .	621
23.4.4	Emissionsverhalten bei interner Abgasrückführung . . . . .	623
23.4.5	Emissionsverhalten bei alternativen Flüssigkraftstoffen . . . . .	623
23.4.6	Emissionsverhalten im Schichtbetrieb bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung . . . . .	626
23.4.7	Emissionsverhalten bei Entdrosselung mit variablem Ventiltrieb . . . . .	627



23.4.8	Emissionsverhalten bei Drallladungsbewegung mit variablem Ventiltrieb . . . . .	629
23.4.9	Einfluss des Emissionsverhaltens durch das Verdichtungsverhältnis . . . . .	629
23.4.10	Emissionsverhalten bei Brennverfahren mit homogener Selbstzündung . . . . .	629
	Literatur . . . . .	635
<b>24</b>	<b>Dieselerbrennung . . . . .</b>	<b>639</b>
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
24.1	Gemischbildung . . . . .	640
24.2	Selbstzündung und Verbrennungsablauf . . . . .	643
24.3	Rohemissionen des Dieselmotors . . . . .	647
24.3.1	Einspritzparameter . . . . .	648
24.3.2	Abgasrückführung und Aufladung . . . . .	657
24.3.3	Homogenisierung/alternative Brennverfahren . . . . .	659
24.3.4	Emissionen im transienten Betrieb . . . . .	661
24.4	Potenzial des Dieselmotors . . . . .	663
	Literatur . . . . .	664
 <b>Teil IV Gemischbildung</b>		
<b>25</b>	<b>Ladungswechsel . . . . .</b>	<b>669</b>
	Helmut Eichlseder und Peter Grabner	
25.1	Steuerung . . . . .	669
25.2	Wichtige Kenngrößen des Ladungswechsels (Auszug aus DIN 1940) . . . . .	671
25.3	Abgasrückführung . . . . .	672
25.4	Variabilitäten im Ladungswechsel . . . . .	675
25.4.1	Sauganlagen . . . . .	675
25.4.2	Ladungsbewegungsklappen (Drall und Tumble) . . . . .	675
	Literatur . . . . .	678
<b>26</b>	<b>Benzineinspritzsysteme . . . . .</b>	<b>681</b>
	Roger Busch	
26.1	Saugrohreinspritzung . . . . .	682
26.1.1	Aufbau der Saugrohreinspritzung . . . . .	682
26.1.2	Arbeitsweise der Saugrohreinspritzung . . . . .	686
26.1.3	Elektromagnetische Einspritzventile . . . . .	688
26.1.4	Kraftstoffverteiler . . . . .	690
26.1.5	Gemischbildung . . . . .	691
26.1.6	Advanced Port Fuel Injection . . . . .	694
26.2	Direkteinspritzung . . . . .	696

26.2.1	Aufbau Direkteinspritzung . . . . .	697
26.2.2	Arbeitsweise . . . . .	697
26.2.3	Brennverfahren und Gemischbildung . . . . .	703
26.2.4	Mechatronische Systemkonzepte . . . . .	706
26.3	Wassereinspritzung . . . . .	708
26.3.1	Vorteile der Wassereinspritzung . . . . .	708
26.3.2	Aufbau eines Wassereinspritzsystems . . . . .	711
	Literatur . . . . .	712
<b>27</b>	<b>Dieseleinspritzsysteme . . . . .</b>	<b>713</b>
	Thomas Wintrich, Kai Sutter, Gerd Lösch, Andreas Rettich und Jürgen Hammer	
27.1	Grundfunktionen . . . . .	713
27.2	Bauarten . . . . .	714
27.2.1	Übersicht . . . . .	714
27.2.2	Hub-/Druck-Steuerung der Düsennadel . . . . .	716
27.3	Common-Rail-System . . . . .	717
27.3.1	Niederdrucksystem . . . . .	717
27.3.2	Hochdrucksystem . . . . .	719
27.4	Hochdruckpumpen . . . . .	722
27.4.1	Aufbau und Funktion . . . . .	722
27.4.2	Mengenregelung . . . . .	724
27.4.3	Hauptbauarten für Personenkraftwagen . . . . .	726
27.5	Rail und Anbaukomponenten . . . . .	727
27.6	Common-Rail-Injektoren . . . . .	731
27.6.1	Düsen für Common-Rail-Injektoren . . . . .	731
27.6.2	Magnetventilinjektor mit Kugelsitzventil . . . . .	734
27.6.3	Magnetventilinjektor mit Schieberventil . . . . .	737
27.6.4	Piezo-Inline-Injektoren . . . . .	740
27.7	Zumessfunktionen . . . . .	743
	Literatur . . . . .	744
<b>28</b>	<b>Einspritzung für Großdieselmotoren . . . . .</b>	<b>745</b>
	Hartmut Schneider, Clemens Senghaas und Ralph-Michael Schmidt	
28.1	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	745
28.2	Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsysteme . . . . .	750
28.3	Pumpe-Düse-Einspritzsysteme . . . . .	753
28.4	Speichereinspritzsysteme . . . . .	755
28.4.1	Common-Rail-Systeme der ersten Generation . . . . .	755
28.4.2	Common-Rail-Systeme der zweiten Generation . . . . .	759
28.4.3	Common-Rail-Systeme der dritten Generation . . . . .	761
28.4.4	Schweröl-Common-Rail-Systeme . . . . .	762

28.5	Derivate . . . . .	764
28.5.1	Einspritzventile für Gasmotoren . . . . .	764
28.5.2	Wassereinspritzsystem . . . . .	766
28.5.3	Einspritzsysteme für Sonderkraftstoffe . . . . .	766
	Literatur . . . . .	767
<b>29</b>	<b>Aufladeverfahren . . . . .</b>	<b>769</b>
	Roland Baar	
29.1	Einführung . . . . .	769
29.1.1	Natürliche Aufladung . . . . .	771
29.1.2	Druckwellenaufladung . . . . .	772
29.1.3	Kompressoraufladung . . . . .	772
29.1.4	Abgasturboaufladung . . . . .	774
29.2	Aufbau und Funktion von Turboladern . . . . .	775
29.3	Regelung . . . . .	785
29.4	Anpassung von Turboladern an Verbrennungsmotoren . . . . .	788
29.5	Erweiterte Turboladermodellierung . . . . .	795
	Literatur . . . . .	799
<b>30</b>	<b>Aufladesysteme . . . . .</b>	<b>801</b>
	Roland Baar	
30.1	Laderkombinationen und Elektrifizierung . . . . .	801
30.1.1	Zweistufig geregelte Aufladung aus zwei Abgasturboladern . . . . .	801
30.1.2	Zweistufig geregelte Aufladung aus Abgasturbolader und Kompressor . . . . .	802
30.1.3	Registeraufladung . . . . .	803
30.1.4	Elektrisch unterstützte Aufladung . . . . .	805
30.2	Sonstiges . . . . .	806
30.2.1	Ladeluftkühlung . . . . .	806
30.2.2	Abgasrückführung . . . . .	806
30.2.3	Stau- und Stoßaufladung . . . . .	807
30.2.4	Kennfeldstabilisierende Maßnahmen am Verdichter . . . . .	808
30.2.5	Schubumluft . . . . .	808
	Literatur . . . . .	809
<b>31</b>	<b>Thermomanagement . . . . .</b>	<b>811</b>
	Raimund Almbauer, Andreas Ennemoser, Heinz Petutschnig und Armin Traußnig	
31.1	Einleitung . . . . .	811
31.1.1	Begriffliche Abgrenzung . . . . .	813
31.1.2	Thermomanagement Entwicklungsziele VKM . . . . .	814
31.2	Thermomanagementmaßnahmen VKM . . . . .	816

31.2.1	Überblick . . . . .	817
31.3	Modellbildung und Simulation . . . . .	818
31.3.1	Gesamtfahrzeugsimulation . . . . .	818
31.3.2	Grundgleichungen für Energieerhaltung und Wärmeübertragung für den Aufbau thermischer Modelle . . . . .	819
31.3.3	Grundgleichungen Fluidmechanik . . . . .	831
31.3.4	Modellierung ausgewählter Komponenten . . . . .	837
31.4	Betriebsstrategie und Regelung . . . . .	842
31.4.1	Temperaturregelung . . . . .	843
31.5	Ausgewählte Anwendungsfälle des Thermomanagements . . . . .	845
31.5.1	Jahresenergiebilanzanalyse für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	845
31.5.2	Konzeptauswahl geregelte Ölpumpe und Kolbenringe . . . . .	846
31.5.3	„NO WASTE“ EU-Projekt, Restwärmenutzung im Nutzfahrzeug mit Rankine-Zyklus . . . . .	847
	Literatur . . . . .	849

## Teil V Verbrennungsdiagnostik

32	<b>Druckindizierung . . . . .</b>	<b>853</b>
	Rüdiger Teichmann und Andreas Wimmer	
32.1	Allgemeines . . . . .	854
32.2	Die Indiziermesskette . . . . .	857
32.2.1	Piezoelektrische Druckaufnehmer . . . . .	858
32.2.2	Piezomaterialien . . . . .	860
32.2.3	Aufbau von piezoelektrischen Druckaufnehmern . . . . .	864
32.2.4	Absolutdruckmessende Sensoren . . . . .	866
32.2.5	Ladungsverstärker . . . . .	868
32.2.6	Indiziergerät . . . . .	870
32.2.7	Messverkabelung . . . . .	873
32.2.8	Winkelaufnehmer . . . . .	873
32.3	Einflüsse auf die Messgenauigkeit . . . . .	877
32.3.1	Äußere Einflüsse auf den Sensor . . . . .	877
32.3.2	OT-Zuordnung . . . . .	879
32.3.3	Bestimmung des Druckniveaus . . . . .	882
32.4	Kennwerte infolge von äußeren Einflüssen auf den Sensor . . . . .	886
32.4.1	Temperaturbedingte Empfindlichkeitsänderung . . . . .	886
32.4.2	Lastwechseldrift . . . . .	890
32.5	Varianten für die Sensoradaptierung . . . . .	891
32.5.1	Zündkerzenadaptierung . . . . .	891
32.5.2	Druckindizierung mit Eingriff am Versuchsträger . . . . .	894

32.6	Elektrische Drift am Ladungsverstärker . . . . .	897
32.7	Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem . . . . .	898
32.7.1	Piezoelektrische Druckaufnehmer . . . . .	899
32.7.2	Piezoresistive Druckaufnehmer . . . . .	900
	Literatur . . . . .	901
<b>33</b>	<b>Druckverlaufsanalyse . . . . .</b>	<b>903</b>
	Rüdiger Teichmann und Andreas Wimmer	
33.1	Bestimmung des Brennverlaufes . . . . .	903
33.1.1	Erfassung des Drucksignals . . . . .	903
33.1.2	Auswertung des Drucksignals . . . . .	904
33.2	Verlustteilung . . . . .	907
33.2.1	Verluste aus unvollständiger/unvollkommener Verbrennung . . . . .	909
33.2.2	Verbrennungsverluste . . . . .	909
33.2.3	Wandwärmeverluste . . . . .	910
33.2.4	Ladungswechselverluste . . . . .	910
33.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	910
33.3.1	Vergleich der Brennverläufe unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	911
33.3.2	Vergleich der Verlustteilung unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	911
	Literatur . . . . .	913
<b>34</b>	<b>Optische Messverfahren . . . . .</b>	<b>915</b>
	Ernst Winklhofer	
34.1	Einleitung . . . . .	915
34.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick . . . . .	916
34.3	Beispiele optischer Methoden . . . . .	917
34.4	Dieselmotoren . . . . .	918
34.4.1	Brennraumendoskopie . . . . .	919
34.4.2	Flammenbildauswertung . . . . .	920
34.4.3	Rußbildung – Rußabbrand Variantenanalyse . . . . .	921
34.4.4	Rußbewertung mit der Zweifarbenmethode . . . . .	922
34.5	Ottomotoren . . . . .	924
34.5.1	Emissionen: Bewerten der Gemischbildung aus einer Messung der Flammenstrahlung . . . . .	924
34.5.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	927
34.5.3	Verbrennungsstabilität: Strömung, EGR, Lambda . . . . .	930
34.5.4	Irreguläre Verbrennung . . . . .	934
34.5.5	Berührungslose Temperaturmessung . . . . .	936
34.6	Lasermesstechniken . . . . .	937
34.7	Ausblick Verbrennungsdiagnostik . . . . .	938
	Literatur . . . . .	939

**Teil VI Emissionen**

<b>35</b>	<b>Schadstoffbildung</b> . . . . .	943
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
35.1	Abgaszusammensetzung . . . . .	943
35.2	Innermotorische Schadstoffbildung und -reduktion . . . . .	945
35.2.1	Kohlenmonoxid (CO) . . . . .	950
35.2.2	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) . . . . .	951
35.2.3	Partikelemission beim Dieselmotor . . . . .	958
35.2.4	Stickoxide . . . . .	967
	Literatur . . . . .	974
<b>36</b>	<b>Nachmotorische Schadstoffreduktion</b> . . . . .	979
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
36.1	Heterogene Katalyse . . . . .	980
36.2	Deaktivierungsmechanismen . . . . .	982
36.3	Oxidationskatalysatoren . . . . .	984
36.4	Dreiwegekatalysatoren . . . . .	988
36.5	NO <sub>x</sub> -Speicher-katalysatoren . . . . .	990
36.6	Selektive katalytische Reduktion (SCR) . . . . .	992
36.7	Partikelfilter . . . . .	999
	Literatur . . . . .	1004
<b>37</b>	<b>Emissionsmesstechnik</b> . . . . .	1009
	Alexander Bergmann, Kurt Engeljehring und Rüdiger Teichmann	
37.1	Einführung . . . . .	1009
37.2	Messgasaufbereitung . . . . .	1010
37.2.1	Messgasaufbereitung Abgasmessanlage . . . . .	1010
37.2.2	Messgasaufbereitung durch Verdünnung . . . . .	1014
37.2.3	Unverdünnte versus verdünnte Abgasmessung . . . . .	1016
37.3	Messung gasförmiger Bestandteile . . . . .	1017
37.3.1	NDIR – nichtdispersiver Infrarotdetektor . . . . .	1018
37.3.2	FID – Flame Ionisation Detector . . . . .	1020
37.3.3	CLD – Chemolumineszenz Detektor . . . . .	1021
37.3.4	PMD – Paramagnetischer Detektor . . . . .	1022
37.3.5	FTIR – Fourier-Transform Infrarotspektroskopie . . . . .	1022
37.3.6	LDS – Laser-Dioden-Spektroskopie . . . . .	1024
37.4	Messung fester Bestandteile . . . . .	1024
37.4.1	Messung der Partikel entsprechend gesetzlicher Vorgaben . .	1024
37.4.2	Bestimmung von Partikeleigenschaften im Abgas mit alternativen Verfahren . . . . .	1027
	Literatur . . . . .	1033

<b>38</b>	<b>RDE und neue Testzyklen</b> . . . . .	1035
	Kurt Engeljehring	
38.1	Einführung . . . . .	1035
38.2	Gesetzgebung . . . . .	1036
38.3	RDE-Test und Randbedingungen . . . . .	1038
38.4	PEMS-Messtechnik . . . . .	1040
	Literatur . . . . .	1042
<b>Teil VII 0D- und 1D- Motorprozessrechnung</b>		
<b>39</b>	<b>Nulldimensionale Modellierung</b> . . . . .	1045
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
39.1	Grundgleichungen . . . . .	1047
39.2	Stoffwerte . . . . .	1050
39.3	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	1051
39.4	Ein- und Mehrzonenmodelle . . . . .	1055
	39.4.1 Einzonenmodell . . . . .	1055
	39.4.2 Zweizonenmodell . . . . .	1057
	39.4.3 Mehrzonenmodelle . . . . .	1061
39.5	Simulation . . . . .	1061
	39.5.1 Ersatzbrennverläufe . . . . .	1061
	39.5.2 Verbrennungsmodelle . . . . .	1063
	39.5.3 Grundsätzliche Ansätze zur Modellierung von Zündverzug und Brennrate . . . . .	1063
	Literatur . . . . .	1066
<b>40</b>	<b>Wärmeübergang</b> . . . . .	1069
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
40.1	Allgemeines . . . . .	1069
40.2	Modelle auf Basis des Newton'schen Ansatzes . . . . .	1071
	40.2.1 Wärmeübergangsbeziehung nach Woschni . . . . .	1072
	40.2.2 Wärmeübergangsbeziehung nach Hohenberg . . . . .	1073
40.3	Physikalische Modelle . . . . .	1074
40.4	Strömungsfeldorientierte Ansätze . . . . .	1076
	40.4.1 Wärmeübergang nach Bargende . . . . .	1076
	40.4.2 Wärmeübergang nach Wimmer (2000), Pivec (2001) und Schubert et al. (2005) . . . . .	1077
40.5	Strahlungswärmeübergang . . . . .	1079
	Literatur . . . . .	1082

<b>41</b>	<b>Modellierung des Ladungswechsels</b> . . . . .	1083
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
41.1	Grundlagen . . . . .	1083
41.1.1	Füll- und Entleermethode . . . . .	1084
41.1.2	Gasdynamische Betrachtung . . . . .	1085
41.2	Koppelungsansätze . . . . .	1091
41.2.1	Eindimensionale Ladungswechselrechnung und Motorprozessrechnung . . . . .	1092
41.2.2	Eindimensionale Ladungswechselrechnung und 3-D-CFD-Simulation . . . . .	1096
	Literatur . . . . .	1096
<b>42</b>	<b>Gesamtsimulation</b> . . . . .	1099
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
42.1	Transiente Simulation . . . . .	1099
42.2	Hydrauliksimulation . . . . .	1100
42.2.1	Aufbau eines Simulationsprogramms für hydraulische Systeme . . . . .	1101
42.2.2	Kavitation . . . . .	1105
42.3	Gesamtfahrzeugsimulation . . . . .	1107
42.3.1	Thermisches Motormodell . . . . .	1109
42.3.2	Wärmeeintragsmodell . . . . .	1110
42.3.3	Reibungsmodell . . . . .	1111
42.3.4	Prognosegenauigkeit . . . . .	1113
42.4	Vereinfachte Modellierung auf Basis von Mittelwertmodellen . . . . .	1115
	Literatur . . . . .	1117
 <b>Teil VIII Phänomenologische Verbrennungsmodelle</b>		
<b>43</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Ottomotoren</b> . . . . .	1121
	Gunnar Stiesch, Friedrich Dinkelacker und Sebastian Rakowski	
43.1	Laminare und turbulente Flammgeschwindigkeit . . . . .	1124
43.2	Wärmefreisetzung . . . . .	1126
43.3	Zündung . . . . .	1129
43.4	Klopfen . . . . .	1130
	Literatur . . . . .	1131
<b>44</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Dieselmotoren</b> . . . . .	1133
	Gunnar Stiesch	
44.1	Nulldimensionale Brennverlaufsfunction . . . . .	1133
44.2	Stationärer Gasstrahl . . . . .	1135
44.3	Paketmodelle . . . . .	1140



44.4	Zeitskalenmodelle . . . . .	.1147
	Literatur . . . . .	.1151
<b>45</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Großgasmotoren . . . . .</b>	<b>.1153</b>
	Franz Chmela, Gerhard Pirker, Andreas Wimmer und Friedrich Dinkelacker	
45.1	Zündverzug . . . . .	.1154
45.2	Brennrate beim Ottogasmotor mit offenem Brennraum . . . . .	.1155
45.3	Brennrate beim Ottogasmotor mit Vorkammer . . . . .	.1156
45.4	Klopfen . . . . .	.1159
45.5	NO <sub>x</sub> -Emissionen . . . . .	.1161
45.6	Methanemissionen . . . . .	.1162
	Literatur . . . . .	.1162
<b>46</b>	<b>Abgasnachbehandlungssysteme . . . . .</b>	<b>.1165</b>
	Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
46.1	Methoden der Abgasnachbehandlung . . . . .	.1165
46.2	Modellbildung und Simulation . . . . .	.1167
46.3	Abgaskatalysatoren . . . . .	.1168
	46.3.1 Grundgleichungen . . . . .	.1168
	46.3.2 Katalysatortypen . . . . .	.1172
46.4	Dieselpartikelfilter . . . . .	.1178
	46.4.1 Grundgleichungen . . . . .	.1178
	46.4.2 Beladung und Druckverlust . . . . .	.1182
	46.4.3 Regeneration und Temperaturverteilung . . . . .	.1183
46.5	Dosiereinheiten . . . . .	.1185
46.6	Gesamtsystem . . . . .	.1186
46.7	Nomenklatur . . . . .	.1187
	Literatur . . . . .	.1189
 <b>Teil IX 3D-Simulation des Arbeitsprozesses</b>		
<b>47</b>	<b>Strömungsmechanische Grundlagen . . . . .</b>	<b>.1193</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
47.1	Massen- und Impulstransport . . . . .	.1196
47.2	Transport von innerer Energie und Spezies . . . . .	.1199
47.3	Passive Skalare und Mischungsbruch . . . . .	.1200
47.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen . . . . .	.1201
47.5	Turbulenz und Turbulenzmodelle . . . . .	.1202
	47.5.1 Phänomenologie der Turbulenz . . . . .	.1202
	47.5.2 Modellierung der Turbulenz . . . . .	.1203
	47.5.3 Turbulentes Wandgesetz . . . . .	.1206
	47.5.4 Modellierung des turbulenten Mischungszustandes . . . . .	.1209

	47.5.5 Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze . . .	1212
	Literatur . . . . .	1217
<b>48</b>	<b>Numerik und zukünftige Entwicklungen . . . . .</b>	<b>1219</b>
	Christian Krüger, Frank Otto, Martin Schmitt und Konstantinos Boulouchos	
	48.1 Finites-Volumen-Verfahren . . . . .	1219
	48.2 Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen . . . . .	1220
	48.3 Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema . . . . .	1222
	48.4 Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema . . . . .	1223
	48.5 Diskretisierung des Quellterms . . . . .	1225
	48.6 Operator-Split-Verfahren . . . . .	1226
	48.7 Diskretisierung und numerische Lösung der Impulsgleichung . . . . .	1226
	48.8 Rechennetze . . . . .	1227
	48.9 Beispiele . . . . .	1229
	48.9.1 Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor	1229
	48.9.2 Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor . . . . .	1231
	48.9.3 Düseninnenströmung . . . . .	1233
	48.10 Direkte Numerische Simulation der Strömung im Brennraum. Stand der Technik und Ausblick . . . . .	1236
	48.10.1 Simulationsaufbau und Validierung . . . . .	1238
	48.10.2 Ergebnisse: Strömungsfeld und Wandwärmeübergang im Verdichtungstakt . . . . .	1239
	48.10.3 Fazit . . . . .	1241
	48.10.4 Ausblick . . . . .	1242
	Literatur . . . . .	1242
<b>49</b>	<b>Simulation der Aufladung . . . . .</b>	<b>1245</b>
	Roland Baar	
	49.1 Allgemeines . . . . .	1245
	49.2 Interaktion von Laufrad und Gehäuse . . . . .	1248
	49.3 Grundlagen der Gittergenerierung für Turbomaschinen . . . . .	1250
	49.4 Netzaufbau, Netzqualität, Turbulenzmodelle und Randbedingungen . . . . .	1251
	49.5 Auswertung . . . . .	1255
	49.6 Beispiel . . . . .	1259
	Literatur . . . . .	1260
<b>50</b>	<b>Simulation von Einzeltröpfchenprozessen . . . . .</b>	<b>1261</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
	50.1 Impulsaustausch . . . . .	1261
	50.2 Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell) . . . . .	1262
	50.3 Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponentenmodellierung) . . . . .	1266

50.4	Flashboiling . . . . .	1270
	Literatur . . . . .	1271
<b>51</b>	<b>Simulation des Einspritzstrahls . . . . .</b>	<b>1273</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
51.1	Strahlstatistik . . . . .	1273
51.1.1	Boltzmann-Williams-Gleichung . . . . .	1274
51.1.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung: Das Standardmodell (Lagrange-Formulierung) . . . . .	1276
51.1.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen . . . . .	1278
51.1.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt . . . . .	1280
51.1.5	Modellierung von Zerfallsprozessen . . . . .	1281
51.1.6	Modellierung von Stoßprozessen . . . . .	1286
51.1.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell . . . . .	1287
51.1.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker- Planck-Gleichung . . . . .	1289
51.1.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung . . . . .	1294
51.1.10	Probleme des Standardstrahlmodells . . . . .	1297
51.1.11	Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit nach außen öffnendem Piezo-Injektor . . . . .	1301
51.2	Euler-Strahlmodelle . . . . .	1305
51.2.1	Lokal homogene Strömung . . . . .	1306
51.2.2	Einbettungen von 1D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen	1309
51.2.3	3D-Euler-Verfahren . . . . .	1312
	Literatur . . . . .	1315
<b>52</b>	<b>Simulation der Dieselerverbrennung . . . . .</b>	<b>1317</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
52.1	Verbrennungsregimes . . . . .	1317
52.2	Allgemeines Vorgehen . . . . .	1320
52.3	Diesel-Verbrennung . . . . .	1322
52.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung . . . . .	1322
52.3.2	Zündung . . . . .	1329
52.3.3	NO <sub>x</sub> -Bildung . . . . .	1330
52.3.4	Rußbildung . . . . .	1332
52.3.5	HC- und CO-Emissionen . . . . .	1332
	Literatur . . . . .	1333
<b>53</b>	<b>Simulation der Benzinverbrennung . . . . .</b>	<b>1335</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
53.1	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung) . . . . .	1335

53.1.1	Zweiphasenproblematik . . . . .	1336
53.1.2	Magnussen-Modell . . . . .	1339
53.1.3	Flammenflächenmodelle (auch Coherent Flame Models) . . .	1343
53.1.4	G-Gleichung . . . . .	1347
53.1.5	Diffusive G-Gleichung . . . . .	1350
53.1.6	Zündung . . . . .	1351
53.1.7	Klopfen . . . . .	1352
53.1.8	Schadstoffbildung . . . . .	1352
53.2	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen) . . . . .	1353
	Literatur . . . . .	1358
<b>54</b>	<b>Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick . . . . .</b>	<b>1359</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
54.1	Netzbewegung . . . . .	1360
54.2	Numerik . . . . .	1361
54.3	Turbulenz . . . . .	1361
54.4	Modellierung der Einspritzprozesse . . . . .	1362
54.4.1	Näherung I: Berücksichtigung der Zerfälle nur als Mittelwertsprozess . . . . .	1363
54.4.2	Näherung II: Vernachlässigung von Stoßprozessen . . . . .	1365
54.5	Modellierung der Verbrennung . . . . .	1366
	Literatur . . . . .	1367
<b>A</b>	<b>3D-CFD Simulation mit dem kommerziellen Code AVL FIRE™ . . . . .</b>	<b>1369</b>
	Reinhard Tatschl	
<b>B</b>	<b>Antriebssystems simulation mit dem kommerziellen Code CRUISE™ M . . . .</b>	<b>1403</b>
	Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
<b>C</b>	<b>Prüfstandssoftware – Fehlerdiagnose an Motorprüfständen . . . . .</b>	<b>1441</b>
	Michael Wohlthan, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>1461</b>