

---

# 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 . . . . .	106
5.2.1	Heterogene Brennverfahren . . . . .	107
5.2.2	Homogene Brennverfahren . . . . .	112
5.2.3	Beispiele ausgeführter Nutzfahrzeugmotoren . . . . .	114
5.3	Kaltstartfähigkeit und Warmlaufverhalten . . . . .	117
5.4	Besonderheiten der Aufladung . . . . .	118
5.5	Mechanik des Nutzfahrzeugdieselmotors . . . . .	121
5.6	Motorbremssysteme . . . . .	123
5.7	Non-Road-Mobile-Machinery-Motoren . . . . .	127
5.8	Potenzial des Nutzfahrzeugdieselmotors . . . . .	129
	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>Viertaktschnellläufer</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 Viertakt Dieselmotoren . . . . .</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	Abgasenergie rückgewinnung . . . . .	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

**Teil II Alternative Antriebssysteme**

<b>12</b>	<b>Notwendigkeit von Optimierungsstrategien</b> . . . . .	247
	Christian Beidl, Hans-Michael Koegeler, Mats Ivarson und Andreas Rainer	
12.1	Einführung . . . . .	248
12.2	Modellstrukturierung . . . . .	250
12.3	Modellansätze für die Optimierung . . . . .	257
12.4	Beispiele für Optimierungsaufgaben . . . . .	260
12.4.1	Emissionsoptimierung Dieselpersonenkraftwagen . . . . .	260
12.4.2	Volllastoptimierung Ottomotor . . . . .	273
12.4.3	Variantenauslegung von Arbeitsmaschinen . . . . .	276
	Literatur . . . . .	281
<b>13</b>	<b>Realfahrtsbezogene Funktions- und Korrekturbedatung</b> . . . . .	283
	Christian Beidl, Hans-Michael Koegeler, Mats Ivarson und Andreas Rainer	
13.1	Bedatung virtueller Sensoren . . . . .	283
13.2	Kaskadierte, modellbasierte Optimierung und Funktionsbedatung . . . . .	288
13.2.1	Antriebsstrangkonzepauslegung mit Model-in-the-Loop . . . . .	289
13.2.2	Optimierung des Energiemanagements von Hybridfahrzeugen in kritischen Zyklusabschnitten . . . . .	295
13.2.3	Beherrschung mehrschichtiger Optimierungsprobleme in Realfahrtszenarien . . . . .	299
13.2.4	Identifikation kritischer Bereiche im transienten Verhalten . . . . .	301
13.2.5	Transiente Korrektur . . . . .	303
13.3	Beispiel zur Höhenkorrektur am virtuellen Prüfstand . . . . .	306
13.4	Zusammenfassung . . . . .	310
	Literatur . . . . .	310
<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 . . . . .	361
	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 . . . . .	386
	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>	<b>513</b>
	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>	<b>541</b>
	Peter Eckert, Helmut Eichlseder, 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 . . . . .	553
	21.2.2 Dieselmotoren . . . . .	561
	Literatur . . . . .	571
<b>22</b>	<b>Reaktionskinetik . . . . .</b>	<b>573</b>
	Gunnar Stiesch und Peter Eckert	
22.1	Grundlagen . . . . .	573
	22.1.1 Chemisches Gleichgewicht . . . . .	573

22.1.2	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	577
22.1.3	Partielles Gleichgewicht und Quasistationarität . . . . .	578
22.2	Reaktionskinetik von Kohlenwasserstoffen . . . . .	581
22.2.1	Oxidation von Kohlenwasserstoffen . . . . .	581
22.2.2	Zündvorgänge . . . . .	584
22.2.3	Reaktionskinetik in der motorischen Simulation . . . . .	590
	Literatur . . . . .	595
<b>23</b>	<b>Benzinverbrennung . . . . .</b>	<b>597</b>
	Wolfram Gottschalk	
23.1	Gemischbildung . . . . .	597
23.1.1	Homogenbetrieb mit Saugrohreinspritzung . . . . .	599
23.1.2	Homogenbetrieb mit Direkteinspritzung . . . . .	600
23.1.3	Schichtbetrieb mit Direkteinspritzung . . . . .	600
23.1.4	Homogene Selbstzündung . . . . .	603
23.2	Zündung und Verbrennungsablauf . . . . .	605
23.2.1	Aufbau der elektrischen Zündanlage . . . . .	605
23.2.2	Bereitstellung der elektrischen Energie . . . . .	606
23.2.3	Verlauf der elektrischen Fremdzündung . . . . .	606
23.2.4	Auslenkung und Abriss des Zündfunkens, Nebenschluss . . . . .	607
23.2.5	Wärmewert, Selbstreinigungsfähigkeit und Elektrodenabstand . . . . .	607
23.2.6	Optimierte und alternative Zündsysteme . . . . .	608
23.2.7	Flammfrontentwicklung und Einfluss der Turbulenz . . . . .	609
23.2.8	Verbrennungsgeschwindigkeit und Heiz- bzw. Brennverlauf . . . . .	611
23.3	Irreguläre Verbrennungsphänomene . . . . .	612
23.3.1	Klopfende Verbrennung . . . . .	614
23.3.2	Reaktionskinetische Vorentflammung . . . . .	615
23.3.3	Fremdinduzierte Vorentflammung bzw. Glühzündung . . . . .	616
23.4	Rohemissionen und innermotorische Schadstoffreduktion . . . . .	617
23.4.1	Abhängigkeit der Emissionskomponenten von Luftverhältnis und Verbrennungstemperatur . . . . .	618
23.4.2	Verhältnis der Emissionskomponenten und Betriebspunktabhängigkeit . . . . .	618
23.4.3	Emissionsverhalten bei Variation von Einspritztiming und Raildruck . . . . .	619
23.4.4	Emissionsverhalten bei interner Abgasrückführung . . . . .	621
23.4.5	Emissionsverhalten bei alternativen Flüssigkraftstoffen . . . . .	621
23.4.6	Emissionsverhalten im Schichtbetrieb bei Direkteinspritzung- Ottomotoren . . . . .	624
23.4.7	Emissionsverhalten bei Entdrosselung mit variablem Ventiltrieb . . . . .	625

23.4.8	Emissionsverhalten bei Drallladungs- bewegung mit variablem Ventiltrieb . . . . .	627
23.4.9	Einfluss des Emissionsverhaltens durch das Verdichtungsverhältnis . . . . .	627
23.4.10	Emissionsverhalten bei Brennverfahren mit homogener Selbstzündung . . . . .	627
	Literatur . . . . .	633
<b>24</b>	<b>Dieselverbrennung</b> . . . . .	<b>637</b>
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
24.1	Gemischbildung . . . . .	638
24.2	Selbstzündung und Verbrennungsablauf . . . . .	641
24.3	Rohemissionen des Dieselmotors . . . . .	645
24.3.1	Einspritzparameter . . . . .	646
24.3.2	Abgasrückführung und Aufladung . . . . .	655
24.3.3	Homogenisierung/alternative Brennverfahren . . . . .	657
24.3.4	Emissionen im transienten Betrieb . . . . .	659
24.4	Potenzial des Dieselmotors . . . . .	661
	Literatur . . . . .	662
<b>Teil IV Gemischbildung</b>		
<b>25</b>	<b>Ladungswechsel</b> . . . . .	<b>667</b>
	Helmut Eichseder und Peter Grabner	
25.1	Steuerung . . . . .	667
25.2	Wichtige Kenngrößen des Ladungswechsels (Auszug aus DIN 1940) . . . . .	669
25.3	Abgasrückführung . . . . .	670
25.4	Variabilitäten im Ladungswechsel . . . . .	673
25.4.1	Sauganlagen . . . . .	673
25.4.2	Ladungsbewegungsklappen (Drall und Tumble) . . . . .	673
	Literatur . . . . .	676
<b>26</b>	<b>Benzin Einspritzsysteme</b> . . . . .	<b>679</b>
	Roger Busch	
26.1	Saugohreinspritzung . . . . .	680
26.1.1	Aufbau der Saugohreinspritzung . . . . .	680
26.1.2	Arbeitsweise der Saugohreinspritzung . . . . .	684
26.1.3	Elektromagnetische Einspritzventile . . . . .	686
26.1.4	Kraftstoffverteiler . . . . .	688
26.1.5	Gemischbildung . . . . .	689
26.1.6	Advanced Port Fuel Injection . . . . .	692
26.2	Direkteinspritzung . . . . .	694

26.2.1	Aufbau Direkteinspritzung . . . . .	695
26.2.2	Arbeitsweise . . . . .	695
26.2.3	Brennverfahren und Gemischbildung . . . . .	701
26.2.4	Mechatronische Systemkonzepte . . . . .	704
26.3	Wassereinspritzung . . . . .	706
26.3.1	Vorteile der Wassereinspritzung . . . . .	706
26.3.2	Aufbau eines Wassereinspritzsystems . . . . .	709
	Literatur . . . . .	710
<b>27</b>	<b>Dieseleinspritzsysteme . . . . .</b>	<b>711</b>
	Thomas Wintrich, Kai Sutter, Gerd Lösch, Andreas Rettich und Jürgen Hammer	
27.1	Grundfunktionen . . . . .	711
27.2	Bauarten . . . . .	712
27.2.1	Übersicht . . . . .	712
27.2.2	Hub-/Druck-Steuerung der Düsennadel . . . . .	714
27.3	Common-Rail-System . . . . .	715
27.3.1	Niederdrucksystem . . . . .	715
27.3.2	Hochdrucksystem . . . . .	717
27.4	Hochdruckpumpen . . . . .	720
27.4.1	Aufbau und Funktion . . . . .	720
27.4.2	Mengenregelung . . . . .	722
27.4.3	Hauptbauarten für Personenkraftwagen . . . . .	724
27.5	Rail und Anbaukomponenten . . . . .	725
27.6	Common-Rail-Injektoren . . . . .	729
27.6.1	Düsen für Common-Rail-Injektoren . . . . .	729
27.6.2	Magnetventilinjektor mit Kugelsitzventil . . . . .	732
27.6.3	Magnetventilinjektor mit Schieberventil . . . . .	735
27.6.4	Piezo-Inline-Injektoren . . . . .	738
27.7	Zumessfunktionen . . . . .	741
	Literatur . . . . .	742
<b>28</b>	<b>Einspritzung für Großdieselmotoren . . . . .</b>	<b>743</b>
	Hartmut Schneider, Clemens Senghaas und Ralph-Michael Schmidt	
28.1	Geschichtlicher Rückblick . . . . .	743
28.2	Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsysteme . . . . .	748
28.3	Pumpe-Düse-Einspritzsysteme . . . . .	751
28.4	Speichereinspritzsysteme . . . . .	753
28.4.1	Common-Rail-Systeme der ersten Generation . . . . .	753
28.4.2	Common-Rail-Systeme der zweiten Generation . . . . .	757
28.4.3	Common-Rail-Systeme der dritten Generation . . . . .	759
28.4.4	Schweröl-Common-Rail-Systeme . . . . .	760

28.5	Derivate . . . . .	762
28.5.1	Einspritzventile für Gasmotoren . . . . .	762
28.5.2	Wassereinspritzsystem . . . . .	764
28.5.3	Einspritzsysteme für Sonderkraftstoffe . . . . .	764
	Literatur . . . . .	765
<b>29</b>	<b>Aufladeverfahren . . . . .</b>	<b>767</b>
	Roland Baar	
29.1	Einführung . . . . .	767
29.1.1	Natürliche Aufladung . . . . .	769
29.1.2	Druckwellenaufladung . . . . .	770
29.1.3	Kompressoraufladung . . . . .	770
29.1.4	Abgasturboaufladung . . . . .	772
29.2	Aufbau und Funktion von Turboladern . . . . .	773
29.3	Regelung . . . . .	783
29.4	Anpassung von Turboladern an Verbrennungsmotoren . . . . .	786
29.5	Erweiterte Turboladermodellierung . . . . .	793
	Literatur . . . . .	797
<b>30</b>	<b>Aufladesysteme . . . . .</b>	<b>799</b>
	Roland Baar	
30.1	Laderkombinationen und Elektrifizierung . . . . .	799
30.1.1	Zweistufig geregelte Aufladung aus zwei Abgasturboladern . . . . .	799
30.1.2	Zweistufig geregelte Aufladung aus Abgasturbolader und Kompressor . . . . .	800
30.1.3	Registeraufladung . . . . .	801
30.1.4	Elektrisch unterstützte Aufladung . . . . .	803
30.2	Sonstiges . . . . .	804
30.2.1	Ladeluftkühlung . . . . .	804
30.2.2	Abgasrückführung . . . . .	804
30.2.3	Stau- und Stoßaufladung . . . . .	805
30.2.4	Kennfeldstabilisierende Maßnahmen am Verdichter . . . . .	806
30.2.5	Schubumluft . . . . .	806
	Literatur . . . . .	807
<b>31</b>	<b>Thermomanagement . . . . .</b>	<b>809</b>
	Raimund Almbauer, Andreas Ennemoser, Heinz Petutschnig und Armin Traußnig	
31.1	Einleitung . . . . .	809
31.1.1	Begriffliche Abgrenzung . . . . .	811
31.1.2	Thermomanagement Entwicklungsziele VKM . . . . .	812
31.2	Thermomanagementmaßnahmen VKM . . . . .	814

31.2.1	Überblick . . . . .	815
31.3	Modellbildung und Simulation . . . . .	816
31.3.1	Gesamtfahrzeugsimulation . . . . .	816
31.3.2	Grundgleichungen für Energieerhaltung und Wärmeübertragung für den Aufbau thermischer Modelle . . . . .	817
31.3.3	Grundgleichungen Fluidmechanik . . . . .	829
31.3.4	Modellierung ausgewählter Komponenten . . . . .	835
31.4	Betriebsstrategie und Regelung . . . . .	840
31.4.1	Temperaturregelung . . . . .	841
31.5	Ausgewählte Anwendungsfälle des Thermomanagements . . . . .	843
31.5.1	Jahresenergiebilanzanalyse für Hybrid- und Elektrofahrzeuge	843
31.5.2	Konzeptauswahl geregelte Ölpumpe und Kolbenringe . . . . .	844
31.5.3	„NO WASTE“ EU-Projekt, Restwärmenutzung im Nutzfahrzeug mit Rankine-Zyklus . . . . .	845
	Literatur . . . . .	847

## Teil V Verbrennungsdiagnostik

<b>32</b>	<b>Druckindizierung . . . . .</b>	<b>851</b>
	Rüdiger Teichmann und Andreas Wimmer	
32.1	Allgemeines . . . . .	852
32.2	Die Indiziermesskette . . . . .	855
32.2.1	Piezoelektrische Druckaufnehmer . . . . .	856
32.2.2	Piezomaterialien . . . . .	858
32.2.3	Aufbau von piezoelektrischen Druckaufnehmern . . . . .	862
32.2.4	Absolutdruckmessende Sensoren . . . . .	864
32.2.5	Ladungsverstärker . . . . .	866
32.2.6	Indiziergerät . . . . .	868
32.2.7	Messverkabelung . . . . .	871
32.2.8	Winkelaufnehmer . . . . .	871
32.3	Einflüsse auf die Messgenauigkeit . . . . .	875
32.3.1	Äußere Einflüsse auf den Sensor . . . . .	875
32.3.2	OT-Zuordnung . . . . .	877
32.3.3	Bestimmung des Druckniveaus . . . . .	880
32.4	Kennwerte infolge von äußeren Einflüssen auf den Sensor . . . . .	884
32.4.1	Temperaturbedingte Empfindlichkeitsänderung . . . . .	884
32.4.2	Lastwechseldrift . . . . .	888
32.5	Varianten für die Sensoradaptierung . . . . .	889
32.5.1	Zündkerzenadaptierung . . . . .	889
32.5.2	Druckindizierung mit Eingriff am Versuchsträger . . . . .	892

32.6	Elektrische Drift am Ladungsverstärker . . . . .	895
32.7	Druckindizierung im Ein- und Auslasssystem . . . . .	896
32.7.1	Piezoelektrische Druckaufnehmer . . . . .	897
32.7.2	Piezoresistive Druckaufnehmer . . . . .	898
	Literatur . . . . .	899
<b>33</b>	<b>Druckverlaufsanalyse . . . . .</b>	<b>901</b>
	Rüdiger Teichmann und Andreas Wimmer	
33.1	Bestimmung des Brennverlaufes . . . . .	901
33.1.1	Erfassung des Drucksignals . . . . .	901
33.1.2	Auswertung des Drucksignals . . . . .	902
33.2	Verlustteilung . . . . .	905
33.2.1	Verluste aus unvollständiger/unvollkommener Verbrennung . . . . .	907
33.2.2	Verbrennungsverluste . . . . .	907
33.2.3	Wandwärmeverluste . . . . .	908
33.2.4	Ladungswechselverluste . . . . .	908
33.3	Vergleich unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	908
33.3.1	Vergleich der Brennverläufe unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	909
33.3.2	Vergleich der Verlustteilung unterschiedlicher Brennverfahren . . . . .	909
	Literatur . . . . .	911
<b>34</b>	<b>Optische Messverfahren . . . . .</b>	<b>913</b>
	Ernst Winklhofer	
34.1	Einleitung . . . . .	913
34.2	Anwendungsgebiete optischer Methoden im tabellarischen Überblick . . . . .	914
34.3	Beispiele optischer Methoden . . . . .	915
34.4	Dieselmotoren . . . . .	916
34.4.1	Brennraumendoskopie . . . . .	917
34.4.2	Flammenbildauswertung . . . . .	918
34.4.3	Rußbildung – Rußabbrand Variantenanalyse . . . . .	919
34.4.4	Rußbewertung mit der Zweifarbenmethode . . . . .	920
34.5	Ottomotoren . . . . .	922
34.5.1	Emissionen: Bewerten der Gemischbildung aus einer Messung der Flammenstrahlung . . . . .	922
34.5.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	925
34.5.3	Verbrennungsstabilität: Strömung, EGR, Lambda . . . . .	928
34.5.4	Irreguläre Verbrennung . . . . .	932
34.5.5	Berührungslose Temperaturmessung . . . . .	934
34.6	Lasermesstechniken . . . . .	935
34.7	Ausblick Verbrennungsdiagnostik . . . . .	936
	Literatur . . . . .	937

**Teil VI Emissionen**

<b>35</b>	<b>Schadstoffbildung</b> . . . . .	941
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
35.1	Abgaszusammensetzung . . . . .	941
35.2	Innermotorische Schadstoffbildung und -reduktion . . . . .	943
35.2.1	Kohlenmonoxid (CO) . . . . .	948
35.2.2	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) . . . . .	949
35.2.3	Partikelemission beim Dieselmotor . . . . .	956
35.2.4	Stickoxide . . . . .	965
	Literatur . . . . .	972
<b>36</b>	<b>Nachmotorische Schadstoffreduktion</b> . . . . .	977
	Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
36.1	Heterogene Katalyse . . . . .	978
36.2	Deaktivierungsmechanismen . . . . .	980
36.3	Oxidationskatalysatoren . . . . .	982
36.4	Dreiwegekatalysatoren . . . . .	986
36.5	NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysatoren . . . . .	988
36.6	Selektive katalytische Reduktion (SCR) . . . . .	990
36.7	Partikelfilter . . . . .	997
	Literatur . . . . .	1002
<b>37</b>	<b>Emissionsmesstechnik</b> . . . . .	1007
	Alexander Bergmann, Kurt Engeljehringer und Rüdiger Teichmann	
37.1	Einführung . . . . .	1007
37.2	Messgasaufbereitung . . . . .	1008
37.2.1	Messgasaufbereitung Abgasmessanlage . . . . .	1008
37.2.2	Messgasaufbereitung durch Verdünnung . . . . .	1012
37.2.3	Unverdünnte versus verdünnte Abgasmessung . . . . .	1014
37.3	Messung gasförmiger Bestandteile . . . . .	1015
37.3.1	NDIR – nichtdispersiver Infrarotdetektor . . . . .	1016
37.3.2	FID – Flame Ionisation Detector . . . . .	1018
37.3.3	CLD – Chemolumineszenz Detektor . . . . .	1019
37.3.4	PMD – Paramagnetischer Detektor . . . . .	1020
37.3.5	FTIR – Fourier-Transform Infrarotspektroskopie . . . . .	1021
37.3.6	LDS – Laser-Dioden-Spektroskopie . . . . .	1022
37.4	Messung fester Bestandteile . . . . .	1022
37.4.1	Messung der Partikel entsprechend gesetzlicher Vorgaben . . . . .	1022
37.4.2	Bestimmung von Partikeleigenschaften im Abgas mit alternativen Verfahren . . . . .	1025
	Literatur . . . . .	1031

<b>38</b>	<b>RDE und neue Testzyklen</b> . . . . .	1033
	Kurt Engeljehringer	
38.1	Einführung . . . . .	1033
38.2	Gesetzgebung . . . . .	1034
38.3	RDE-Test und Randbedingungen . . . . .	1036
38.4	PEMS-Messtechnik . . . . .	1038
<b>Teil VII 0D- und 1D- Motorprozessrechnung</b>		
<b>39</b>	<b>Nulldimensionale Modellierung</b> . . . . .	1043
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
39.1	Grundgleichungen . . . . .	1045
39.2	Stoffwerte . . . . .	1048
39.3	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	1049
39.4	Ein- und Mehrzonenmodelle . . . . .	1053
	39.4.1 Einzonenmodell . . . . .	1053
	39.4.2 Zweizonenmodell . . . . .	1055
	39.4.3 Mehrzonenmodelle . . . . .	1059
39.5	Simulation . . . . .	1059
	39.5.1 Ersatzbrennverläufe . . . . .	1059
	39.5.2 Verbrennungsmodelle . . . . .	1061
	39.5.3 Grundsätzliche Ansätze zur Modellierung von Zündverzug und Brennrate . . . . .	1061
	Literatur . . . . .	1064
<b>40</b>	<b>Wärmeübergang</b> . . . . .	1067
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
40.1	Allgemeines . . . . .	1067
40.2	Modelle auf Basis des Newton'schen Ansatzes . . . . .	1069
	40.2.1 Wärmeübergangsbeziehung nach Woschni . . . . .	1070
	40.2.2 Wärmeübergangsbeziehung nach Hohenberg . . . . .	1071
40.3	Physikalische Modelle . . . . .	1072
40.4	Strömungsfeldorientierte Ansätze . . . . .	1074
	40.4.1 Wärmeübergang nach Bargende . . . . .	1074
	40.4.2 Wärmeübergang nach Wimmer (2000), Pivec (2001) und Schubert et al. (2005) . . . . .	1075
40.5	Strahlungswärmeübergang . . . . .	1077
	Literatur . . . . .	1080
<b>41</b>	<b>Modellierung des Ladungswechsels</b> . . . . .	1081
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
41.1	Grundlagen . . . . .	1081

41.1.1	Füll- und Entleermethode . . . . .	1082
41.1.2	Gasdynamische Betrachtung . . . . .	1083
41.2	Koppelungsansätze . . . . .	1089
41.2.1	Eindimensionale Ladungswechselrechnung und Motorprozessrechnung . . . . .	1090
41.2.2	Eindimensionale Ladungswechselrechnung und 3-D-CFD-Simulation . . . . .	1094
	Literatur . . . . .	1094
<b>42</b>	<b>Gesamtsimulation . . . . .</b>	<b>1097</b>
	Franz Chmela, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
42.1	Transiente Simulation . . . . .	1097
42.2	Hydrauliksimulation . . . . .	1098
42.2.1	Aufbau eines Simulationsprogramms für hydraulische Systeme . . . . .	1099
42.2.2	Kavitation . . . . .	1103
42.3	Gesamtfahrzeugsimulation . . . . .	1105
42.3.1	Thermisches Motormodell . . . . .	1107
42.3.2	Wärmeeintragsmodell . . . . .	1108
42.3.3	Reibungsmodell . . . . .	1109
42.3.4	Prognosegenauigkeit . . . . .	1111
42.4	Vereinfachte Modellierung auf Basis von Mittelwertmodellen . . . . .	1113
	Literatur . . . . .	1115
<b>Teil VIII Phänomenologische Verbrennungsmodelle</b>		
<b>43</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Ottomotoren . . . . .</b>	<b>1119</b>
	Gunnar Stiesch, Peter Eckert, Friedrich Dinkelacker und Sebastian Rakowski	
43.1	Laminare und turbulente Flammgeschwindigkeit . . . . .	1122
43.2	Wärmefreisetzung . . . . .	1124
43.3	Zündung . . . . .	1127
43.4	Klopfen . . . . .	1128
	Literatur . . . . .	1129
<b>44</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Dieselmotoren . . . . .</b>	<b>1131</b>
	Gunnar Stiesch, Peter Eckert und Sebastian Rakowski	
44.1	Nulldimensionale Brennverlauffunktion . . . . .	1131
44.2	Stationärer Gasstrahl . . . . .	1133
44.3	Paketmodelle . . . . .	1138
44.4	Zeitskalenmodelle . . . . .	1145
	Literatur . . . . .	1149

<b>45</b>	<b>Verbrennungsmodelle für Großgasmotoren</b> . . . . .	1151
	Franz Chmela, Gerhard Pirker, Andreas Wimmer und Friedrich Dinkelacker	
45.1	Zündverzug . . . . .	1152
45.2	Brennrate beim Ottogasmotor mit offenem Brennraum . . . . .	1153
45.3	Brennrate beim Ottogasmotor mit Vorkammer . . . . .	1154
45.4	Klopfen . . . . .	1157
45.5	NO <sub>x</sub> -Emissionen . . . . .	1159
45.6	Methanemissionen . . . . .	1160
	Literatur . . . . .	1160
<b>46</b>	<b>Abgasnachbehandlungssysteme</b> . . . . .	1163
	Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
46.1	Methoden der Abgasnachbehandlung . . . . .	1163
46.2	Modellbildung und Simulation . . . . .	1165
46.3	Abgaskatalysatoren . . . . .	1166
	46.3.1 Grundgleichungen . . . . .	1166
	46.3.2 Katalysatortypen . . . . .	1170
46.4	Dieselpartikelfilter . . . . .	1176
	46.4.1 Grundgleichungen . . . . .	1176
	46.4.2 Beladung und Druckverlust . . . . .	1180
	46.4.3 Regeneration und Temperaturverteilung . . . . .	1181
46.5	Dosiereinheiten . . . . .	1183
46.6	Gesamtsystem . . . . .	1184
46.7	Nomenklatur . . . . .	1185
	Literatur . . . . .	1187

## Teil IX 3D-Simulation des Arbeitsprozesses

<b>47</b>	<b>Strömungsmechanische Grundlagen</b> . . . . .	1191
	Christian Krüger und Frank Otto	
47.1	Massen- und Impulstransport . . . . .	1194
47.2	Transport von innerer Energie und Spezies . . . . .	1197
47.3	Passive Skalare und Mischungsbruch . . . . .	1198
47.4	Konservative Formulierung der Transportgleichungen . . . . .	1199
47.5	Turbulenz und Turbulenzmodelle . . . . .	1200
	47.5.1 Phänomenologie der Turbulenz . . . . .	1200
	47.5.2 Modellierung der Turbulenz . . . . .	1201
	47.5.3 Turbulentes Wandgesetz . . . . .	1204
	47.5.4 Modellierung des turbulenten Mischungszustandes . . . . .	1207
	47.5.5 Die Gültigkeit von Turbulenzmodellen; Alternativansätze . . . . .	1210
	Literatur . . . . .	1215

<b>48</b>	<b>Numerik und zukünftige Entwicklungen</b> . . . . .	1217
	Christian Krüger, Frank Otto, Martin Schmidt und Konstantinos Boulouchos	
48.1	Finites-Volumen-Verfahren . . . . .	1217
48.2	Diskretisierung des Diffusionsterms – Zentrale Differenzen . . . . .	1218
48.3	Diskretisierung des Konvektionsterms – Aufwindschema . . . . .	1220
48.4	Diskretisierung der Zeitableitung – Implizites Schema . . . . .	1221
48.5	Diskretisierung des Quellterms . . . . .	1223
48.6	Operator-Split-Verfahren . . . . .	1224
48.7	Diskretisierung und numerische Lösung der Impulsgleichung . . . . .	1224
48.8	Rechennetze . . . . .	1225
48.9	Beispiele . . . . .	1227
48.9.1	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Ottomotor	1227
48.9.2	Simulation von Strömungsstrukturen im Zylinder: Dieselmotor . . . . .	1229
48.9.3	Düseninnenströmung . . . . .	1231
48.10	Direkte Numerische Simulation der Strömung im Brennraum. Stand der Technik und Ausblick . . . . .	1234
48.10.1	Simulationsaufbau und Validierung . . . . .	1236
48.10.2	Ergebnisse: Strömungsfeld und Wandwärmeübergang im Verdichtungstakt . . . . .	1237
48.10.3	Fazit . . . . .	1239
48.10.4	Ausblick . . . . .	1240
	Literatur . . . . .	1240
<b>49</b>	<b>Simulation der Aufladung</b> . . . . .	1243
	Roland Baar	
49.1	Allgemeines . . . . .	1243
49.2	Interaktion von Laufrad und Gehäuse . . . . .	1246
49.3	Grundlagen der Gittergenerierung für Turbomaschinen . . . . .	1248
49.4	Netzaufbau, Netzqualität, Turbulenzmodelle und Randbedingungen .	1249
49.5	Auswertung . . . . .	1253
49.6	Beispiel . . . . .	1257
	Literatur . . . . .	1258
<b>50</b>	<b>Simulation von Einzeltropfenprozessen</b> . . . . .	1259
	Christian Krüger und Frank Otto	
50.1	Impulsaustausch . . . . .	1260
50.2	Massen- und Wärmeaustausch (Einkomponentenmodell) . . . . .	1261
50.3	Massen- und Wärmeaustausch (Mehrkomponentenmodellierung) . . .	1264
50.4	Flashboiling . . . . .	1268
	Literatur . . . . .	1269

<b>51</b>	<b>Simulation des Einspritzstrahls</b> . . . . .	1271
	Christian Krüger und Frank Otto	
51.1	Strahlstatistik . . . . .	1271
51.1.1	Boltzmann-Williams-Gleichung . . . . .	1272
51.1.2	Numerische Lösung der Boltzmann-Williams-Gleichung: Das Standardmodell (Lagrange-Formulierung) . . . . .	1274
51.1.3	Exkurs: Numerische Bestimmung von Zufallszahlen . . . . .	1276
51.1.4	Partikel-Startbedingungen am Düsenaustritt . . . . .	1278
51.1.5	Modellierung von Zerfallsprozessen . . . . .	1279
51.1.6	Modellierung von Stoßprozessen . . . . .	1284
51.1.7	Modellierung der turbulenten Dispersion im Standard-Modell . . . . .	1285
51.1.8	Beschreibung der turbulenten Dispersion mittels Fokker- Planck-Gleichung . . . . .	1287
51.1.9	Die Diffusionsdarstellung der Fokker-Planck-Gleichung . . . . .	1292
51.1.10	Probleme des Standardstrahlmodells . . . . .	1295
51.1.11	Benzindirekteinspritzung für Schichtladung mit nach außen öffnendem Piezo-Injektor . . . . .	1299
51.2	Euler-Strahlmodelle . . . . .	1303
51.2.1	Lokal homogene Strömung . . . . .	1304
51.2.2	Einbettungen von 1D-Euler-Verfahren und anderen Ansätzen	1307
51.2.3	3D-Euler-Verfahren . . . . .	1310
	Literatur . . . . .	1313
<b>52</b>	<b>Simulation der Dieselverbrennung</b> . . . . .	1315
	Christian Krüger und Frank Otto	
52.1	Verbrennungsregimes . . . . .	1315
52.2	Allgemeines Vorgehen . . . . .	1318
52.3	Diesel-Verbrennung . . . . .	1320
52.3.1	Simulation der Wärmefreisetzung . . . . .	1320
52.3.2	Zündung . . . . .	1327
52.3.3	NO <sub>x</sub> -Bildung . . . . .	1328
52.3.4	Rußbildung . . . . .	1330
52.3.5	HC- und CO-Emissionen . . . . .	1330
	Literatur . . . . .	1331
<b>53</b>	<b>Simulation der Benzinverbrennung</b> . . . . .	1333
	Christian Krüger und Frank Otto	
53.1	Homogener Benzinmotor (Vormischverbrennung) . . . . .	1333
53.1.1	Zweiphasenproblematik . . . . .	1334
53.1.2	Magnussen-Modell . . . . .	1337
53.1.3	Flammenflächenmodelle (auch Coherent Flame Models) . . . . .	1341

53.1.4	G-Gleichung	1345
53.1.5	Diffusive G-Gleichung	1348
53.1.6	Zündung	1349
53.1.7	Klopfen	1350
53.1.8	Schadstoffbildung	1350
53.2	Benzinmotor mit Ladungsschichtung (teilweise vorgemischte Flammen)	1351
	Literatur	1356
<b>54</b>	<b>Strömungsmechanische Simulation von Ladungswechsel, Gemischbildung und Verbrennung: Ausblick</b>	<b>1357</b>
	Christian Krüger und Frank Otto	
54.1	Netzbewegung	1358
54.2	Numerik	1359
54.3	Turbulenz	1359
54.4	Modellierung der Einspritzprozesse	1360
54.4.1	Näherung I: Berücksichtigung der Zerfälle nur als Mittelwertsprozess	1361
54.4.2	Näherung II: Vernachlässigung von Stoßprozessen	1363
54.5	Modellierung der Verbrennung	1364
	Literatur	1365
<b>A</b>	<b>3D-CFD Simulation mit dem kommerziellen Code AVL FIRE™</b>	<b>1367</b>
	Reinhard Tatschl	
<b>B</b>	<b>Antriebssystems simulation mit dem kommerziellen Code CRUISE™ M</b>	<b>1401</b>
	Reinhard Tatschl und Johann Wurzenberger	
<b>C</b>	<b>Prüfstandssoftware – Fehlerdiagnose an Motorprüfständen</b>	<b>1439</b>
	Michael Wohlthán, Gerhard Pirker und Andreas Wimmer	
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>1459</b>