

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen XIII

1	Allgemeine Grundlagen 1
1.1	Überblick 1
1.2	Grundlagen der Thermodynamik 2
1.2.1	Erster Hauptsatz der Thermodynamik 2
1.2.2	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 4
1.2.3	Kreisprozesse 5
1.2.4	Exergie und Anergie 6
1.3	Ideales Gas 7
1.3.1	Thermische Zustandsgleichung 7
1.3.2	Kalorische Zustandsgrößen 8
1.3.3	Gemische aus idealen Gasen 11
1.4	Reale Gase und Dämpfe 13
1.4.1	Reale Gase 13
1.4.2	Verdampfungsvorgang 14
1.4.3	Gas-Dampf-Gemische 14
1.5	Grundlagen der Strömung mit Wärmetransport 16
1.5.1	Beschreibung von Strömungsvorgängen 16
1.5.2	Ähnlichkeitstheorie und charakteristische Kennzahlen 17
1.5.3	Stationäre eindimensionale Strömung 23
1.5.4	Instationäre eindimensionale Strömung 27
1.5.5	Dreidimensionale Strömung 45
1.5.6	Turbulenzmodellierung 49
1.5.7	Grenzschichttheorie 54
2	Verbrennung 63
2.1	Brennstoffe 63
2.2	Luftbedarf und Luftverhältnis 67
2.3	Energiebilanz und Heizwert 69
2.4	Chemisches Gleichgewicht 74
2.5	Zusammensetzung und Stoffgrößen des Verbrennungsgases 79
2.5.1	Verbrennungsgas bei vollständiger Verbrennung 80
2.5.2	Verbrennungsgas bei chemischem Gleichgewicht 83
2.5.3	Luftverhältnis aus Abgasanalyse 87
2.6	Umsetzungsgrad 92
2.7	Reaktionskinetik 94

2.8	Zündprozesse 100
2.8.1	Thermische Explosion 100
2.8.2	Chemische Explosion und Zündverzug 101
2.8.3	Zündgrenzen und Zündbedingungen 103
2.9	Flammenausbreitung 105
2.9.1	Vorgemischte Verbrennung 105
2.9.2	Detonation 110
2.9.3	Nicht-vorgemischte Verbrennung 113
2.10	Brennstoffzelle 114
3	Idealisierte Motorprozesse 121
3.1	Kenngrößen 121
3.2	Vereinfachter Vergleichsprozess 125
3.3	Vollkommener Motor 132
3.4	Ergebnisse der genauen Berechnung 137
3.5	Einflüsse auf den Wirkungsgrad des vollkommenen Motors 140
3.6	Aufgeladener vollkommener Motor 144
3.7	Gleichraumgrad 150
3.8	Exergiebilanz des vollkommenen Motors 152
4	Analyse und Simulation des Systems Brennraum 157
4.1	Einleitung 157
4.2	Nulldimensionale Modellierung 159
4.2.1	Modellannahmen 159
4.2.2	Grundgleichungen des Einzonenmodells 160
4.2.3	Zustandsgrößen des Arbeitsgases 162
4.2.3.1	Gaszusammensetzung und Luftverhältnis 163
4.2.3.2	Gaskonstante 169
4.2.3.3	Innere Energie 170
4.2.3.4	Enthalpie 172
4.2.3.5	Realgasverhalten 172
4.2.4	Brennverlauf 173
4.2.4.1	Ideale Verbrennung 174
4.2.4.2	Ersatzbrennverläufe 175
4.2.4.3	Ersatzbrennverläufe bei geänderten Betriebsbedingungen 185
4.2.4.4	Nulldimensionale Verbrennungssimulation 189
4.2.5	Wandwärmevergang 194
4.2.5.1	Wärmedurchgang 195
4.2.5.2	Gasseitiger konvektiver Wärmeübergang 200
4.2.5.3	Gasseitiger Wärmeübergang durch Strahlung 209
4.2.5.4	Experimentelle Erfassung des gasseitigen Wandwärmevergangs 212
4.2.5.5	Vergleich verschiedener Ansätze für Wandwärmevergang 220
4.2.5.6	Wärmemanagement und thermisches Netzwerk 223
4.2.6	Ladungswechsel 224
4.2.6.1	Kenngrößen des Ladungswechsels 225
4.2.6.2	Massenverläufe aus Energiesatz 228

4.2.6.3	Massenverläufe mittels Durchflussgleichung	229
4.2.6.4	Berechnung der Spülung	234
4.2.6.5	Abgasrückführung	238
4.2.7	Zusammenstellung der Gleichungen des Einzonenmodells	242
4.2.8	Zwei- und Mehrzonenmodelle	246
4.2.8.1	Modellannahmen und Grundgleichungen	246
4.2.8.2	Zweizonenmodell mit unverbrannter und verbrannter Zone	248
4.2.8.3	Modell mit mehreren Verbrennungsgaszonen	257
4.2.8.4	Kamermotoren	258
4.3	Quasidimensionale Modellierung	263
4.3.1	Ladungsbewegung	264
4.3.2	Verbrennungssimulation	271
4.3.3	Wärmeübergang	277
4.4	Schadstoffbildung	279
4.4.1	Überblick	280
4.4.2	Stickoxide	283
4.4.3	Kohlenwasserstoffe und Ruß	286
4.5	Dreidimensionale Modellierung	287
4.5.1	Rechenprogramme	287
4.5.2	Beispiele zur CFD-Simulation	289
5	Ein- und Auslasssystem, Aufladung	303
5.1	Einlass- und Auslasssystem	303
5.1.1	Berechnungsverfahren	303
5.1.2	Berechnungsbeispiele	306
5.2	Aufladung	307
5.3	Zusammenwirken von Motor und Lader	308
5.3.1	Zweitaktmotor	309
5.3.2	Viertaktmotor	310
5.3.3	Ladeluftkühlung	311
5.4	Mechanische Aufladung	312
5.5	Abgasturboaufladung	314
5.5.1	Charakteristische Betriebslinien	314
5.5.2	Beaufschlagungsarten der Turbine	315
5.5.3	Abgasturboaufladung von Vieraktmotoren	318
5.5.4	Abgasturboaufladung von Zweitaktmotoren	318
5.5.5	Kennfelddarstellung	320
5.5.6	Berechnung der Aufladung bei stationären Betriebszuständen	326
5.5.7	Berechnung der Aufladung bei instationären Betriebszuständen	330
5.6	Wellendynamische Aufladeeffekte	333
5.6.1	Schwingrohraufladung	333
5.6.2	Resonanzaufladung	333
5.6.3	Auslegungsbeispiele	334
5.6.4	Druckwellenlader	336
5.7	Sonderformen der Aufladung	337
5.7.1	Zweistufige Aufladung	337

5.7.2	Miller-Verfahren 338
5.7.3	Hyperbaraufladung 339
5.7.4	Registeraufladung 340
5.7.5	Turbocompound 341
6	Analyse des Arbeitsprozesses ausgeführter Motoren 343
6.1	Methodik 343
6.1.1	Energiebilanz des gesamten Motors 343
6.1.2	Energiebilanz des Brennraums 345
6.1.3	Wirkungsgrade und Verlustanalyse 349
6.2	Ergebnisse 361
6.2.1	Zweitakt-Ottomotor 362
6.2.2	Viertakt-Ottomotor 364
6.2.3	Ottomotor mit direkter Benzineinspritzung 366
6.2.4	PKW-Dieselmotor mit direkter Einspritzung und Turboaufladung 368
6.2.5	LKW-Dieselmotor mit direkter Einspritzung und Turboaufladung 370
6.2.6	Großmotoren 371
6.2.7	Ältere analysierte Motoren 375
6.2.8	Vergleichende Brennverlaufsanalyse 377
6.2.9	Vergleich von Wirkungsgraden und Mitteldrücken 379
6.2.10	Vergleichende Verlustanalyse 382
7	Anwendung der thermodynamischen Simulation 387
7.1	Simulation in der Motorenentwicklung 387
7.2	Simulation des gesamten Fahrzeugs 391
	Anhänge 395
	A Stoffgrößen 397
	B Zylindervolumen und Volumenänderung 460
	Literatur 462
	Namen- und Sachverzeichnis 471