

# 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	Kenngößen	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	Wandwärmeübergang	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 Wandwärmeübergangs	212
4.2.5.5	Vergleich verschiedener Ansätze für Wandwärmeübergang	220
4.2.5.6	Wärmemanagement und thermisches Netzwerk	223
4.2.6	Ladungswechsel	224
4.2.6.1	Kenngößen 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	Kammermotoren	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 Viertaktmotoren	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	Registerraufladung	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