

Die\ferbrennungs- kraftmaschine

Herausgegeben von

Hans List und Anton Pischinger

Neue Folge

Band 5

Thermodynamik der Verbrennungs- kraftmaschine

**R. Pischinger
G. Kraßnig
G. Taucar
Th. Sams**

Springer-Verlag
Wien New York



Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

XIV

1	Thermodynamische Grundlagen	1
1.1	Überblick	1
1.2	Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	2
1.3	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	4
1.3.1	Allgemeine Formulierung und die Entropie	4
1.3.2	Kreisprozesse	6
1.3.3	Exergie und Anergie	7
1.4	Das ideale Gas	9
1.4.1	Die thermische Zustandsgleichung	9
1.4.2	Die kalorischen Zustandsgrößen	10
1.4.3	Gemische aus idealen Gasen	14
1.5	Reale Gase und Dämpfe	16
1.5.1	Reale Gase	16
1.5.2	Der Verdampfungsvorgang	17
1.5.3	Gas-Dampf-Gemische	17
1.6	Strömung	20
1.6.1	Stationäre Strömung	20
1.6.2	Grundgleichungen der instationären Strömung	25
1.6.3	Die Schalltheorie	29
1.6.4	Lösung der instationären Strömungsgleichungen mit Hilfe des Charakteristiken-Verfahrens	32
1.7	Verbrennung	41
1.7.1	Brennstoffe	41
1.7.2	Luftbedarf und Luftverhältnis	45
1.7.3	Energiebilanz und Heizwert	46
1.7.4	Zusammensetzung und Stoffwerte des Verbrennungsgases bei vollständiger Verbrennung	54

1.7.5	Chemisches Gleichgewicht und genaue Stoffwerte des Verbrennungsgases.	57
1.7.6	Ermittlung des Luftverhältnisses.	63
1.7.7	Umsetzungsgrad.	70
1.7.8	Reaktionskinetik.	73

Allgemeine Zusammenhänge und idealisierte Prozesse 81

2.1	Kenngrößen.	81
2.2	Vereinfachter Vergleichsprozeß.	86
2.3	Genaue Berechnung des vollkommenen Motors.	94
2.4	Ergebnisse der genauen Berechnung.	98
2.5	Der aufgeladene vollkommene Motor.	108
2.6	Gleichraumgrad.	117
2.7	Exergiebilanz des vollkommenen Motors.	119

3 Prozeßrechnung am realen Motor 123

3.1	Allgemeines und Zweck der Prozeßrechnung.	123
3.2	Das Einzonenmodell.	126
3.2.1	Modellannahmen.	126
3.2.2	Anwendung des Einzonenmodells.	128
3.2.3	Ermittlung der Grundgleichungen des Einzonenmodells.	129
3.2.3.1	Zeitliche Änderung des momentanen Verbrennungsluftverhältnisses.	132
3.2.3.2	Innere Energie des Arbeitsgases und ihre Ableitung.	133
3.2.3.3	Enthalpie der zu- und abfließenden Massenströme.	135
3.2.3.4	Gaskonstante des Arbeitsgases und ihre Ablesung.	136
3.2.4	Ermittlung der Endgleichungen des Einzonenmodells.	137
3.2.5	Lösung der Endgleichungen des Einzonenmodells.	139
3.2.6	Volumänderungsarbeit des Kolbens.	139
3.2.7	Bestimmung des Zylinderdruckes und der Druckänderung.	142
3.2.8	Bestimmung des Brennverlaufes.	149
3.2.8.1	Berechnung des Brennverlaufes am Einkammermotor.	149
3.2.8.2	Vorgabe des Brennverlaufes für Parameterstudien.	153
3.2.8.3	Vorgabe des Brennverlaufes zur Vorausberechnung des realen Motorprozesses.	167
3.2.8.4	Berechnung des Brennverlaufes am Zweikammermotor.	176

3.2.9	Wärmeübergang	183
3.2.9.1	Arten der Wärmeübertragung	184
3.2.9.2	Brennraumseitiger Wärmeübergang durch Konvektion	185
3.2.9.3	Brennraumseitiger Wärmeübergang durch Strahlung	193
3.2.9.4	Brennraumseitiger Gesamt Wärmeübergang	195
3.2.9.5	Berechnung der Brennraumwandtemperaturen	196
3.2.10	Ladungswechsel	199
3.2.10.1	Wichtige Kenngrößen des Ladungswechsels	199
3.2.10.2	Bestimmung der Ladungswechselgrößen bei vorgegebenen Gegendrücken	201
3.2.10.3	Bestimmung der Ladungswechselgrößen mit Berechnung der Gegendrücke	210
3.2.10.4	Berechnung der Spülung	217
3.2.11	Numerisches Lösungsverfahren zur Berechnung des Einzonenmodells	222
3.2.12	Verlustteilung	223
3.2.12.1	Verlust durch unvollkommene Kraftstoffumsetzung	226
3.2.12.2	Verlust durch nicht-idealen Brennverlauf	226
3.2.12.3	Verlust durch Wärmeübergang	227
3.2.12.4	Verlust durch Leckage	228
3.2.12.5	Verlust durch Überströmen	229
3.2.12.6	Verlust durch Ladungswechsel	229
3.2.12.7	Verlust durch mechanische Reibung	231
3.2.12.8	Gütegrad (innerer Gesamt Verlust)	233
3.3	Das Zweizonenmodell	234
3.3.1	Anwendung und Annahmen des Modells	234
3.3.2	Aufstellung der Grundgleichungen für das Zweizonenmodell	235
3.3.2.1	Momentanes Verbrennungsluft Verhältnis in der verbrannten Zone und örtliches Verbrennungsluftverhältnis	235
3.3.2.2	Massenbilanz	239
3.3.2.3	Thermische Zustandsgleichung und Energiegleichung in der unverbrannten Zone	240
3.3.2.4	Thermische Zustandsgleichung und Energiegleichung in der verbrannten Zone	240
3.3.2.5	Innere Energie der unverbrannten Zone	241
3.3.2.6	Innere Energie der verbrannten Zone	243
3.3.2.7	Gaskonstante der unverbrannten Zone	244
3.3.2.8	Gaskonstante der verbrannten Zone	245
3.3.2.9	Wärmeübergang	245
3.3.2.10	Ermittlung der Endgleichungen für die Berechnung des Brennverlaufes	247
3.3.2.11	Ermittlung des Druckverlaufes	250
3.4	Vergleich Einzonenmodell - Zweizonenmodell	250
3.4.1	Ottomotor	250
3.4.2	Dieselmotor	253

4	Aufladung	257
4.1	Einleitung	257
4.2	Zusammenwirken Motor-Lader	258
4.2.1	Zweitaktmotor	259
4.2.2	Viertaktmotor	261
4.2.3	Ladeluftkühlung	262
4.3	Mechanische Aufladung	263
4.4	Abgasturboaufladung (ATL)	265
4.4.1	Charakteristische Betriebslinien	265
4.4.2	Beaufschlagungsarten der Turbine	266
4.4.3	Abgasturboaufladung von Viertaktmotoren	268
4.4.4	Abgasturboaufladung von Zweitaktmotoren	269
4.4.5	Geschlossene Berechnung des Motorprozesses mit ATL	271
4.4.5.1	Berechnung der Aufladung bei stationären Betriebszuständen	272
4.4.5.2	Kennfelddarstellung	277
4.4.5.3	Berechnung der Aufladung bei instationären Betriebszuständen	284
4.4.5.4	Anwendungsmöglichkeiten der Prozeßrechnung bei Aufladung	288
4.4.5.5	Vergleich Rechnung-Messung bei Stationärbetrieb	289
4.4.5.6	Vergleich von Rechnung und Messung bei Beschleunigung des Motors entlang einer Propellerkennlinie	290
4.5	Sonderformen der Aufladung	292
4.5.1	Schwingrohr- und Resonanzaufladung	292
4.5.2	Druckwellenlader - COMPREX	293
4.5.3	Hochaufladeverfahren	295
4.5.3.1	Zweistufige Aufladung	295
4.5.3.2	Miller-Verfahren	296
4.5.3.3	Hyperbaraufladung	297
4.5.3.4	Registeraufladung	298
5	Der Motorprozeß ausgeführter Motoren	301
5.1	Allgemeines	301
5.2	Grundlagen für die Durchführung der Analyse	301
5.3	Untersuchte Motoren	302

Inhalt	s	Verzeichnis	XI
5.4	Brenn verlaufe der untersuchten Motoren.....y.		303
5.4.1	Dieselmotoren mit direkter Einspritzung		303
5.4.1.1	Mittelschnellaufender Großmotor.		303
5.4.1.2	Schnellaufender, selbstsaugender LKW-Motor.		305
5.4.1.3	Schnellaufender LKW-Ladermotor mit direkter Einspritzung		307
5.4.1.4	Unaufgeladener, direkteinspritzender PKW-Dieselmotor.		309
5.4.1.5	Aufgeladener PKW-Dieselmotor mit direkter Einspritzung.		310
5.4.2	Dieselmotoren mit indirekter Einspritzung		310
5.4.2.1	PKW-Wirbelkammermotor.		310
5.4.2.2	PKW-Vorkammermotor.		314
5.4.3	Ottomotor.		314
5.5	Vergleich der untersuchten Motoren.		316
5.5.1	Wirkungsgrad des vollkommenen Vergleichsprozesses.		316
5.5.2	Vergleich der realen Prozesse.		319
5.5.3	Bestimmung der einzelnen Verluste.		323
5.5.3.1	Verlust durch unvollkommene Kraftstoffumsetzung		323
5.5.3.2	Verlust durch nicht-idealen Brennverlauf.		323
5.5.3.3	Verlust durch Wärmeübergang.		325
5.5.3.4	Verlust durch Leckage.		326
5.5.3.5	Verlust durch Überströmen.		326
5.5.3.6	Verlust durch Ladungswechsel.		327
5.5.3.7	Gütegrad (innerer Gesamt Verlust).....		328
5.5.3.8	Verlust durch mechanische Reibung.		329
5.5.3.9	Gesamtverlust und effektiver Wirkungsgrad.		330
6	Meßtechnik		333
6.1	Einleitung und prinzipieller Aufbau von Motorprüfeinrichtungen		333
6.2	Druckmessung.		341
6.2.1	Drückdarstellungen.		341
6.2.2	Anforderungen an die Aufnehmer zur Druckmessung.		342
6.2.3	Die piezoelektrische Meßeinrichtung.		343
6.2.3.1	Meßprinzip.		343
6.2.3.2	Kennlinie.		344
6.2.3.3	Nullpunkt.		345
6.2.3.4	Besonderheiten der piezoelektrischen Meßeinrichtung		347
6.2.3.5	Dynamische Kenngrößen.		349
6.2.3.6	Beurteilung von Meßaufnehmern.		351
6.2.3.7	MeßVerkabelung und LadungsVerstärker.		356
6.2.4	DMS-Druckaufnehmer, Aufnehmer mit druckabhängigen Widerständen.		358

6.3	Temperaturmessung	359
6.3.1	Anforderungen an die Aufnehmer zur Temperaturmessung	359
6.3.2	Thermoelement	361
6.3.2.1	Meßprinzip	361
6.3.2.2	Kennlinie, Linearität und Nullpunkt	361
6.3.2.3	Dynamische Eigenschaften	362
6.3.2.4	Ausgleichsleitung, Vergleichskontakt und Meßverstärker	363
6.3.3	Widerstandsfühler	364
6.3.3.1	Meßprinzip, Kennlinie und Nullpunkt	364
6.3.3.2	Dynamische Eigenschaften	365
6.3.3.3	Meßleitung und Meßverstärker	366
6.3.4	Templug und Schmelzstift	367
6.3.5	Optische Temperaturmeßverfahren	368
6.3.5.1	Allgemeines	368
6.3.5.2	Zweifarbennethoden	369
6.3.5.3	Emissions-Absorptions-Methode, Linienumkehr-Methode und pyrometrische Meßverfahren	373
6.3.5.4	Spektroskopische Techniken unter Verwendung von Laser	375
6.3.6	Akustische Temperaturmessung	376
6.4	Bestimmung des Wärmeüberganges	377
6.4.1	Wärmebilanzmethode	378
6.4.2	Wärmeübergangssonden (Wärmestromsonden)	378
6.4.3	Oberflächentemperatur-Meßmethode	380
6.5	Wegmessungen	384
6.5.1	Allgemeines	384
6.5.2	Induktive Meßwertaufnehmer	384
6.5.3	Kapazitive Meßwertaufnehmer	386
6.5.4	Hall-Effekt-Meßwertaufnehmer	387
6.6	Messung der Strömung im Zylinder und der Flammenausbreitung	387
6.6.1	Allgemeines	387
6.6.2	Hitzdraht-Anemometrie	388
6.6.3	Laser-Doppler- und Laser-Zweifokus-Anemometrie	389
6.6.4	Funkenspur-Anemometrie	391
6.6.5	Schlieren- und Schattenmethoden	391
6.6.6	Ionisations-Sonden	392
6.6.7	Flammenfenster	392
6.7	Winkel- und Triggermarkierung	393
6.7.1	Anforderungen	393
6.7.2	Markierungssysteme mit aktiven induktiven Aufnehmern	397
6.7.3	Markierungssysteme mit fotoelektrischen Aufnehmern	398

6.8	Registriergeräte	399
6.8.1	Allgemeines	399
6.8.2	Kathodenstrahl-Oszilloskop	399
6.8.3	Magnetbandspeichern^ mittels Trägerfrequenz	399
6.8.4	Puls-Code-Modulations- (PCM) Verfahren	399
6.8.5	Meßdatenerfassungs- und Analyseeinrichtungen	401
6.9	Abgasanalyse	404
6.9.1	Allgemeines	404
6.9.2	Stoffe und deren Analysemeßgeräte sowie Probenkonditionierung	405
6.9.2.1	Kohlendioxid- und Kohlenmonoxidmessung, Infrarot-Analysator	409
6.9.2.2	Sauerstoffmessung und A-Messung	410
6.9.2.3	Stickoxidmessung, Chemolumineszenz-Methode	413
6.9.2.4	Kohlenwasserstoffmessung, Flammen-Ionisations-Detektor	414
6.9.2.5	Analyseverfahren mit hoher zeitlicher Auflösung	415
6.9.2.6	Stickstoff- und Argonmessung, Gas-Chromatographie	417
6.9.2.7	Ruß-, Rauch- bzw. Partikelmessung	420
6.9.2.8	Messung des Wassergehaltes von Gasen (Feuchtigkeitsmeßmethoden)	423
6.10	Versuchsapparaturen für die Untersuchung von Vorgängen im Zusammenhang mit der Gemischbildung und der Verbrennung	425
6.11	Optische Abbildungen	429
6.11.1	Allgemeines	429
6.11.2	Kameras	430
6.11.3	Anschlußoptiken und Hilfseinrichtungen	432
6.11.4	Ergebnisse	434
	Anhang (Tabellen und Diagramme)	439
	Literaturverzeichnis	503
	Sachverzeichnis	519

j