

Franz Joos

Technische Verbrennung

Franz Joos

Technische Verbrennung

Verbrennungstechnik,
Verbrennungsmodellierung, Emissionen

Mit 449 Abbildungen und 65 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Franz Joos
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg
FB Maschinenbau, Energietechnik
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg, Germany
joos@hsu-hh.de

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN-10 3-540-34333-4 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-34333-2 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Text und Abbildungen wurden mit größter Sorgfalt erarbeitet. Verlag und Autor können jedoch für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Satz: druckfertige Daten des Autors
Herstellung: LE-TEX, Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Umschlaggestaltung: medionet AG, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3100 YL - 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Räume müssen klimatisiert, Fahrzeuge und Maschinen angetrieben werden. Um unsere Bedürfnisse nach Wärme und Antrieb zu erfüllen, muss die Energie, wie sie sich in der Umwelt vorfindet in eine nutzbare Form umgewandelt werden. Die Verbrennung zur Bereitstellung von jederzeit verfügbarer Wärme gehört zu den ältesten Technologien der Menschheit. Standen ursprünglich die Nutzung des Feuers zur Jagd, zur Herstellung von Gerät, zur Wärmeerzeugung und Bekömmlichmachung der Nahrung im Vordergrund, so erfolgte im Laufe der industriellen Revolution die Ermöglichung von Antriebsmaschinen und die Wärmeabgewinnung in großindustriellem Maßstab. Erst nach der Mitte des 20. Jahrhundert erweiterte sich die Aufgabenstellung der Verbrennungs- und Feuerungstechniker dahingehend, dass die Verbrennungsführung emissionsarm umgestaltet werden musste. Heute wird neben der Minimierung der Luftschadstoffe zusätzlich die Reduktion der Treibhausgase angestrebt. Dies soll nicht nur durch die effizientere Nutzung der Energie erfolgen, sondern über Prozesse realisiert werden, die es einfach erlauben, das unvermeidlich entstehende Kohlendioxid abzutrennen und aufzufangen. Vision ist die Bereitstellung elektrischen Stroms in einem CO₂-freien Kohlekraftwerk, ein Anachronismus per se.

Zielsetzung des vorliegenden Buches ist die Darstellung der Verbrennung unter dem Aspekt der technischen Realisierung. Basierend auf den Grundlagen der chemischen Thermodynamik und der Reaktionstechnik wird neben der Berechnung der Wärmefreisetzung und der Verbrennungstemperatur die Entstehungsmechanismen der Luftschadstoffe bei der Verbrennung aufgezeigt. Primär- sowie Sekundärmaßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemission in vielen Bereichen der Verbrennungstechnik, wie beispielsweise in Gasturbinen, werden dargestellt. In der technischen Anwendung spielen die Geometrie des Verbrennungsraumes und die Mischprozesse eine grundlegende Rolle. Deshalb wird detailliert auf die Möglichkeiten der numerischen Berechnung von Flammen und die Ermittlung von Emissionen in technischen Brennräumen eingegangen. Ein Überblick über die Gesetze und Verordnungen der Luftreinhaltung und über Standardmessverfahren der Luftschadstoffe runden die Darstellung ab.

Das Buch entstand im Rahmen meiner zwei-trimestrigen Vorlesung zur Technischen Verbrennung an der Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg für Studenten des Maschinenbaus vorwiegend der Vertiefungsrichtung Energie- und Umwelttechnik sowie Fahrzeugtechnik. Meinen Mitarbeitern Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Harder schulde ich Dank für die Bearbeitung der Kap. 11, 12 und 13 sowie für die kritische Durchsicht des Manuskriptes, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Matysiak für die Bearbeitung des Kapitels 14. Ohne die unermüdliche Bearbeitung des Skriptums und der Abbildungen sowie die Überarbeitung zum druckfertigen Manuskript durch Frau Gerds wäre die vorliegende Darstellung nicht möglich gewesen. Auch ihr sei hiermit gedankt. Nicht zuletzt möchte ich mich beim Springer Verlag für sein Verständnis bedanken, dass das Buch in diesem Umfang erscheinen konnte, so dass die meisten Themen mit denen sich ein Ingenieur beschäftigen muss, wenn er eine Brennkammer verstehen bzw. auslegen will, zumindest soweit geboten werden können, dass ein Überblick für weitere Vertiefungen zur Verfügung gestellt wird.

Hamburg, Sommer 2006

Franz Joos

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1	Energiewirtschaft.....	1
1.2	Primärenergie	5
1.3	Wandlung von Primärenergie in Nutzenergie	7
1.4	Verbrennung	9
1.5	Flammen	11
	Literatur	14
2.	Brennstoffe	15
2.1	Einfache Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe	16
2.2	Feste fossile Brennstoffe	24
2.3	Flüssige fossile Brennstoffe	27
2.4	Gasförmige fossile Brennstoffe	29
2.5	Regenerative Brennstoffe	31
2.6	Brennstoffe für Gasturbinen	33
2.7	Kraftstoffe der Verbrennungsmotoren.....	41
2.8	Brennstoffe mit zugesetztem Oxidator	44
2.8.1	Treibstoffe	45
2.8.2	Sprengstoffe.....	46
	Literatur	49
3.	Grundlagen	51
3.1	Grundlagen der Thermodynamik	51
3.2	Die Hauptsätze der Thermodynamik	59
3.3	Die Standard-Bildungsenthalpien.....	64
3.4	Thermodynamische Funktionen, Gleichgewichtskriterien, Chemisches Potential	71
3.5	Die Bestimmung der adiabaten Flammentemperatur, der Heizwert	78
	Literatur	84

4.	Verbrennungsrechnung	85
4.1	Die Verbrennungsrechnung für feste und flüssige Brennstoffe ...	85
4.1.1	Erforderlicher Sauerstoff- und Luftbedarf.....	86
4.1.2	Abgasmenge und -zusammensetzung.....	90
4.2	Die Verbrennungsrechnung für gasförmige Brennstoffe	100
	Literatur	107
5.	Chemische Reaktionskinetik	109
5.1	Die Beschreibung homogener chemischer Reaktionen	110
5.1.1	Die Reaktionsgeschwindigkeit	110
5.1.2	Gleichgewichtsreaktionen	114
5.1.3	Elementarreaktionen.....	115
5.1.4	Radikalkettenreaktionen	119
5.1.5	Temperaturabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten....	124
5.1.6	Druckabhängigkeit des Geschwindigkeitskoeffizienten	126
5.2	Die Beschreibung heterogener Reaktionssysteme.....	129
5.2.1	Heterogen katalysierte Reaktionen.....	129
5.2.2	Adsorption	134
5.2.3	Umsatzgeschwindigkeit katalysierter Reaktionen.....	136
5.2.4	Filmdiffusion und Reaktion.....	139
5.2.5	Porendiffusion und Reaktion	143
	Literatur	148
6.	Reaktionsmechanismen.....	151
6.1	Detaillierte Chemie.....	152
6.2	Methoden der Vereinfachung von Reaktionsmechanismen	156
6.2.1	Einfache Reaktionsfolge mit analytischer Lösung	156
6.2.2	Quasistationarität.....	158
6.2.3	Empfindlichkeitsanalyse (Sensitivitätsanalyse)	160
6.2.4	Eigenwertanalyse von chemischen Reaktionsmechanismen	165
6.2.5	Partielle Gleichgewichte.....	170
6.2.6	Reaktionsflussanalyse	174
6.3	Numerische Verfahren zur Reduktion der Rechenzeit von Reaktionsmechanismen	176
6.3.1	Das Reduktionsverfahren der intrinsischen niedrigdimensionalen Mannigfaltigkeit (ILDm).....	177
6.3.2	Flamelet Generated Manifolds (FGM).....	185
6.3.3	Automatisierte Reduktionsmethoden (CARM)	186
6.3.4	Adaptive Tabellenerstellung (ISAT)	187
6.3.5	Reduktion von Reaktionsmechanismen mittels genetischer Algorithmen.....	188

6.3.6	Reduktion des Rechenaufwandes mittels neuronaler Netze	192
	Literatur	194
7.	Flammenstabilisierung.....	199
7.1	Physik der Flammenstabilisierung	199
7.2	Stabilisierung selbstzündender Flammen	210
7.3	Flammeninstabilität in der Nähe der Zünd- und Löschgrenzen.....	212
7.4	Löschabstand	213
	Literatur	215
8.	Zündprozesse	217
8.1	Physikalische Grundphänomene der Zündung	218
8.1.1	Zündgrenzen, Zündtemperatur	218
8.1.2	Mindestzündenergie	225
8.2	Modellvorstellungen von Zündprozessen.....	226
8.2.1	Vereinfachte thermische Theorie der Zündung von Semenov ...	227
8.2.2	Thermische Theorie der Zündung von Frank-Kamenetskii.....	229
8.2.3	Zündverhalten des H_2/O_2 -Systems	231
8.3	Selbstzündvorgänge von Kohlenwasserstoff-Luftgemischen....	235
8.3.1	Messmethode der Selbstzündung	236
8.3.2	Methan/Luftgemische.....	238
8.3.3	Gemische gasförmiger höherer Kohlenwasserstoffe	240
8.3.4	Gemische flüssiger höherer Kohlenwasserstoffe	248
8.4	Zündung von festen Brennstoffen	253
8.4.1	Phänomenologische Betrachtung der Feststoffzündung.....	254
8.4.2	Experimentelle Untersuchungen	257
8.4.3	Modellierung des Zündprozesses von Kohlepartikel	259
8.4.4	Selbstzündeffekte bei festen Brennstoffen	262
8.5	Detonationen	266
	Literatur	268
9.	Laminare Vormischflammen.....	277
9.1	Flammgeschwindigkeit.....	278
9.2	Messverfahren der Flammgeschwindigkeit	280
9.2.1	Rohrreaktor.....	282
9.2.2	Rührkessel	285
9.3	Messwerte der Flammgeschwindigkeit	286
9.4	Theoretische Beschreibung der laminaren Flammgeschwindigkeit.....	293
9.4.1	Vereinfachte thermische Theorie der Flammenausbreitung.....	294

9.4.2	Numerische Modellierung der Flammengeschwindigkeit.....	303
9.5	Laminare Flammenstrukturen	307
	Literatur	310

10. Laminare nicht-vorgemischte Flammen ..313

10.1	Erscheinungsformen nicht-vorgemischter Flammen.....	313
10.2	Abschätzung der Flammenlänge	315
10.3	Modellierung nicht-vorgemischter Gegenstromflammen	317
10.4	Mischungsbruchbeschreibung nicht-vorgemischter Flammen mit schneller Chemie.....	321
	Literatur	328

11. Turbulente reaktive Strömungen.....329

11.1	Grunderscheinungen turbulenter nichtreaktiver und reaktiver Strömungen	329
11.2	Turbulente Skalen.....	332
11.3	Erscheinungsformen turbulenter Flammen	335
11.3.1	Die turbulente Flammengeschwindigkeit.....	335
11.3.2	Experimentelle Bestimmung turbulenter Flammengeschwindigkeiten	339
11.4	Mathematische Beschreibung turbulenter reaktiver Strömungen	343
11.4.1	Die Erhaltungsgleichungen, die Navier-Stokes'schen- Gleichungen.....	343
11.4.2	Direkte Numerische Simulation (DNS).....	346
11.4.3	„Large-Eddy“-Simulation (LES).....	349
11.4.4	Zeitliche- bzw. Favre-Mittelungsverfahren.....	351
11.4.5	Gemittelte Erhaltungsgleichungen (RANS, TRANS, URANS)	354
11.4.6	Turbulenzmodelle.....	356
11.4.7	Problematik der Mittelung von Reaktionsgeschwindigkeiten in turbulenten Strömungen	361
11.4.8	(U)RANS mit statistischer Beschreibung (PDF) der Turbulenz-Chemie-Interaktion zur Schließung des Quellterms	364
	Literatur	370

**12. Schließungsmodelle turbulenter
nicht-vorgemischter Flammen.....373**

12.1	Das Eddy-Dissipations-Modell (EDM).....	376
12.2	Das linearisierte Finite-Rate-Chemistry-Modell (FRCM)	377

12.3	Angenommene Wahrscheinlichkeitsdichtemodelle (Presumed-PDF)	379
12.3.1	Das Mischungsbruchmodell mit Presumed-PDF	380
12.3.2	Das Flamelet-Modell	385
12.3.3	Das Flamelet-Modell mit Presumed-PDF	388
12.4	Das PDF-Transportgleichungsmodell	390
12.4.1	Einleitung	390
12.4.2	Statistische Beschreibung des thermochemischen Zustandes	392
12.4.3	Herleitung der PDF-Transportgleichung	394
12.4.4	Mischungsmodellierung	396
12.4.5	Monte-Carlo-Lösungsverfahren	399
12.4.6	Kopplung mit CFD-Programmen	401
12.5	Das Conditional Moment Closure Modell.....	403
12.6	Das Flame Surface Density Modell.....	404
12.7	Modellvergleich mit experimentellen Daten	405
12.7.1	Beschreibung der Sandia-Flamme.....	405
12.7.2	Ergebnisse	407
12.8	Überblick über die vorgestellten Modelle	409
	Literatur	411

13. Schließungsmodelle turbulenter Vormischflammen 415

13.1	Charakterisierung turbulenter vorgemischter Flammen	416
13.2	Modelle turbulenter Vormischflammen	420
13.2.1	Definition der Reaktionsfortschrittsvariablen	421
13.2.2	Auf der skalaren Dissipationsrate basierende Modelle	422
13.2.3	Auf der Flammentopologie basierende Modelle	423
13.2.4	Statistische Modelle mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen.	427
	Literatur	429

14. Modellierung der Verbrennung flüssiger Brennstoffe..... 433

14.1	Phänomenologie der Verbrennung flüssiger Brennstoffe.....	434
14.2	Zerstäubung	435
14.2.1	Zerstäuber	436
14.2.2	Primärzerfall.....	438
14.2.3	Sekundärzerfall.....	444
14.2.4	Einflüsse auf die Zerstäubung	448
14.2.5	Beschreibung eines Sprays	453
14.3	Modellierung des Tropfenzerfalls	455

14.3.1	Empirische Modellierung	456
14.3.2	Mechanische Modellierung	460
14.4	Verdampfung	463
14.4.1	Quasi-eindimensionale Abschätzung der Tropfenverdampfung ..	464
14.4.2	Detailliertere Berechnung des abdampfenden Massenstroms	468
14.4.3	Berechnung der Tropfentemperatur	473
14.5	Modelle zur numerischen Beschreibung von Mehrphasenströmungen	481
14.5.1	Lokal homogene Modelle (LHF-Modelle, locally homogeneous flow)	481
14.5.2	Modelle unter Beachtung der Dispersion (SF-Modelle, separated flow)	484
14.6	Turbulente Dispersion	496
14.6.1	Deterministische Verfahren	496
14.6.2	Stochastische Verfahren	497
14.6.3	Particle Cloud Tracking Modelle	504
14.7	Sprayverbrennung	509
14.7.1	Verbrennung von Einzeltröpfchen	509
14.7.2	Verbrennung eines Sprays	511
	Literatur	512
15.	Die Verbrennung fester Brennstoffe	519
15.1	Einleitung	520
15.2	Kohlefeuerungen	521
15.3	Phänomenologie des Kohleverbrennungsprozesses	527
15.4	Berechnungsmethodik der Kohleverbrennung	532
15.4.1	Strömungsfeld	534
15.4.2	Wärmeübertragung	538
15.4.3	Die heterogene Kohleverbrennungsmodellierung	545
15.4.4	Die Berücksichtigung der homogenen Gaphasen-reaktion	563
15.4.5	Berechnungsbeispiele von Kohlefeuerungen	564
	Literatur	570
16.	Stationäre, eindimensionale Strömungen mit Wärmezufuhr	577
16.1	Wärmezufuhr im Kanal mit veränderlichem Querschnitt	577
16.2	Wärmezufuhr im Kanal konstanten Querschnitts	580
16.2.1	Berechnung des statischen Druckverhältnisses	580
16.2.2	Berechnung des Totaldruckverhältnisses	582
16.2.3	Kritische Wärmezufuhr	586
	Literatur	589

17.	Emissionen der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen	591
17.1	Primärenergie und Luftschadstoffe	591
17.2	Emission der Stickoxide (<i>NO_x</i>)	596
17.2.1	Bildungsmechanismen der Stickoxide	597
17.2.2	Bildungsmechanismen des Thermischen <i>NO</i> (Zeldovich- <i>NO</i>) ..	601
17.2.3	Bildungsmechanismen des Prompten <i>NO</i> (Fenimore- <i>NO</i>)	605
17.2.4	Über Distickstoffoxid (<i>N₂O</i> , Lachgas) erzeugtes <i>NO</i>	606
17.2.5	Über das <i>NNH</i> -Radikal gebildetes <i>NO</i>	607
17.2.6	Bildungsmechanismen der Konversion von brennstoff gebundenem Stickstoff in <i>NO</i>	608
17.2.7	<i>NO_x</i> -Bildung bei Abgasrückführung	610
17.2.8	Grundlegende Zusammenstellung der Primärmaßnahmen zur <i>NO_x</i> -Reduktion	613
17.3	Kohlenmonoxid (<i>CO</i>)	615
17.4	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe als Schadstoffemissionen ...	616
17.5	Bildung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (<i>PAK</i> , <i>PAH</i>) als Rußvorgänger	618
17.6	Ruß	619
	Literatur	628
18.	Gasturbinenbrennkammern	633
18.1	Konventionelle Brennkammern von Gasturbinen	633
18.1.1	Funktionsweise	634
18.1.2	Brennkammerbauformen	637
18.1.3	Brennstoffeindüsung	639
18.1.4	Der Brennkammerdruckverlust	642
18.1.5	Die Temperaturverteilung am Brennkammeraustritt	643
18.1.6	Betriebsverhalten einer konventionellen Fluggasturbinenbrennkammer	645
18.2	Gasturbinenbrennkammertechnologie zur Reduktion der Emissionen	648
18.2.1	Technologie schadstoffreduzierter Brennkammer (<i>LEC</i>)	649
18.2.2	Magerverbrennung gasförmiger Brennstoffe (<i>DLE</i>)	650
18.2.3	Magerverbrennung flüssiger Brennstoffe	655
18.2.4	Fett-Magerverbrennung (<i>RQL</i> , Rich burn – Quick quench – Lean burn)	668
18.2.5	Lean Direct Injection Systeme (<i>LDI</i>)	672
18.2.6	Nachverbrennung	675
18.2.7	Alternative Brennstoffe	677
18.2.8	Absenkung der Flammentemperatur	681

18.3	Katalytische Verbrennung	682
	Literatur	686
19.	Primäre Reduktion der Stickoxid- emission bei Feuerungsanlagen	689
19.1	<i>NO_x</i> -reduzierte Kohlefeuerung	689
19.2	Modellierung der <i>NO_x</i> -Bildung.....	693
19.3	Stickoxidbildung bei gestufter Verbrennung.....	697
19.4	Emissionen ausgeführter Feuerungsanlagen	703
19.4.1	Kohlefeuerungen von Kraftwerken	703
19.4.2	Ölgefeuerte Anlagen.....	704
19.4.3	Gasgefeuerte Anlagen	705
	Literatur	706
20.	Sekundäre Maßnahmen der Abgasreinigung.....	711
20.1	Entschwefelung bei Feuerungsanlagen	712
20.1.1	Trockenadditiv-Verfahren	712
20.1.2	Waschverfahren.....	712
20.2	Entstickung bei stationären und mobilen Anlagen.....	714
20.2.1	Selektive nichtkatalytische Reduktion (<i>SNCR</i>)	715
20.2.2	Katalytische Verfahren bei stationären Anlagen	715
20.2.3	Der Drei-Wege-Katalysator mit mobilen Anlagen.....	716
20.3	Partikelrückhaltung bei stationären Anlagen.....	718
20.4	Rußentfernung bei mobilen Anlagen, Abgasreinigung des Dieselmotors	722
	Literatur	723
21.	<i>CO₂</i>-Sequestrierung	725
21.1	<i>CO₂</i> -Abscheidungstechniken.....	726
21.1.1	Abgasreinigung	727
21.1.2	<i>CO₂</i> -arme Kraftwerkskonzepte	727
21.1.3	Auswirkungen und Verbrennungsprozess.....	731
21.2	<i>CO₂</i> -Verwertung.....	732
21.3	<i>CO₂</i> -Deponierung.....	732
21.4	Mögliche Umweltwirkungen der Abscheidungstechnologien ...	733
	Literatur	735

22.	Thermoakustik von Brennkammern.....	737
22.1	Einleitung	738
22.2	Anregungsmechanismen der Brennkammerpulsationen	738
22.2.1	Phänomen der fremderregten Brennkammerschwingungen.....	739
22.2.2	Das Phänomen der selbsterregten Brennkammer schwingungen.....	740
22.3	Abhilfemaßnahmen	746
22.3.1	Modifikation am Brenner, am Brennraum oder an der Brennstoff- bzw. Luftzuführung.....	747
22.3.2	Passive Dämpfungsmaßnahmen	749
22.3.3	Aktive Stabilisierungsmaßnahmen	751
22.4	Analysemethoden der Thermoakustik	754
22.4.1	Experimentelle Untersuchungsmethoden	754
22.4.2	Akustische Stabilitätsanalysen der Brennkammer	755
22.4.3	Verzugszeitmodelle	757
22.4.4	Stabilitätsanalysen mit Flammenübertragungsfunktionen.....	758
22.4.5	Instationäre CFD-Berechnung.....	763
	Literatur	766
23.	Wärmeübertragung in Brennräumen	775
23.1	Wärmeübertragungsprozesse vom Heißgas auf die Wand	777
23.1.1	Wärmeaustausch durch Strahlung	777
23.2	Wärmeleitung innerhalb der Wand	787
23.3	Wärmeabgabe der Wand	790
23.3.1	Strahlungsaustausch mit der Umgebung	790
23.3.2	Konvektion auf der kalten Wandseite	790
23.4	Wärmedurchgang durch die Wand	798
23.5	Wände mit vergrößerter Oberfläche	799
23.6	Filmkühlung der Heißgasseite	801
	Literatur	808
24.	Motorische Verbrennung	811
24.1	Thermodynamische Modellierung des Brennverlaufs.....	811
24.2	Beschreibung der dieselmotorischen Verbrennung	817
24.2.1	Einleitung	817
24.2.2	Strahlmodellierung	818
24.2.3	Wandwärmeübergang.....	820
24.2.4	Selbstzündung	821
24.2.5	Verbrennungsmodell	821
24.2.6	Schadstoffbildung.....	821
24.2.7	Beispiele dieselmotorischer Verbrennungssimulation	822

24.3	Beschreibung der ottomotorischen Verbrennung	827
24.3.1	Einleitung	827
24.3.2	Verbrennungsmodelle	827
24.3.3	Beispiele ottomotorischer Verbrennungssimulation	832
24.4	Primäre Maßnahmen zur Emissionsreduktion von Verbrennungsmotoren	833
24.4.1	Absenkung der Spitzentemperaturen.....	833
24.4.2	Abgasrezirkulation (EGR).....	834
24.5	Zusammenfassung	837
	Literatur	838

**25. Standardmessverfahren der
Luftschadstoffe841**

25.1	Überblick	842
25.2	Chemilumineszenzanalysator für <i>NO_x</i>	844
25.3	Nichtdispersiver Infrarotanalysator (<i>NDIR</i>) für alle Gase.....	845
25.4	Flammen-Ionisations-Detektor (<i>FID</i>) für <i>HC</i>	847
25.5	Paramagnetischer Analysator (<i>PMA</i>) für <i>O₂</i>	847
25.6	<i>O₃</i> -Nachweis durch <i>UV</i> -Absorption	848
25.7	<i>SO₂</i> -Nachweis durch <i>UV</i> -Fluoreszenz.....	848
25.8	Die Fotometrie.....	849
25.9	Kolorimetrie	851
25.10	Konduktometrie.....	851
25.11	Chromatographische Verfahren.....	852
25.12	Olfaktometrie.....	853
25.13	Rauchmessung.....	853
25.14	Nachweis von Schwebstoffen (Feinstaub, <i>PM₁₀</i> , <i>PM_{2,5}</i>) in der Luft.....	857
25.14.1	Partikeltrennung durch einen Kaskadenimpaktor.....	858
25.14.2	Messung der Staubniederschläge aus der Atmosphäre.....	859
25.14.3	Messung der Staubkonzentration der Luft	859
25.14.4	Staubmessung durch Absorption von β -Strahlung.....	861
25.15	Luftkontrollstation.....	862
25.16	Standardverfahren zur Messung der Emissionen von Gasturbinen und Kraftfahrzeugen	863
25.17	Umrechnungen und Konzentrationen.....	863
25.17.1	Feuchtigkeitskorrektur.....	864
25.17.2	Der Emissionsindex <i>EI</i>	864
25.17.3	Der Verbrennungswirkungsgrad	866
	Literatur	866

26. Gesetze und Verordnungen zur Luftreinhaltung	867
26.1 Internationale Vereinbarungen	867
26.1.1 Die „Genfer UNECE-Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen“ von 1979	868
26.1.2 Das Protokoll zur Begründung des europäischen Mess- und Bewertungsprogramms für Luftschadstoffe“ von 1984	869
26.1.3 Das „Helsinki-Protokoll“ von 1985.....	870
26.1.4 Das „Sofia-Protokoll“ von 1988.....	870
26.1.5 Das „Genfer-Protokoll“ von 1991	871
26.1.6 Das „Oslo-Protokoll“ von 1994.....	871
26.1.7 Das „Kyoto-Protokoll“ von 1997	871
26.1.8 Das „Aarhus-Protokoll“ von 1998.....	873
26.1.9 Das „Göteborg-Protokoll“ von 1999	873
26.1.10 Internationale Abgaskgrenzwerte für den Luftverkehr.....	875
26.1.11 Andere internationale Regelungen	876
26.2 EU-Recht	877
26.2.1 Die „Luftqualitäts-Rahmenrichtlinie“ von 1996	878
26.2.2 Die „1. Tochtterrichtlinie für SO_2 , NO_2 , PM_{10} und Blei“ von 1999	878
26.2.3 Die „VOC-Richtlinie“ von 1999.....	878
26.2.4 Die „3. Tochtterrichtlinie über den Ozongehalt der Luft“ von 2002	879
26.2.5 Die „Großfeuerungsanlagen-Richtlinie“ von 2001	879
26.2.6 Die „Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe“ von 2002.....	879
26.2.7 Abgaskgrenzwerte für den Verkehr.....	880
26.3 Nationale Gesetzgebung	882
26.3.1 Allgemeines.....	882
26.3.2 Das „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“ in der Fassung vom 11. September 2002.....	884
26.3.3 Zusammenstellung der Verordnungen des BImSchG	885
26.3.4 Kleinf Feuerungsanlagen (1. BImSchV)	889
26.3.5 Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV).....	890
26.3.6 Sonstige Feuerungsanlagen (TA-Luft).....	891
26.3.7 Abfallverbrennungsanlagen (17. BImSchV)	894
26.3.8 Umweltverträglichkeitsprüfungsgesetz (UVPG)	896
Literatur	896

Anhang	897
Literatur	900
Sachverzeichnis	901

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

A	m^2	Fläche
a	1/s	Streckung
a	m/s	Schallgeschwindigkeit
A	$\frac{1}{s} \cdot \frac{cm^3}{mol \cdot s}$	präexponentieller Faktor
a, b, c ...		Reaktionsordnung
A_i	-	Stoffsymbol in allgemeiner Reaktionsgleichung
C	J/K	Wärmekapazität
c	mol/m ²	Oberflächenkonzentration
c	-	stoffunabhängige Reaktionslaufzahl
c	m/s	Geschwindigkeit
c_i	$\frac{mol_i}{mol_{ges}}$	(Volumen-) Konzentration der Spezies i
c_p	J/kg K	spez. Wärmekapazität bei konst. Druck
c_v	J/kg K	spez. Wärmekapazität bei konst. Volumen
c_w	-	Widerstandsbeiwert
d	m	Durchmesser
D	m ² /s	Diffusionskoeffizient
$Da = \frac{t_0}{t_L}$	-	Damköhler-Zahl (t_L Zeitmaß der lam. Flamme, t_0 integrales Zeitmaß)
E	J	Energie
e	-	elektrisches Potential
e	-	spektrale Energiedichte
E_a	J/mol	Aktivierungsenergie
E_{ir}	-	Sensitivität des Stoffes in der Reaktion r
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
F	mol	Brennstoff
$F = U - T \cdot S$	J	freie Energie
g	m/s ²	Gravitationskonstante
$G = H - T \cdot S$	J	freie Enthalpie (Gibbs'sche ~)
G_x	Nm/s	Axialimpuls
G_ϕ	kgm/m ² /s	Umfangsimpuls
H	M	Höhe, Distanz
h	J / kg	spez. Enthalpie
H	J	Enthalpie

XX Symbolverzeichnis

$\Delta \bar{H}_{t,298}^0$	$\text{kJ/mol}_{\text{fuel}}$	Bildungsenthalpie
H_o	$\text{MJ/kg}_{\text{fuel}}$	Brennwert, oberer Heizwert
$\Delta_R H$	kJ/mol	Reaktionsenthalpie
H_u	$\text{MJ/kg}_{\text{fuel}}$	Heizwert (unterer)
k	-	Geschwindigkeitskoeffizient
k	$1/\text{m}$	Wellenzahl
	J	kinetische Energie
$Ka = \frac{t_L}{t_K}$	J/kg	Karlowitz-Zahl (t_L Zeitmaß der lam. Flamme, t_K Kolmogorov Zeitskala)
k_B	-	Boltzmann-Konstante ($k_B = 1,38054 \cdot 10^{-23}$)
$k^{(f)}$	-	Geschwindigkeitskoeffizient einer chem. Reaktion
K_p	-	Gleichgewichtskonstante
l	$\frac{\text{kmol Luft}}{\text{kg fuel}}$	Luftbedarf (tatsächlich)
L	m	Länge
l	m	Mischungslänge
l_0	m	Integrales Längenmaß
$Le = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p \cdot D}$	-	Lewis-Zahl
l_K	m	Kolmogorov Längenmaß
l_{\min}	$\frac{\text{kmol}_{\text{Luft}}}{\text{kg fuel}}$	Mindestluftbedarf
m	kg	Masse
M	-	Anzahl der Elemente
M_i	kg/kmol_i	molare Masse
N	-	Atomanzahl
n, n_i	mol	Stoffmenge
N_A	$1/\text{mol}$	Avogadro-Konstante, Loschmidt-Zahl ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$)
n_R	$\frac{\text{kmol}}{\text{kg fuel}}$	Rauchgasmenge
O	mol	Oxidator
O	m^2	Oberfläche
O_{\min}	$\frac{\text{kmol}}{\text{kmol}_{\text{fuel}}}$	Mindestsauerstoffbedarf
P	J	Wärmeproduktion
P	mol	Produkt
p	$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$	Druck
p_i	N/m^2	Partialdruck der Komponente i
Q	J	Wärme

q	J/kg	spez. Wärme
R	J/kg K	spez. Gaskonstante
R	M	Radius
r	J/kg	Verdampfungswärme
r_i	kmol _i /m ³ s	Reaktionsgeschwindigkeit
r	M	Radialkoordinate, Radius
$Re = \frac{u \cdot l}{\nu}$	-	Reynoldszahl
R_m	J/mol K	Allgemeine Gaskonstante ($R_m = 8,314$ J/mol K)
S	m ²	Oberfläche
s	J/kg K	spez. Entropie
s	-	an Reaktion beteiligte Stoffe
S	J/K	Entropie
S	-	Anzahl der beteiligten Stoffe
s	-	stöchiometrisches Massenverhältnis
\bar{S}_{298}^0	J/mol K	Bildungsentropie
S_N	-	Drallparameter
$s_i = r_i M_i$	kg _i /m ³ s	chemischer Quellterm
$\Delta_R S$	J/mol K	Reaktionsentropie
t	°C	Temperatur
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
T_b	K	Verbrennungstemperatur, adiabate Flammentemperatur
Tu	-, %	Turbulenzgrad
U	J	innere Energie
u	J/kg	spez. innere Energie
u	m/s	Anströmgeschwindigkeit
$\Delta_R U$	kJ/mol	innere Reaktionsenergie
V	m ³	Volumen
v	m/s	Geschwindigkeit
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
$v = \frac{1}{\rho}$	m ³ /kg	spez. Volumen
W	J	Arbeit
w	J/kg	spez. Arbeit
x	m	Ortskoordinate
y	m	Ortskoordinate
Y_i	-	Massenbruch der Spezies i
Z	1/kg	Aktive Zentren pro Masseneinheit
z	m	Ortskoordinate
Z_i	-	Elementmassebruch