

Inhaltsverzeichnis

I	Verbrennungseinrichtungen	1
	Aufbau, Funktion und Charakterisierung	
1	Einführung und Motivation	3
1.1	Energiesituation und Konsequenzen für die Verbrennungstechnik	3
1.2	Umweltschutz und seine Auswirkungen auf Industrie und Kraftwerkstechnik	5
1.3	Hauptvorgänge bei der Verbrennung	6
1.4	Einflüsse auf den Verbrennungsvorgang	7
1.5	Motivation für eine mathematische Modellbildung und Simulation	9
1.6	Teilbereiche mathematischer Modellierung bei technischen Verbrennungssystemen	10
	Literatur	13
2	Einteilung technischer Verbrennungseinrichtungen	15
2.1	Übersicht	15
2.2	Einsatzbereiche	16
2.2.1	Einteilung	16
2.2.2	Feuerungen in Industrieöfen	17
2.2.3	Kesselfeuerungen	19
2.2.4	Feuerungen in Entsorgungsanlagen (thermische Zersetzung)	22
2.2.5	Brennräume in Verbrennungskraftmaschinen	24
2.3	Verfahrenstechnische Einteilung technischer Feststoffverbrennungssysteme	26
2.3.1	Übersicht	26
2.3.2	Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung und Staubfeuerung	26
2.3.3	Drehrohrofen	29
	Formelzeichen	30
	Literatur	30

3	Kenngrößen technischer Verbrennungseinrichtungen	31
3.1	Charakterisierungsgrundlagen	31
3.1.1	Strömungstechnische Charakterisierung	31
3.1.2	Wärmetechnische Charakterisierung	35
3.1.3	Reaktionstechnische Charakterisierung	38
3.2	Feuerungen für gasförmige und flüssige Brennstoffe	39
3.3	Feuerungen für feste Brennstoffe	40
3.3.1	Allgemeine Kennzeichnung der Systeme	40
3.3.2	Rostfeuerungen	40
3.3.3	Wirbelschichtfeuerungen	42
3.3.4	Staubfeuerungen	49
3.4	Feuerungen für Abfallstoffe	52
3.4.1	Allgemeine Kennzeichnung der Systeme	52
3.4.2	Hausmüllverbrennung	53
3.4.3	Klärschlammverbrennung	55
3.4.4	Industrierückstandsverbrennung	56
3.4.5	Sondermüllverbrennung	57
3.4.6	Rauchgasreinigung bei der Abfallverbrennung	59
	Literatur	61

II Mathematische Modellierung 65

Voraussetzungen, Teilmodelle, Gesamtmodelle

Überblick und Einordnung 65

4	Voraussetzungen für eine mathematische Modellbildung und Simulation	67
	Literatur	69
5	Ebenen der mathematischen Modellierung	71
5.1	Global- / Detail-Modelle	71
5.2	Einzel- / Gesamt-Modelle	72
5.3	Euler- / Lagrange-Modelle	73
5.4	Koordinaten, Dimensionalität und Einsatzbereiche der Modelle	74
5.4.1	Koordinaten	74
5.4.2	Dimensionalität	75
5.4.3	Einsatzbereiche	77
5.4.4	Mehr-Gitter-Methode (Multi-Gridding)	80
5.4.5	Teilgebietszerlegung (Subdomain Decomposition) Überlappende Gitter (Patched Grids)	80
	Formelzeichen	80
	Literatur	81

Kontinuumsbeschreibung**83**

6	Bilanzierung von Zustandsgrößen	85
6.1	Herleitung der Bilanzgleichung	85
6.1.1	Allgemeine Überlegungen	85
6.1.2	Bilanzierung an einem endlichen Volumenelement dV	86
6.2	Zu bilanzierende Größen	91
6.2.1	Wechselwirkungszusammenhänge der Hauptmodelle	91
6.2.2	Bilanzgrößen der Hauptmodelle	91
	Formelzeichen	93
	Literatur	94
7	Beschreibung der Strömung	95
7.1	Verschiedene Variablensysteme (/7.1.1/)	95
7.2	Impulstransport ("primitive Variablen")	96
7.2.1	Impulstransportgleichung	96
7.2.2	Gleichungen für die Druckberechnung	99
7.2.2.1	Übersicht über Berechnungsmethoden	99
7.2.2.2	Poisson-Gleichung	100
7.2.2.3	Druckkorrekturgleichung	101
7.2.3	Kontinuitätsgleichung	102
7.3	Turbulenzmodellierung	102
7.3.1	Eigenschaften der Turbulenz	102
7.3.1.1	Phänomenologische Betrachtung (/7.1.1/)	102
7.3.1.2	Energiekaskade	103
7.3.1.3	Statistische Größen	106
7.3.2	Turbulenzmodelle	106
7.3.2.1	Turbulenter Impulstransport (Reynoldsgleichungen)	106
7.3.2.2	Übersicht über Turbulenzmodelle	109
7.3.2.3	Mischungslängenansätze	112
7.3.2.4	Zweigliedungsmodell	114
7.3.2.5	Reynolds-Spannungsmodell	118
7.3.2.6	Algebraisches Spannungsmodell	121
7.3.3	Turbulenter Transport skalarer Größen	123
7.4	Einphasensysteme oder homogene Systeme	125
7.5	Zweiphasensysteme oder heterogene Systeme	125
7.5.1	Grundsätzliche Definitionen und Überlegungen	125
7.5.2	Bilanzierung für monodisperse nicht reagierende Zweiphasen- strömungen	127
7.5.2.1	Allgemeine Bemerkungen	127
7.5.2.2	Kontinuitätsbilanz	128
7.5.2.3	Impulsbilanz	129

7.5.3	Bilanzierung für polydisperse nichtreagierende Zweiphasenströmungen	130
7.5.3.1	Grundsätzliche Überlegungen	130
7.5.3.2	Kontinuitätsbilanz	130
7.5.3.3	Impulsbilanz	131
7.5.4	Turbulenzmodellierung bei Zweiphasenströmungen	132
7.5.4.1	Allgemeine Bemerkungen	132
7.5.4.2	Globale Berücksichtigung der Turbulenzbeeinflussung	134
7.5.4.3	Modifikationen des Turbulenzmodells	135
7.5.5	Turbulenter Transport skalarer Größen	138
7.5.6	Polydisperse reagierende Zweiphasenströmungen	139
	Formelzeichen	140
	Literatur	142
8	Beschreibung des Brennstoffabbrandes	147
8.1	Bilanzierung für eine Spezies	147
8.1.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Bilanzierung	147
8.1.2	Wahl des Konzentrationsmaßes	149
8.1.3	Bilanzgleichung für eine Spezies	150
8.1.4	Beschreibung des Mischungszustandes	152
8.1.5	Lokale Ungemischtheiten	153
8.2	Grundzüge der Reaktionskinetik	155
8.2.1	Kinetische Grundgleichungen (/8.5.10/)	155
8.2.2	Arrheniusansatz für Reaktionen erster Ordnung	157
8.2.3	Allgemeiner Geschwindigkeitsansatz	159
8.2.4	Gleichgewichtskonzentration	161
8.2.5	Schnelle Gasphasenreaktionen	162
8.2.6	Turbulente reagierende Strömungen	163
8.2.6.1	Allgemeine Überlegungen	163
8.2.6.2	Einfluß der Temperaturfluktuationen	165
8.2.6.3	Das "Eddy-Break-Up"-Modell	165
8.2.6.4	Das "Eddy-Dissipation"-Konzept	166
8.2.6.5	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen	166
8.2.7	Einordnung von Flammentypen	167
8.2.8	Heterogene Verbrennungsreaktionen	169
8.2.8.1	Verschiedene Regime bei heterogenen Reaktionen	169
8.2.8.2	Einzelteilchen- und Teilchengruppenverbrennung	170
8.3	Gasverbrennung	171
8.4	Ölverbrennung	175
8.4.1	Phänomenologische Beschreibung	175
8.4.2	Ölzerstäubung	176
8.4.3	Tropfenverdampfung bzw. -verdunstung	178
8.4.4	Abbrand der Dämpfe	179
8.4.5	Ruß und Flugkoks	179

8.5	Kohleverbrennung	180
8.5.1	Phänomenologische Betrachtung	180
8.5.2	Pyrolyse	182
8.5.2.1	Phänomenologische Betrachtung und Einflußfaktoren	182
8.5.2.2	Aufheizrate und maximale Pyrolysetemperatur	186
8.5.2.3	Kohlezusammensetzung bzw. -provenienz	186
8.5.2.4	Übersicht über Pyrolysemodelle	187
8.5.2.5	Pyrolysemodell mit konstanter Pyrolyserate	188
8.5.2.6	Pyrolysemodell mit einer Arrheniusreaktion N-ter Ordnung	189
8.5.2.7	Pyrolysemodell mit zwei konkurrierenden Reaktionen erster Ordnung	189
8.5.3	Koksabbrand	191
8.5.3.1	Überblick und limitierende Teilvorgänge	191
8.5.3.2	Limitierung durch Transportprozesse	195
8.5.3.3	Limitierung durch chemische Reaktion	196
8.5.3.4	Koksabbrandzeiten	197
8.5.4	Abbrand der Fluchtigen	198
8.5.5	Ascheverhalten	200
8.5.6	Partikelgrößenhaushalt	202
8.5.6.1	Prinzipielle Überlegungen	202
8.5.6.2	Größenspezifische Eigenschaften	203
8.5.6.3	Kohlespezifische Eigenschaften	204
8.5.6.4	"Shadow"-Methode für die Umsatzberechnung	206
8.5.6.5	Modifizierte Momentenmethode	207
8.5.6.6	Fragmentierung	208
	Formelzeichen	210
	Literatur	213
9	Beschreibung der Schadstoffentstehung	219
9.1	Technisch relevante Schadstoffkomponenten	219
9.2	Einzuhaltende Grenzwerte	221
9.3	Kohlenstoffoxide	224
9.3.1	Kohlenstoffmonoxid (CO)	224
9.3.2	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	226
9.4	Schwefeloxide	227
9.5	Stickstoffoxide (Stickoxide)	230
9.5.1	Einzelspezies und Entstehungspfade	230
9.5.2	Thermische NO-Bildung	231
9.5.3	Brennstoff-NO-Bildung	232
9.5.4	Prompt NO-Mechanismus	235
9.5.5	NO-Oxidations- und Reduktionspfade	236
9.5.6	Wirkungsweise von Primär- und nichtkatalytischen Sekundär- maßnahmen zur NO _x -Reduktion	237
9.5.7	N ₂ O-Bildungsmechanismus	242

9.6	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Ruß und Flugkoks	243
9.7	Partikel, Stäube und Feinststäube	246
9.8	Spurenelemente	249
9.9	Dioxine und Furane	250
	Formelzeichen	252
	Literatur	253
10	Beschreibung der Wärmeübertragung	261
10.1	Bilanzierung der Enthalpie	261
10.1.1	Energieübertragungsmechanismen	261
10.1.2	Gesamtenthalpie als beschreibende Größe	262
10.1.3	Bilanzgleichung für die Enthalpie	265
10.2	Konvektiver Energietransport	268
10.3	Energietransport durch Leitung	268
10.4	Energietransport durch Strahlung	269
10.4.1	Phänomenologische Betrachtung	269
10.4.2	Strahlungsintensitätsverteilung	271
10.4.2.1	Spektrale Richtungsstrahlungsintensität	271
10.4.2.2	Gesamtstrahlungsintensität	274
10.4.2.3	Übersicht über Strahlungsaustauschmodelle	277
10.4.3	Diffusionsmodell	278
10.4.4	Strahlungsaustauschrechnung mit der Flußmethode	279
10.4.5	Strahlungsaustauschrechnung mit der Zonenmethode	281
10.4.5.1	Grundsätzliche Überlegungen	281
10.4.5.2	Hottel'sches Zonenmodell	282
10.4.5.3	Monte-Carlo-Zonenmodell	284
10.4.6	Discrete-Transfer-Modell	287
10.5	Optische Eigenschaften	288
10.5.1	Allgemeine Grundlagen	288
10.5.2	Gasphasenspezies	289
10.5.3	Partikelbeladenes Kontinuum	291
10.5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	291
10.5.3.2	Absorptionsverhalten von Kohle und Koks	293
10.5.3.3	Absorptionsverhalten von Asche	294
10.5.3.4	Absorptionsverhalten von Ruß	294
10.6	Berechnung der Temperatur	295
10.6.1	Mittlere Gastemperatur	295
10.6.2	Temperaturfluktuationen in der Gasphase	296
10.6.3	Mittlere Partikeltemperatur	297
	Formelzeichen	299
	Literatur	301

Einzelpartikelbeschreibung für die Partikel- und Feststoffphase	305
11 Bewegung von Tröpfchen und Partikeln	307
11.1 Bewegung von Einzelpartikeln	307
11.1.1 Impulsbilanzgleichung	307
11.1.2 Widerstandsbeiwert für nichtreagierende Teilchen	312
11.1.3 Einfluß einer irregulären geometrischen Gestalt	313
11.1.4 Widerstandsbeiwert für verdampfende/pyrolysierende und abbrennende Teilchen	314
11.2 Teilchenwechselwirkung mit einem turbulenten Fluid	315
11.2.1 Phänomenologische Beschreibung und grundlegende Zusammenhänge	315
11.2.2 Deterministischer Diffusionsansatz	316
11.2.3 Stochastischer Dispersionsansatz	317
11.3 Teilchenwechselwirkungen im Partikelschwarm	320
11.4 Strömung im Nahfeld eines Partikels	321
11.4.1 Eindimensionale Approximation	321
11.4.2 Dreidimensionale Beschreibung	321
11.4.2.1 Allgemeine Überlegungen	321
11.4.2.2 Impulsbilanzgleichung	322
Formelverzeichnis	324
Literatur	325
12 Reaktion und Stoffaustausch bei Tröpfchen und Partikeln	327
12.1 Bilanzierung an Einzelpartikeln	327
12.1.1 Speziesbilanz an einem Einzelteilchen	327
12.1.2 Speziesbilanzgleichung für die Grenzschicht um das Teilchen	330
12.1.3 Einfluß der Relativbewegung auf den Stoffaustausch	331
12.1.4 Speziesbilanzgleichung für das Teilcheninnere	332
12.2 Teilchengruppenverbrennung	333
12.3 Abbrand von Öltröpfchen	335
12.3.1 Auftretende Phänomene	335
12.3.2 Reine Verdampfung	337
12.3.3 Simultane Verdampfung und Abbrand	338
12.3.4 Teilchengruppenverbrennung bei der Ölverbrennung	338
12.4 Abbrand von Kohlepartikeln	339
12.4.1 Auftretende Phänomene	339
12.4.2 Plastisches Verhalten	340
12.4.3 Morphologisches Verhalten und Transportvorgänge im Inneren eines Teilchens	341
12.4.4 Adsorptions- und Desorptionsprozesse	344
12.4.5 Heterogene Oberflächenreaktionen	345
12.4.6 Teilchengruppenverbrennung bei der Kohleverbrennung	346
Formelverzeichnis	347
Literatur	348

13	Energieaustausch bei Tröpfchen und Partikeln	351
13.1	Enthalpiebilanz an einem Einzelpartikel	351
13.2	Strahlungsaustauschverhalten von Einzelteilchen	353
13.2.1	Grundlagen und Definitionen	353
13.2.2	Absorptions- und Streuverhalten von Kohlen, Koksen und Aschen	355
13.3	Strahlungsaustauschverhalten bei hoher Beladung	356
13.4	Wärmetönung durch chemische Reaktion	357
13.5	Teilchentemperaturberechnung	359
13.5.1	Vereinfachte Berechnung der mittleren Teilchentemperatur	359
13.5.2	Verteilung der Grenzschichttemperatur	359
	Formelverzeichnis	360
	Literatur	361
14	Kopplung zwischen Kontinuums- und Einzelteilchenbeschreibung	363
14.1	Allgemeine Zusammenhänge	363
14.2	Kopplung der Impulsbilanz	365
14.3	Kopplung der Speziesbilanz	366
14.4	Kopplung der Energiebilanz	366
	Formelverzeichnis	367
	Literatur	368
15	Modellierungsansätze für Wirbelschichtfeuerungen	371
15.1	Besonderheiten der Wirbelschichtmodellierung	371
15.2	Eindimensionale Wirbelschichtmodelle	372
15.2.1	Vereinfachungen und Annahmen	372
15.2.2	Bilanzgleichungen	374
15.3	Dreidimensionale Wirbelschichtmodelle	380
15.3.1	Teilmodelle	380
15.3.2	Dispersionsmodell für die Quervermischung	380
15.3.3	Korngrößenbilanz	381
	Formelverzeichnis	382
	Literatur	383

III Lösung des Gleichungssystems 385

Eigenschaften der Gleichungen und Methoden zu ihrer Lösung

16	Mathematische Eigenschaften der beschreibenden Gleichungen und Numerische Lösungsmethoden	387
16.1	Eigenschaften der Gleichungen	387
16.2	Überblick über Numerische Lösungsmethoden	389
16.3	Definitionen zum numerischen Lösungsverfahren	392
	Formelverzeichnis	393
	Literatur	393

17	Numerische Lösungsverfahren bei der Finiten Differenzen Methode	395
17.1	Approximation von Differentialquotienten	395
17.2	Ortsdiskretisierung	396
17.2.1	Differenzenschemata erster Ordnung	396
17.2.2	Die versetzte Gitterdefinition	399
17.2.3	Upwind-Differenzen	400
17.2.4	Das Hybrid-Verfahren	401
17.2.5	Differenzenschemata höherer Ordnung	402
17.2.6	Das ADI-Verfahren	403
17.3	Zeitdiskretisierung	406
17.3.1	Allgemeine Unterscheidung	406
17.3.2	Explizite Lösungsverfahren	407
17.3.2.1	Maximale Zeitschrittweite	407
17.3.2.2	Dynamische Zeitschrittssteuerung	408
17.4	Integration der Partikeltrajektorien	408
	Formelverzeichnis	410
	Literatur	411
IV	Simulation	413
	Ausgewählte Beispiele	
18	Simulationsbeispiele	415
18.1	Voraussetzungen, Randbedingungen und Vorgehensweise	415
18.2	Einzelflammenberechnungen (Kohlenstaub)	417
18.2.1	Geschwindigkeiten, Temperaturen und Schlüsselspezies für eine abgehobene unverdrallte Flamme (Steinkohle)	417
18.2.2	Einfluß des Dralls bei einer Steinkohlenstaubflamme	421
18.2.3	NO-Berechnungen für eine Steinkohlenstaubflamme	421
18.3	Feuerraumberechnungen (Kohlenstaub)	424
18.3.1	Geschwindigkeiten und Mischungsfelder für einen braun- und steinkohlebefeuchten Feuerraum	424
18.3.2	Temperaturverteilung für einen braunkohlebefeuchten Feuer- raum	428
18.3.3	Feuerraumgesamtberechnungen	431
18.4	Schlußbemerkungen	434
	Literatur	434
A	Anhänge	437
A1	Eigenschaften technischer Brennstoffe	439
A1.1	Übersicht	439
A1.2	Eigenschaften technischer Brennstoffe	442
A1.2.1	Eigenschaften technischer Gase	442
A1.2.2	Eigenschaften technischer Öle	443

A1.2.3 Eigenschaften von Kohle	443
A1.2.4 Eigenschaften von Holz und Torf	444
A1.2.5 Eigenschaften von Hausmüll	445
A1.2.6 Eigenschaften von Klärschlamm	446
A1.3 Einsatz technischer Brennstoffe	447
A1.3.1 Steinkohle	447
A1.3.2 Braunkohle	447
A1.3.3 Klärschlämme	448
Literatur	448
A2 Bilanzgleichungen für verschiedene Koordinatensysteme	449
A2.1 Kontinuitätsgleichung	450
A2.2 Impulstransportgleichung	451
A2.3 k - ϵ -Turbulenzmodell	460
A2.4 Transportgleichung für eine skalare Größe	464
A2.4.1 Nichtzeitgemittelte Transportgleichung	464
A2.4.2 Zeitgemittelte Transportgleichung	466
Literatur	468
A3 Stoffeigenschaften von Brennstoff und Verbrennungsprodukten	469
A3.1 Allgemeine Bemerkungen	469
A3.2 Kohle, Koks und Asche	470
A3.3 Flüchtige Bestandteile (allgemein bei Kohle) und Methan	472
A3.4 Luft und Sauerstoff	473
A3.5 Kohlenmonoxid und Kohlendioxid	474
A3.6 Wasserdampf und Stickstoff	475
Literatur	476
A4 Definitionen statistischer Größen	477
A4.1 Definition der Wahrscheinlichkeit	477
A4.2 Definition der differentiellen Wahrscheinlichkeit	478
A4.3 Definition der Verteilungsfunktion	478
A4.4 Definition der Verteilungsdichtefunktion	479
A4.5 Verbundene Wahrscheinlichkeitsfunktion	480
Literatur	482
A5 Combustion Symposien	483
A6 Formelzeichen	485
A7 Farbtafeln	489
Sachverzeichnis	493