

<b>Autorenverzeichnis</b> .....	IX
---------------------------------	----

<b>Symbolverzeichnis</b> .....	XXI
--------------------------------	-----

<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Auslegung und Simulation .....	1
1.2 Einbindung in umgebende Systeme und Lebenszyklusmodellierung .....	5
1.3 Simulation und Experimente .....	7
1.4 Mathematische und numerische Modelle .....	9
1.5 Entwicklung von CFD zur Feuerraumsimulation .....	11
<b>2 Umwandlung und Transport von Masse, Energie, Impuls und Stoffen</b> .....	17
2.1 Bilanzgleichungen .....	17
2.1.1 Formen der zeitlichen Ableitung .....	17
2.1.2 Bilanzgleichung für eine allgemeine Bilanzgröße .....	20
2.1.3 Massenbilanz (Kontinuitätsgleichung) .....	25
2.1.4 Impulsbilanz .....	26
2.1.5 Energiebilanz (Leistungsbilanz) .....	29
2.1.6 Bilanzgleichung der mechanischen Energie (Leistung) ..	30
2.1.7 Bilanzgleichung der thermischen Energie (Leistung) ....	32
2.1.8 Bilanzgleichung der Stoffkomponenten .....	32
2.1.9 Stationäre und instationäre Zustände .....	33
2.2 Turbulenzmodelle .....	36
2.2.1 Phänomenologische Beschreibung .....	36
2.2.2 Turbulenzmodellierung .....	38
2.2.3 Klassifizierung von Turbulenzmodellen .....	38
2.2.4 Nullgleichungsmodelle .....	38
2.2.5 Eingleichungsmodelle .....	38
2.2.6 Zweigleichungsmodelle .....	39

2.2.7	Das $k$ - $\varepsilon$ Turbulenzmodell . . . . .	39
2.2.8	Reynolds-Spannungsmodelle . . . . .	41
2.2.9	Large-Eddy-Simulation . . . . .	43
2.2.10	Interaktion zwischen Turbulenz und chemischer Reaktion . . . . .	44
2.2.11	Eddy-Dissipation-Concept . . . . .	44
2.2.12	Reaktionsgebiet . . . . .	45
2.2.13	Charakteristische Kenngrößen der Fine Structures . . . . .	46
2.2.14	Integration chemischer Reaktionskinetik . . . . .	48
2.2.15	Berechnung der mittleren chemischen Reaktionsquellterme . . . . .	49
2.2.16	Modifikation der EDC-Kenngrößen . . . . .	49
2.2.17	Quasistationaritätsbedingungen . . . . .	50
2.2.18	Eddy-Dissipation-Modell . . . . .	51
2.3	Wärmeleitung und Diffusion . . . . .	52
2.3.1	Grundlagen zur Wärmeleitgleichung . . . . .	52
2.3.2	Wärmeleitgleichung und Energiebilanz . . . . .	54
2.3.3	Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	55
2.3.4	Grundlagen zum Stofftransport durch Diffusion . . . . .	58
2.3.5	Diffusion in Feststoffen . . . . .	61
2.4	Konvektiver Wärme- und Stoffübergang . . . . .	63
2.4.1	Konvektiver Wärmeübergang bei einphasiger Strömung . . . . .	63
2.5	Strahlung . . . . .	77
2.5.1	Lösung der Strahlungstransportgleichung . . . . .	79
2.5.2	Monte-Carlo-Methode . . . . .	81
2.5.3	Diskrete-Transfer-Methode (DTM) . . . . .	81
2.5.4	P-1 Strahlungsmodell . . . . .	83
2.5.5	Rosseland-Strahlungsmodell . . . . .	85
2.5.6	Diskrete-Ordinaten-Methode (DO) . . . . .	86
2.5.7	Surface-to-Surface-Strahlungsmodell (S2S) . . . . .	87
2.6	Chemische Reaktionen . . . . .	89
2.6.1	Reaktionsenergie und Reaktionsenthalpie . . . . .	89
2.6.2	Reaktionsgeschwindigkeit . . . . .	90
2.7	Zweiphasenströmung . . . . .	94
2.7.1	Zweiphasenströmung Gas-Flüssigkeit . . . . .	94
2.7.2	Zweiphasenströmung Gas-Feststoff . . . . .	118
2.7.3	Kondensation reiner Dämpfe . . . . .	130
2.8	Zustands- und Transportgrößen . . . . .	142
2.8.1	Grundlagen . . . . .	142
2.8.2	Stoffwerte für Wasser und Wasserdampf . . . . .	143
2.8.3	Stoffwerte für Gase und Gasgemische . . . . .	144
2.8.4	Stoffwerte für Brennstoffe und Werkstoffe . . . . .	146
2.9	Wärmeaustausch mittels Wärmeübertrager . . . . .	146
2.9.1	Regenerator . . . . .	147
2.9.2	Rekuperator . . . . .	148

2.9.3	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz (LMTD) ..	149
2.9.4	Kreislaufverbundsystem, Wärmerohre und weitere Möglichkeiten der Wärmeübertragung .....	158

<b>3</b>	<b>Numerische Methoden .....</b>	<b>159</b>
3.1	Koordinatensysteme und Gitter .....	160
3.1.1	Koordinatensysteme .....	160
3.1.2	Gitter und Gittergenerierung .....	164
3.1.3	Kartesisches Diskretisierungsschema .....	169
3.2	Diskretisierungsmethoden .....	171
3.2.1	Finite-Differenzen-Methode .....	172
3.2.2	Finite-Elemente-Methode .....	174
3.2.3	Finite-Volumen-Methode .....	175
3.3	Approximation der Oberflächen- und Volumenintegrale .....	177
3.3.1	Diskretisierung der konvektiven Terme .....	182
3.3.2	Diskretisierung der diffusiven Terme .....	185
3.3.3	Anwendung auf ein eindimensionales Problem .....	187
3.3.4	Fehler und Stabilitätsabschätzung .....	190
3.3.5	Das HYBRID-Schema .....	191
3.3.6	Diskretisierung des Speicherterms .....	193
3.3.7	Berücksichtigung von Quell- und Senkentermen .....	194
3.4	Rand- und Anfangswerte .....	195
3.5	Druckkorrekturverfahren .....	196
3.5.1	SIMPLE-Algorithmus .....	201
3.5.2	SIMPLEC-Algorithmus .....	204
3.5.3	SIMPLER .....	205
3.5.4	PISO-Algorithmus .....	207
3.5.5	Nichtversetztes Rechengitter .....	210
3.6	Diskrete-Elemente-Methode .....	213
3.6.1	Grundlagen .....	213
3.6.2	Einzelpartikel-Methode .....	217
3.6.3	Impuls- und Drehimpulserhaltungsgleichungen .....	235
3.6.4	Deterministische Kollisionsdetektion .....	260
3.6.5	Fluid-Partikel-Wechselwirkung .....	266
3.6.6	Berechnung der Partikel-Zeitschrittweite .....	280
3.6.7	Simulationsabläufe .....	289
3.7	Lösungsalgorithmen .....	293
3.7.1	Einleitung .....	293
3.7.2	Lineare Gleichungssysteme .....	294
3.7.3	Nichtlineare Gleichungssysteme .....	299
3.7.4	Relaxation .....	301
3.7.5	Differentialgleichungssysteme .....	303
3.7.6	Differential-algebraische Gleichungssysteme .....	316
3.7.7	Verfahren zur numerischen Differentiation .....	317

<b>4</b>	<b>Simulation der Feuerung und Gasströmung</b>	<b>321</b>
4.1	Grundlagen	321
4.1.1	Brennstoffeigenschaften	321
4.1.2	Verbrennungsrechnung	322
4.1.3	Adiabate Verbrennungstemperatur (ohne Bettmaterial und Additive)	325
4.2	Vereinfachte Brennkammermodelle	326
4.2.1	Nulldimensionales Brennkammermodell	326
4.2.2	Flammraum-Strahlraum-Modell	328
4.3	Modellierung und Simulation von Feuerungen	339
4.3.1	Modellierung der Verbrennung fester Brennstoffe	339
4.3.2	Modellierung der $\text{NO}_x$ -Entstehung und deren Minderung	357
4.3.3	Modellierung der $\text{SO}_x$ -Entstehung und Minderung	374
4.3.4	Wirbelschichtmodelle	390
4.3.5	Rostfeuerungsmodelle	407
4.4	CFD-Programmaufbau und Programmablauf	412
4.5	Einsatz von CFD bei der Bearbeitung von praktischen Aufgabenstellung	413
4.5.1	Mitverbrennung eines Abfallproduktes in einer Hauptfeuerung	414
4.5.2	Kohlebefeuerte Dampferzeuger	416
4.5.3	Braunkohlegefeuerte Dampferzeuger	417
4.5.4	Trockenbraunkohlebefeuerte Dampferzeuger	420
4.5.5	Steinkohlebefeuerte Dampferzeuger	427
4.5.6	Mühlensysteme	428
4.6	Simulation von hochbeladenen Strömungen (Wirbelschichten und pneumatischer Transport)	432
4.6.1	Beispiele zur DEM-Methode	432
4.6.2	Simulation einer Wirbelschichtanlage mithilfe der Euler-Euler-Methode	436
4.7	Simulation der Fluidströmung um ein Rippenrohr	439
4.8	Schwingungen im Luft- und Abgasstrom	442
4.8.1	Einleitung	442
4.8.2	Druckpulsationen in Brennkammern	442
4.8.3	Strömungserregte Schwingungen in Rohrbündeln	446
4.8.4	Abgasdruckschwingungen bei Ausfall der Feuerung	455
<b>5</b>	<b>Mineralumwandlung in Feuerungen</b>	<b>459</b>
5.1	Verschlackungs- und Verschmutzungskennzahlen und andere einfache Verfahren	459
5.1.1	Oxidische Ascheanalyse	460
5.1.2	Ascheschmelzverhalten	461
5.1.3	Andere Untersuchungsmethoden	461

5.2	Übersicht über Simulationsmodelle für Brennkammer- verschlackung .....	462
5.2.1	Simulationsmodelle mit angenäherten algebraischen Ausdrücken .....	462
5.2.2	Simulationsmodelle mit diskreten Methoden – CFD Strömungssimulation .....	463
5.3	Modellierung der Mineralumwandlung .....	468
5.3.1	Kohle- und Mineraleigenschaften .....	468
5.3.2	Grundlagen der Modellierung von Mineral- umwandlungen .....	470
5.3.3	Modellierung von Schmelzvorgängen und Reaktionen im flüssigen Zustand und Erstarrung am Beispiel der Eisenoxidation .....	477
5.4	Kopplung von Brennkammersimulation und Mineralumwandlung .....	484
5.4.1	Berechnungsschritte und Kopplungsverfahren .....	484
5.4.2	Modell für die Verteilung der Mineralien auf die Startpunkte der Partikelbahnen .....	487
5.4.3	Besonderheiten der numerischen Verfahren bei der Kopplung von Euler'scher und Lagrange'scher Betrachtungsweise .....	489
5.5	Modell der Haftung und Verschlackung .....	491
5.6	Simulation der Mineralumwandlung und Verschlackung .....	491
<b>6</b>	<b>Dampferzeugersimulation – Simulation der Wasser- und Dampfströmung .....</b>	<b>505</b>
6.1	Typen von Dampferzeugern .....	505
6.1.1	Naturumlaufdampferzeuger .....	507
6.1.2	Zwangumlaufdampferzeuger .....	511
6.1.3	Zwangdurchlaufdampferzeuger .....	512
6.1.4	Zwangdurchlaufdampferzeuger mit Vollastumwälzung ..	517
6.2	Stationäre Strömungsverteilung in den Rohren von Dampferzeugern .....	518
6.2.1	Modellierung der Rohrströmung .....	519
6.2.2	Modellierung der Sammler .....	521
6.2.3	Modellierung der Trommel .....	523
6.2.4	Verwaltung der Daten .....	525
6.2.5	Gleichungssystem und dessen Lösung .....	527
6.2.6	Beispiel einer Rohr-Sammler-Struktur .....	529
6.3	Instationäres Dampferzeugermodell .....	530
6.3.1	Rohrwandmodelle .....	530
6.3.2	Rohr-Sammler-Modell .....	539
6.3.3	Modell für die Trommel .....	545
6.3.4	Modell eines Einspritzkühlers .....	552

6.3.5	Anwendungsbeispiel für das instationäre Dampferzeugermodell .....	554
6.4	Strömungsinstabilitäten .....	557
6.4.1	Statische Strömungsinstabilitäten .....	558
6.4.2	Dynamische Strömungsinstabilitäten .....	577
<b>7</b>	<b>Kraftwerkssimulation – Modelle und Validierung .....</b>	<b>585</b>
7.1	Entwicklung der Kraftwerkssimulation und Übersicht .....	585
7.2	Stationäre Kraftwerkssimulation .....	588
7.2.1	Komponenten einer stationären Kraftwerkssimulation ..	588
7.2.2	Aufstellen und Lösen des impliziten algebraischen Gleichungssystems .....	599
7.2.3	Beispiel: Einfacher Dampfturbinenkreislauf (Rankine Cycle) .....	602
7.3	Instationäre Kraftwerkssimulation .....	608
7.3.1	Leistungsregelung von Dampfkraftwerken, Betriebsarten und Dampftemperaturregelung .....	608
7.3.2	Vereinfachte instationäre Kraftwerkssimulation mit analytischen Modellen .....	614
7.3.3	Detaillierte instationäre Kraftwerkssimulation .....	648
7.4	Überprüfung der Lösbarkeit des stationären Gleichungssystems und Validierung stationärer Messdaten ...	671
7.4.1	Lösbarkeit des Gleichungssystems stationärer Kraftwerkssimulationen .....	671
7.4.2	Validierung stationärer Messdaten von Kraftwerken ...	675
<b>8</b>	<b>Monitoring .....</b>	<b>689</b>
8.1	Betriebsmonitoring .....	689
8.1.1	Einleitung .....	689
8.1.2	Aufgaben, Umfang und Verfahren von Diagnose- systemen .....	690
8.1.3	Auflistung von Diagnoseaufgaben in konventionellen Dampfkraftwerken und Gas- und Dampfturbinen- Kombianlagen .....	693
8.1.4	Anforderungen an Diagnosesysteme im Kraftwerk ....	694
8.2	Lebensdauermonitoring .....	696
8.2.1	Problemstellung .....	696
8.2.2	Direkte Messung der Wandtemperaturdifferenz .....	697
8.2.3	Berechnung der Wandtemperaturdifferenz aus dem Verlauf einer Wandtemperatur .....	698
8.2.4	Bestimmung der Wandtemperaturdifferenz aus dem Verlauf der Dampftemperatur, des Dampfdruckes und des Dampfmassenstroms .....	698
8.2.5	Vergleich von Mess- und Rechenwerten .....	699

8.2.6	Bestimmung der Wandtemperaturdifferenz aus alleiniger Verwendung der Dampftemperatur- und Dampfdruckmessungen . . . . .	700
8.2.7	Vergleich von Mess- und Rechenwerten . . . . .	702
8.2.8	Spannungsanalyse und Lebensdauerverbrauch . . . . .	702
8.3	Überwachung des Verschmutzungszustandes von Heizflächen und Rußbläsersteuerung . . . . .	705
8.3.1	Grundlagen . . . . .	705
8.3.2	Anwendungen . . . . .	705
8.4	Online-Optimierung von Feuerungen . . . . .	706
8.4.1	Problemstellung . . . . .	706
8.4.2	Schallpyrometrie . . . . .	706
8.4.3	Fourierreihenentwicklung . . . . .	708
8.4.4	Algebraic Reconstruction Technique (ART) . . . . .	709
8.4.5	Vergleich mit Messungen aus der Absaugepyrometrie . . . . .	710
8.4.6	Optimierung der Verbrennung durch Schallpyrometrie und BK-Simulation bzw. durch ein neuronales Netzwerk . . . . .	712
8.5	Aufgaben eines Monitoring-, Schutz- und Regelsystems für Turbomaschinen . . . . .	713
<b>9</b>	<b>Ergebniskontrolle, Genauigkeit und Auswertung . . . . .</b>	<b>719</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>725</b>
	<b>Glossar . . . . .</b>	<b>793</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>801</b>