

Autorenverzeichnis	IX
--------------------------	----

Symbolverzeichnis	XXI
-------------------------	-----

1 Einleitung	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
2 Umwandlung und Transport von Masse, Energie, Impuls und Stoffen	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 - ε 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	Roseland-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
3	Numerische Methoden	159
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

4	Simulation der Feuerung und Gasströmung	321
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 NO_x -Entstehung und deren Minderung	357
4.3.3	Modellierung der 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
5	Mineralumwandlung in Feuerungen	459
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
6	Dampferzeugersimulation – Simulation der Wasser- und Dampfströmung	505
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
7	Kraftwerkssimulation – Modelle und Validierung	585
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
8	Monitoring	689
8.1	Betriebsmonitoring	689
8.1.1	Einleitung	689
8.1.2	Aufgaben, Umfang und Verfahren von Diagnosesystemen	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 Dampf- temperatur- 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
9	Ergebniskontrolle, Genauigkeit und Auswertung	719
	Literaturverzeichnis	725
	Glossar	793
	Sachverzeichnis	801