

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Beispiele und Definitionen	2
1.1.1	Einführende Demonstration	2
1.1.2	Modellierung und Simulation in der Strömungsmechanik	5
1.1.3	Strömungsphänomene in Rohrkrümmern	7
1.1.4	Vorbereitung und Durchführung	11
1.1.5	Geschichte	18
1.2	Einführende Beispiele	21
1.2.1	Naturkonvektionsströmung in einem Behälter	21
1.2.2	Die Blasenfahne	26
1.2.3	Thermische Vermischung stromab eines Rohrleitungs-T-Stücks	29
	Literatur	33
2	Vorgehensweise	37
2.1	Physikalische Beschreibung	37
2.1.1	Kontinuumsmechanik	37
2.1.2	Fluide und ihre Eigenschaften	39
2.1.3	Kompressibilität einer Gasströmung	43
2.1.4	Thermische Instabilität der horizontalen Fluidschicht	45
2.1.5	Turbulenz	47
2.1.6	Dimensionsanalyse	49
2.2	Mathematische Formulierung	54
2.2.1	Eigenschaften von Differentialgleichungen	55
2.2.2	Eindimensionale Grundgleichungen der Stromfadentheorie	58
2.2.3	Vereinfachte Ableitung der Navier-Stokes-Gleichungen	60
2.2.4	Randbedingungen	65
2.2.5	Analytische Lösungen	68
2.2.6	Navier-Stokes-Gleichungen für kompressible Strömung	70
2.2.7	Eindimensionale Stoßausbreitung	72

2.3	Diskretisierung	76
2.3.1	Numerische Ableitungsbildung	76
2.3.2	Zeitdiskretisierung	79
2.3.3	Das Einschrittverfahren mit zentralen Differenzen	84
2.3.4	Lax-Wendroff-Verfahren	89
2.3.5	Finite-Differenzen-Methode für die Poisson-Gleichung	93
2.3.6	DuFort-Frankel-Differenzenverfahren	97
2.3.7	SIMPLE-Methode zur Druckberechnung	103
2.3.8	Grundlagen der Finite-Volumen-Methode	105
2.3.9	Metrikkoeffizienten	111
2.3.10	Finite-Volumen-Methode zur Lösung der Poisson-Gleichung	113
2.4	Koordinatentransformation und Netzgenerierung	115
2.4.1	Klassifikation numerischer Netze	116
2.4.2	Generierung strukturierter Netze	123
2.4.3	Transformation auf krummlinige Koordinaten	126
2.4.4	Generierung unstrukturierter Netze	129
2.4.5	Netzadaption	132
2.4.6	Bewegte Netze	135
2.5	Beispiele Numerischer Methoden	136
2.5.1	Runge-Kutta-Finite-Volumen-Methode	136
2.5.2	Semi-Implizite Finite-Volumen-Methode	143
2.5.3	Taylor-Galerkin-Finite-Elemente-Methode	147
	Literatur	157
3	Grundgleichungen und Modelle	159
3.1	Beschreibung auf Molekülebene	160
3.1.1	Gaskinetische Simulationsmethode	160
3.1.2	Lattice-Boltzmann-Methode	165
3.2	Laminare Strömungen	166
3.2.1	Hierarchie der Grundgleichungen	166
3.2.2	Die Euler-Gleichungen der Gasdynamik	168
3.2.3	Potenzialgleichung	171
3.2.4	Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Strömung	174
3.3	Turbulente Strömungen	177
3.3.1	Direkte Numerische Simulation	177
3.3.2	Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen	183
3.3.3	Prandtl'sches Mischungswegmodell	186
3.3.4	Algebraische Turbulenzmodelle	192
3.3.5	Zweigleichungs-Transportmodelle	194
3.3.6	Reynoldsspannungsmodelle	199
3.3.7	Klassifikation von Turbulenzmodellen	203
3.3.8	Grobstruktursimulation	204

3.4	Zweiphasenströmungen	208
3.4.1	Klassifikation von Zweiphasenströmungen	208
3.4.2	Euler-Lagrange-Methode	210
3.4.3	Homogenes Modell	217
3.4.4	Zwei-Fluid-Formulierung für Zweiphasenströmungen	220
3.4.5	Modelle für Blasenströmungen	226
	Literatur	230
4	Qualität und Genauigkeit	233
4.1	Anforderungen	233
4.1.1	Fehler und Genauigkeit	234
4.1.2	Anforderungen der Strömungsphysik	235
4.1.3	Anforderungen des Ingenieurwesens	237
4.2	Numerische Fehler und Verifikation	239
4.2.1	Rundungsfehler	239
4.2.2	Diskretisierungsfehler	242
4.2.3	Numerische Diffusion	244
4.2.4	Netzverfeinerungsstudie: seitlich beheizter Behälter	245
4.3	Modellfehler und Validierung	247
4.3.1	Vergleich integraler Parameter	247
4.3.2	Detaillierter Vergleich mit Modellexperimenten	248
	Literatur	268
5	Anwendungsbeispiele	269
5.1	Strömungen mit Wärmetransport	269
5.1.1	Konvektionsströmung in einem Behälter	270
5.1.2	Wärmeübergang eines Heizstabs in einem Kanal	271
5.1.3	Beheizte Rohrströmung mit superkritischem Kohlendioxid	273
5.2	Mehrphasenströmungen	274
5.2.1	Gravitationsgetriebene zweiphasige Rohrströmung	274
5.2.2	Kondensation oberhalb eines Kühlturms	275
5.3	Vermischungsvorgänge	276
5.3.1	Auflösung einer Dichteschichtung	276
5.3.2	Durchmischung von Gasen unterschiedlicher Temperaturen	278
5.3.3	Ausbreitung von Wasserdampf im Kernkraftwerks-Sicherheitsbehälter	279
5.4	Aerodynamik	280
5.4.1	Kraftfahrzeugumströmung	281
5.4.2	Umströmung eines Rennwagens	284
5.4.3	Transsonischer Tragflügel	285

5.5	Bioströmungsmechanik	286
5.5.1	Vogelflug	287
5.5.2	Strömung im Herzen	289
5.5.3	Wellenpumpe	293
	Literatur	297
6	Fragenkatalog	299
6.1	Vorlesung „Numerische Strömungssimulation“	299
6.2	Vorlesung „Methoden der Numerischen Strömungssimulation“	315
6.3	Vorlesung „Modellierung von Zweiphasenströmungen“	323
	Sachverzeichnis	325