

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Beispiele und Definitionen	1
1.1.1	Einführende Demonstration	1
1.1.2	Modellierung und Simulation in der Strömungsmechanik	5
1.1.3	Strömungsphänomene in Rohrkrümmern	7
1.1.4	Vorbereitung und Durchführung	9
1.1.5	Geschichte	14
1.2	Einführende Beispiele	17
1.2.1	Naturkonvektionsströmung in einem Behälter	17
1.2.2	Die Blasenfahne	21
2	Vorgehensweise	25
2.1	Physikalische Beschreibung	25
2.1.1	Kontinuumsmechanik	25
2.1.2	Fluide und ihre Eigenschaften	26
2.1.3	Kompressibilität einer Gasströmung	29
2.1.4	Thermische Instabilität der horizontalen Fluidschicht	31
2.1.5	Turbulenz	32
2.1.6	Dimensionsanalyse	34
2.2	Mathematische Formulierung	38
2.2.1	Eigenschaften von Differentialgleichungen	38
2.2.2	Eindimensionale Grundgleichungen der Stromfadentheorie	42
2.2.3	Vereinfachte Ableitung der Navier-Stokes-Gleichungen	44
2.2.4	Randbedingungen	49
2.2.5	Analytische Lösungen	51
2.2.6	Navier-Stokes-Gleichungen für kompressible Strömung	54
2.2.7	Eindimensionale Stoßausbreitung	56
2.3	Diskretisierung	59
2.3.1	Numerische Ableitungsbildung	60
2.3.2	Zeitdiskretisierung	63
2.3.3	Das Einschrittverfahren mit zentralen Differenzen	68
2.3.4	Lax-Wendroff-Verfahren	73
2.3.5	Finite-Differenzen-Methode für die Poissongleichung	77

2.3.6	DuFort-Frankel-Differenzenverfahren	81
2.3.7	SIMPLE-Methode zur Druckberechnung	86
2.3.8	Grundlagen der Finite-Volumen-Methode	88
2.3.9	Metrikkoeffizienten	94
2.3.10	Finite-Volumen-Methode zur Lösung der Poissongleichung	96
2.4	Koordinatentransformation und Netzgenerierung	99
2.4.1	Klassifizierung numerischer Netze	99
2.4.2	Generierung strukturierter Netze	106
2.4.3	Transformation auf krummlinige Koordinaten	109
2.4.4	Generierung unstrukturierter Netze	112
2.4.5	Netzadaption	116
2.4.6	Bewegte Netze	119
2.5	Beispiele Numerischer Methoden	119
2.5.1	Runge-Kutta-Finite-Volumen-Methode	120
2.5.2	Semi-Implicite Finite-Volumen-Methode	126
2.5.3	Taylor-Galerkin-Finite-Elemente-Methode	130
2.6	Simulationsprogramme	138
2.6.1	Übersicht	139
2.6.2	Das Rechenprogramm Ansys-CFX	140
3	Grundgleichungen und Modelle	143
3.1	Beschreibung auf Molekülebene	143
3.1.1	Gaskinetische Simulationemethode	143
3.1.2	Lattice-Boltzmann-Methode	148
3.2	Laminare Strömungen	149
3.2.1	Hierarchie der Grundgleichungen	150
3.2.2	Die Euler-Gleichungen der Gasdynamik	151
3.2.3	Potentialgleichungen	155
3.2.4	Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Strömung	158
3.3	Turbulente Strömungen	161
3.3.1	Direkte Numerische Simulation	161
3.3.2	Reynoldsgleichungen für turbulente Strömungen	166
3.3.3	Prandtl'sches Mischungswegmodell	169
3.3.4	Algebraische Turbulenzmodelle	175
3.3.5	Zweigleichungs-Transportmodelle	176
3.3.6	Reynoldsspannungsmodelle	181
3.3.7	Klassifikation von Turbulenzmodellen	185
3.3.8	Grobstruktursimulation	186

3.4	Zweiphasenströmungen	190
3.4.1	Klassifikation von Zweiphasenströmungen	191
3.4.2	Euler-Lagrange-Methode	192
3.4.3	Homogenes Modell	199
3.4.4	Zwei-Fluid-Formulierung für Zweiphasenströmungen	202
3.4.5	Modelle für Blasenströmungen	207
4	Qualität und Genauigkeit	213
4.1	Anforderungen	213
4.1.1	Fehler und Genauigkeit	213
4.1.2	Anforderungen der Strömungsphysik	214
4.1.3	Anforderungen des Ingenieurwesens	216
4.2	Numerische Fehler und Verifikation	218
4.2.1	Rundungsfehler	218
4.2.2	Diskretisierungsfehler	221
4.2.3	Numerische Diffusion	223
4.2.4	Netzverfeinerungsstudie	224
4.3	Modellfehler und Validierung	225
4.3.1	Vergleich integraler Parameter	225
4.3.2	Detaillierter Vergleich mit Modellexperimenten	226
5	Anwendungsbeispiele	239
5.1	Strömungen mit Wärmetransport	239
5.1.1	Konvektionsströmung in einem Behälter	239
5.1.2	Wärmeübergang eines Heizstabs in einem Kanal	241
5.1.3	Thermische Vermischung in einer Rohrleitung	242
5.2	Mehrphasenströmungen	244
5.2.1	Gravitationsgetriebene zweiphasige Rohrströmung	244
5.2.2	Wassermittliss bei gegengerichteter Schichtenströmung	245
5.2.3	Tragflügel in einem Kanal	246
5.3	Energietechnik	247
5.3.1	Strömung in einem großen Behälter mit Einbauten	247
5.3.2	Auflösung einer Dichteschichtung	248
5.3.3	Durchmischung von Gasen unterschiedlicher Temperaturen	250
5.4	Maschinenbau und Verfahrenstechnik	251
5.4.1	Strömung durch einen Rückstrombegrenzer	251
5.4.2	Drehschieberpumpe	252
5.4.3	Helteejektor einer Handhabungsroboters	253

5.5	Aerodynamik	254
5.5.1	Kraftfahrzeugumströmung	254
5.5.2	Motorradumströmung	258
5.5.3	Transsonischer Tragflügel	259
6	Ausgewählte Literatur	261
7	Fragenkatalog	265
	Wiederholungs- und Verständnisfragen für Nachbearbeitung und Prüfungsvorbereitung	
8	Sachwortverzeichnis	289