

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	59
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 Poissons-Gleichung	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. Metrikoeffizienten	94
2.3.10. Finite-Volumen-Methode zur Lösung der Poissons-Gleichung	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-Implizite 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 Molekül ebene	143
3.1.1. Gaskinetische Simulationsmethode	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	174
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	247
5.1. Strömungen mit Wärmetransport.....	247
5.1.1. Konvektionsströmung in einem Behälter	247
5.1.2. Wärmeübergang eines Heizstabs in einem Kanal	249
5.1.3. Thermische Vermischung in einer Rohrleitung	250
5.1.4. Stabbündelströmung	252
5.2. Mehrphasenströmungen	254
5.2.1. Gravitationsgetriebene zweiphasige Rohrströmung	254
5.2.2. Wassermittriss bei gegengerichteter Schichtenströmung.....	255
5.2.3. Tragflügel in einem Kanal	256
5.3. Energietechnik	257
5.3.1. Strömung in einem großen Behälter mit Einbauten	257
5.3.2. Auflösung einer Dichteschichtung	258
5.3.3. Durchmischung von Gasen unterschiedlicher Temperaturen	260
5.4. Maschinenbau und Verfahrenstechnik	261
5.4.1. Strömung durch einen Rückstrombegrenzer.....	261
5.4.2. Drehschieberpumpe	262
5.4.3. Helteejektor einer Handhabungsroboters	263
5.5. Aerodynamik.....	264
5.5.1. Kraftfahrzeugumströmung.....	264

5.5.2. Motorradumströmung	268
5.5.3. Transsonischer Tragflügel	269
5.6. Bioströmungsmechanik	270
5.6.1. Vogelflug	270
5.6.2. Strömung im Herzen	272
5.6.3. Wellenpumpe	277
6. Ausgewählte Literatur	281
7. Fragenkatalog	285
Wiederholungs- und Verständnisfragen für Nachbearbeitung und Prüfungsvorbereitung	
8. Sachwortverzeichnis.....	309