

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Beispiele und Definitionen</b>	<b>1</b>
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
<b>1.2. Einführende Beispiele</b>	<b>17</b>
1.2.1. Naturkonvektionsströmung in einem Behälter	17
1.2.2. Die Blasenfahne	21
<b>2. Vorgehensweise</b>	<b>25</b>
<b>2.1. Physikalische Beschreibung</b>	<b>25</b>
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
<b>2.2. Mathematische Formulierung</b>	<b>38</b>
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
<b>2.3. Diskretisierung</b>	<b>59</b>
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 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
<b>2.4. Koordinatentransformation und Netzgenerierung .....</b>	<b>99</b>
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
<b>2.5. Beispiele Numerischer Methoden .....</b>	<b>119</b>
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
<b>2.6. Simulationsprogramme .....</b>	<b>138</b>
2.6.1. Übersicht.....	139
2.6.2. Das Rechenprogramm Ansys-CFX .....	140
<b>3. Grundgleichungen und Modelle.....</b>	<b>143</b>
<b>3.1. Beschreibung auf Molekülebene .....</b>	<b>143</b>
3.1.1. Gaskinetische Simulationemethode .....	143
3.1.2. Lattice-Boltzmann-Methode .....	148
<b>3.2. Laminare Strömungen .....</b>	<b>149</b>
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
<b>3.3. Turbulente Strömungen .....</b>	<b>161</b>
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
<b>3.4. Zweiphasenströmungen.....</b>	<b>190</b>
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
<b>4. Qualität und Genauigkeit .....</b>	<b>213</b>
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
<b>5. Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>247</b>
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. Wassermittels 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
<b>5.6. Bioströmungsmechanik .....</b>	<b>270</b>
5.6.1. Vogelflug .....	270
5.6.2. Strömung im Herzen .....	272
5.6.3. Wellenpumpe .....	277
<b>6. Ausgewählte Literatur .....</b>	<b>281</b>
<b>7. Fragenkatalog .....</b>	<b>285</b>
Wiederholungs- und Verständnisfragen für Nachbearbeitung und Prüfungsvorbereitung	
<b>8. Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>309</b>