

Eckart Laurien | Herbert Oertel jr.

Numerische Strömungsmechanik

Grundgleichungen und Modelle – Lösungsmethoden –
Qualität und Genauigkeit

3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 190 Abbildungen und
über 320 Wiederholungs- und Verständnisfragen

STUDIUM



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 Differenzialgleichungen	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 Poisson-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 Poisson-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 Numerische 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	Modellierung 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	Potenzialgleichung	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	Zweigliedrige-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	231
5.1	Gravitationsgetriebene zweiphasige Rohrströmung	232
5.2	Strömung durch einen Rückstrombegrenzer	233
5.3	Durchmischung von Gasen unterschiedlicher Temperaturen	234
5.4	Strömung in einem großen Behälter mit Einbauten	235
5.5	Wassermittels bei gegengerichteter Schichtenströmung	236
5.6	Tragflügel in einem Kanal	237
5.7	Volumenstrommessung mit einem Staukörper	238
5.8	Ejektor eines Handhabungsroboter	239
	Bezeichnungen	241
	Ausgewählte Literatur	247
	Fragenkatalog	251
	für die Nachbearbeitung und Prüfungsvorbereitung	
	Sachwortverzeichnis	269