

Inhaltsverzeichnis

Erklärung der Zeichen und Abkürzungen	X
1 Die numerische Simulation – eine Schlüsseltechnologie für die Zukunft	1
1.1 Experiment, Modellbildung und Simulation	1
1.2 Fluide und Strömungen	5
1.3 Numerische Simulation von Strömungen	8
2 Die mathematische Beschreibung von Strömungen	11
2.1 Das mathematische Modell: Die Navier-Stokes-Gleichungen	11
2.2 Die Herleitung der Navier-Stokes-Gleichungen	14
2.2.1 Die Erhaltung der Masse	15
2.2.2 Die Erhaltung des Impulses	16
2.3 Dynamische Ähnlichkeit von Strömungen	18
3 Zur numerischen Behandlung der Navier-Stokes-Gleichungen	21
3.1 Die Diskretisierung	21
3.1.1 Einfache Diskretisierungsformeln	21
3.1.2 Die Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen	26
3.2 Der Algorithmus	33
3.2.1 Die Zeitschleife	33
3.2.2 Die diskreten Impulsgleichungen	35
3.2.3 Die Poissongleichung für den Druck	36
3.2.4 Die Stabilitätsbedingung	40
3.2.5 Zusammenfassung	41
3.3 Implementierung	41
3.3.1 Die Problemgrößen und Datenstrukturen	41
3.3.2 Das Programm	44
3.3.3 Hinweise zum modularen Programmieren	45
3.4 Behandlung allgemeiner Geometrien	47
3.4.1 Die Einführung von Hindernisgebieten	47
3.4.2 Implementierung	50
4 Visualisierungstechniken	53
4.1 Standardtechniken	53
4.1.1 Reellwertige Funktionen	53
4.1.2 Vektorwertige Funktionen	54
4.1.3 Graphik-Werkzeuge und -Standards	55
4.1.4 Implementierung	56

4.2	Strömungsvisualisierung mittels Partikelverfolgung und Streichlinien . . .	57
4.2.1	Interpolation der Geschwindigkeiten im versetzten Gitter	57
4.2.2	Implementierung	59
4.3	Die Stromfunktion ψ und die Wirbelstärke ζ	63
4.3.1	Definition und Interpretation	63
4.3.2	Implementierung	66
4.3.3	Die ψ - ζ -Formulierung der Navier-Stokes-Gleichungen	67
5	Anwendungsbeispiele	69
5.1	Nischenströmung	69
5.2	Strömung über eine Stufe	78
5.3	Umströmung eines Hindernisses	80
5.4	Rohrverzweigung	83
5.5	Durchströmung komplizierter Geometrien	84
5.6	Fluid-Struktur-Wechselwirkung	86
6	Freie Randwertprobleme	89
6.1	Die Bestimmung der Gebietsform	89
6.2	Die Bedingungen am freien Rand	92
6.3	Der erweiterte Algorithmus	99
6.4	Implementierung	100
7	Anwendungsbeispiele für freie Randwertprobleme	103
7.1	Der brechende Damm	103
7.2	Der fallende Tropfen	103
7.3	Stufenströmung mit freier Oberfläche	105
7.4	Spritzguß	107
7.5	Vorhangbeschichtung	109
8	Parallelisierung	111
8.1	Parallelrechner und Programmierumgebungen	111
8.2	Gebietszerlegung als Parallelisierungsstrategie	113
8.3	Parallelisierung des Strömungsprogramms	115
8.4	Implementierung auf einem Netzwerk von Arbeitsplatzrechnern unter PVM	119
8.5	Leistungsmessung	123
9	Energietransport	125
9.1	Erweiterung des mathematischen Modells um die Energiegleichung . . .	125
9.2	Herleitung der Energiegleichung	130
9.3	Zur Gültigkeit der Boussinesq-Approximation	132
9.4	Diskretisierung der Energiegleichung und Erweiterung des Algorithmus .	134
9.5	Implementierung	138
9.6	Visualisierung des Wärmetransports	139

9.7	Anwendungsbeispiele	140
9.7.1	Natürliche Konvektion bei beheizten Seitenwänden	140
9.7.2	Auftriebsströmung: Rayleigh-Bénard-Strömung	143
9.7.3	Fluidfalle	148
9.8	Transport chemischer Stoffe	150
9.8.1	Modellierung und Diskretisierung	150
9.8.2	Implementierung	151
9.8.3	Anwendungsbeispiel	152
10	Turbulenz	155
10.1	Turbulente Strömungen	155
10.2	Turbulenzmodellierung	157
10.2.1	Die direkte numerische Simulation und ihre Grenzen	157
10.2.2	Grundlagen der Turbulenzmodellierung	159
10.2.3	Das k - ε -Turbulenzmodell	162
10.2.4	Randbedingung beim k - ε -Modell	164
10.2.5	Ausblick auf weitere Turbulenzmodelle	166
10.3	Diskretisierung des k - ε -Modells	166
10.4	Implementierung	170
10.5	Numerische Ergebnisse	172
11	Erweiterung auf den dreidimensionalen Fall	176
11.1	Die kontinuierlichen Gleichungen	176
11.2	Diskretisierung und Algorithmus	177
11.3	Erweiterungen und Modifikationen	179
11.4	Beispiele für die 3D-Simulation	180
11.4.1	Modellprobleme	180
11.4.2	Bespiele aus Umwelt, Architektur und Technik	184
11.4.3	Beispiele zu freien Randwertaufgaben	189
11.4.4	Beispiele von temperaturgetriebenen Strömungen	191
12	Abschließende Bemerkungen	196
A	Hinweise zur Parallelisierung mit PVM	198
B	Thermophysikalische Stoffgrößen	201
	Literaturverzeichnis	204
	Sachwortverzeichnis	216