

Herbert Oertel Jr. • Eckart Laurien

# Numerische Strömungsmechanik

Mit 111 Abbildungen



Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	
<b>2</b>	<b>Strömungsprobleme</b>	9
2.1.	Luftfahrt	9
2.2	Kraftfahrzeugtechnik	14
2.3	Strömungsmaschinen	17
2.4	Strömungen mit Wärmeübergang	19
<b>3</b>	<b>Grundgleichungen der Strömungsmechanik</b>	22
3.1	Hierarchie der Grundgleichungen	22
3.2	Navier Stokes Gleichungen	31
3.2.1	Navier-Stokes Gleichungen in Erhaltungsforn	31
3.2.2	Euler-Gleichungen	35
3.2.3	Potentialgleichung	36
3.2.4	Boussinesq-Gleichungen	38
3.2.5	Inkompressible Navier-Stokes Gleichungen	40
3.2.6	Stokes-Gleichungen	42
3.2.7	Thin-Layer Navier-Stokes Gleichungen	42
3.2.8	Parabolisierte Navier-Stokes Gleichungen	44
3.2.9	Grenzschichtgleichungen	46
3.3	Reynoldsgleichungen	48
3.3.1	Reynoldsgleichungen in Erhaltungsforn	48
3.3.2	Baldwin-Lomax Modell	51
3.3.3	Prandtl'sches Eingleichungsmodell	53
3.3.4	$k$ - $\epsilon$ Modell	54
3.3.5	Andere Turbulenzmodelle	55
3.4	Störungs-Differentialgleichungen	57
3.4.1	Primäre Störungsdifferentialgleichungen	59
3.4.2	Orr-Sommerfeld Gleichung	64
3.4.3	Sekundäre Störungsdifferentialgleichungen	65
3.5	Auswahl der Grundgleichungen	66
<b>4</b>	<b>Diskretisierung</b>	74
4.1	Grundlagen	74
4.1.1	Geometriedefinition	76
4.1.2	Netzgenerierung	82
4.1.3	Diskretisierung im Raum	86
4.1.4	Zeitdiskretisierung	101
4.1.5	Fehler arten	105

4.1.6	Lösung von Gleichungssystemen	107
4.2	Konvergenz, Konsistenz und Stabilität	115
4.2.1	Verhalten des numerischen Fehlers	115
4.2.2	Nachweis der Konvergenz	118
4.2.3	Verifikation und Validierung	121
4.2.4	Nachweis der Stabilität	122
4.3	Methoden zur Netzgenerierung	127
4.3.1	Kartesische Netze mit Verdichtung	127
4.3.2	Interpolationsmethodc	129
4.3.3	Transfinite Interpolation	131
4.3.4	Schießverfahren	133
4.3.5	Delaunay-Triangularisierung	134
4.3.6	Front-Generierungsmethode	138
; 4.3.7	Netzadaption	140
<b>I^urnerische Lösungsmethoden</b>		<b>142</b>
5.1	Finite-Differenzen Methoden (FDM)	142
5.1.1	Du Fort- Frankel Verfahren	142
5.1.2	Lax-Wendroff- und MacCormack-Verfahren	150
5.1.3	Beam und Warming Verfahren	162
5.2	Finite-Volumen Methoden (FVM)	168
5.2.1	Finite-Volumen Runge-Kutta Verfahren	168
5.2.2	Semi implizites Verfahren	176
5.2.3	Hochauflösendes Finite-Volumen Verfahren	186
5.3	Finite-Elemente Methoden (FEM)	195
5.3.1	Taylor-Galerkin Finite-Elemente Methode	195
5.3.2	Finite-Elemente Methode für inkompressible Strömungen	205
5.4	Spektralmethoden (SM)	212
5.4.1	Tschebyscheff-Matrixmethode	212
5.4.2	Fourier-Spektralmethode	217
<b>Rechnerarchitekturen und Rechentechnik</b>		<b>224</b>
6.1	Rechnerarchitekturen	224
6.1.1	Entwicklung der Rechanlagen und Datennetze	224
6.1.2	Grundbegriffe	226
6.1.3	Einteilung der Rechanlagen	228
6.2	Programmierung von Vektorrechnern	231
6.2.1	Grundlagen	231
6.2.2	Vektorisieren von Programmen	233
6.3	Programmierung von Parallelrechnern	237
6.3.1	Parallele Sprachelemente	237
6.3.2	Gebietszerlegungsmethode	239

<b>7</b>	<b>Beispiel-Lösungen und Lösungsansätze</b>	<b>244</b>
7.1	Flugzeugtragflügel	244
7.2	Kraftfahrzeugumströmung	252
7.3	Verdichtergitter	256
7.4	Konvektionsströmung	257
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>261</b>
8.1	Programmkonzept	261
8.2	Programmbeispiele	267
8.2.1	Netzgenerator	268
8.2.2	Parallelprogramm für Workstation-Cluster	271
8.3	Computerfilm	275
	<b>Ausgewählte Literatur</b>	<b>277</b>
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>281</b>