

W. ALBRING

# ANGEWANDTE STRÖMUNGSLEHRE

# Angewandte Strömungslehre

Von

**WERNER ALBRING**

5., durchgesehene Auflage

Mit 434 Abbildungen, Tabellen und Tafeln



Akademie-Verlag · Berlin 1978

# Inhaltsverzeichnis

172/2749 INSTITUT  
 FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE  
 UNIVERSITÄT HANNOVER  
 HERRENHAUSER STR. 2 • 3000 HANNOVER 21

1. Überblick zu den Anwendungen und Methoden der Strömungslehre	1		
2. Statik der Flüssigkeiten und Gase	5	2.1. Der hydrostatische Spannungszustand	5
		2.2. Grundaufgaben der Hydrostatik	6
		2.3. Ausnutzung von Druckunterschieden	7
3. Elementare Verfahren zum Berechnen von Strömungen	8	3.1. Die Gleichungen von EULER und BERNOULLI für stationäre reibungsfreie Strömungsvorgänge	8
		3.2. Anwendungen der Bernoullischen Gleichung	9
		3.3. Die Kontinuitätsgleichung	14
		3.4. Instationäre Strömungsvorgänge	18
		3.5. Der Impulssatz	22
		3.6. Dimensionslose Druckwerte	28
4. Die zweidimensionale Strömung	31	4.1. Einleitung	31
		4.2. Die Gleichung der Drehungsfreiheit	32
		4.3. Die Differentialgleichung von LAPLACE	35
		4.4. Die physikalische Bedeutung der Funktionen $\Phi$ und $\Psi$	37
		4.5. Die Potentialströmung um einen Kreiszyylinder	37
		4.6. Die Differentialgleichungen für $\Phi$ und $\Psi$ bei rotationssymmetrischer Strömung	39
5. Das Singularitätenverfahren	42	5.1. Untersuchung ebener Grundströmungen	42
		5.2. Rotationssymmetrische Grundströmungen	53
		5.3. Aufbau von umströmten Körpern aus Singularitäten	54
6. Kraftwirkung an Singularitäten bei Überlagerung einer Parallelströmung	63		
7. Berechnung der Druckverteilung von Tragflügeln	66	7.1. Belegung der Sehne mit Singularitäten	66
		7.2. Belegung der Profilkontur mit Wirbeln	71
		7.3. Zusammenfassung und qualitative Beurteilung der Profilparameter bei $Re > 10^5$	73

8. Konforme Abbildung	77	8.1. Grundlagen	77
		8.2. Abbildung nach JOUKOWSKI	78
		8.3. Einige andere Abbildungsverfahren	82
9. Tragflügelprofile mit endlicher Breite	92	9.1. Berechnung der induzierten Abwärts- geschwindigkeit	92
		9.2. Die Kraftbeiwerte des endlichen Trag- flügels	95
		9.3. Darstellung von Kraftmessungen an Tragflügeln	97
		9.4. Anwendungen des Tragflügels	98
10. Die Wellenbewegung an freier Flüssigkeits- oberfläche	103		
11. Kapillarität, Kavitation und räumliche Strömungen	108	11.1. Kapillarität und Oberflächenspannung	108
		11.2. Kavitation	111
		11.3. Räumliche Strömungen	115
		11.4. Windkanäle zum Aufmessen ebener und räumlicher Strömungen	120
12. Analogien zur ebenen hydrodynamischen Strömung	123	12.1. Seifenhautanalogie	123
		12.2. Gemeinsame Ableitung für weitere Ana- logien zur ebenen Strömung	128
		12.3. Die Wärmeleitung	130
		12.4. Die Sickerströmung	130
		12.5. Das elektrodynamische Feld	133
		12.6. Der elektrolytische Trog	133
		12.7. Bestimmung der Geschwindigkeitsvertei- lung auf Einzelprofilen und geraden Flügelgittern unter Benutzung des elek- trolytischen Troges	134
		12.8. Elektromagnetisches Feld	135
13. Die Grundlagen der Gasdynamik	138	13.1. Einleitung	138
		13.2. Bernoulligleichung und Kontinuitäts- gleichung der kompressiblen Strömungen	142
		13.3. Die Schallgeschwindigkeit und die Mach- zahl	144
		13.4. Die Schallausbreitung	146
		13.5. Dimensionslose Beziehungen zwischen Druck, Dichte, Temperatur und Mach- zahl	147
		13.6. Die Stromdichte	151
		13.7. Düsen und Diffusoren im Unter- und Überschallbereich	152
14. Zustandsänderungen mit Entropiezuwachs	159	14.1. Verzögerte oder beschleunigte Gasströ- mung in Rohren konstanten Querschnitts	159
		14.2. Der Verdichtungsstoß	160
		14.3. Ableitung der Hauptgleichungen des senkrechten Stoßes	162
		14.4. Der schräge Verdichtungsstoß	164
		14.5. Diffusoren, die mit aufeinanderfolgenden schwachen Stößen arbeiten	169
		14.6. Fortpflanzungsgeschwindigkeit von Stoß- wellen	170

15. Anwendung der eindimensionalen Strömung bei Schaufelgittern	173		
16. Zweidimensionale ebene gasdynamische Strömung	180	16.1. Ableitung der Potentialgleichung	180
		16.2. Die linearisierte Strömung	182
17. Strömungen mit Unterschallgeschwindigkeit	184	17.1. Linearisierung nach der Prandtl'schen Regel	184
		17.2. Optische Meßverfahren in der Gasdynamik	187
		17.3. Meßergebnisse über das Verhalten von schlanken Tragflügeln bei Unterschallgeschwindigkeit	189
		17.4. Das Verhalten von Flügelgittern bei hoher Unterschallgeschwindigkeit	195
		17.5. Verdichtungsstoß und Kondensation	198
18. Die Expansion einer Überschallströmung	204	18.1. Die Abhängigkeit $M^*(\vartheta)$	205
		18.2. Die Darstellung $M^*(\alpha_M)$	208
		18.3. Ermittlung der Geschwindigkeit im ebenen Überschallfeld bei beliebigen Randbedingungen	209
19. Gerade Schaufelgitter für Überschallströmung	217		
20. Geometrisches Verfahren zur Entwicklung von Flügelgittern für hydrodynamische Strömung und für Unterschallströmung	223	20.1. Ausblick auf verbesserte Näherungen	231
21. Reibungsbehaftete Strömungsvorgänge	237	21.1. Einleitung	237
		21.2. Ableitung der Bernoullischen Gleichung mit „Verlustglied“	238
		21.3. Maßeinheiten der Zähigkeit	239
		21.4. Ähnlichkeitsbetrachtungen für reibungsbehaftete Strömung	240
		21.5. Die Strömung im kreiszylindrischen Rohr bei kleinen Reynoldszahlen (Hagen-Poiseuille-Strömung)	244
		21.6. Meßergebnisse über den Druckabfall in kreiszylindrischen Rohren	246
		21.7. Übertragung der Kurven $\lambda = f(\text{Re})$ für glatte kreiszylindrische Rohre auf andere Querschnittsformen	249
		21.8. Berechnung der laminaren Strömung im ebenen Spalt	249
		21.9. Gemessene Widerstandsbeiwerte beim Durchströmen von Kontaktkörpersäulen	250
		21.10. Einige gemessene Widerstandsbeiwerte von Durchströmteilen	253
		21.11. Eine Beziehung zwischen Gefälle $i$ eines Gerinnes sowie $c$ , $A/U$ und $\lambda$	263
		21.12. Verzweigung von Kanälen und Rohrleitungen	264
		21.13. Der Diffusor	264
		21.14. Gasdynamische Rohrströmung mit Reibung	274

22. Mehrdimensionale reibungsbehaftete Strömungsvorgänge	281	22.1. Die Navier-Stokesschen Gleichungen	281
		22.2. Die zeitliche Abnahme der Umfangsgeschwindigkeit eines Wirbels in zähigkeitsbehafteter Strömung	285
		22.3. Numerische Integration für rotations-symmetrische Strömung	289
		22.4. Ebene Wirbelfelder	290
23. Strömungsvorgänge, bei denen die Trägheitsglieder in den Navier-Stokesschen Gleichungen verschwinden	295	23.1. Die Strömung zwischen parallelen Wänden und die Isotachen bei zylindrischen Rohren	295
		23.2. Die Couette-Strömung und Anwendung auf Schmiermittelströmung	298
		23.3. Die Verbindung zwischen $h(x)$ und $dp/dx(x)$ für Kanäle mit geringen Neigungen $dh/dx$	299
		23.4. Schmiermittelströmung beim Gleitklotz	299
		23.5. Schmiermittelströmung beim Radiallager	301
		23.6. Widerstand von Kugeln und quer-angeblasenen Kreiszyllindern	304
		23.7. Bewegungen von Staubteilchen in Gasen. Staubabscheidung	307
24. Zweidimensionale, reibungsbehaftete stationäre Strömungsvorgänge mit großer Reynoldszahl	319	24.1. Ableitung der Prandtlischen Grenzschichtgleichung	319
		24.2. Die Grenzschicht an der ebenen, geraden, parallel angeblasenen Platte	322
		24.3. Verdrängungsdicke und Impulsverlustdicke	325
		24.4. Exakte Lösung der Grenzschichtgleichungen für $Ha = \text{const}$	326
		24.5. Potenzansatz für die Geschwindigkeitsprofile der laminaren Grenzschichten (Pohlhausenprofile)	329
		24.6. Turbulente Strömungsvorgänge	330
		24.7. Freistrahlen	335
		24.8. Nachrechnung von Einzelheiten der Wirbelbewegung	338
		24.9. Druckwirkungen in Wirbelfeldern	342
25. Beschleunigte und verzögerte Grenzschichten	347	25.1. Ableitung der Impulsgleichung für Grenzschichten	347
		25.2. Hagenzahl für laminare und turbulente Grenzschichten	349
		25.3. Integration der Impulsgleichung mit einer Näherung über $\delta^*/\delta^{**}$ ; $k$ ( $Ha$ )	350
		25.4. Die turbulente Wandgrenzschicht bei Beschleunigung und Verzögerung	354
		25.5. Integration der Impulsgleichung für veränderliches $\delta^*/\delta^{**}$ sowie $\tau_{\text{Wand}}/(\rho \cdot \bar{c}^2)$	357
		25.6. Die Ablösungspunkte von Grenzschichten	359
26. Der Übergang vom geschichteten Fließen zum Wirbelfeld	362		
27. Einfluß der Grenzschicht auf Auftrieb und Widerstand	369	27.1. Tragflügel und Gitterprofile	369
		27.2. Drehkörper	377

28. Einige spezielle Strömungsprobleme der Turbomaschinen	381	28.1. Einleitung	381
		28.2. Eulergleichung und Bernoulligleichung im rotierenden Bezugssystem	381
		28.3. Die Eulersche Gleichung für die Arbeitsübertragung in Strömungsmaschinen	382
		28.4. Randverluste in Flügelgittern	384
		28.5. Kavitation in Strömungsmaschinen	386
Literaturverzeichnis	392		
Register	400		