

Herbert Oertel jr. (Hrsg.)

Prandtl – Führer durch die Strömungslehre

Grundlagen und Phänomene

12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 527 Abbildungen

Bearbeitet von

Martin Böhle

Peter Ehrhard

Dieter Etling

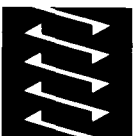
Ulrich Müller

Uwe Riedel

Katepalli R. Sreenevasan

Jürgen Warnatz †

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase	15
2.1	Eigenschaften der Flüssigkeiten	15
2.2	Lehre vom Spannungszustand	17
2.3	Der Flüssigkeitsdruck	20
2.4	Eigenschaften der Gase	26
2.5	Gasdruck	29
2.6	Wechselwirkung von Gasdruck und Flüssigkeitsdruck	33
2.7	Gleichgewicht bei anderen Kraftfeldern	36
2.8	Oberflächenspannung (Kapillarität)	40
3	Kinematik der Strömungen	45
3.1	Darstellungsmittel	45
3.2	Beschleunigung einer Strömung	50
3.3	Topologie einer Strömung	52
4	Dynamik der Strömungen	59
4.1	Dynamik der reibungsfreien Flüssigkeit	59
4.1.1	Kontinuität und Bernoulli-Gleichung	59
4.1.2	Folgerungen aus der Bernoulli-Gleichung	63
4.1.3	Druckmessung	70
4.1.4	Trennflächen und Wirbelbildung	72
4.1.5	Potentialströmung	76
4.1.6	Tragflügelantrieb und Magnus-Effekt	89
4.1.7	Impulssatz für stationäre Strömungen	92
4.1.8	Wellen auf einer freien Flüssigkeitsoberfläche	99
4.2	Dynamik zäher Flüssigkeiten	109
4.2.1	Zähigkeit (innere Reibung), Navier-Stokes-Gleichung	109
4.2.2	Mechanische Ähnlichkeit, Reynolds-Zahl	113
4.2.3	Laminare Grenzschichten	114
4.2.4	Entstehung der Turbulenz	117
4.2.5	Ausgebildete Turbulenz	127
4.2.6	Strömungsablösung und Wirbelbildung	136
4.2.7	Sekundärströmungen	143
4.2.8	Strömungen mit überwiegender Zähigkeit	145
4.2.9	Strömungen durch Rohre und Kanäle	152
4.2.10	Widerstand von Körpern in Flüssigkeiten	157
4.2.11	Strömungen Nicht-Newtonscher Medien	167
4.3	Dynamik der Gase	172

4.3.1	Druckfortpflanzung, Schallgeschwindigkeit	172
4.3.2	Stationäre kompressible Strömungen	176
4.3.3	Energiesatz	181
4.3.4	Theorie des senkrechten Verdichtungsstoßes	182
4.3.5	Strömungen um Ecken, Freistrahlen	187
4.3.6	Strömungen mit schwachen Störungen	191
4.3.7	Profilumströmungen	195
4.4	Aerodynamik	201
4.4.1	Vogelflug	202
4.4.2	Profil und Tragflügel	204
4.4.3	Profil- und Tragflügeltheorie	212
4.4.4	Aerodynamisches Versuchswesen	228
4.4.5	Transsonische Aerodynamik, Pfeilflügel	229
4.4.6	Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkung	235
4.4.7	Strömungsablösung	242
4.4.8	Überschallaerodynamik, Deltaflügel	244
5	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	253
5.1	Kontinuitätsgleichung	253
5.2	Navier-Stokes-Gleichungen	255
5.2.1	Laminare Strömungen	255
5.2.2	Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen	261
5.3	Energiegleichung	266
5.3.1	Laminare Strömungen	266
5.3.2	Turbulente Strömungen	269
5.4	Grundgleichungen in Erhaltungsform	272
5.4.1	Hierarchie der Grundgleichungen	272
5.4.2	Navier-Stokes-Gleichungen	275
5.4.3	Abgeleitete Modellgleichungen	278
5.4.4	Reynolds-Gleichungen für turbulente Strömungen	285
5.4.5	Turbulenzmodelle	287
5.4.6	Mehrphasenströmungen	305
5.4.7	Reaktive Strömungen	317
5.5	Differentialgleichungen der Störungen	320
6	Instabilitäten und turbulente Strömungen	325
6.1	Grundlagen turbulenter Strömungen	325
6.2	Einsetzen der Turbulenz	327
6.2.1	Strömungsmechanische Instabilitäten	327
6.2.2	Lineare Stabilitätsanalyse	330
6.2.3	Übergang zur Turbulenz	353
6.3	Ausgebildete Turbulenz	359

6.3.1	Die Notation der Mischungsweglänge	359
6.3.2	Turbulente Durchmischung	361
6.3.3	Turbulente Energiebeziehungen	362
6.4	Klassifikation turbulenter Strömungen	365
6.4.1	Freie Turbulenz	365
6.4.2	Turbulenz in Wandnähe	367
6.4.3	Rotierende und geschichtete Strömungen	370
6.4.4	Turbulenz im Windkanal	371
6.4.5	Zweidimensionale Turbulenz	375
6.5	Neue Entwicklungen	380
6.5.1	Grundlagen	380
6.5.2	Lagrange-Untersuchungen der Turbulenz	385
6.5.3	Feldtheoretische Methoden	386
6.5.4	Ausblick	386
7	Konvektive Wärme- und Stoffübertragung	389
7.1	Grundlagen der Wärme- und Stoffübertragung	389
7.1.1	Freie und erzwungene Konvektion	389
7.1.2	Wärmeleitung und Konvektion	392
7.1.3	Diffusion und Konvektion	394
7.2	Freie Konvektion	395
7.2.1	Rayleigh-Bénard-Konvektion	395
7.2.2	Konvektion an der vertikalen Platte	407
7.2.3	Konvektion am waagerechten Zylinder	412
7.3	Erzwungene Konvektion	414
7.3.1	Rohrströmung	414
7.3.2	Grenzschichtströmung	418
7.3.3	Umströmte Körper	425
7.4	Wärme- und Stoffaustausch	426
7.4.1	Diffusions-Konvektion	426
7.4.2	Stoffaustausch an der ebenen Platte	432
8	Strömungen mit mehreren Phasen	435
8.1	Grundlagen der Strömungen mit mehreren Phasen	435
8.1.1	Definitionen	436
8.1.2	Strömungsformen	439
8.1.3	Strömungskarten	439
8.2	Strömungsmodelle	443
8.2.1	Das eindimensionale Zwei-Fluid-Modell	443
8.2.2	Mischungsmodelle	446
8.2.3	Das Driftströmungsmodell	448
8.2.4	Blasen und Tropfen	450

8.2.5	Sprühströmungen	456
8.2.6	Flüssig-Feststoff Transport	459
8.2.7	Fluidisierung von Partikelbetten	462
8.3	Druckverlust und Volumenanteil in Hydraulikkomponenten	465
8.3.1	Der Reibungsdruckverlust in horizontalen geraden Rohren	465
8.3.2	Beschleunigungsdruckverluste	470
8.4	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Dichtewellen und kritische Massenströme	475
8.4.1	Dichtewellen	475
8.4.2	Kritische Massenströme	477
8.4.3	Kavitation	484
8.5	Instabilitäten in Zweiphasen-Strömungen	489
8.6	Turbulenz in disperser Zwei-Phasen-Strömung	495
8.6.1	Allgemeine Gesichtspunkte	495
8.6.2	Das Mischungsweg-Konzept	500
8.6.3	Transportgleichungs-Modelle für Turbulenzeigenschaften	502
9	Strömungen mit chemischen Reaktionen	505
9.1	Grundlagen reaktiver Strömungen	505
9.1.1	Zeitgesetz und Reaktionsordnung	507
9.1.2	Zusammenhang von Vorwärts- und Rückwärtsreaktion	508
9.1.3	Elementarreaktionen und Reaktionsmolekularität	509
9.1.4	Temperaturabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	512
9.1.5	Druckabhängigkeit von Geschwindigkeitskoeffizienten	514
9.1.6	Eigenschaften von Reaktionsmechanismen	516
9.2	Laminare reaktive Strömungen	522
9.2.1	Struktur vorgemischter Flammen	522
9.2.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit vorgemischter Flammen	524
9.2.3	Empfindlichkeitsanalyse	525
9.2.4	Nicht-vorgemischte Gegenstromflammen	526
9.2.5	Nicht-vorgemischte Strahlflammen	530
9.2.6	Nicht-vorgemischte Flammen mit schneller Chemie	531
9.2.7	Abgasreinigung mit Plasmaquellen	532
9.2.8	Strömungen in Ätzreaktoren	535
9.2.9	Heterogene Katalyse	536
9.3	Turbulente reaktive Strömungen	538
9.3.1	Übersicht und Begriffsbildung	538
9.3.2	Direkte Simulation	539
9.3.3	Mittlere Reaktionsgeschwindigkeiten	540
9.3.4	Eddy-Break-Up-Modelle	546
9.3.5	Turbulente nicht-vorgemischte Flammen	546
9.3.6	Turbulente Vormischflammen	557
9.4	Hypersonische Strömungen	565

9.4.1	Physikalisch-chemische Phänomene beim Wiedereintrittsflug	565
9.4.2	Chemisches Nichtgleichgewicht	566
9.4.3	Thermisches Nichtgleichgewicht	569
9.4.4	Oberflächenreaktionen an Wiedereintrittsflugkörpern	572
10	Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean	577
10.1	Grundlagen der Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean	577
10.1.1	Einführung	577
10.1.2	Grundgleichungen im rotierenden System	577
10.1.3	Geostrophische Strömung	581
10.1.4	Vorticity	583
10.1.5	Ekman-Schicht	586
10.1.6	Prandtl-Schicht	589
10.2	Strömungen in der Atmosphäre	591
10.2.1	Thermische Windsysteme	591
10.2.2	Thermische Konvektion	595
10.2.3	Schwerewellen	597
10.2.4	Wirbel	600
10.2.5	Globale atmosphärische Zirkulation	605
10.3	Strömungen im Ozean	608
10.3.1	Windgetriebene Strömungen	608
10.3.2	Wasserwellen	610
10.4	Anwendungen der Gesetzmäßigkeiten für Strömungen in der Atmosphäre und im Ozean	614
10.4.1	Wettervorhersage	614
10.4.2	Treibhauseffekt und Klimavorhersage	616
10.4.3	Ozonloch	620
11	Mikroströmungen	623
11.1	Grundlagen der Mikroströmungen	623
11.1.1	Anwendungen von Mikroströmungen	623
11.1.2	Fluidmodelle	625
11.1.3	Mikroströmung von Gasen	626
11.1.4	Mikroströmung von Flüssigkeiten	628
11.2	Molekulare Modelle	631
11.2.1	Grundlagen molekularer Modelle	631
11.2.2	Monte-Carlo-Simulation	633
11.2.3	Molekulardynamische Simulation	637
11.3	Kontinuum-Modelle	639
11.3.1	Ähnlichkeits-Diskussion	639
11.3.2	Modifikationen der Randbedingungen	641
11.3.3	Elektrokinetische Effekte	644

11.3.4 Benetzung und dünne Filme	653
11.4 Experimente	663
11.4.1 Druckverlust	663
11.4.2 Laminar-turbulente Transition	665
11.4.3 Wärmeübergang	666
12 Bioströmungsmechanik	669
12.1 Grundlagen der Bioströmungsmechanik	669
12.1.1 Bioströmungsmechanik der Tiere	671
12.1.2 Bioströmungsmechanik des Menschen	675
12.1.3 Rheologie des Blutes	681
12.2 Schwimmen und Fliegen	684
12.2.1 Fortbewegung der Einzeller	684
12.2.2 Schwimmen der Fische	687
12.2.3 Strömungskontrolle	689
12.2.4 Vogelflug	691
12.3 Strömung im menschlichen Herzen	698
12.3.1 Physiologie und Anatomie des Herzens	698
12.3.2 Struktur des Herzens	701
12.3.3 Erregungsphysiologie des Herzens	705
12.3.4 Strömung im Herzen	707
12.3.5 Herzklappen	712
12.4 Strömung in Blutgefäßen	716
12.4.1 Instationäre Rohrströmung	720
12.4.2 Instationäre Arterienströmung	723
12.4.3 Arterienverzweigungen	726
12.4.4 Mikrozirkulation	730
Literaturverzeichnis	733
Sachwortverzeichnis	759