

Ludwig Prandtl
Klaus Oswatitsch
Karl Wieghardt

Führer durch die Strömungslehre

Unter Mitarbeit von
W. Dettmering, D. Küchemann, H. Ludwieg,
J. Rotta, W. Schneider, J. Sündermann und
F. Wippermann

9., verbesserte und erweiterte Auflage

mit 458 Bildern



Bibliothek

INSTITUT FÜR WASSERBAU
UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT
PETERSENSTR. 13, 64287 DARMSTADT
Tel. 0 61 51 / 16 21 43 · Fax: 16 32 43

Juv.-Nr. : 3123

Inhaltsverzeichnis

1	Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase. Gleichgewichtszustand	1
1.1	Eigenschaften der Flüssigkeiten	1
1.2	Lehre vom Spannungszustand	2
1.3	Der Flüssigkeitsdruck	5
1.4	Druckverteilung in einer Flüssigkeit bei Nichtberücksichtigung der Schwere	6
1.5	Eigenschaften der Gase	7
1.6	Gleichgewicht einer schweren Flüssigkeit	10
1.7	Gleichgewicht eines schweren Gases	13
1.8	Wechselwirkung von Luftdruck und Flüssigkeitsdruck, Flüssigkeitsmanometer	17
1.9	Unterdruck. Barometer	18
1.10	Flüssigkeitsgleichgewicht bei anderen Kraftfeldern	20
1.11	Oberflächenspannung (Kapillarität)	23
2	Kinematik der Flüssigkeiten. Dynamik der reibungsfreien Flüssigkeit	28
2.1	Vorbemerkung	28
2.2	Kinematik der Flüssigkeiten	28
2.2.1	Darstellungsmittel	28
2.2.2	Kontinuität	31
2.3	Dynamik der „idealen“ reibungsfreien Flüssigkeit	34
2.3.1	Kräfte in einer strömenden Flüssigkeit. <i>Bernoullische</i> Druckgleichung	34
2.3.2	Folgerungen aus der <i>Bernoullischen</i> Gleichung	38
2.3.3	Weitere Ausführungen über den Flüssigkeitsdruck	42
2.3.4	Zusammenfluß zweier Flüssigkeitsströme. Trennungsf lächen. Wirbelbildung	48
2.3.5	Weiteres über Trennungsf lächen. Druckmessung	51
2.3.6	Verfeinerte Betrachtungen über die Bewegungen einer homogenen reibungslosen Flüssigkeit. Potentialströmung	54
2.3.7	Rotation und Potentialströmung	58
2.3.8	Potentialströmung mit Zirkulation. Tragflügelantrieb. Magnuseffekt	65
2.3.9	Wirbelbewegung einer reibungsfreien Flüssigkeit. Wirbelfäden	69
2.3.10	Impulssätze für stationäre Bewegungen	73

2.3.11	Weitere Beispiele zu den Impulssätzen	77
2.3.12	Impulssatz für Strömungen mit Geschwindigkeits- schwankungen	80
2.3.13	Wellen auf einer freien Flüssigkeitsoberfläche	81
2.3.14	Verhalten des Wassers in offenen Gerinnen	87
3	Strömung mit erheblichen Dichteänderungen (Gasdynamik)	91
3.1	Vorbemerkung	91
3.2	Druckfortpflanzung. Schallgeschwindigkeit	92
3.3	Stationäre Strömungen bei erheblichen Volumenänderungen in eindimensionaler Behandlung	99
3.4	Rakete	106
3.5	Energiesatz	107
3.6	Theorie des senkrechten Verdichtungsstoßes	112
3.7	Behandlung der mehrdimensionalen ebenen Überschallströmung. Strömung um eine Ecke. Gasstrahlen	118
3.7.1	Strömung mit Überschallgeschwindigkeit um eine Ecke	118
3.7.2	Vorgänge in freien Gasstrahlen	121
3.8	Allgemeines Näherungsverfahren für zweidimensionale Überschallströmungen	122
3.9	Betrachtungen über Strömungen mit schwachen Störungen	125
3.10	Zweidimensionale Überschallströmungen an Profilen. Luftkraftbeiwerte	130
3.11	Die Geschwindigkeitsverteilung an Profilen bei verschiedenen <i>Machzahlen</i>	137
3.12	Ähnlichkeitsgesetze für Schallnähe und Hyperschall	141
3.13	Geschosse	146
3.14	Auswirkung von Verlusten auf Wirbelbildung und Widerstand	153
3.15	Verbrennung, Detonation	155
3.16	Extreme Temperaturerhöhungen	157
3.17	Kondensation und Relaxation in <i>Laval</i> düsen	158
3.18	Gasdynamischer Laser	161
4	Bewegung zäher Flüssigkeiten, Turbulenz, Widerstände, Technische Anwendungen	164
4.1	Zähigkeit (innere Reibung). <i>Navier-Stokessche</i> Differentialgleichungen	164
4.2	Mechanische Ähnlichkeit. <i>Reynoldssche</i> Zahl	168
4.3	Allgemeine Eigenschaften der Strömungen zäher Flüssigkeiten	170
4.4	Laminare Grenzschichten	176
4.5	Entstehung der Turbulenz	182
4.6	Ausgebildete Turbulenz	190
4.6.1	Kinematik der Turbulenz	191
4.6.2	Dynamik der Turbulenz	195
4.6.3	Vermischung in turbulenter Strömung	198
4.6.4	Austausch und Mischungsweg	201

4.7	Einzelheiten turbulenter Strömungen	203
4.7.1	Wandturbulenz	203
4.7.2	Rohrströmung	207
4.7.3	Freie Turbulenz	208
4.7.4	Turbulente Grenzschichten	213
4.8	Strömungsablösung und Wirbelbildung	216
4.9	Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung	222
4.10	Sekundärströmungen. Dreidimensionale Grenzschichten	226
4.11	Weitere Strömungen mit überwiegender Zähigkeit	231
4.12	Hydrodynamische Theorie der Lagerschmierung	234
4.13	Strömung durch Rohre und Kanäle gleichbleibenden Querschnitts	241
4.14	Strömung durch Kanäle mit Querschnittsänderungen	249
4.15	Widerstand von Körpern in Flüssigkeit	254
4.15.1	Allgemeine Vorbemerkungen über die Widerstandsgleichung	254
4.15.2	Zerlegung des Widerstandes	256
4.15.3	Bewegter Körper und bewegte Flüssigkeit	257
4.16	Theorie des Flüssigkeitswiderstandes	258
4.16.1	Grundsätzliches	258
4.16.2	Einzelausführungen	261
4.16.3	Reibungswiderstand	264
4.16.4	Zusammenhang des Widerstandes mit den Zuständen in größerer Entfernung	267
4.17	Einzelheiten zum Strömungswiderstand	269
4.18	Drehwiderstand	277
4.19	Zur Strömung im Blutkreislauf	281
5	Konvektive Wärme- und Stoffübertragung; Grenzschichten bei hohen Geschwindigkeiten	293
5.1	Allgemeines über den Wärmeübergang	293
5.1.1	Vorbemerkung. Erzwungene und natürliche Konvektion	293
5.1.2	Wärmeleitung und Konvektion	293
5.1.3	Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetze	295
5.2	Wärmeübergang in erzwungenen Strömungen	298
5.2.1	Wärmeübergang im Rohr; Allgemeines und laminare Strömung	298
5.2.2	Temperaturverteilung in turbulenter Scherströmung	302
5.2.3	Turbulente Rohrströmung	304
5.2.4	Einige historische Bemerkungen	306
5.2.5	Wärmeübergang an einer ebenen Platte in laminarer Strömung	307
5.2.6	Wärmeübergang an einer ebenen Platte in turbulenter Strömung	309
5.2.7	Wärmeübergang an umströmten Körpern	309
5.2.8	Wärmeübergang mit Ausblasen aus der Wand	312

5.3	Natürliche Konvektion infolge von Dichteunterschieden	313
5.3.1	Einführung	313
5.3.2	Natürliche Konvektion an einer senkrechten Wand	314
5.3.3	Natürliche Konvektion am waagerechten Zylinder	317
5.3.4	Auftriebserzeugte und auftriebsbeeinflusste Freistrahlen	319
5.3.5	Natürliche Konvektion an einer horizontalen Platte und in einer horizontalen Flüssigkeitsschicht (<i>Bénard-Konvektion</i>)	323
5.3.6	Thermokonvektive Wellen	328
5.4	Wärmeübergang bei Änderung des Aggregatzustandes	329
5.4.1	Vorbemerkung	329
5.4.2	Kondensation	329
5.4.3	Verdampfung	332
5.5	Konvektion und Strahlung	335
5.5.1	Allgemeines	335
5.5.2	Laminare Strömung eines strahlenden Gases über eine ebene Platte	336
5.6	Stoffübergang bei erzwungener und natürlicher Strömung	340
5.6.1	Diffusion in strömenden Flüssigkeiten und Gasen	340
5.6.2	Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang	341
5.7	Grenzschichten bei hohen Geschwindigkeiten	342
5.7.1	Allgemeines	342
5.7.2	Die ebene Platte und der Kegel mit konstantem Druck an der Oberfläche	344
5.7.3	Dissoziationsvorgänge bei Hyperschallströmung	349
5.7.4	Der Staupunkt an Zylindern (Flügeln) und an Rotationskörpern	351
5.7.5	Druckänderungen in Strömungsrichtung und schiebende Zylinder (Flügel)	352
5.8	Abschmelzen und Verdampfen von festen Körpern in einem Gasstrom hoher Temperatur	353
5.9	Der Umschlagpunkt von laminarer zu turbulenter Strömung	354
5.10	Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und reibungsfreier Außenströmung	355
5.11	Verschiedenes	361
5.12	Gaskinetische Effekte, Gleiten an der Wand	361
6	Strömungen mit mehreren Phasen	367
6.1	Bewegung von Tropfen und Blasen	367
6.1.1	Tropfen- und Blasenbewegung mit kleiner <i>Reynoldsscher</i> Zahl	368
6.1.2	Tropfenbewegung mit großer <i>Reynoldsscher</i> Zahl; Tropfenzerfall	371
6.1.3	Blasenbewegung mit großer <i>Reynoldsscher</i> Zahl; Schirmblasen	373
6.1.4	Gasblasen in einem Rohr	377

6.2	Kavitation	379
6.2.1	Kavitationsentstehung und Bläschenmodell	379
6.2.2	Vollkavitierende Strömungen	382
6.3	Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen in Gasen	384
6.3.1	Strahlerfall bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten: Zertropfen	384
6.3.2	Strahlerfall bei großen Strömungsgeschwindigkeiten: Zerwellen und Zerstäuben	386
6.4	Homogene Zweiphasenströmungen	390
6.4.1	Zustandsgrößen und Schallgeschwindigkeit	390
6.4.2	Isotherme Strömung	394
6.4.3	Reibungsfreie Strömung	395
6.4.4	Rohrströmung mit Reibung	396
6.4.5	Zähigkeit von Suspensionen	398
6.5	Zweiphasenströmungen mit Relativgeschwindigkeit	399
6.5.1	Allgemeines und Grundgleichungen	399
6.5.2	Driftfluß	403
6.5.3	Kinematische Wellen; Sedimentation	407
6.6	Transport fester Körper in strömenden Gasen und Flüssigkeiten	411
6.6.1	Pneumatischer Transport, Staubabscheidung	411
6.6.2	Sandbewegung durch den Wind	413
6.6.3	Geschiebebewegung in Flüssen	414
6.6.4	Verhalten von Schwebstoff	415
6.6.5	Geschiebetrieb	417
6.6.6	Verhalten der Flußsohle unter der Wirkung des Geschiebetriebes	419
6.7	Körper in beschleunigter Strömung. Hydrodynamische Feldkräfte	420
7	Flugkörper, Antriebe und Strömungsmaschinen	430
7.1	Flügelprofile bei Unterschallgeschwindigkeiten	430
7.1.1	Typische Strömungsformen bei kleinen Geschwindigkeiten	430
7.1.2	Die tragende Platte bei kleinen Geschwindigkeiten	432
7.1.3	Einfluß von Dicke und Nasenradius	435
7.1.4	Einfluß der Reibung bei gesunder Strömung	436
7.1.5	Einfluß der Ablösung	438
7.1.6	Einfluß der Kompressibilität	439
7.2	Profilentwurfsfragen: Formgebung und Grenzschichtbeeinflussung	440
7.3	Wirbelsysteme an Tragflächen	443
7.4	Flügel großer Streckung	445
7.4.1	Konstanter Abwind, elliptische Verteilung	445
7.4.2	Beliebige Auftriebsverteilung	450
7.5	Tragflächen auf Wasseroberflächen	455

7.6	Anwendungen auf das Flugzeug	457
7.6.1	Das klassische Flugzeug	457
7.6.2	Das Flugzeug mit Pfeilflügel	458
7.7	Der schiebende Flügel	460
7.8	<i>Machzahleinfluß</i> beim schiebenden Flügel	461
7.9	Pfeilflügel endlicher Streckung	464
7.9.1	Nichtangestellter Pfeilflügel	465
7.9.2	Angestellter Pfeilflügel	465
7.10	Die Strömung um schlanke Flügel	468
7.11	Lineare Theorie des dünnen Flügels in Überschallströmung	469
7.12	Theorie des Flügels kleinen Seitenverhältnisses	474
7.13	Theorie der kegeligen Überschallströmung	478
7.14	Theorie des Tragflügels mit Unter- und Überschallvorderkanten	481
7.15	Der Schub von Triebwerken	482
7.16	Schraubenpropeller	484
7.17	Schiffspropeller	486
7.18	Mantelschraube; Schiffspropeller mit Leitrad	490
7.19	Windräder	492
7.20	Brenner im Luftstrom	494
7.21	Staustrahltriebwerke	496
7.22	Turbinenstrahltriebwerk	499
7.23	Vogelflug	500
7.24	Vortrieb von Wassertieren	501
7.25	Allgemeines über Strömungsmaschinen	503
7.26	Turbokraftmaschinen	507
7.27	Turboarbeitsmaschinen	514
7.28	Strömungskupplungen und Drehmomentwandler	519
7.29	Das Wirbelrohr	520
8	Strömungen in der Atmosphäre	525
8.1	Einige strömungsmechanische Grundlagen der Meteorologie	525
8.1.1	Koordinatensysteme in der Geophysik, Bezeichnungen	525
8.1.2	Der Einfluß der Erddrehung; geostrophischer Wind	525
8.1.3	Gleichungen	526
8.2	Größenbereiche unterschiedlicher atmosphärischer Strömungsvorgänge	529
8.2.1	Charakteristische Größen	529
8.2.2	Die Näherungen des hydrostatischen und geostrophischen Gleichgewichts	530
8.2.3	Vereinfachung der Kontinuitätsbedingung	532
8.2.4	Die für die unterschiedlichen Fälle maßgebenden Kräfte	533
8.2.5	Die Spektraldichteverteilung der kinetischen Energie	535
8.3	Großräumige Strömungsvorgänge. Macro-Scale	537
8.3.1	Aufbau großräumiger Wind- und Massenfelder	537
8.3.2	Die zonale Zirkulation und überlagerte Meridional- zirkulationen	538

8.3.3	Die atmosphärische Makroturbulenz	540
8.3.4	Die Energetik großräumiger Strömungsvorgänge	542
8.3.5	Die Überströmung großer Kettengebirge	543
8.4	Mittlräumige Strömungsvorgänge. Meso-Scale	546
8.4.1	Die tropische Zyklone (Hurricane, Taifun)	546
8.4.2	Thermische Windsysteme im Meso-Scale	548
8.4.3	Die Über- und Umströmung von Bergen	550
8.4.4	Schwerewellen in der Atmosphäre	553
8.4.5	Thermische Konvektion	557
8.5	Kleinräumige Strömungsvorgänge. Micro-Scale	558
8.5.1	Die atmosphärische Grenzschicht. <i>Ekman</i> -Spirale	558
8.5.2	Einige Überlegungen zur turbulenten atmosphärischen Reibungsströmung	560
8.5.3	Der vertikale turbulente Wärmestrom in der Atmosphäre	561
8.5.4	Berechnung der atmosphärischen Grenzschicht einschließlich Wärmeübertragung	562
8.5.5	Die Strömungsverhältnisse in der bodennahen Schicht	566
8.5.6	Luftströmungen an erwärmten und abgekühlten Hängen	568
8.5.7	Strömungen in und über Pflanzenbeständen	570
8.5.8	Widerstands- und Wärmeübergangsgesetz in der planetarischen Grenzschicht	572
8.5.9	Der Low-Level Jet (LLJ)	574
8.5.10	Longitudinale Wirbelrollen in der planetarischen Grenzschicht	575
9	Strömungen im Ozean	580
9.1	Theoretische Grundlagen	580
9.1.1	Koordinatensystem, Zustandsgrößen und Gleichungen	580
9.1.2	Größenordnungen und Gleichgewichte	581
9.1.3	Wirbelbehaftete reibungsfreie Strömungen	582
9.2	Strömungen im Meer	585
9.2.1	Klassifikation	585
9.2.2	Geostrophische Strömungen	586
9.2.3	Strömungen in der Ekman-Schicht	587
9.2.4	Die großräumige windgetriebene Zirkulation	590
9.3	Wellen im Meer	592
9.3.1	Klassifikation, Schwerewellen	592
9.3.2	Lange Wellen	594
9.3.3	Kurze Wellen	595
10	Aerodynamisches und hydrodynamisches Versuchswesen	597
10.1	Herstellung einwandfreier Versuchsbedingungen	597
10.2	Windkanäle	600
10.2.1	Allgemeines	600
10.2.2	Windkanäle für langsame Geschwindigkeiten	601

10.2.3	Windkanäle für hohe Unterschallgeschwindigkeiten	602
10.2.4	Windkanäle für transsonische Geschwindigkeiten	602
10.2.5	Windkanäle für Überschallgeschwindigkeiten	603
10.2.6	Hypersonische Kanäle	607
10.2.7	Stoßwellenrohre	608
10.3	Meßtechnik	609
10.3.1	Optische Verfahren zur Sichtbarmachung von Strömungen	609
10.3.2	Geschwindigkeitsmessung	611
10.3.3	Richtungsbestimmung	615
10.3.4	Kräfteermittlung an Modellen	616
10.3.5	Andere Arten der Kraftmessung	617
10.3.6	Reibungswiderstand	618
10.4	Schiffbauliches Versuchswesen	621
11	Verschiedene Einzelausführungen	624
11.1	Strömungen unter dem Einfluß elektromagnetischer Kräfte	624
11.1.1	Die <i>Poiseuille-Härtmann</i> -Strömung	625
11.1.2	Die kompressible, reibungsfreie Strömung eines Plasmas in einer ebenen <i>Laval</i> -Düse	627
11.2	Bemerkungen zu numerischen Verfahren in der Strömungslehre	629
	Buchliteratur	632
	Umrechnung einiger Maßeinheiten	638
	Sachwortverzeichnis	639