

uni—text

L. Prandtl / K. Oswatitsch / K. Wieghardt

Strömungslehre

Lehrbuch für
Physiker, Maschinenbauer,
Elektrotechniker
ab 3. Semester

Vieweg

D III - 46
54/1866

INSTITUT
FÜR METEOROLOGIE U. KLIMATOLOGIE
DER TECHN. UNIVERSITÄT

Ludwig Prandtl HANNOVER · HERRENHAUSER STR. 9

Klaus Oswatitsch

Karl Wieghardt

NK: 551.511

53

Führer durch die Strömungslehre

unter Mitarbeit von

Prof. Dr.-Ing. Dettmering, Prof. Dr. Kleinschmidt,
Dr. Küchemann, Prof. Dr. Ludwieg, Ing. Rotta und
Dr. Schuh

7., überarbeitete Auflage

mit 451 Bildern



FRIEDR. VIEWEG + SOHN
BRAUNSCHWEIG

Inhaltsverzeichnis

1. Eigenschaften der Flüssigkeiten und Gase. Gleichgewichtszustand

1.1.	Eigenschaften der Flüssigkeiten	1
1.2.	Lehre vom Spannungszustand	2
1.3.	Der Flüssigkeitsdruck	4
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	16
1.9.	Unterdruck. Barometer	19
1.10.	Flüssigkeitsgewicht bei anderen Kraftfeldern	21
1.11.	Oberflächenspannung (Kapillarität)	24

2. Kinematik der Flüssigkeiten. Dynamik der reibungsfreien Flüssigkeit

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. Trennungsfächen. Wirbelbildung	45
2.3.5.	Weiteres über Trennungsfächen. Druckmessung	48
2.3.6.	Verfeinerte Betrachtungen über die Bewegungen einer homogenen reibungslosen Flüssigkeit. Potentialströmung	50
2.3.7.	Weiteres über Potentialbewegung	55
2.3.8.	Potentialströmung mit Zirkulation. Tragflügelauftrieb. Magnuseffekt	62
2.3.9.	Wirbelbewegung einer reibungsfreien Flüssigkeit. Wirbelfäden	65
2.3.10.	Impulssätze für stationäre Bewegungen	69
2.3.11.	Weitere Beispiele zu den Impulssätzen	73
2.3.12.	Impulssatz für Strömungen mit Geschwindigkeitsschwankungen	76
2.3.13.	Wellen auf einer freien Flüssigkeitsoberfläche	77
2.3.14.	Verhalten des Wassers in offenen Gerinnen	83

3. Strömung mit erheblichen Dichteänderungen (Gasdynamik)

3.1.	Vorbemerkung	87
3.2.	Druckfortpflanzung. Schallgeschwindigkeit	88
3.3.	Stationäre Strömungen bei erheblichen Volumenänderungen in eindimensionaler Behandlung	94
3.4.	Rakete	100
3.5.	Energiesatz	101
3.6.	Theorie des senkrechten Verdichtungsstoßes	106
3.7.	Behandlung der mehrdimensionalen ebenen Überschallströmung. Strömung um eine Ecke. Gasstrahlen	110
3.7.1.	Strömung mit Überschallgeschwindigkeit um eine Ecke	110
3.7.2.	Vorgänge in freien Gasstrahlen	113
3.8.	Allgemeines Näherungsverfahren für zweidimensionale Überschallströmungen	114
3.9.	Betrachtungen über Strömungen mit schwachen Störungen	117
3.10.	Zweidimensionale Überschallströmungen an Profilen. Luftkraftbeiwerte	122

3.11.	Die Geschwindigkeitsverteilung an Profilen bei verschiedenen Machzahlen...	128
3.12.	Ähnlichkeitsgesetze für Schallnähe und Hyperschall	132
3.13.	Geschosse	136
3.14.	Auswirkung von Verlusten auf Wirbelbildung und Widerstand	143
3.15.	Wärmeumsetzungen und extreme Temperaturen	145

4. **Bewegung zäher Flüssigkeiten, Turbulenz, Widerstände, Technische Anwendungen**

4.1.	Zähigkeit (innere Reibung). <i>Navier-Stokessche</i> Differentialgleichungen	151
4.2.	Mechanische Ähnlichkeit. <i>Reynoldssche</i> Zahl	155
4.3.	Allgemeine Eigenschaften der Strömungen zäher Flüssigkeiten	157
4.4.	Laminare Grenzschichten	163
4.5.	Entstehung der Turbulenz	168
4.6.	Ausgebildete Turbulenz	176
4.6.1.	Kinematik der Turbulenz	177
4.6.2.	Dynamik der Turbulenz	181
4.6.3.	Vermischung in turbulenter Strömung	184
4.6.4.	Austausch und Mischungsweg	187
4.7.	Einzelheiten turbulenter Strömungen	188
4.7.1.	Wandturbulenz	188
4.7.2.	Rohrströmung	192
4.7.3.	Freie Turbulenz	194
4.7.4.	Turbulente Grenzschichten	198
4.8.	Strömungsablösung und Wirbelbildung	200
4.9.	Maßnahmen zur Grenzschichtbeeinflussung	206
4.10.	Sekundärströmungen. Dreidimensionale Grenzschichten	209
4.11.	Weitere Strömungen mit überwiegender Zähigkeit	214
4.12.	Hydrodynamische Theorie der Lagerschmierung	217
4.13.	Strömung durch Rohre und Kanäle gleichbleibenden Querschnitts	223
4.14.	Strömung durch Kanäle mit Querschnittsänderungen	231
4.15.	Widerstand von Körpern in Flüssigkeit	236
4.15.1.	Allgemeine Vorbemerkungen über die Widerstandsgleichung	236
4.15.2.	Zerlegung des Widerstandes	238
4.15.3.	Bewegter Körper und bewegte Flüssigkeit	239
4.16.	Theorie des Flüssigkeitswiderstandes	240
4.16.1.	Grundsätzliches	240
4.16.2.	Einzel Ausführungen	242
4.16.3.	Reibungswiderstand	245
4.16.4.	Zusammenhang des Widerstandes mit den Zuständen in größerer Entfernung	248
4.17.	Einzelheiten zum Flüssigkeitswiderstand	250

5. **Konvektive Wärme- und Stoffübertragung, Grenzschichten bei hohen Geschwindigkeiten**

5.1.	Vorbemerkung zur aufgezungenen Strömung und natürlichen Konvektion bei niedrigen Geschwindigkeiten	261
5.2.	Aufgezungenen Wärmeübergang bei niedriger Geschwindigkeit	262
5.2.1.	Einleitung	262
5.2.2.	Wärmeübergang im Rohr. Allgemeines und laminare Strömung	264
5.2.3.	Wärmeübergang bei turbulenter Strömung im Rohr	267
5.2.4.	Einige historische Bemerkungen	270
5.2.5.	Wärmeübergang an der Platte	271
5.2.6.	Wärmeübergang an umströmten dicken Körpern	272
5.2.7.	Wärmeübergang beim Ausblasen aus der Wand	275
5.3.	Elemente des Stoffüberganges bei aufgezungenen Strömung	276

5.4.	Wärmeübergang durch natürliche Konvektion infolge von Dichteunterschieden	278
5.4.1.	Einführung	278
5.4.2.	Natürliche Konvektion an senkrechter warmer Wand	279
5.4.3.	Natürliche Konvektion am waagerechten Zylinder	280
5.4.4.	Wärmequellen	282
5.4.5.	Wärmeströmung an einer waagerechten Platte	283
5.5.	Abschmelzen und Verdampfen von festen Körpern in einem Gasstrom hoher Temperatur	285
5.6.	Grenzschichten bei hohen Geschwindigkeiten	286
5.6.1.	Allgemeines	286
5.6.2.	Die ebene Platte und der Kegel mit konstantem Druck an der Oberfläche	288
5.6.3.	Der Staupunkt an Zylindern (Flügeln) und an Rotationskörpern	292
5.6.4.	Druckänderungen in Strömungsrichtung und schiebende Zylinder (Flügel)	293
5.7.	Der Umschlagspunkt von laminar zu turbulenter Strömung	295
5.8.	Wechselwirkung zwischen Grenzschicht und reibungsfreier Außenströmung	296
5.9.	Dissoziationsvorgänge bei Hyperschallströmung	299
5.10.	Verschiedenes	301
5.11.	Gaskinetische Effekte, Gleiten an der Wand	301
6.	Aerodynamisches und hydrodynamisches Versuchswesen	
6.1.	Herstellung einwandfreier Versuchsbedingungen	305
6.2.	Windkanäle	307
6.2.1.	Allgemeines	307
6.2.2.	Windkanäle für langsame Geschwindigkeiten	308
6.2.3.	Windkanäle für hohe Unterschallgeschwindigkeiten	309
6.2.4.	Windkanäle für transsonische Geschwindigkeiten	310
6.2.5.	Windkanäle für Überschallgeschwindigkeiten	311
6.2.6.	Hypersonische Kanäle	314
6.2.7.	Stoßwellenrohre	315
6.3.	Meßtechnik	316
6.3.1.	Optische Verfahren zur Sichtbarmachung von Strömungen	316
6.3.2.	Geschwindigkeitsmessung	318
6.3.3.	Richtungsbestimmung	321
6.3.4.	Kräfteermittlung an Modellen	322
6.3.5.	Andere Arten der Kraftmessung	323
6.3.6.	Reibungswiderstand	324
6.4.	Schiffbauliches Versuchswesen	327
7.	Flugkörper, Antriebe und Strömungsmaschinen	
7.1.	Flügelprofile bei Unterschallgeschwindigkeiten	330
7.1.1.	Typische Strömungsformen bei kleinen Geschwindigkeiten	330
7.1.2.	Die tragende Platte bei kleinen Geschwindigkeiten	332
7.1.3.	Einfluß von Dicke und Nasenradius	335
7.1.4.	Einfluß der Reibung bei gesunder Strömung	336
7.1.5.	Einfluß der Ablösung	337
7.1.6.	Einfluß der Kompressibilität	340
7.2.	Profilentwurfsfragen: Formgebung und Grenzschichtbeeinflussung	342
7.3.	Wirbelsysteme an Tragflächen	345
7.4.	Flügel großer Streckung	347
7.4.1.	Konstanter Abwind, elliptische Verteilung	347
7.4.2.	Beliebige Auftriebverteilung	351
7.5.	Das klassische Flugzeug	355
7.6.	Das Flugzeug mit Pfeilflügel	357
7.7.	Der schiebende Flügel	358

7.8.	Machzahleinfluß beim schiebenden Flügel	359
7.9.	Pfeilflügel endlicher Streckung	361
7.9.1.	Nichtangestellter Pfeilflügel	362
7.9.2.	Angestellter Pfeilflügel	363
7.9.3.	Widerstandsverteilung in Spannweitenrichtung	365
7.9.4.	Ablösung und Wirbel	367
7.10.	Entwurf von Pfeilflügeln	369
7.11.	Der Widerstand entworfenener Pfeilflügel	371
7.12.	Das Delta-Flugzeug kleiner Streckung	373
7.13.	Die Strömung um schlanke Flügel	375
7.14.	Linearisierte Theorie des dünnen Flügels in Überschallströmung	377
7.15.	Überschalltheorie des Flügels kleinen Seitenverhältnisses	381
7.16.	Theorie der kegeligen Überschallströmung	385
7.17.	Theorie des Tragflügels mit Unter- und Überschallvorderkanten	388
7.18.	Der Schub von Triebwerken	390
7.19.	Schraubenpropeller	391
7.20.	Schiffspropeller	393
7.21.	Mantelschraube	396
7.22.	Windmühlen	398
7.23.	Brenner im Luftstrom	398
7.24.	Staustrahltriebwerk	400
7.25.	Turbinenstrahltriebwerk	403
7.26.	Vogelflug	404
7.27.	Vortrieb von Wassertieren	405
7.28.	Allgemeines über Strömungsmaschinen	406
7.29.	Turbokraftmaschinen	412
7.30.	Turboarbeitsmaschinen	418
7.31.	Strömungskupplungen und Drehmomentwandler	424
7.32.	Das Wirbelrohr	424

8. Meteorologische Anwendungen

8.1.	Einfluß der Erddrehung auf reibungslose Bewegungen in der Atmosphäre und im Meer	430
8.1.1.	Grundlagen. Geostrophische Bewegung	430
8.1.2.	Flüssigkeit auf rotierender Scheibe als einfachstes atmosphärisches Modell ..	431
8.1.3.	Zyklonen und Antizyklonen. <i>Rossby-Wellen</i>	433
8.2.	Reibungswind und ähnliches	435
8.2.1.	Wirkung der <i>Coriolis</i> -Kräfte	435
8.2.2.	Angenäherte Berechnung der turbulenten Reibungsströmung	437
8.2.3.	Abbau des Druckfeldes durch die Bodenreibung	439
8.2.4.	Zeitliche und örtliche Änderung der Bodenreibung	440
8.2.5.	Meeresströmung unter Einfluß des Windes	441
8.3.	Zwei Flüssigkeiten verschiedener Dichte	442
8.3.1.	Überströmen eines Wehrs. Kaltluftvorstoß	442
8.3.2.	Wellen an der Grenzfläche	444
8.4.	Geschichtete Flüssigkeit bei stetigem Dichteverlauf	446
8.4.1.	Satz von <i>V. Bjerknes</i>	446
8.4.2.	Interne Wellen	447
8.4.3.	Interne Wellen in zusammendrückbaren Medien	450
8.4.4.	Stabilitätsgrenze von scherenden Strömungen einer stabil geschichteten Flüssigkeit	453
8.5.	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsfeld und Dichte- oder Temperaturfeld in geostrophischer Strömung	457
8.5.1.	Stetige Felder	457
8.5.2.	Frontflächen	459

8.6.	Zyklonen	460
8.6.1.	Die potentielle Rotation und der Wirbelsatz von <i>Ertel</i>	460
8.6.2.	Anwendung auf Zyklonen	461
8.6.3.	Stabilität des geostrophischen Gleichgewichts. Tropische Zyklonen	463
8.7.	Atmosphärische Zirkulation	466
8.7.1.	Die allgemeine Zirkulation	466
8.7.2.	Hangwinde. Berg- und Talwind	469
9.	Verschiedene Einzelausführungen	
9.1.	Kavitation	473
9.1.1.	Kavitationsentstehung und Bläschenmodell	473
9.1.2.	Vollkavitierende Strömungen	476
9.2.	Wasserschlag. Gleitflächen	478
9.2.1.	Stoßartige Vorgänge	478
9.2.2.	Stetige Vorgänge	479
9.2.3.	Gleitflächen auf der Wasserfläche	481
9.3.	Zur Entstehung von Wasserwellen durch Wind	482
9.4.	Wasser-Luft-Gemische	484
9.4.1.	Wassertropfen in Luft	484
9.4.2.	Zerfall von Flüssigkeitsstrahlen in Luft	485
9.4.3.	Luftblasen in Wasser	488
9.5.	Feste Körper in strömender Luft	490
9.5.1.	Technische Anwendungen	491
9.5.2.	Wirkungen des freien Windes	492
9.6.	Feste Körper in strömendem Wasser	493
9.6.1.	Geschiebebewegung in Flüssen	493
9.6.2.	Verhalten von Schwebestoff	495
9.6.3.	Geschiebetrieb	496
9.6.4.	Verhalten der Flußsohle unter der Wirkung des Geschiebetriebes	498
9.7.	Körper in beschleunigter Strömung. Hydrodynamische Fernkräfte	500
9.8.	Rotierende Körper oder rotierende Bezugssysteme	503
9.9.	Zur Strömung im Blutkreislauf	510
9.10.	Strömungen unter dem Einfluß elektromagnetischer Kräfte	514
9.10.1.	Die <i>Poiseuille-Hartmann</i> -Strömung	515
9.10.2.	Die kompressible reibungsfreie Strömung eines Plasmas in einer ebenen Laval- düse	517
Buchliteratur	522
Sachverzeichnis	527