

Kamprath-Reihe

Prof. Dipl.-Ing. Willi Bohl

Technische Strömungslehre

Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik,
Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible
Strömungen, Strömungsmesstechnik

12., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Die wichtigsten Formelzeichen und Einheiten	13
1 Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen	17
1.1 Einleitung	17
1.2 Dichte, spezifisches Volumen	17
1.2.1 Definitionen	17
1.2.2 Dichte von Flüssigkeiten	18
1.2.3 Dichte von Gasen und Dämpfen	19
1.2.4 Dichte von Luft	19
1.3 Schallgeschwindigkeit	20
1.4 Viskosität	22
1.4.1 Einleitung	22
1.4.2 Viskosität Newton'scher Fluide	22
1.4.2.1 Dynamische Viskosität	22
1.4.2.2 Kinematische Viskosität	23
1.4.2.3 Temperaturabhängigkeit der Viskosität	24
1.4.2.4 Druckabhängigkeit der Viskosität	26
1.4.2.5 Arbeitsunterlagen und Gebrauchsformeln	26
1.4.3 Viskosität nicht Newton'scher Fluide	30
1.5 Thermische Stoffwerte	31
1.5.1 Einleitung	31
1.5.2 Spezifische Wärmekapazität	31
1.5.3 Gaskonstante	34
1.5.4 Enthalpie	35
1.5.5 Dampfdruck	35
1.6 Oberflächenspannungen und Kapillarität	36
1.6.1 Einleitung	36
1.6.2 Oberflächenspannung	36
1.6.3 Haftspannung	37
1.6.4 Grenzflächendruck (Kapillardruck)	40
1.6.5 Kapillarität	41
2 Hydrostatik	45
2.1 Ausbildung der freien Oberfläche	45
2.2 Hydrostatischer Druck	48
2.2.1 Grundbegriffe	48
2.2.2 Einheiten	49
2.2.3 Erzeugung des hydrostatischen Druckes	50
2.2.3.1 Kolbendruck	50
2.2.3.2 Druckerarbeit	52
2.2.3.3 Schweredruck	52
2.2.3.4 Kommunizierende Gefäße	53
2.3 Druckkräfte	54
2.3.1 Druckkräfte bei Wirkung des Kolbendruckes	54
2.3.1.1 Druckkräfte gegen ebene Wände	54
2.3.1.2 Druckkräfte gegen gekrümmte Wände	55
2.3.2 Druckkräfte bei Wirkung des Schweredruckes	57
2.3.2.1 Druckkräfte gegen ebene Wände	57
2.3.2.2 Druckkräfte gegen gekrümmte Wände	61
2.3.2.3 Aufwärts gerichtete Vertikaldruckkraft (Aufdruckkraft)	66

2.4	Auftrieb und Schwimmen	. . . . .	.67
2.4.1	Statischer Auftrieb	. . . . .	.67
2.4.2	Thermischer Auftrieb	. . . . .	.68
2.4.3	Schwimmen und Schweben	. . . . .	.69
2.4.4	Stabilität	. . . . .	.70
2.4.4.1	Einleitung	. . . . .	.70
2.4.4.2	Stabilität von vollständig eingetauchten Körpern	. . . . .	.70
2.4.4.3	Stabilität von teilweise eingetauchten Körpern	. . . . .	.71
3	Aerostatik	. . . . .	.75
3.1	Einleitung	. . . . .	.75
3.2	Zusammensetzung der Atmosphäre	. . . . .	.75
3.3	Schichtung der Atmosphäre	. . . . .	.75
3.4	Isotherme Schichtung	. . . . .	.77
3.5	Isentrope Schichtung	. . . . .	.79
3.6	Normatmosphäre	. . . . .	.80
4	Inkompressible Strömungen	. . . . .	.83
4.1	Einleitung	. . . . .	.83
4.2	Grundbegriffe	. . . . .	.83
4.3	Grundgleichungen	. . . . .	.89
4.3.1	Kontinuitätsgleichung	. . . . .	.89
4.3.2	Energiegleichung	. . . . .	.90
4.3.2.1	Energiegleichung längs einer Stromlinie	. . . . .	.90
4.3.2.2	Energiegleichung längs einer Stromröhre	. . . . .	.91
4.3.2.3	Verschiedene Druckbegriffe in einem strömenden Fluid	. . . . .	.96
4.3.2.4	Einige praktische Anwendungen der Energiegleichung	. . . . .	.100
4.3.3	Druckänderung senkrecht zur Strömungsrichtung	. . . . .	.105
4.3.4	Impulsatz	. . . . .	.108
4.3.4.1	Allgemeine Ableitung und Darstellung	. . . . .	.108
4.3.4.2	Anwendungen und Beispiele	. . . . .	.111
4.3.5	Drallsatz	. . . . .	.131
4.3.5.1	Allgemeine Formulierung	. . . . .	.131
4.3.5.2	Spezielle Formulierung	. . . . .	.132
4.3.5.3	Anwendungen	. . . . .	.133
4.4	Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln	. . . . .	.137
4.4.1	Einleitung	. . . . .	.137
4.4.2	Ähnlichkeitsbedingungen	. . . . .	.138
4.4.3	Reynolds-Zahl	. . . . .	.139
4.4.4	Froude-Zahl	. . . . .	.141
4.5	Modellversuche	. . . . .	.142
4.6	Strömungsformen	. . . . .	.143
4.6.1	Einleitung	. . . . .	.143
4.6.2	Laminare und turbulente Rohrströmung	. . . . .	.143
4.6.3	Umströmung von Kreiszyllindern und Kugeln	. . . . .	.145
4.6.4	Strömende und schießende Bewegung bei Strömungen mit freier Oberfläche unter Schwerkereinfluss	. . . . .	.146
4.6.5	Turbulenzgrad	. . . . .	.146
4.7	Stoffströme in geschlossenen Rohrleitungen (Rohrhydraulik)	. . . . .	.147
4.7.1	Energiegleichung für reibungsbehaftete Strömungen	. . . . .	.147
4.7.1.1	Stationäre Strömungen	. . . . .	.147
4.7.1.2	Instationäre Strömungen	. . . . .	.149
4.7.2	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei laminarer Strömung ($Re < 2320$)	. . . . .	.150
4.7.3	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei turbulenter Strömung ($Re > 2320$)	. . . . .	.154
4.7.3.1	Einleitung	. . . . .	.154

4.7.3.2	Geschwindigkeitsverteilung	154
4.7.3.3	Druckabfall	160
4.7.4	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei Strömung nicht Newton'scher Flüssigkeiten	166
4.7.4.1	Einleitung	166
4.7.4.2	Fließgesetze	167
4.7.4.3	Repräsentative Viskosität	168
4.7.4.4	Druckverlust	168
4.7.5	Druckabfall in gewellten Rohren	169
4.7.6	Rohre mit nicht kreisförmigen Querschnitten	171
4.7.6.1	Hydraulischer Durchmesser	171
4.7.6.2	Bestimmung der Rohrreibungszahl	172
4.7.7	Strömungsverluste in Rohrleitungselementen	177
4.7.7.1	Grundlagen	177
4.7.7.2	Rohreinläufe	180
4.7.7.3	Rohrausläufe	180
4.7.7.4	Querschnittsänderungen	180
4.7.7.5	Richtungsänderungen	199
4.7.7.6	Rohrverzweigungen	206
4.7.7.7	Dehnungsausgleicher	208
4.7.7.8	Absperr- und Regelorgane	208
4.7.7.9	Drosselgeräte	211
4.7.7.10	Filter und Siebe	213
4.7.7.11	Zusammengesetzte Widerstände	221
4.7.8	Einlaufstrecke (Rohreinlauf)	225
4.7.9	Spaltströmungen	228
4.8	Strömung in offenen Gerinnen	238
4.8.1	Einleitung	238
4.8.2	Geschwindigkeitsverteilung	238
4.8.3	Fließformeln	239
4.8.4	Hydraulisch optimale Profile	242
4.9	Ausfluss aus Behältern	245
4.9.1	Ausfluss durch kleine Öffnungen bei konstantem Druckunterschied und konstanter Spiegelhöhe	245
4.9.2	Ausfluss ins Freie durch große Öffnungen unter dem Einfluss der Schwere bei konstanter Spiegelhöhe	251
4.9.3	Ausfluss unter Gegendruck bei konstantem Niveauunterschied	253
4.9.4	Ausfluss bei veränderlicher Spiegelhöhe	253
4.9.4.1	Ausfluss aus kleinen Öffnungen unter dem Einfluss der Schwere	253
4.9.4.2	Instationärer Ausfluss unter Gegendruck	257
4.10	Umströmung von Körpern (Außenströmung)	259
4.10.1	Strömungsbilder	259
4.10.2	Kraftwirkungen	267
4.10.2.1	Einleitung	267
4.10.2.2	Reibungswiderstand (Flächenwiderstand)	269
4.10.2.3	Radscheibenreibung	271
4.10.2.4	Druckwiderstand (Formwiderstand)	276
4.10.2.5	Gesamtwiderstand	276
4.10.3	Luftkräfte an Fahrzeugen	284
4.10.3.1	Einleitung	284
4.10.3.2	Luftwiderstand	284
4.10.3.3	Auftrieb	285
4.10.3.4	Seitenwindkraft	286
4.10.4	Schwebegeschwindigkeit von Kugeln	287
4.11	Tragflügel	289
4.11.1	Einleitung	289
4.11.2	Kurze Einführung in die Geschichte der Tragflügeltheorie	289

4.11.3	Profilgeometrie.	291
4.11.4	Kräfte am unendlich breiten Tragflügel.	293
4.11.5	Druckverteilung am Profil.	294
4.11.6	Polardiagramm.	296
4.11.7	Induzierter Widerstand.	301
5	Kompressible Strömungen.	305
5.1	Einleitung.	305
5.2	Schallausbreitung.	305
5.3	Grundgleichungen.	307
5.3.1	Kontinuitätsgleichung.	307
5.3.2	Energiegleichung.	307
5.3.3	Impulssatz.	308
5.4	Verdichtungsstoß und Verdünnungswelle.	309
5.4.1	Einleitung.	309
5.4.2	Verdichtungsstöße.	309
5.4.3	Verdünnungswelle.	309
5.5	Rohrströmungen.	309
5.5.1	Einleitung.	309
5.5.2	Druckabfallgleichung bei beliebigem Wärmeaustausch.	311
5.5.3	Druckabfall bei isothermer Strömung.	314
5.5.4	Druckabfall bei adiabater Strömung.	314
5.5.5	Druckabfall bei Drosselung.	316
5.6	Ausströmvorgänge.	317
5.6.1	Ausströmen aus Druckbehältern.	317
5.6.1.1	Ausströmungsgeschwindigkeit.	317
5.6.1.2	Austretender Massenstrom.	320
5.6.1.3	Kritisches Druckverhältnis.	321
5.6.1.4	Kritische Geschwindigkeit.	323
5.6.1.5	Ausströmen mit Vorgeschwindigkeit.	324
5.6.2	Laval-Düse.	326
5.6.2.1	Einleitung.	326
5.6.2.2	Strömungsverhältnisse im Auslegepunkt.	327
5.6.2.3	Strömungsverhältnisse bei falschem Gegendruck.	328
5.6.2.4	Konstruktive Gestaltung von Laval-Düsen.	330
5.7	Verdichtungsströmungen.	331
5.7.1	Unterschalldiffusor.	331
5.7.2	Überschalldiffusor.	333
5.8	Umströmung von Körpern.	334
5.8.1	Strömungsbilder.	334
5.8.2	Druck- und Temperaturerhöhung im Staupunkt.	335
5.8.3	Widerstand von umströmten Körpern.	337
5.8.3.1	Widerstand der ebenen Platte.	337
5.8.3.2	Widerstand räumlich ausgedehnter Körper.	337
5.8.4	Tragflügel.	338
5.8.4.1	Tragflügel in reiner Unterschallströmung.	339
5.8.4.2	Tragflügel mit örtlichen Verdichtungsstößen.	339
5.8.4.3	Tragflügel in reiner Überschallströmung.	340
6	Strömungsmesstechnik.	341
6.1	Druckmessung.	341
6.1.1	Einleitung.	341
6.1.2	Flüssigkeits-Druckmessgeräte.	342
6.1.3	Kolben-Druckmessgeräte.	346
6.1.4	Federelastische Manometer.	346
6.1.5	Elektrische Druckmessgeräte.	347

6.2	Geschwindigkeitsmessung	351
6.2.1	Mechanische Verfahren	351
6.2.1.1	Schalenkreuzanemometer	351
6.2.1.2	Flügelradanemometer	351
6.2.1.3	Hydrometrische Flügel	352
6.2.1.4	Windfahnen-Richtungsmesser	353
6.2.2	Staurohre und Sonden	354
6.2.2.1	Prandtl-Rohr	354
6.2.2.2	Stauscheiben-Windmesser	355
6.2.2.3	Gesamtdrucksonden	355
6.2.2.4	Richtungssonden	355
6.2.3	Hitzdrahtanemometer	356
6.3	Flüssigkeitsstandmessung (Niveaumessung)	358
6.4	Volumenmessung	359
6.4.1	Trommelzähler	359
6.4.2	Ringkolbenzähler	360
6.4.3	Ovalradzähler	361
6.4.4	Flügelradzähler	361
6.4.5	Woltmanzähler	362
6.5	Durchflussmessung	362
6.5.1	Bestimmung des Volumenstroms aus Geschwindigkeitsverteilung und Leitungs-(Kanal-)Querschnitt	362
6.5.2	Drosselgeräte	364
6.5.3	Überfallwehr	367
6.5.4	Venturikanal	368
6.5.5	Durchflussmessung mit Schwebkörpergeräten	369
6.5.6	Elektromagnetische Durchflussmessgeräte	370
6.5.7	Ultraschall-Durchflussmesser	371
6.6	Viskosimetrie	371
6.6.1	Kapillarverfahren	371
6.6.2	Rotationsverfahren	372
6.6.3	Fallkörperverfahren	373
Literaturverzeichnis		377
Tabellenanhang		389
Namensverzeichnis		435
Stichwortverzeichnis		437