
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	35
1.6.1 Einleitung	35
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 Druckerbeit	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	Isotherne Schichtung	77
3.5	Isentrope Schichtung	79
3.6	Polytrope Schichtung	80
3.7	Normatmosphäre	81
4	Inkompressible Strömungen	83
4.1	Einleitung	83
4.2	Grundbegriffe	83
4.3	Grundgleichungen	89
4.3.1	Kontinuitätsgleichung (Durchflussgleichung)	89
4.3.2	Energiegleichung	90
4.3.2.1	Bewegungsgleichung 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	Impulssatz	108
4.3.4.1	Allgemeine Ableitung und Darstellung	108
4.3.4.2	Anwendungen und Beispiele	111
4.3.5	Drallsatz	132
4.3.5.1	Allgemeine Formulierung	132
4.3.5.2	Spezielle Formulierung	133
4.3.5.3	Anwendungen	134
4.4	Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln	138
4.4.1	Einleitung	138
4.4.2	Ähnlichkeitsbedingungen	139
4.4.3	Reynolds-Zahl	140
4.4.4	Froude-Zahl	142
4.5	Modellversuche	143
4.6	Strömungsformen	144
4.6.1	Einleitung	144
4.6.2	Laminare und turbulente Rohrströmung	144
4.6.3	Umströmung von Kreiszylindern und Kugeln	146
4.6.4	Strömende und schießende Bewegung bei Strömungen mit freier Oberfläche unter Schwereeinfluss	147
4.6.5	Turbulenzgrad	147
4.7	Stoffströme in geschlossenen Rohrleitungen (Rohrhydraulik)	148
4.7.1	Energiegleichung für reibungsbehaftete Strömungen	148
4.7.1.1	Stationäre Strömungen	148
4.7.1.2	Instationäre Strömungen	150
4.7.2	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei laminarer Strömung ($Re < 2320$)	151

4.7.3	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei turbulenter Strömung ($Re > 2320$)	155
4.7.3.1	Einleitung	155
4.7.3.2	Geschwindigkeitsverteilung	155
4.7.3.3	Druckabfall	161
4.7.4	Druckabfall in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt bei Strömung nicht Newton'scher Flüssigkeiten	167
4.7.4.1	Einleitung	167
4.7.4.2	Fließgesetze	168
4.7.4.3	Repräsentative Viskosität	169
4.7.4.4	Druckverlust	169
4.7.5	Druckabfall in gewellten Rohren	170
4.7.6	Rohre mit nicht kreisförmigen Querschnitten	172
4.7.6.1	Hydraulischer Durchmesser	172
4.7.6.2	Bestimmung der Rohrreibungszahl	173
4.7.7	Strömungsverluste in Rohrleitungselementen	178
4.7.7.1	Grundlagen	178
4.7.7.2	Rohreinläufe	181
4.7.7.3	Rohrausläufe	181
4.7.7.4	Querschnittsänderungen	181
4.7.7.5	Richtungsänderungen	200
4.7.7.6	Rohrverzweigungen	207
4.7.7.7	Dehnungsausgleicher	209
4.7.7.8	Absperr- und Regelorgane	209
4.7.7.9	Drosselgeräte	212
4.7.7.10	Filter und Siebe	214
4.7.7.11	Zusammengesetzte Widerstände	222
4.7.8	Einlaufstrecke (Rohreinlauf)	226
4.7.9	Spaltströmungen	229
4.8	Strömung in offenen Gerinnen	239
4.8.1	Einleitung	239
4.8.2	Geschwindigkeitsverteilung	239
4.8.3	Fließformeln	240
4.8.4	Hydraulisch optimale Profile	243
4.9	Ausfluss aus Behältern	246
4.9.1	Ausfluss durch kleine Öffnungen bei konstantem Druckunterschied und konstanter Spiegelhöhe	246
4.9.2	Ausfluss ins Freie durch große Öffnungen unter dem Einfluss der Schwere bei konstanter Spiegelhöhe	252
4.9.3	Ausfluss unter Gegendruck bei konstantem Niveauunterschied	254
4.9.4	Ausfluss bei veränderlicher Spiegelhöhe	254
4.9.4.1	Ausfluss aus kleinen Öffnungen unter dem Einfluss der Schwere	254
4.9.4.2	Instationärer Ausfluss unter Gegendruck	258
4.10	Umströmung von Körpern (Außenströmung)	260
4.10.1	Strömungsbilder	260
4.10.2	Kraftwirkungen	268
4.10.2.1	Einleitung	268
4.10.2.2	Reibungswiderstand (Flächenwiderstand)	270
4.10.2.3	Radscheibenreibung	272
4.10.2.4	Druckwiderstand (Formwiderstand)	277
4.10.2.5	Gesamtwiderstand	277
4.10.3	Luftkräfte an Fahrzeugen	285
4.10.3.1	Einleitung	285
4.10.3.2	Luftwiderstand	285
4.10.3.3	Auftrieb	286
4.10.3.4	Seitenwindkraft	287
4.10.4	Schwebegeschwindigkeit von Kugeln	288

4.11	Tragflügel	290
4.11.1	Einleitung	290
4.11.2	Kurze Einführung in die Geschichte der Tragflügeltheorie	290
4.11.3	Profilgeometrie	292
4.11.4	Kräfte am unendlich breiten Tragflügel	294
4.11.5	Druckverteilung am Profil	295
4.11.6	Polardiagramm	297
4.11.7	Induzierter Widerstand	302
5	Kompressible Strömungen	305
5.1	Einleitung	305
5.2	Schallausbreitung	305
5.3	Grundgleichungen der 1-dimensionalen Stromfadentheorie	308
5.3.1	Kontinuitätsgleichung	308
5.3.2	Energiegleichung, Isentrope und Polytrope	309
5.3.3	Thermodynamische Zustandsgleichung	314
5.3.4	Impulssatz und Drallsatz	314
5.4	Flächen-Geschwindigkeits-Beziehung	314
5.5	Rohrströmungen	315
5.5.1	Druckabfall bei beliebigem Wärmeaustausch	316
5.5.2	Druckabfall bei isothermer Strömung	319
5.5.3	Druckabfall bei adiabater Strömung (Fanno-Strömung)	320
5.5.4	Druckabfall bei adiabater Drosselung	322
5.6	Ausströmvorgänge	325
5.6.1	Ausströmen aus Druckbehältern	325
5.6.1.1	Ausströmgeschwindigkeit und Mach-Zahl	325
5.6.1.2	Austretender Massenstrom	328
5.6.1.3	Kritischer Zustand für eine reibungsfreie Strömung	330
5.6.1.4	Kritischer Zustand für eine reibungsbehaftete Strömung	333
5.6.2	Ausströmen mit Vorgeschwindigkeit	338
5.6.3	Laval-Düse	339
5.6.3.1	Verhältnisse im Auslegungspunkt für eine reibungsfreie Strömung	340
5.6.3.2	Verhältnisse im Auslegungspunkt für eine reibungsbehaftete Strömung	342
5.6.3.3	Strömungsverhältnisse bei nicht angepasstem Betrieb	343
5.6.3.4	Konstruktive Gestaltung von Laval-Düsen	346
5.7	Verdichtungsstöße	346
5.7.1	Senkrechter Verdichtungsstoß	347
5.7.2	Schräger Verdichtungsstoß	348
5.8	Prandtl-Meyer-Expansion	350
5.9	Verdichtungsströmungen	352
5.10	Umströmung von Körpern	355
5.10.1	Strömungsbilder	355
5.10.2	Druck- und Temperaturerhöhung im Staupunkt	356
5.10.3	Widerstand von umströmten Körpern	358
5.10.3.1	Widerstand der ebenen Platte	358
5.10.3.2	Widerstand räumlich ausgedehnter Körper	358
5.10.4	Tragflügel	359
5.10.4.1	Tragflügel in reiner Unterschallströmung	360
5.10.4.2	Tragflügel mit örtlichen Verdichtungsstößen	360
5.10.4.3	Tragflügel in reiner Überschallströmung	361
6	Strömungsmesstechnik	363
6.1	Druckmessung	363
6.1.1	Einleitung	363
6.1.2	Druckentnahme und Anbringung von Druckmessgeräten	363

6.1.3	Flüssigkeitsdruckmessgeräte	366
6.1.4	Kolben-Druckmessgeräte	370
6.1.5	Federelastische Manometer	371
6.1.6	Elektrische Druckmessgeräte	372
6.1.6.1	Einleitung	372
6.1.6.2	Widerstandsdruckmesser	372
6.1.6.3	Kapazitive Druckaufnehmer	373
6.1.6.4	Induktive Druckaufnehmer	373
6.1.6.5	Piezoelektrische Druckaufnehmer	374
6.2	Geschwindigkeitsmessung	374
6.2.1	Rotierende Stromwegmesser	374
6.2.2	Staurohre und Sonden	377
6.2.2.1	Druckbegriffe in strömenden Fluiden	377
6.2.2.2	Totaldrucksonden	379
6.2.2.3	Statische Sonden	379
6.2.2.4	Staudrucksonden (Staurohre)	380
6.2.2.5	Strömungsrichtungssonden	382
6.2.3	Thermische Sonden	385
6.2.4	Optische Messsonden	387
6.3	Füllstandsmessung (Niveaumessung)	389
6.4	Volumenmessung	391
6.5	Durchflussmessung	394
6.5.1	Einleitung	394
6.5.2	Netzmessungen	394
6.5.2.1	Grundlagen	394
6.5.2.2	Anordnung und Anzahl der Messpunkte	395
6.5.2.3	Referenzmessung	396
6.5.2.4	Auswertung	397
6.5.3	Wirkdruckverfahren mit Drosselgeräten	399
6.5.4	Durchflussmessung in offenen Gerinnen	411
6.5.4.1	Messwehre (Überfallwehre)	411
6.5.4.2	Venturi-Kanäle	413
6.5.5	Schwebekörper-Durchflussmesser	414
6.5.6	Magnetisch-induktive Durchflussmesser	415
6.5.7	Ultraschall-Durchflussmesser	416
6.5.8	Wirbelzähler-Durchflussmesser	418
6.5.9	Spezielle Verfahren	419
6.5.9.1	Durchflussmessung aus dem Druckabfall in geraden Rohren	419
6.5.9.2	Durchflussmessung an Rohrkrümmern	420
6.5.9.3	Ellison-Annubar-Durchflussmesser	421
6.5.10	Pulsierende Strömungen	422
6.6	Viskosimetrie	424
6.6.1	Rotationsviskosimeter	424
6.6.2	Fallkörperviskosimeter	426
6.6.3	Kapillarviskosimeter	427
Tafelverzeichnis		429
Namensverzeichnis		477
Literaturverzeichnis		479
Stichwortverzeichnis		495