

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>1</b>
1.1	Begriffe, Dimensionen, Formelzeichen	1
1.2	Aufgabe und Bedeutung	4
1.3	Wichtige Eigenschaften der Fluide	6
1.3.1	Kompressibilität	6
1.3.2	Stoffarten und -kombinationen	9
1.3.3	Teilchenkräfte, Kapillarität	11
1.3.3.1	Teilchenkräfte	11
1.3.3.2	Kapillarität	13
1.3.3.3	Krümmungsdruck	14
1.3.4	Mittlere freie Teilchenweglänge	15
1.3.5	Viskosität	15
1.3.5.1	Definition	15
1.3.5.2	Fluidreibungsgesetz nach Newton	16
1.3.5.3	Dynamische Viskosität $\eta$	21
1.3.5.4	Kinematische Viskosität $\nu$	22
1.3.5.5	Viskositätseinheiten	23
1.3.6	Schallgeschwindigkeit	24
1.4	Fluidkräfte, reale und ideale Fluide	27
<b>2</b>	<b>Fluid-Statik (Hydro- und Aerostatik)</b>	<b>31</b>
2.1	Grenzflächen (Trennflächen, freie Oberflächen)	31
2.1.1	Grundsätzliches	31
2.1.2	Fluid in Ruhe oder konstanter Translationsbewegung	31
2.1.3	Fluid in beschleunigter Translationsbewegung	31
2.1.4	Fluid in Rotationsbewegung	32
2.1.5	Übungsbeispiele	34
2.2	Fluid-Druck	34
2.2.1	Druck-Definition (Druckspannung)	34
2.2.2	Richtungsabhängigkeit des Druckes	35
2.2.3	Druck-Fortpflanzung	36
2.2.4	Technische Anwendung der Druck-Fortpflanzung	37
2.2.5	Druckenergie	38
2.2.6	Druckkraft auf gekrümmte Flächen	39
2.2.7	Gleichgewichtszustand	40
2.2.8	Druck-Ausbildung durch Schwerkraft (Schweredruck)	42
2.2.8.1	Inkompressible Fluide (Hydrostatisches Grundgesetz)	42
2.2.8.2	Kompressible Fluide (Luft- oder Barometerdruck)	44
2.3	Kommunizierende Gefäße	47
2.4	Saugwirkung	48
2.5	Fluidkräfte auf Wandungen	50
2.5.1	Grundsätzliches	50
2.5.2	Fluidkräfte gegen ebene Wandungen	50

---

2.5.2.1	Bodenkraft . . . . .	50
2.5.2.2	Seitenkraft . . . . .	51
2.5.2.3	Aufkraft . . . . .	54
2.5.3	Fluidkräfte gegen gekrümmte Wandungen . . . . .	54
2.5.4	Übungsbeispiele . . . . .	56
2.6	Auftrieb und Schwimmen . . . . .	58
2.6.1	Auftrieb . . . . .	58
2.6.2	Schwimmen . . . . .	59
2.6.2.1	Gleichgewicht . . . . .	59
2.6.2.2	Stabilität . . . . .	59
2.6.3	Übungsbeispiele . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Fluid-Dynamik, Grundlagen . . . . .</b>	<b>63</b>
3.1	Strömungseinteilung und Begriffe . . . . .	63
3.1.1	Strömungseinteilung . . . . .	63
3.1.2	Begriffe . . . . .	63
3.2	Fluid-Kinematik . . . . .	66
3.2.1	Grundsätzliches . . . . .	66
3.2.2	Eindimensionale Strömungen . . . . .	67
3.2.2.1	Bewegungszustand . . . . .	67
3.2.2.2	Grundgleichungen . . . . .	68
3.2.2.3	Übungsbeispiele . . . . .	70
3.2.3	Mehrdimensionale Strömungen . . . . .	71
3.2.3.1	Bewegungszustand . . . . .	71
3.2.3.2	Grundgleichung (Kontinuität) . . . . .	76
3.2.3.3	GAUSSscher Integralsatz . . . . .	78
3.3	Fluid-Kinetik . . . . .	78
3.3.1	Ähnlichkeitstheorie . . . . .	78
3.3.1.1	Grundlagen . . . . .	78
3.3.1.2	Strömungskennzahlen aus Dimensionsanalyse . . . . .	80
3.3.1.3	Bedeutung der Ähnlichkeitsgesetze . . . . .	85
3.3.1.4	Anwendung der Kennzahlen . . . . .	86
3.3.1.5	Herleitung der Kennzahlen durch Vergleichen gleichartiger Größen . . . . .	86
3.3.2	Strömungsformen . . . . .	89
3.3.2.1	Laminare Strömung . . . . .	89
3.3.2.2	Turbulente Strömung . . . . .	89
3.3.3	Grenzschichttheorie . . . . .	95
3.3.3.1	Grundsätzliches . . . . .	95
3.3.3.2	Grenzschichtdicke $\delta$ . . . . .	96
3.3.3.3	Verdrängungsdicke $\delta_1$ . . . . .	96
3.3.3.4	Grenzschichtströmung . . . . .	96
3.3.3.5	Kompressible Grenzschichten . . . . .	100
3.3.4	Strömungs-Ablösungen . . . . .	100
3.3.5	Unstetigkeitsflächen . . . . .	105
3.3.6	Eindimensionale Strömung idealer Fluide . . . . .	108
3.3.6.1	EULERSCHE Bewegungsgleichung der Absolutströmung . . . . .	108
3.3.6.2	EULERSche Bewegungsgleichung der Relativströmung in waagrechter Ebene . . . . .	112

---

3.3.6.3	Energiegleichungen der Absolutströmung . . . . .	115
3.3.6.4	Energiegleichung der Relativströmung . . . . .	128
<b>4</b>	<b>Strömungen ohne Dichteänderung . . . . .</b>	<b>131</b>
4.1	Eindimensionale Strömungen realer inkompressibler Fluide (Flüssigkeiten) . . . . .	131
4.1.1	Innenströmungen (Rohrströmungen) . . . . .	131
4.1.1.1	Erweiterte Energiegleichung . . . . .	131
4.1.1.2	Energieliniengefälle . . . . .	132
4.1.1.3	Gerade Rohre mit Kreisquerschnitt . . . . .	132
4.1.1.4	Gerade Rohre mit beliebigem Querschnitt . . . . .	148
4.1.1.5	Rohreinbauten . . . . .	150
4.1.1.6	Strömungen mit Energiezufuhr und/oder Energieabfuhr . . . . .	165
4.1.1.7	Kennlinie von Rohrsystemen . . . . .	167
4.1.1.8	Versuchswesen . . . . .	167
4.1.1.9	Übungsbeispiele . . . . .	168
4.1.2	Ausfluss aus Öffnungen . . . . .	171
4.1.2.1	Grundsätzliches . . . . .	171
4.1.2.2	Kleiner Ausflussquerschnitt . . . . .	172
4.1.2.3	Großer Ausflussquerschnitt . . . . .	172
4.1.2.4	Übungsbeispiele . . . . .	174
4.1.3	Strömungen in Gerinnen . . . . .	175
4.1.3.1	Grundsätzliches . . . . .	175
4.1.3.2	Gleichförmige stationäre Gerinneströmung . . . . .	176
4.1.3.3	Ungleichförmige stationäre Gerinneströmung . . . . .	177
4.1.4	Plattenströmungen (eindimensionale Außenströmungen) . . . . .	180
4.1.4.1	Grundsätzliches . . . . .	180
4.1.4.2	Glatte Platte (technisch glatt) . . . . .	180
4.1.4.3	Raue Platte . . . . .	182
4.1.4.4	Zulässige Rauigkeit . . . . .	184
4.1.4.5	Übungsbeispiele . . . . .	186
4.1.5	Rotierende Scheibe . . . . .	186
4.1.5.1	Grundsätzliches . . . . .	186
4.1.5.2	Freie Scheibe . . . . .	186
4.1.5.3	Umschlossene Scheibe . . . . .	188
4.1.5.4	Übungsbeispiele . . . . .	190
4.1.6	Strömungskräfte . . . . .	190
4.1.6.1	Impulssatz . . . . .	190
4.1.6.2	Drallsatz . . . . .	214
4.1.6.3	Hauptgleichung der Kreiselradtheorie . . . . .	221
4.1.6.4	Übungsbeispiele . . . . .	223
4.2	Mehrdimensionale Strömungen idealer Fluide . . . . .	224
4.2.1	EULERsche Bewegungsgleichungen . . . . .	224
4.2.2	Liniendifferenzial und Zirkulation . . . . .	227
4.2.2.1	Liniendifferenzial $\Lambda$ . . . . .	227
4.2.2.2	Zirkulation $\Gamma$ . . . . .	229
4.2.2.3	Vergleich von Strömungsfeld mit elektromagnetischem Feld . . . . .	230
4.2.3	Satz von THOMSON . . . . .	232

4.2.4	Integralsatz von STOKES . . . . .	233
4.2.5	Potenzial- und Stromfunktion . . . . .	235
4.2.6	Komplexes Potenzial . . . . .	237
4.2.7	Konforme Abbildung . . . . .	240
4.2.8	Strömungsklassen . . . . .	242
4.2.8.1	Potenzialströmungen . . . . .	242
4.2.8.2	Wirbelströmungen . . . . .	248
4.2.8.3	Zusammengesetzte Strömungen . . . . .	249
4.2.9	Umströmung von Schaufeln und Profilen . . . . .	254
4.2.9.1	MAGNUS-Effekt . . . . .	254
4.2.9.2	Tragflügeltheorie . . . . .	256
4.3	Mehrdimensionale Strömungen realer Fluide . . . . .	259
4.3.1	Bewegungsgleichungen . . . . .	259
4.3.1.1	Grundsätzliches . . . . .	259
4.3.1.2	NAVIER-STOKES-Gleichungen . . . . .	262
4.3.1.3	Wirbeltransportgleichung . . . . .	265
4.3.1.4	Grenzschicht-Gleichung nach PRANDTL . . . . .	266
4.3.1.5	Schlierschichttheorie . . . . .	268
4.3.1.6	REYNOLDS-Gleichungen . . . . .	271
4.3.1.7	Turbulenz-Modelle . . . . .	274
4.3.1.8	Numerische Strömungsmechanik . . . . .	280
4.3.2	Körper-Umströmung . . . . .	314
4.3.2.1	Grundsätzliches . . . . .	314
4.3.2.2	Flächenwiderstand . . . . .	316
4.3.2.3	Formwiderstand . . . . .	317
4.3.2.4	Gesamtwiderstand . . . . .	322
4.3.2.5	STOKESsches Widerstandsgesetz . . . . .	328
4.3.2.6	Übungsbeispiele . . . . .	329
4.3.3	Kräfte an umströmten Tragflächen . . . . .	330
4.3.3.1	Grundsätzliches . . . . .	330
4.3.3.2	Bezeichnungen . . . . .	331
4.3.3.3	Kräfte am unendlich breiten Tragflügel . . . . .	333
4.3.3.4	Erzeugung der Zirkulation . . . . .	335
4.3.3.5	Druckverteilung am Tragflügel . . . . .	337
4.3.3.6	Tragflügeleigenschaften . . . . .	338
4.3.3.7	Gleitflug . . . . .	339
4.3.3.8	Polarendiagramm . . . . .	340
4.3.3.9	Kräfte an endlich breiten Tragflügeln . . . . .	348
4.3.3.10	Flugbedingungen . . . . .	352
4.3.3.11	Übungsbeispiele . . . . .	354
5	Strömungen mit Dichteänderung . . . . .	355
5.1	Grundsätzliches . . . . .	355
5.2	Kleine Druckstörungen (Schall) . . . . .	356
5.2.1	Schallgeschwindigkeit . . . . .	356
5.2.2	Schallausbreitung . . . . .	360
5.3	Eindimensionale kompressible Strömungen (Stromfadentheorie) . . . . .	362

---

5.3.1	Grundgleichungen	362
5.3.1.1	Durchfluss und Kontinuität	362
5.3.1.2	Energiesatz	362
5.3.1.3	Impuls und Drall	371
5.3.2	Unterschall-Rohrströmungen	372
5.3.2.1	Grundsätzliches	372
5.3.2.2	Polytropen Rohrströmung	372
5.3.2.3	Isotherme Rohrströmung	375
5.3.2.4	Adiabate Rohrströmung	376
5.3.2.5	Rohreibungszahl $\lambda$	377
5.3.2.6	Drosselung	377
5.3.2.7	Übungsbeispiele	379
5.3.3	Ausströmungen (Expansionsströmungen)	379
5.3.3.1	Grundsätzliches	379
5.3.3.2	Mündung (einfache Düse)	380
5.3.3.3	LAVAL-Düse (erweiterte Düse)	389
5.3.4	Einströmungen (Verdichtungsströmungen)	400
5.3.4.1	Grundsätzliches	400
5.3.4.2	Unterschalldiffusor	400
5.3.4.3	Überschalldiffusor	404
5.3.4.4	Stoßdiffusor	405
5.3.5	Transsonische Rohrströmung	405
5.3.6	Übungsbeispiele	406
5.4	Große Druckstörungen (Stoß, Welle)	408
5.4.1	Grundsätzliches	408
5.4.2	Verdichtungsstöße	412
5.4.2.1	Senkrechter Verdichtungsstoß	413
5.4.2.2	Schräger Verdichtungsstoß	420
5.4.3	Verdünnungswellen	428
5.4.4	Zusammenstellung der Beeinflussungen von Überschallströmungen durch Wellen und Stöße	430
5.4.5	Übungsbeispiele	433
5.5	Mehrdimensionale kompressible Strömungen	433
5.5.1	Vorbemerkung	433
5.5.2	Umströmung mit (reinem) Unterschall	433
5.5.3	Umströmung mit Überschall	434
5.5.3.1	Örtlicher Überschall	435
5.5.3.2	Reiner Überschall	437
5.5.4	Blockierung (Choking) überschallschnell angeströmter Öffnungen	447
5.5.5	Übungsbeispiele	448
6	Anhang	451
6.1	Übersicht	451
6.2	Tabellen und Bilder	452
7	Lösungen der Übungsbeispiele	489

<b>8</b>	<b>Schrifttum</b>	567
8.1	Lehrbücher	567
8.2	Übungsbücher	567
8.3	Weiterführende Literatur	568
8.4	Handbücher	569
	<b>Sachverzeichnis</b>	571