

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	1
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 η	21
1.3.5.4	Kinematische Viskosität ν	22
1.3.5.5	Viskositätseinheiten	23
1.3.6	Schallgeschwindigkeit	24
1.4	Fluidkräfte, reale und ideale Fluide	27
2	Fluid-Statik (Hydro- und Aerostatik)	31
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 Schwerewirkung (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
3	Fluid-Dynamik, Grundlagen	63
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 δ	96
3.3.3.3	Verdrängungsdicke δ_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 waagrechtter Ebene	112

3.3.6.3	Energiegleichungen der Absolutströmung	115
3.3.6.4	Energiegleichung der Relativströmung	128
4	Strömungen ohne Dichteänderung	131
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	Linienintegral und Zirkulation	227
4.2.2.1	Linienintegral Λ	227
4.2.2.2	Zirkulation Γ	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	Schmierschichttheorie	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	Polytrope Rohrströmung	372
5.3.2.3	Isotherme Rohrströmung	375
5.3.2.4	Adiabate Rohrströmung	376
5.3.2.5	Rohrreibungszahl λ	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

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