

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Grundlagen	1
1.1	Womit beschäftigt sich die Fluidmechanik?	1
1.2	Unterscheidung zwischen Fluiden und festen Körpern	2
1.2	Systemdefinition	3
1.3	Zustandsgrößen	5
1.3.1	Spezifisches Volumen, Druck und Temperatur	5
1.3.1.1	Dichte und spezifisches Volumen	5
1.3.1.2	Spezifisches Volumen der Flüssigkeiten	6
1.3.1.3	Spezifisches Volumen der Gase und Dämpfe	7
1.4	Druck	8
1.5	Temperatur	9
1.6	Viskosität	10
1.6.1	Viskosität Newton'scher Fluide	10
1.6.2	Fließverhalten nicht Newton'scher Fluide	13
1.7	Oberflächenspannung	14
1.7.1	Haftspannungen	16
1.7.2	Grenzflächendruck (Kapillardruck)	17
1.7.3	Kapillarität	18
1.8	Problemlösungsmethodik	21
1.9	Benutzung der Programme	23
2	Ruhende Fluide	25
2.1	Ausbildung freier Flüssigkeitsoberflächen	25
2.2	Statischer Druck	30
2.2.1	Erzeugung des hydrostatischen Druckes	30
2.2.1.1	Kolbendruck	30
2.2.1.2	Schweredruck	32
2.2.2	Kommunizierende Gefäße	33
2.2.2	Statischer Druck der Atmosphäre (Aerostatik)	36
2.2.2.1	Isotherme Schichtung	36
2.2.2.2	Isentrope Schichtung	37
2.2.2.3	Normalatmosphäre	38
2.3	Druckkräfte	41
2.3.1	Druckkräfte auf ebene Wände	41
2.3.2	Druckkräfte auf gekrümmte Wände	41
2.3.3	Hydrostatisches Paradoxon	42
2.4	Auftrieb und Schwimmen	43

3	Bewegte Fluide	47
3.1	Grundbegriffe	47
3.1.1	Strömungsgeschwindigkeit	47
3.1.2	Stromlinie, Strömungsfeld	48
3.2	Sichtbarmachung von Strömungen	49
3.2.1	Experimentelle Sichtbarmachung	49
3.2.2	Rechnerische Erfassung von Strömungsfeldern	50
3.3	Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltungssatz)	50
3.3.1	Massenstrom und Volumenstrom	50
4	Energieerhaltungssatz	61
4.1	Allgemeiner Energieerhaltungssatz	61
4.1.2	Energieerhaltung in der Strömung inkompressibler Fluide	62
4.1.3	Energieerhaltung in Strömungen idealer Fluide	62
4.1.4	Der dynamische Druck	63
4.2	Anwendung der Bernoulli-Gleichung	64
4.2.1	Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit	64
4.2.2	Bestimmung des Massen- und Volumenstromes	67
4.2.3	Berechnung der Ausflussgeschwindigkeit aus einem Behälter	70
4.2.4	Strahlpumpen	74
4.2.5	Das hydrodynamische Paradoxon	75
4.2.6	Druckänderung senkrecht zur Strömungsrichtung	76
4.2.7	Kavitation	77
5	Impulssatz	79
5.1	Impulssatz	79
5.2	Anwendungen des Impulssatzes	82
5.2.1	Strömungskräfte am Rohrkrümmer	82
5.2.2	Rückstoßkräfte von Flüssigkeitsstrahlen	84
5.2.2.1	Strahlstoßkräfte auf eine senkrechte Wand	86
5.2.2.2	Schiefer Stoß gegen eine Wand	88
5.2.2.3	Gerader Stoß gegen eine gewölbte Platte	88
5.3	Vereinfachte Propellertheorie	89
5.3.1	Schub der Strahl- und Raketentriebwerke	93
5.4	Drallsatz	93
5.4.1	Kraftwirkung auf die Laufräder der Strömungsmaschinen	95
6	Reibungsdruckverlust inkompressibler Fluide in Rohren	105
6.1	Einleitung	105
6.2	Ähnlichkeitsgesetze und Kennzahlen	106
6.2.1	Reynoldszahl	107
6.2.2	Froudezahl	108
6.2.3	Eulerzahl	108
6.2.4	Modellversuche	109

6.2.5	Strömungsformen	111
6.2.5.1	Strömungsformen im Rohr	112
6.2.5.2	Strömungsformen an umströmten Körpern	113
6.2.5.3	Strömung von Flüssigkeiten mit freier Oberfläche	113
6.3	Energiebilanzgleichung reibungsbehafteter Strömung	114
6.4	Reibungsdruckverlust in Rohren	114
6.4.1	Druckverlust in der laminaren Rohrströmung	115
6.4.2	Druckverlust in der turbulenten Rohrströmung	120
6.4.3	Reibungsdruckverlust im Rohr nicht kreisförmigen Querschnitts ..	132
6.4.3.1	Druckverlust der turbulenten Strömung	132
6.4.3.2	Druckverlust bei laminarer Strömung	135
6.5	Navier-Stokes-Gleichungen	141
7	Druckverlust in Rohrleitungselementen	145
7.1	Allgemeines	145
7.2	Widerstandszahlen gängiger Rohrleitungselemente	146
7.2.1	Rohreinläufe	146
7.2.2	Plötzliche Querschnittserweiterung	147
7.2.3	Plötzliche Querschnittsverengung	148
7.2.4	Allmähliche Querschnittserweiterung (Diffusor)	150
7.2.5	Allmähliche Querschnittsverengungen (Konfusor, Düse)	152
7.2.6	Normdrosselorgane	153
7.2.7	Krümmen (Rohrbogen)	154
7.2.8	Verzweigungen	155
7.2.9	Andere Rohrleitungselemente	156
7.3	Rohrleitungssysteme	156
7.4	Ausströmungsvorgänge	164
7.4.1	Ausfluss bei konstantem Flüssigkeitsniveau	164
7.4.2	Ausfluss bei veränderlichem Flüssigkeitsniveau	166
8	Strömung kompressibler Fluide	167
8.1	Grundlagen	167
8.1.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Druckstörung	167
8.1.2	Machzahl	169
8.1.3	Zustandsgrößen der Stagnation	172
8.2	Adiabate Strömung in Kanälen konstanten Querschnitts	172
8.2.1	Energiebilanz der kompressiblen adiabaten Strömung	173
8.2.2	Spezielle Lösungen der Energiebilanzgleichung	173
8.3	Strömung in Kanälen veränderlichen Querschnitts	184
8.3.1	Einfluss der Machzahl	184
8.3.2	Ausströmung aus einem Behälter	186
8.3.2.1	Ausströmgeschwindigkeit	186
8.3.2.2	Austretender Massenstrom	187

8.3.2.3	Kritisches Druckverhältnis	188
8.3.2.4	Kritischer Massenstrom und kritische Geschwindigkeit	190
8.3.2.5	Strömungsvorgänge bei kritischer Strömung	191
8.3.3	Entleeren eines Behälters	194
8.3.3.1	Isothermes Entleeren eines Behälters	194
8.3.3.2	Isentropes Entleeren eines Behälters	198
8.4	Überschallströmung	203
8.4.1	Lavaldüse	203
8.4.1.1	Berechnung der Lavaldüsen	204
8.4.1.2	Betriebsverhalten bei veränderlichem Gegendruck	205
8.4.1.3	Konstruktive Gestaltung der Lavaldüsen	206
8.4.2	Verdichtungsströmung	208
8.4.2.1	Unterschalldiffusor	208
8.4.2.2	Überschallkonfusor	210
9	Strömung von Gas-Flüssigkeitsgemischen	211
9.1	Einleitung	211
9.1.1	Grundlagen	211
9.1.1.1	Dampfgehalt und Dampfvolumenteil	211
9.1.1.2	Kontinuitätsgleichung	212
9.1.1.3	Dichte	212
9.2	Strömungsformen	213
9.3	Druckverluste	217
9.3.1	Reibungsdruckverlust	217
9.3.2	Dampfvolumenteil	223
9.3.3	Statischer Druckverlust	223
9.3.4	Beschleunigungsdruckverlust	224
9.3.5	Reibungsdruckverluste in Rohrleitungselementen	224
9.4	Kritischer Durchfluss	229
10	Umströmte Körper	235
10.1	Einführung	235
10.2	Strömungswiderstand umströmter Körper	235
10.2.1	Reibungswiderstand	237
10.2.2	Druck- oder Formwiderstand	238
10.2.3	Messung der Widerstandskräfte	239
10.2.4	Luftwiderstand der Fahrzeuge	240
10.2.4.1	Luftwiderstand	241
10.2.4.2	Auftrieb	243
10.2.4.3	Seitenwindkraft	243
10.2.5	Widerstandszahlen der Körper verschiedener Formen	244
10.2.6	Schwebegeschwindigkeit	245
10.3	Wirbelablösungen an zylindrischen Körpern	246
10.4	Druckverlust in quer angeströmten Rohrbündeln	249

10.4.1	Zylindrische glatte Rohre	249
10.4.2	Zylindrische Rippenrohre	253
10.5	Tragflügel	256
10.5.1	Einleitung	256
10.5.2	Tragflügeltheorie	256
10.5.3	Kräfte am unendlich breiten Tragflügel	257
10.5.4	Induzierter Widerstand	260
10.6	Umströmung im Überschallbereich	260
10.6.1	Druck und Temperatur am Staupunkt	261
10.6.2	Widerstand umströmter Körper	262
10.6.2.1	Ebene, parallel angeströmte dünne Platte	262
10.6.2.2	Widerstand räumlicher Körper	263
10.6.2.3	Tragflügel	264
11	Einführung in numerische Lösungsmethoden	265
11.1	Allgemeines	265
11.2	Grundlagen der Strömungsprogramme	266
11.3	Endliche Differenzen-Methode	266
11.3.1	Gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung	266
11.3.2	Differentialgleichungen zweiter Ordnung	270
12	Strömungsmesstechnik	275
12.1	Einleitung	275
12.2	Druckmessung	275
12.2.1	Druckmesssystem	275
12.2.2	Prinzip der Druckmessung	277
12.2.3	Druckmessgeräte	277
12.2.3.1	Flüssigkeitsmanometer	277
12.2.3.2	Gewichtsmanometer	281
12.2.3.3	Federmanometer	282
12.2.4	Anordnung der Druckmesssysteme	284
12.2.4.1	Unterkühlte Flüssigkeiten und überhitzte Gase	285
12.2.4.2	Gesättigte Fluide	287
12.3	Temperaturmessung	290
12.3.1	Prinzip der Temperaturmessung	290
12.3.2	Temperaturmessgeräte	291
12.3.2.1	Flüssigkeitsthermometer	291
12.3.2.2	Bimetallthermometer	292
12.3.2.3	Ideales Gasthermometer	293
12.3.2.4	Widerstandsthermometer	293
12.3.2.5	Thermoelemente	294
12.3.3	Anordnung des Temperaturmesssystems	296
12.4	Geschwindigkeitsmessung	297
12.4.1	Prinzip der Geschwindigkeitsmessung	297

12.4.2	Geschwindigkeitsmessgeräte	297
12.4.2.1	Mechanische Messgeräte	297
12.4.2.2	Staurohre	298
12.4.2.3	Hitzdraht- und Heißfilmanemometer	299
12.4.2.4	Laser-Doppler-Anemometer	300
12.5	Flüssigkeitsstandmessung	301
12.6	Volumenmessung	302
12.6.1	Prinzip der Volumenmessung	302
12.6.2	Volumenzähler	302
12.6.2.1	Trommelzähler	302
12.6.2.2	Ringkolbenzähler	303
12.6.2.3	Ovalradzähler	303
12.6.2.4	Flügelradzähler	303
12.6.2.5	Woltmanzähler	304
12.7	Durchflussmessung	304
12.7.1	Prinzipien der Durchflussmessung	304
12.7.2	Durchflussmessmethoden und -geräte	305
12.7.2.1	Aus der Messung der Strömungsgeschwindigkeit	305
12.7.2.2	Drosselmessgeräte	307
12.7.2.3	Schwebekörper-Durchflussmesser	311
12.7.2.4	Elektromagnetische Durchflussmessgeräte	312
12.7.2.5	Ultraschall-Durchflussmessgerät	313
12.7.2.6	Tracer-Durchflussmessung	314
12.8	Auswertung von Messungen	315
12.8.1	Fehlerarten	316
12.8.1.1	Systematische Fehler	316
12.8.1.2	Zufällige Fehler	317
12.8.2	Fehlerrechnung	317
12.8.2.1	Geschätzte Fehler einer Einzelmessung	317
12.8.2.2	Fehler einer Messreihe	318
12.8.2.3	Mittlerer Fehler des Mittelwerts	320
12.8.2.4	Fehlerfortpflanzung	321
12.8.2.5	Der absolute Fehler	322
12.8.3	Angabe der Fehler	324
Anhang		329
A1:	Normatmosphäre	329
A2:	Stoffwerte Wasser/Wasserdampf: Dynamische Viskosität	330
A3:	Stoffwerte Wasser/Wasserdampf: Dichte	331
A4:	Stoffwerte Wasser/Wasserdampf: Schallgeschwindigkeit	332
A5:	Stoffwerte des Wassers bei 1 bar Druck	333
A6:	Dichte der Flüssigkeiten bei 1 bar Druck	334
A7:	Kinematische Viskosität der Flüssigkeiten bei 1 bar Druck	335
A8:	Kinematische Viskosität der Öle bei 1 bar Druck	336

B1: Temperaturtabellen für Thermoelemente	337
B2: Durchflusszahlen für Normdüsen	338
B3: Expansionszahlen für Normdüsen	339
B4: Durchflusszahlen für Normblenden	340
B5: Expansionszahlen für Normblenden	341
B6: Durchflusszahlen für Normventuridüsen	342
C1: Liste der Programme	343
Sachverzeichnis	345
Literaturhinweise	351