

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Formelzeichen und Einheiten	11
1 Einleitung	13
2 Grundgesetze der reibungsfreien Strömung	13
2.1 Kontinuitätsgleichung	14
2.2 Energiegleichung	14
2.2.1 Energieformen in einem Strömungssystem	14
2.2.1.1 Kinetische Energie	14
2.2.1.2 Potentielle Energie	16
2.2.1.3 Druck-Energie	17
2.2.1.4 Innere Energie	17
2.2.2 Bernoullische Gleichung	17
2.3 Druck-Definition in einer Strömung	19
2.3.1 Gesamtdruck	19
2.3.2 Kinetischer Druck (Dynamischer Druck)	19
2.4 Strömung in gekrümmten Bahnen	19
2.4.1 Druckänderungen senkrecht zur Strömung	19
2.4.2 Geschwindigkeitsverteilung in einer gekrümmten Strömung	20
2.5 Impulsgleichung	22
2.5.1 Rohrkrümmer	23
2.5.2 Staudruck gegen Flächen	24
2.5.3 Bewegte Platte	25
2.5.4 Rückstoßkraft	25
2.5.5 Impulsstrommoment (Drehimpuls)	26
3 Innere Flüssigkeitsreibung (Viskosität)	27
4 Strömungsformen	29
4.1 Laminare Rohrströmung	29
4.2 Turbulente Strömung	31
5 Grenzschichten	31
5.1 Laminare Grenzschicht	31
5.1.1 Einlaufänge im laminar durchströmten Rohr	33
5.1.2 Grenzschichtdicke aus der Impulsstromgleichung	34
5.2 Turbulente Grenzschicht	37
5.2.1 Turbulente Grenzschichtdicke	41
5.2.2 Dicke der laminaren Unterschicht bei glatten Rohren	43
5.2.3 Einlaufänge im turbulent durchströmten Rohr	44
5.2.4 Universelles Geschwindigkeitsverteilungsgesetz	45
6 Ablösung und Wirbelbildung	50
6.1 Durchströmte Körper	50
6.2 Umströmte Körper	50
6.2.1 Grenzschichtdicke bei quer angeströmten Körpern	54
6.2.2 Grenzschichtdicke am Kreiszyylinder	55

6.3	Querschnittsveränderungen	56
6.3.1	Unstetige Querschnittserweiterung	56
6.3.2	Stetige Querschnittserweiterung	57
6.3.3	Unstetige Querschnittsverengung	58
6.3.4	Stetige Verengungen	59
6.3.5	Verengungen und Erweiterungen	59
7	Druckverlust	65
7.1	Druckverlust in Rohrsystemen	65
7.1.1	Nicht kreisförmige Querschnitte	66
7.2	Druckverlustdefinition	67
7.3	Druckverlust in Gasleitungen bei großem Druckabfall	67
7.3.1	Druckabfall bei isothermer Strömung	69
7.3.2	Druckabfall bei adiabater Strömung	70
7.4	Laminare Rohrströmung	70
7.5	Turbulente Rohrströmung	72
7.5.1	Turbulente Strömung in rauhen Rohren	74
7.5.2	Berechnung	76
7.5.3	Vollkommen raue Rohre	76
7.5.4	Gesamter Bereich	77
7.5.5	Rohrrauigkeit	78
7.5.6	Übergangsgebiet von laminarer zu turbulenter Strömung	84
7.5.7	Reibungszahl λ bei Metallschläuchen	84
7.6	Rohreinlaufverluste	91
7.6.1	Laminare Strömung	91
7.6.2	Turbulente Strömung	92
7.7	Druckabfall in gekrümmten Rohren	93
7.7.1	Geometrie der Rohrschlinge	94
7.7.2	Laminare Strömung	95
7.7.3	Turbulente Strömung	96
7.7.3.1	Widerstand in ebenen Rohrschlingen	97
7.8	Druckverlust in Rohrbögen	98
7.9	Druckverlust im Krümmer und Knie	102
7.10	Druckverlust für sonstige Formstücke	107
7.10.1	Widerstandsbeiwerte für Einbauten	112
7.10.2	Widerstandsbeiwerte für Rohrleitungsorgane	115
7.10.3	Armaturen	115
7.10.4	Rückschlagarmaturen	119
7.10.5	Schmutzfänger	119
7.11	Bezugssystem für die Druckverlustbestimmung	120
8	Flächenwiderstand	121
8.1	Laminare Grenzschicht der ebenen, glatten Platte	121
8.2	Turbulente Grenzschicht der ebenen, glatten Platte	121
8.2.1	Rauhe Platten	123
9	Form- und Gesamtwiderstand	124
9.1	Druckverlustbeiwert eines Einzelrohres	126
9.1.1	Druckverlustbeiwert einer einzelnen Rohrreihe	127
9.1.2	Druckverlustbeiwert von Rohrbündeln	128
9.1.3	Strömungsmerkmale am querangeströmten Rohr und Rohrbündel	128

9.2	Berechnung des Druckverlustes im Rohrbündel mit Hilfe des Druckverlustbeiwertes ξ	132
9.2.1	Berechnung des Druckverlustbeiwertes	134
9.2.2	Einfluß der Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte	136
9.2.3	Einfluß der Anzahl der Rohrreihen	136
9.2.4	Zusammenfassende Gleichungen des Druckverlustbeiwertes	138
9.3	Strömungsverluste bei quer angeströmten Rohrbündeln mit Hilfe des Reibungsbeiwertes λ_{sq}	139
9.4	Druckverlust in Schüttungen	143
10	Ausgewählte Themen der Strömungstechnik	145
10.1	Strömungsverteilung und Sammlung	145
10.2	Anlagendruckverlust	146
10.2.1	1-Strang-Systeme	146
10.2.2	Verzweigte Systeme	148
10.2.2.1	Rohrsysteme	149
10.2.2.2	Gesamtwiderstand	150
10.3	Schwebegeschwindigkeit	150
10.4	Schallgeschwindigkeit (Druckfortpflanzungsgeschwindigkeit)	152
10.5	Strömung durch Lochscheiben	155
10.6	Druckverlust bei Einbauten im Kanalsystem	158
10.6.1	Druckverlust bei Versperrung mit einem Körper	158
10.6.2	Druckverlust bei einem Körper mit Formwiderstand	159
10.6.3	Druckverlust im Wärmetauscher	161
10.7	Strömungsbegrenzung bei Flüssigkeiten durch Kavitation	162
10.7.1	Kavitationszahl σ	163
10.7.2	Kavitationszahlen	164
10.8	Strömungsbegrenzung bei Gasen durch Schallgeschwindigkeit	165
10.8.1	Totaler Druck, totale Temperatur und totale Dichte	167
10.8.2	Widerstandsbeiwerte	168
10.9	Strömungsverteilung zwischen Verteiler und Sammler	169
10.10	Widerstandsbeiwerte von Verteiler und Sammler	169
10.10.1	Verteiler mit konstantem Querschnitt über die Länge	169
10.10.2	Sammler mit konstantem Querschnitt über die Länge	170
10.10.3	Verteiler und Sammler in U-Form (mit konstantem Querschnitt)	170
10.10.4	Verteiler und Sammler in Z-Form (mit konstantem Querschnitt)	171
10.11	Strömungsverteilung bei Apparateanströmung	171
10.12	Korrekturglied für die kinetische Energie in der Bernoullischen Gleichung (Coreolis-Koeffizient)	172
10.13	Verlustbeiwert bei einer das System verlassenden Strömung	172
10.14	Flüssigkeitsgasströmung	173
11	Zusammenstellung der wichtigsten Gleichungen	175
12	Stoffwerte	196
13	Beispiele	203
1	Bestimmung des Ruhedruckunterschiedes eines Schornsteins	203
2	Bestimmung des Volumenstromes am Rohrkrümmer	203
3	Reaktionskraft am Rohrkrümmer	204
4	Reaktionskraft an einer stehenden und bewegten Platte	205
5	Ausflußgeschwindigkeit und Reaktionskraft an einem Behälter	206

6	Geschwindigkeiten, Drehmoment und Leistungsaufnahme an einem Pumpenlauftrad	206
7	Grenzschichtdicke an einer ebenen Platte	208
8	Strömungszustände im Rohr	209
9	Wirbelablösung an einem quer angeströmten Rohr	209
10	Stoßverlust an einer plötzlichen Querschnittserweiterung	210
11	Druckverlust in einem Rohrwendel	211
12	Druckverlust in einer Wasserrohrleitung	213
13	Druckverlust in einer Heizölrohrleitung	216
14	Bestimmung der Rohrrauigkeit	219
15	Druckverlust in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser	221
16	Rechteckschlitz – hydraulischer Durchmesser und Druckverlust bei laminarer Strömung	224
17	Hintereinanderschaltung von Widerständen	227
18	Parallelschaltung von Widerständen	231
19	Beliebige Schaltung von Widerständen	234
20	Hydraulischer Durchmesser und Druckverlust im Rohrbündelwärmeaustauscher	236
21	Heißwasseranlage mit Naturumlauf	239
22	Pumpenanlage	243
23	Widerstandsbeiwerte von Armaturen	246
24	Kennzeichnung von Stellventilen	249
25	Druckverlust durch Armaturengruppe am Erdgasbrenner	250
26	Erhitzeranlage mit Naturzug	252
27	Lufterhitzeranlage mit Gebläse	256
28	Windkanal	263
29	Schornsteinzugstärke	267
30	Einfluß der Druckverluste auf die Schornsteinhöhe	268
31	Grenzgeschwindigkeit zur Unterteilung von kompressibler und inkompressibler Luftströmung	271
32	Vergleich von inkompressibler und kompressibler Strömung	273
33	Druckabfall bei isothermer Druckluftströmung	274
34	Druckabfall bei adiabatischer Dampfströmung	276
35	Zulässiger Rohrwidestandsbeiwert bei adiabatischer Dampfströmung	278
36	Zulässige Einzelwiderstände bei adiabatischer Heißdampfströmung	279
37	Isotherme Strömung in einer Ferngasleitung	280
38	Adiabatische Erdgasströmung mit kritischer Geschwindigkeit am Leitungsende	282
39	Wasser-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende	288
40	Druckluft-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende	289
41	Heißdampf-Volumenstrombestimmung mittels Düse	292
42	Feuchte-Luft-Volumenstrombestimmung mittels Normventuridüse	295
43	Wasser-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende und U-Rohr-Quecksilber-Differenzdruckmanometer	297
44	Auslegung von Drosselscheiben	299
45	Überschlägige Bestimmung der Widerstandsbeiwerte von Blende und Düse	300
46	Druckverlust am Glatrohrbündel	303
47	Druckverlust einer Wärmeträgeranlage	306
48	Strömungsverteilung bei Apparateanströmung	309
Bildbeispiele ausgeführter Bauteile und Anlagen		311
Literaturverzeichnis		315
Stichwortverzeichnis		317