

Kamprath-Reihe

Dipl.-Ing. Walter Wagner

Strömung und Druckverlust

Mit Beispielsammlung

4., überarbeitete und erweiterte Auflage

Vogel Buchverlag

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 Grenzschichtdichte	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 rauen 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 X 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 Rohrschlange.	94
7.7.2	Laminare Strömung.	95
7.7.3	Turbulente Strömung.	96
7.7.3.1	Widerstand in ebenen Rohrschlangen.	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	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 er	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
11	Zusammenstellung der wichtigsten Gleichungen	169
12	Stoffwerte	190
13	Beispiele	197
1	Bestimmung des Ruhedruckunterschiedes eines Schornsteins	197
2	Bestimmung des Volumenstromes am Rohrkrümmer	197
3	Reaktionskraft am Rohrkrümmer	198
4	Reaktionskraft an einer stehenden und bewegten Platte	199
5	Ausflußgeschwindigkeit und Reaktionskraft an einen Behälter	200
6	Geschwindigkeiten, Drehmoment und Leistungsaufnahme an einem Pumpenlaufrad	200
7	Grenzschichtdicke an einer ebenen Platte	202
8	Strömungszustände im Rohr	203
9	Wirbelablösung an einem quer angeströmten Rohr	203
10	Stoßverlust an einer plötzlichen Querschnittserweiterung	204
11	Druckverlust in einem Rohrwinkel	205
12	Druckverlust in einer Wasserröhrleitung	207
13	Druckverlust in einer Heizölrohrlleitung	210
14	Bestimmung der Rohrrauigkeit	213
15	Druckverlust in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser	215

16	Rechteckschlitz - hydraulischer Durchmesser und Druckverlust bei laminarer Strömung	218
17	Hintereinanderschaltung von Widerständen	221
18	Parallelschaltung von Widerständen	225
19	Beliebige Schaltung von Widerständen	228
20	Hydraulischer Durchmesser und Druckverlust im Rohrbündelwärmeaustauscher.	230
21	Heißwasseranlage mit Naturumlauf	233
22	Pumpenanlage.	237
23	Widerstandsbeiwerte von Armaturen.	240
24	Kennzeichnung von Stellventilen.	243
25	Druckverlust durch Armaturengruppe am Erdgasbrenner.	244
26	Erhitzeranlage mit Naturzug.	246
27	Lufterhitzeranlage mit Gebläse.	250
28	Windkanal.	257
29	Schornsteinzugstärke.	261
30	Einfluß der Druckverluste auf die Schornsteinhöhe.	262
31	Grenzgeschwindigkeit zur Unterteilung von kompressibler und inkompressibler Luftströmung.	265
32	Vergleich von inkompressibler und kompressibler Strömung	267
33	Druckabfall bei isothermer Druckluftströmung.	268
34	Druckabfall bei adiabatischer Dampfströmung.	270
35	Zulässiger Rohrwiderstandsbeiwert bei adiabatischer Dampfströmung.	272
36	Zulässige Einzelwiderstände bei adiabatischer Heißdampfströmung	273
37	Isotherme Strömung in einer Ferngasleitung	274
38	Adiabatische Erdgasströmung mit kritischer Geschwindigkeit am Leitungsende.	276
39	Wasser-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende.	282
40	Druckluft-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende.	283
41	Heißdampf-Volumenstrombestimmung mittels Düse.	286
42	Feuchte-Luft-Volumenstrombestimmung mittels Notmventuridüse.	289
43	Wasser-Volumenstrombestimmung mittels Meßblende und U-Rohr-Quecksilber-Differenzdruckmanometer.	291
44	Auslegung von Drosselscheiben.	293
45	Überschlägige Bestimmung der Widerstandsbeiwerte von Blende und Düse.	294
46	Druckverlust am Glattrohrbündel	297
47	Druckverlust einer Wärmeträgeranlage.	300
	Bildbeispiele ausgeführter Bauteile und Anlagen	303
	Literaturverzeichnis.	307
	Stichwortverzeichnis.	309