

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 Einlauflänge 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 Röhren	43
5.2.3 Einlauflänge 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 Kreiszylinder	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 rauhe Rohre . . . . .	.76
7.5.4	Gesamter Bereich . . . . .	.77
7.5.5	Rohrrauigkeit . . . . .	.78
7.5.6	Übergangsgebiet von laminarer zu turbulenten Strömung . . . . .	.84
7.5.7	Reibungszahl X bei Metallschlüuchen . . . . .	.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 Rohrschlaufe . . . . .	.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 Einzelrohrs . . . . .	.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 i	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 angestromten Rohrbündeln mit Hilfe des Reibungsbeiwertes X^A	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 angestromten Rohr	203
10	Stoßverlust an einer plötzlichen Querschnittserweiterung	204
11	Druckverlust in einem Rohrwendel	205
12	Druckverlust in einer Wasserrohrleitung	207
13	Druckverlust in einer Heizölrohrleitung	210
14	Bestimmung der Rohrrauhigkeit	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 Rohrbündelwärmetauscher	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 Notventuridüse	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