

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1. Formelzeichen und Einheiten	4
2. Hydro- und Aerostatik	11
2.1 Hydrostatik inkompressibler Flüssigkeiten	11
2.2 Hydrostatik kompressibler Flüssigkeiten	13
2.2.1 Die Wichte	13
2.2.2 Einfluß der Kompressibilität der Flüssigkeiten auf hydrostatische Antriebe	14
2.2.3 Bedeutung der Wärmeausdehnung von festen Körpern und Flüssigkeiten in hydrostatischen Antrieben	15
2.3 Zustandsgleichung der Gase	17
2.3.1 Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und Volumen für Dämpfe	18
2.4 Spezifische Verdichtungsarbeit im Kolbenverdichter	20
2.4.1 Leistungsbedarf für die Verdichtung	22
2.4.2 Der Liefergrad des Kolbenverdichters	23
3. Hyrodynamik	25
3.1 Stationäre Strömung einer reibungsfreien, inkompressiblen Flüssigkeit	25
3.1.1 Eindimensionale Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	25
3.1.2 Mehrdimensionale Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	26
3.2 Kontinuitätsgleichung	28
3.2.1 Kontinuitätsgleichung für inkompressive Flüssigkeiten	28
3.2.2 Kontinuitätsgleichung für kompressive Flüssigkeiten	28
3.3 Ähnlichkeitsgesetze	28
3.3.1 Zähigkeit der Flüssigkeiten	29
3.3.2 Die Reynolds-Zahl	34
3.4 Laminare Strömung durch zylindrische Rohre	37
3.5 Laminare Strömung im Ringspalt	40
3.6 Laminare Strömung zwischen zwei Platten	42

VIII Inhaltsverzeichnis

3.7	Hydrostatische Lagerung	42
3.8	Turbulente Strömung durch glatte zylindrische Rohre	43
3.9	Geschwindigkeitsverteilung über den Rohrquerschnitt in geraden zylindrischen Rohren nach dem $1/n$ -Potenzgesetz	46
3.10	Einfluß der Rauigkeit auf den Strömungswiderstand in Rohren	50
3.10.1	Die kritische Reynolds-Zahl	51
3.10.2	Beispiele für die Berechnung des Druckverlustes in einer geraden Rohrleitung	53
3.10.3	Druckverlust in gewellten Rohren	55
3.11	Diffusoren und Infusoren	56
3.11.1	Konisch erweiterter Diffusor und konisch verengter Infusor	57
3.11.2	Stoßdiffusor	64
3.11.3	Stufendiffusor	65
3.11.4	Ringdiffusor	65
3.11.5	Druckverteilung bei verzögerter Strömung in einem Diffusor	67
3.12	Berechnung des Volumenstromes aus dem Druckabfall in einem Venturirohr	67
3.13	Strömung von Flüssigkeiten und Gasen durch Drosselketten	68
3.14	Einfluß von Zähigkeit und Austrittsform auf die Ausflußmenge aus Gefäßen	71
3.14.1	Ausfluß durch Düsen oder Blenden	72
3.14.2	Ausfluß durch ein horizontales Rohr	74
3.14.3	Ausfluß durch ein lotrechtes Rohr	78
3.15	Definition von Mittelwerten	80
3.15.1	Statistische Mittelwerte	80
3.15.2	Örtliche Mittelwerte	80
3.15.3	Zeitliche Mittelwerte	82
4.	Strömung von Gasen, Gasdynamik	83
4.1	Zähigkeit der Gase	83
4.2	Ausströmen von Gasen aus Gefäßen bei geringem Druckgefälle	85
4.3	Ausströmen von Gasen aus Gefäßen bei hohem Druckgefälle. Das kritische Druckverhältnis	86
4.4	Rechenbeispiele für das Ausströmen von Gasen	91
4.4.1	Ausströmende Leckluft aus einem Druckluftnetz	91
4.4.2	Erforderlicher Querschnitt für das Sicherheitsventil eines Kompressors	93
4.4.3	Erforderlicher Querschnitt für das Sicherheitsventil eines Dampfkessels	94
4.4.4	Durch eine Leckstelle ausströmendes Stadtgas	95
4.5	Strömung von Gasen durch Ventile	96
4.6	Strömung von Gasen durch Rohre	97
4.7	Stationäre Strömung von Gasen durch Drosselketten	104
4.8	Durchflußmengenmessung durch Düsen und Blenden	106
4.8.1	Flüssigkeiten und Gase bei relativ kleinem Druckgefälle an der Drosselstelle	107
4.8.2	Gase bei hohem Druckgefälle an der Drosselstelle	108
4.9	Strömung durch Lavaldüsen mit überkritischem Druckverhältnis	111
5.	Instationäre Strömungsvorgänge	113
5.1	Instationäre Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	114
5.1.1	Rohrströmung während einer Schließbewegung an der Rohrmündung bei inkompressiblen Flüssigkeiten	115

5.2 Instationäre Strömung kompressibler Flüssigkeiten	117
5.2.1 Positiver und negativer Druckstoß durch plötzliches Schließen bzw. Öffnen eines Ventiles (Schließzeit $T = 0$)	117
5.2.1.1 Dämpfung durch Reibung	134
5.2.2 Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in Rohrleitungen während der Stell- bewegung eines Ventiles (Öffnungs- oder Schließzeit $T > 0$)	135
5.2.2.1 Reflexion von Druck- und Geschwindigkeitswellen an offenen Rohrenden	138
5.2.2.2 Reflexion von Druck- und Geschwindigkeitswellen an geschlossenen Rohrenden	140
5.2.2.3 Veränderung der Druckwellen an Querschnittserweiterungen	140
5.2.2.4 Veränderung der Wellenform und Reflexion an Rohrverzweigungen	141
5.2.2.5 Reflexion an verengten Rohrmündungen	142
5.2.2.6 Druckstoß durch eine Schließbewegung am Leitungsende innerhalb der Zeit $T < 2 L/a$	143
5.2.2.7 Druckstoß bei langsamer Schließbewegung. Schließzeit $T > 2 L/a$	145
5.2.2.8 Druckstoß bei langsamer Schließbewegung mit konstanter Schließgeschwindigkeit	148
5.2.2.9 Druckstoß bei langsamer Teilschließbewegung	149
5.2.2.10 Druckverlauf während und nach Öffnen eines Querschnittes am Leitungsende	150
5.2.2.11 Betätigung eines Absperrorgans an einer beliebigen Stelle einer Rohrleitung	152
5.2.3 Beispiel zur Berechnung des Druckes vor dem Abschlußventil in einem Druckwasserstollen mit und ohne Berücksichtigung der Kompressibilität der Flüssigkeit	153
5.2.4 Pulsierende Strömung in Rohrleitungen	155
5.2.5 Druckstoße und Vibrationen durch Verzögerung von Pumpe und Antriebsmotor	157
6. Quasistationäre Strömungsvorgänge	159
6.1 Strömung durch eine Rohrleitung mit einem Ventil, dessen Querschnitt mit der Zeit verändert wird	159
6.2 Quasistationärer Ausfluß von Flüssigkeiten aus Gefäßen	162
6.3 Quasistationäre Strömung von Gasen	163
6.3.1 Füllen und Entleeren von Gasbehältern	164
6.3.2 Füllen und Entleeren von Druckluftzylindern	167
7. Der k_v-Wert und Strömungsvorgänge in Armaturen	169
7.1 k_v -Wert und C_v -Wert	171
7.2 Zusammenhang zwischen dem k_v -Wert und der Widerstandszahl ξ	171
7.3 Berechnung des Druckverlustes bei gegebener Durchflußmenge	172
7.4 Bestimmung des k_v -Wertes zur Wahl eines geeigneten Ventiles bei gegebener Durchflußmenge	173
7.5 Diagramme zur Wahl eines Ventiles mit richtigem k_v -Wert für beliebige Medien und Druckverhältnisse	176
7.5.1 Wasser und Flüssigkeiten geringer Zähigkeit	180
7.5.2 Zähe Flüssigkeiten	183

X Inhaltsverzeichnis

7.5.3 Gase bei unterkritischem Druckverhältnis ($p_2 > 0,53 p_1$)	184
7.5.4 Gase bei überkritischem Druckverhältnis ($p_2 < 0,53 p_1$)	186
7.5.5 Wasserdampf bei unterkritischem Druckverhältnis	187
7.5.6 Wasserdampf bei überkritischem Druckverhältnis	188
7.6 k_v -Wert für Ventilgruppen	190
7.7 Richtwerte von k_v bzw. ξ für verschiedene Armaturen	190
7.7.1 Absperrarmaturen mit mechanischer Betätigung	192
7.7.2 Absperrarmaturen selbsttätig wirkend	192
7.7.3 Magnetventile	196
7.7.4 Schnellkupplungen	197
7.8 Strömungsvorgänge in Armaturen	199
7.8.1 Mechanisch betätigtes Absperrventile, Schieber, Kugelhähne, Kükenhähne und Klappen	200
7.8.2 Handbetätigtes Mehrwege-Steuerschieber der Ölhydraulik	201
7.8.3 Magnetventile	202
7.8.4 Schnellkupplungen	207
7.8.5 Plattenventile der Kolbenverdichter	209
7.8.6 Rückschlagventile	211
7.8.7 Drosselventile	211
7.8.8 Druckbegrenzungsventile für Hydrauliksysteme	212
7.8.9 Zwangsgesteuerte Ventile in Kolbenmaschinen	213
8. Strömung in Rohrleitungssystemen	214
8.1 Optimale Nennweite von Rohrleitungen	214
8.2 Äquivalente Rohrlängen und Widerstandswerte verschiedener Einbauten	216
8.3 Tabellen und Abbildungen für Rauigkeit, Widerstandszahl, Wichte, Zähigkeit und Gaskonstante	224
8.4 Wirtschaftliche Geschwindigkeiten in Rohrleitungen. Hydraulischer Radius. Strömung im Laminar- und Übergangsbereich. Korrekturfaktoren für stark kompressible Medien bei hohen Geschwindigkeiten	247
8.5 Druckverlust in Rohrleitungen für kaltes Wasser	251
8.6 Diagramme für den Druckverlust im Rohren bei Flüssigkeiten unterschiedlicher Zähigkeit	257
8.7 Druckschwankungen durch rasche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit und Möglichkeiten der Abhilfe	257
8.8 Tabelle zur Berechnung des Druckabfalls in Preßluftleitungen	272
8.9 Allgemeines Druckverlust-Rechendiagramm	276
9. Kavitation	284
9.1 Berechnung der Saughöhe bei Ansaugen aus einem offenen Behälter	291
9.2 Berechnung der Druckverhältnisse bei einer Pumpe mit Zulauf aus einem geschlossenen Behälter mit Überdruck	292
9.3 Berechnung der Druckverluste im Saugrohr einer Zahnradpumpe	293
10. Unberechenbare Strömungsvorgänge	296
11. Anwendungsgrenzen und Regeln bei Berechnung von Rohrleitungssystemen mit Hilfe der äquivalenten Rohrlänge für Einbauten	298
Literaturverzeichnis	304

Inhaltsverzeichnis XI

Verzeichnis der wichtigsten Medien	308
Physikalische Daten von Luft, Wasser, Öl und brennbaren Gasen	308
Physikalische Daten anderer Fluide	309
Sachverzeichnis	311