

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1. Formelzeichen und Einheiten	5
2. Hydro- und Aerostatik	9
2.1 Hydrostatik inkompressibler Flüssigkeiten	9
2.2 Hydrostatik kompressibler Flüssigkeiten	11
2.2.1 Die Dichte	11
2.2.2 Einfluß der Kompressibilität der Flüssigkeiten auf hydrostatische Antriebe	12
2.2.3 Bedeutung der Wärmeausdehnung von festen Körpern und Flüssigkeiten bei hydrostatischen Antrieben	13
2.3 Zustandsgleichung der Gase	15
2.3.1 Zusammenhang zwischen Druck, Temperatur und Volumen für Dämpfe	16
2.4 Spezifische Verdichtungsarbeit im Kolbenverdichter	18
2.4.1 Leistungsbedarf für die Verdichtung	20
2.4.2 Der Liefergrad des Kolbenverdichters	21
3. Hydrodynamik	23
3.1 Stationäre Strömung einer reibungsfreien, inkompressiblen Flüssigkeit	23
3.1.1 Eindimensionale Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	23
3.1.2 Mehrdimensionale Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	24
3.2 Kontinuitätsgleichung	26
3.2.1 Kontinuitätsgleichung für inkompressible Flüssigkeiten	26
3.2.2 Kontinuitätsgleichung für kompressible Flüssigkeiten	26
3.3 Ähnlichkeitsgesetze	26
3.3.1 Zähigkeit der Flüssigkeiten	27
3.3.2 Der Viskositätsindex (VI)	32
3.3.3 Die Reynolds-Zahl	33
3.4 Laminare Strömung durch zylindrische Rohre	36
3.5 Laminare Strömung im Ringspalt	39
3.6 Laminare Strömung zwischen zwei Platten	41

VIII Inhaltsverzeichnis

3.7	Hydrostatische Lagerung	41
3.8	Turbulente Strömung durch glatte zylindrische Rohre	42
3.9	Geschwindigkeitsverteilung über den Rohrquerschnitt in geraden zylindrischen Rohren nach dem $1/n$ -Potenzgesetz	45
3.10	Einfluß der Rauigkeit auf den Strömungswiderstand in Rohren	49
3.10.1	Die kritische Reynolds-Zahl	50
3.10.2	Beispiele für die Berechnung des Druckverlustes in einer geraden Rohrleitung	52
3.10.3	Druckverlust in gewellten Rohren	54
3.11	Diffusoren und Infusoren	55
3.11.1	Konisch erweiterter Diffusor und konisch verengter Infusor	56
3.11.2	Stoßdiffusor	63
3.11.3	Stufendiffusor	64
3.11.4	Ringdiffusor	64
3.11.5	Druckverteilung bei verzögerter Strömung in einem Diffusor	66
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	73
3.14.3	Ausfluß durch ein lotrechtes Rohr	77
3.15	Definition von Mittelwerten	79
3.15.1	Statistische Mittelwerte	79
3.15.2	Örtliche Mittelwerte	79
3.15.3	Zeitliche Mittelwerte	81
4.	Strömung von Gasen, Gasdynamik	82
4.1	Zähigkeit der Gase	82
4.2	Ausströmen von Gasen aus Gefäßen bei geringem Druckgefälle	84
4.3	Ausströmen von Gasen aus Gefäßen bei hohem Druckgefälle. Das kritische Druckverhältnis	85
4.4	Rechenbeispiele für das Ausströmen von Gasen	90
4.4.1	Ausströmende Leckluft aus einem Druckluftnetz	90
4.4.2	Erforderlicher Querschnitt für das Sicherheitsventil eines Kompressors	92
4.4.3	Erforderlicher Querschnitt für das Sicherheitsventil eines Dampfkessels	93
4.4.4	Durch eine Leckstelle ausströmendes Stadtgas	94
4.5	Strömung von Gasen durch Ventile	95
4.6	Strömung von Gasen durch Rohre	96
4.7	Stationäre Strömung von Gasen durch Drosselketten	103
4.8	Durchflußmengenmessung durch Düsen und Blenden	105
4.8.1	Flüssigkeiten und Gase bei relativ kleinem Druckgefälle an der Drossel- stelle	106
4.8.2	Gase bei hohem Druckgefälle an der Drosselstelle	107
4.9	Strömung durch Lavaldüsen mit überkritischem Druckverhältnis	110
5.	Instationäre Strömungsvorgänge	112
5.1	Instationäre Strömung inkompressibler Flüssigkeiten	113
5.1.1	Rohrströmung während einer Schließbewegung an der Rohrmündung bei inkompressiblen Flüssigkeiten	114

5.2	Instationäre Strömung kompressibler Flüssigkeiten	116
5.2.1	Positiver und negativer Druckstoß durch plötzliches Schließen bzw. Öffnen eines Ventiles (Schließzeit $T = 0$)	116
5.2.1.1	Dämpfung durch Reibung	133
5.2.2	Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in Rohrleitungen während der Stellbewegung eines Ventiles (Öffnungs- oder Schließzeit $T > 0$)	134
5.2.2.1	Reflexion von Druck- und Geschwindigkeitswellen an offenen Rohrenden	137
5.2.2.2	Reflexion von Druck- und Geschwindigkeitswellen an geschlossenen Rohrenden	139
5.2.2.3	Veränderungen der Druckwellen an Querschnittserweiterungen	139
5.2.2.4	Veränderung der Wellenform und Reflexion an Rohrverzweigungen	140
5.2.2.5	Reflexion an verengten Rohrmündungen	141
5.2.2.6	Druckstoß durch eine Schließbewegung am Leitungsende innerhalb der Zeit $T < 2L/a$	142
5.2.2.7	Druckstoß bei langsamer Schließbewegung. Schließzeit $T > 2L/a$	144
5.2.2.8	Druckstoß bei langsamer Schließbewegung mit konstanter Schließgeschwindigkeit	147
5.2.2.9	Druckstoß bei langsamer Teilschließbewegung	148
5.2.2.10	Druckverlauf während und nach Öffnen eines Querschnittes am Leitungsende	149
5.2.2.11	Bestätigung eines Absperrorgans an einer beliebigen Stelle einer Rohrleitung	151
5.2.3	Beispiel zur Berechnung des Druckes vor dem Abschlußventil in einem Druckwasserstollen mit und ohne Berücksichtigung der Kompressibilität der Flüssigkeit	152
5.2.4	Pulsierende Strömung in Rohrleitungen	154
5.2.5	Druckstöße und Vibrationen durch Verzögerung von Pumpe und Antriebsmotor	156
6.	Quasistationäre Strömungsvorgänge	158
6.1	Strömung durch eine Rohrleitung mit einem Ventil, dessen Querschnitt mit der Zeit verändert wird	158
6.2	Quasistationärer Ausfluß von Flüssigkeiten aus Gefäßen	161
6.3	Quasistationäre Strömung von Gasen	162
6.3.1	Füllen und Entleeren von Gasbehältern	163
6.3.2	Füllen und Entleeren von Druckluftzylindern	166
7.	Der k_v -Wert und Strömungsvorgänge in Armaturen	168
7.1	k_v -Wert und C_v -Wert	170
7.2	Zusammenhang zwischen dem k_v -Wert und der Widerstandszahl ζ	170
7.3	Berechnung des Druckverlustes bei gegebener Durchflußmenge	171
7.4	Bestimmung des k_v -Wertes zur Wahl eines geeigneten Ventiles bei gegebener Durchflußmenge	172
7.5	Diagramme zur Wahl eines Ventiles mit richtigem k_v -Wert für beliebige Medien und Druckverhältnisse	175
7.5.1	Wasser und Flüssigkeiten geringer Zähigkeit	179
7.5.2	Zähe Flüssigkeiten	182

X Inhaltsverzeichnis

7.5.3	Gase bei unterkritischem Druckverhältnis ($p_2 > 0,53 p_1$)	183
7.5.4	Gase bei überkritischem Druckverhältnis ($p_2 < 0,53 p_1$)	185
7.5.5	Wasserdampf bei unterkritischem Druckverhältnis	186
7.5.6	Wasserdampf bei überkritischem Druckverhältnis	187
7.6	k_v -Wert für Ventilgruppen	189
7.7	Richtwerte von k_v bzw. ξ für verschiedene Armaturen	189
7.7.1	Absperrarmaturen mit mechanischer Betätigung	191
7.7.2	Absperrarmaturen selbsttätig wirkend	191
7.7.3	Magnetventile	195
7.7.4	Schnellkupplungen	196
7.8	Strömungsvorgänge in Armaturen	198
7.8.1	Mechanisch betätigte Absperrventile, Schieber, Kugelhähne, Kükenhähne und Klappen	199
7.8.2	Handbetätigte Mehrwege-Steuerschieber der Ölhydraulik	200
7.8.3	Magnetventile	201
7.8.4	Schnellkupplungen	206
7.8.5	Plattenventile der Kolbenverdichter	208
7.8.6	Rückschlagventile	210
7.8.7	Drosselventile	210
7.8.8	Druckbegrenzungsventile für Hydrauliksysteme	211
7.8.9	Zwangsgesteuerte Ventile in Kolbenmaschinen	212
8.	Strömung in Rohrleitungssystemen	213
8.1	Optimale Nennweite von Rohrleitungen	213
8.2	Äquivalente Rohrlängen und Widerstandswerte verschiedener Einbauten	215
8.3	Anwendungsgrenzen der Regeln für die Berechnung von Rohrleitungssystemen mit Hilfe der äquivalenten Rohrlänge	222
8.4	Tabellen und Abbildungen für Rauigkeit, Widerstandszahl, Dichte, Zähigkeit und Gaskonstante	228
8.5	Wirtschaftliche Geschwindigkeiten in Rohrleitungen. Hydraulischer Radius. Strömung im Laminar- und Übergangsbereich. Korrekturfaktoren für stark kompressible Medien bei hohen Geschwindigkeiten	251
8.6	Druckverlust in Rohrleitungen für kaltes Wasser	255
8.7	Diagramme für den Druckverlust in Rohren bei Flüssigkeiten unterschiedlicher Zähigkeit	261
8.8	Druckschwankungen durch rasche Änderung der Strömungsgeschwindigkeit und Möglichkeiten der Abhilfe	268
8.9	Tabelle zur Berechnung des Druckabfalls in Preßluftleitungen	270
8.10	Allgemeines Druckverlust-Rechendiagramm	273
9.	Kavitation	282
9.1	Berechnung der Saughöhe bei Ansaugen aus einem offenen Behälter	288
9.2	Berechnung der Druckverhältnisse bei einer Pumpe mit Zulauf aus einem geschlossenen Behälter mit Überdruck	289
9.3	Berechnung der Druckverluste im Saugrohr einer Zahnradpumpe	290
9.4	Die kritische Drehzahl von Zahnradpumpen	293
9.5	Kritische Verhältnisse in Ventilen und Drosselementen	294
9.5.1	Kritische Strömung in Ventilen	295
9.5.2	Reibungsfreie Strömung eines inkompressiblen Mediums durch ein Venturirohr	301

9.5.3 Das kritische Druckverhältnis für verschiedene Formen von Austrittsöffnungen	303
10. Bedeutung der strömungstechnischen Vorgänge für die Auswahl von Kühlern und Rücklauf filtern in Hydrauliksystemen	311
11. Unberechenbare Strömungsvorgänge	315
Literaturverzeichnis	317
Verzeichnis der wichtigsten Medien	321
Physikalische Daten von Luft, Wasser, Öl und brennbaren Gasen	321
Physikalische Daten anderer Fluide	322
Sachverzeichnis	324