

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b> .....	1
<b>1. Formelzeichen und Einheiten</b> .....	5
<b>2. Hydro- und Aerostatik</b> .....	9
2.1 Hydrostatisik inkompressibler Flüssigkeiten .....	9
2.2 Hydrostatisik 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
<b>3. Hydrodynamik</b> .....	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 inkompressive Flüssigkeiten .....	26
3.2.2 Kontinuitätsgleichung für kompressive 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 Rauhigkeit 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 Rohleitung . . . . .	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.	<b>Strömung von Gasen, Gasdynamik . . . . .</b>	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 Drosselstelle . . . . .	106
4.8.2	Gase bei hohem Druckgefälle an der Drosselstelle . . . . .	107
4.9	Strömung durch Lavaldüsen mit überkritischem Druckverhältnis . . . . .	110
5.	<b>Instationäre Strömungsvorgänge . . . . .</b>	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 $T < 2 L/a$ . . . . .	142
5.2.2.7	Druckstoß bei langsamer Schließbewegung. Schließzeit $T > 2 L/a$ . . . . .	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 Absperrorganes 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 $\xi$ . . . . .	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. $\xi$ 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	Handbetätigtes 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

## Inhaltsverzeichnis XI

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