

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Begriffe und Abgrenzung des Sachgebietes .....	1
1.2	Aufbau eines Hydrauliksystems (Hydrosystem) .....	2
1.3	Schaltplandarstellung mit grafischen Symbolen .....	3
1.4	Vor- und Nachteile der Ölhydraulik .....	5
1.5	Das S.I.-Maßsystem und praktische Berechnungen .....	6
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b> .....	7
2.1	Hydrostatik .....	7
2.2	Hydrodynamik .....	9
2.2.1	Gleichung von Bernoulli .....	9
2.2.2	Kontinuitätsgleichung .....	9
2.2.3	Beschleunigungsdruck .....	10
2.2.4	Hydraulische Leistung .....	11
2.3	Strömungsverluste (Druckverluste) .....	12
2.3.1	Reynoldssche Zahl .....	13
2.3.2	Strömungsverluste in geraden Leitungen .....	14
2.3.3	Strömungsverluste in Krümmern, Verzweigungen, Erweiterungen, Verengungen (Drosseln) usw. ....	17
2.3.4	Strömungsverluste in Blenden (kurzen Verengungen) .....	18
2.3.5	Strömungsverlust in Ventilen .....	19
2.3.6	Druckverlust bei einer anderen Betriebsflüssigkeit .....	20
2.3.7	Hintereinander- und Parallelschaltung von Ventilen .....	20
2.3.8	Wirkungsgrad des Leitungs- und Steuerungssystems .....	21
2.4	Die Kompressibilität der Druckflüssigkeit und ihre Auswirkungen .....	21
2.4.1	Kompressibilitätsfaktor und Kompressionsmodul .....	21
2.4.2	Auswirkung der Kompressibilität auf die Bewegung eines Arbeitszylinders .....	22

2.4.3	Druckstöße als Folge von Schaltvorgängen . . . . .	27
2.4.4	Anlaufzeit eines Hydromotors oder Zylinders . . . . .	32
2.5	Kraftwirkung eines Flüssigkeitsstromes . . . . .	33
2.5.1	Kraft eines Flüssigkeitsstrahles auf eine ebene Platte bei stationärer Strömung . . . . .	33
2.5.2	Kraftwirkung auf einen rotationssymmetrischen Steuerkolben . . . . .	34
2.5.3	Kraftwirkung auf einen Steuerkolben mit rechteckigen Kanten . . . . .	35
2.6	Strömung in Spalten . . . . .	36
2.6.1	Spalte mit parallelen Wänden ohne äußeren Druck und Einführung des Viskositätsbegriffs . . . . .	36
2.6.2	Spalt mit parallelen unbewegten Wänden unter Druck . . . . .	39
2.6.3	Korrekturen der Spaltformel . . . . .	41
2.6.4	Kräfte im Spalt – Hydrostatisches Lager . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Druckflüssigkeiten . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1	Mineralöle . . . . .	49
3.1.1	Dichte . . . . .	50
3.1.2	Kompressibilität . . . . .	51
3.1.3	Viskosität und Ölauswahl . . . . .	51
3.1.4	Spezifische Wärme . . . . .	54
3.1.5	Stockpunkt . . . . .	54
3.1.6	Flammpunkt . . . . .	54
3.1.7	Alterung . . . . .	55
3.1.8	Wasserabscheidevermögen . . . . .	55
3.1.9	Luftlösevermögen und der Einfluss von Luft in Hydrauliksystemen . . . . .	55
3.2	Schwerentflammbare Druckflüssigkeiten . . . . .	57
3.2.1	Wasserhaltige Druckflüssigkeiten (HFA, HFB, HFC) . . . . .	58
3.2.2	Wasserfreie Druckflüssigkeiten (Kennbuchstaben HFD) . . . . .	59
3.3	Umweltverträgliche Druckflüssigkeiten . . . . .	59
3.3.1	Polyglykole (Kennbuchstaben HEPG) . . . . .	59
3.3.2	Native (pflanzliche) Öle (HETG) . . . . .	60
3.3.3	Synthetische Ester (HEES) . . . . .	60
3.4	Pflege und Wechsel der Druckflüssigkeit . . . . .	60

---

<b>4</b>	<b>Filter, Flüssigkeitsbehälter, Wärmefall und Kühlung</b> .....	63
4.1	Filter .....	63
4.1.1	Filteranordnung .....	64
4.1.2	Bauarten von Filterelementen .....	66
4.2	Flüssigkeitsbehälter .....	67
4.3	Wärmefall und Kühlung .....	67
4.3.1	Verluste in einem Hydraulik-System .....	67
4.3.2	Erwärmungsvorgang einer ölhydraulischen Anlage .....	68
4.3.3	Wärmeabgabe über den Ölbehälter und zusätzliche Kühlung .....	70
4.3.4	Vorwärmer (Heizer) .....	71
<b>5</b>	<b>Hydropumpen</b> .....	73
5.1	Berechnungsgrundlagen .....	74
5.1.1	Förderdruck und Leistung .....	74
5.1.2	Grundgleichungen ohne Verluste .....	75
5.1.3	Wirkungsgrade und Grundgleichungen mit Verlusten .....	76
5.1.4	Saugverhalten .....	78
5.1.5	Einfluss der Kompressibilität auf den effektiven Förderstrom .....	79
5.1.6	Ungleichförmigkeitsgrad .....	81
5.2	Bauarten hydrostatischer Pumpen .....	83
5.2.1	Zahnpumpen .....	83
5.2.2	Flügelumpen .....	87
5.2.3	Kolbenumpen .....	91
5.2.4	Betriebsgrößen hydrostatischer Pumpen .....	100
5.3	Kennlinien .....	100
5.4	Verstell- und Regeleinrichtungen für Hydropumpen .....	102
5.4.1	Verstelleinrichtungen .....	102
5.4.2	Elektrohydraulische Verstellung .....	105
5.4.3	Regeleinrichtungen .....	107
5.5	Servopumpen .....	112
<b>6</b>	<b>Motoren</b> .....	113
6.1	Zylinder .....	114
6.1.1	Bauformen .....	114
6.1.2	Aufbau eines Zylinders .....	115
6.1.3	Berechnung eines Hydrozylinders .....	116
6.1.4	Einfluss der Kompressibilität der Druckflüssigkeit .....	119
6.1.5	Endlagendämpfung .....	120
6.1.6	Befestigungsarten .....	121

6.2	Hydromotoren .....	121
6.2.1	Bauarten .....	121
6.2.2	Wirkungsgrade und Grundgleichungen mit Verlusten .....	125
6.2.3	Kompressibilitätseinfluss .....	127
6.3	Schwenkmotoren .....	128
6.4	Kräfte und Momente an Motoren .....	129
6.5	Berechnung von Hydrosystemen (Hydraulikanlagen) .....	131
<b>7</b>	<b>Ventile als Steuergeräte und ihre Anwendungen .....</b>	<b>137</b>
7.1	Druckventile .....	140
7.1.1	Druckbegrenzungsventile (DbV) .....	140
7.1.2	Druckminderventile (Druckregelventile) .....	144
7.1.3	Druckschaltventile .....	146
7.2	Wegeventile (Schaltventile) .....	148
7.2.1	Wege-Kolbenventile (Schieberventile) .....	148
7.2.2	Wege-Sitzventile .....	155
7.3	Sperrventile .....	157
7.3.1	Rückschlagventile .....	157
7.3.2	Ferngesteuerte Rückschlagventile .....	158
7.4	Stromventile .....	159
7.4.1	Kennlinien der Stromventile .....	160
7.4.2	Steuerungsarten mit Stromventilen .....	161
7.4.3	Einfache Stromventile (Drosselventile) .....	162
7.4.4	Stromregelventile .....	164
7.5	2-Wege-Einbauventile .....	169
7.5.1	Beschreibung eines 2-Wege-Einbauventils .....	169
7.5.2	Steuerung mit 2-Wege-Einbauventilen .....	170
<b>8</b>	<b>Stetig verstellbare Ventile (Stetigventile) .....</b>	<b>173</b>
8.1	Elektrohydraulische Servoventile .....	174
8.1.1	Wirkungsvergleich: Wegeschaltventil – Servoventil .....	174
8.1.2	Aufbau und Bauarten der Servoventile .....	176
8.1.3	Beispiel eines zweistufigen Servoventils .....	177
8.1.4	Kennlinien und Auswahl eines Servoventils .....	178
8.1.5	Dynamisches Verhalten eines Servoventils .....	181
8.2	Das Servoventil im elektrohydraulischen Regelkreis .....	182
8.3	Proportionalventile .....	184
8.3.1	Proportionalmagnete .....	184
8.3.2	Proportional-Druckventile .....	185
8.3.3	Proportional-Wegeventile .....	186

---

8.3.4	Auslegung von Steuerungen mit Proportional-Wegeventilen . . . . .	191
8.3.5	Proportionale Stromregelung (Proportional-Stromventil) . . . . .	194
8.4	Regelventile . . . . .	195
<b>9</b>	<b>Hydrospeicher</b> . . . . .	<b>197</b>
9.1	Anwendungsmöglichkeiten . . . . .	197
9.1.1	Hydrospeicher als sekundäre Energiequelle . . . . .	197
9.1.2	Hydrospeicher als Notenergiequelle . . . . .	198
9.1.3	Hydrospeicher für Druckhaltung in abgesperrten Leitungen für Leckölausgleich und für Volumenausgleich bei Druck- und Temperaturschwankungen . . . . .	198
9.1.4	Hydrospeicher als Energiequelle für schwingungsfreien hydraulischen Antrieb . . . . .	198
9.1.5	Hydrospeicher zur Dämpfung von Druckstößen und zur Federung . . . . .	198
9.2	Hydrospeicherbauarten . . . . .	199
9.3	Berechnung der Gas-Hydrospeicher . . . . .	200
9.4	Sicherheitsanforderungen . . . . .	202
<b>10</b>	<b>Verbindungselemente und Ventilmontagesysteme</b> . . . . .	<b>203</b>
10.1	Rohrleitungen . . . . .	203
10.2	Rohrverbindungen . . . . .	204
10.3	Schlauchleitungen . . . . .	205
10.4	Ventilmontagesysteme . . . . .	206
<b>11</b>	<b>Dichtungen</b> . . . . .	<b>209</b>
11.1	Statische Dichtungen . . . . .	209
11.2	Dynamische Dichtungen . . . . .	211
11.2.1	Kolbenringe . . . . .	211
11.2.2	Elastische Dichtungen . . . . .	212
11.3	Stick-Slip oder Ruckgleiten . . . . .	213
<b>12</b>	<b>Anwendung von Kennlinien bei der Berechnung von Hydrokreisläufen</b> . . . . .	<b>215</b>
12.1	Kennlinien der Bauelemente eines Hydrokreislaufes . . . . .	215
12.2	Hintereinander- und Parallelschaltung . . . . .	217
12.3	Kennlinie eines Pumpenaggregates . . . . .	218
12.4	Beispiel für das Zusammenwirken Pumpenaggregat – Verbraucherkreis . . . . .	219

<b>13</b>	<b>Hydrostatische Getriebe</b> .....	221
13.1	Schaltpläne und Wirkungsweise .....	221
13.1.1	Offener Kreislauf .....	221
13.1.2	Geschlossener Kreislauf .....	222
13.2	Leistungs-Momentenkennlinie und Berechnung .....	224
13.3	Wandlungsbereich .....	226
<b>14</b>	<b>Steuerung im Leistungsbereich</b> .....	231
14.1	Widerstandssteuerung (Ventilsteuerung) .....	231
14.2	Verdrängersteuerung .....	232
14.3	Drehzahlvariabler Pumpenantrieb .....	233
<b>15</b>	<b>Prinzipbedingte Leistungsverluste bei konventionellen und neueren Hydrauliksystemen</b> .....	235
15.1	Pumpensteuerung (Pumpenverstellung) .....	235
15.2	Ventilsteuerung mit Stromventilen .....	236
15.2.1	2-Wege-Stromregelventil und Konstantpumpe .....	236
15.2.2	3-Wege-Stromregelventil und Konstantpumpe .....	237
15.2.3	2-Wege-Stromregelventil im Bypass .....	237
15.2.4	2-Wege-Stromregelventil und druckgeregelter Verstellpumpe .....	238
15.3	Ventilsteuerung mit stetig verstellbaren Wege-Ventilen .....	238
15.4	Load-Sensing-Systeme .....	239
15.4.1	Load-Sensing-System mit Konstantpumpe .....	239
15.4.2	Load-Sensing-System mit Verstellpumpe mit Druck-Förderstromregler .....	240
15.4.3	Elektrohydraulisches Load-Sensing .....	241
15.5	Sekundärregelung (Motorsteuerung) .....	242
<b>16</b>	<b>Einführung in die Steuerung des Signalfusses</b> .....	245
16.1	Die Steuerkette .....	245
16.2	Steuerungsarten nach DIN 19226 .....	248
16.3	Steuerungsbeispiele der Ölhydraulik .....	249
<b>17</b>	<b>Anwendungsbeispiele der Ölhydraulik</b> .....	253
17.1	Hydraulische Folgesteuerung einer Spann- und Produktionsvorrichtung .....	253
17.2	Vorschubantrieb mit Primärsteuerung .....	254
17.3	Antrieb einer kleineren Oberkolbenpresse .....	256
17.4	Zentrifugenantrieb .....	258
17.5	Antrieb der Spritzeinheit einer Spritzgießmaschine .....	259
17.6	Geschwindigkeitsgeregelter Antrieb einer fliegenden Säge .....	260
17.7	Hydropulsanlage (Servohydraulische Prüfanlage) .....	262
17.8	Hubstaplerantrieb .....	262

---

17.9	Antrieb eines vollhydraulischen Mobilbaggers . . . . .	264
17.10	Elektronisch geregelter Fahrtrieb eines Kommunalfahrzeuges . . . . .	266
17.11	Hydrostatische Lüfterantriebe für Verbrennungsmotoren . . . . .	268
17.12	Festlegung des Arbeitsdrucks . . . . .	270
<b>18</b>	<b>Grundlagen der Simulation hydraulischer Antriebssysteme . . . . .</b>	<b>273</b>
18.1	Einführung in die mathematisch-physikalische Modellbildung . . . . .	274
18.1.1	Physikalische Rahmengleichungen . . . . .	274
18.1.2	Ausgewählte konstruktive Beziehungen . . . . .	280
18.2	Simulation eines einfachen hydromechanischen Antriebssystems . . . . .	283
18.2.1	Mathematisch-physikalische Modellgleichungen . . . . .	283
18.2.2	Entwicklung des Simulationsmodells . . . . .	286
18.2.3	Automatisierung des Simulationsprozesses . . . . .	294
18.2.4	Diskussion des dynamischen Antriebsverhaltens . . . . .	299
<b>19</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>303</b>
19.1	Benennung, Erklärung und Symbole der Ölhydraulik nach der DIN ISO 1219 . . . . .	303
19.1.1	Symbole für Hydropumpen und Hydromotoren . . . . .	303
19.1.2	Symbole für Ventile . . . . .	307
19.1.3	Symbole für Hydraulikleitungen und Zubehör . . . . .	315
19.1.4	Symbole für Betätigungen . . . . .	317
19.1.5	Symbole verschiedener Geräte und Energiequellen . . . . .	318
19.2	Normen und Richtlinien (Beispiele) . . . . .	319
19.3	Lösungen zu den Übungsbeispielen . . . . .	320
19.4	Numerische Lösung gewöhnlicher Differentialgleichungen . . . . .	325
	<b>Literatur . . . . .</b>	<b>331</b>
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>333</b>