

Inhalt

1 Einführung

1.1 Begriffe	1
1.2 Aufbau und Funktion ölhydraulischer Antriebe	2
1.3 Technische Eigenschaften ölhydraulischer Antriebe.	5
1.3.1 Grundlegende Eigenschaften	5
1.3.2 Systemeigenschaften ölhydraulischer und elektrischer Antriebe.	6
1.3.3 Physikalische Analogien Ölhydraulik – Elektrik	6
1.4 Historische und wirtschaftliche Entwicklung der Ölhydraulik	7
1.5 Normung in der Ölhydraulik	11
1.5.1 Normungsziele	11
1.5.2 Trend zu internationalen Normen	11
1.5.3 Grafische Symbole für Schaltpläne	12
Literaturverzeichnis.	16

2 Physikalische Grundlagen ölhydraulischer Systeme

2.1 Grundlagen über Druckflüssigkeiten	17
2.1.1 Aufgaben und Anforderungen	17
2.1.2 Arten und Stoffdaten	18
2.1.3 Physikalisches Verhalten	24
2.1.3.1 Viskositätsverhalten	24
2.1.3.2 Dichte-Verhalten	28
2.1.3.3 Temperaturverhalten bei adiabater Druckänderung	29
2.1.3.4 Luftaufnahmevermögen	30
2.2 Grundlagen aus der Hydrostatik	31
2.2.1 Hydrostatisches Verhalten von Flüssigkeiten	31
2.2.2 Energiewandlung mit Kolben und Zylinder.	31
2.2.3 Energiewandlung mit rotierendem Verdränger	33
2.3 Grundlagen aus der Hydrodynamik	34
2.3.1 Kontinuitätsgleichung	34
2.3.2 Bernoulli'sche Bewegungsgleichung	35
2.3.3 Druckverlust in Rohrleitungen	36
2.3.3.1 Grundlegende Betrachtungen	36
2.3.3.2 Laminare Rohrströmung	38
2.3.3.3 Turbulente Rohrströmung.	41
2.3.4 Druckverlust in Krümmern und Leitungselementen	43
2.3.5 Strömungsmechanik hydraulischer Widerstände	45
2.3.6 Leckölverlust durch Spalte	47
2.3.7 Kraftwirkung strömender Flüssigkeiten, Druckstöße	49
2.4 Tragende Ölfilme	51
Literaturverzeichnis	54

3 Energiewandler für stetige Bewegung (Hydropumpen und -motoren)

3.1 Axialkolbenmaschinen	57
3.1.1 Schrägachsenmaschinen	60
3.1.2 Schrägscheibenmaschinen	63
3.1.3 Taumelscheibenmaschinen	65
3.1.4 Berechnung der Axialkolbenmaschinen	65
3.2 Radialkolbenmaschinen	67
3.2.1 Maschinen mit Außenabstützung	67
3.2.2 Maschinen mit Innenabstützung	68
3.2.3 Berechnung von Radialkolbenmaschinen	69
3.3 Zahnrad- und Zahnringmaschinen	69
3.3.1 Außenzahnradmaschinen	69
3.3.2 Innenzahnradmaschinen	71
3.3.3 Zahnringmaschinen	72
3.3.4 Berechnung von Zahnrad- und Zahnringmaschinen	72
3.4 Flügelzellenmaschinen	73
3.4.1 Einhubige Maschinen	74
3.4.2 Mehrhubige Maschinen	74
3.4.3 Berechnung von Flügelzellenmaschinen	75
3.5 Sperr- und Rollflügelmaschinen	75
3.5.1 Sperrflügelmaschinen	75
3.5.2 Rollflügelmaschinen	76
3.5.3 Berechnung von Sperr- und Rollflügelmaschinen	76
3.6 Schraubenmaschinen	77
3.7 Übersicht zur Auswahl von Verdrängermaschinen	77
3.8 Betriebsverhalten von Verdrängermaschinen	81
3.8.1 Wirkungsgrade und Kennlinienfelder	81
3.8.2 Förderstrom- und Druckpulsation	88
3.8.3 Pulsationsdämpfung	91
Literaturverzeichnis	94

4 Energiewandler für absätzig Bewegung (Hydrozylinder, Schwenkmotoren)

4.1 Einfach wirkende Zylinder	97
4.1.1 Plunger- oder Tauchkolbenzylinder	97
4.1.2 Normaler einfach wirkender Zylinder	97
4.1.3 Mehrfach- oder Teleskopzylinder	98
4.2 Doppeltwirkende Zylinder	99
4.2.1 Zylinder mit einseitiger Kolbenstange (Differenzialzylinder).	99
4.2.2 Zylinder mit zweiseitiger Kolbenstange (Gleichlaufzylinder).	102
4.3 Endlagendämpfung und Einbau von Hydrozylindern	102
4.3.1 Endlagendämpfung	102
4.3.2 Einbau von Hydrozylindern	103

4.4 Schwenkmotoren	104
4.4.1 Schwenkmotoren mit mechanischer Übersetzung	104
4.4.2 Schwenkmotoren mit direkter Beaufschlagung.	105
Literaturverzeichnis	105

5 Geräte zur Energiesteuerung und -regelung (Ventile)

5.1 Betätigungsmittel für Ventile	107
5.1.1 Übersicht	107
5.1.2 Schaltende elektromechanische Wandler	108
5.1.3 Proportional wirkende elektromechanische Wandler	109
5.1.3.1 Geschichtliche Entwicklung	109
5.1.3.2 Torque-Motoren	110
5.1.3.3 Tauchspulen.	111
5.1.3.4 Proportionalmagnete	112
5.1.3.5 Piezo-Aktoren	114
5.2 Wegeventile	115
5.2.1 Konstruktive Gestaltung des mechanischen Kernbereiches	115
5.2.2 Nicht drosselnde schaltende Wegeventile	120
5.2.2.1 Direkt betätigte schaltende Wegeventile	120
5.2.2.2 Vorgesteuerte schaltende Wegeventile	120
5.2.3 Drosselnde stetige Wegeventile	122
5.2.3.1 Mechanisch betätigte stetige Wegeventile.	123
5.2.3.2 Elektromechanisch betätigte stetige Wegeventile.	123
5.2.4 Betriebsverhalten von Wegeventilen.	128
5.2.4.1 Druckabfall in Wegeventilen	128
5.2.4.2 Statisches u. dyn. Verhalten proportional wirkender Wegeventile	129
5.3 Sperrventile	132
5.3.1 Einfache Rückschlagventile	132
5.3.2 Entsperrbare Rückschlagventile	133
5.3.3 Drosselrückschlagventile	133
5.4 Druckventile	134
5.4.1 Druckbegrenzungsventile	134
5.4.2 Druckverhältnisventile	136
5.4.3 Folgeventile	136
5.4.4 Druckregel- oder Druckreduzierventile	137
5.4.5 Differenzdruckregelventile	137
5.4.6 Kombinierte Druckventile	138
5.4.7 Proportional-Druckventile	140
5.4.8 Betriebsverhalten von Druckventilen	140
5.5 Stromventile	142
5.5.1 Drosselventile	142
5.5.2 Stromregelventile	143
5.5.3 Stromteilventile	145
5.5.4 Proportional-Stromventile	145
5.5.5 Betriebsverhalten von Stromventilen	146

5.6 Zwei-Wege-Einbauventile 149
 5.7 Ventilanschlüsse und Verknüpfungsarten 153
 Literaturverzeichnis 157

6 Verbindungselemente, Dichtungen und Zubehör

6.1 Verbindungselemente. 159
 6.1.1 Rohr- und Schlauchleitungen 159
 6.1.2 Rohr- und Schlauchverbindungen 162
 6.2 Dichtungen 164
 6.2.1 Statische Dichtungen 165
 6.2.2 Dynamische Dichtungen 165
 6.2.3 Betriebsverhalten von Dichtungen 167
 6.3 Ölbehälter. 168
 6.3.1 Anforderungen 168
 6.3.2 Offene Ölbehälter 168
 6.3.3 Geschlossene Ölbehälter 169
 6.4 Filter 170
 6.4.1 Verschmutzungsbewertung, Filterfeinheit, Anforderungen. 170
 6.4.2 Filterelemente 172
 6.4.3 Filteranordnung, Filterbauarten, Betriebsverhalten. 173
 6.5 Hydrospeicher 175
 6.5.1 Aufgaben und Anforderungen 175
 6.5.2 Speicherbauarten und Faustwerte 176
 6.5.3 Berechnung von Speichern 178
 6.5.4 Sicherheitsbestimmungen. 180
 6.6 Wärmetauscher 180
 6.6.1 Heizer (Vorwärmer) 180
 6.6.2 Kühler 181
 6.7 Schalt- und Messgeräte, Sensoren 182
 Literaturverzeichnis 187

7 Steuerung und Regelung hydrostatischer Antriebe

7.1 Bedeutung, Begriffe, Vorteile 189
 7.2 Übertragungsverhalten von Elementen und Systemen 191
 7.3 Methoden zur Veränderung des Volumenstroms 192
 7.3.1 Konstantpumpen mit Drosselsteuerungen. 192
 7.3.2 Geschaltete parallele Konstantpumpen. 193
 7.3.3 Konstantpumpen mit stufenlos verstellbarem Antrieb 194
 7.3.4 Verstellpumpen 194
 7.4 Steuerung mit Verstellpumpen. 195
 7.4.1 Grundlagen. 195
 7.4.2 Steuerungsarten 195

7.5 Regelung mit Verstellpumpen	199
7.5.1 Grundlagen	199
7.5.2 Regelungsarten	199
7.5.2.1 Druckregelungen	199
7.5.2.2 Volumenstromregelungen	202
7.5.2.3 Leistungsregelungen	203
7.5.2.4 Kombinierte Regelungen	203
7.6 Steuerung und Regelung mit Verstellmotoren	204
Literaturverzeichnis	206
8 Planung, Berechnung und Betrieb hydraulischer Anlagen	
8.1 Grundschatpläne	208
8.1.1 Elementare Grundfragen der Schaltungstechnik	208
8.1.2 Grundordnung der Kreislaufsysteme	212
8.1.3 Systemvergleich für drei bedeutende Kreislaufsysteme	218
8.1.4 Weitere Grundschatpläne	219
8.1.4.1 Grundschatpläne für einzelne Verbraucher	219
8.1.4.2 Grundschatpläne für mehrere Verbraucher	223
8.2 Anlagenplanung und Berechnungsbeispiele	228
8.2.1 Konzept- und Entwurfsphase	228
8.2.2 Typische Arbeitsdrücke der Ölhydraulik	230
8.2.3 Funktionsdiagramme und Berechnungsbeispiele	230
8.3 Wärmetechnische Auslegung	235
8.3.1 Thermodynamische Grundlagen	235
8.3.2 Erwärmungsverlauf mit Berechnungsbeispiel	237
8.4 Überlegungen zum Bau geräuscharmer Anlagen	241
Literaturverzeichnis	244
9 Anwendungsbeispiele	
9.1 Stufenlose hydrostatische Getriebe	247
9.1.1 Direkte stufenlose hydrostatische Fahrtriebe	247
9.1.2 Stufenlose hydrostatische Fahrtriebe mit Leistungsverzweigung	252
9.2 Hydrostatische Hilfskraftlenkungen	255
9.3 Hydraulik in mobilen Arbeitsmaschinen	259
9.4 Hydraulik in Straßenfahrzeugen	266
9.5 Hydraulik in großen Flugzeugen	268
9.6 Hydraulik in stationären Maschinen	270
9.7 Energie sparen durch Hydraulik	275
Literaturverzeichnis	286
Anhang Kurzaufgaben	290
Anhang Namensliste zu den neun Literaturverzeichnissen	295
Anhang Sachwortverzeichnis	296

Zusammenstellung der wichtigsten Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheiten
A, A_1, A_2, A_3	Fläche, Kolben-, Kolbenring-, Kolbenstangenfläche	m^2
b	Breite, Konstante (Viskositäts-Temperatur-Verhalten)	m, K
C	Wärmespeichervermögen	kJ/K
c	Konstante (VT-Verhalten), Federrate	$K, \text{N/m}$
c, c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ}/(\text{kg}, \text{K})$
D	Außendurchmesser	m
D	Dämpfung	–
d	Durchmesser, Innendurchmesser	m
e	Exzentrizität	m
F	Kraft	N
f	Frequenz, Pulsationsfrequenz	s^{-1}
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Abstand, Spalthöhe, Zahnhöhe usw.	m
I, I_N	Strom, Nennstrom	A
K	Kompressionsmodul	$\text{Pa} = \text{N/m}^2; \text{bar}^*$
k	Konstante (Viskositäts-Temp.-Verhalten)	$\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{Ns/m}^2$
k_s, k_t, k_x	Druckverlust-Faktoren	–
l	Länge, Rohrlänge	m
M	Drehmoment	Nm
m	Masse, Richtungskonstante (Ölviskosität)	$\text{kg}, -$
n	Drehzahl, Polytropenexponent	$\text{s}^{-1}, \text{min}^{-1}, -$
P	Leistung	W, kW
$p, p_0, \Delta p, p_B$	Druck, atmosph. Druck, Druckdifferenz, Berstdruck	Pa, bar^*
p	mittlere Flächenpressung	$\text{Pa} = \text{N/m}^2; \text{bar}$
Q	Volumenstrom	m^3/s
R	Lagerradius, Krümmungsradius	m
Re	Reynolds'sche Zahl	–
R_m	Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit (Rohre)	$\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$
r	Radius, Wellenradius	m
S	Wärmeabgabevermögen	kW/K
s	Weg, Steigung, Wanddicke	m
t	Zeit	s
T	absolute Temperatur bzw. Temperaturdifferenz	K
U	Innere Energie	$\text{W} \cdot \text{s}, \text{kW} \cdot \text{s}$
V	Volumen, Verdrängungsvolumen	m^3
v	Geschwindigkeit, mittlere Geschwindigkeit	m/s
W	Arbeit	$\text{W} \cdot \text{s}, \text{kW} \cdot \text{s}$
z	Kolbenzahl	–

* 1 Pa (Pascal) = 1 N/m², 1 bar = 10⁵ Pa ----- 1 MPa = 10⁶ Pa = 10 bar = 1 N/mm²
 1 psi = 0,069 bar, 1 bar = 14,5 psi (beide Werte leicht gerundet)

Zeichen	Bedeutung	Einheiten
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2 \cdot K)$, $kW/(m^2 \cdot K)$
α	Bunsen'scher Losungskoeffizient	–
α	Viskositäts-Druckkoeffizient	Pa^{-1} ; bar^{-1}
α	Durchflusszahl	–
β	lin. Wärmeausdehnungskoeffizient, Filterkennwert	K^{-1} , –
γ	Wärmeausdehnungskoeffizient	K^{-1}
δ	Ungleichförmigkeitsgrad, Temperatur	–, $^{\circ}C$
δ	Spalthöhe	m
η	Dynamische Viskosität	$Pa \cdot s = N \cdot s/m^2$
η	Wirkungsgrad	–
ϑ	Temperatur	K, $^{\circ}C$
κ	Isentropenexponent	–
κ	Kompressibilität	Pa^{-1} ; bar^{-1}
λ	Wärmeleitkoeffizient	$W/(m \cdot K)$, $kW/(m \cdot K)$
λ	Rohrwiderstandsbeiwert	–
μ	Reibungszahl	–
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ζ	Widerstandsbeiwert	–
ρ	Dichte	kg/m^3
σ , σ_B	Spannung, Bruchspannung	$N/mm^2 = MPa$
τ	Schubspannung durch Scherung	$N/m^2 = Pa$
τ	Zeitkonstante	s
ψ	Relatives Lagerspiel	–
ω	Winkelgeschwindigkeit, Eigenfrequenz	s^{-1}

Indices

1	Antrieb	M	Motor
2	Abtrieb	n	normal
A	Arbeitsgang, Ausgang	ND	Niederdruck
Anl	Anlage	P	Pumpe
Betr	Betrieb	q	quer
D	Drossel	Sa	Schrägachsen-Bauweise
eff	effektiv	Ss	Schrägscheiben-Bauweise
E	Eilgang, Eingang	t	tangential
ges	Gesamt	th	theoretisch (verlustlos)
HD	Hochdruck	Ts	Taumelscheiben-Bauweise
hm	hydraulisch-mechanisch	Umg	Umgebung
k, K	Kolben	v	Verlust
Kühl	Kühler	vol	volumetrisch
L	Lecköl, Last	wä	Wärme