

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Hydrostatische Leistungsübertragung</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung in die Getriebesystematik: <i>Druckmittelglied, Druckmittelgetriebe, hydrostatisches Getriebe</i>	2
1.2	Hydrokreislauf als Energiepfad: <i>Wirkschema hydraulischer Schaltplan</i>	5
1.3	Energieumsatz längs des Energiepfads: <i>Dreiteilung des hydrostatischen Getriebes</i>	6
1.4	Verallgemeinerte Getriebekennwerte: <i>Kraftdichte, Arbeitsvolumen, Wirkungsgrad</i>	8
	Literatur	10
<b>2</b>	<b>Druckflüssigkeit</b>	<b>13</b>
2.1	Grundlagen der Hydromechanik	14
2.1.1	Gesetze der Hydrostatik: <i>Pascalsches Gesetz, Kompressibilität, Schallgeschwindigkeit</i>	14
2.1.2	Gesetze der Hydrodynamik idealer Flüssigkeiten: <i>Kontinuitätsgleichung, Bernoullische Gleichung</i>	29
2.1.3	Gesetze der Hydrodynamik realer (newtonscher) Flüssigkeiten bei Innenströmung in Rohren: <i>Strömungsformen, Druckverluste</i>	34
2.1.4	Durchflussgesetze bei Innenströmung in Funktionsspalten: <i>Parallel-, Ringspalt</i>	61
2.1.5	Durchflussgesetze bei Innenströmung in Einbauteilen: <i>Drossel, Blende</i>	72
2.2	Physikalische Eigenschaften der Druckflüssigkeit	77
2.2.1	Dichte	77
2.2.2	Viskosität	79
2.2.3	Luftabscheidevermögen	84
2.2.4	Verdampfungsdruck	88

2.3	Technische Druckflüssigkeiten: <i>Stoffarten, Viskositätsklassen</i> .....	91
2.3.1	Druckflüssigkeiten auf Basis Mineralöl (H): <i>Hydrauliköle</i> ....	92
2.3.2	ISO-Viskositätsklassifikation der Druckflüssigkeiten .....	93
2.3.3	Schwerentflammbare Druckflüssigkeiten (HF). <i>Hydraulikflüssigkeiten</i> .....	94
2.3.4	Umweltverträgliche Druckflüssigkeiten (HE): <i>Biofluide</i> .....	97
2.4	Physikalische Kennwerte der Druckflüssigkeiten: <i>Mindestanforderungen</i> .....	102
2.4.1	Richtungskonstante und Viskositätsindex .....	103
2.4.2	Korrosionsschutzverhalten .....	104
2.4.3	Alterungsbeständigkeit .....	104
2.4.4	Verhalten gegen Dichtungswerkstoffe .....	105
2.4.5	Verschleißschutzverhalten .....	105
2.5	Verschmutzung von Druckflüssigkeiten. <i>Kontamination</i> .....	105
2.5.1	Feststoffverschmutzung .....	106
2.5.2	Gas in Öl (Luft in Öl) .....	108
2.5.3	Wasser in Öl .....	109
	Literatur .....	110
<b>3</b>	<b>Verdrängermaschinen</b> .....	<b>115</b>
3.1	Hydropumpen .....	116
3.1.1	Pumpenkenngößen .....	116
3.1.2	Pumpenkennlinien .....	143
3.1.3	Methodische Pumpenauswahl nach Konstruktionskatalog: <i>Nieder-/Hochdruckpumpen</i> .....	147
3.1.4	Pumpenbauarten nach Verdrängerprinzipien: <i>Dreh-/Hubkolbenmaschinen</i> .....	157
3.1.5	Zahnradpumpe: <i>Außen-/Innenzahnrad-, Zahnringpumpe</i> ....	161
3.1.6	Flügelzellenpumpe: <i>einhubig/doppelhubig</i> .....	174
3.1.7	Sperrflügelpumpe: <i>doppelhubig</i> .....	179
3.1.8	Schraubenpumpe: <i>Zwei-/Dreispindelpumpe</i> .....	181
3.1.9	Axialkolbenpumpe: <i>Taumel-/Schrägscheiben-, Schrägachsenbauart</i> .....	183
3.1.10	Radialkolbensystem: <i>außen/innen beaufschlagt</i> .....	200
3.1.11	Reihenkolbenpumpe .....	210
3.1.12	Pulsation des Förderstroms: <i>Ungleichförmigkeitsgrad</i> .....	211
3.1.13	Hydroanlage als Geräuschquelle. <i>Lärmschutzmaßnahmen</i> ....	215
3.1.14	Hydraulikbehälter: <i>Volumen, Wärmehaushalt, Ausstattung</i> ....	233
3.1.15	Antriebsaggregate: <i>Klein-, Standard-, Sonderaggregat</i> .....	247
3.1.16	Drehzahlvariable Pumpenantriebe. <i>Hybridantriebe</i> .....	250

3.2	Hydromotoren .....	258
3.2.1	Motorkenngrößen .....	260
3.2.2	Motorkennlinien .....	265
3.2.3	Anlauf- und Langsamlaufverhalten: <i>Ungleichförmigkeitsgrad</i> ....	268
3.2.4	Dynamisches Verhalten: <i>dynamische Kenngrößen</i> . <i>Schwingungskennwerte</i> .....	276
3.2.5	Methodische Motorenauswahl nach Konstruktionskatalog: <i>Schnell-/Langsamläufer</i> .....	289
3.2.6	Motorbauarten nach Verdrängerprinzipien: <i>Dreh-/Hubkolbenmaschinen</i> .....	295
3.2.7	Zahnringmotor: <i>raumfeste/umlaufende Läuferachse</i> .....	296
3.2.8	Flügelzellenmotor: <i>mehrhübig</i> .....	299
3.2.9	Rollflügelmotor: <i>Hydrotriebemotor</i> .....	301
3.2.10	Axialkolbenmotor: <i>Taumel-/Schrägscheiben-, Schrägachsen-, Hydrotriebemotor, Hydroachse</i> .....	303
3.2.11	Radialkolbenmotor: <i>innen/außen abgestützt, Hydrotriebemotor, Radmotor</i> .....	328
3.3	Hydraulische Schwenkmotoren .....	348
3.3.1	Motorkenngrößen .....	350
3.3.2	Dynamisches Verhalten: <i>Bewegungsphasen, dynamische Kenngrößen, Bremsphase</i> .....	353
3.3.3	Methodische Schwenkmotorenauswahl nach Konstruktionskatalog: <i>Schwenkwinkel/Abtriebsmoment</i> .....	358
3.3.4	Schwenkmotorbauarten nach Verdrängerprinzipien: <i>Dreh-/Schubkolbenmaschinen mit Umlenkmechanismus</i> .....	360
3.3.5	Drehflügelschwenkmotor: <i>Zwei-/Vierkammervariante</i> .....	360
3.3.6	Kolbenschwenkmotor: <i>Zahnstangen-, Kurvenrollen-, Steilgewindemotor</i> .....	367
3.3.7	Dreh-Hub-Zylinder: <i>Kurvenrollen, Steilgewindezylinder</i> .....	373
3.4	Hydrozylinder .....	374
3.4.1	Zylinderkenngrößen .....	375
3.4.2	Dynamisches Verhalten: <i>Bewegungsphasen, dynamische Kenngrößen, Bremsphase</i> .....	383
3.4.3	Methodische Zylinderauswahl nach Konstruktionskatalog: <i>Bewegungs-/Kraftzylinder</i> .....	397
3.4.4	Zylinderbauarten: <i>Einfach-/Zweifach-Schubkolbenmaschinen</i> ....	401
3.4.5	Tauchkolben-Zylinder: <i>Plungerkolben</i> .....	402

3.4.6	Einfachwirkender Zylinder: <i>Scheibenkolben</i> .....	403
3.4.7	Doppeltwirkender Zylinder: <i>Differenzial-/Gleichlaufzylinder</i> ..	403
3.4.8	Teleskopzylinder: <i>einfach-/doppeltwirkend</i> .....	413
3.4.9	Elektrohydraulische Linearantriebe: <i>Hydraulische Achsen, Servozylinder</i> .....	416
3.4.10	Elastische Berührungsdichtungen. <i>Hydraulikdichtungen</i> .....	429
Literatur .....		438
<b>4</b>	<b>Ventile</b> .....	459
4.1	Wegeventile .....	460
4.1.1	Nichtdrosselnde Wegeventile: <i>Schieber-/Sitzventile</i> .....	463
4.1.2	Drosselnde Wegeventile: <i>Fühlerventile</i> .....	482
4.1.3	2-Wege-Einbauventile: <i>Gesteuerte Einzelwiderstände</i> .....	483
4.2	Druckventile .....	489
4.2.1	Druckbegrenzungsventile .....	490
4.2.2	Druckreduzierventile: <i>Folgeventile</i> .....	492
4.3	Stromventile .....	494
4.3.1	Drosselventile .....	495
4.3.2	Stromregelventile: 2-Wege-/3-Wege-Stromregelventile .....	497
4.3.3	Stromteiler: <i>Stromteilerventil, Mehrfachstromteiler</i> .....	507
4.4	Sperrventile: <i>Rückschlagventile</i> .....	509
4.4.1	Rückschlagventile .....	510
4.4.2	Entsperrbare Rückschlagventile .....	512
4.5	Hydraulische Stetigventile: <i>elektrisch stetig ansteuerbare Ventile</i> .....	513
4.5.1	Stetigwegeventile: <i>elektrische Eingangs-, hydraulische Vorsteuerstufe, Kantengeometrie, Rückführungssysteme</i> .....	514
4.5.2	Proportional-Wegeventile: <i>einstufige, zweistufige, schnelle (Regel-) Ventile</i> .....	527
4.5.3	Servoventile: <i>zweistufige, dreistufige Ventile</i> .....	558
4.5.4	Stetigdruckventile .....	575
4.5.5	Stetigstromventile .....	581
4.6	Ventilmontagesysteme .....	582
4.6.1	Rohrmontage und Montagewand .....	584
4.6.2	Verkettungssysteme .....	585
4.6.3	Blockbauweise .....	598
Literatur .....		608
<b>5</b>	<b>Zubehör</b> .....	615
5.1	Leitungen und Leitungsanschlüsse: <i>Energieübertragung</i> .....	616
5.1.1	Rohrleitungen .....	616
5.1.2	Rohrverschraubungen .....	620

5.1.3	Schlauchleitungen .....	633
5.1.4	Trennbare Leitungsanschlüsse: <i>Hydraulikkupplungen</i> .....	644
5.2	Hydrospeicher: <i>Energiespeicherung</i> .....	647
5.2.1	Aufgaben .....	647
5.2.2	Bauarten und Wirkungsweise .....	649
5.2.3	Kenngößen und Auslegung .....	658
5.2.4	Dynamische Eigenschaften und Kennwerte .....	672
5.2.5	Varianten zur Erhöhung der Energiekapazität .....	675
5.2.6	Zentrale Druckflüssigkeitsversorgung: <i>Zentralhydraulik</i> .....	676
5.3	Hydraulikfilter: <i>Flüssigkeitsaufbereitung</i> .....	681
5.3.1	Arten der Feststoffverschmutzung .....	682
5.3.2	Reinheitsforderungen an die Flüssigkeit: <i>ISO-Reinheitsklassen</i> ...	684
5.3.3	Anforderungen an die Filter: <i>Filterkenngößen</i> .....	688
5.3.4	Filterkonzept .....	694
5.4	Wärmetauscher: <i>Flüssigkeitsaufbereitung</i> .....	704
5.4.1	Luftgekühlte Ölkühler .....	704
5.4.2	Wassergekühlte Ölkühler .....	706
	Literatur .....	712
<b>6</b>	<b>Elektrohydraulische Antriebssysteme</b> .....	<b>717</b>
6.1	Entwicklung mechatronischer Systeme .....	717
6.1.1	Grundstruktur .....	719
6.1.2	Aktorprinzipien .....	724
6.1.3	Mechatronische Entwicklungsmethodik .....	728
6.2	Systemtechnische Grundlagen elektrohydraulischer Antriebe .....	733
6.3	Stationäre Übertragungseigenschaften gesteuerter Antriebe .....	737
6.3.1	Ventilsteuerungen mit aufgeprägtem Systemdruck .....	737
6.3.2	Ventilsteuerungen mit aufgeprägtem Volumenstrom .....	746
6.3.3	Verdrängersteuerungen .....	750
6.4	Elektrohydraulische Lageregelkreise .....	760
6.4.1	Einführung in die mathematische Beschreibung .....	760
6.4.2	Modell der Regelstrecke, Kenngößen .....	766
6.4.3	Statisches und dynamisches Verhalten von Lageregelungen .....	774
6.5	Strategien zur Verbesserung des Übertragungsverhaltens .....	783
6.5.1	Einteilung der Maßnahmen .....	783
6.5.2	Regler mit Zeitverhalten bei einschleifigen Lageregelkreisen .....	783
6.5.3	Unterlagerung von Hilfsregelgrößen .....	785
6.5.4	Zustandsregelung .....	789
6.5.5	Nichtlineare Regelungsstrategien .....	792
6.6	Dezentrale Steuerungssysteme mit digitalem Feldbus .....	795
	Literatur .....	802

<b>7 Simulation elektrohydraulischer Komponenten und Systeme</b>	807
7.1 Simulation im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme	807
7.2 Nichtlineare Dynamiksimulation mit konzentrierten Parametern	814
7.2.1 Anforderungen an multidisziplinäre Modellbildung und Simulationssoftware	814
7.2.2 Beispiele für multi-domain Simulationswerkzeuge	824
7.2.3 Simulationsbeispiele	834
7.3 Numerische Strömungsberechnung (CFD)	853
7.3.1 CFD in der Hydraulik	853
7.3.2 Diskretisierung des Strömungsgebiets	854
7.3.3 Turbulenzmodellierung	856
7.3.4 Modellierung von Kavitation	859
7.3.5 Anwendungsbeispiele	860
7.3.6 Rechnergestützte Simulation von Tribosystemen	866
7.4 Numerische Optimierung fluidtechnischer Systeme	869
7.4.1 Formalisierung der Systembeschreibung	869
7.4.2 Parameterbasierte Optimierungsverfahren	873
7.4.3 Optimierung am Beispiel eines Tauchspulenreglers	875
Literatur	880
<b>8 Sicherheit von Maschinen mit hydraulischem Antriebssystem</b>	885
8.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen und Normen	885
8.2 Verfahren zur Risikominderung und sicherheitstechnischer Entwurfsprozess	889
8.3 Funktionale Sicherheit bei mechatronischen Systemen	892
8.3.1 Zuverlässigkeit ( $MTTF_d$ )	894
8.3.2 Kategorie (Grundtypen)	896
8.3.3 Diagnose Deckungsgrad (DC)	896
8.3.4 Fehler gemeinsamer Ursache (CCF)	898
8.4 Entwurf einer Sicherheitsfunktion am Beispiel einer Drehmaschine	898
8.5 Integrierte Sicherheit, neue Sicherheitskonzeptionen	908
Literatur	911
<b>9 Hydraulische Antriebe und Steuerungen im Maschinen- und Fahrzeugbau</b>	913
9.1 Anwendungsbeispiele im stationären Maschinenbau	913
9.1.1 Aufbereitungs- und Entsorgungstechnik: <i>Rohrmühle, Schredder, Innenknetzer</i>	914
9.1.2 Hütten- und Walzwerke	917
9.1.3 Spanende Werkzeugmaschinen	920
9.1.4 Umformende Werkzeugmaschinen	924
9.1.5 Prüfstände und Simulatoren	932

9.2	Anwendungsbeispiele in mobilen Arbeitsmaschinen .....	941
9.2.1	Hydrostatischer Fohrantrieb .....	941
9.2.2	Hydraulik in der Arbeitsausrüstung .....	948
9.2.3	Fahrzeug-Management-System .....	954
9.2.4	Bagger und Radlader .....	956
9.2.5	Hebezeuge und Fahrzeugkrane .....	960
9.2.6	Landmaschinen .....	964
9.3	Montage- und Handhabungseinrichtungen .....	970
9.4	Hydraulik in Kraftfahrzeugen .....	978
9.4.1	Automatgetriebe .....	978
9.4.2	Fahrassistenzsysteme und Stoßdämpfer .....	979
	Literatur .....	986
	<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>997</b>