

<b>1</b>	<b>Hydrostatische Antriebe</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung des hydrostatischen Antriebs in die Getriebesystematik	5
1.2	Wirkschema hydrostatischer Antriebe und verallgemeinerte Getriebekennwerte	7
1.3	Gleichmäßig übersetzende hydrostatische Antriebe	11
1.4	Ungleichmäßig übersetzende hydrostatische Antriebe	17
1.5	Elektrohydraulische Präzisions-Stellantriebe für kontrolliertes Bewegen (hydraulische Aktoren)	22
1.5.1	Aktoren für spanende Werkzeugmaschinen	27
1.5.2	Aktoren für umformende Werkzeugmaschinen	30
1.5.3	Aktoren für kunststoffverarbeitende Maschinen	33
1.5.4	Aktoren für Handhabungseinrichtungen	36
1.5.5	Aktoren für Landmaschinen	42
1.5.6	Aktoren für Simulatoren	45
1.5.7	Aktoren für Werkstoffprüfmaschinen	50
	Literatur zu Kapitel 1	52
<b>2</b>	<b>Druckflüssigkeit</b>	<b>58</b>
2.1	Physikalische Grundgesetze für Flüssigkeiten	58
2.1.1	Gesetze der Hydrostatik	58
2.1.2	Kompressibilität	59
2.1.3	Kompression einer Flüssigkeitsmenge bei starrer Gefäßwandung	63
2.1.4	Kompression einer Flüssigkeitsmenge bei elastischer Gefäßwandung	65
2.1.5	Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten	70
2.1.6	Gesetze der Hydrodynamik idealer Flüssigkeiten	71
2.1.6.1	Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltungssatz)	72
2.1.6.2	Bernoullische Gleichung für stationäre Strömung (Energiesatz)	73
2.1.6.3	Bernoullische Gleichung für instationäre Strömung	75
2.1.7	Gesetze der Hydrodynamik realer (newtonscher) Flüssigkeiten bei Innenströmung in Rohren	76
2.1.7.1	Strömungsformen realer Flüssigkeiten bei stationärer Strömung	77

2.1.7.2	Reynolds-Zahl als bestimmende Kennzahl für die Ausbildung der Strömungsform . . . . .	80
2.1.7.3	Bernoullische Gleichung für stationäre Strömung (Energiesatz für reibungsbehaftete Fluide) . . . . .	83
2.1.7.4	Druckverlust in geraden Rohrleitungen: Reibungsverlust . .	83
2.1.7.5	Druckverlust in Rohrkrümmern, Leitungsverbindungen und Steuerventilen: Verwirbelungsverlust . . . . .	88
2.1.7.6	Gesamter Druckverlust und Wirkungsgrad von Energieübertragung und Energiesteuerung . . . . .	96
2.2	Physikalische Eigenschaften der Hydraulikflüssigkeiten . . .	101
2.2.1	Dichte . . . . .	101
2.2.2	Viskosität . . . . .	103
2.2.3	Luftabscheidevermögen . . . . .	107
2.2.4	Verdampfungsdruck . . . . .	112
2.3	Mindestanforderungen an Hydraulikflüssigkeiten . . . . .	112
2.3.1	Hydrauliköle (Mineralöle) . . . . .	113
2.3.2	ISO-Viskositätsklassifikation der Mineralöle . . . . .	114
2.3.3	Schwerentflammbare Hydraulikflüssigkeiten . . . . .	115
2.3.4	Umweltverträgliche Hydraulikflüssigkeiten . . . . .	118
2.4	Hydraulikflüssigkeit und Betriebssicherheit der Hydroanlage . . . . .	119
2.4.1	Physikalische Kennwerte zur Qualitätsbewertung von Hydraulikölen . . . . .	121
2.4.1.1	Richtungskonstante und Viskositätsindex . . . . .	123
2.4.1.2	Korrosionsschutz . . . . .	123
2.4.1.3	Alterungsbeständigkeit . . . . .	124
2.4.1.4	Verhalten gegen Dichtungswerkstoffe . . . . .	124
2.4.1.5	Mechanische Prüfung in der FZG-Zahnrad-Verspannungs- Prüfmaschine . . . . .	125
2.4.2	Verschmutzung von Hydraulikflüssigkeiten . . . . .	125
2.4.2.1	Feststoffverschmutzung . . . . .	125
2.4.2.2	Gas in Öl (Luft in Öl) . . . . .	127
2.4.2.3	Wasser in Öl . . . . .	127
2.5	Durchflußgesetze bei Innenströmung in Funktionsspalten ohne Querschnittsänderung . . . . .	128
2.5.1	Spaltströmung infolge bewegter Wand (Schleppströmung) . .	128
2.5.2	Spaltströmung infolge Druckdifferenz (Leckströmung) . . . .	131
2.5.3	Überlagerte Spaltströmung . . . . .	135
2.5.4	Rheologische Eigenschaften von Hydraulikflüssigkeiten mit VT-Verbesserer bei Strömung durch enge Kanäle . . . . .	138
2.6	Durchflußgesetze bei Innenströmung in Einbauteilen mit Querschnittsänderung . . . . .	139
2.6.1	Strömung durch Drossel (Kapillare) . . . . .	139
2.6.2	Strömung durch Blende (Drosselscheibe) . . . . .	140
	Literatur zu Kapitel 2 . . . . .	143

<b>3</b>	<b>Hydrogeräte zur Energieumformung (Verdrängermaschinen)</b>	<b>147</b>
3.1	Antriebseinheiten als Energiequelle	147
3.1.1	Elektromotoren als Antriebseinheiten von Hydropumpen	147
3.1.1.1	Drehstrom-Asynchronmotor mit Käfigläufer	148
3.1.1.2	Gleichstrommotor mit Fremderregung	149
3.1.2	Verbrennungsmotoren als Antriebseinheiten von Hydropumpen	149
3.2	Hydropumpen	150
3.2.1	Hydraulische Kenngrößen der verlustfreien Pumpe	150
3.2.1.1	Betriebsdruck auf der Eingangsseite (Saugverhalten)	151
3.2.1.2	Betriebsdruck auf der Ausgangsseite (Förderverhalten)	159
3.2.1.3	Förderdruck als nutzbare Betriebsdruckdifferenz der Pumpe (Energieumsatz)	159
3.2.1.4	Geometrisches und theoretisches Fördervolumen	161
3.2.1.5	Theoretischer Förderstrom	164
3.2.2	Kenngrößen des verlustfreien Antriebs	164
3.2.2.1	Theoretisches Pumpendrehmoment	164
3.2.2.2	Theoretische Pumpenleistung	164
3.2.3	Hydraulische Kenngrößen der verlustbehafteten Pumpe	165
3.2.3.1	Effektiver Förderstrom und volumetrischer Wirkungsgrad	166
3.2.4	Kenngrößen des verlustbehafteten Antriebs	169
3.2.4.1	Effektives Pumpendrehmoment und hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad	170
3.2.4.2	Pumpenleistung und Gesamtwirkungsgrad	172
3.2.5	Pumpenkennlinien	175
3.2.5.1	Kennlinien hydraulischer Kenngrößen	177
3.2.5.2	Kennlinien von Kenngrößen des Antriebs	177
3.2.5.3	Pumpenkennfeld	178
3.2.6	Methodische Pumpenauswahl – Arbeitshilfen Leitlinien und Konstruktionskatalog, Zugriffsteil mit Anhang	179
3.2.7	Pumpenbauarten nach Verdrängerprinzipien – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Gliederungsteil	189
3.2.7.1	Drehkolbenmaschinen	190
3.2.7.2	Hubkolbenmaschinen	191
3.2.8	Ausgeführte Pumpenbauarten – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Hauptteil	194
3.2.9	Pulsation des Förderstroms	237
3.2.10	Hydroanlage als Geräuschquelle, Lärmschutzmaßnahmen	242
3.2.10.1	Geräuschemission, Meßverfahren und Emissionskenngrößen	243
3.2.10.2	Grundsätze der Geräuschminderung – Richtlinien des lärmarmen Gestaltens	246
3.2.10.3	Lärmminderung an der Schallquelle	248
3.2.10.4	Lärmminderung bei der Schallausbreitung	251

3.2.11	Hydraulikbehälter zur Flüssigkeitsaufbewahrung . . . . .	257
3.2.12	Antriebsaggregate . . . . .	270
3.3	Hydromotoren . . . . .	274
3.3.1	Hydraulische Kenngrößen des verlustfreien Motors . . . . .	275
3.3.2	Kenngrößen des verlustfreien Abtriebs . . . . .	276
3.3.3	Hydraulische Kenngrößen des verlustbehafteten Motors . . .	276
3.3.3.1	Effektiver Schluckstrom und volumetrischer Wirkungsgrad .	276
3.3.4	Kenngrößen des verlustbehafteten Abtriebs . . . . .	277
3.3.4.1	Effektives Motordrehmoment und hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	277
3.3.4.2	Motorleistung und Gesamtwirkungsgrad . . . . .	278
3.3.5	Motorkennlinien . . . . .	280
3.3.6	Anlauf- und Langsamlaufverhalten . . . . .	283
3.3.7	Dynamisches Verhalten . . . . .	290
3.3.7.1	Anlaufvorgang und dynamische Kenngrößen . . . . .	290
3.3.7.2	Schwingungskennwerte . . . . .	295
3.3.7.3	Schwingungsanalyse und Simulation des Antriebssystems . .	298
3.3.8	Methodische Motorenauswahl – Arbeitshilfen, Leitlinie und Konstruktionskatalog, Zugriffsteil mit Anhang . . . . .	309
3.3.9	Motorbauarten nach Verdrängerprinzipien – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Gliederungsteil . . . . .	315
3.3.10	Ausgeführte Motorbauarten – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Hauptteil . . . . .	315
3.4	Hydraulische Schwenkmotoren . . . . .	368
3.4.1	Hydraulische Kenngrößen des verlustbehafteten Schwenkmotors . . . . .	369
3.4.2	Kenngrößen des verlustbehafteten Abtriebs . . . . .	370
3.4.3	Dynamisches Verhalten . . . . .	371
3.4.3.1	Bewegungsphasen und dynamische Kenngrößen . . . . .	371
3.4.3.2	Bremsphase mit Endlagendämpfung . . . . .	375
3.4.4	Methodische Schwenkmotorenauswahl – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Zugriffsteil . . . . .	376
3.4.5	Schwenkmotorbauarten nach Verdrängerprinzipien – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Gliederungsteil . . . . .	379
3.4.6	Ausgeführte Schwenkmotorbauarten – Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Hauptteil . . . . .	379
3.5	Hydrozylinder . . . . .	394
3.5.1	Hydraulische Kenngrößen des verlustfreien Zylinders . . . . .	394
3.5.2	Kenngrößen des verlustfreien Abtriebs . . . . .	396
3.5.3	Hydraulische Kenngrößen des verlustbehafteten Zylinders . .	396
3.5.4	Kenngrößen des verlustbehafteten Abtriebs . . . . .	397
3.5.4.1	Effektive Kolbenkraft und hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad . . . . .	397
3.5.4.2	Zylinderleistung und Gesamtwirkungsgrad . . . . .	400

3.5.5	Dynamisches Verhalten . . . . .	402
3.5.5.1	Bewegungsphasen und dynamische Kenngrößen . . . . .	402
3.5.5.2	Bremsphase mit Endlagendämpfung . . . . .	406
3.5.5.3	Schwingungskennwerte . . . . .	408
3.5.5.4	Schwingungsanalyse und Simulation des Antriebssystems . . . . .	411
3.5.6	Methodische Zylinderauswahl	
	– Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Zugriffsteil . . . . .	424
3.5.7	Zylinderbauarten für Schubkolbentriebe	
	– Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Gliederungsteil . . . . .	428
3.5.8	Ausgeführte Zylinderbauarten	
	– Arbeitshilfe Konstruktionskatalog, Hauptteil . . . . .	429
3.5.9	Elektrohydraulische Linearantriebe . . . . .	443
3.5.9.1	Kompakte Linearantriebe (Aktoren) . . . . .	443
3.5.9.2	Präzisionszylinder (Servozylindersysteme) . . . . .	447
3.5.10	Elastische Berührungsdichtungen (Hydraulikdichtungen) . . . . .	452
3.5.10.1	Berührungsdichtungen an ruhenden Flächen . . . . .	453
3.5.10.2	Berührungsdichtungen an gleitenden Flächen . . . . .	454
	Literatur zu Kapitel 3 . . . . .	458

#### **4 Hydrogeräte zur Energiesteuerung und -regelung (Ventile) . . . . . 475**

4.1	Wegeventile . . . . .	479
4.1.1	Nichtdrosselnde Wegeventile . . . . .	479
4.1.1.1	Mechanische Bauteile und Betätigungsarten . . . . .	482
4.1.1.2	Bauarten . . . . .	490
4.1.1.3	Betätigungskraft am Wege-Schieberventil . . . . .	493
4.1.1.4	Druckverlust bei voll geöffnetem Wege-Schieberventil . . . . .	497
4.1.2	Drosselnde Wegeventile (Fühlerventile) . . . . .	498
4.1.3	Hydraulische Stetigventile, insbesondere Stetigwegeventile . . . . .	499
4.1.3.1	Elektrische Eingangsstufe . . . . .	504
4.1.3.2	Hydraulische Vorsteuerstufe (Verstärkerstufe) . . . . .	506
4.1.3.3	Steuerkantengeometrie . . . . .	509
4.1.3.4	Rückführungssysteme . . . . .	513
4.1.4	Proportional-Wegeventile . . . . .	517
4.1.4.0	Aufgabe und Anwendung in Antriebssteuerungen . . . . .	517
4.1.4.0.1	Elektromagnetischer Umformer der Bauart Proportionalmagnet . . . . .	518
4.1.4.0.2	Hubgesteuerter Proportionalmagnet . . . . .	518
4.1.4.0.3	Kraftgesteuerter Proportionalmagnet . . . . .	519
4.1.4.0.4	Lagegeregelter Proportionalmagnet . . . . .	521
4.1.4.0.5	Bauarten der Ansteuerelektronik . . . . .	522
4.1.4.0.6	Integration der Elektronik in das Stetigventil . . . . .	524
4.1.4.1	Einstufige (direktwirkende) Proportional-Wegeventile . . . . .	526
4.1.4.2	Zweistufige (vorgesteuerte) Proportional-Wegeventile . . . . .	530
4.1.4.3	Schnelle Proportional-Wegeventile (Regelventile) . . . . .	534
4.1.5	Servoventile . . . . .	549

4.1.5.0	Aufgabe und Anwendung in Antriebsregelungen . . . . .	549
4.1.5.1	Zweistufige (vorgesteuerte) Servoventile . . . . .	550
4.1.5.2	Dreistufige Servoventile . . . . .	560
4.2	Sperrventile (Rückschlagventile) . . . . .	563
4.3	Druckventile . . . . .	567
4.3.1	Druckbegrenzungsventile . . . . .	569
4.3.2	Druckreduzierventile und Folgeventile . . . . .	569
4.3.3	Stetigdruckventile . . . . .	572
4.3.3.1	Proportional-Druckventile . . . . .	572
4.3.3.2	Servo-Druckventile . . . . .	576
4.4	Stromventile . . . . .	578
4.4.1	Drosselventile . . . . .	579
4.4.2	Stromregelventile . . . . .	581
4.4.3	Stetigstromventile . . . . .	590
4.4.3.1	Proportional-Drosselventile . . . . .	590
4.4.3.2	Proportional-Stromregelventile. . . . .	590
4.4.4	Stromteiler . . . . .	592
4.5	2-Wege-Einbauventile . . . . .	595
	Literatur zu Kapitel 4 . . . . .	601

## **5      Hydrogeräte zur Energieübertragung, Energiespeicherung und Flüssigkeitsaufbereitung (Zubehör) . . . . . 605**

5.1	Leitungen und Leitungsverbindungen zur Energieübertragung . . . . .	605
5.1.1	Rohrleitungen . . . . .	605
5.1.2	Rohrverschraubungen . . . . .	609
5.1.2.1	Lötlose (lösbare) Rohrverschraubungen . . . . .	611
5.1.2.2	Gelötete und geschweißte (lösbare) Rohrverschraubungen . .	616
5.1.2.3	Löt- und Schweißverbindungen (nicht lösbare) . . . . .	617
5.1.2.4	Flanschverbindungen und richtungseinstellbare Verbindungen (lösbare) . . . . .	617
5.1.3	Schlauchleitungen . . . . .	622
5.1.3.1	Schläuche . . . . .	627
5.1.3.2	Schlaucharmaturen . . . . .	629
5.1.4	Anschlußelemente: Kupplungen . . . . .	633
5.1.5	Ventilmontagesysteme . . . . .	636
5.1.5.1	Rohrmontage und Montagewand . . . . .	637
5.1.5.2	Verkettungssysteme . . . . .	639
5.1.5.3	Blockbauweise . . . . .	658
5.2	Hydrospeicher zur Energiespeicherung . . . . .	669
5.2.0	Aufgaben und sicherheitstechnische Anforderungen . . . . .	669
5.2.1	Bauarten und Wirkungsweise . . . . .	671
5.2.2	Kenngrößen und Auslegung . . . . .	681

5.2.2.1	Zustandsänderung und Arbeitsaustausch bei idealem Energieträger . . . . .	684
5.2.2.2	Zustandsänderung und Arbeitsaustausch bei realem Energieträger . . . . .	688
5.2.2.3	Bemessen nach thermischem Beharrungsverhalten: konventionelle Speicherauslegung . . . . .	689
5.2.2.4	Bemessen nach thermischem Zeitverhalten: Simulationsauslegung . . . . .	692
5.2.3	Dynamische Eigenschaften und Kennwerte . . . . .	694
5.2.4	Möglichkeiten zur Erhöhung der Energiekapazität . . . . .	697
5.2.5	Zentrale Druckflüssigkeitsversorgung (Zentralhydraulik) . . . . .	698
5.3	Hydraulikfilter zur Flüssigkeitsaufbereitung . . . . .	704
5.3.1	Arten der Feststoffverschmutzung . . . . .	704
5.3.2	Reinheitsforderungen an die Hydraulikflüssigkeit: ISO-Reinheitsklassen . . . . .	708
5.3.3	Anforderungen an die Filter: Filterkenngrößen . . . . .	711
5.3.3.1	Abscheideleistung: Filterfeinheit $x$ . . . . .	711
5.3.3.2	Schmutzkapazität: ACFTD-Kapazität $\alpha$ . . . . .	714
5.3.3.3	Anforderungen an das Filtermaterial . . . . .	716
5.3.4	Filterkonzept . . . . .	718
5.3.4.1	Begriffserläuterung zum Filterkonzept . . . . .	718
5.3.4.2	Filterarten und Anforderungen . . . . .	719
5.3.4.3	Filterbauformen und Anordnungen . . . . .	723
5.4	Wärmetauscher zur Flüssigkeitsaufbereitung . . . . .	729
5.4.1	Luftgekühlte Ölkühler . . . . .	729
5.4.2	Wassergekühlte Ölkühler . . . . .	731
	Literatur zu Kapitel 5 . . . . .	738

<b>Herstellerverzeichnis</b> . . . . .	745
--	-----

<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	753
----------------------------------	-----