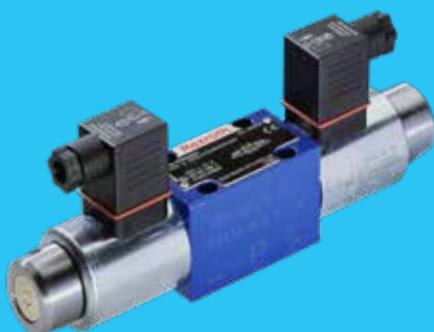


WISSEN AUSFÜHRLICH

# Hydraulik

# Grundlagen



**Wissen ausführlich**

# **Hydraulik – Grundlagen**

## Impressum

# Wissen ausführlich

# Hydraulik – Grundlagen

**Herausgeber:**

Bosch Rexroth AG  
Bosch Rexroth Academy  
Unterdürrbacher Straße 10  
97080 Würzburg, Deutschland

Wir übernehmen keine Haftung für die Übereinstimmung des Inhalts mit den jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften.  
Änderungen vorbehalten.

1. Auflage (2022)  
Materialnummer: R901566372  
ISBN: 978-3-9820731-4-9

Die angegebenen Daten dienen allein der Produktbeschreibung.  
Aufgrund stetiger Weiterentwicklung unserer Produkte kann eine Aussage über eine bestimmte Beschaffenheit oder eine Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Die Angaben entbinden den Verwender nicht von eigenen Beurteilungen und Prüfungen. Es ist zu beachten, dass unsere Produkte einem natürlichen Verschleiß- und Alterungsprozess unterliegen. Abbildungen sind beispielhaft und können vom Originalprodukt abweichen.

## Weiterbildung mit der Bosch Rexroth Academy

Die Bosch Rexroth AG hat sich als kompetenter Partner für die Aus- und Weiterbildung in zahlreichen Unternehmen und Institutionen etabliert.

Das Portfolio der Bosch Rexroth Academy als ein zentraler Weiterbildungsbereich der Bosch Rexroth AG umfasst maßgeschneiderte Angebote zu unterschiedlichen Technologien, wie beispielsweise Hydraulik, Pneumatik, Elektrik oder Mechatronik, für nahezu jeden Bildungsbedarf.

Das Bildungsangebot der Bosch Rexroth Academy umfasst:

► **Training**

In den Trainings der Bosch Rexroth Academy werden den Teilnehmern zielgruppengerecht und praxisorientiert die erforderlichen Kenntnisse vermittelt. Dabei wird sowohl das klassische Präsenztraining im Schulungsraum als auch web-basiertes E-Learning am PC angeboten.

► **Trainingssysteme**

Die modularen Trainingssysteme der Bosch Rexroth AG sind exakt auf die geforderten Qualifikationsstufen der Industrie- und Bildungseinrichtungen abgestimmt.

Ein Trainingssystem besteht aus der Arbeitsstation, den in den Gerätesätzen enthaltenen Komponenten und den Übungsbüchern. Die Trainingssysteme vermitteln sowohl Einsteigern als auch Fortgeschrittenen praxisorientiertes Wissen in den Bereichen Hydraulik, Automatisierung (elektrische Antriebs- und Steuerungstechnik, Mechatronik) und Pneumatik.

Die von den Bosch-Rexroth-Spezialisten entwickelten modularen Trainingssysteme vermitteln Einsteigern und Fortgeschrittenen Technik-Know-how und Lösungskompetenz zum Anfassen. Fundiertes praxisorientiertes Wissen wird anhand industrieller Serienkomponenten – mit international standardisierten Programmiersprachen und offenen Schnittstellen – erlebbar gemacht.

► **Lehr- und Lernmedien**

Bücher, Software oder Animationen der Bosch Rexroth Academy machen Wissen mobil verfügbar und sind genau auf die Trainingsangebote und Trainingssysteme abgestimmt.

Das aktuelle Bildungsangebot und die sonstigen Wissenprodukte der Bosch Rexroth Academy können Sie unter folgender Internetadresse einsehen:

[www.boschrexroth.de/academy](http://www.boschrexroth.de/academy)



# Inhaltsverzeichnis

Impressum	2	<b>3 Komponenten hydraulischer Systeme</b>	<b>59</b>
Weiterbildung mit der Bosch Rexroth Academy	3	<b>3.1 Druckmedium, Verdrängung, Kennlinien</b>	<b>59</b>
Inhaltsverzeichnis	5	3.1.1 Druckflüssigkeiten im Vergleich	59
<b>1 Allgemeines</b>	<b>9</b>	3.1.2 Verdrängerprinzip und seine Anwendung	61
<b>1.1 Einführung in die Hydraulik</b>	<b>9</b>	3.1.3 Kennlinien und Kennfelder von Pumpen und Motoren	67
1.1.1 Definition	9	<b>3.2 Hydropumpen</b>	<b>75</b>
1.1.2 Historische Entwicklung	9	3.2.1 Außenzahnpumpen	75
1.1.3 Anwendungsgebiete der Hydraulik	10	3.2.2 Innenzahnpumpen	81
<b>1.2 Antriebstechniken im Vergleich</b>	<b>13</b>	3.2.3 Flügelzellenpumpen	83
1.2.1 Antriebstechniken	13	3.2.4 Axialkolbenpumpen – Schrägscheibenbauweise	89
1.2.2 Gegenüberstellung der Antriebstechniken	14	3.2.5 Axialkolbenpumpen – Schrägachsenbauweise	94
1.2.3 Unterschiede bei der Energieversorgung und Energiewandlung	15	3.2.6 Radialkolbenpumpen mit innerer Abstützung	99
1.2.4 Unterschiede bei der Energieverteilung	15	3.2.7 Radialkolbenpumpen mit äußerer Abstützung	102
1.2.5 Eigenschaften des Übertragungsmediums	16	3.2.8 Zahnringpumpen	104
1.2.6 Eigenschaften der Antriebstechniken	17	3.2.9 Schraubenspindelpumpen	106
1.2.7 Fazit	18	3.2.10 Pumpenstellsysteme	109
<b>1.3 Grafische Symbole</b>	<b>18</b>	3.2.11 Hydropumpen im Vergleich	121
1.3.1 Zweckbestimmung	18	<b>3.3 Hydroventile</b>	<b>125</b>
1.3.2 Grafische Symbole nach DIN ISO 1219	18	3.3.1 Übersicht der Hydroventile	125
1.3.3 Grafische Symbole gemäß DIN ISO 1219 – Pumpen, Motoren, Zylinder, Zubehör	19	3.3.2 Betätigung von Hydroventilen	133
1.3.4 Grafische Symbole gemäß DIN ISO 1219 – Hydroventile	22	3.3.3 Wegeventile	136
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>25</b>	3.3.4 Betriebsverhalten von Wegeventilen	143
<b>2.1 Hydraulische Grundlagen</b>	<b>25</b>	3.3.5 Druckbegrenzungsventile	148
2.1.1 Hydrostatik – Gesetz von Pascal	25	3.3.6 Druckreduzierventile	156
2.1.2 Hydrodynamik – Gesetz von Bernoulli	30	3.3.7 Druckzuschaltventile	162
2.1.4 Blenden in Hydraulikleitungen	35	3.3.8 Druckabschaltventile	168
2.1.5 Rohrströmungen	37	3.3.9 Rückschlagventile	172
2.1.6 Kompressibilität von Flüssigkeiten	40	3.3.10 Entsperrbare Rückschlagventile	175
2.1.7 Kavitation	42	3.3.11 Drosselventile	180
<b>2.2 Mechanische Grundlagen</b>	<b>46</b>	3.3.12 Stromregelventile	185
2.2.1 Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung	46	<b>3.4 Hydrozylinder</b>	<b>191</b>
2.2.2 Kraft und Drehmoment	48	3.4.1 Grundlagen Hydrozylinder	191
2.2.3 Energie und Arbeit	52	3.4.2 Plungerzylinder	199
2.2.4 Leistung	54	3.4.3 Teleskopzylinder	201
2.2.5 Wirkungsgrad	55	3.4.4 Differenzialzylinder	205
2.2.6 Zusammenhang zwischen hydraulischen und mechanischen Größen	57	3.4.5 Servozylinder	209
		3.4.6 Gleichgangzylinder	213

<b>3.5 Hydromotoren</b>	<b>217</b>	<b>4.3 Hydrostatische Antriebe</b>	<b>316</b>
3.5.1 Außenzahnradmotoren	217	4.3.1 Wirkprinzipien der Hydrostatik im Vergleich	316
3.5.2 Innenzahnradmotoren	221	4.3.2 Wirkprinzip "Vorgegebener Volumenstrom"	322
3.5.3 Flügelzellenmotoren	224	4.3.3 Wirkprinzip "Vorgegebener Druck"	329
3.5.4 Axialkolbenmotoren – Schrägscheibenbauweise	228	4.3.4 Wirkprinzip "Vorgegebene Druckdifferenz"	334
3.5.5 Axialkolbenmotoren – Schrägachsenbauweise	232	4.3.5 Wirkprinzip "Vorgegebene Drehzahl"	335
3.5.6 Radialkolbenmotoren mit innerer Abstützung	237	4.3.6 Wirkprinzip "Vorgegebene Leistung"	338
3.5.7 Radialkolbenmotoren mit äußerer Abstützung	241	<b>4.4 Druck- und kraftabhängige Steuerungen</b>	<b>339</b>
3.5.8 Zahnringmotoren – Gerotorprinzip	244	4.4.1 Druckabsicherung in hydraulischen Anlagen	339
3.5.9 Zahnringmotoren – Orbitprinzip	246	4.4.2 Steuerung mit Druckschalter	342
3.5.10 Hydromotoren im Vergleich	250	4.4.3 Steuerung von Verbrauchern mit geringerem Arbeitsdruck	346
<b>3.6 Verbindungstechniken</b>	<b>251</b>	4.4.4 Steuerung von Verbrauchern im Parallelbetrieb	348
3.6.1 Verbindungstechniken im Vergleich	251	4.4.5 Schaltungen mit Hydrospeichern	353
3.6.2 Rohr- und Schlauchleitungen	254	<b>5 Hydraulikaggregate und Systeme</b>	<b>359</b>
3.6.3 Höhenverkettungen	260	<b>5.1 Hydraulik-Antriebsaggregate</b>	<b>359</b>
3.6.4 Reihenplatten	262	5.1.1 Antriebsaggregate in der Hydraulik	359
3.6.5 Steuerblöcke	264	5.1.2 Aufbau eines Hydraulikaggregats	360
<b>3.7 Zubehör</b>	<b>267</b>	5.1.3 Modulare Standardaggregate	364
3.7.1 Hydrospeicher	267	5.1.4 Modulare Standard-Kleinaggregate	365
3.7.2 Hydrofilter	277	5.1.5 Intelligente vernetzbare Versorgungssysteme	366
3.7.3 Kühler	281	5.1.6 Modulare Großaggregate	366
3.7.4 Manometer	286	5.1.7 Geräuscharme Kompakteinheiten – Flüsteraggregate	367
3.7.5 Druckschalter	290	5.1.8 Individualaggregate	368
3.7.6 Druckmessumformer	293	5.1.9 Antriebsmodule	368
3.7.7 Digitale Druckanzeigen	294	5.1.10 Spann- und Antriebsmodule	369
3.7.8 Füllstandsmessung	294	5.1.11 Kompaktmodule	370
3.7.9 Volumenstrommessung	295	5.1.12 Antriebseinheiten	370
3.7.10 Temperaturmessung von Druckflüssigkeiten	296	5.1.13 Hydraulikaggregate im Vergleich	371
<b>4 Grundsaltungen der Hydraulik</b>	<b>297</b>	<b>5.2 Drehzahlvariable Pumpenantriebe (Sytronix)</b>	<b>372</b>
<b>4.1 Schaltpläne der Hydraulik</b>	<b>297</b>	<b>5.3 Trainingssysteme der Hydraulik (Lehraggregate)</b>	<b>374</b>
4.1.1 Grafische Darstellung hydraulischer Schaltkreise	297		
<b>4.2 Steuerungen und Regelungen mit Ventilen</b>	<b>300</b>	<b>Index</b>	<b>377</b>
4.2.1 Steuerung mit Wegeventilen	300		
4.2.2 Geschwindigkeitssteuerung mit Drosselventilen	304		
4.2.3 Lastunabhängige Geschwindigkeitsregelung mit Stromregelventilen	309		
4.2.4 Eilgangschaltungen	312		





# 1 Allgemeines

## 1.1 Einführung in die Hydraulik

### 1.1.1 Definition

Die Hydraulik ist die wissenschaftliche Lehre von den ruhenden und strömenden Flüssigkeiten. In der technischen Praxis versteht man unter Hydraulik allgemein das Erzeugen von Kräften und Bewegungen durch Druckflüssigkeiten. Der Begriff leitet sich aus den altgriechischen Wörtern "hydor" (das Wasser) und "aulos" (das Rohr) ab.

### 1.1.2 Historische Entwicklung

Bereits in der Antike machten sich Menschen die Energie des fließenden Wassers zunutze. So entstanden beispielsweise die ersten Wasserräder nachweislich etwa um 300 v. Chr. Sie haben sich bei Wassermühlen bis in unsere Zeit erhalten und finden in ihrer technischen Weiterentwicklung als Wasserturbinen in Kraftwerken auch heute noch Verwendung.

<b>ab ca. 5000 v. Chr.</b>	Menschen nutzen die Energie des fließenden Wassers.
<b>ca. 300 v. Chr.</b>	Die ersten Wasserräder entstehen und stellen einen Meilenstein in der Technikgeschichte der Menschheit dar.
<b>ab ca. 1600</b>	Der Wasserdruck wird als Antriebskraft genutzt.
<b>1653</b>	Der französische Physiker Pascal (1623-1662) erläutert das hydrostatische Prinzip am Beispiel der hydraulischen Presse.
<b>1795</b>	Der britische Ingenieur Joseph Bramah (1749-1814) fertigt eine hydraulische Presse mit Wasser als Druckflüssigkeit zur Erzeugung großer Kräfte. Er gilt damit als Entwickler der ersten industriellen Anwendung der Hydraulik.
<b>1851</b>	Der britische Industrielle William G. Armstrong (1810-1900) entwickelt einen Speicher ("Gewichtsakkumulator"), mit dessen Hilfe große Volumenströme erzeugt werden konnten.
<b>1905</b>	Beginn der Ölhydraulik: Williams und Janney setzen erstmals Mineralöl als Übertragungsmedium für hydrostatische Getriebe ein.
<b>1922</b>	Der Ingenieur Hans Thoma erfindet die Radialkolbenpumpe und entwickelt sie für den industriellen Einsatz weiter. Der Technikbereich der Industriehydraulik entsteht und gewinnt zunehmend an Bedeutung.
<b>ab ca. 1950</b>	Die Ölhydraulik setzt sich in allen Bereichen der Industriehydraulik durch. Die ersten Servoventile für die Industriehydraulik kommen zum Einsatz. Proportionalventile mit analoger elektrischer Ansteuerung werden auf konstruktiver Basis von Schaltventilen entwickelt und in Industrieanwendungen eingeführt.
<b>ab ca. 1980</b>	Einzug der digitalen Elektronik in der Stetigventiltechnik und damit verbunden die Entwicklung der digitalen Regelungstechnik.
<b>ab ca. 2015</b>	Mit "Industrie 4.0" beginnt auch in der Hydraulik die umfassende Digitalisierung und Vernetzung der Komponenten und Funktionsabläufe sowie die vollständige Verknüpfung mit angrenzenden Technikbereichen.

Überblick der Geschichte der Hydraulik

### 1.1.3 Anwendungsgebiete der Hydraulik

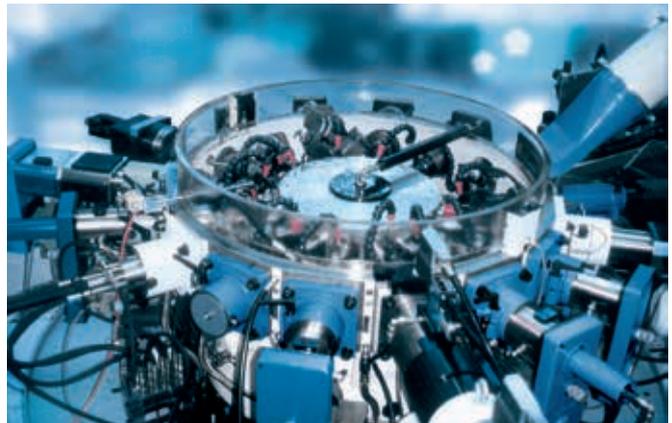
Hydraulische Systeme werden in Bereichen der Leistungsübertragung sowie der Steuer- und Regelungstechnik eingesetzt. Um die Vielfalt der möglichen Anwendungsbereiche einzuordnen, unterscheidet man grundsätzlich zwischen der **Industriehydraulik** (oder Stationärhydraulik) und der **Mobilhydraulik**.

#### Anwendungen in der Industriehydraulik

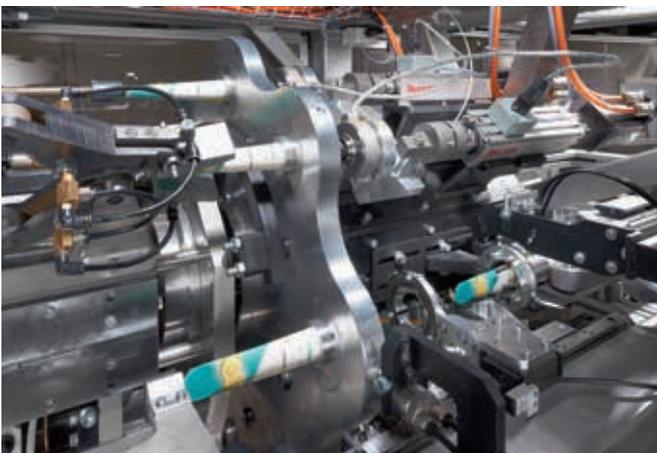
Unter Industriehydraulik werden Anwendungen zusammengefasst, bei denen Hydraulikkomponenten ortsfest installiert sind. Beispiele dafür sind Werkzeugmaschinen, Kunststoffmaschinen, Pressen und Anwendungen in der Walzwerkindustrie.



*Kunststoff-Spritzgießmaschine*



*Hydraulische Achse*



*Verarbeitungsmaschine für Kartonage*



*Platinschneidanlage in der Automobilindustrie*



Tower Bridge in London



Tiefseewinde



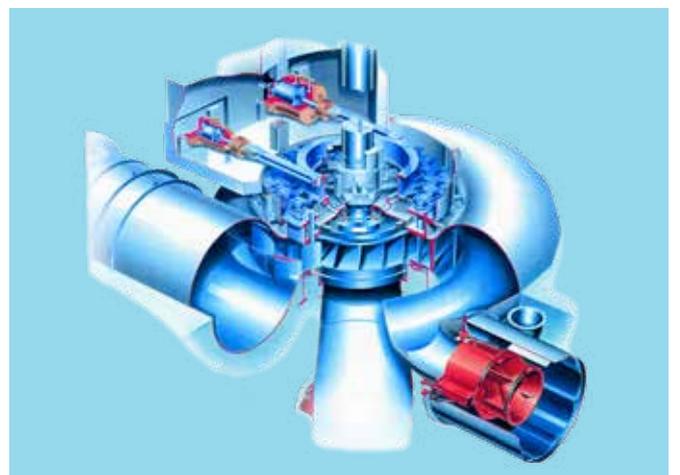
Schleuse des Panamakanals



Offshore-Windpark



Tunnelvortriebsmaschine



Francis-Turbine

## Anwendungen in der Mobilhydraulik

Die Mobilhydraulik umfasst Anwendungen, bei denen Hydraulikkomponenten in mobilen Arbeitsmaschinen installiert sind. Hydraulik wird hier z.B. eingesetzt in Hydraulikbaggern, Radladern, Straßenwalzen, Pistenraupen, Traktoren, Staplern oder Kommunalfahrzeugen.



*Mobilbagger*



*Traktor mit Hubwerk*



*Pistenraupe*



*Raupenkran*



*LKW-Schwerlastkran*



*Radlader*

## 1.2 Antriebstechniken im Vergleich

### 1.2.1 Antriebstechniken

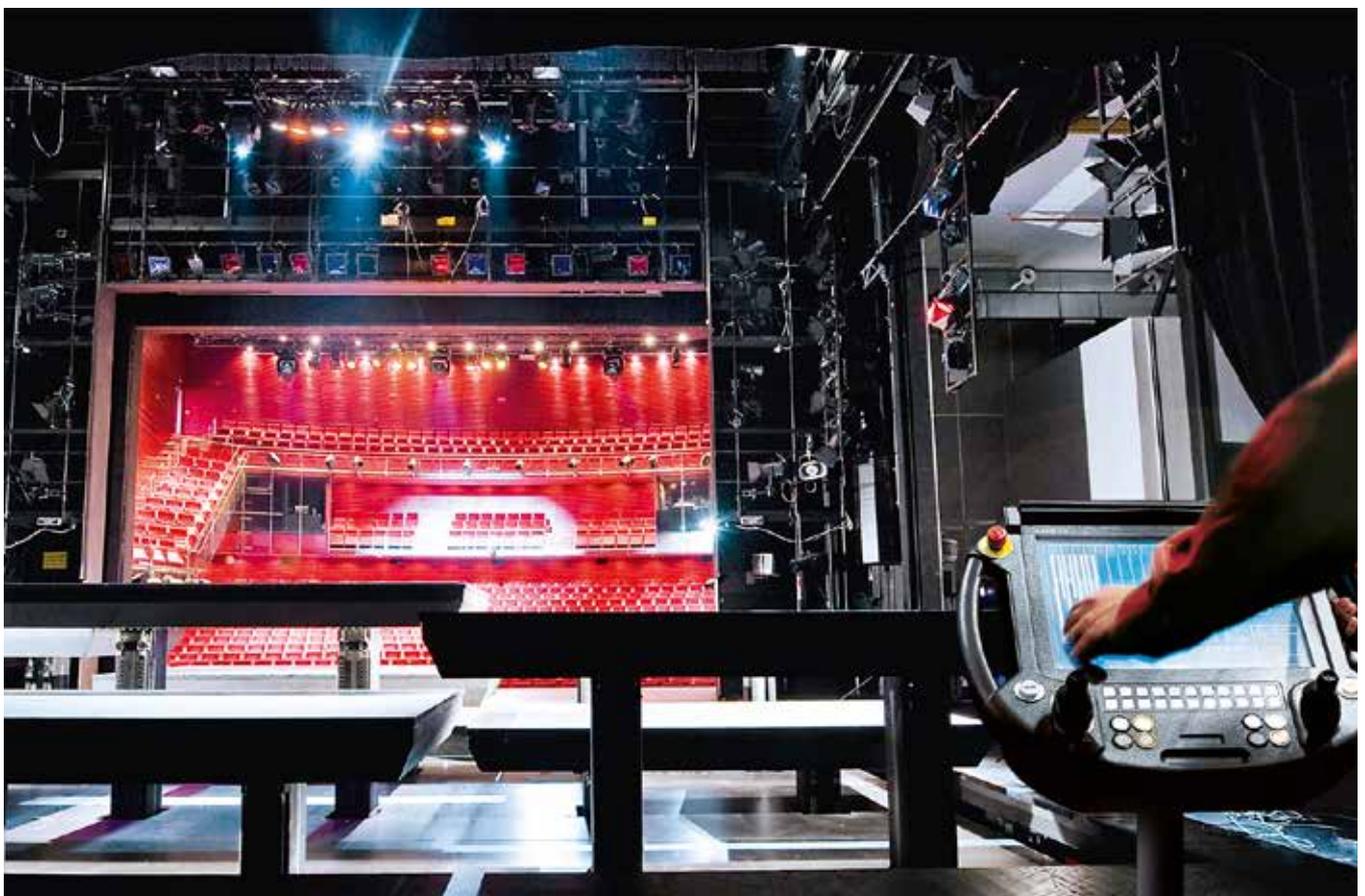
Für die Realisierung von Antrieben kommen Lösungen aus den Technikbereichen der Hydraulik, der Pneumatik, der Elektrik und der Mechanik zum Einsatz:

- ▶ In hydraulischen Antrieben wird Bewegung mit Hilfe einer Druckflüssigkeit erzeugt. Hydraulik-Antriebe werden in vielen Bereichen der Industrie und in mobilen Arbeitsmaschinen, z.B. in Baggern, eingesetzt.
- ▶ In pneumatischen Antrieben wird Bewegung mit Hilfe von Druckluft erzeugt. Bekannte Anwendungen sind pneumatische Schraubwerkzeuge in Kfz-Werkstätten oder die Beförderung von leichten Gütern in Fertigungsstraßen
- ▶ Elektrische Antriebe arbeiten meist mit Elektromotoren, die in zunehmendem Maße elektronisch geregelt werden. Elektrische Antriebe werden beispielsweise bei hochgenauen Werkzeugmaschinen oder in Druckmaschinen eingesetzt.
- ▶ Mechanische Antriebe erzeugen translatorische oder rotatorische Bewegungen oder Kurvenbahnen durch den Einsatz von Kurbeltrieben, Getrieben mit fester Übersetzung, stufenlosen Getrieben oder Kurvengetrieben.

Je nach Einsatz und Verwendung werden verschiedene Anforderungen an die Antriebstechnik gestellt.

Unterschiede zwischen den Antriebstechniken ergeben sich im Besonderen in Bezug auf die Energieversorgung, die Verteilung der Energie, die Eigenschaften des verwendeten Übertragungsmediums und die Eigenschaften des Antriebs (Art der Bewegung) selbst.

In den meisten Anwendungsfällen der Industrie und anderer technischer Bereiche sind mehrere Antriebstechniken vertreten und wirken im Zusammenspiel. Dadurch können die Vorteile jeder Technik genutzt und deren Nachteile im Gesamtkonzept des Systems ausgeglichen werden.



Zusammenspiel verschiedener Antriebstechniken in der modernen Bühnentechnik (Oper Krakau)

## 1.2.2 Gegenüberstellung der Antriebstechniken

Folgende Tabelle enthält eine Gegenüberstellung der Antriebstechniken anhand ihrer wichtigsten technischen Kriterien.

Kriterium	Hydraulik	Pneumatik	Elektrik	Mechanik
<b>Energieträger</b>	Druckflüssigkeit	Luft	Elektronen	Bewegung, Lage, Verformung
<b>Energieübertragung</b>	Rohre, Schläuche, Bohrungen	Rohre, Schläuche, Bohrungen	elektrisch leitendes Material	Wellen, Gestänge, Riemen, Ketten, Räder, usw.
<b>Umwandlung aus bzw. in mechanische Energie</b>	Hydropumpe, Hydromotor, Hydrozylinder	Verdichter, Pneumatikzylinder, Pneumatikmotor	Generator, Magnet, Elektromotor	–
<b>Wichtigste Kenngrößen</b>	Druck $p$ , Volumenstrom $q_V$	Druck $p$ , Volumenstrom $q_V$	Spannung $U$ , elektrischer Strom $I$	Kraft $F$ , Drehmoment $M$ , Geschwindigkeit $v$ , Drehzahl $n$
<b>Speicherung</b>	Blasenspeicher, Kolbenspeicher, Membranspeicher	Druckluftbehälter	Kondensator, Batterie, Akkumulator	Gewichtskraft
<b>Leistungsdichte</b>	sehr gut (hohe Betriebsdrücke)	gut (Einschränkung durch max. Betriebsdruck)	weniger gut (Leistungsgewicht von Elektromotoren ca. 10-mal höher als von Hydromotoren)	gut (wenn keine Energieumwandlung notwendig; Einschränkungen, wenn hohe Anforderungen an die Regelbarkeit gestellt werden)
<b>Wirkungsgrad</b>	abhängig von Leckage und Reibung bei der Energieumwandlung; Verluste bei Steuerung und Regelung in Ventilen	abhängig von Leckage und Reibung bei der Energieumwandlung; Verluste bei Steuerung und Regelung in Ventilen	abhängig von Verfügbarkeit der Elektrizität als Primär-Energie	abhängig von der Größe der Reibungsverluste
<b>Erzeugung linearer Bewegung</b>	sehr einfach (über Zylinder; Anfahren und Bewegungsumkehr unter Volllast möglich)	sehr einfach (über Zylinder)	weniger einfach (über Linear-Elektromotor, Gewindespindel, usw.)	einfach (über Kurbeltrieb, Spindel usw.)
<b>Erzeugung rotierender Bewegung</b>	einfach (über Hydromotor)	einfach (über Druckluftmotor)	sehr einfach (über Rotations-Elektromotor)	sehr einfach (über Getriebe)
<b>Erzeugung von Kurvenbahnen</b>	weniger gut	weniger gut	weniger gut	sehr gut bei bestimmten Anwendungen (Biegetechnik)
<b>Weggenauigkeit</b>	sehr gut (Flüssigkeit ist kaum kompressibel)	weniger gut (Luft ist kompressibel)	unterschiedlich: (weniger gut bei Asynchronmotoren; sehr gut bei Synchron- und Schrittmotoren)	sehr gut (durch Form- und Kraftschluss)
<b>Steuer- und Regelbarkeit, Signalverarbeitung</b>	sehr gut (über Ventile und Stellpumpen; Einsatz von Servoventilen in der Regelungstechnik; weitere Verbesserung in Kombination mit Elektrik)	sehr gut (über Ventile)	sehr gut (über Schalter, Relais, Halbleiter, Regelmotoren, variable Widerstände usw.)	gut (über Getriebe, Hebelsysteme usw.)

Technische Kriterien der verschiedenen Antriebstechniken

### 1.2.3 Unterschiede bei der Energieversorgung und Energiewandlung

Die folgende Übersicht zeigt die unterschiedlichen Methoden und Komponenten zur Energieversorgung und Energiewandlung der Antriebstechniken getrennt nach stationären und mobilen Anwendungen.

Antriebstechnik	Betrieb	Energieversorgung	Energiewandlung	Steuerung	Bewegungserzeugung
<b>Hydraulik</b>	<b>stationär</b>	Stromnetz	Elektromotor + Hydropumpe	Hydroventil, Verstellpumpen, drehzahlvariable Pumpenantriebe oder Verstellmotoren, Sekundärregelung	Hydromotor, Hydrozylinder
	<b>mobil</b>	Kraftstoff	Verbrennungsmotor und Hydropumpe oder dieselektrischer Antrieb <sup>1)</sup> und Hydropumpe		
<b>Pneumatik</b>	<b>stationär</b>	Stromnetz	Elektromotor und Verdichter	Pneumatikventil	Pneumatikmotor, Pneumatikzylinder
	<b>mobil</b>	Kraftstoff	Verbrennungsmotor und Verdichter oder dieselektrischer Antrieb <sup>1)</sup> und Verdichter		
<b>Elektrik</b>	<b>stationär</b>	Stromnetz	--	Umrichter, Schalter, Relais ...	Elektromotor
	<b>mobil</b>	Kraftstoff	Generator, Verbrennungsmotor		
		Brennstoffzelle	--		
		Akkumulator	--		
<b>Mechanik</b>	<b>stationär</b>	Stromnetz und Elektromotor	Getriebe oder Drehzahländerung	stufenlos verstellbares Getriebe (über Fliehkraft oder Hebel ...)	Kurbeltriebe, Getriebe mit fester Übersetzung oder stufenloses Getriebe, Kurvengetriebe
	<b>mobil</b>	Kraftstoff	Verbrennungsmotor		

<sup>1)</sup> ... dieselektrischer Antrieb bestehend aus Dieselmotor, Generator und Elektromotor

*Energieversorgung und Energiewandlung der Antriebstechniken*

### 1.2.4 Unterschiede bei der Energieverteilung

Die Energieverteilung wird je nach Antriebstechnik und damit eingesetztem Übertragungsmedium durch folgende Kriterien bestimmt:

- ▶ Entfernung der Energieübertragung
- ▶ Fließgeschwindigkeit des Mediums
- ▶ Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen im Medium

Die wirtschaftlich überbrückbare Entfernung der Energieübertragung ist begrenzt durch Übertragungsverluste, die abhängig von der Strömung des Mediums sind.

Antriebstechnik	Übertragungsmedium	Entfernung der Energieübertragung	Fließgeschwindigkeit	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
<b>Hydraulik</b>	Druckflüssigkeit	< 100 m	2 bis 15 m/s	ca. 1,5 - 2 km/s
<b>Pneumatik</b>	Druckluft	< 1000 m	10 bis 50 m/s	ca. 0,34 km/s
<b>Elektrik</b>	elektrische Ladung	< 1000 km	0,0007 m/s (Elektronengeschwindigkeit)	ca. 300.000 km/s (im Vakuum)
<b>Mechanik</b>	mechanische Bauteile	begrenzt durch mechanische Steifigkeit	--	--

*Übertragungseigenschaften der Antriebstechniken*

## 1.2.5 Eigenschaften des Übertragungsmediums

Druckflüssigkeit, Druckluft, elektrische Ladung und mechanische Bauteile sind Übertragungsmedien, deren Eigenschaften Einfluss auf die Möglichkeiten der Energiespeicherung, die Geschwindigkeit der Energieentnahme und die Umweltverträglichkeit der jeweiligen Antriebstechnologietechnik haben.

### Energiespeicherung

Die Energiespeicherung erfolgt bei den verschiedenen Antriebstechniken auf unterschiedliche Weise:

#### ► **Hydraulik**

In der Hydraulik führt die geringe Kompressibilität der Druckflüssigkeit, verglichen mit der Kompressibilität eines Gases, nur zu einem geringen Energiespeichereffekt. Die Speicherung erfolgt über ein Gas als Kompressionsmedium, in der Regel Stickstoff. Durch den hohen Systemdruck werden große Energien gespeichert. Das erfordert besondere sicherheitstechnische Maßnahmen.

#### ► **Pneumatik**

Zur Speicherung von pneumatischer Energie wird Luft als Kompressionsmedium eingesetzt. Neben speziellen Druckbehältern ist das gesamte System ein Energiespeicher. Aus Sicherheitsgründen muss der Systemdruck deshalb relativ gering bleiben. Der Druckbereich in einem pneumatischen System liegt bei 4 bis 6 bar.

#### ► **Elektrik**

Das Speichern von elektrischer Energie ist mit hohen Energieverlusten verbunden. Prinzipiell eignen sich als Speichermedien sowohl Spulen als auch Kondensatoren. Bei Kondensatoren ist der Energieverlust jedoch leichter zu beherrschen als bei Spulen. Neben Kondensatoren werden in der elektrischen Antriebstechnik vor allem Batterien und Akkumulatoren als Energiespeicher eingesetzt.

#### ► **Mechanik**

Das Speichern von mechanischer Energie erfolgt durch Spindelantriebe (potentielle Energie) und durch das Speichern von Bremsenergie in Schwungrädern (kinetische Energie). Damit ist das Zuschalten von Energie bei Beschleunigungsvorgängen möglich. Durch den Einsatz von technische Federn können begrenzte Energiemengen gespeichert werden.

### Geschwindigkeit der Energieentnahme

Aus hydraulischen, pneumatischen und mechanischen Speichern ist die gespeicherte Energie sehr schnell abrufbar.

Kondensatoren können ihre Energie ebenfalls schnell abgeben. Batterien und Akkumulatoren fassen wesentlich mehr Energie, können diese jedoch nur langsam abgeben.

### Umweltverträglichkeit

Die Antriebstechniken unterscheiden sich aufgrund des jeweils verwendeten Übertragungsmediums (Druckflüssigkeit, Druckluft, elektrische Ladung, ...) in Bezug auf ihre Umweltverträglichkeit erheblich:

#### ► **Hydraulik**

Bei hydraulischen Antrieben stellt das unerwünschte Austreten von Hydraulikflüssigkeit aus der Anlage (äußere Leckage) ein Gefährdungspotential für die Umwelt dar. Diese Gefährdung kann durch Verwendung biologisch abbaubarer Flüssigkeiten oder Wasser weitestgehend ausgeschlossen werden. Das Auffangen der Leckage und die umweltgerechte Entsorgung verbrauchter Hydraulikflüssigkeit muss gewährleistet werden.

#### ► **Pneumatik**

Pneumatische Antriebe sind bei modernen Anlagen (ölfreie Luft) sehr umweltverträglich, da Druckluft ohne Filterung direkt in die Umgebung abgelassen werden kann. Eine Rückleitung des Übertragungsmediums zu einem Behälter, wie bei hydraulischen Antrieben notwendig, entfällt hier.

#### ► **Elektrik**

Bei elektrischen Antrieben muss die elektromagnetische Abstrahlung beachtet und ggf. geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden.

#### ► **Mechanik**

Mechanische Antriebe sind im störungsfreien Betriebseinsatz sehr umweltverträglich, da keine Beeinflussung der Umwelt erfolgt (keine Abluft, keine äußere Leckage der Komponenten).

## 1.2.6 Eigenschaften der Antriebstechniken

Die Antriebstechniken unterscheiden sich in ihren Bedingungen und Möglichkeiten, Bewegungen zu erzeugen. Vergleichskriterien sind vorzugsweise Bewegungsart (drehend, geradlinig), konstruktive Ausführung (Direktantrieb, Getriebeeinsatz), Kraftdichte, Regelungsverhalten, Genauigkeit, Wirkungsgrad und Sicherheitsaspekte.

Aus dem Vergleich der Einsatzigenschaften der Antriebstechniken ergeben sich folgenden Feststellungen:

- ▶ Hydraulische und pneumatische Antriebe sind besonders geeignet für **lineare und rotatorische Bewegungen**, die sich einfach durch Hydrozylinder oder Hydromotoren erzeugen lassen. Elektrische Antriebe haben einen komplexen Aufbau und werden überwiegend für die Erzeugung von **Drehbewegungen** gebaut. Mechanische Antriebe eignen sich je nach Aufbau sowohl für lineare als auch für Drehbewegungen und zur Realisierung von vorgegebenen Kurvenbahnen.
- ▶ Die volumenbezogene Leistungsdichte von hydraulischen Antrieben ist um ein Vielfaches größer als die volumenbezogene **Leistungsdichte** von Elektroantrieben. Deutlich geringer ist dagegen die Leistungsdichte von pneumatischen Antrieben.
- ▶ Hydraulische und pneumatische Antriebe werden sowohl als **Direktantriebe** als auch mit mechanischem Getriebe eingesetzt. Bei elektrischen Antrieben wird oft ein Getriebe zur Anpassung des Drehmoments und der Drehzahl genutzt. Die Integration des Motors in die Maschinenkonstruktion ist mit Elektro-Antrieben nur bei höchsten Anforderungen an Dynamik und Steifigkeit wirtschaftlich sinnvoll.
- ▶ Die erreichbaren **Drehmomente und Kräfte** von hydraulischen und elektrischen Antrieben sind erheblich größer als die in der Pneumatik. Für die Erzeugung gleicher Kräfte benötigen die elektrischen Antriebe ein wesentlich größeres Bauvolumen als hydraulische Antriebe.
- ▶ Elektromotoren brauchen zur Erzeugung des Drehmoments aus dem Stillstand ungefähr das Dreifache des Nennstroms. Dadurch tritt eine erhebliche Erwärmung des Elektromotors auf, wodurch eine **zusätzliche Kühlung** notwendig ist.
- ▶ Elektrische und mechanische Antriebe haben einen guten **Wirkungsgrad**. Bei hydraulischen und pneumatischen Antrieben ist der Wirkungsgrad geringer, da sich zusätzliche Verluste durch Strömungsverluste und Leckage ergeben. In der Pneumatik wird der Wirkungsgrad zudem durch die im Kompressor entstehende und in die Umwelt entweichende Wärme deutlich verschlechtert.
- ▶ Ein **Überlastschutz** ist in hydraulischen und pneumatischen Antrieben durch Überlastventile (Druckbegrenzungsventile) einfach zu realisieren. Auch bei mechanischen Antrieben ist der Überlastschutz durch vorgegebene Sollbruchstellen problemlos möglich. Bei elektrischen Antrieben ist der Schutz vor Überlastung aufwendiger, da die dabei entstehenden Verluste in Form von Wärme schwierig abzuführen sind.
- ▶ Das **Stoppen der Bewegung im Notfall** ist bei hydraulischen und pneumatischen Antrieben durch Sperrventile einfach möglich. Bei elektrischen Antrieben ist ein Not-Stopp durch Trennung von der Energieversorgung schnell möglich. Das ungebremsste Weiterlaufen des Elektromotors ist zu beachten und sollte durch eine zusätzliche Bremsvorrichtung minimiert werden.
- ▶ Der **Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen** ist für pneumatische Antriebe mit relativ geringem Aufwand möglich, wenn die Luft nicht ölhaltig ist. Bei hydraulischen Anlagen ist der Einsatz von schwerentflammenden Druckflüssigkeiten zwingend notwendig. Beim Einsatz von elektrisch angesteuerten Ventilen müssen die Komponenten eigensicher oder explosionsgeschützt ausgeführt sein. Elektrische Antriebe müssen dagegen immer in druckdichten Gehäusen gekapselt werden. Bei mechanischen Antrieben ist auf Verwendung von geeigneten Materialien zu achten, z.B. ist der Einsatz von Aluminium im Bergbau verboten (gilt für alle Antriebstechniken).

## 1.2.7 Fazit

Die Gegenüberstellung der einzelnen Antriebstechniken führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- ▶ **Hydraulik**  
Hydraulische Antriebe haben Vorteile bei der Erzeugung hoher Kräfte bei gleichzeitig sehr kompakter Bauweise. Nachteilig ist bei dieser Antriebstechnik der notwendige Aufwand um zu verhindern, dass Druckflüssigkeit austritt und in die Umwelt gelangt.
- ▶ **Pneumatik**  
Pneumatische Antriebe können bevorzugt dort eingesetzt werden, wo schnelle Bewegungen bei geringem Kraftbedarf gefordert sind. Weitere Vorteile bieten die vergleichsweise geringen Investitionskosten und eine gute Umweltverträglichkeit. Die relativ starke Geräuschentwicklung ist ein Nachteil dieser Technik.
- ▶ **Elektrik**  
Elektrische Antriebe zeichnen sich durch eine hohe Regeldynamik und Flexibilität aus. Von Nachteil sind die vergleichsweise hohen Investitionskosten.
- ▶ **Mechanik**  
Mechanische Antriebe sind einfach realisierbar und können sehr einfach lineare und rotierende Bewegungen erzeugen. Ein Nachteil ist jedoch die weniger gute Steuer- und Regelbarkeit.

Durch die Kombination verschiedener Antriebstechniken, beispielsweise die Verbindung von Hydraulik und der Elektrotechnik bei drehzahlvariablen Pumpenantrieben (Sytronix), können die Vorteile der jeweiligen Technik optimal genutzt und Nachteile ggf. kompensiert werden.

## 1.3 Grafische Symbole

### 1.3.1 Zweckbestimmung

Grafische Symbole der Hydraulik (auch Schaltzeichen genannt) dienen der abstrakten Darstellung von fluidtechnischen Bauteilen und deren Funktionen sowie zum Verständnis von Systemschaltungen von hydraulischen Kreisläufen.

Grafische Symbole werden aus mehreren Basiselementen und im Allgemeinen aus einem oder mehreren Funktionszeichen nach einem bestimmten System zusammengesetzt. Sie sind so gestaltet, dass die Funktion der dargestellten Komponente oder Schaltung einfach und schnell zu erfassen ist.

Konstruktive Details der Komponenten sind in Symboldarstellungen nicht berücksichtigt.

Grafische Symbole werden vor allem in Schaltplänen, Produktkatalogen und Betriebsanleitungen angewendet. Sie sind eine wichtige Hilfe bei der Projektierung, Montage, Inbetriebnahme, Prüfung, Fehlersuche und der Wartung von hydraulischen Anlagen.

### 1.3.2 Grafische Symbole nach DIN ISO 1219

#### Geltungsbereich und Norm

Grafische Symbole für die Fluidtechnik werden weltweit angewendet und sind in der DIN ISO 1219 festgelegt und international verbindlich genormt.

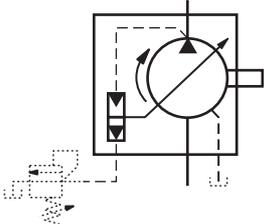
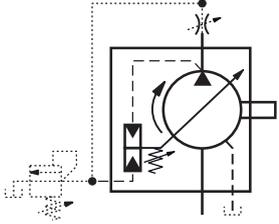
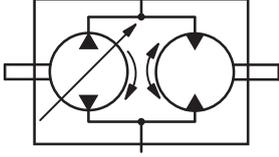
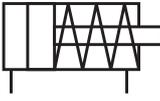
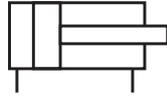
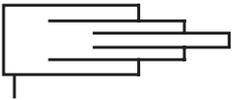
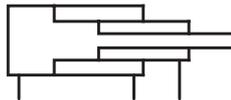
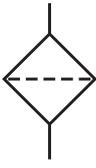
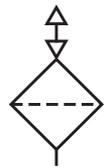
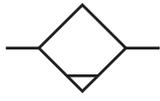
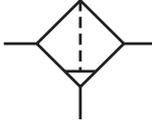
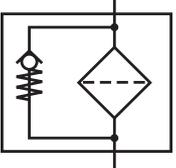
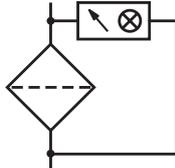
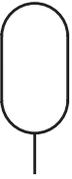
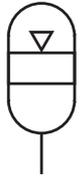
Der Alleinverkauf von Normblättern erfolgt in Deutschland durch:

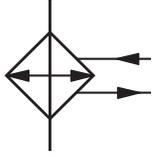
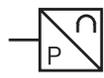
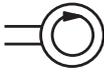
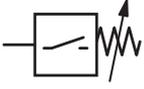
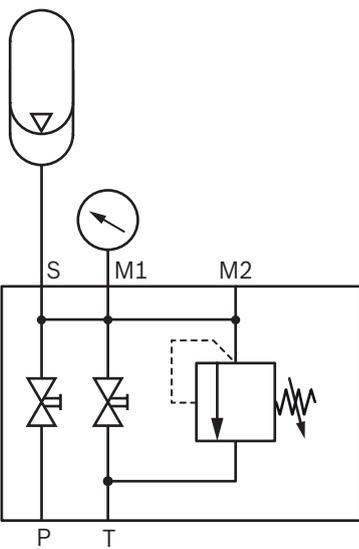
- ▶ Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Die folgende Auflistung zeigt Beispiele von grafischen Symbolen gemäß der Norm DIN ISO 1219 (Teil 1: "Graphische Symbole für konventionelle und datentechnische Anwendungen"). Diese Aufstellung dient als Arbeitshilfe für die Zuordnung von grafischen Symbolen und dem Lesen oder Erstellen von Schaltplänen der Hydraulik.

### 1.3.3 Grafische Symbole gemäß DIN ISO 1219 – Pumpen, Motoren, Zylinder, Zubehör

Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
Energiequelle, hydraulisch		Energiequelle, pneumatisch	
Antriebseinheit (außer Elektromotor)		Elektromotor	
Hauptleitung (starr) Steuer- oder Leckölleitung		Schlauchleitung (flexibel)	
Leitungskreuzung (Leitungen nicht verbunden)		Leistungsverbindung	
Behälter		Behälter mit Leitung	
Schnellverschluss-Kupplung ohne mechanisch zu öffnendes Rückschlagventil, gekuppelt/entkuppelt		Schnellverschluss-Kupplung mit mechanisch zu öffnendem Rückschlagventil, gekuppelt/entkuppelt	
Hydropumpe, allgemein		Hydromotor, allgemein	
Konstantpumpe mit: • 1 Volumenstromrichtung • 1 Drehrichtung		Konstantpumpe/-motor mit: • 1 Volumenstromrichtung • 1 Drehrichtung	
Verstellpumpe mit: • 2 Volumenstromrichtungen • 1 Drehrichtung • Leckageanschluss		Konstantmotor mit: • 2 Volumenstromrichtungen • 2 Drehrichtungen	
Verstellpumpe mit hydraulischer Servoverstellung und: • 1 Volumenstromrichtung • 1 Drehrichtung • Leckageanschluss		Verstellpumpe/-motor mit: • 2 Volumenstromrichtungen • 2 Drehrichtungen • Leckageanschluss	

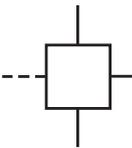
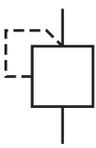
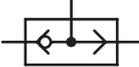
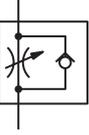
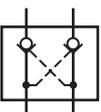
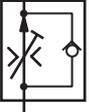
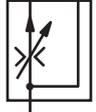
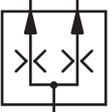
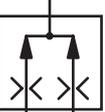
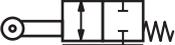
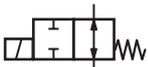
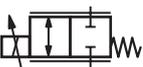
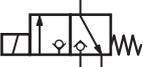
Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
Verstellpumpe mit Druckregler (vorgesteuert) und: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Drehrichtung</li> <li>• Leckageanschluss</li> </ul>		Verstellpumpe mit kombiniertem Druck-/Stromregler und: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Drehrichtung</li> <li>• Leckageanschluss</li> </ul>	
Hydraulischer Schwenkmotor		Hydrokompaktgetriebe	
Einfachwirkender Hydrozylinder, mit einseitiger Kolbenstange, Rückhub durch Federkraft, Federraum mit Anschluss		Doppeltwirkender Hydrozylinder mit einseitiger Kolbenstange	
Einfachwirkender Teleskop-Hydrozylinder		Doppeltwirkender Teleskop-Hydrozylinder	
Filter, allgemein		Behälter-Belüftungsfilter	
Abscheider		Filter mit Abscheider	
Filter mit Umgehungsventil		Filter mit optischer Verschmutzungsanzeige (auf Druckdifferenz basierend)	
Speicher, allgemein		Kolbenspeicher	
Blasenspeicher		Membranspeicher	

Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
Heizung		Kühler mit flüssigem Kühlmedium	
Temperaturregler		Drucksensor, Ausgangssignal analog	
Druckmessgerät (Manometer)		Differenzdruckmessgerät	
Flüssigkeits-Niveauanzeige (Schauglas)		Thermometer	
Volumenstromanzeige		Volumenstrommessgerät	
Drehzahlmessgerät		Drehmomentmessgerät	
Druckschalter, elektromechanisch, einstellbar		Druckschalter, elektronisch einstellbar, Ausgangssignal schaltend	
<p>Speicher mit Speicherabsperblock</p> <p>Speicherabsperblock mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• System-Absperrhahn</li> <li>• Druckbegrenzungsventil (Sicherheitsventil)</li> <li>• manueller Entlastung</li> <li>• Druckmessgerät (Manometer)</li> </ul>			

Auswahl von Symbolen aus dem Bereich Pumpen, Motoren, Zylinder, Speicher und Zubehör

### 1.3.4 Grafische Symbole gemäß DIN ISO 1219 – Hydroventile

Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
Hydraulische Betätigung (einstufig)		Pneumatische Betätigung (einstufig)	
Hydraulische Betätigung (zweistufig)		Betätigung durch Magnetspule mit einer Wicklung	
Betätigung durch Magnetspule mit zwei gegeneinander wirkenden Wicklungen		Betätigung durch Magnetspule mit zwei gegeneinander wirkenden Wicklungen, stetig verstellbar	
Elektrische Betätigung (Magnetspule mit einer Wicklung), hydraulische Vorsteuerung mit externer Steuerölversorgung		Elektrische Betätigung (Magnetspule mit zwei gegeneinander wirkenden Wicklungen; stetig verstellbar), zweistufige hydraulische Vorsteuerung mit externer Steuerölversorgung	
Betätigung durch Druckknopf		Betätigung durch Pedal	
Betätigung durch Wippe		Betätigung durch Hebel	
Betätigung durch Stößel		Betätigung durch Stößel mit einstellbarer Hubbegrenzung	
Betätigung durch Rollenstößel		Betätigung durch Federkraft	
Betätigung durch hydraulische Druckbeaufschlagung (durch Steueröl) oder Druckentlastung, direkt auf Stellglied wirkend		Betätigung durch hydraulische Druckbeaufschlagung (durch Steueröl) oder Druckentlastung über unterschiedlich große, gegenüberliegende Steuerflächen	
Zwei parallel wirkende Betätigungen		Mechanische Rückführung	

Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
Externe Steuerölleitung		Interner Steuerölkanal	
Drosselventil, einstellbar		Rückschlagventil	
Rückschlagventil mit Feder		Entsperrbares Rückschlagventil mit Feder, Ventil wird durch Steuerdruck geöffnet	
Absperrventil		Wechselventil (ODER-Funktion)	
Drossel-Rückschlagventil, einstellbar		Doppelrückschlagventil, entsperrbar	
2-Wege-Stromventil, fest eingestellt, mit Umgehungs-Rückschlagventil		3-Wege-Stromregelventil, einstellbar	
Volumenstromteiler		Volumenstromsummierer	
Druckventil- und Wegeventil-Einbausatz, Sitzausführung		Drosselventil, Betätigung mit Rollenstößel, Federrückstellung	
2/2-Wegeventil, in Ruhestellung offen, Magnetbetätigung, Federrückstellung		2/2-Proportional-Wegeventil, in Ruhestellung geschlossen, Magnetbetätigung, Federrückstellung	
3/2-Wegeventil, in Ruhestellung geschlossen, Magnetbetätigung, Federrückstellung		3/2-Wegesitzventil, in Ruhestellung geschlossen, Magnetbetätigung, Federrückstellung	

Elementbeschreibung	Symbol	Elementbeschreibung	Symbol
4/2-Wegeventil, Magnetbetätigung, Federrückstellung		4/3-Wegeventil, hydraulisch betätigt, Federzentrierung	
4/3-Wegeventil, direkte Magnetbetätigung, Federzentrierung der Mittelstellung		4/3-Wegeventil, vorgesteuert, elektrohydraul. Betätigung, Federzentrierung der Mittelstellung, Steuerölversorgung und Steuerölrückführung extern	
4/3-Wegeventil, zweistufig, elektrohydraulische Betätigung, Druckzentrierung der Mittelstellung, Steuerölrückführung extern		4/3-Wegeventil, zweistufig, elektrohydraulische Betätigung, Federzentrierung der Mittelstellung, Hauptsteuerventil zusätzlich druckzentriert, mit Notbetätigung, Steuerölrückführung extern	
4/3-Wegeventil, vorgesteuert, elektrohydraulische Betätigung, Federzentrierung der Mittelstellung, mit Notbetätigung, Steuerölrückführung extern		4/3-Wegeventil, vorgesteuert, elektrische Betätigung der Vorsteuerstufe und hydraulischer Betätigung der Hauptstufe, ohne Notbetätigung, Federzentrierung der Mittelstellung, Steuerölversorgung und Steuerölrückführung extern	
4/3-Proportional-Wegeventil, direkte Magnetbetätigung, Federzentrierung der Mittelstellung		4/3-Proportional-Wegeventil, vorgesteuert, mit Lageregelung der Haupt- und Vorsteuerstufe, mit integrierter Elektronik	
4/3-Proportional-Wegeventil, vorgesteuert, mit Stellmagnet, mit Lageregelung der Haupt- und der Vorsteuerstufe, mit integrierter Elektronik		4/3-Wege-Servoventil, vorgesteuert, Vorsteuerstufe mit elektrischer Betätigung, mit mechanischer Rückführung der Lage des Steuerkolbens, mit integrierter Elektronik	
Druckbegrenzungsventil, direktbetätigt, Steuerölversorgung intern		2-Wege-Druckreduzierventil, direktbetätigt, einstellbar, Steuerölversorgung intern, Steuerölrückführung extern	
Proportional-Druckbegrenzungsventil, direktbetätigt, Magnet wirkt über Feder auf Ventilkegel, Steuerölversorgung intern		2-Wege-Druckreduzierventil, vorgesteuert, Steuerölversorgung intern, Steuerölrückführung extern	
Druckbegrenzungsventil, vorgesteuert, Steuerölversorgung und -rückführung intern		3-Wege-Druckreduzierventil, direktbetätigt, Steuerölversorgung intern, Steuerölrückführung extern	

Auswahl von Symbolen aus dem Bereich der Hydroventile

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Hydraulische Grundlagen

#### 2.1.1 Hydrostatik – Gesetz von Pascal

##### Kurzbeschreibung

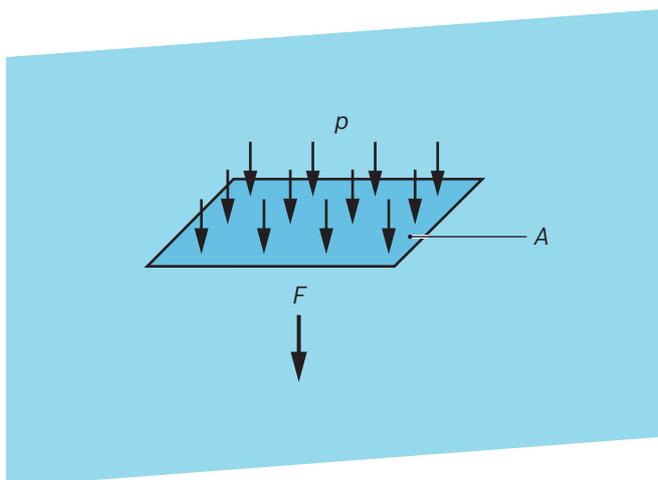
Die Hydrostatik beschreibt die Zustände einer ruhenden Flüssigkeit. Von zentraler Bedeutung ist dabei das Gesetz von Pascal. Dieses Gesetz der Physik beschreibt die Wirkung des Drucks in ruhenden Flüssigkeiten – der Druck breitet sich nach allen Seiten gleichmäßig aus.

##### Gesetz von Pascal

##### Definition des Drucks

Der Druck ist eine grundlegende physikalische Größe der Hydrostatik. Der Druck  $p$  ist definiert als die senkrecht wirkende Kraft  $F$  auf die Fläche  $A$ .

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p \cdot A$$



Druck  $p$  auf Fläche  $A$  erzeugt Kraft  $F$

##### Physikalische Maßeinheiten des Drucks

##### Physikalische Einheit des Drucks lt. Definition

Die physikalische Einheit des Drucks ist gemäß dem Internationales Einheitensystem (SI) das **Pascal (Pa)**:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Für den Bereich der Hydraulik ist 1 Pa ein sehr geringer und deshalb unpraktischer Wert. Relevante Druckangaben würden ab etwa 10000 Pa beginnen und könnten bis zu siebenstelligen Werten erreichen.

Um zu große Zahlenwerte zu vermeiden wird deshalb die Einheit Mega-Pascal (MPa) verwendet:

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

##### Physikalische Einheit des Drucks in der Praxis

In der Hydraulik ist laut EU-Richtlinie neben der SI-Einheit auch die Einheit "Bar" (bar) erlaubt und wird in der Praxis weitestgehend angewendet:

- ▶ 1 bar = 10 N/cm<sup>2</sup>
- ▶ 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa
- ▶ 1 bar = 0,1 MPa

In den USA ist dagegen die Einheit **pound-force per square inch (psi)** (Pfund pro Quadratzoll) gebräuchlich:

- ▶ 1 psi = 6894,757293168 Pa

Für die Praxis ergeben sich daraus folgende Umrechnungsfaktoren:

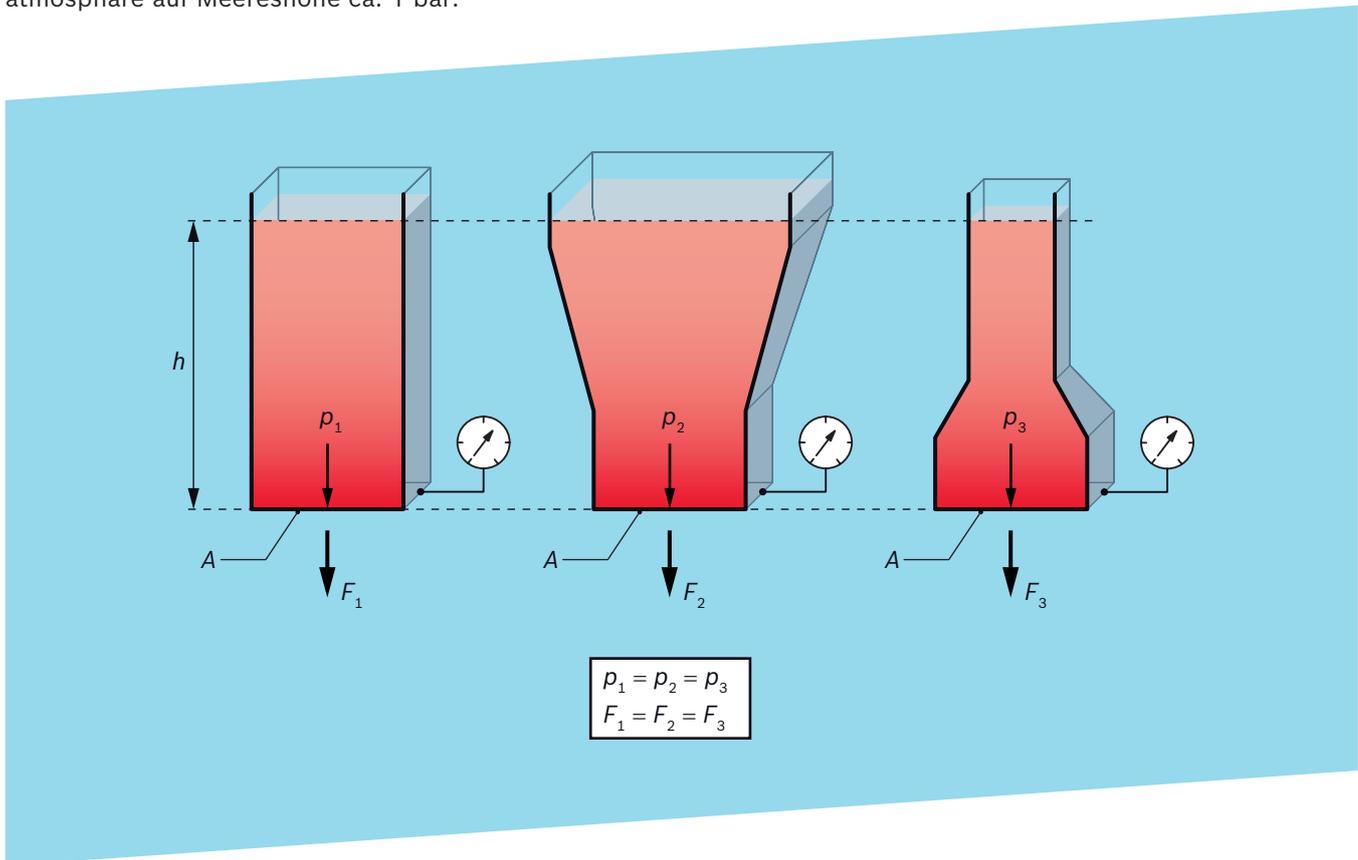
- ▶ 1 bar = 14,49 psi
- ▶ 1 psi = 0,069 bar

### Hydrostatischer Druck durch Schwerkraft

Wenn nur die Schwerkraft auf eine Flüssigkeit wirkt, herrscht in ihr ein Druck, der von der Höhe der Flüssigkeitssäule und von der Dichte der Flüssigkeit abhängt. Dieser Druck wird als Schweredruck bezeichnet.

Bei Wasser beträgt die Zunahme des hydrostatischen Drucks mit der Höhe der Wassersäule ca. 1 bar pro 10 m. Bei Luft beträgt der Druck der gesamten Erdatmosphäre auf Meereshöhe ca. 1 bar.

An einer Reihe von Gefäßen unterschiedlicher Form kann man beobachten, dass bei gleicher Flüssigkeit der Druck am Boden nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule und nicht von der Form des Gefäßes oder der Flüssigkeitsmenge abhängt. Dieses Phänomen wird als **hydrostatisches Paradoxon** bezeichnet.



Hydrostatisches Paradoxon (bei gleicher Fläche A)

Daraus abgeleitet gilt folgende Beziehung:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

- $\rho$  Hydrostatischer Druck
- $\rho$  Spezifische Dichte der Flüssigkeit
- $g$  Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $h$  Höhe der Flüssigkeitssäule

Den hydrostatischen Druck durch die Schwerkraft beschreibt das **Gesetz von Pascal**:

Die Wirkung einer Kraft auf eine ruhende Flüssigkeit pflanzt sich nach allen Richtungen innerhalb der Flüssigkeit fort. Ohne äußere Kräfte ist die Größe des Drucks in der Flüssigkeit gleich der Gewichtskraft, bezogen auf ihre Wirkfläche. Der Druck wirkt immer senkrecht auf die Begrenzungsflächen des Behälters.

### Wegübersetzung (Hydraulisches Hebelgesetz)

Für inkompressible Flüssigkeiten gilt:

*In einem abgeschlossenen System ändert sich das Gesamtvolumen der Flüssigkeit nicht.*

Wie in der Grafik "Kraft- und Wegübersetzung" ( auf Seite 27) dargestellt, muss das Volumen an Druckflüssigkeit, das von einem Kolben verdrängt wird, gegen den anderen Kolben drücken und ihn bewegen (Verdrängungsprinzip).

Die Veränderung der Teilvolumen ist in beiden Zylinderräumen innerhalb des Systems gleich und wird nach folgender Formel ermittelt:

$$\Delta V = A_1 \cdot s_1 = A_2 \cdot s_2$$

Die Wege verhalten sich umgekehrt proportional wie die zugehörigen Kolbenflächen.

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

Somit macht der Kolben mit der kleineren Kolbenfläche einen größeren Hub als der Kolben mit der größeren Kolbenfläche.

$$s_1 = s_2 \cdot \frac{A_2}{A_1}$$

Diese Beziehung gilt, analog zur Mechanik, als hydraulisches Hebelgesetz. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die sog. "Wegübersetzung".

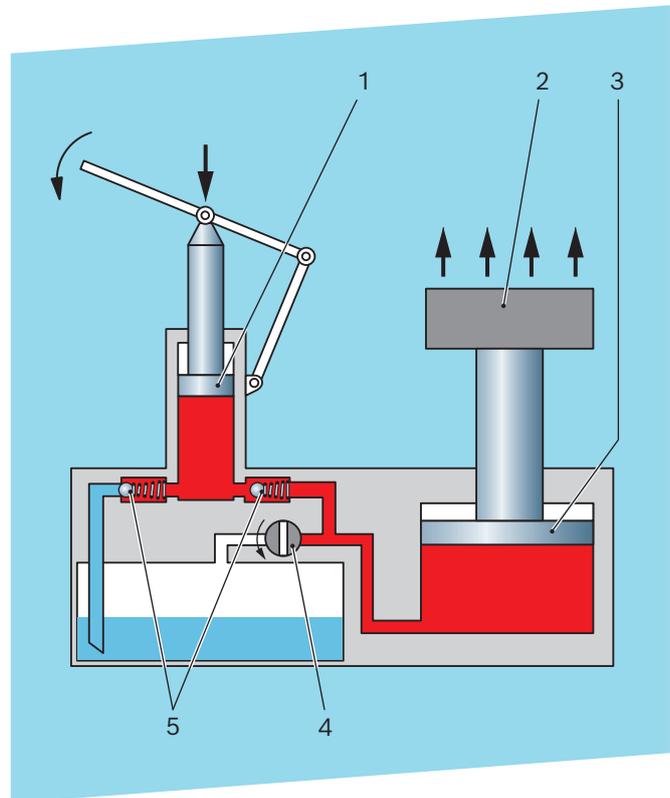
### Anwendung der Kraft- und Wegübersetzung

Die Kraft- und Wegübersetzung wird beispielsweise bei einer hydraulischen Hubbühne zum Heben schwerer Lasten genutzt. Der Zylinder der Handpumpe ist durch einen großen Hub bei kleiner Kolbenfläche gekennzeichnet. Dadurch ist nur ein geringer Kraftaufwand notwendig, um mit vielen Hübten das notwendige Volumen an Druckflüssigkeit zum Arbeitszylinder zu fördern.

Am Arbeitskolben mit großer Fläche erfolgt eine Übersetzung in eine hohe Kraft der Hubbühne bei geringem Weg.

Folgende Abbildung soll die Anwendung der Kraft- und Wegübersetzung bei einer hydraulischen Hubbühne

verdeutlichen. Rückschlagventile verhindern die Rückströmung der Druckflüssigkeit in die Handpumpe und somit ein Absenken des Arbeitskolbens. Zum Absenken der Last auf der Hubbühne ist ein Sperrelement vorgesehen (hier ein Drehschieber), mit dem der Abfluss der Druckflüssigkeit in den Behälter gesteuert wird.



- 1 Zylinderkolben der Handpumpe
- 2 Hubbühne
- 3 Zylinderkolben der Hubbühne
- 4 Drehschieber
- 5 Rückschlagventile

Prinzip einer hydraulischen Hubbühne (Anwendung der Kraft- und Wegübersetzung)



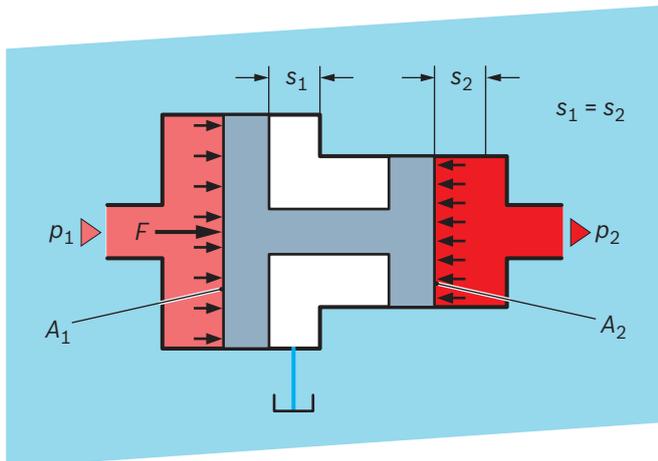
Hydraulischer Wagenheber (Praxisbeispiel für Anwendung der Kraft- und Wegübersetzung)

## Druckübersetzung

Unter Druckübersetzung versteht man die Wandlung eines Eingangs- oder Primärdruckes in meist höheren Ausgangs- oder Sekundärdruck.

Bei mechanischer Kopplung der mit Druck beaufschlagten Flächen wird der Druck im Verhältnis dieser Flächen übersetzt.

Voraussetzung sind zwei fest verbundene, unterschiedlich große Kolbenflächen in einem abgeschlossenen Hydrauliksystem.



Prinzip der Druckübersetzung (Druckübersetzer)

Auf den großen Kolben wirkt der Druck  $p_1$  und erzeugt die Kraft  $F$ , die über den kleinen Kolben den Druck  $p_2$  bewirkt.

$$p_1 \cdot A_1 = F = p_2 \cdot A_2$$

Die Drücke verhalten sich also umgekehrt proportional zu den zugehörigen Kolbenflächen.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{A_2}{A_1}$$

Aus diesem Zusammenhang ergibt sich die sog. "Druckübersetzung".

## Anwendung der Druckübersetzung

Ein typisches Anwendungsbeispiel für die Druckübersetzung ist eine Komponente, die als Druckübersetzer bezeichnet wird (siehe Abbildung oben "Prinzip der Druckübersetzung" und Abschnitt "Druckübersetzer" auf Seite 342).

Der Druckübersetzer verstärkt den zur Verfügung stehenden Druck. Der an der Eingangsseite wirkende Primärdruck wird im umgekehrten Verhältnis der wirksamen Kolbenflächen auf einen höheren Sekundärdruck an der Ausgangsseite verstärkt.

Die Volumenströme der Primär- und Sekundärseite verhalten sich wie die Kolbenflächen.

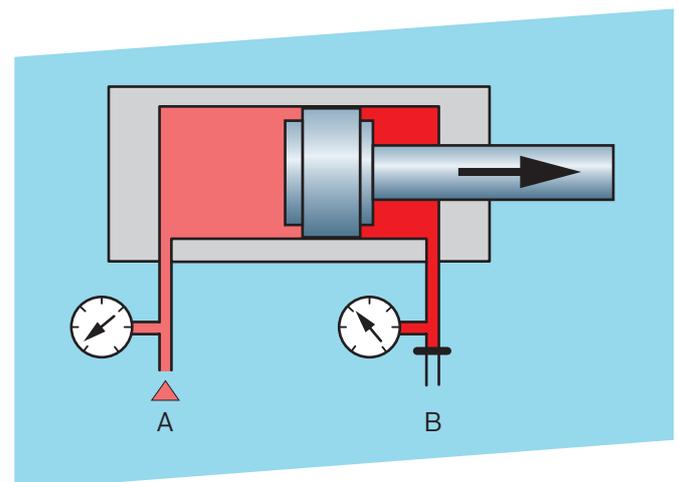
$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{A_1}{A_2}$$

Der Volumenstrom wird nach folgender Formel berechnet.

$$q_v = \frac{A \cdot s}{t}$$

Aufgrund der mechanischen Trennung der beiden Bereiche des Druckübersetzers kann für den Primärbereich ein anderes Druckmedium (z.B. Hydrauliköl) eingesetzt werden als für den Sekundärbereich (z.B. Wasser).

## Gefährdung durch Druckübersetzung



Druckübersetzung im doppeltwirkenden Hydrozylinder

Soll der Hydrozylinder durch Druckbeaufschlagung am Anschluss A ausgefahren werden, aber der Anschluss B verschlossen ist, würde das eine Druckübersetzung zwischen den Zylinderräumen hervorrufen (entsprechend dem Verhältnis der Flächen von Kolbenboden- und Kolbenstangenseite). Diese Druckerhöhung kann im Extremfall zum Bersten des Zylinderrohres und von damit verbundenen Bauteilen führen.



### Hinweis:

Bei der Planung und Dimensionierung von hydraulischen Anlagen ist es wichtig, die mögliche Druckübersetzung und somit eine Druckerhöhung durch Hydrozylinder zu berücksichtigen.



## 3.3 Hydroventile

### 3.3.1 Übersicht der Hydroventile

#### Kurzbeschreibung

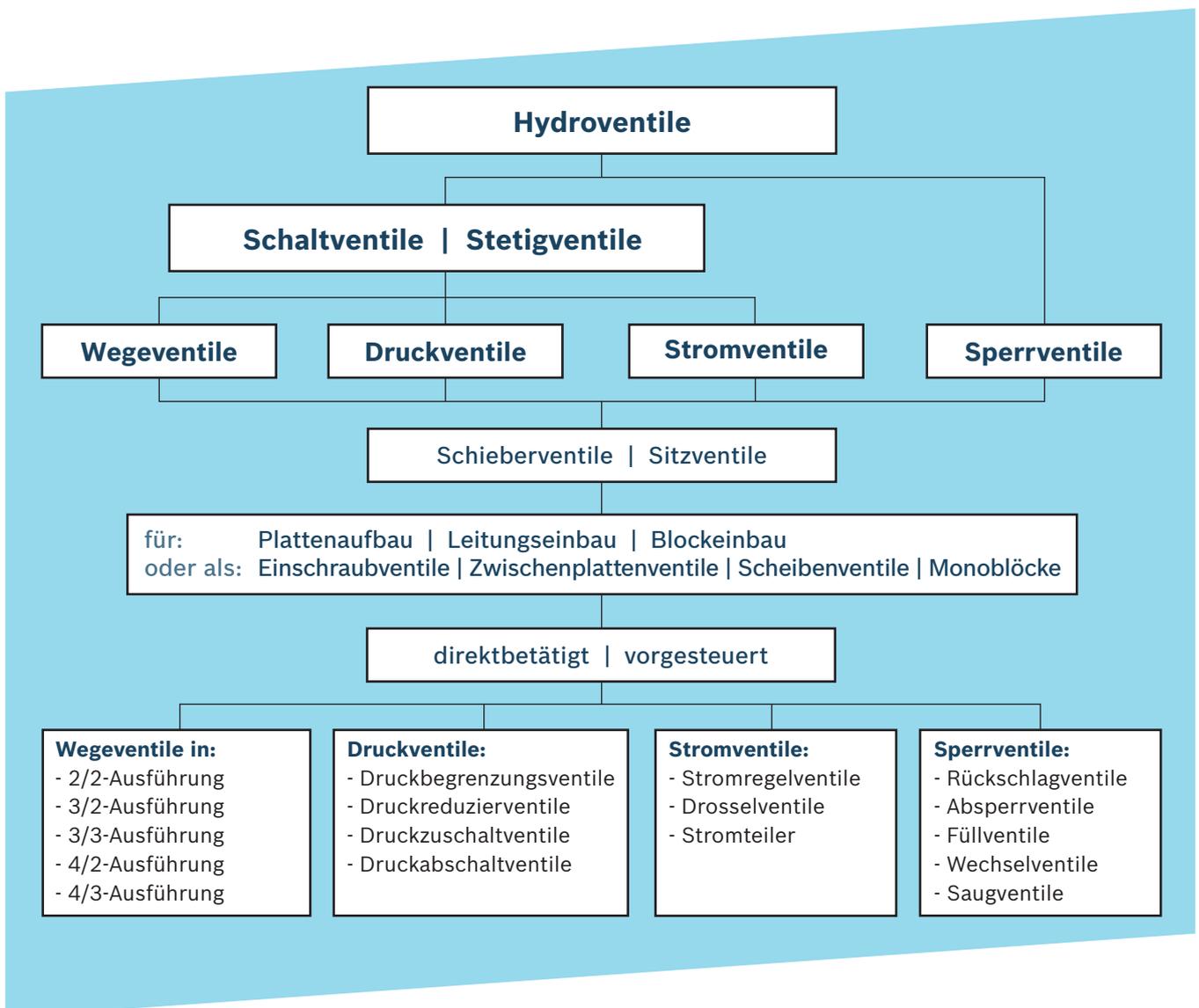
Hydroventile sind Komponenten zur Steuerung und Regelung des Energieflusses in einer hydraulischen Anlage. Je nach Ausführung beeinflussen sie Start, Stopp und Menge des Volumenstroms und dadurch die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit hydraulischer Aktoren sowie die Höhe des Drucks in hydraulischen Anlagen.

#### Einteilung der Hydroventile

Die Hauptunterscheidung innerhalb dieser Komponentenfamilie wird nach dem Signalverhalten bzw. der Arbeitsweise des Ventils vorgenommen:

- ▶ **Schaltventile**  
Ein verändertes Eingangssignal führt ohne Zwischenstellung zu einer sprunghaften Veränderung des hydraulischen Ausgangssignals (binäres Verhalten; auch als "Schwarz/Weiß-Ventile" bezeichnet).
- ▶ **Stetigventile**  
Ein veränderliches Eingangssignal wird in ein stetiges und proportional veränderliches hydraulisches Ausgangssignal umgesetzt. Innerhalb der Stetigventile wird grundsätzlich zwischen Proportionalventilen und Servoventilen unterschieden.

Die weitere Unterteilung der Hydroventile ist für diese beiden Hauptgruppen weitestgehend identisch.



Allgemeine Einteilungskriterien für Hydroventile

## 3.4 Hydrozylinder

### 3.4.1 Grundlagen Hydrozylinder Charakteristik

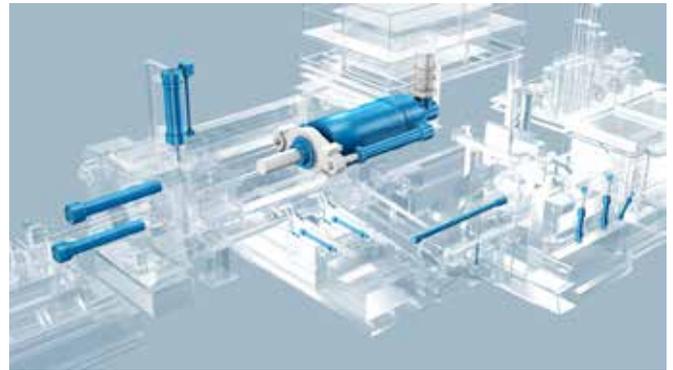
#### Kurzbeschreibung

Hydrozylinder sind Komponenten zur Energiewandlung, die nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten. Sie wandeln den Volumenstrom, der in den Zylinderraum einströmt, in eine translatorische, also geradlinige, Bewegung.

Hydrozylinder können große Kräfte auf einem durch ihre Wirklänge begrenzten Weg übertragen. Je nach Bauart können Hydrozylinder in eine oder in zwei Richtungen Kräfte übertragen. Im Verhältnis zu ihrer Baugröße sind Hydrozylinder sehr leistungsfähig und werden daher in allen Bereichen der Industrie- und Mobilhydraulik eingesetzt.



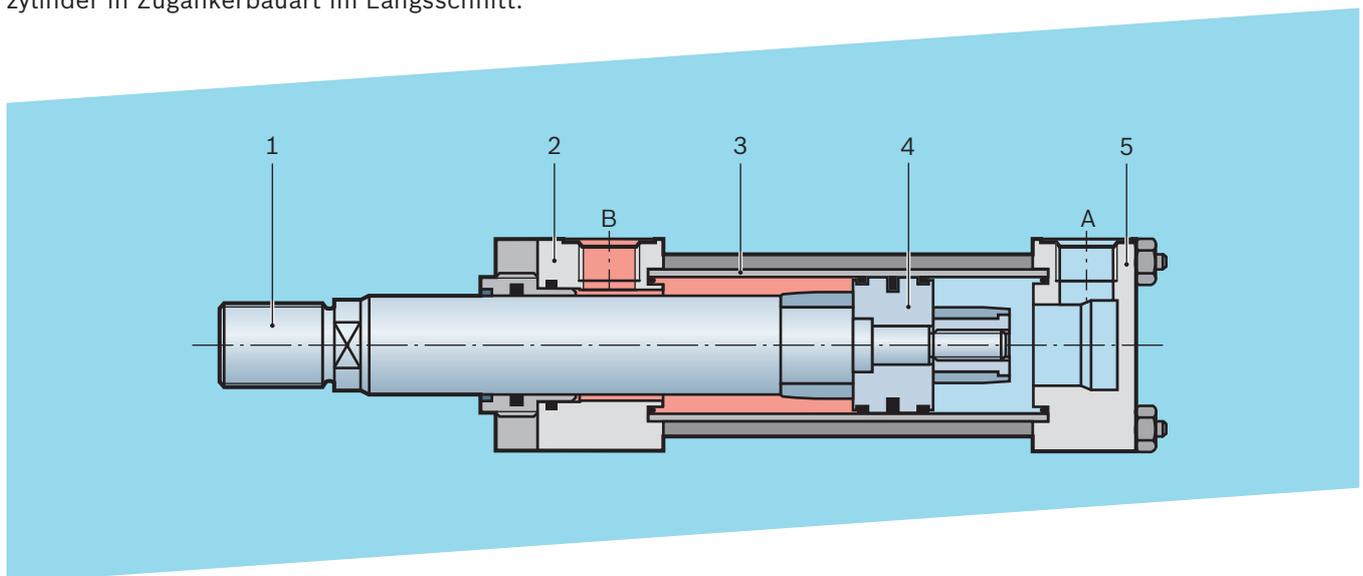
Einsatz von Hydrozylindern in einem Radlader



Einsatz von Hydrozylindern in einer Strangpresse

#### Aufbau

Die Abbildung zeigt einen doppelwirkenden Hydrozylinder in Zugankerbauart im Längsschnitt.



- 1 Kolbenstange
- 2 Zylinderkopf
- 3 Zylinderrohr
- 4 Kolben
- 5 Zylinderboden

- A Anschluss Kolbenbodenseite
- B Anschluss Kolbenstangenseite

Längsschnitt eines doppelwirkenden Hydrozylinders in Zugankerbauart

## 3.5 Hydromotoren

### 3.5.1 Außenzahnradmotoren

#### Kurzbeschreibung

Außenzahnradmotoren sind Verdrängermaschinen, bei denen die Verdrängerkammern durch außenverzahnte Zahnräder gebildet werden. Hoch- und Niederdruckbereich sind durch den Kontakt der ineinander greifenden Zahnräder getrennt.

#### Charakteristik

Außenzahnradmotoren sind schnelllaufende Konstantmotoren. Sie zeichnen sich durch eine kompakte Bauweise und eine hohe Leistungsdichte aus. Diese Motoren bestehen aus wenigen Bauteilen und sind kompakt aufgebaut. Das Gehäuse kann mit niedrigem Fertigungsaufwand aus einem Aluminiumstrangprofil hergestellt werden.

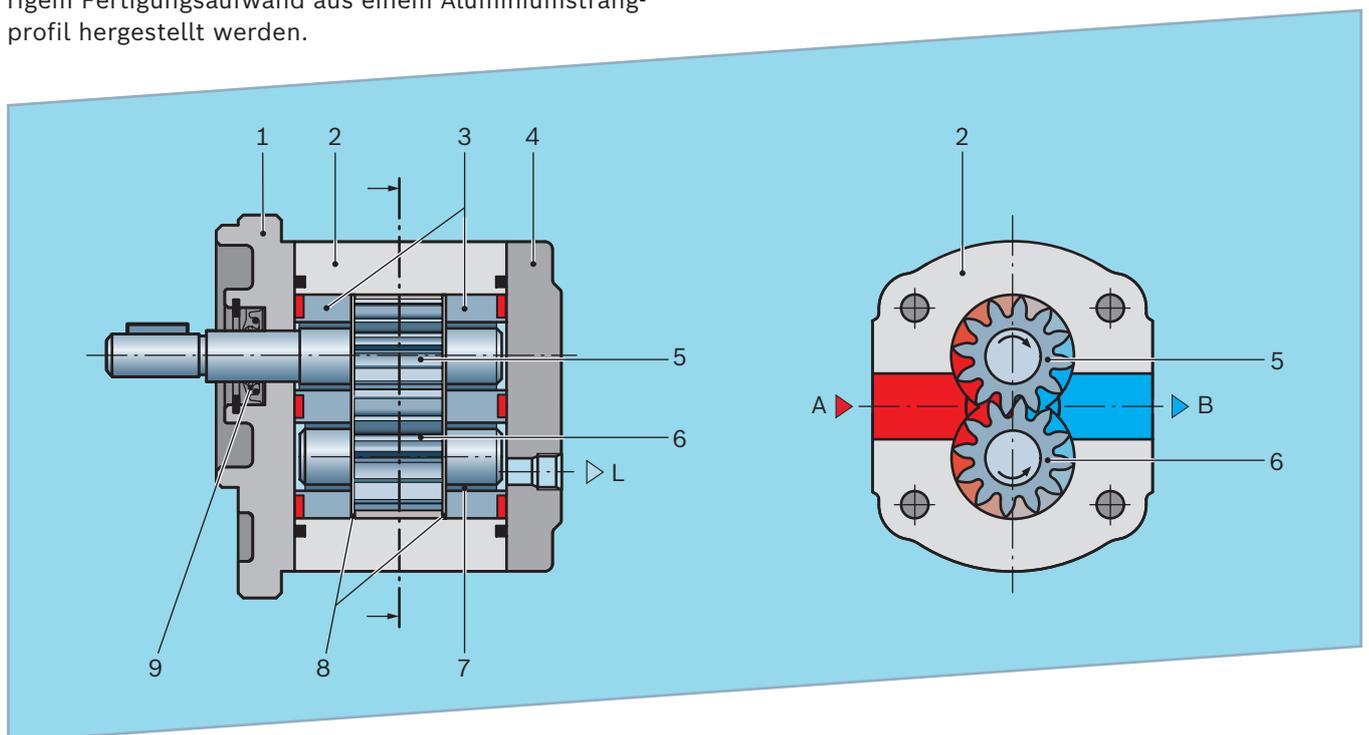
Außenzahnradmotoren können in einem weiten Drehzahlbereich eingesetzt und mit Druckflüssigkeiten innerhalb eines großen Viskositätsbereichs betrieben werden. Dadurch ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Mobilhydraulik und in industriellen Anwendungen.

Beispiel für den Einsatz von Außenzahnradmotoren sind:

- ▶ Baumaschinen (Straßenwalzen oder Straßendeckenfertiger)
- ▶ Straßenfahrzeuge (Busse oder Lastkraftwagen)
- ▶ Land- und Forstwirtschaft (Mähdrescher oder Forstmaschinen)
- ▶ Anlagenbau (Lüfterantriebe)

#### Aufbau

Die Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Außenzahnradmotors im Längs- und Querschnitt.



1 Flansch (Frontdeckel)

2 Gehäuse

3 Lagerbrillen

4 Gehäusedeckel (Enddeckel)

5 Abtriebswelle mit Zahnrad

6 Zahnrad

7 Lager

8 Dichtfläche zwischen Lagerbrillen und Zahnrädern

9 Wellendichtring

A Hochdruckanschluss

B Niederdruckanschluss

L Leckageanschluss

Längs- und Querschnitt eines Außenzahnradmotors

## 4 Grundsaltungen der Hydraulik

### 4.1 Schaltpläne der Hydraulik

#### 4.1.1 Grafische Darstellung hydraulischer Schaltkreise

##### Hydraulik-Schaltpläne

Zur grafischen Darstellung der Komponenten und ihrer Funktionen, ihrer Verbindungen in der hydraulischen Anlage sowie ihres Zusammenwirkens im Hydraulik-System werden Schaltpläne erstellt.

Schaltpläne sind Hilfsmittel, um das Verständnis für den Entwurf und die Beschreibung einer hydraulischen Anlage zu erleichtern. Sie sind ebenso ein geeignetes Mittel, durch eine vereinheitlichte Darstellung der hydraulischen Gegebenheiten Unklarheiten und Fehler während der Planungsphase, der Fertigung, der Montage und der Instandhaltung der Hydraulikanlage zu vermeiden.

Basiselemente hydraulischer Schaltpläne sind genormte grafische Symbole der Hydraulik nach ISO 1219 (siehe Kapitel "Grafische Symbole" ab Seite 18). Grafische Symbole der Hydraulik geben keine Informationen über den konstruktiven Aufbau der Komponenten. Sie umfassen abstrakt dargestellte Funktionseinheiten wie Antriebsmotor, Hydropumpe, Hydroventil, Hydrozylinder oder Hydromotor sowie Zubehör-Bauteile oder Baugruppen.

Die Darstellung der Leitungsverknüpfungen zeigt die Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten und Baugruppen.

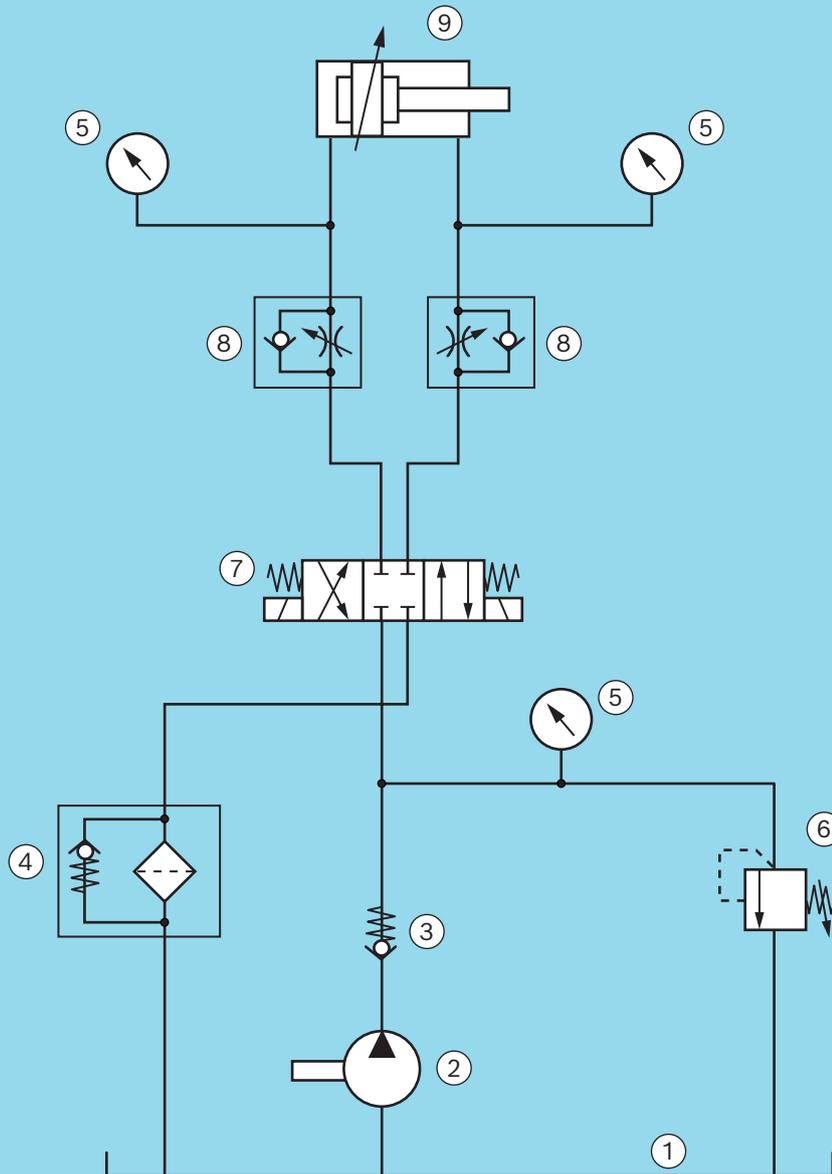
Die Kennzeichnung von Komponenten, kompakten Baugruppen und Anschlussbezeichnungen erleichtert die Zuordnung der Elemente des Schaltplans zu den Stücklisten und Gegebenheiten des realen hydraulischen Aufbaus. Des Weiteren ist es möglich, geforderte physikalische Kennwerte an relevante Positionen des Schaltplanes einzutragen.



Lesen und Verstehen eines Schaltplanes als Grundlage für die Arbeit an hydraulischen Anlagen

## Schaltplan/Schaltschema

Folgende Abbildung zeigt den **Schaltplan** einer hydraulischen Anlage mit Versorgung (Hydropumpe), Komponenten zur Steuerung, Sicherheit und Anzeige sowie dem hydraulischen Verbraucher (Hydrozylinder).



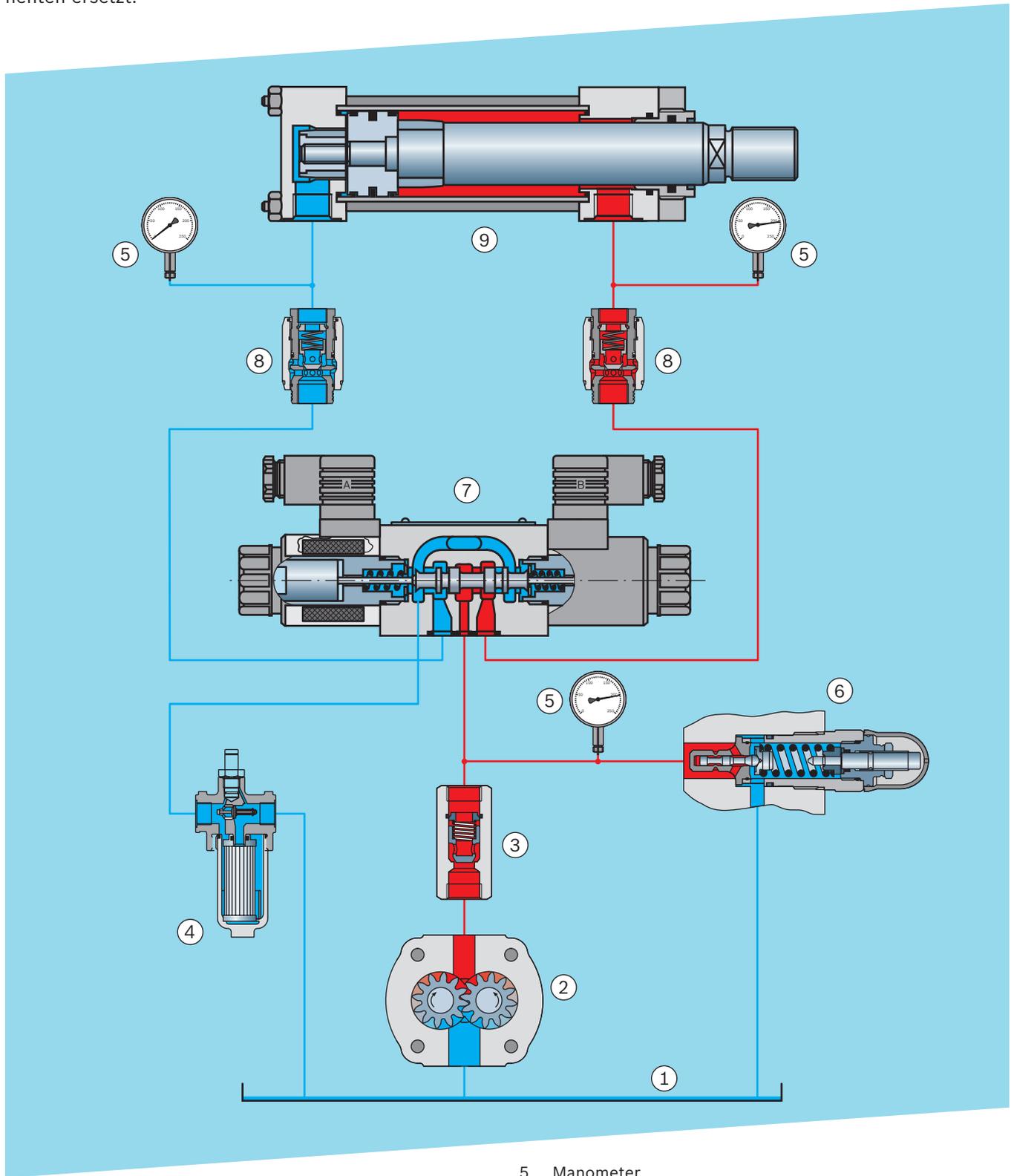
- 1 Behälter
- 2 Hydropumpe (hier Konstantpumpe)
- 3 Rückschlagventil
- 4 Rücklauffilter

- 5 Manometer
- 6 Druckbegrenzungsventil
- 7 Wegeventil
- 8 Drosselrückschlagventil
- 9 Hydrozylinder

Schaltplan eines Hydraulikkreislaufs mit Schaltsymbolen nach DIN ISO 1219

In der nachstehenden Abbildung sind die Komponenten einer Hydraulikanlage in einem **Schaltschema** dargestellt. Dieses Schaltschema wurde aus dem vorher gezeigten Schaltplan abgeleitet. Die abstrakten grafischen Symbole sind durch Schnittbilder der Komponenten ersetzt.

Diese, vor allem in der Aus- und Weiterbildung genutzte Form der Darstellung einer hydraulischen Schaltung, zeigt auf anschauliche Art zusammengefasst den Aufbau und das Zusammenwirken der einzelnen Baugruppen, Komponenten und Bauteile.



- |                                       |                           |
|---------------------------------------|---------------------------|
| 1 Behälter                            | 5 Manometer               |
| 2 Hydropumpe (hier Außenzahnradpumpe) | 6 Druckbegrenzungsventil  |
| 3 Rückschlagventil                    | 7 Wegeventil              |
| 4 Rücklauffilter                      | 8 Drosselrückschlagventil |
|                                       | 9 Hydrozylinder           |

Zugehöriges Schaltschema (mit Schnittbildern) des Hydraulikkreislaufes

## 4.2 Steuerungen und Regelungen mit Ventilen

### 4.2.1 Steuerungen mit Wegeventilen

#### Kurzbeschreibung

Wegeventile der Hydraulik sind Komponenten zur Beeinflussung von Start, Stopp und Durchflussrichtung des Volumenstroms einer Druckflüssigkeit. Sie stellen Leitungsverknüpfungen her, indem sie einen oder mehrere Strompfade öffnen, sperren oder ändern.

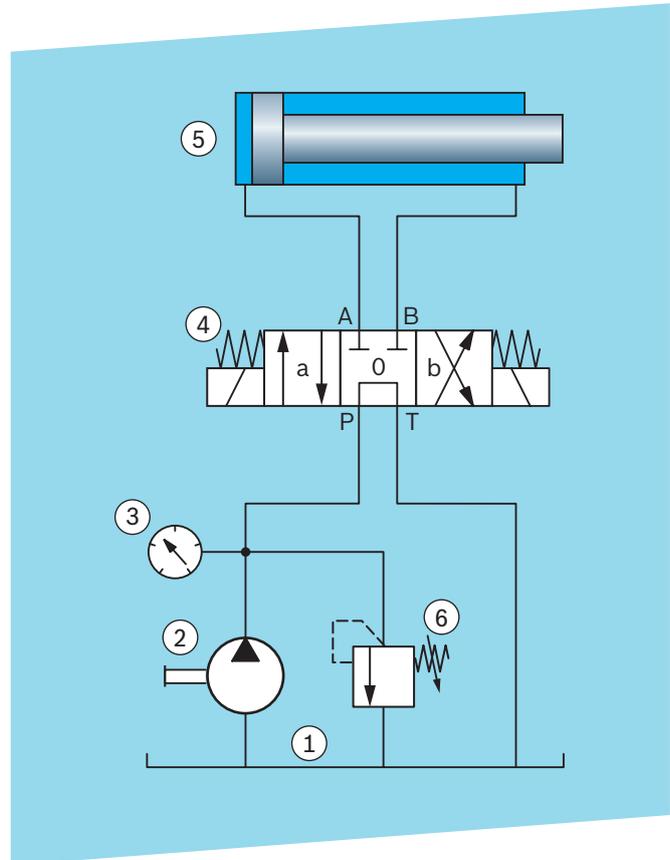
Je nach Anwendung und Aufgabe werden verschiedene Varianten von Steuerungen mit Wegeventilen realisiert, die sich hinsichtlich Aufbau und Funktion unterscheiden.

#### Aufbau

Eine Steuerung mit Wegeventilen besteht im Wesentlichen aus folgenden Hauptkomponenten:

- ▶ Eine Hydropumpe fördert den Volumenstrom.
- ▶ Ein Wegeventil steuert Start und Stopp sowie die Strömungsrichtung.
- ▶ Ein Aktor (Verbraucher), hier Hydrozylinder, verrichtet Arbeit mit Hilfe des Volumenstroms.
- ▶ Ein Druckbegrenzungsventil begrenzt den Betriebsdruck der Anlage.

Die Abbildung zeigt den Schaltplan für eine Zylindersteuerung mit einem elektrisch betätigten 4/3-Wegeventil in Mittelstellung.



1 Behälter	4 4/3-Wegeventil
2 Hydropumpe	5 Hydrozylinder
3 Manometer	6 Druckbegrenzungsventil

Zylindersteuerung mit elektrisch betätigtem 4/3-Wegeventil

Bei dem im Schaltplan abgebildeten Symbol eines Wegeventils sind in Mittelstellung (Nullstellung) die Anschlüsse P und T miteinander verbunden. Dies wird auch als neutraler Umlauf bezeichnet, ein solches Wegeventil als Umlaufventil.

Der Vorteil besteht darin, dass die Hydropumpe in dieser Schaltstellung des Wegeventils energiesparend arbeitet, da sie lediglich den geringen Druck zur Überwindung der Ventil- und Leitungswiderstände aufbauen muss.



Stetig-Wegeventile mit integrierter Elektronik für den Einsatz in der Industriehydraulik

# 5 Hydraulikaggregate und Systeme

## 5.1 Hydraulik-Antriebsaggregate

### 5.1.1 Antriebsaggregate in der Hydraulik

#### Kurzbeschreibung

Hydraulikaggregate sind selbstständige Baugruppen, in denen Komponenten zur gesteuerten Bereitstellung hydraulischer Energie zusammengefasst sind. Der Antrieb erfolgt entweder durch einen Elektromotor oder durch einen Verbrennungsmotor.

#### Anforderungen

Hydraulikaggregate müssen an die Anforderungen verschiedenster Hydrauliksysteme angepasst sein. Unterschiede im Anforderungsprofil ergeben sich z.B. hinsichtlich des erforderlichen Volumenstroms, des Betriebsdrucks, der Umgebungsbedingungen sowie der Transport- und Montagemöglichkeiten. Immer im Fokus steht die Forderung nach einem niedrigen Geräuschpegel und einer optimalen Energieeffizienz.

Der Einsatz von Standardkomponenten und modularen Baugruppen in Hydraulikaggregaten bieten die Möglichkeit, die Vielfalt der aus den Anforderungen resultierenden Varianten besser handhabbar zu machen. Durch eine modulare Bauweise gelingt es, unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte eine optimale konstruktive Lösung zu realisieren und dabei hohe Betriebssicherheit, geringe Geräuschemission, geringen Energieverbrauch sowie Wartungsfreundlichkeit und Langlebigkeit zu gewährleisten.

#### Einsatzgebiete

Typische Einsatzfälle für Hydraulikaggregate sind stationäre Anwendungen im allgemeinen Maschinenbau (Stahl- und Wasserbau, Hüttentechnik), in der kunststoffverarbeitenden Industrie, in Hub- und Lifteinrichtungen und in Pressen. In Anwendungen der Mobilhydraulik werden kleine Aggregate mit Elektromotor-Antrieb genutzt, z.B. für den Betrieb von Ladebordwänden von LKW oder bei hydrostatischen Lüfterantrieben.



Hydraulik-Großaggregat (mit Öl-Luft-Wärmetauscher)

# Index

## A

Aggregate	359
Antriebsaggregate	359
Antriebseinheiten	370
Antriebsmodule	368
Antriebstechniken	13
Eigenschaften	17
Energieversorgung und Energiewandlung	15
Energieverteilung	15
Gegenüberstellung	14
Übertragungsmedium	16
Umweltverträglichkeit	16
Anwendungen der Industriehydraulik	10
Anwendungen der Mobilhydraulik	12
Arbeit (physikalisch)	53
Arbeitsstation	<i>siehe "Trainingssysteme"</i>
Außenzahnradmotoren	217
Außenzahnradpumpen	75
Axialkolbenmotoren - Schrägachsenbauweise	232
Axialkolbenmotoren - Schrägscheibenbauweise	228
Axialkolbenpumpen - Schrägachsenbauweise	94
Axialkolbenpumpen - Schrägscheibenbauweise	89

## B

Bauarten Hydrozylinder	198
Bauformen von Hydroventilen	127
Blockeinbau	129
Leitungseinbau	128
Monoblock	130
Plattenaufbau	128
Scheibenbauweise	130
Zwischenplattenventile	129
Befestigungsarten Hydrozylinder	197
Behälter	362
Bernoulli, Gesetz von	30
Betätigungsarten von Hydroventilen	130
direktbetätigtes Ventil	130
elektrische Betätigung	134
hydraulische oder pneumatische Betätigung	134
vorgesteuertes Ventil	130
Betätigungselemente von Hydroventilen	130
Betriebsverhalten von Wegeventilen	143
Blasenspeicher	272
Blenden	<i>siehe "Feindrosselventile"</i>
Blenden in Hydraulikleitungen	35
Blockeinbau	129

## C

CytroBox	366
CytroPac	366

## D

Dämpfung durch Speicherschaltungen	
mit Stabilisierungsmodulen	356
von mechanischen Stößen	356
von Pulsation und Druckstößen	356
Dämpfungslager	361
Definition der Hydraulik	9
Differenzdruck-Manometer	287
Differenzialzylinder	205
Digital-Manometer	294
DIN ISO 1219 - Auszug	19, 22
Drehmoment	50
Drehmomentgleichgewicht	50
Drehzahlvariable Pumpenantriebe (Sytronix)	372
Drosselrückschlagventile	183
Drosselventile	180
zur Geschwindigkeitssteuerung	304
Druckabfall bei Rohrströmungen	38
Druckabhängigkeit der Druckflüssigkeit	40
Druckabschaltventile	168
Druckabsicherung	339
Druckanzeigen, analog	<i>siehe "Manometer"</i>
Druckanzeigen, digital	294
Druckbegrenzungsventile	148
Druckflüssigkeiten	59
Druckflüssigkeit-Temperaturmessung	296
Druckmedium	59
Druckmessumformer	293
Druckreduzierung	
im Zulauf von Wegeventilen	347
zwischen Wegeventil und Verbraucher	346
Druckreduzierventile	156
Druckschalter	290, 342
Druckschalter; elektronisch	292
in Folgesteuerung zur Druckerhöhung	342
in Speicherladesteuerung	345
Kolben-Druckschalter	292
Rohrfeder-Druckschalter	292
zur Überwachung der Filterfunktion	345
Drucksensoren	<i>siehe "Druckmessumformer"</i>
Druckübersetzer	342
Druckübersetzung	29
Druck- und kraftabhängige Steuerungen	339
Druckwaage	<i>siehe "Stromregelventil - Funktionsweise"</i>
Druckzuschaltventile	162

## E

Eilgangschaltungen	312
Einschraubventile	129
Einsteckventile	129
Endlagendämpfung Hydrozylinder	196
Energie und Arbeit	52

<b>F</b>			
Feindrosselventile (Blenden)	183		
Filter		<i>siehe "Hydrofilter"</i>	
Filter-Aufnahmekapazität	280		
Filterfeinheit	280		
Filterwirksamkeit	280		
Flanschbefestigungen	258		
Flügelzellenmotoren	224		
Flügelzellenpumpen	83		
Flüsteraggregate	367		
Folgeventile	164		
Füllstandsanzeige	362		
Füllstandsmessung	294		
Füllventile	178		
<b>G</b>			
Geräuscharme Kompakteinheiten - Flüsteraggregate	367		
Gerotorprinzip bei Zahnringmotoren	244		
Geschwindigkeitsregelung mit Stromregelventilen	309		
Geschwindigkeitssteuerung mit Drosselventilen	304		
Gesetz von Bernoulli	30		
Gesetz von Pascal	25		
Gleichgangzylinder	213		
Gleichlaufsteuerung mit Stromregelventilen	351		
mit Stromteiler	352		
Grafische Symbole	18		
Großaggregate	366		
Grundlagen			
hydraulische Grundlagen	25		
mechanische Grundlagen	46		
Grundsaltungen der Hydraulik	297		
<b>H</b>			
Heizung (eines Hydraulikaggregates)	363		
Historie der Hydraulik	9		
Hochdruckfilter	278		
Höhenverkettungen	260		
Hydraulikaggregate	359		
Hydraulikaggregate im Vergleich	371		
Hydrauliksysteme	359		
Hydraulik-Trainingssysteme	374		
Hydrodynamik - Gesetz von Bernoulli	30		
Hydrofilter	277		
Hochdruckfilter	278		
Rücklauffilter	278		
Saugfilter	278		
Hydromotoren	217		
Außenzahnradmotoren	217		
Axialkolbenmotoren - Schrägachsenbauweise	232		
Axialkolbenmotoren - Schrägscheibenbauweise	228		
Flügelzellenmotoren	224		
Innenzahnradmotoren	221		
Radialkolbenmotoren mit äußerer Abstützung	241		
Radialkolbenmotoren mit innerer Abstützung	237		
Hydromotoren im Vergleich	250		
Hydropumpen	75		
Außenzahnradpumpen	75		
Axialkolbenpumpen - Schrägachsenbauweise	94		
Axialkolbenpumpen - Schrägscheibenbauweise	89		
Flügelzellenpumpen	83		
Innenzahnradpumpen	81		
Pumpenstellsysteme	109		
Radialkolbenpumpen mit äußerer Abstützung	102		
Radialkolbenpumpen mit innerer Abstützung	99		
Schraubenspindelpumpen	106		
Zahnringpumpen	104		
Hydropumpen im Vergleich	121		
Hydrospeicher	267		
Blasenspeicher	272		
Kolbenspeicher	273		
Membranspeicher	272		
Schaltungen	353		
Sicherheit von Hydrospeichern	275		
Speicherabsperblöcke	276		
Hydrostatik - Gesetz von Pascal	25		
Hydrostatische Antriebe	316		
Hydroventile	125		
Bauformen	127		
Betätigungsarten	130		
Betätigungselemente	130		
Kavitationserscheinungen in Hydroventilen	45		
Kenngrößen	131		
Typbezeichnung	132		
Übersicht	125		
Ventilbetätigung	130		
Hydrozylinder	191		
Bauarten-Vergleich	198		
Befestigungsarten	197		
doppeltwirkende Hydrozylinder	194		
einfachwirkende Hydrozylinder	194		
Endlagendämpfung	196		
Grundlagen	191		
Rundbauart	195		
Zugankerbauart	195		
<b>I</b>			
Impulserhaltungssatz	53		
Individualaggregate	368		
Inhaltsverzeichnis	5		
Innenzahnradmotoren	221		
Innenzahnradpumpen	81		
ISO 1219 (DIN ISO 1219) - Auszug	19, 22		

<b>K</b>			
Kavitation	42	Modulare Standard-Kleinaggregate	365
Akustische Kavitation	43	Monoblock	130
Einzelblasenkavitation	43	Motoren	<i>siehe "Hydromotoren"</i>
Schichtkavitation	43	Motor-Pumpen-Gruppe	361
Wirbelkavitation	43	<b>O</b>	
Wolkenkavitation	43	Ölkühler, luftgekühlt	283
Kennfelder	71	Ölkühler, wassergekühlt	284
Kennlinien von Pumpen und Motoren	67	Orbitprinzip bei Zahnringmotoren	246
für den Volumenstrom	67	<b>P</b>	
für den Wirkungsgrad	69	Parallelbetrieb ohne Gleichlauf	350
für die mechanische Antriebsleistung	68	Parallelschaltung von Verbrauchern	348
Kolben-Druckschalter	292	Pascal, Gesetz von	25
Kolbenspeicher	273	Physikalische Grundlagen	25
Kompaktmodule	370	hydraulische Grundlagen	25
Kompensation von Volumenausdehnung	357	Plattenaufbau	128
Komponenten	59	Plungerzylinder	199
Kompressibilität im Hydrauliksystem	41	Positioniervorgang	47
Kompressibilität von Flüssigkeiten	40	Pulsationsdämpfer	361
Kompressionsmodul	40	Pumpen	<i>siehe "Hydropumpen"</i>
Kraftübersetzung	27	Pumpenstellsysteme	109
Kraft und Drehmoment	48	<b>R</b>	
Kraft- und Wegübersetzung	27	Radialkolbenmotoren mit äußerer Abstützung	241
Kreislaufsysteme der Hydraulik	316	Radialkolbenmotoren mit innerer Abstützung	237
Kühler	281, 363	Radialkolbenpumpen mit äußerer Abstützung	102
Ölkühler, luftgekühlt	283	Radialkolbenpumpen mit innerer Abstützung	99
Ölkühler, wassergekühlt	284	Regelungen mit Ventilen	300
<b>L</b>		Reihenplatten	262
Laminare Strömung	37	Relativdruck-Manometer	286
Lehraggregate	<i>siehe "Trainingssysteme der Hydraulik"</i>	Reynoldssche Zahl	37
Leistung (physikalisch)	54	Rohrfeder-Druckschalter	292
Leitungseinbau	128	Rohrleitungen	254
<b>M</b>		Rohrströmungen	37
Manometer	286	Rohr- und Schlauchleitungen	254
Belastbarkeit von Manometern	290	Rohrverschraubungen	257
Differenzdruck-Manometer	287	Ruck	47
Digital-Manometer	294	Ruckbegrenzung	48
Manometer, elektronisch	<i>siehe "Druckanzeigen, digital"</i>	Rücklauffilter	278
Manometerwahlschalter	288	Rückschlagventile	172
Relativdruck-Manometer	286	Rückschlagventile, entsperrbar	175
Manometerwahlschalter	288	Rundbauart (von Hydrozylindern)	195
Maßeinheiten des Drucks	25	<b>S</b>	
Mechanische Grundlagen	46	Saugfilter	278
Membranspeicher	272	Schaltplan	298
Messanschlüsse	258	Schaltpläne der Hydraulik	297
Messblende	<i>siehe "Stromregelventil - Funktionsweise"</i>	Schaltschema	298
Messkupplung	<i>siehe "Messanschlüsse"</i>	Schaltsymbole	<i>siehe "Grafische Symbole"</i>
Minimess-Anschlüsse	<i>siehe "Messanschlüsse"</i>	Scheibenbauweise	130
Modulare Großaggregate	366	Schieberventile	127
Modulare Standardaggregate	364	Schlauchleitungen	254
		Schnellverschlusskupplungen	256

- Schrägachsenbauweise  
bei Axialkolbenmotoren 232  
bei Axialkolbenpumpen 94
- Schrägscheibenbauweise  
bei Axialkolbenmotoren 228  
bei Axialkolbenpumpen 89
- Schraubenspindelpumpen 106
- Sensoren zur Druckflüssigkeit-  
Temperaturmessung 296
- Sensoren zur Druckmessung  
*siehe "Druckmessumformer"*
- Servozyylinder 209
- Sitzventile 128
- Spann- und Antriebsmodule 369
- Speicher *siehe "Hydrospeicher"*
- Speicherabsperreblöcke 276
- Speicherladeventile 171
- Speicherschaltungen 353  
zur Bereitstellung von Volumenstrom 353  
zur Kompensation von Volumenausdehnung 357  
zur Stoß- und Schwingungsdämpfung 356
- Stabilisierungsmodule 356
- Standardaggregate 364
- Standard-Kleinaggregate 365
- Steuerblöcke 264
- Steuerungen  
mit Druckschalter 342  
mit Wegeventilen 300
- Steuerungen mit Ventilen 300
- Steuerung von Verbrauchern  
im Parallelbetrieb 348  
mit geringerem Arbeitsdruck 346
- Stromregelventile 185  
zur Gleichlaufsteuerung 351
- Stromteiler 352
- Strömung  
laminare Strömung 37  
turbulente Strömung 37
- Strömungsverluste in Hydraulikleitungen 39
- Symbole *siehe "Grafische Symbole"*
- Sytronix-Pumpenantriebe 372
- T**
- Tank *siehe "Behälter"*
- Teleskopzylinder 201
- Temperaturabhängigkeit der Druckflüssigkeit 40
- Temperaturmessung von Druckflüssigkeiten 296
- Trainingssysteme der Hydraulik (Lehraggregate) 374
- Turbulente Strömung 37
- Typbezeichnung von Hydroventilen 132
- U**
- Überdeckung bei Wegeventilen 146
- Ultraschall-Messverfahren zur  
Volumenstrommessung 296
- Umlaufventile 165
- V**
- Ventilbetätigung 130  
direktbetätigtes Ventil 130  
vorgesteuertes Ventil 130
- Ventile *siehe "Hydroventile"*
- Verbindungselemente  
für Rohre 256  
für Schläuche 256
- Verbindungstechniken 251  
Anforderungen 251  
Übersicht 251
- Verdrängermaschinen 64
- Verdrängerprinzip 61
- Verdrängung 61
- Versorgungssysteme (CytoPac, CytoBox) 366
- Viskosität  
dynamische Viskosität 31  
kinematische Viskosität 31
- Viskositätsindex 33
- Viskositätsklassen 33
- Viskosität von Flüssigkeiten 31
- Volumenstrommessung 295
- Volumenstrom-Messverfahren 295
- Vorspannventile 165
- W**
- Wechselventile 174
- Wegeventile 136  
Schaltverhalten 146  
Schaltzeit 143  
Steuerung mit Wegeventilen 300  
Überdeckung 146
- Wegübersetzung 28
- Widerstandszahl 38
- Wirkprinzipien der Hydrostatik 316
- Wirkprinzip "Vorgegebene Drehzahl" 335
- Wirkprinzip "Vorgegebene Druckdifferenz" 334
- Wirkprinzip "Vorgegebene Leistung" 338
- Wirkprinzip "Vorgegebener Druck" 329
- Wirkprinzip "Vorgegebener Volumenstrom" 322
- Wirkungsgrad 55
- Z**
- Zahnringmotoren - Gerotorprinzip 244
- Zahnringmotoren - Orbitprinzip 246
- Zahnringpumpen 104
- Zubehör 267
- Zugankerbauart (von Hydrozylindern) 195
- Zusammenhang zwischen hydraulischen  
und mechanischen Größen 57
- Zwischenplattenventile 129
- Zylinder *siehe "Hydrozylinder"*

**Bosch Rexroth AG**

Bosch Rexroth Academy  
Unterdürrbacher Straße 10  
97080 Würzburg, Deutschland  
Phone: +49 9352 18-1920  
E-Mail: [training@boschrexroth.de](mailto:training@boschrexroth.de)  
[www.boschrexroth.com/academy](http://www.boschrexroth.com/academy)

