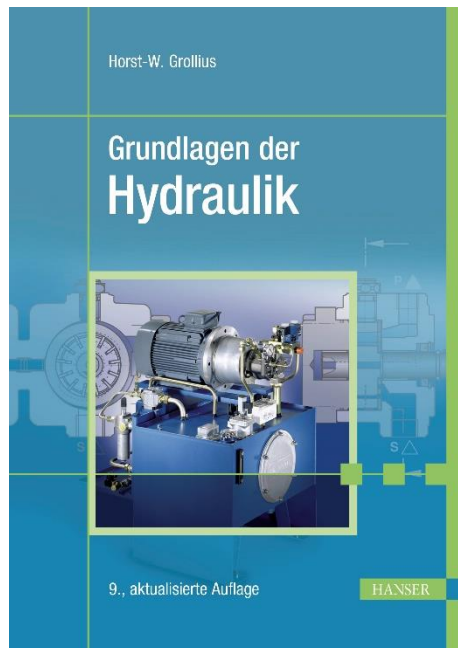


# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **Grundlagen der Hydraulik**

von Horst-W. Grollius

Print-ISBN 978-3-446-47401-7

E-Book-ISBN 978-3-446-47404-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446474017>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Zum Erhalt der Konkurrenzfähigkeit auf den Weltmärkten ist es für industrialisierte Gesellschaften unverzichtbar, den Automatisierungsgrad von Herstellungsabläufen ständig zu erhöhen, um Produkte in der nachgefragten Menge bei marktgerechten Preisen anbieten zu können. Trotz der damit verbundenen gesellschaftlichen Probleme (Freisetzung von Arbeitskräften, negative Einflüsse auf die Umwelt) besteht zum Zwang der Entwicklung immer effizienterer Technik keine Alternative, da nur die Nationen Mittel für die soziale Absicherung aufbringen können, die sich auf den globalen Märkten behaupten. Den in der Verantwortung stehenden Fachleuten stellen sich damit auch ethische und ökologische Fragen, die es zu beantworten gilt. Insofern sind die von *Albert Einstein* im Jahre 1931 geäußerten Worte weiterhin aktuell:

*„Die Sorge um den Menschen und ihr Schicksal muss stets Hauptinteresse allen technischen Strebens bilden, die großen ungelösten Fragen der Organisation der Arbeit und der Güterverteilung, damit die Erzeugnisse unseres Geistes dem Menschengeschlecht zum Segen gereichen und nicht zum Fluche. – Vergesst dies nie über Euren Zeichnungen und Gleichungen.“*

Zur Steigerung der Effizienz von Produktions- und Arbeitsabläufen ist Wissen und dessen Anwendung aus vielfältigen Technikdisziplinen erforderlich. Hierzu gehört auch die mit dem Oberbegriff **Fluidtechnik** bezeichnete Disziplin, die sich in **Hydraulik** und **Pneumatik** untergliedert.

Das vorliegende Buch verfolgt die Absicht, den Leser mit den **wesentlichen Grundlagen der Hydraulik** vertraut zu machen, wobei sein gestraffter Umfang der von Politik und Industrie gewünschten Reduzierung der Studienzeiten Rechnung trägt.

So wird beispielsweise im Kapitel 6 (Hydropumpen) zur Erläuterung der Wirkungsweise der in der Hydraulik verwendeten Bauarten von Hydropumpen lediglich auf das ihnen zugrunde liegende Prinzip eingegangen; auf eine umfassende Darlegung konstruktiver Details dieser Aggregate muss – um den Zweck des Buches zu erfüllen – verzichtet werden.

Den an Universitäten, Technischen Hochschulen, Fachhochschulen, Technikerschulen und Meisterschulen in der Ausbildung stehenden Studentinnen und Studenten bietet das Buch deshalb die Möglichkeit, sich ohne allzu großen zeitlichen Aufwand **Grundwissen** auf dem Gebiet der Hydraulik anzueignen.

Das Buch soll darüber hinaus aber auch denjenigen eine Hilfe sein, die als technisch Tätige in der beruflichen Praxis stehen und ihr Grundwissen auf dem Gebiet der Hydraulik in kurzer Zeit auffrischen möchten.

Zum Erwerb vertiefter Kenntnisse auf dem außergewöhnlich vielfältigen Gebiet der Hydraulik kann auf das Studium weiterführender Literatur nicht verzichtet werden.

In Kapitel 16 findet der Leser einige Aufgaben, die neben der Aufgabenstellung die ausführliche Darlegung des Lösungsweges in Lösungsschritten beinhalten,

wobei jeder Lösungsschritt kommentiert wird. Dadurch sollen Klarheit und leichtes Nachvollziehen der Lösungswege sichergestellt werden.

Neben dem Lernen aus Büchern bieten sich den Studentinnen und Studenten heutzutage durch die mediale Vielfalt weitere Möglichkeiten für den Erwerb von Wissen, wodurch leicht der Eindruck entstehen könnte, dass der Wissenserwerb heute weniger Mühe macht als früher. Doch zur „Kultur der Anstrengung“ besteht keine Alternative: Mit Selbstdisziplinierung sind Erkenntnisblockaden zu beseitigen und Verständnisprobleme zu meistern, um so die Genugtuung der den Widerständen abgerungenen eigenen Leistung zu erfahren.

Möge die Beschäftigung mit diesem Buch nicht nur Mühe bereiten, sondern den Leser nach dem Einstieg in die grundlegenden Zusammenhänge der Hydraulik auch motiviert haben, sich noch tiefer in dieses faszinierende und volkswirtschaftlich bedeutsame Gebiet der Technik mit weiterführender Literatur einzuarbeiten.

Der Verfasser dankt Frau *Ute Eckardt*, Frau *Katrin Wulst* und Herrn *Jochen Horn* vom Fachbuchverlag Leipzig (im Carl Hanser Verlag) für die vielen nützlichen Hinweise zur Gestaltung des Buches und die jederzeit gute Zusammenarbeit.

Weiterhin ist zu danken der Firma Technobox (Bochum), deren Software CAD6 zur Erstellung von Bildern gedient hat und allen Firmen der Hydraulikindustrie, die Bilder und Diagramme für dieses Buch bereitwillig zur Verfügung gestellt haben. Diese Firmen werden an geeigneter Stelle namentlich genannt.

Köln, im Februar 2019

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	11
<b>2</b>	<b>Physikalisches Basiswissen</b>	12
2.1	Druck, Absolutdruck, Überdruck, Einheiten	12
2.2	Gesetz von Pascal	14
2.3	Schweredruck	16
2.4	Kraft- und Wegübersetzung	17
2.5	Druckübersetzung	18
2.6	Hydraulische Arbeit, Leistung, Wirkungsgrade	19
2.7	Kontinuitätsgleichung	21
2.8	Bernoulli-Gleichung	22
2.9	Strömungsformen	23
2.10	Viskosität	25
2.11	Druckverluste in Rohren, Formstücken und Ventilen	26
2.12	Strömung durch Drosselgeräte – Volumenstrommessung	33
2.13	Spaltströmungen	35
2.14	Hydraulische Widerstände	39
2.15	Kompressibilität und Kompressionsmodul	42
2.16	Kavitation	45
<b>3</b>	<b>Genormte Symbole</b>	47
<b>4</b>	<b>Grundsätzlicher Aufbau eines Hydrosystems</b>	60
<b>5</b>	<b>Einfache Schaltpläne</b>	62
<b>6</b>	<b>Hydropumpen</b>	67
6.1	Allgemeines	67
6.2	Verdrängungsvolumen, theoretischer Förderstrom	68
6.3	Theoretische Pumpenleistung, theoretisches Pumpenmoment	69
6.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	69
6.5	Hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad, Pumpenleistung	71
6.6	Gesamtwirkungsgrad	71
6.7	Anordnung von Hydropumpen	72
6.8	Bauarten von Hydropumpen	75
6.8.1	Vorbemerkung	75
6.8.2	Zahnradpumpen	76
6.8.3	Flügelzellenpumpen	78
6.8.4	Schraubenspindelpumpen	80
6.8.5	Radialkolbenpumpen	81
6.8.6	Axialkolbenpumpen	84
6.9	Kennlinien/Kennfelder	89
<b>7</b>	<b>Hydromotoren</b>	95
7.1	Allgemeines	95
7.2	Verdrängungsvolumen, theoretischer Schluckstrom	96

7.3	Theoretische Motorleistung, theoretisches Motormoment .....	97
7.4	Volumetrischer Wirkungsgrad .....	97
7.5	Hydraulisch-mechanischer Wirkungsgrad, Motorleistung .....	98
7.6	Gesamtwirkungsgrad .....	99
7.7	Kennlinien/Kennfelder .....	99
<b>8</b>	<b>Hydrozylinder</b> .....	<b>102</b>
8.1	Bauarten .....	103
8.1.1	Doppeltwirkende Zylinder .....	103
8.1.1.1	Differenzialzylinder .....	104
8.1.1.2	Gleichgangzylinder .....	106
8.1.2	Einfachwirkende Zylinder .....	107
8.1.3	Teleskopzylinder .....	107
8.1.3.1	Einfache Teleskopzylinder .....	107
8.1.3.2	Gleichlauf-Teleskopzylinder .....	109
8.2	Endlagendämpfung .....	110
8.3	Befestigungsarten .....	111
8.4	Knicksicherheit, wichtige Durchmesser .....	111
8.5	Kolbenstangenkraft .....	116
<b>9</b>	<b>Schwenkmotoren</b> .....	<b>118</b>
<b>10</b>	<b>Hydroventile</b> .....	<b>123</b>
10.1	Wegeventile .....	123
10.2	Sperrventile .....	130
10.2.1	Einfache Rückschlagventile .....	130
10.2.2	Entsperrbare Rückschlagventile .....	131
10.2.3	Drosselrückschlagventile .....	134
10.2.4	Wechselventile .....	135
10.2.5	Rohrbruchsicherungen .....	136
10.3	Druckventile .....	136
10.3.1	Druckbegrenzungsventile .....	137
10.3.2	Druckminderventile .....	139
10.3.3	Druckverhältnisventile .....	141
10.3.4	Differenzdruckregelventile .....	142
10.3.5	Verhältnisdrukregelventile .....	143
10.3.6	Folgeventile .....	144
10.4	Stromventile .....	144
10.4.1	Drosselventile .....	145
10.4.1.1	Konstantdrosselventile .....	145
10.4.1.2	Verstelldrosselventile .....	145
10.4.2	Stromregelventile .....	145
10.4.2.1	2-Wege-Stromregelventile .....	146
10.4.2.2	3-Wege-Stromregelventile .....	147
10.4.3	Stromteilventile .....	149
<b>11</b>	<b>Servoventile</b> .....	<b>151</b>

---

<b>12 Weitere Schaltplanbeispiele.....</b>	<b>155</b>
<b>13 Hydrauliköle .....</b>	<b>160</b>
13.1 Eigenschaften .....	160
13.1.1 Viskosität .....	162
13.1.2 Kompressibilität .....	165
13.1.3 Schmier- und Verschleißschutzvermögen .....	166
13.1.4 Schutz vor Korrosion .....	166
13.1.5 Flammpunkt und Brennpunkt .....	166
13.1.6 Stockpunkt und Pourpoint .....	167
13.1.7 Schaumbildung .....	167
13.1.8 Spezifische Wärmekapazität .....	167
13.2 Arten .....	168
<b>14 Zubehörteile .....</b>	<b>175</b>
<b>15 Hinweise zur Projektierung von Hydrosystemen .....</b>	<b>177</b>
<b>16 Aufgaben .....</b>	<b>178</b>
<b>Quellen und weiterführende Literatur .....</b>	<b>217</b>
<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>222</b>

# 1 Einleitung

Hydraulik und Pneumatik sind Teilgebiete der mit dem Begriff **Fluidtechnik** bezeichneten Wissenschaft. Die in der Hydraulik zur Energieübertragung verwendeten Fluide sind Flüssigkeiten; das zur Energieübertragung in der Pneumatik verwendete Fluid ist ein Gas, nämlich Luft.

In den Anfängen der Hydraulik, die einige Jahrhunderte zurückliegen, verwendete man Wasser (griechisch: Hydor) als Fluid zur Energieübertragung. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts benutzt man als Energieträger Öle, die auch gleichzeitig Schmier- und Korrosionsschutz bieten. Neuerdings wird in Einzelfällen aus Gründen des Umweltschutzes und der Kosten auch wieder Wasser als Fluid zur Energieübertragung verwendet. Man spricht in diesem Fall von „Wasserhydraulik“.

Das vorliegende Buch befasst sich ausschließlich mit **ölbetriebenen Hydrosystemen** (Ölhydraulik). Die Ölhydraulik beinhaltet somit die Energieübertragung durch Öl zum Betrieb von Maschinen und Anlagen, wobei insbesondere Mineralöle verwendet werden.

Die Ölhydraulik unterteilt sich in die Gebiete der hydrodynamischen und der hydrostatischen Energieübertragung.

Bei der **hydrodynamischen Energieübertragung** wird von einem Pumpenrad mechanische Energie auf das Öl übertragen und als Strömungsenergie zum Antrieb eines Turbinenrades verwendet. Man spricht in diesem Fall von einem **hydrodynamischen Antrieb**. Beispiele für Anlagen, bei denen eine hydrodynamische Energieübertragung stattfindet, sind z.B. Föttinger-Wandler und Flüssigkeitskupplungen.

Bei der **hydrostatischen Energieübertragung** erzeugt eine mechanisch angetriebene Pumpe (Hydropumpe) einen vorwiegend druckbeladenen Volumenstrom (Förderstrom), der zu einem Hydroverbraucher (Hydrozylinder oder Hydro-motor) geleitet wird. Darin wird die im Förderstrom enthaltene Druckenergie wieder in mechanische Energie umgewandelt. Man spricht in diesem Fall von einem **hydrostatischen Antrieb**.

Die kinetische Energie ist in Anlagen mit hydrostatischer Energieübertragung gegenüber der Druckenergie vernachlässigbar klein. Umgekehrt kann bei hydrodynamischer Energieübertragung die im Förderstrom enthaltene Druckenergie meist vernachlässigt werden.

Im Maschinenbau haben die hydrostatischen Antriebe eine wesentlich größere Bedeutung als die hydrodynamischen Antriebe. Die hydrostatischen Antriebe sind deshalb alleiniger Gegenstand der Behandlung in diesem Buch und werden hier mit ölhydraulischen Antrieben oder einfach mit hydraulischen Antrieben bezeichnet. Anstelle des Begriffes hydraulischer Antrieb werden gleichbedeutend auch die Begriffe hydraulische Anlage, hydraulisches System oder **Hydro-system** verwendet.

## 2 Physikalisches Basiswissen

### 2.1 Druck, Absolutdruck, Überdruck, Einheiten

Zur Erläuterung des Druckbegriffes wird ein aus der Flüssigkeit eines Behälters heraus geschnittenes Volumen nach der im Bild 2.1 dargestellten Situation betrachtet.

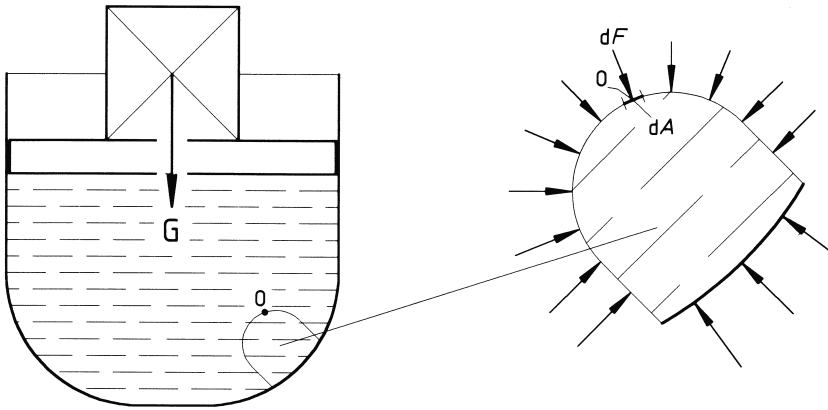


Bild 2.1: Zur Erläuterung des Druckbegriffes

Mit 0 wird ein Punkt der Flüssigkeit gekennzeichnet, der auch gleichzeitig ein auf der Berandungsfläche des herausgeschnittenen Flüssigkeitsvolumens liegender Punkt ist. An dem am Punkt 0 vorliegenden Flächenelement  $dA$  greift die Druckkraft  $dF$  senkrecht an (Normalkraft). Der Quotient

$$p = \frac{dF}{dA} \quad (2.1)$$

ist die **Druckspannung**, die auch kurz **Druck** genannt wird.

Die Größe des Druckes am Punkt 0 ist unabhängig von der Lage der durch den Punkt 0 gelegten Schnittebene. Der Druck  $p$  ist also **richtungsunabhängig** und damit eine **skalare** physikalische Größe, die nur vom Ort in der Flüssigkeit abhängig ist.

Die Maßeinheit (kurz: Einheit) des Druckes wird unter Verwendung der Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI-Maßsystem) Kilogramm (Einheitenzeichen: kg), Meter (Einheitenzeichen: m) und Sekunde (Einheitenzeichen: s) mit **Pascal** (Einheitenzeichen: Pa) festgelegt:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} / \text{m}^2 = 1 \text{ N/m}^2. \quad (2.2)$$



Da die Einheit Pascal zu hohe Zahlenwerte ergibt, wird in der Praxis häufig die Einheit **Bar** (Einheitenzeichen: bar) verwendet:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2. \quad (2.3)$$

Kleine Drücke werden in **Millibar** (Einheitenzeichen: mbar) oder in **Hektopascal** (Einheitenzeichen: hPa = 100 Pa) angegeben:

$$1 \text{ mbar} = 0,001 \text{ bar} = 1 \text{ hPa}. \quad (2.4)$$

In den angelsächsischen Ländern wird oft noch die Einheit **Psi** (Einheitenzeichen: psi) verwendet:

$$1 \text{ bar} = 14,5 \text{ psi}. \quad (2.5)$$

Zur Erläuterung der Begriffe **Absolutdruck** und **Überdruck** dienen die Skalen in Bild 2.2.

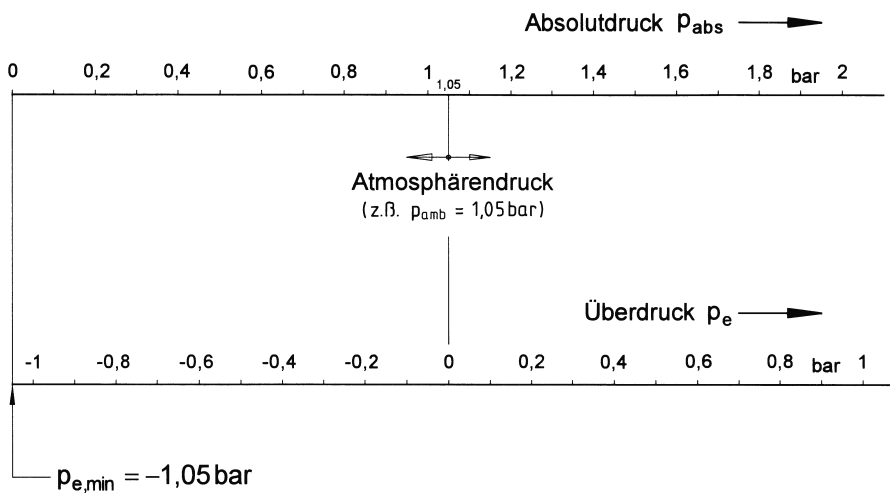


Bild 2.2: Absolutdruck- und Überdruckskala

Die **Absolutdruckskala** (obere Skala in Bild 2.2) beginnt mit  $p_{\text{abs}} = 0$ , da der Absolutdruck der Druck gegenüber dem Druck Null des leeren Raumes ist. Die Differenz zwischen einem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$  und dem aktuell vorliegenden (absoluten) Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  ist die atmosphärische Druckdifferenz

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}}, \quad (2.6)$$

die in der Technik als **Überdruck** bezeichnet wird.

Ist der Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$  größer als der Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$ , nimmt der Überdruck positive Werte an:

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} > 0. \quad (2.7)$$

Bei einem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$ , der kleiner als der Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  ist, erhält man für den Überdruck einen negativen Wert:

$$p_e = p_{\text{abs}} - p_{\text{amb}} < 0. \quad (2.8)$$

Der Begriff **Unterdruck**, früher definiert durch die Druckdifferenz  $p_{\text{amb}} - p_{\text{abs}}$  bei einem Absolutdruck, der kleiner als der Atmosphärendruck ist, wird nicht mehr verwendet. Der Unterdruckbereich wird nach Gl. (2.8) durch negative Werte des Überdruckes gekennzeichnet (Unterdruck wird ersetzt durch den Begriff negativer Überdruck).

Der Minimalwert  $p_{e,\text{min}}$  der negativen Überdruckskala (untere Skala in Bild 2.2) wird durch den aktuell vorliegenden Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  festgelegt. Liegt beispielsweise ein Atmosphärendruck von  $p_{\text{amb}} = 1,05 \text{ bar}$  vor, gilt für den Minimalwert des negativen Überdruckes ( $p_{\text{abs}} = 0 \text{ bar}$ , leerer Raum):

$$p_{e,\text{min}} = 0 \text{ bar} - 1,05 \text{ bar} = -1,05 \text{ bar}. \quad (2.9)$$

Das Beispiel zeigt, dass die untere Grenze der negativen Überdruckskala durch den Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$  bestimmt wird.

In der Hydraulik wird meist nicht mit dem Absolutdruck  $p_{\text{abs}}$ , sondern mit dem Überdruck  $p_e$  gearbeitet.

Hinweis: Oft werden die Indizes „abs“ und „e“ zur eindeutigen Kennzeichnung von Absolut- und Überdrücken weggelassen. Für den jeweils vorliegenden Fall ist aus dem Zusammenhang herauszufinden, ob es sich bei der Angabe von Drücken um Absolutdrücke oder Überdrücke handelt.

## 2.2 Gesetz von Pascal

Das Gesetz von Pascal bildet das **Grundgesetz der Hydrostatik** und gilt für inkompressible und nicht der Schwerkraft unterworfenen Flüssigkeiten. Es besagt Folgendes:

Wird auf eine sich in einem Behälter befindende Flüssigkeit an irgendeiner Stelle ein Druck ausgeübt (z. B. durch einen mit einer Kraft belasteten Kolben), so herrscht überall an der Innenwand des Behälters und im Innern der Flüssigkeit der gleiche Druck.

Zur Verdeutlichung des Gesetzes von Pascal dient Bild 2.3.

Bei der Bewegung des oberen Kolbens um den Weg  $s_K$  nach unten wird das Flüssigkeitsvolumen  $V_K = A_K \cdot s_K$  verdrängt, das in den beiden seitlichen Kammern, die durch **reibungsfrei** geführte Kolben **leckfrei** abgedichtet sind, Platz findet. Es ist

$$V_K = V_1 + V_2 = s_1 \cdot A_1 + s_2 \cdot A_2. \quad (2.10)$$

Bei der Verschiebung der seitlichen Kolben werden die rückwärtig angeordneten Druckfedern zusammengedrückt, sodass die Federkräfte  $F_1$ ,  $F_2$  über die

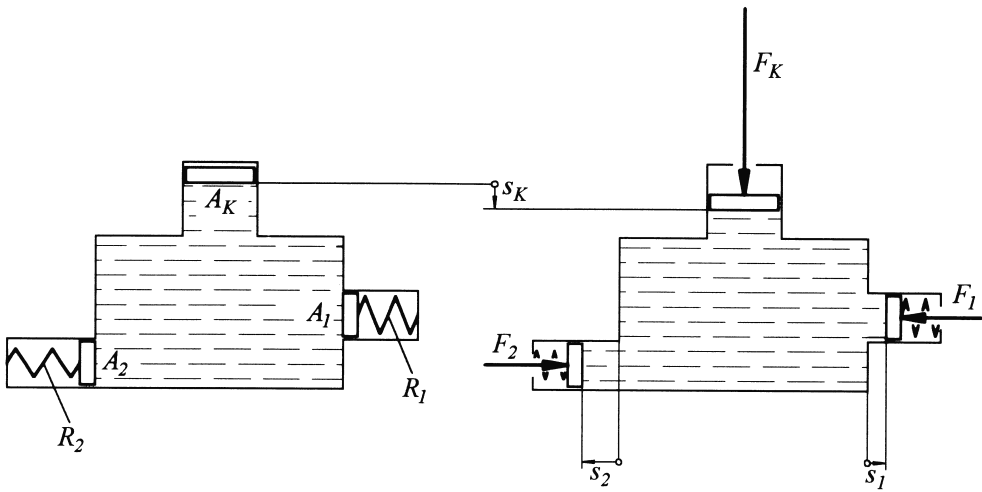


Bild 2.3: Zum Gesetz von Pascal

Kolben auf die Flüssigkeit wirken. Der von dem rechten Kolben auf die Flüssigkeit ausgeübte Druck ist

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1}. \quad (2.11)$$

Der von dem linken Kolben auf die Flüssigkeit ausgeübte Druck ist

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2}. \quad (2.12)$$

Sind die **Federwege**  $s_1, s_2$ , die **Federraten** der Druckfedern  $R_1, R_2$  und die Kolbenflächen  $A_1, A_2$  bekannt, lassen sich nach den Gln. (2.11) und (2.12) mit  $F_1 = s_1 \cdot R_1$  und  $F_2 = s_2 \cdot R_2$  die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  berechnen. Man findet

$$p_1 = p_2, \quad (2.13)$$

womit das **Gesetz von Pascal** bestätigt wird.

Für den in der Behälterflüssigkeit herrschenden Druck, allgemein mit  $p$  bezeichnet, gilt

$$p = p_1 = p_2 = p_K. \quad (2.14)$$

Die Kraft  $F_K$ , die auf den oberen Kolben in seiner Endlage wirkt, ist daher

$$F_K = p_K \cdot A_K. \quad (2.15)$$

## 2.3 Schweredruck

Das Gesetz von Pascal gilt unter der Annahme, dass die Schwerkraft keinen Einfluss auf die Flüssigkeit im Behälter ausübt: die Flüssigkeit wird also als **gewichtslos** betrachtet. In Wirklichkeit unterliegt die Flüssigkeit jedoch der Schwerkraft und neben dem durch äußere Kräfte erzeugten Druck ist noch der durch die Schwerkraft hervorgerufene Druck, der so genannte **Schweredruck** vorhanden. Bild 2.4 zeigt einen mit einer Flüssigkeit gefüllten, oben offenen Behälter. Auf dem Flüssigkeitsspiegel wirkt der Atmosphärendruck  $p_{\text{amb}}$ . Das Diagramm neben dem Behälter gibt den Druckverlauf in der Flüssigkeit über der Höhenkoordinate  $h$  wieder.

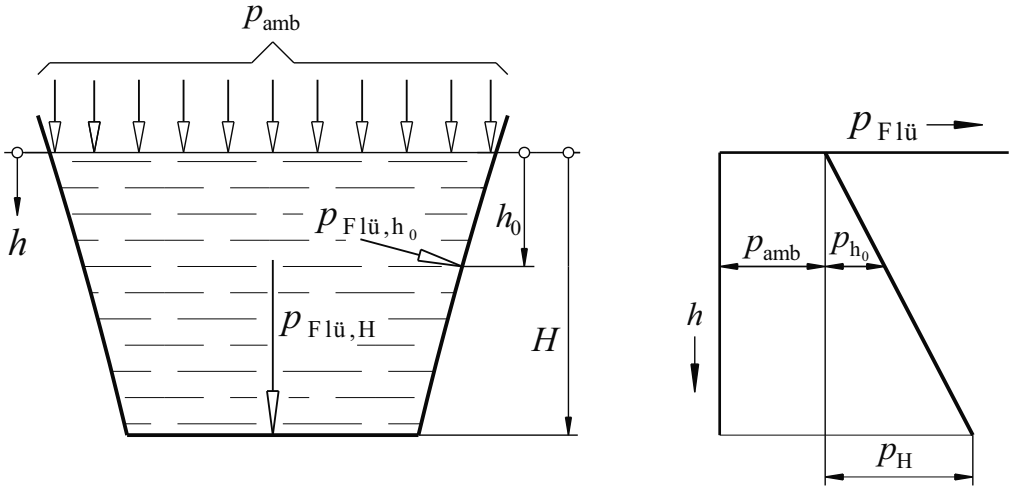


Bild 2.4: Zum Schweredruck in einer Flüssigkeit

Der allein von der Schwerkraft in der Flüssigkeit erzeugte **Druck** ist gegeben durch

$$p_h = \varrho \cdot g \cdot h. \quad (2.16)$$

Für den Druck in der Flüssigkeit des Behälters nach Bild 2.4 gilt in der Tiefe  $h = h_0$  unter Berücksichtigung des Atmosphärendruckes  $p_{\text{amb}}$

$$p_{\text{Flü},h_0} = p_{\text{amb}} + p_{h_0} = p_{\text{amb}} + \varrho \cdot g \cdot h_0. \quad (2.17)$$

Am Behälterboden mit  $h = H$  herrscht der Druck

$$p_{\text{Flü},H} = p_{\text{amb}} + p_H = p_{\text{amb}} + \varrho \cdot g \cdot H. \quad (2.18)$$

Hinweis: Bei der Auslegung von hydraulischen Systemen ist zu prüfen, ob der Schweredruck gegenüber den im System auftretenden Drücken (**Systemdrücken**) eine beachtenswerte Größe annimmt. Meist findet der Schweredruck keine Berücksichtigung, da er oft klein gegenüber den Systemdrücken ist.

## 2.4 Kraft- und Wegübersetzung

Das Prinzip der Kraft- und Wegübersetzung lässt sich am besten am Beispiel der **hydraulischen Presse** nach Bild 2.5 erläutern. Der Einfluss des Schweredruckes bleibt unberücksichtigt; die Kolben der Presse werden **reibungsfrei** geführt und dichten **leckfrei** ab.

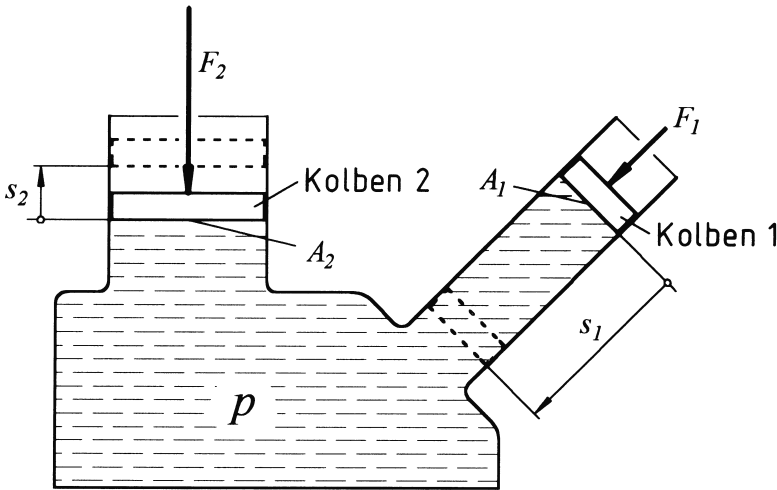


Bild 2.5: Hydraulische Presse – Prinzip

Der von der Kraft  $F_1$  erzeugte **Druck**

$$p = \frac{F_1}{A_1} \quad (2.19)$$

herrscht nach dem Gesetz von Pascal an allen Stellen der Flüssigkeit, somit auch an der Fläche  $A_2$  ( $A_2 > A_1$ ). Mit

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2.20)$$

wird

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1}. \quad (2.21)$$

Mit Gl. (2.21) lässt sich das Prinzip der **Kraftübersetzung** verdeutlichen: Ist beispielsweise die Fläche  $A_2$  um das Zehnfache größer als die Fläche  $A_1$  ( $A_2 = 10 \cdot A_1$ ), so wird die Kraft  $F_1$  um das Zehnfache ihres Wertes übersetzt. Es ist  $F_2 = 10 \cdot F_1$ .

Bei der Bewegung des Kolbens 1 um den Weg  $s_1$  nach unten wird das Volumen  $V_1 = A_1 \cdot s_1$  verdrängt, wodurch der Kolben 2 um den Weg  $s_2$  nach oben bewegt wird.

Mit

$$V_1 = A_1 \cdot s_1 = V_2 = A_2 \cdot s_2. \quad (2.22)$$

ergibt sich

$$s_2 = s_1 \frac{A_1}{A_2}. \quad (2.23)$$

Mit Gl. (2.23) lässt sich das Prinzip der **Wegübersetzung** verdeutlichen: Ist wie beim Beispiel zur Kraftübersetzung die Fläche  $A_2$  um das Zehnfache größer als die Fläche  $A_1$  ( $A_2 = 10 \cdot A_1$ ), so wird

$$s_2 = s_1 \frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{10} s_1. \quad (2.24)$$

Der Weg  $s_2$ , den der Kolben 2 zurücklegt, ist bei diesem Beispiel also nur ein Zehntel des vom Kolben 1 zurückgelegten Weges  $s_1$ .

## 2.5 Druckübersetzung

Das Prinzip der **Druckübersetzung** wird durch Bild 2.6 verdeutlicht.

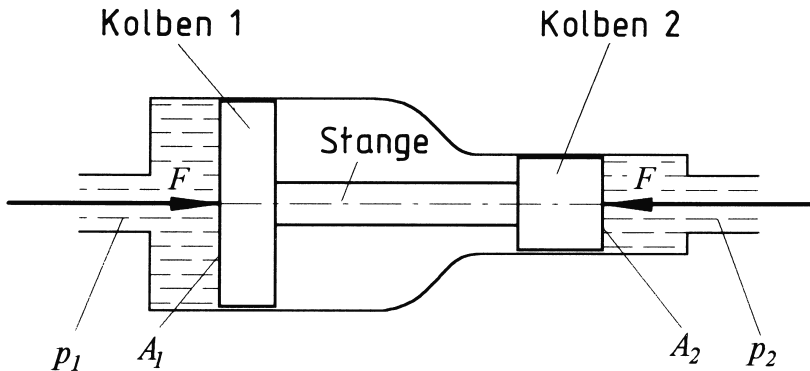


Bild 2.6: Zur Druckübersetzung

Die beiden reibungsfrei geführten und leckfrei abdichtenden Kolben mit den Kolbenflächen  $A_1$  und  $A_2$  sind durch eine Stange fest miteinander verbunden. Herrscht an der Kolbenfläche  $A_1$  der Druck  $p_1$ , wirkt daran die Kraft  $F = p_1 \cdot A_1$ , die über die Stange auch an der Kolbenfläche  $A_2$  wirksam ist. Der Druck an der Kolbenfläche  $A_2$  ist  $p_2 = F/A_2$ .

Mit

$$F = p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2 \quad (2.25)$$

wird

$$p_2 = p_1 \frac{A_1}{A_2}. \quad (2.26)$$

Ist beispielsweise die Fläche  $A_1$  doppelt so groß wie die Fläche  $A_2$  ( $A_1 = 2 \cdot A_2$ ), so wird der Druck  $p_1$  auf das Doppelte seines Wertes übersetzt:  $p_2 = 2 \cdot p_1$ .

## 2.6 Hydraulische Arbeit, Leistung, Wirkungsgrade

Wird bei der hydraulischen Presse nach Bild 2.5 der Kolben 1 (Kolbenfläche  $A_1$ ) mit der Kraft  $F_1$  um den Weg  $s_1$  nach unten bewegt, so ist die dabei verrichtete **hydraulische Arbeit**

$$W_1 = F_1 \cdot s_1 = p_1 \cdot A_1 \cdot s_1. \quad (2.27)$$

Die bei diesem Vorgang am Kolben 2 (Kolbenfläche  $A_2$ ) verrichtete hydraulische Arbeit ist

$$W_2 = F_2 \cdot s_2 = p_2 \cdot A_2 \cdot s_2. \quad (2.28)$$

Mit  $V_1 = A_1 \cdot s_1$  und  $V_2 = A_2 \cdot s_2$  erhält man

$$W_1 = p_1 \cdot V_1 \quad \text{und} \quad W_2 = p_2 \cdot V_2. \quad (2.29), (2.30)$$

Wird für die Bewegung des Kolbens 1 um den Weg  $s_1$  die Zeit  $t_1$  benötigt, ist die **hydraulische Leistung**

$$P_1 = \frac{W_1}{t_1} = \frac{p_1 \cdot V_1}{t_1}. \quad (2.31)$$

Mit dem **Volumenstrom**  $Q_1 = V_1/t_1$  wird daraus

$$P_1 = p_1 \cdot Q_1. \quad (2.32)$$

Analog gilt für den Kolben 2 in Bild 2.5 für die hydraulische Leistung

$$P_2 = p_2 \cdot Q_2. \quad (2.33)$$

Die **hydraulische Leistung** ist hier also das Produkt aus Druck und Volumenstrom.

Für den **Gesamtwirkungsgrad** einer Hydropumpe und eines Hydromotors gilt

$$\eta_t = \eta_v \cdot \eta_{hm}. \quad (2.34)$$

**Hinweis:** Auf Hydropumpen und Hydromotoren wird in den Kapiteln 6 und 7 noch eingegangen. Auch werden dort die den Wirkungsgraden zugrunde liegenden Definitionen noch ausführlich erläutert.

In Gl. (2.34) ist  $\eta_v$  der **volumetrische Wirkungsgrad**. Er berücksichtigt die so genannten volumetrischen Verluste, die sich aufgrund von Leckströmen ergeben. Der hydraulisch-mechanische Wirkungsgrad  $\eta_{hm}$  ist ein Maß für Verluste, die sich durch **Strömungsverluste** und aufeinander gleitende Maschinenteile (Reibung) ergeben.

Bild 2.7 soll den Begriff des **Gesamtwirkungsgrades**  $\eta_t$  veranschaulichen.

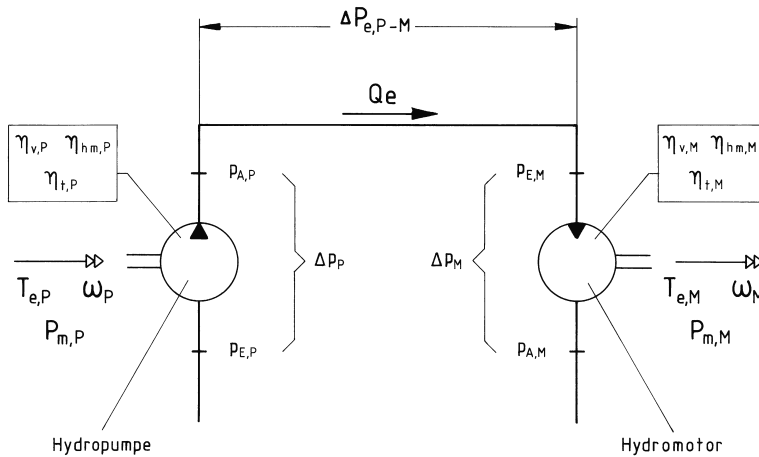


Bild 2.7: Zur Veranschaulichung des Begriffes Gesamtwirkungsgrad

Die **Wellenleistung** (mechanische Eingangsleistung) an der Hydropumpe (Index P) ist  $P_{m,P} = T_{e,P} \cdot \omega_P$ . Diese wird zum überwiegenden Teil in die hydraulische Leistung  $P_{e,P} = \Delta p_P \cdot Q_e$  umgewandelt (ein geringer Teil der Wellenleistung wird zur Deckung der in der Hydropumpe auftretenden volumetrischen Verluste und der Strömungs- und Reibungsverluste benötigt).

Der **Gesamtwirkungsgrad** der Hydropumpe ist somit

$$\eta_{t,P} = \frac{P_{e,P}}{P_{m,P}} = \frac{\Delta p_P \cdot Q_e}{T_{e,P} \cdot \omega_P} = \frac{(p_{A,P} - p_{E,P}) Q_e}{T_{e,P} \cdot \omega_P}. \quad (2.35)$$

Die dem Hydromotor (Index M) zur Verfügung stehende hydraulische Leistung  $P_{e,M}$  ist wegen des zwischen Hydropumpe und Hydromotor auftretenden Leistungsverlustes  $\Delta P_{e,P-M}$  kleiner als die am Austritt der Hydropumpe vorhandene hydraulische Leistung  $P_{e,P}$ . Es ist

$$P_{e,M} = P_{e,P} - \Delta P_{e,P-M}. \quad (2.36)$$



# Sachwortverzeichnis

- Absolutdruck 13
- Abtriebsleistung, mechanische 98
- Abtriebsmoment, mechanisches 98
- Additive 162
- Alterungsbeständigkeit 168
- Anschlussplatten 175
- Antriebsleistung, mechanische 71
- Antriebsmoment, mechanisches 71
- Arbeit, hydraulische 19
- Atmosphärendruck 13
- Außenzahnradpumpe 76
- Axialkolben-Konstantmotor 100
- Axialkolbenpumpen 84
  
- Bauarten von Hydropumpen 75
- Befestigungsarten 111
- Betätigungseinrichtungen 49
- Blende 33
- Brennpunkt 166
  
- Dampfblasen-Kavitation 45
- Differenzdruckmessung 35
- Differenzdruckregelventile 142
- Differenzialzylinder 103, 104
- Drosselrückschlagventile 134
- Drosselventile 145
- Druck 12
- Druckbegrenzungsventile 137
- Druckdifferenz, atmosphärische 13
- Druckflüssigkeiten, schwer entflammare 168
- Druckform 22
- Druckmessgeräte 175
- Druckminderventile 139
- Druckreduzierventile 139
- Druckregelventile 139
- Druckübersetzung 18
- Druckventile 136
- Druckverhältnisventile 141
- Druckverlust 28, 30
- Durchflusskoeffizient 35
- Durchflusszahl 35
- Durchmesser, hydraulischer 30
- Düse 33
  
- Einspannung, hydraulische 133
- Endlagendämpfung 104, 106, 111
- Energie, hydrostatische 67
- Energieform 22
- Energiesteuerung 53
- Energieumformung 52
- Englergrade 162
- Entlüftungsventile 175
- Ersatzdurchmesser 30
- Eulersche Knickkraft-Gleichung 113
- Exzentrizität 79, 82
  
- Flammpunkt 166
- Flügelzellenpumpe, direkt gesteuerte 80
- Flügelzellenpumpen 78
- Folgeventile 144
- Förderstrom, effektiver 69
- , theoretischer 69
- Formstücke 30
- Fressverschleiß 166
- Füllungsverluste 70
- Funktionselemente 48
  
- Gesamtdruckverlust 41
- Gesamtenergie 22
- Gesamtvolumenstrom 41
- Gesamtwiderstand 41
- Gesamtwirkungsgrad 19, 20, 71, 99
- Geschwindigkeit, kritische 25
- Gesetz von Pascal 14
- Gleichgangzylinder 103, 106
- Gleichlaufzylinder 103
- Gleichlauf-Teleskopzylinder 109
- Graetzschaltung 156
- Grundgesetz der Hydrostatik 14
- Grundsymbole 47
  
- Haftvermögen 166
- Hintereinanderschaltung 40
- Höhenform 22
- Hub-Schwenkeinheit 120
- Hubfunktion 120
- Hubverdrängermaschinen 75
- Hubvolumen 68
- Hydrauliköle 160, 169
- Hydromotoren 95
- Hydropumpen 67
- Hydroventile 123
- Hydrozylinder 102

- Implosion 46  
Inhibitoren 166  
Innenzahnradpumpe 78  
  
Kavitation 45  
Kavitationserosion 46  
Kavitationslärm 46  
Kennlinien/Kennfelder 89, 99  
Kennlinienfelder 77  
Knickkraft 114  
Knicksicherheit 113, 114  
–, erforderliche 115  
Kolbenhub 85  
Kolbenstangenkraft 116  
Kompressibilität 42, 165  
Kompressibilitätskoeffizient, isothermer 43  
Kompressionsmodul, mittlerer 43  
–, wahrer 43  
Kompressionsverlust 70  
Kompressionsvolumen 43  
Konstantdrosselventile 145  
Konstantpumpen 68, 76, 78  
Kontinuitätsgleichung 21  
Korrekturfaktor 30  
Korrosionsschutz-Inhibitoren 166  
Kraft- und Wegübersetzung 17  
Kraftübersetzung 17  
Kugelsitzventil 132  
  
Längsschieberventile 127  
Lastwiderstand 61  
Leckstrom 35  
–, äußerer 70  
–, innerer 70  
Leistung, hydraulische 19  
Leitungen 49  
Leitungsbruchsicherungen 136  
Leitungsverbindungen 49  
Linearmotoren 102  
Load Sensing-Regler 92  
Luftblasen-Kavitation 45, 167  
  
Massenströme 21  
Mitschleppstrom 38  
Motorleistung 98  
–, theoretische 97  
Motormoment 98  
Motormoment, theoretisches 97  
  
Nullüberdeckung 129  
  
Öffnungsdruckverhältnis 133  
  
Parallelschaltung 41  
Pourpoint 162, 167  
Presse, hydraulische 17  
Primärsteuerung 158  
Projektierung von Hydrosystemen 177  
Proportionalmagnet 151  
Proportionalventile 123, 151  
Pumpe, selbstansaugende 72  
Pumpenleistung, theoretische 69  
Pumpenmoment 71  
–, theoretisches 69  
Pumpenumlauf 127  
  
Radialkolben-Konstantmotor 99  
Radialkolbenpumpe, außenbeaufschlagte 83  
Radialkolbenpumpen 81  
Reibungsgesetz, newtonsches 25  
Reihenschaltung 40  
Reynolds-Zahl 24  
–, kritische 24  
Rohrbruchsicherungen 136  
Rohrleitungen 175  
Rohrreibungszahl 27  
Rückschlagventil, federbelastetes 155  
Rückschlagventile, einfache 130  
–, entspernbare 131  
  
Schaltplanbeispiele 155  
Schaltpläne 62  
Schaltüberdeckung 129  
Schaltverhalten 129  
Schaumbildung 167  
Schlauchkupplungen 175  
Schlauchleitungen 175  
Schleppstrom 37, 38  
Schluckstrom, theoretischer 96  
Schluckstrom, effektiver 97  
–, theoretischer 96  
Schluckvolumen 96  
Schmierfilm 160, 166  
Schrägachsenpumpen 84, 87  
Schrägscheibenpumpen 84  
Schraubenspindelpumpen 80  
Schwenkfunktion 120  
Schwenkmotoren 118, 120  
Schweredruck 16  
Sekantenkompressionsmodul 43  
Sekundärsteuerung 158, 159

- Selbstzündung 46  
Servoventile 123, 151  
Sicherheitsventile 137  
Spaltformel 36  
Spaltstrom 37  
Speicherung 52  
Sperrrichtung 131  
Sperrventile 130  
Spieldausgleich, hydrostatischer 78  
Steilgewinde-Schwenkmotor 119  
Stetigventile 151  
Steuerkanten 129  
Stockpunkt 162, 167  
Stromlinien 23  
Stromregelventile 145, 156  
Stromteilventile 149  
Strömung, laminare 23  
Strömung, turbulente 24  
Strömungsverluste 20  
Stromventile 144  
Symbole, genormte 47
- Taumelscheibenpumpen 84  
Teleskopzylinder 107  
Torquemotor 153
- Überdruck 13  
Umlaufverdrängermaschinen 75  
Unterdruck 14  
Unterschicht, laminare 24
- Ventilkennlinien 32  
Venturirohr 33  
Verdrängermaschinen 67  
Verdrängerprinzip 95  
Verdrängungsräume 68  
Verdrängungsvolumen 68  
–, geometrisches 68, 82  
–, maximales geometrisches 85
- Verhältnisdruckregelventile 143  
Verluste, volumetrische 70  
Verschraubungen 175  
Verstelldrosselventile 145  
Verstellpumpen 68, 78  
Viskosität 25, 160, 162  
–, kinematische 25  
Viskositäts-Polhöhe 164  
Viskositäts-Richtungskonstante 164  
Viskositäts-Temperatur-Druck-Verhalten 26  
Viskositätsindex 164  
Volumeneinstellung 68  
Volumenstrom 19  
Volumenstrommessgeräte 176  
V,T-Diagramme 162
- Wandrauigkeit, absolute 29  
Wärmekapazität, spezifische 167  
Wechselventile 135  
2-Wege-Stromregelventile 146  
3-Wege-Stromregelventile 147  
Wegeventile 123  
3/2-Wegeventil 62  
3/3-Wegeventil 63  
4/3-Wegeventil 64  
Wegübersetzung 18  
Wellenleistung 20  
Widerstand, hydraulischer 39  
Widerstandsbeiwert 30  
Wirkdruck 35  
Wirkungsgrad, hydraulisch-mechanischer 71, 98  
Wirkungsgrad, volumetrischer 20, 97
- Zahnradpumpen 76  
Zubehörteile 175  
Zusatzausrüstung 58  
Zuschaltventile 144  
Zylinder, doppeltwirkende 103  
–, einfachwirkende 107