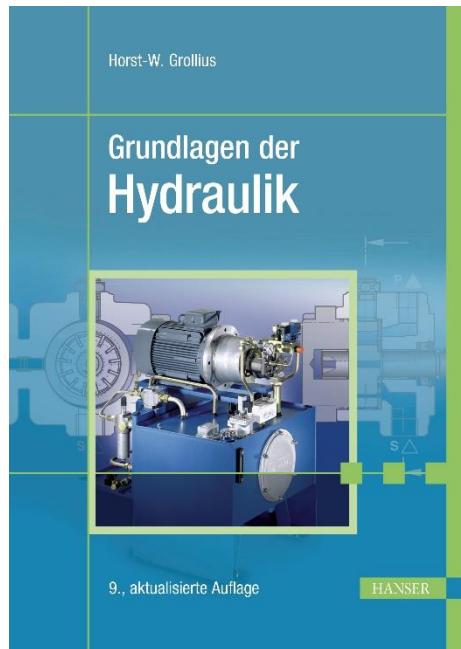


HANSER



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

1 Einleitung	11
2 Physikalisches Basiswissen	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
3 Genormte Symbole	47
4 Grundsätzlicher Aufbau eines Hydrosystems	60
5 Einfache Schaltpläne	62
6 Hydropumpen	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
7 Hydromotoren	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
8	Hydrozylinder.....	102
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
9	Schwenkmotoren	118
10	Hydroventile	123
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	Verhältnisdruckregelventile	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
11	Servoventile	151

12 Weitere Schaltplanbeispiele	155
13 Hydrauliköle	160
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
14 Zubehörteile	175
15 Hinweise zur Projektierung von Hydrosystemen	177
16 Aufgaben	178
Quellen und weiterführende Literatur	217
Sachwortverzeichnis	222

1 Einleitung

Hydraulik und Pneumatik sind Teilgebiete der mit dem Begriff **Fluidtechnik** bezeichneten Wissenschaftsdisziplin. 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 Hydromotor) 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 **Hydrosystem** 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.

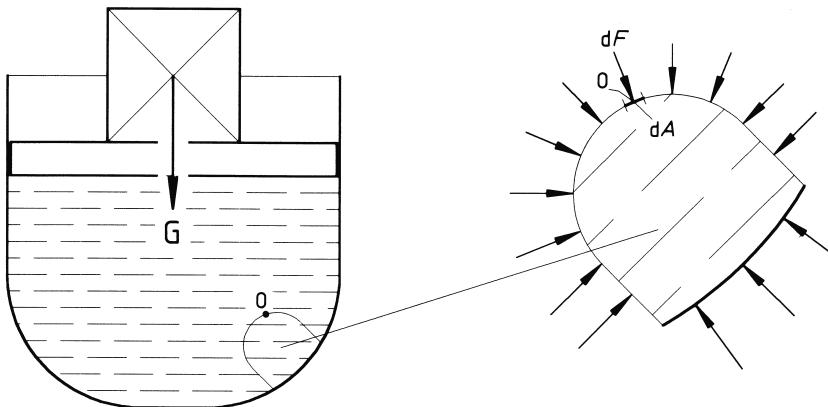


Bild 2.1: Zur Erläuterung des Druckbegriffes

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 Basis-einheiten des Internationalen Einheitensystems (SI-Maßsystem) Kilogramm (Einheitenzeichen: kg), Meter (Einheitenzeichen: m) und Sekunde (Einheitenzeichen: s) mit **Pascal** (Einheitenzeichen: Pa) festgelegt:

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

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.

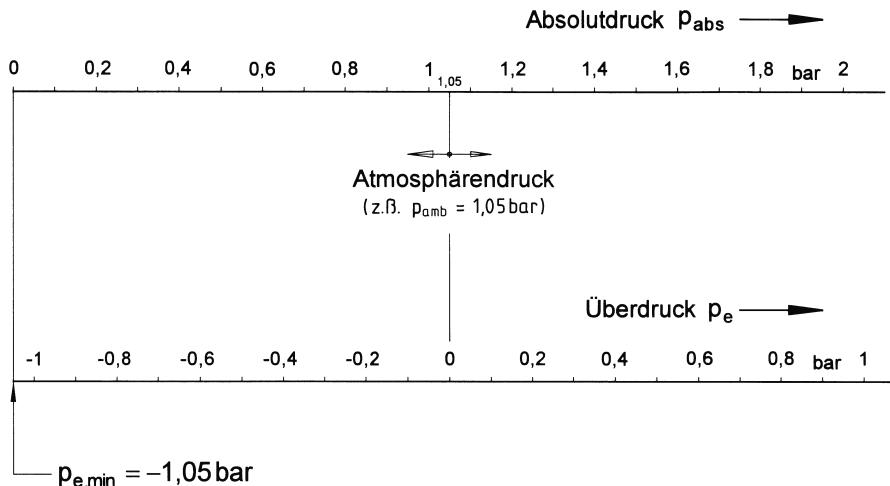


Bild 2.2: Absolutdruck- und Überdruckskaalaufstellung

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_{abs} und dem aktuell vorliegenden (absoluten) Atmosphärendruck p_{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_{abs} größer als der Atmosphärendruck p_{amb} , nimmt der Überdruck positive Werte an:

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

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

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

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

In der Hydraulik wird meist nicht mit dem Absolutdruck p_{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 unterworfen 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

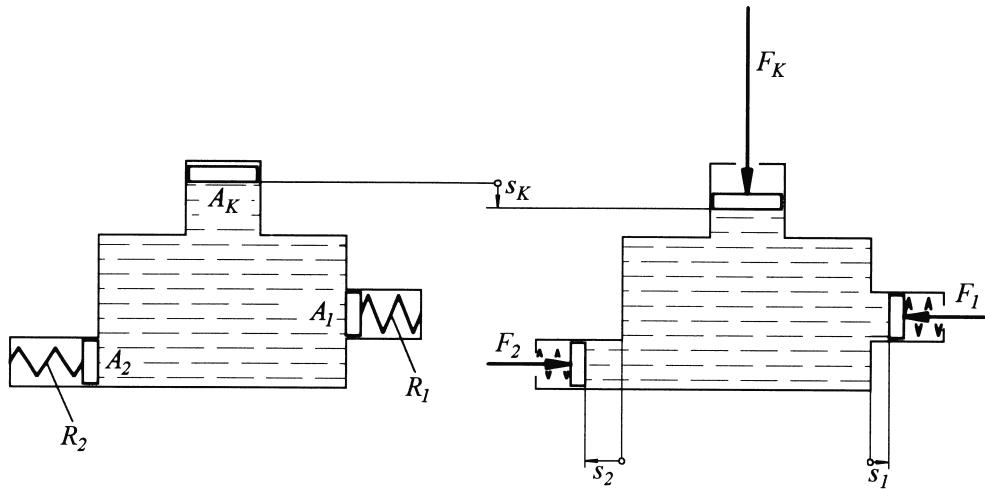


Bild 2.3: Zum Gesetz von Pascal

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_{amb} . Das Diagramm neben dem Behälter gibt den Druckverlauf in der Flüssigkeit über der Höhenkoordinate h wieder.

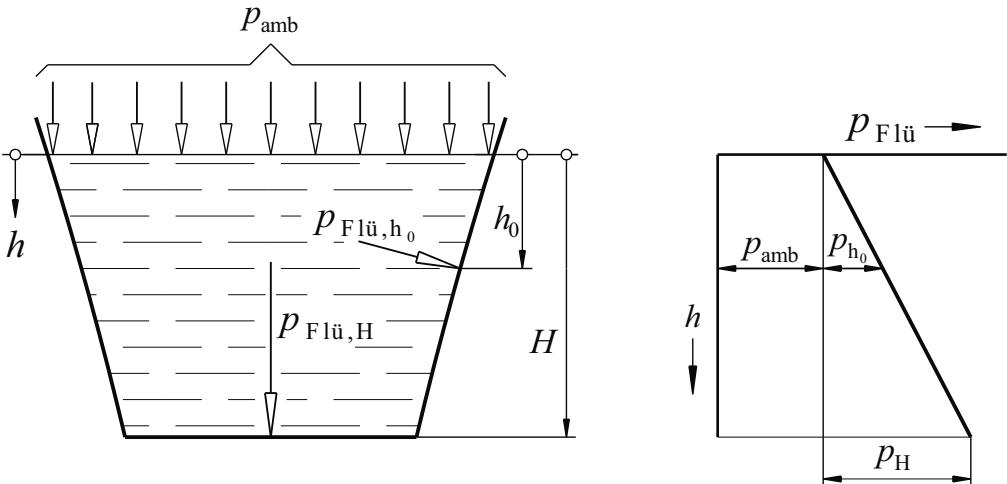


Bild 2.4: Zum Schweredruck in einer Flüssigkeit

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_{amb}

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

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 Schweredrucks bleibt unberücksichtigt; die Kolben der Presse werden **reibungsfrei** geführt und dichten **leckfrei** ab.

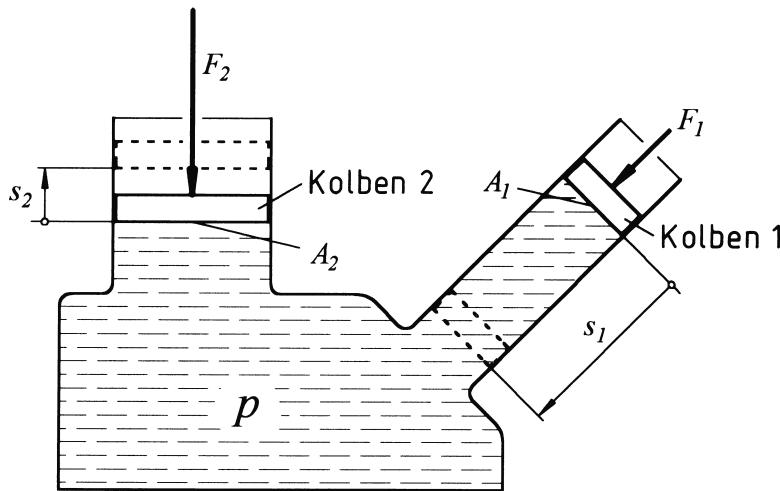


Bild 2.5: Hydraulische Presse – Prinzip

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.

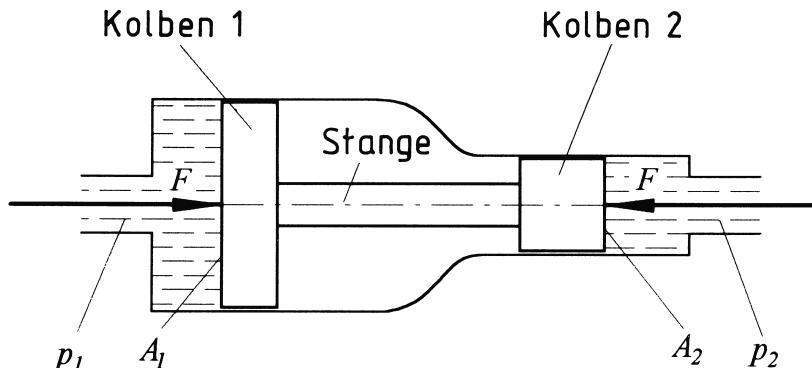


Bild 2.6: Zur Druckübersetzung

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_2 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

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

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

Bild 2.7 soll den Begriff des **Gesamtwirkungsgrades** η_t veranschaulichen.

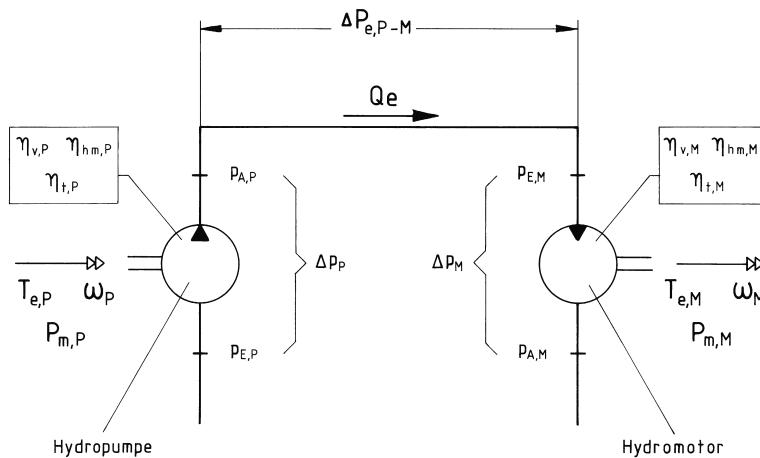


Bild 2.7: Zur Veranschaulichung des Begriffes Gesamtwirkungsgrad

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
Betätigungsseinrichtungen 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 entflammbar 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, selbstanstaugende 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
Rohreibungszahl 27
Rückschlagventil, federbelastetes 155
Rückschlagventile, einfache 130
–, entsperrbare 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
Spielausgleich, 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
Teleskopzyylinder 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