



Leseprobe

Horst-Walter Grollius

Grundlagen der Hydraulik

ISBN (Buch): 978-3-446-44275-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44104-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44275-7>

sowie im Buchhandel.

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

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.

Wuppertal, im November 2014

Horst-Walter Grollius

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 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 **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.

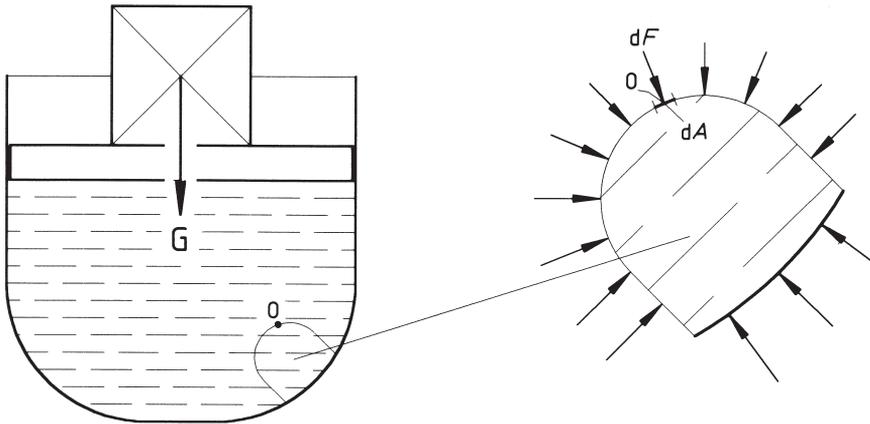


Bild 2.1: Zur Erläuterung des Druckbegriffes

Mit 0 wird ein Punkt der Flüssigkeit gekennzeichnet, der auch gleichzeitig ein auf der Berandungsfäche 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.

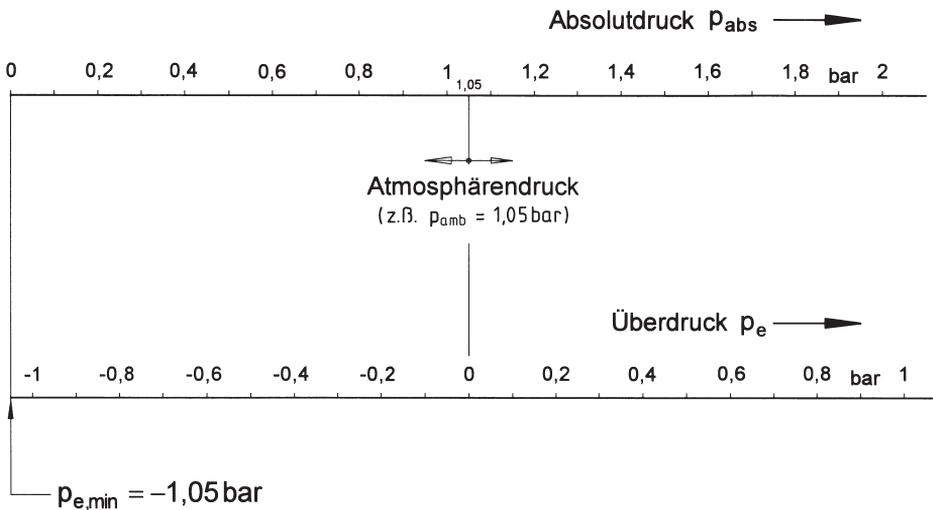


Bild 2.2: Absolutdruck- und Überdruckskala

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_{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 $p_{e,\text{min}}$ der negativen Überdruckskala (untere Skala in Bild 2.2) wird durch den aktuell vorliegenden Atmosphärendruck p_{amb} festgelegt. Liegt beispielsweise ein Atmosphärendruck von $p_{\text{amb}} = 1,05 \text{ bar}$ 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_{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 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

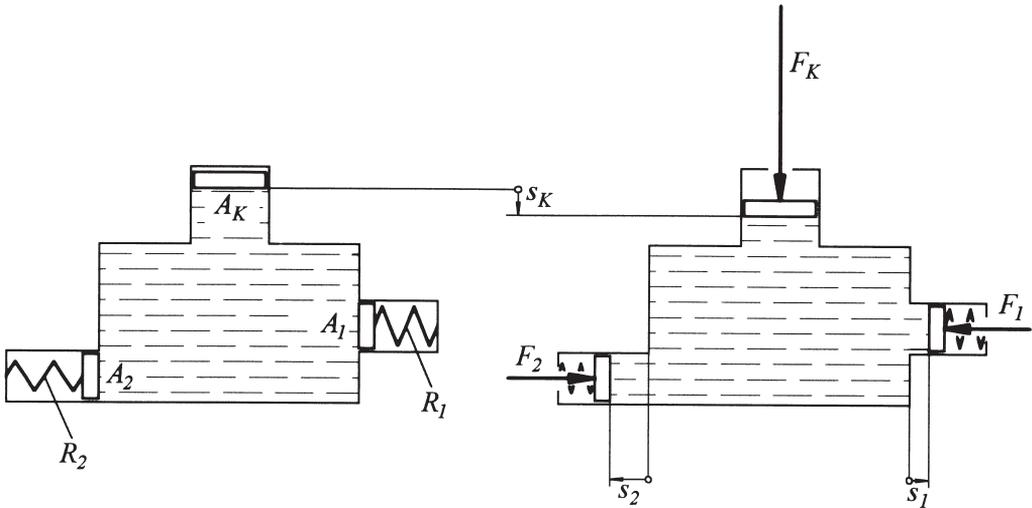


Bild 2.3: Zum Gesetz von Pascal

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

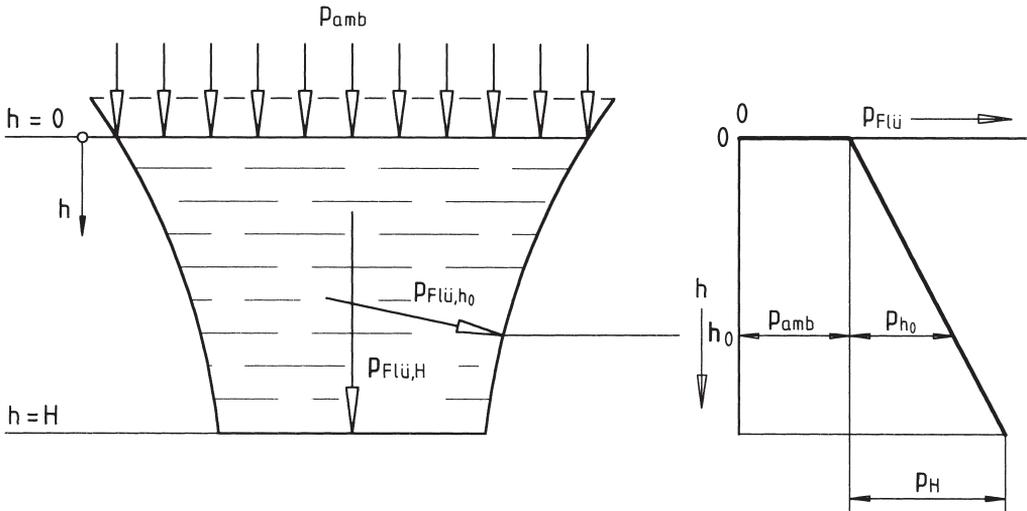


Bild 2.4: Zum Schweredruck in einer Flüssigkeit

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

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

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}

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

Am Behälterboden mit $h = H$ herrscht der Druck

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

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.

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 entflammbare 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
 Innenzahradpumpe 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
 –, entsperbare 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
 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, doppelwirkende 103
 –, einfachwirkende 107