

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.

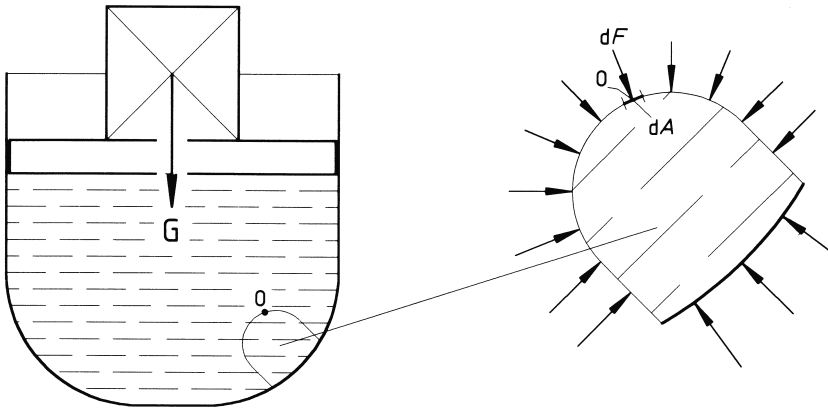


Bild 2.1: Zur Erläuterung des Druckbegriffes

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.

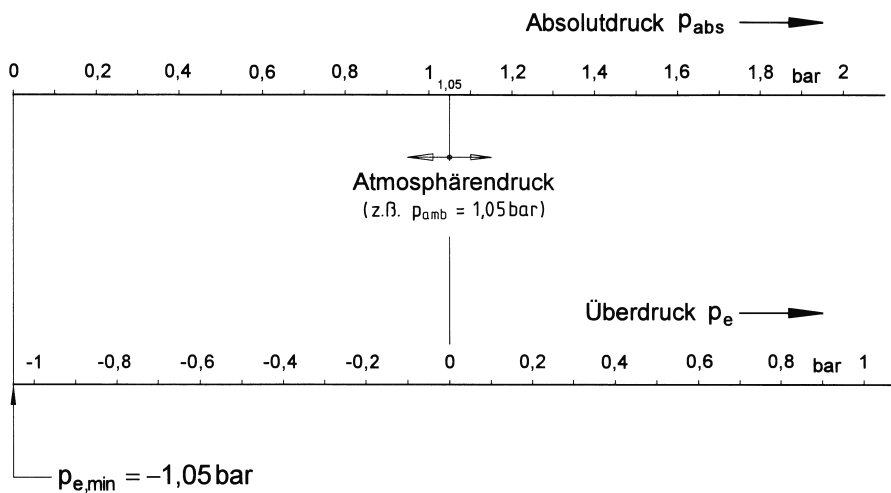


Bild 2.2: Absolutdruck- und Überdruckskala

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_{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 $p_{\text{amb}} = 1,05$ bar vor, gilt für den Minimalwert des negativen Überdruckes ($p_{\text{abs}} = 0$ 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

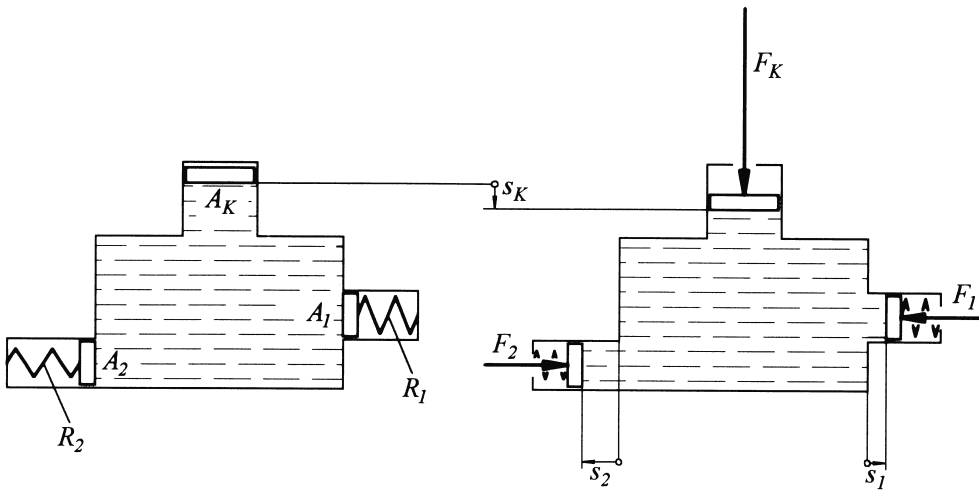


Bild 2.3: Zum Gesetz von Pascal

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

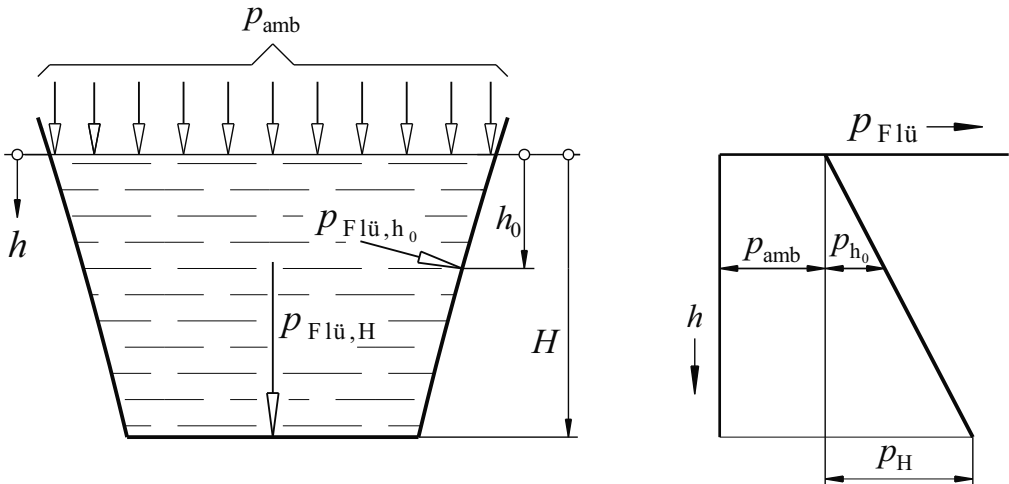


Bild 2.4: Zum Schweredruck in einer Flüssigkeit

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}

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

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.

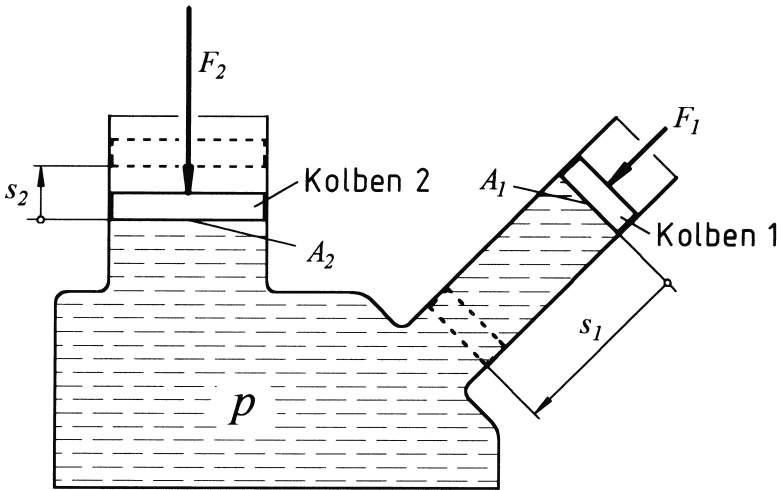


Bild 2.5: Hydraulische Presse – Prinzip

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.

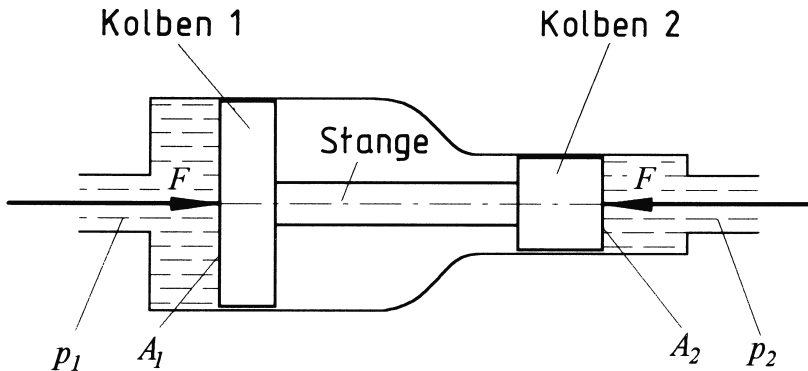


Bild 2.6: Zur Druckübersetzung

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 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.

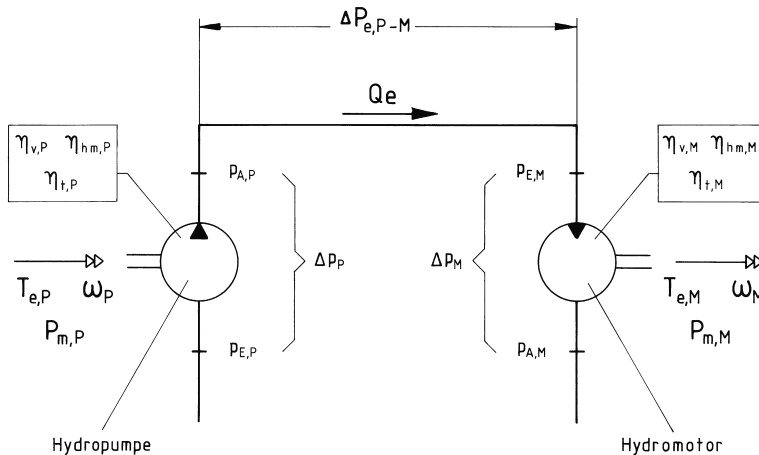


Bild 2.7: Zur Veranschaulichung des Begriffes Gesamtwirkungsgrad

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
- 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
–, 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
Schraubenspindel-pumpen 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
 Sperrichtung 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

 Verhältnisdrosselventile 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

 Wandraugigkeit, 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