

## Formelsammlung der Hydraulik (Komponenten & Anlagenbau) 1/5

Die Planung und Auslegung von hydraulischen Anlagen ist nach den verschiedensten Gesichtspunkten durchzuführen, wobei die hydraulischen Elemente entsprechend den gewünschten Funktionsabläufen ausgewählt werden.

Wichtigste Voraussetzung dazu ist die Bestimmung bzw. Festlegung der relevanten Verbrauchergößen, z.B. die Lasten (Lastkräfte, Last- bzw. Drehmomente), Bewegungsfunktionen (Wege, Geschwindigkeiten, Drehzahlen, zeitlicher Ablauf) u.a.

Erst danach lassen sich Hydroverbraucher (Hydromotoren, Hydrozylinder), Antriebseinheiten (Aggregate), Steuer- und Regelgeräte (Ventilarten mit Betätigungen) sowie Verbindungselemente (Leitungen, Verzweigungen) festlegen.

Einen weiteren Einfluß auf die Auswahl von Hydraulikanlagen und Komponenten haben z.B.

Geräuschemissionswerte und Betrachtungen zur Wärmebilanz.

Nachstehende Formeln und Tabellen sind unverbindlich und sollen die überschlägige Auslegung eines Hydrauliksystems erleichtern.

| Anlagenkomponente                        | Formeln und Beschreibung   | Schaltsymbol  |
|--|--|---|
| <b>allgemein</b>                         | <p>Grundgleichungen (verlustlose Betrachtung, statischer Zustand)</p> $Q = \frac{V}{t}$ $V = A \cdot s$ $F = p \cdot A$ $p = \frac{F}{A}$ $Q = A \cdot v$ $M = \frac{V \cdot p}{2\pi}$ $v = \frac{s}{t}$ <p>Kraft: F<br/>                     Druck: p<br/>                     Fläche: A<br/>                     Volumenstrom: Q<br/>                     Geschwindigkeit: v<br/>                     Volumen: V<br/>                     Zeit: t<br/>                     Weg (Hub): s<br/>                     Drehmoment: M</p>   |   |
| <b>Hydrozylinder</b><br>• einfachwirkend | $A [\text{mm}^2] = \frac{\pi}{4} d^2 [\text{mm}]$ $v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{s [\text{mm}]}{1000 t [\text{s}]}$ $F_s [\text{N}] = -0,1 \cdot p_B [\text{bar}] \cdot A [\text{mm}^2]$ $p_B [\text{bar}] = \frac{-10 F_s [\text{N}]}{A_1 [\text{mm}^2]}$ $Q_{zu} [\text{l/min}] = 0,06 \cdot A [\text{mm}^2] \cdot v \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$ <p>d: Kolbendurchmesser (mm)<br/>                     A: Kolbenfläche (mm<sup>2</sup>)<br/>                     F<sub>s</sub>: Kraft (N)<br/>                     p<sub>B</sub>: Betriebsdruck (bar)<br/>                     v: Kolbengeschwindigkeit <math>\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]</math><br/>                     Q<sub>zu</sub>: zufließender Volumenstrom (l/min)<br/>                     s: Hub (mm)<br/>                     t: Zeit (s)</p>  |   |
| <b>Hydromotoren</b>                      | <p>Verdrängungsvolumen pro Umdrehung (für Kolbenpumpen): <math>V = A \cdot h \cdot \pi</math></p> <p>Volumenstrom: <math>Q = V \cdot n</math></p> <p>mittleres Drehmoment: <math>M = \frac{V \cdot \Delta p}{2\pi}</math></p> <p>Leistung: <math>P_{\text{hydr}} = \Delta p \cdot Q</math></p> <p>abgegebene Leistung (Motor): <math>P_{\text{mech}} = \frac{\Delta p \cdot Q}{\eta_T} = \frac{M \cdot 2\pi n}{\eta_T}</math> <sup>2)</sup></p> <p>aufgenommene Leistung (Pumpe): <math>P_{\text{max}} = \Delta p \cdot Q \cdot \eta_T = M \cdot 2\pi n \cdot \eta_T</math> <sup>2)</sup></p> <p>V: Verdrängungsvolumen bzw. Schluckvolumen (cm<sup>3</sup>)<br/>                     A: wirksame Kolbenfläche (mm<sup>2</sup>)<br/>                     h: doppelter Hub (mm)<br/>                     n: Drehzahl (U/min)<br/>                     M: mittleres Drehmoment (Nm)<br/>                     p: Druck (bar)<br/>                     Δp: wirksamer Druck (bar)<br/>                     Q: Volumenstrom (l/min)<br/>                     P<sub>hydr</sub>: hydraulische Leistung (kW)<br/>                     P<sub>mech</sub>: mechanische Leistung (kW)<br/>                     η<sub>T</sub>: Gesamtwirkungsgrad (enthalten volumetrisch hydraulisch-mechanische Verluste)</p> $V [\text{cm}^3] \approx \frac{A [\text{mm}^2] \cdot h [\text{mm}]}{318}$ $Q [\text{l/min}] \approx \frac{V [\text{cm}^3] \cdot n [\text{min}^{-1}]}{1000}$ $M [\text{Nm}] \approx \frac{V [\text{cm}^3] \cdot \Delta p [\text{bar}]}{62}$ $P_{\text{hydr}} [\text{kW}] \approx \frac{\Delta p [\text{bar}] \cdot Q [\text{l/min}]}{612}$ $P_{\text{Antrieb}} [\text{kW}] \approx \frac{\Delta p [\text{bar}] \cdot Q [\text{l/min}]}{500}$ $P_{\text{Ab}} [\text{kW}] \approx \frac{\Delta p [\text{bar}] \cdot Q [\text{l/min}]}{740} \approx \frac{M [\text{Nm}] \cdot n [\text{min}^{-1}]}{12000}$ | <br><p>Hydromotor</p><br><p>1) p<sub>0</sub> ergibt sich aus Leitungs- und Ventilwiderständen<br/>                     2) mit Wirkungsgrad η<sub>T</sub> ≈ 0,82</p> <p>Faustwert: Um mit einem Volumenstrom von Q = 1 l/min einen Betriebsdruck von p = 500 bar zu erreichen, ist eine Antriebsleistung von ca. 1 kW notwendig!</p> |

# Formelsammlung der Hydraulik (Komponenten & Anlagenbau) 2/5

| Anlagenkomponente | Formeln und Beschreibung | Schaltsymbol |
|-------------------|--------------------------|--------------|
|-------------------|--------------------------|--------------|

• doppelwirkend

### Ausfahren

Grundgleichungen (Kräftegleichgewicht):

$$A_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 \approx 0,78 d_1^2$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$$

$$p_1 \cdot A_1 = p_3 \cdot A_3 - F$$

$$p_1 = \frac{1}{A_1} (p_3 \cdot A_3 - F)$$

$$Q_{zu} = A_1 \cdot v$$

$$Q_{ab} = A_3 \cdot v$$

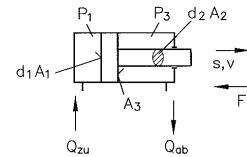
vereinfacht:

$$p_1 [\text{bar}] = \frac{p_3 [\text{bar}] \cdot A_3 [\text{mm}^2] - 10F [\text{N}]}{A_1 [\text{mm}^2]}$$

$$F [\text{N}] = \frac{-p_1 [\text{bar}] \cdot A_1 [\text{mm}^2] + p_3 [\text{bar}] \cdot A_3 [\text{mm}^2]}{10}$$

$p_3$  ergibt sich aus Leitungs- und Ventilwiderständen bei  $Q_{ab}$

Achtung: Mögliche Druckübersetzung beachten !



### Einfahren

Grundgleichungen (Kräftegleichgewicht):

$$p_1 \cdot A_1 = p_3 \cdot A_3 + F$$

$$p_3 = \frac{1}{A_3} (p_1 \cdot A_1 - F)$$

$$Q_{zu} = A_3 \cdot v$$

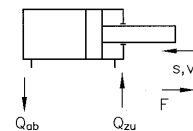
$$Q_{ab} = A_1 \cdot v$$

vereinfacht:

$$p_3 [\text{bar}] = \frac{p_1 [\text{bar}] \cdot A_1 [\text{mm}^2] - 10F [\text{N}]}{A_3 [\text{mm}^2]}$$

$$F [\text{N}] = \frac{p_1 [\text{bar}] \cdot A_1 [\text{mm}^2] - p_3 [\text{bar}] \cdot A_3 [\text{mm}^2]}{10}$$

$p_1$  ergibt sich aus Leitungs- und Ventilwiderständen bei  $Q_{ab}$



$A_1$ : Kolbenfläche (mm<sup>2</sup>)

$A_3$ : Kolbenringfläche (mm<sup>2</sup>)

$d_1$ : Kolben-Ø (mm)

$d_2$ : Stangen-Ø (mm)

$F$ : Kraft (N)

$Q_{zu}$ : zufließender Volumenstrom (l/min)

$Q_{ab}$ : abfließender Volumenstrom (l/min)

$p_1$ : kolbenseitiger Druck (bar)

$p_3$ : stangenseitiger Druck (bar)

$s$ : Hub, Weg (mm)

### Blenden

(ideal, scharfkantig)

z.B. Einsteckblenden

Typ EB; Blendenrückschlagventile Typ BC, BE

(siehe auch unter "Weitere Informationen")

Grundgleichung:

$$Q \approx \alpha \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$Q$ : Volumenstrom (l/min)

$\Delta p$ : Druckdifferenz zwischen A u. B (bar)

$d$ : Blendendurchmesser (mm)

$\rho$ : Dichte (ca. 0,9 g/cm<sup>3</sup>)

$\alpha$ : Durchflußzahl (ca. 0,78)

vereinfacht:

$$Q \approx 0,55 d^2 [\text{mm}] \cdot \sqrt{\Delta p [\text{bar}]}$$

$$d = 1,37 \cdot \frac{Q [\text{l/min}]}{\sqrt{\Delta p [\text{bar}]}}$$

$$\Delta p \approx \left( \frac{1,81 Q [\text{l/min}]}{d^2 [\text{mm}]} \right)^2$$



### Rohre / Schläuche

Die Rohr- bzw. Schlauchdurchmesser sollten so ausgelegt werden, daß ein möglichst geringer Durchflußwiderstand entsteht.



$$\text{Grundgleichungen: } Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad \lambda_R = \frac{64}{Re} \quad \Delta p = \lambda_R \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} v^2$$

$\lambda_R$ : Rohrwiderstandsbeiwert

$\Delta p$ : Druckverlust (bar)

$l$ : Rohrlänge (m)

$d$ : Rohrdurchmesser (mm)

$\nu$ : kinematische Viskosität (mm<sup>2</sup>/s)

$Q$ : Volumenstrom (l/min)

$Re$ : Reynoldszahl (< 2300)

$\rho$ : Dichte (ca. 0,9 g/cm<sup>3</sup>)

$v$ : Durchflußgeschwindigkeit  $\left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$

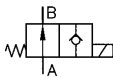



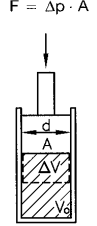
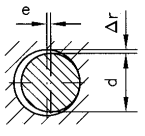
vereinfacht:

$$Q [\text{l/min}] \leq 0,108 \cdot d [\text{mm}] \cdot v \left[ \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]$$


$$d [\text{mm}] \geq \frac{9,2 \cdot Q [\text{l/min}]}{v \left[ \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right]}$$

$$\frac{\Delta p [\text{bar}]}{l [\text{m}]} = \frac{6,1 \cdot v \left[ \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right] \cdot Q \left[ \frac{\text{l}}{\text{min}} \right]}{d^4 [\text{mm}]}$$

# Formelsammlung der Hydraulik (Komponenten & Anlagenbau) 3/5

| Anlagenkomponente   | Formeln und Beschreibung   | Schaltsymbol  |
|---|--|---|
| <b>Ventile</b><br>Wegeventile<br>Druckventile<br>Stromventile<br>Sperrventile   | Druckverluste durch strömende Flüssigkeit<br>Der Druckverlust in Hydrauliksystemen setzt sich zusammen aus: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilwiderständen</li> <li>• Rohrwiderständen</li> <li>• Formwiderständen (Krümmer etc.)</li> </ul> Druckverluste $\Delta p$ der Ventile, die durch die strömende Flüssigkeit hervorgerufen werden, können den $\Delta p - Q$ - Kennlinien der entsprechenden Dokumentationen entnommen werden. Im allgemeinen kann man für eine erste überschlägige Auslegung von ca. 20... 30% Leistungsverlust in der Gesamtsteuerung ausgehen. | Beispiele:<br>Wegeventil<br><br>Druckbegrenzungsventil<br><br>Stromregelventil<br><br>entsperres<br>Rückschlagventil<br> |
| <b>Volumenänderungen</b><br>(infolge Druckerhöhung)                             | Grundgleichungen: $\Delta V = \beta_p \cdot V_0 \cdot \Delta p$<br>mit $\Delta p = p_2 - p_1$<br><br>$p_1$ : Anfangsdruck (bar) vereinfacht:<br>$p_2$ : Enddruck (bar) $\Delta V = 0,7 \cdot 10^{-4} \cdot V_0 \cdot \Delta p$<br>$V_0$ : Ausgangsvolumen (l) (mit $\beta_p \approx 0,7 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{bar}}$ )<br>$\Delta V$ : Volumenänderung (l)<br>$\beta_p$ : Kompressibilität   |    |
| <b>Volumenänderungen</b><br>(infolge Temperaturerhöhung)                        | Grundgleichungen: $\Delta V = \beta_T \cdot V_0 \cdot \Delta \vartheta$<br>mit $\Delta \vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1$<br><br>$\vartheta_1$ : Anfangstemperatur (°C) vereinfacht:<br>$\vartheta_2$ : Endtemperatur (°C) $\Delta V = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot V_0 \cdot \Delta \vartheta$<br>$\Delta \vartheta$ : Temperaturänderung (K) (mit $\beta_T \approx 0,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$ )<br>$V_0$ : Ausgangsvolumen (l)<br>$\Delta V$ : Volumenänderung (l)<br>$\beta_T$ : Ausdehnungskoeffizient   |   |
| <b>Druckerhöhung infolge Temperaturerhöhung</b><br>(ohne Volumenausgleich)      | $\Delta V = 0,7 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta \vartheta$<br>d.h. $\Delta \vartheta \approx 1\text{K} \Delta \Delta p \approx 10 \text{ bar}$   |   |
|   | Achtung: Bei Temperaturerhöhungen von in sich geschlossenem Ölvolumen entsteht ein Überdruck!<br>(u.U. muß ein Druckbegrenzungsventil als Überlastschutz vorgesehen werden)<br>Faustwert: Eine Temperaturerhöhung von 1K bewirkt eine Drucksteigerung von ca. 10 bar.  |   |
| <b>Leckölverluste</b><br>(durch konzentrische (e = 0) und exzentrische Spalten) | Grundgleichung: $Q_L = \frac{\pi \cdot d \cdot \Delta r^3}{12 \cdot \nu \cdot p} \cdot \Delta p (1 + 1,5 \cdot \varepsilon^2)$<br><br>$e$ : Exzentrizität (mm)<br>$\Delta r$ : Spaltmaß (mm) $Q_L = 1848 \frac{d \cdot \Delta r^3}{\nu} \frac{\Delta p}{l} (1 + 1,5 \cdot \varepsilon^2) \quad \varepsilon = \frac{e}{\Delta r}$<br>$\Delta p$ : Druckdifferenz (bar)<br>$d$ : Durchmesser (mm)<br>$\nu$ : kinematische Viskosität (mm <sup>2</sup> /s)<br>$l$ : Spalllänge (mm)<br>$p$ : Dichte (ca. 0,9 g/cm <sup>3</sup> )  |    |

# Formelsammlung der Hydraulik (Komponenten & Anlagenbau) 4/5

| Anlagenkomponente   | Formeln und Beschreibung  | Schaltsymbol  |
|---|---|---|
| <b>Formwiderstände</b><br>(Krümmer etc.)                          | Grundgleichungen: $\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} v^2$ $v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d^2}$<br><br>90° Krümmer $\zeta = 0,15$<br>gerade Rohrverschraubung $\zeta = 0,5$ vereinfacht:<br>Winkelverschraubung $\zeta = 1,0$ $\Delta p[\text{bar}] = 2,2 \cdot \zeta \cdot \frac{Q^2 [\text{l/min}]}{d^4 [\text{mm}]}$<br><br>$\Delta p$ : Druckverlust (bar)<br>$\zeta$ : Widerstandsbeiwert<br>$v$ : kinematische Viskosität (mm <sup>2</sup> /s)<br>$d$ : Leitungsdurchmesser (mm)<br>$\rho$ : Dichte (ca. 0,9 g/cm <sup>3</sup> )   |   |
| <b>Hydrospeicher</b>  | Hydrospeicher werden zur Deckung eines bestimmten, plötzlich auftretenden Volumenstrombedarfs (schnelle, adiabate Zustandsänderung), zum Lecköl-ausgleich bzw. zur Schwingungsdämpfung (langsame, isotherme Zustands-änderung) verwendet.   |  |
| Zustandsänderungen<br>isotherm (langsam)<br>adiabatisch (schnell) | Grundgleichungen: $p_1 = 1,1 \cdot p_0$<br><br>isotherm (langsam) $\Delta V = V_1 \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right)$<br><br>adiabatisch (schnell) $\Delta V = V_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{0,71}\right)$<br><br>$p_0$ : Gas-Fülldruck (bar)<br>$p_1$ : unterer Betriebsdruck (bar)<br>$p_2$ : oberer Betriebsdruck (bar)<br>$V_1$ : Ausgangsvolumen (l)<br>$\Delta V$ : Volumenänderung (l)   |   |
| <b>Kavitation</b>   | Öl enthält bei atmosphärischem Druck ca. 9 Volumenprozent Luft in gelöster Form. Die Gefahr von Luftblasenkavitation ist bei Atmosphärendruck unter 0,2 bar gegeben. Sie kann bei Saugvorgängen von Pumpen und Hydrozylindern sowie bei extremen Drosselstellen vorkommen und macht sich meist durch Geräuschentwicklung bemerkbar. Die Hydraulikkomponenten sind dabei einem erhöhten Verschleiß ausgesetzt.   |   |
| <b>Wärmehaushalt</b><br>Verlustleistung<br>und Öltemperatur       | Die hydraulischen Leistungsverluste in einer Hydraulikanlage werden vom Öl und den Anlagenkomponenten in Form einer Temperaturerhöhung gespeichert und teilweise über die Oberfläche der Anlage an die Umgebung abgegeben. Sie können überschlägig mit 20 - 30% der zugeführten Leistung angegeben werden. Nach der Aufwärmphase stellt sich ein Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgegebener Wärme ein.<br><br>Grundgleichungen: $P_v = 0,3 \cdot P_{\text{hydr}}$ $\vartheta_{\text{Öl max}} \approx \vartheta_{\text{Umg}} + c \cdot \frac{P_v}{A}$<br><br>freie umströmte Oberfläche $c \approx 7,5$ vereinfacht:<br>schlechte Luftzirkulation $c \approx 12$ $\vartheta_{\text{Öl max}} \approx \vartheta_{\text{Umg}} + c \cdot \frac{0,3 \cdot P_{\text{hydr}} [\text{kW}]}{A [\text{m}^2]}$<br>künstlicher Luftstrom ( $v \approx 2 \text{ m/s}$ ) $c \approx 4$<br>Wasserkühler $c \approx 0,5$<br><br>$P_v$ : Verlustleistung, in Wärme umgesetzt (kW)<br>$P_{\text{hydr}}$ : hydraulische Leistung (kW)<br>$\vartheta_{\text{Öl max}}$ : max. Öltemperatur (°C)<br>$\vartheta_{\text{Umg}}$ : Umgebungstemperatur (°C)<br>$A$ : Anlagenoberfläche (Behälter, Rohre etc.) (m <sup>2</sup> ) |   |

## Formelsammlung der Hydraulik (Komponenten & Anlagenbau) 5/5

### Umrechnungstabelle

| Größe                   | Kennzeichen    | Einheit   | ≈ | Faktor               | x | Einheit                        |
|-------------------------|----------------|---|---|----------------------|---|--------------------------------|
| Druck                   | p              | $1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$                  | ≈ | 10                   |   | bar                            |
|                         |                | 1 MPa   | ≈ | 10                   |   | bar                            |
|                         |                | $1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$                | ≈ | 1                    |   | bar                            |
|                         |                | 1 psi   | ≈ | 0,07                 |   | bar                            |
| Kraft                   | F              | $1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$   | = | 1                    |   | N                              |
|                         |                | 1 lbf   | ≈ | 4,45                 |   | N                              |
| Länge, Weg, Hub         | l, s, h        | 1 in  | ≈ | 25,4                 |   | mm                             |
|                         |                | 1 ft  | ≈ | 304,8                |   | mm                             |
| Drehmoment              | M              | $1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$ | = | 1                    |   | Nm                             |
| Leistung                | P              | 1 PS, 1 hp  | ≈ | 0,74                 |   | kW                             |
| Fläche                  | A              | 1 ft <sup>2</sup>                                 | ≈ | 92903                |   | mm <sup>2</sup>                |
|                         |                | 1 in <sup>2</sup>                                 | ≈ | 645,16               |   | mm <sup>2</sup>                |
| Volumen                 | V              | 1 ft <sup>3</sup>                                 | ≈ | 28,92                |   | l                              |
|                         |                | 1 in <sup>3</sup>                                 | ≈ | $1,64 \cdot 10^{-2}$ |   | l                              |
|                         |                | 1 UK gal  | ≈ | 4,55                 |   | l                              |
|                         |                | 1 US gal  | ≈ | 3,79                 |   | l                              |
| Temperaturen            | T, $\vartheta$ | $5 (^\circ\text{F}-32)/9$                         | ≈ | 1                    |   | °C                             |
| Masse                   | m              | 1 lb  | ≈ | 0,45                 |   | kg                             |
| kinematische Viskosität | v              | 1 cSt   | = | 1                    |   | $\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$ |