



01 - Grundlagen der Pneumatik

- Druck und Vakuum
- Das Boyle-Mariotte-Gesetz
- Das Gay-Lussac-Gesetz
- Strömungseigenschaften
- Konstanten "C" und "b"
- Konstante K_v
- Nenndurchfluss Q_{Nn}

DRUCK

Druck ist das Verhältnis zwischen einer Kraft und der Fläche, auf die sie wirkt

$$P = \frac{F}{S}$$

Internationale Maßeinheit : $P = \frac{N \text{ (Newton)}}{m^2} = Pa \text{ (Pascal)}$

Pa ist eine sehr kleine Einheit; daher wird bevorzugt in bar gerechnet:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa (100 kPa)}$$

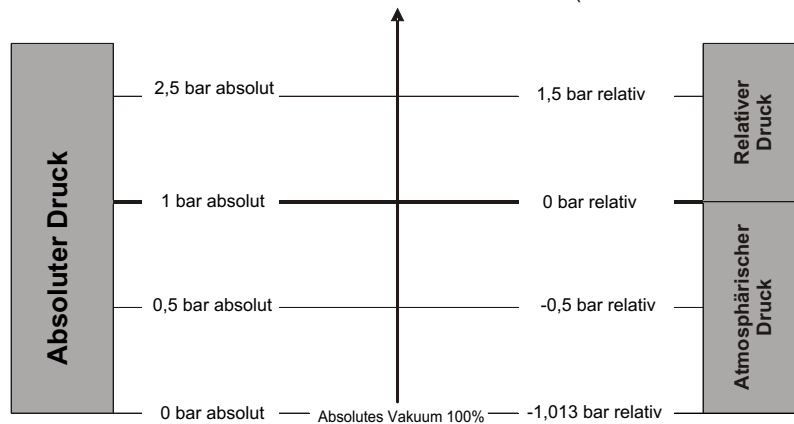
(Umrechnungstabellen zur Umrechnung des Drucks in andere Maßeinheiten siehe Abschnitt 3)

Luftdruck: Druck, den Luft der Atmosphäre auf die Erdoberfläche ausübt.

Bei einer Temperatur von 20° C und einer Luftfeuchtigkeit von 65 % auf 0 m NN beträgt der Luftdruck 1,013 bar und ändert sich mit der Höhe über dem Meeresspiegel. Bei Berechnungen verwendet man ohne Berücksichtigung der Höhe den ungefähren Wert von 1 bar.

Relativer Druck: Der mit Hilfe von Messgeräten in den Pneumatikleitungen gemessene Druck.

Absoluter Druck: Summe des Luftdrucks und des relativen Drucks (verwendet zur Berechnung des Luftbedarfs der Zylinder)



VAKUUM: Unter Vakuum versteht man einen abgeschlossenen, materiefreien Hohlraum. Ein Vakuum besteht, wenn der Druck geringer als der Luftdruck ist; als absolutes Vakuum bezeichnet man einen Zustand, bei dem der absolute Druck und der Luftdruck gleich Null sind.

Maßeinheit: Ein Vakuum wird als negativer Druck in verschiedenen Maßeinheiten ausgedrückt: bar, Pa, Torr, mmHg, % Vakuum.

Anwendungsbereich: -bis zu 20 % Vakuum zur Lüftung, Kühlung, Reinigung

- von 20 % bis zu 99 % "Industrievakuum" in der Hebetchnik, Handhabung und Automatisierung
- über 99 % "Prozessvakuum" in Labors, bei der Verarbeitung von Mikrochips und für Beschichtungen in Molekularstärke.

DAS BOYLE-MARIOTTE-GESETZ

Das Volumen eines idealen, in einem Behälter eingeschlossenen Gases verhält sich unter konstanter Temperatur umgekehrt proportional zum absoluten Druck. Daher ist das Produkt aus dem Volumen und dem absoluten Druck einer vorgegebenen Gasmenge konstant:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = P_3 \times V_3 = \text{usw.}$$

DAS GAY-LUSSAC-GESETZ

-bei konstantem Druck ist das Volumen einer vorgegebenen Gasmenge direkt proportional zur Temperatur*.

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2$$

- bei konstantem Volumen ist der Druck einer vorgegebenen Gasmenge direkt proportional zur Temperatur .

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

(* in absoluten Grad Kelvin: $0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$)

Daraus ergibt sich, dass z. B. zum Füllen einer Zylinderkammer genauso viele Liter Wasser notwendig sind, wie sie in der Kammer selbst enthalten sind, multipliziert mit dem Druck (unter konstanter Temperatur).

Kommt es während des Füllvorgangs zu einer Temperaturänderung, führt dies zu keiner wesentlichen Änderung des erhaltenen Wertes (VAP), denn dieser ergäbe bei einem Temperaturunterschied von 20 % zwischen der Lufttemperatur in den Leitungen und der Lufttemperatur im Zylinder nach dem Gesetz von GAY und LUSSAC:

- Bei einer Zylinderkammer mit 100 l Volumen.
- Bei einer Lufttemperatur in den Leitungen von 30°C und 6 bar Druck
- Bei einer Lufttemperatur im Zylinder von 10°C (am Schluss)

$$V_1 : V_2 = T_1 : T_2$$

$$100 : V_2 = 273 + 30 : 273 + 10$$

$$V_2 = \frac{100 \times 283}{303} = 93,4 \text{ l.}$$

Ebenso für den Druck:

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

$$6 : P_2 = 273 + 30 : 273 + 10$$

$$P_2 = \frac{6 \times 283}{303} = 5,6 \text{ bar}$$

In beiden Fällen verringert sich der Wert also nur um 6,6 %.

Berechnung des Luftbedarfs eines Zylinders in Litern pro Minute siehe Abschnitt 8.

Strömungseigenschaften

Zylinder benötigen, um einen vorgegebenen Hub in der geforderten Zeit ausführen zu können, eine bestimmte Luftmenge, die von dem Steuerventil zugeführt werden muss.

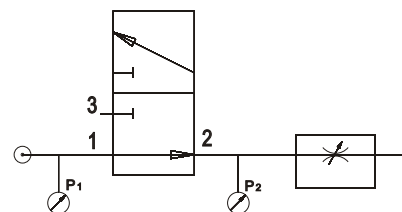
Es ist deshalb erforderlich, die Strömungsgesetze der Ventile zu kennen, d. h. die Zusammenhänge zwischen Druck, Druckabfall und Druckluftmenge müssen bekannt sein, um die geeignete Ventilgröße zu erreichen, damit einem Zylinder bei vorgegebenem Druck unter Berücksichtigung des Druckverlustes die erforderliche Druckluftmenge zugeführt werden kann. Zur Ermittlung der Ventilgröße reicht die Bezugsgröße Gewindeanschluss des Ventils nicht aus, sondern es müssen alle Betriebsdaten einbezogen werden.

Diese Daten werden in unterschiedlicher Form angegeben, je nachdem, nach welcher Norm bzw. Messmethode sie ermittelt wurden. Sie bestehen vor allem aus Konstanten, die in die Durchflussberechnung der Ventile einbezogen werden.

Um den Sinn der Berechnungsformeln zu verstehen, muss man die Strömungsverhältnisse in den Ventilen näher betrachten. Zur Verdeutlichung soll folgendes Beispiel dienen: Ein mit einem absoluten Druck P_1 gespeistes Ventil, dem ein Durchflussregler nachgeschaltet ist.

Anfangszustand - Durchflussregler geschlossen

- kein Durchfluss ($Q=0$)
- ein- und abgehender Druck sind identisch ($P_2=P_1$)

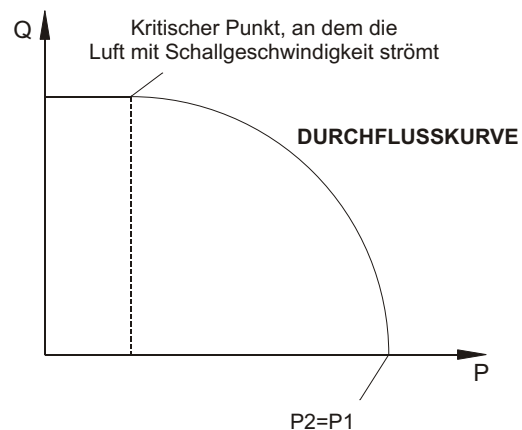


Zwischenzustand - Durchflussregler wird geöffnet

Durch das allmähliche Öffnen des Durchflussreglers sinkt der Druck P_2 und die Durchflussmenge steigt bis zu einem kritischen Punkt, an dem die Durchflussmenge auch dann konstant bleibt, wenn der Regler weiter geöffnet wird. An diesem Punkt strömt die Luft mit Schallgeschwindigkeit.

Endzustand - Durchflussregler vollständig geöffnet

- maximale Durchflussmenge (konstant ab kritischem Punkt)
- abgehender Druck $P_2=0$



Bei Veränderung des Eingangsdruckes P_1 bleibt der Kurvenverlauf bestehen, das heißt, dass sich bei Erhöhung bzw. Reduzierung des Druckes P_1 die Durchflusskurven entsprechend nach oben bzw. unten verschieben. Bei Reduzierung des Eingangsdruckes P_1 könnte der horizontale Teil der Kurve entfallen; dies bedeutet, dass der kritische Durchflusszustand nicht mehr erreicht wird. Der Teil des Kurvenverlaufes, der in der Praxis am meisten interessiert, ist der Bereich vor Erreichen des kritischen Strömungszustandes. Über diesen Bereich gibt es verschiedene, empirisch ermittelte Koeffizienten, die den tatsächlichen Verlauf näherungsweise angeben. Diese ermöglichen es, den Durchfluss in relativ einfacher Weise, mit Hilfe entsprechender Formeln, zu berechnen.

VENTILKONSTANTEN "C" UND "B"

Mit Hilfe von Messverfahren nach CETOP RP 50 P (übernommen von der Norm ISO/DIN 6358) werden die folgenden beiden Konstanten empirisch ermittelt:

- Leitwert **C**
- kritisches Druckverhältnis **b**.

Der Leitwert C = Q*/P1 beschreibt das Verhältnis zwischen der maximalen Durchflussmenge Q* und dem absoluten Eingangsdruck P1 bei kritischem Durchfluss (Überschalldruckzustand) und einer Lufttemperatur von 20° C.

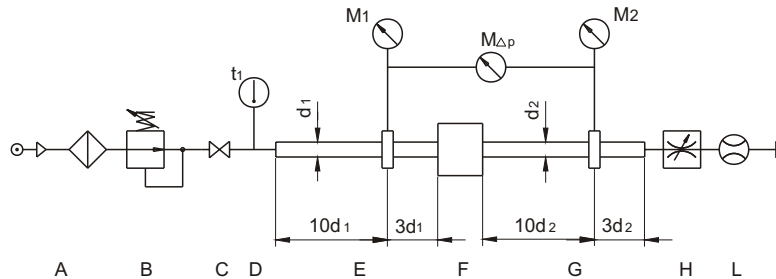
Das kritische Druckverhältnis b = P*2/P1 ist das Verhältnis zwischen dem absoluten Ausgangsdruck P2 und dem absoluten Eingangsdruck P1 bei Erreichen der maximalen Durchflussmenge Q* (Überschallbereich).

Die Formel, deren Ergebnis eine elliptische Annäherung des Verhältnisses zwischen Druck und Durchfluss darstellt, lautet wie folgt:

$$Q_N = C \cdot P_1 \cdot K_t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1-b}{r-b}\right)^2} \quad [1]$$

wobei:	Q _N	= Nenndurchfluss bei Atmosphärendruck 1,013 bar und Temperatur 20° C;
	C (dm ³ /s)	= Leitwert des Ventils;
	P1 ($\frac{\text{dm}^3}{\text{s} \cdot \text{bar}}$)	= absoluter Eingangsdruck;
	R (bar)	= Verhältnis zwischen Ausgangs- und Eingangsdruck (P2/P1);
	B	= kritisches Druckverhältnis;
	k _t = $\sqrt{\frac{293}{T_1}}$	= Korrekturfaktor, der die absolute Eingangstemperatur T1 berücksichtigt;
	T1 = 273+t ₁ (°K)	= absolute Temperatur (wobei t ₁ in °C angegeben wird).

Die empirische Ermittlung der Ventilkonstanten C und b erfolgt nach dem in dem nachfolgenden Bild dargestellten Messverfahren.



Messstrecke nach CETOP

A	Druckluftfilter.
B	Druckluftregler zur Einstellung des Eingangsdruckes P1.
C	Absperrventil.
D	Temperatursensor zur Ermittlung von t in einem Bereich von niedriger Durchflussgeschwindigkeit.
E	Messrohr für den Eingangsdruck
F	Prüfling (Pneumatik-Ventil).
G	Messrohr für den Ausgangsdruck.
H	Drosselventil zum Regulieren des Ausgangsdruckes P2.
L	Durchflussmessgerät.
M1, M2	Messinstrument für den Eingangs- bzw. den Ausgangsdruck.
MΔP	Differenzdruck-Messgerät für den Druckabfall, wenn P1-P2 < 1 bar.

Für die Druckmessung an den Ventileingängen und -ausgängen müssen die von den Normen vorgeschriebenen Messrohre eingesetzt werden. Der Durchmesser der Messrohre ändert sich entsprechend den Gewindeanschlüssen, bzw. entsprechend der Nennweite der Ventile. Die Druckmesspunkte befinden sich an einer genau definierten Position, je nach der lichten Weite des Rohres.

Der Leitwert C wird durch folgende Gleichung bestimmt: Die kritische Durchflussmenge Q* wird bei einem konstanten Eingangsdruck P1 von mehr als 3 bar und der Druckluft-Eingangstemperatur T1 gemessen.

$$C = \frac{Q^*}{P_1 \cdot K_t} \quad [2]$$

Das kritische Druckverhältnis b wird mit Hilfe der nachfolgenden Gleichung bestimmt:

$$b = 1 - \frac{\Delta P}{P_1 \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q'}{Q^*} \right)^2} \right]} \quad [3]$$

Die Durchflussmenge Q' wird bei einem vorgegebenen konstanten Eingangsdruck P_1 bei einem Druckabfall $\Delta P = P_1 - P_2 = 1$ bar gemessen.

Zur Bestimmung des kritischen Druckverhältnisses b wurde die Gleichung 3 entwickelt, da es sehr aufwändig ist, den Druck P_2 bei einem Durchfluss am Übergang zum Überschallbereich empirisch zu ermitteln.

Sowohl der Leitwert C als auch das kritische Druckverhältnis b werden aus dem Mittelwert empirisch ermittelter Messergebnisse bestimmt. Nachdem die Konstanten C und b und die Betriebsbedingungen eines Ventils (P_1 , P_2 , T_1) bekannt sind, verwendet man die Gleichung 1, um den Nenndurchfluss unterhalb des Überschallbereichs zu berechnen ($P_2 > b \cdot P_1$).

Im Überschallbereich ($P_2 \leq b \cdot P_1$) vereinfacht sich die Gleichung 1, und die maximale Durchflussmenge erhält man aus:

$$Q^* = C \cdot P_1 \cdot k^t \quad [4]$$

HYDRAULIKKONSTANTE K_v

Die Hydraulikkonstante ermöglicht es, die Flüssigkeitsmenge,

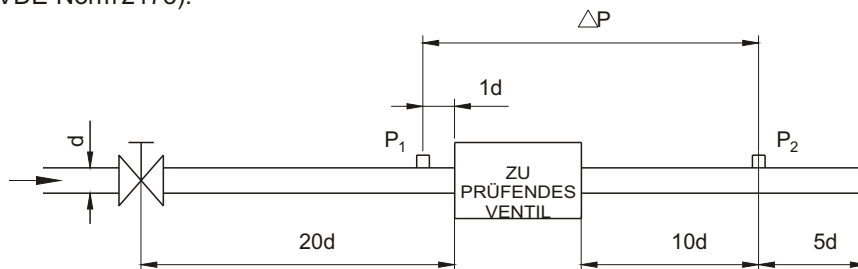
die ein Ventil durchströmt, mit folgender Gleichung zu berechnen: $Q = K_v \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ (l/min) [5]

wobei: Q = Flüssigkeitsmenge in l/min
 Δp = Druckabfall im Ventil in bar ($P_1 - P_2$)
 ρ = Dichte der Flüssigkeit in kg/dm^3

K_v ist die Hydraulikkonstante, die wie folgt berechnet wird: $\frac{\text{l}}{\text{min}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)^{\frac{1}{2}}$

Unter Verwendung dieser Maßeinheiten steht die Hydraulikkonstante K_v für die Durchflussrate (in Litern) von Wasser durch das Ventil bei einem Druckabfall von 1 bar.

Die Ermittlung dieser Werte erfolgt nach den im folgenden Bild dargestellten Messverfahren, wobei sich die Druckmesspunkte an genau definierten Positionen in Abhängigkeit von den Durchmessern der Messrohre befinden (VDE/VDE-Norm 2173).



Hydr. Schaltbild

In einigen Fällen wird die Durchflussmenge in m^3/h gemessen, was der gemessenen K_v entspricht

Sollte der K_v -Wert in $\frac{\text{l}}{\text{min}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)$ gemessen werden, genügt es, den in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{dm}^3 \cdot \text{bar}} \right)^{\frac{1}{2}}$

angegebenen Wert mit der Zahl 16,66 zu multiplizieren.

Mit Hilfe er Hydraulikkonstanten K_v lassen sich die Durchflussmengen für Flüssigkeiten genau bestimmen; bei Druckluft liefert sie jedoch nur sehr ungenaue Werte .

Die Übertragung der K_v -Werte von Hydraulik in Pneumatik ist bei Berücksichtigung der Dichte und der Annahme, dass das Strömungsverhalten der Druckluft dem der Flüssigkeiten entspricht, möglich.

Daher ist es möglich, anhand der durch Experimente mit Wasser gewonnenen Hydraulikkonstanten K_v verlässliche Werte zu berechnen.

Um die Durchflussmenge Q_n durch ein Ventil bei einem bestimmten konstanten absoluten Eingangsdruck P_1 , unabhängig vom absoluten Ausgangsdruck P_2 zu definieren, wird folgende Gleichung verwendet:

$$Q_N = 28,6 \cdot K_v \cdot \sqrt{P_2 \cdot \Delta P} \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \quad [6]$$

- wobei:
- Q_n = Durchflussmenge in l/min;
 - K_v = Hydraulikkonstante in $\frac{l}{\min} \left(\frac{kg}{dm^3 \cdot bar} \right)^{1/2}$
 - T_n = absolute Bezugstemperatur;
 - T_1 = absolute Eingangstemperatur in °K;
 - P_2 = absoluter Ausgangsdruck in bar;
 - ΔP = Druckabfall $P_1 - P_2$ in bar.

Die Gleichung [6] ist gültig bis zu einem Wert von $\Delta P =$ daher $P_2 = \frac{P_1}{2}$

Für niedrigere P_2 - Werte wird die Durchflussmenge entsprechend der Überschall-Durchflussmenge Q^*_n , die sich durch folgende Gleichung ergibt, als konstant betrachtet:

$$Q^*_N = 14,3 \cdot K_v \cdot P_1 \sqrt{\frac{T_n}{T_1}} \quad [7]$$

DIE NOMINALE DURCHFLUSSMENGE Q_{Nn}

Die nominale Durchflussmenge ist das Volumen (bezogen auf normale Bedingungen), die ein Ventil bei einem relativen Eingangsdruck $P_1 = 6$ bar (7 bar absolut) und einem Druckabfall von 1 bar, entsprechend einem relativen Ausgangsdruck $P_2 = 5$ bar (6 bar absolut) durchströmt.

Die nominale Durchflussmenge wird in l/min angegeben und wird in der Regel von empirisch (bei einem relativen Eingangsdruck von 6 bar) ermittelten Durchflusskurven abgelesen. Der so ermittelte Durchflusswert kann zur ersten Einschätzung der Ventilgröße herangezogen werden, unter der Voraussetzung, dass die Einsatzbedingungen der Ventile denen der Ermittlungswerte annähernd entsprechen. Zum Vergleich von Ventildaten, deren Durchflussmengen unterschiedlich angegeben sind, lassen sich die folgenden Behelfsformeln anwenden.

Sind die Koeffizienten C und b bekannt, kann der Durchfluss aus der folgenden Gleichung hergeleitet werden:

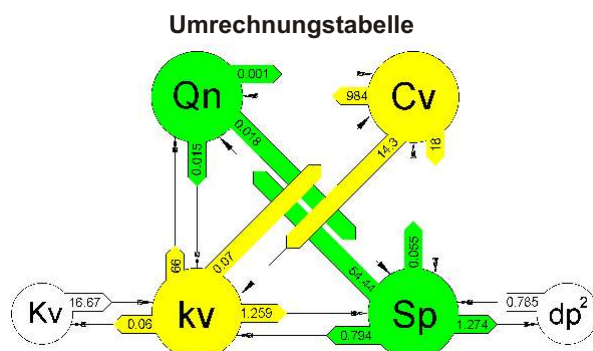
$$Q_{Nn} = 420 \cdot C \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,857 - b}{1 - b} \right)^2} \quad [8]$$

wobei: Q_{Nn} = in l/min und C in $\frac{dm^3}{s \cdot bar}$

Die Beziehung zwischen der Hydraulikkonstante K_v und dem nominalen Durchfluss ergibt sich aus der folgenden Formel:

$$Q_{Nn} = 66 K_v$$

wobei: Q_{Nn} in l/min und K_v in $\frac{l}{\min} \left(\frac{kg}{dm^3 \cdot bar} \right)^{1/2}$ [9]



Qn	Nenndurchfluss	l/min
kv		l/min
Kv	Hydraulikkonstante	m ³ /h
Cv		US-Gallonen/min
Sp	Nominaler Innenquerschnitt	mm ²
dp²	Nenndurchmesser ²	mm ²

* Berechnung des Durchmessers dp (mm²) Quadratwurzel von dp²