

## 1. Grundlagen der Druckluft

### 1.1 Die Geschichte der Druckluft

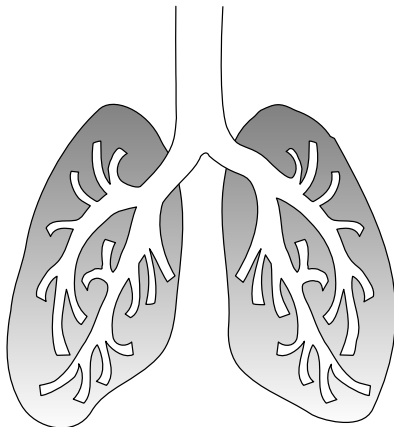
Druckluft ist heute, neben dem elektrischen Strom, der in Industrie und Handwerk am häufigsten genutzte Energieträger. Doch während man den Umgang mit dem elektrischen Strom schon von Kindesbeinen an lernt, sind Bedeutung, Möglichkeiten und Vorteile des Energieträgers Druckluft noch immer zu wenig bekannt.

Das Wissen über die Druckluft ist mit dem Kenntnisstand des Menschen in den anderen technischen Anwendungen gewachsen. Ihre Fortentwicklung im Ablauf der Geschichte fand nur dort statt, wo sie Einsatzvorteile gegenüber anderen Technologien bot. Zu jeder Zeit fand die Druckluft ihre Anwendungen, so daß immer wieder kluge Leute über ihre Weiterentwicklung nachdachten.

#### 1.1.1 Die Anfänge der Druckluft

##### Der erste Kompressor - die Lunge

Viele technische Anwendungsbereiche lassen sich aus der Frühzeit der Menschheit herleiten. Der erste Einsatz von Druckluft war das Blasen auf Zunder, um Feuer zu entfachen. Die zum Blasen verwendete Luft wurde in der Lunge komprimiert. Man könnte die Lunge als eine Art **natürlichen Kompressor** bezeichnen. Kapazität und Leistung dieses Kompressors sind äußerst beeindruckend. Die menschliche Lunge kann 100 l/min oder 6 m<sup>3</sup> Luft pro Stunde verarbeiten. Dabei erzeugt sie einen Druck von 0,02 - 0,08 bar. Im gesunden Zustand ist der menschliche Kompressor in Bezug auf seine Zuverlässigkeit unübertroffen und seine Wartungskosten sind gleich Null.



*Bild 1.1:  
Der erste Kompressor - die Lunge*

##### Die Weiterentwicklung der „Lunge“

Als gänzlich unzureichend erwies sich die Lunge jedoch, als vor mehr als 5000 Jahren die Menschheit anfang, reine Metalle, wie Gold, Kupfer, Zinn und Blei zu schmelzen. Als es später galt, hochwertige Metalle, wie Eisen, aus Erz herzustellen, war die Weiterentwicklung der Drucklufttechnologie unumgänglich. Um Temperaturen von über 1000°C zu erzeugen, waren leistungsfähigere Hilfsmittel als die Lunge vonnöten. Zunächst nutzte man den Aufwind an Hügeln und Bergrücken. Später benutzten ägyptische und sumerische Goldschmiede ein Blasrohr. Sie brachten die Luft direkt in die Glut und konnten somit die Temperatur entscheidend erhöhen. Noch heute nutzen die Goldschmiede in aller Welt ein ähnliches Gerät. Es eignet sich allerdings nur zum Einschmelzen kleinerer Metallmengen.

# Grundlagen der Druckluft

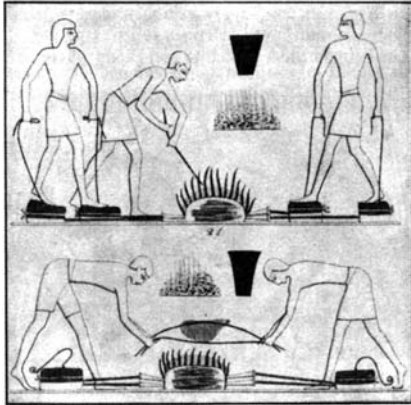


Bild 1.2:  
Darstellung der Nutzung fußbetriebener Blasebälge  
im antiken Ägypten

## Der erste mechanische Kompressor - der Blasebalg

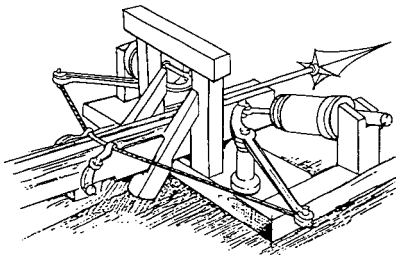
Der erste mechanische Kompressor, der handbetriebene Blasebalg, wurde Mitte des dritten Jahrtausends v.Chr. entwickelt. Die sehr viel leistungsfähigeren fußbetriebenen Blasebälge gab es um 1500 v.Chr. Die Entwicklung wurde notwendig, als sich das Legieren von Kupfer und Zinn zur Herstellung von Bronze zu einem stabilen Herstellungsverfahren entwickelt hatte. Zu sehen ist die Erfindung auf einer Wandmalerei in einem alt-ägyptischen Grabmal. Das war die Geburt der Druckluft im heutigen Sinn.

### 1.1.2 Erste Anwendungen der Druckluft Erkennen der Drucklufigenschaften

#### Wasserorgel

Bevorratung und Pulsationsdämpfung

Die erste bewußte Ausnutzung der Kraft in der Luft ist uns von dem Griechen Ktesibios ( ca. 285 bis 222 v.Chr. ) überliefert. Er baute eine Wasserorgel und nutzte die Druckluft zur **Bevorratung** und zur **Verringerung von Schwankungen**.

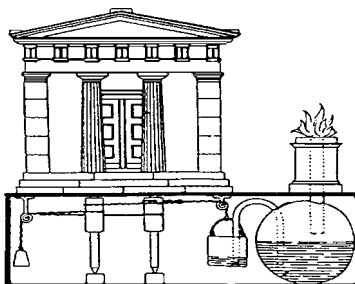


#### Katapult

Speicherung von Energie

Eine weitere Eigenschaft der Druckluft, die **Speicherung von Energie**, nutzte Ktesibios für sein Katapult. Das Katapult des Griechen erzeugte mit Hilfe der in einem Zylinder zusammengepreßten Luft eine Spannung, die Geschosse fortschleuderte.

Bild 1.3:  
Das Katapult des Ktesibios



#### Tempeltüren

Ausdehnung und Verrichtung von Arbeit

Der im ersten Jahrhundert n.Chr. in Alexandria lebende Mechaniker Heron verstand es, die Türen eines Tempels automatisch zu öffnen, solange das Feuer auf dem Altar im Inneren des Gebäudes brannte. Das Geheimnis bestand in der **Ausdehnung** von Heißluft zur Verdrängung von Wasser aus einem Behälter in einen anderen. Die Möglichkeit zur **Verrichtung von Arbeit** durch Änderung des Luftzustandes wurde von Heron zumindest unbewußt erkannt.

Bild 1.4:  
Die Tempeltüren des Heron

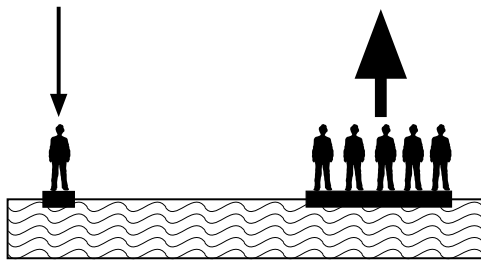


Bild 1.5 :  
Druckluft als Kraftverstärker

## Das Blaise Pascalsche Gesetz

### Kraftverstärkung

Erst im 17. Jahrhundert beschäftigten sich eine Reihe von Gelehrten mit den Gesetzmäßigkeiten der Druckluftanwendung. 1663 veröffentlichte Blaise Pascal seine Erkenntnis der **Kraftverstärkung** durch Flüssigkeiten (Hydraulik), die sich auch auf die Drucklufttechnologie anwenden ließ. Er stellte fest, daß die an einer Öffnung eines geschlossenen Wasserbehälters aufgegebene Kraft eines Mannes an einer anderen Öffnung mit hundertfacher Größe die Kraft von 100 Männern erzeugte.

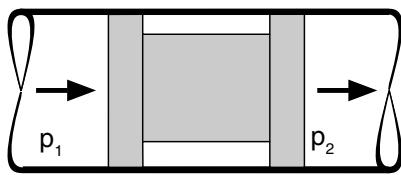


Bild 1.6 :  
Druckluft als Transportmittel

## Transport von Körpern durch Rohre

### Pneumatisches Fördern

Anknüpfend an Heron beschrieb der französische Physiker Denis Papin im Jahre 1667 die Möglichkeit, Körper durch Rohre zu transportieren. Er nutzte die geringe Druckdifferenz in einem Rohr aus. Dabei stellte er fest, daß an einem in diesem Rohr befindlichen Körper Kräfte erzeugt wurden. Hierdurch war der Einsatzvorteil hoher Arbeitsgeschwindigkeiten durch Luft erkannt. Papin legte hiermit den Grundstein zur **pneumatischen Fördertechnik**.

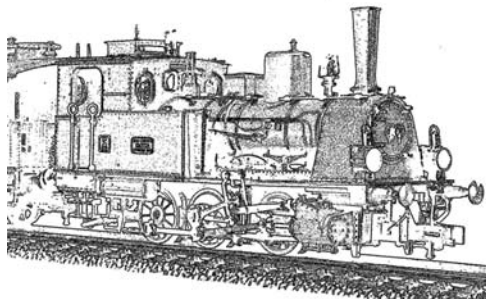


Bild 1.7 :  
Pneumatische Bremsen in  
einer Eisenbahn um 1870

## Pneumatische Bremsen

### Kraftübertragung

Mit Druckluft wurden bereits um 1810 Eisenbahnen angetrieben. 1869 stellte Westinghouse seine pneumatische Überdruckbremse vor. Drei Jahre später folgte sein Bremslüfter. Bei diesem System wurden die Bremsen **durch Überdruck** gelöst. D.h., daß bei Ausfall des Drucks, z.B. durch Platzen eines Schlauches, die volle Bremswirkung erzielt wird.

Die Möglichkeit des Fail-Safe-Verhaltens wurde hier erstmals ausgenutzt. Ein Bremssystem auf dieser Grundlage wird auch heute noch als LKW-Bremse verwendet.

## Rohrpost

*Fördern mit Druckluft*

Die Idee der mit Druckluft angetriebenen Eisenbahnen wurde nicht vergessen. 1863 richtete Latimer Clark zusammen mit dem Ingenieur Rammel eine kleine pneumatische Eisenbahn in London ein. Die kleinen Wagen fuhren komplett in einer Treibröhre. Sie waren zur Beförderung von Postbeuteln und Paketen bestimmt. Diese Bahn war wesentlich wendiger als die schweren atmosphärischen Eisenbahnen von 1810. Das führte schließlich zur Entstehung der Rohrpost.

In der Folge entstanden Rohrpostnetze in Berlin, New York und Paris. Das Pariser Netz erreichte 1934 mit 437 km seine größte Ausdehnung. Auch heute findet man noch die Rohrpost in größeren Industriebetrieben.

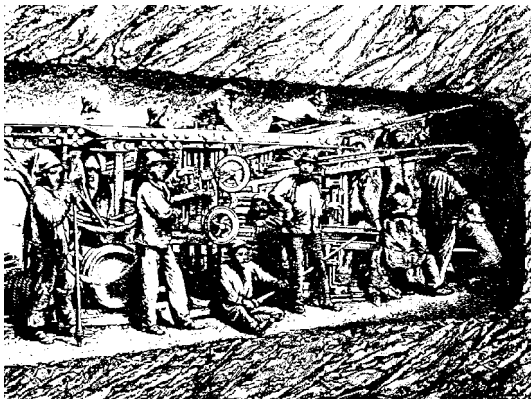


Bild 1.8 :  
Druckluftbohrer beim Tunnelbau

## Druckluftwerkzeuge

*Transportieren von Energie*

Beim Tunnelbau durch den Mont Cenis im Jahre 1857 nutzte man die neue Technik eines druckgetriebenen Bohrhammers für die Bearbeitung des Gesteins. Ab 1861 setzte man Stoßbohrmaschinen mit pneumatischem Antrieb beim Vortrieb des Tunnels ein, die von Kompressoren an den beiden Tunnelingängen mit Druckluft versorgt wurden. In beiden Fällen wurde die Druckluft über weite Strecken transportiert.

Als 1871 der Tunneldurchbruch erfolgte, lagen von beiden Seiten über 7 000 m Rohrleitungen. Somit wurde zum ersten Mal die **Transportierbarkeit von Energie** als Einsatzvorteil der Druckluft einer breiten Öffentlichkeit nachgewiesen und bekannt gemacht. Hieraus entstanden immer leistungsfähigere und vielseitiger einsetzbare Druckluftwerkzeuge.

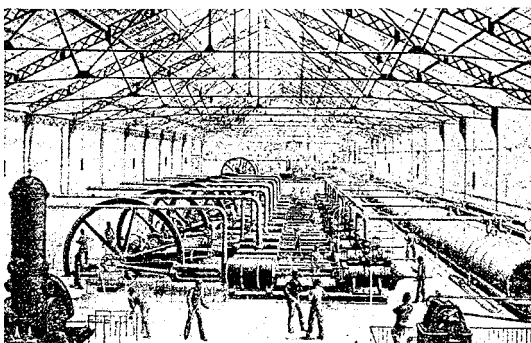


Bild 1.9 :  
Druckluftstation in Paris 1888

## Druckluftnetze

*Zentrale Druckluffertzeugung und Signalübertragung*

Die Erfahrung bei der Handhabung von Druckluft-Leitungsnetzen und die Entwicklung leistungsfähigerer Kompressoren führte dazu, daß Paris ein Druckluftnetz in den Abwasserkanälen erhielt. 1888 wurde es mit einer **zentralen Kompressorleistung** von 1 500 kW in Betrieb genommen. Im Jahr 1891 betrug die installierte Leistung bereits 18 000 kW.

Der umgreifende Erfolg des Druckluftnetzes begründete sich unter anderem in der Erfindung einer Uhr, welche jede Minute durch einen Impuls aus der Kompressorstation gestellt wurde. Man erkannte damals nicht nur die Möglichkeit der Transportierbarkeit von Energie, sondern auch von **Signalen über große Entfernungen eines Druckluftnetzes**.

Das Pariser Druckluftnetz ist bis heute einzigartig und noch immer in Betrieb.

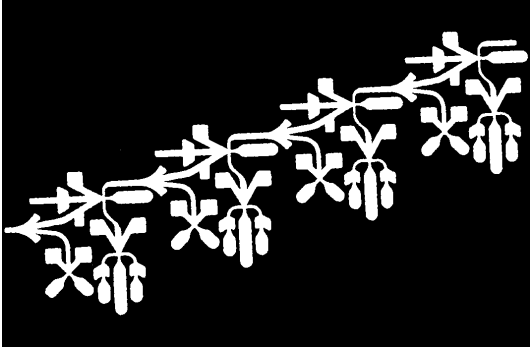


Bild 1.10 :  
Vierstufiges Addierwerk mit Wandstrahlelementen

## Signalverarbeitung

*Druckluft zur Signalübertragung und Verarbeitung*

In den 50er Jahren unseres Jahrhunderts entdeckte man in den USA die hohe Strömungsgeschwindigkeit der Druckluft für die Signalverarbeitung und die Signalübertragung. **Die Niederdruckpneumatik**, auch **Fluidik oder Pneumonik ( Pneumatische Logik )** genannt, erlaubt mit Drücken von 1,001 bis 1,1 bar die Integration von logischen Schaltfunktionen in Form von strömungsmechanischen Elementen auf kleinstem Raum.

Die hohe Betriebssicherheit der fluidischen Logikelemente unter extremen Umweltbedingungen, erlaubte ihren Einsatz in der Raumfahrt- und Wehrtechnik der USA und der UdSSR. Speziell ihre Immunität gegenüber der elektromagnetischen Strahlung explodierender Atombomben verschafft der Fluidik Einsatzvorteile in einigen sensiblen Bereichen.

Dennoch wurde die Fluidik in den Bereichen der Signal und Informationsverarbeitung im Laufe der Zeit weitgehend von der Elektrotechnik und Mikroelektronik verdrängt.

# Grundlagen der Druckluft

## 1.2 Einheiten und Formelzeichen

Die **SI-Einheiten** (Système International d'Unités) wurden auf der 14. Generalkonferenz für Maße und Gewichte vereinbart. Sie sind seit dem 16.10.1971 verbindlich anzuwenden.

### 1.2.1 Basiseinheiten

Die **Basiseinheiten** sind definierte Einheiten der voneinander unabhängigen Basisgrößen als Grundlage des **SI-Systems**.

Basiseinheit	Formelzeichen	Zeichen	Name
Länge	l	[ m ]	Meter
Masse	m	[ kg ]	Kilogramm
Zeit	t	[ s ]	Sekunde
Stromstärke	I	[ A ]	Ampere
Temperatur	T	[ K ]	Kelvin
Lichtstärke	I	[ cd ]	Candela
Stoffmenge	n	[ mol ]	Mol

### 1.2.2 Einheiten der Drucklufttechnik

In der Technik werden von den Basiseinheiten abgeleitete Größen verwendet. In der folgenden Aufstellung sind die in der **Drucklufttechnik** am häufigsten verwendeten Einheiten aufgeführt.

Einheit	Formelzeichen	Zeichen	Name
Kraft	F	[ N ]	Newton
Druck	p	[ Pa ] [ bar ]	Pascal Bar <b>1 bar = 100 000 Pa</b>
Fläche	A	[ m <sup>2</sup> ]	Quadratmeter
Volumen	V	[ m <sup>3</sup> ] [ l ]	Kubikmeter Liter <b>1 m<sup>3</sup> = 1 000 l</b>
Geschwindigkeit	v	[ m / s ]	Meter pro Sekunde
Masse	m	[ kg ] [ t ]	Kilogramm Tonne <b>1 t = 1 000 kg</b>
Dichte	ρ	[ kg / m <sup>3</sup> ]	Kilogramm pro Kubikmeter
Temperatur	T	[ °C ]	Grad Celsius
Arbeit	W	[ J ]	Joule
Leistung	P	[ W ]	Watt
Spannung	U	[ V ]	Volt
Frequenz	f	[ Hz ]	Hertz

## 1.3 Was ist Druckluft ?

### 1.3.1 Zusammensetzung der Luft

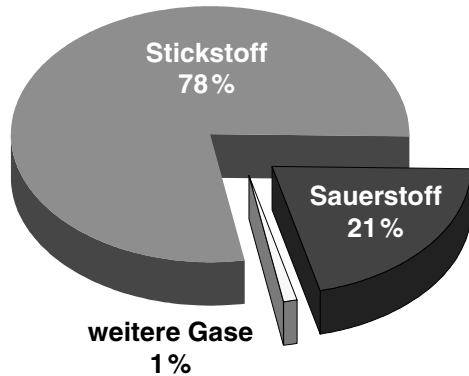


Bild 1.11:  
Zusammensetzung der Luft

Die Luft in unserer Umgebung, der Atmosphäre, besteht aus:

- 78 % Stickstoff
- 21 % Sauerstoff
- 1 % weitere Gase  
( z.B. Kohlendioxyd und Argon )

### 1.3.2 Eigenschaften der Druckluft

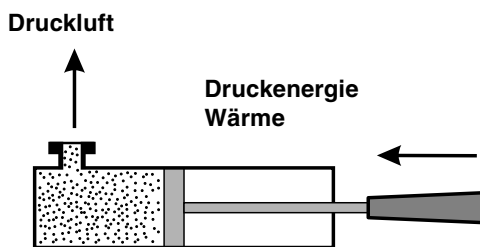


Bild 1.12:  
Verdichten von Luft

Druckluft ist verdichtete atmosphärische Luft.

Druckluft ist ein Träger von Wärmeenergie.

Druckluft kann bestimmte Entfernungen überbrücken ( Rohrleitungen ), gespeichert werden ( Druckluftbehälter ) und Arbeit leisten ( Entspannung ).

### 1.3.3 Wie verhält sich Druckluft ?

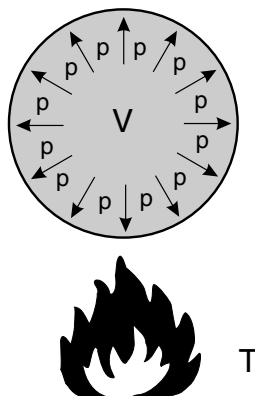


Bild 1.13:  
Luft in einem geschlossenen Behälter

Wie alle Gase besteht die Luft aus Molekülen. Die Moleküle sind durch Molekularkräfte aneinander gebunden. Wird die Luft in einen Behälter eingeschlossen ( konstantes Volumen ), dann prallen diese Moleküle auf die Behälterwände und erzeugen den **Druck p**.

Je höher die **Temperatur**, umso größer ist die Bewegung der Luftmoleküle und umso höher ist der erzeugte **Druck**.

- Volumen ( V ) = konstant
- Temperatur ( T ) = wird erhöht
- Druck ( p ) = steigt

Boyle und Mariotte führten unabhängig voneinander Versuche mit eingeschlossenem Gasvolumen durch und erkannten folgenden Zusammenhang:

**Das Gasvolumen ist dem Druck umgekehrt proportional.**  
( Boyle-Mariottesches Gesetz )

# Grundlagen der Druckluft

## 1.4 Physikalische Grundlagen

Der Zustand der Druckluft wird durch die 3 thermischen Zustandsgrößen bestimmt:

**T = Temperatur**

**V = Volumen**

**p = Druck**

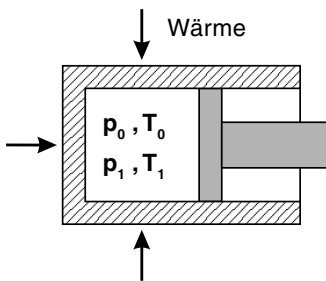
$$\frac{p \times V}{T} = \text{konstant}$$

Das bedeutet:

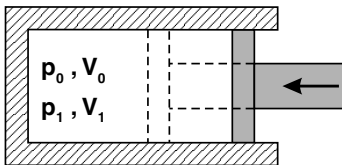
**Volumen konstant ( isochor )  
Druck und Temperatur variabel**

Erhöht man die Temperatur bei konstantem Volumen, so steigt der Druck.

$$\frac{p_0}{p_1} = \frac{T_0}{T_1}$$



*konstantes Volumen  
isochore Verdichtung*

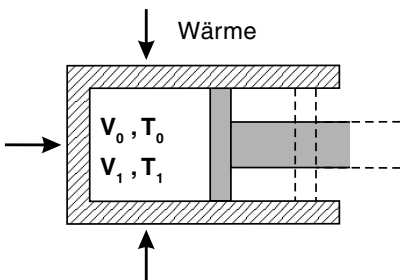


*konstante Temperatur  
isotherme Verdichtung*

**Temperatur konstant ( isotherm )  
Druck und Volumen variabel**

Verkleinert man das Volumen bei konstanter Temperatur, so steigt der Druck.

$$p_0 \times V_0 = p_1 \times V_1 = \text{konstant}$$



*konstanter Druck  
isobare Verdichtung*

**Druck konstant ( isobar )  
Volumen und Temperatur variabel**

Erhöht man die Temperatur bei konstantem Druck, so steigt das Volumen.

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{T_0}{T_1}$$



## 1.4.1 Temperatur

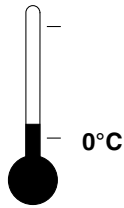
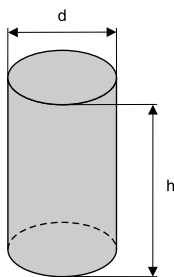


Bild 1.14:  
Anzeige der Temperatur

Die Temperatur gibt den Wärmezustand eines Körpers an und wird in °C an Thermometern abgelesen oder in Kelvin (K) umgerechnet.

$$T \text{ [K]} = t \text{ [}^\circ\text{C]} + 273,15$$

## 1.4.2 Volumen



Volumen (V)

### Volumen V [ l, m³ ]

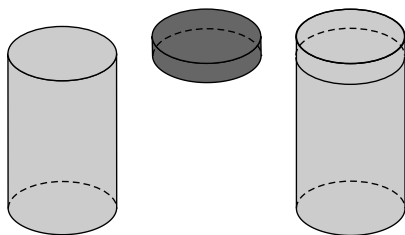
Druckluft im entspannten Zustand, freie Luft

Das Volumen ergibt sich z.B. aus den Abmessungen eines Zylinders. Es wird in l oder m³ gemessen und auf 20°C und 1 bar bezogen.

Die Angaben in unseren Unterlagen beziehen sich immer auf den entspannten Zustand der Druckluft.

$$V_{\text{Zyl}} = \frac{d^2 \times \pi}{4} \times h$$

$$\begin{aligned} V_{\text{Zyl}} &= \text{Volumen} && [\text{m}^3] \\ d &= \text{Durchmesser} && [\text{m}] \\ h &= \text{Höhe} && [\text{m}] \end{aligned}$$



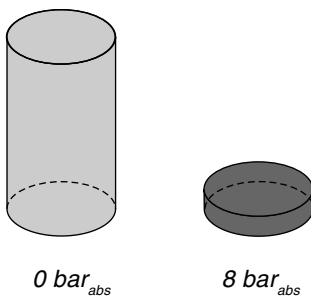
Normvolumen  $0^\circ\text{C}$  + 8% = Volumen  $20^\circ\text{C}$

### Normvolumen $V_{\text{Norm}}$ [ NI, Nm³ ]

Druckluft im entspannten Zustand bei Normbedingungen

Das Normvolumen ist auf den physikalischen Normzustand nach DIN 1343 bezogen. Es ist 8% kleiner als das Volumen bei 20°C.

$$\begin{aligned} 760 \text{ Torr} &= 1,01325 \text{ bar}_{\text{abs}} = 101\,325 \text{ Pa} \\ 273,15 \text{ K} &= 0^\circ\text{C} \end{aligned}$$



$0 \text{ bar}_{\text{abs}}$   $8 \text{ bar}_{\text{abs}}$

### Betriebsvolumen $V_{\text{Betrieb}}$ [ BI, Bm³ ]

Druckluft im verdichteten Zustand

Das Volumen im Betriebszustand ist auf den tatsächlichen Zustand bezogen. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit müssen als Bezugspunkte berücksichtigt werden.

Bei Nennung des Betriebsvolumens ist immer der Druck anzugeben, z.B. 1 m³ bei 7 barü bedeutet, daß 1 m³ entspannte Luft auf 7 barü = 8 bar abs. verdichtet ist und nur noch 1/8 des ursprünglichen Volumens einnimmt.

# Grundlagen der Druckluft

## 1.4.3 Druck

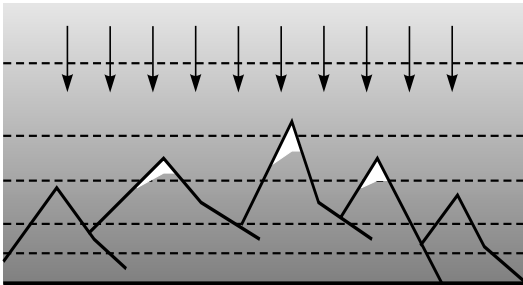


Bild 1.15:  
Atmosphärischer Druck

### Atmosphärischer Druck $p_{amb}$ [ bar ]

Der atmosphärische Druck wird erzeugt durch das Gewicht der Lufthülle, die auf uns ruht. Er ist abhängig von der Dichte und der Höhe der Lufthülle.

In Meereshöhe gelten  $1\,013\text{ mbar} = 1,01325\text{ bar}$   
 $= 760\text{ mm/Hg [ Torr ]}$   
 $= 101\,325\text{ Pa}$

Bei konstanten Bedingungen nimmt der atmosphärische Druck mit zunehmender Höhe des Meßortes ab.

### Überdruck $p_{\ddot{u}}$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Überdruck ist der Druck über dem atmosphärischen Druck. In der Drucklufttechnik wird der Druck meist als Überdruck angegeben, und zwar in bar ohne den Index „ü“.

### Absolutdruck $p_{abs}$ [ bar ]

Der absolute Druck  $p_{abs}$  ist die Summe aus dem atmosphärischen Druck  $p_{amb}$  und dem Überdruck  $p_{\ddot{u}}$ .

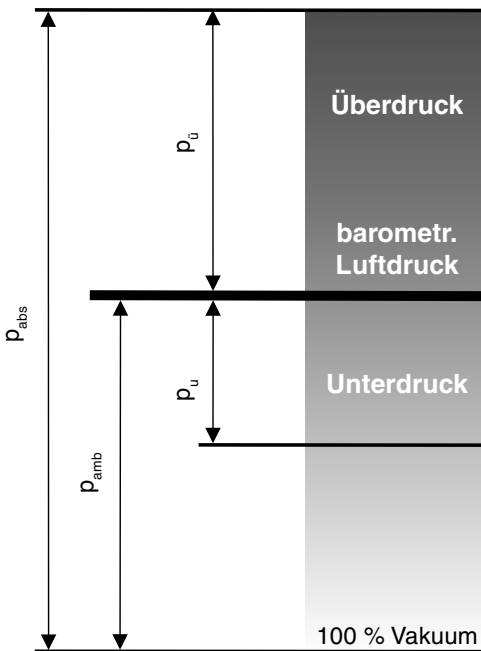
$$p_{abs} = p_{amb} + p_{\ddot{u}}$$

Der Druck wird nach dem **SI-System** in Pascal [ Pa ] angegeben. In der Praxis ist z.Zt. noch die Bezeichnung „bar“ üblich. Die alte Bezeichnung atü ( 1 atü = 0,981 barü ) gibt es nicht mehr.

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \quad p = \frac{F}{A}$$

$$1\text{ Pascal} = \frac{1\text{ Newton}}{1\text{ m}^2} \quad 1\text{ Pa} = \frac{1\text{ N}}{1\text{ m}^2}$$

$$1\text{ bar} = 10195\text{ mmWS [ mmWassersäule ]}$$



- $p_{amb}$  = Atmosphärischer Luftdruck
- $p_{\ddot{u}}$  = Überdruck
- $p_u$  = Unterdruck
- $p_{abs}$  = Absoluter Druck

Bild 1.16:  
Darstellung der unterschiedlichen Drücke

## 1.4.4 Volumenstrom

### Hubvolumenstrom

Ansaugleistung

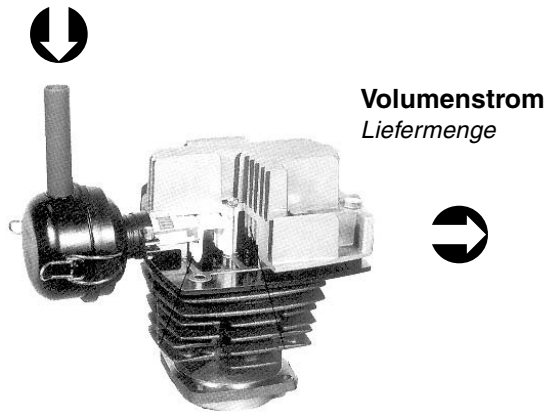


Bild 1.17:  
Hubvolumenstrom und Volumenstrom

**Volumenstrom  $\dot{V}$  [ l/min, m<sup>3</sup>/min, m<sup>3</sup>/h ]**

Als Volumenstrom wird das Volumen ( l oder m<sup>3</sup> ) pro Zeiteinheit ( Minuten oder Stunden ) bezeichnet.

Man unterscheidet zwischen Hubvolumenstrom ( Ansaugleistung ) und Volumenstrom ( Liefermenge ) eines Kompressors.

**Hubvolumenstrom  $\dot{V}_{\text{Hub}}$  [ l/min, m<sup>3</sup>/min, m<sup>3</sup>/h ]**  
Ansaugleistung

Der Hubvolumenstrom ist eine rechnerische Größe bei Kolbenkompressoren. Er ergibt sich aus dem Produkt von Zylinderinhalt ( Hubraum ), Kompressordrehzahl ( Anzahl der Hübe ) und Anzahl der ansaugenden Zylinder. Der Hubvolumenstrom wird angegeben in l/min, m<sup>3</sup>/min bzw. m<sup>3</sup>/h.

$$\dot{V}_{\text{Hub}} = A \times h \times n \times z$$

$\dot{V}_{\text{Hub}}$	=	Hubvolumenstrom	[ l/min ]
A	=	Zylinderfläche	[ dm <sup>2</sup> ]
h	=	Hub	[ dm ]
n	=	Anzahl der Hübe (Kompressordrehzahl)	[ 1/min ]
z	=	Anzahl der ansaugenden Zylinder	

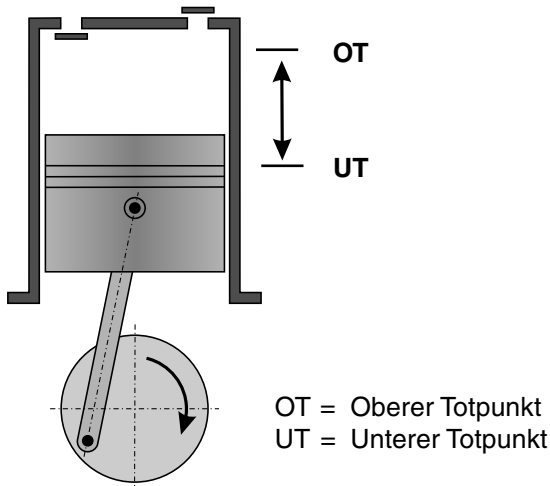


Bild 1.18:  
Bewegung des Kolbens

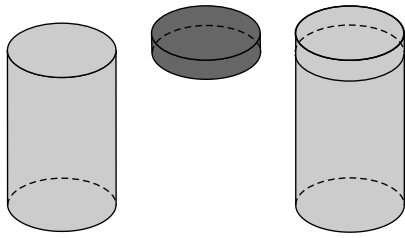
**Volumenstrom  $\dot{V}$  [ l/min, m<sup>3</sup>/min, m<sup>3</sup>/h ]**  
Liefermenge

Üblicherweise wird die Fördermenge eines Kompressors als Volumenstrom deklariert.

Im Gegensatz zum Hubvolumenstrom ist der Volumenstrom kein errechneter, sondern ein am Druckstutzen des Kompressors **gemessener** und auf den Ansaugzustand zurückgerechneter Wert. Der Volumenstrom ist abhängig vom Enddruck, bezogen auf die Ansaugbedingungen Druck, Temperatur und relative Luftfeuchte. Deshalb muß bei der Umrechnung auf den Ansaugzustand der gemessene Volumenstrom auf den Ansaugdruck „entspannt“, auf die Ansaugtemperatur „zurückgekühlt“ und auf eine relative Luftfeuchte von 0°C „getrocknet“ werden.

Der Volumenstrom wird gemessen nach VDMA 4362, DIN 1945, ISO 1217 oder PN2 CPTC2 und angegeben in l/min, m<sup>3</sup>/min bzw. m<sup>3</sup>/h. Der effektive Volumenstrom, also die tatsächlich nutzbare Liefermenge ist eine wesentliche Größe für die Auslegung eines Kompressors. Untereinander vergleichbar sind Volumenströme nur dann, wenn sie unter gleichen Bedingungen gemessen wurden. Es müssen also Ansaugtemperatur, Ansaugdruck, relative Luftfeuchte und Meßdruck übereinstimmen.

# Grundlagen der Druckluft



Normvolumenstrom  $0^{\circ}\text{C}$  + 8% = Volumenstrom  $20^{\circ}\text{C}$

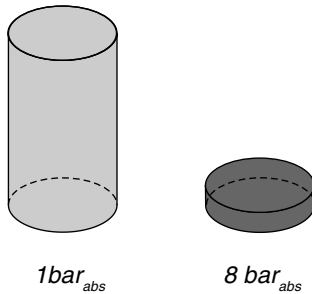
Bild 1.19:  
Norm-Volumenstrom

## Norm-Volumenstrom $\dot{V}_{\text{Norm}}$ [ NI/min, Nm<sup>3</sup>/min, Nm<sup>3</sup>/h ]

Genau wie der Volumenstrom wird auch der Norm-Volumenstrom **gemessen**.

Er bezieht sich aber nicht auf den Ansaugzustand, sondern auf einen theoretischen Vergleichswert. Beim physikalischen Norm-Zustand sind die theoretischen Werte:

- Temperatur = 273,15 K ( 0°C )
- Druck = 1,01325 bar ( 760 mm HG )
- Luftdichte = 1,294 kg/m<sup>3</sup> ( trockene Luft )
- rel. Luftfeucht = 0 %



1 bar<sub>abs</sub>

8 bar<sub>abs</sub>

Bild 1.20:  
Betriebs-Volumenstrom

## Betriebs-Volumenstrom $\dot{V}_{\text{Betrieb}}$ [ BI/min, Bm<sup>3</sup>/min, Bm<sup>3</sup>/h ]

Der Betriebs-Volumenstrom gibt den effektiven Volumenstrom der verdichteten Luft an.

Um den Betriebs-Volumenstrom mit anderen Volumenströmen vergleichen zu können, muß neben der Dimension BI/min, Bm<sup>3</sup>/min bzw. Bm<sup>3</sup>/h immer der Druck der verdichteten Luft angegeben werden.

## 1.5 Bewegte Druckluft

Bei bewegter Druckluft ergeben sich andere Gesetzmäßigkeiten als bei der stationären Druckluft.

### 1.5.1 Strömungsverhalten

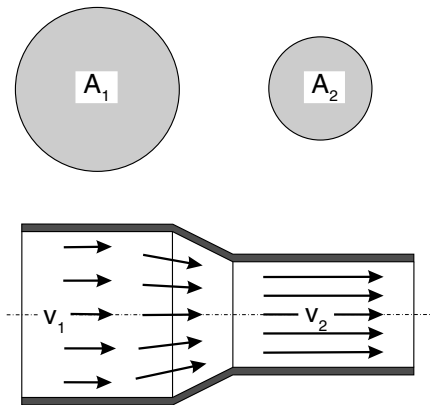


Bild 1.21:  
Strömungsverhalten

Der Volumenstrom wird berechnet aus der Fläche und der Geschwindigkeit.

$$\dot{V} = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$$

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$\dot{V}$  = Volumenstrom  
 $A_1, A_2$  = Querschnitt  
 $v_1, v_2$  = Geschwindigkeit

Aus der Formel ergibt sich:

**Die Strömungsgeschwindigkeit ist umgekehrt proportional zum Querschnitt.**

### 1.5.2 Strömungsarten

Strömungen können laminar bzw. gleichgerichtet (Ideal) oder turbulent (Rückströmungen und Verwirbelungen) sein.

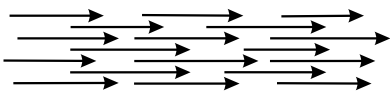


Bild 1.22:  
Laminare Strömung

#### Laminare Strömung ( gleichmäßige Strömung )

geringer Druckabfall  
geringer Wärmeübergang



Bild 1.23:  
Turbulente Strömung

#### Turbulente Strömung ( wirblige Strömung )

hoher Druckabfall  
großer Wärmeübergang