

Teil 2

2.0 Druckluft

Aus der Frühzeit der Menschheit lassen sich viele technische Anwendungsbereiche für komprimierte Luft herleiten.

Um festzustellen, wann zum ersten Male Druckluft eingesetzt wurde zur Verrichtung von Arbeit, muß zurückgeblickt werden bis zu dem Tag, als Jäger Blasrohre mit Pfeilen ausprobierten, um Wild zu erlegen.

Weitaus später kam ein handbedienter Blasebalg zum Einsatz, als alt-ägyptische Goldschmiede anfangen, Metalle wie Gold und Kupfer zu schmelzen. Kupfer und Zinn wurde zu Bronze legiert und entwickelte sich mit Hilfe der 'Luftverdichtung' zu einem stabilen Herstellungsverfahren.

Die Weiterentwicklung hin zum Luftverdichter wurde fortgesetzt mit dem von John Smeaton erfundenen Gebläsezyylinder, der von einem Wasserrad angetrieben wurde.

Die erste Gebläsemaschine baute um 1776 Wilkinson. Diese Gebläsemaschine lieferte Druckluft mit einem Druck von ca. 1 bar.

Erst um das Jahr 1800 diskutierte man ernsthaft darüber, Druckluft als Energieträger einzusetzen. Der erste Versuch im Jahre 1820 in Wales scheiterte. Die Gebläsemaschinen arbeiteten wie erwartet, das Leitungssystem allerdings aus gebrannten Tonröhren war jedoch völlig ungeeignet.

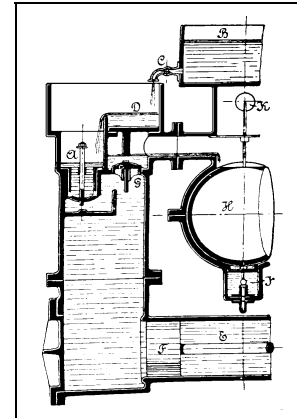


Bild 2.0.1

Die erste erfolgreiche Energieübertragung mit Druckluft im großen Stil gelang beim Bau des Mt. Cenis-Tunnels in den Schweizer Alpen. Beim Bau des 13,6 km langen Tunnels wurden Kompressoren mit einem Druck von 6 bar eingesetzt, die nach dem Prinzip der fallenden Wassersäule arbeiteten (Bild 2.0.1). Die vorbildlichen Ingenieurleistungen beim Bau des Tunnels gingen um die ganze Welt.

Der Durchbruch für die Druckluft gelang endgültig im Jahre 1888, als die Stadt Paris ein Druckluftverteilungssystem installierte, mit dessen Hilfe weite Teile der Stadt mit dieser Energie versorgt wurden. In ein 7 km langes Hauptnetz mit 50 km Nebenleitung förderte ein mit 1500 kW Antriebsleistung ausgerüsteter Kompressor Druckluft in das Leitungsnetz. Bis zum Jahre 1891 wurde diese Station ausgebaut auf eine Gesamtleistung der Kompressoren von 18000 kW.

Die Druckluft stand damit am Beginn einer großen Zeit. Techniker vieler Industrieländer wurden aktiv, um Druckluft auf den unterschiedlichsten Gebieten zu nutzen.

Heute ist Druckluft eine wesentliche Ergänzung der Elektrizität und aus der Industrie nicht mehr wegzudenken. Die Druckluft verdankt ihre rasche Entwicklung und Verbreitung der Tatsache, daß sie Energie- und Arbeitsmedium zugleich ist, im Gegensatz zum elektrischen Strom, der ausschließlich nur als Energieträger eingesetzt werden kann.

Druckluft findet neben dem elektrischen Strom und der Hydraulikflüssigkeit in der heutigen Technik eine vielfältige Verwendung und immer zahlreicher werden die Einsatzmöglichkeiten.

2.0 Druckluft

Druckluft ist verdichtete atmosphärische Luft. Luft im verdichteten Zustand ist ein Energieträger und bietet die Möglichkeit, diese Energie über weite Strecken zu transportieren und bei der Entspannung nutzbar zu machen.

So findet man vor allem in mittleren und größeren Industriebetrieben Bearbeitungswerkzeuge aller Art, die mit Druckluft angetrieben werden. Hinzu kommen pneumatische Verstell- und Vorschubeinheiten, Hubeinrichtungen, Ausblaspistolen, Sand- und Kugelstrahlanlagen oder in Lackierereien Farbspritzpistolen.

Außerdem werden pneumatische mit Druck- oder Saugluft arbeitende Fördereinrichtungen für Schüttgüter, wie für Getreide in Hafenanlagen oder Silos, ferner pneumatische oder pneumatisch und hydraulische Steuer- und Betätigungsanlagen und schließlich die pneumatischen Logikelemente industriell eingesetzt.

Einen weiteren wichtigen Bereich bildet der Bergbau. Ebenso die Herstellung pharmazeutischer Produkte etwa mit der Erzeugung von Impfstoffen oder von Antibiotika, dann zahlreiche Betriebe der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie und nicht zuletzt die mit Druckluftanlagen ausgestatteten Krankenhäuser, Pflegeheime und Unfallstationen.

Alle diese Druckluftanwender, von denen nur die wichtigsten genannt wurden, sind nicht nur auf Druckluft angewiesen sondern zusätzlich darauf, daß diese Druckluft dem Arbeitsprozeß aufbereitet, d.h. gefiltert und getrocknet, zugeführt werden muß.

2.1 Druck

Das einfachste Beispiel für das Arbeitsprinzip der Luftverdichter ist die Luftpumpe. In einem zylindrischen Gehäuse wird ein Kolben bewegt. Der Vorwärtshub drückt die Luft zusammen. Mit der Hubbewegung rückwärts wird neue Luft in den Pumpenraum gesaugt. Jede drückende Hubbewegung erhöht dabei den Druck der eingeschlossenen Luft.

2.0 Druckluft

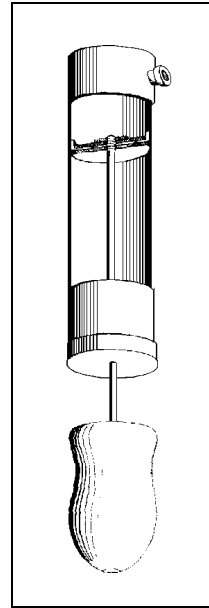


Bild 2.1.1

Die Luftpumpe ist natürlich eine ungeeignete Methode, Druckluft in großen Mengen für industrielle Zwecke zu nutzen. Wird aber der Kolben nicht manuell sondern elektro-mechanisch angetrieben, für hohe Drücke ausgelegt und mit geeigneten Steuereinheiten ausgerüstet, dann kann dieses Prinzip für den Industrieinsatz genutzt werden. Wie einfach oder kompliziert die einzelnen Verdichterbauarten im Prinzip auch aufgebaut sind, alle Verdichter komprimieren die Umgebungsluft auf einen definierten Enddruck.

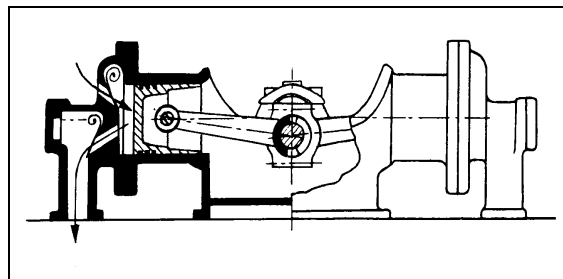


Bild 2.1.2

Der statische Druck ist die auf eine Flächeneinheit verteilte Kraftwirkung einer Normkraft F_N .

$$p = \frac{F_N}{A}$$

Formel 2.1.1

Der statische Druck p oder Staudruck ergibt sich aus dem Druck, den ein ruhendes Fluid auf eine parallel zur Strömungsrichtung liegende Wand ausübt.

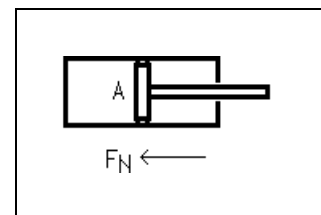


Bild 2.1.3

Der dynamische Druck q dagegen oder Fließdruck erfasst die Kraftwirkung einer strömenden Luftmasse auf eine senkrecht zur Strömungsrichtung liegende Wandung.

$$q = \frac{\rho}{2} * w^2$$

Formel 2.1.2

Die Summe aus statischem und dynamischem Druck ist der erforderlichlich wirkende Gesamtdruck der strömenden Druckluft.

$$p_g = p + q$$

Formel 2.1.3

Bezogen auf einen freien Durchfluß ist der Differenzdruck der Unterschied zwischen Fließdruck und Staudruck. Die Differenz zweier Drücke, p_1 und p_2 , wird als Differenzdruck $\Delta p = p_{1,2}$ bezeichnet. Für Berechnungszwecke sollte der statische Druck in der Regel als absoluter Druck (Differenzdruck gegenüber dem Druck im Vakuum) angegeben werden.

2.0 Druckluft

In Bild 2.1.4 sind die Druckangaben relativ zum barometrischen Luftdruck p_b zeichnerisch dargestellt.

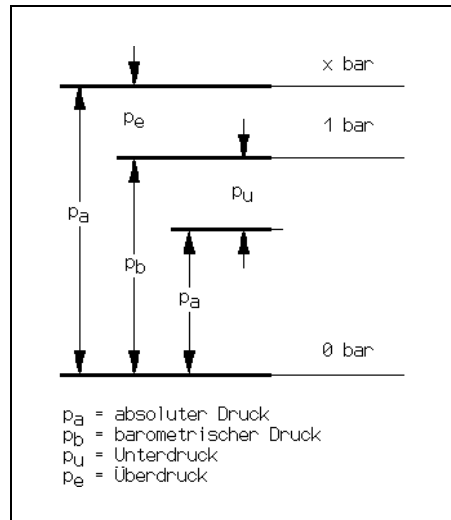


Bild 2.1.4

Bei vielen praktischen Anwendungen wird mit der Bezeichnung Druck stets der Überdruck verstanden. Gegenüber dem atmosphärischen Druck ist der Wert des Überdruckes oder statischen Druckes um den Zahlenwert 1 kleiner. Der statische Druck wird mit einem Manometer oder mit Hilfe eines Staurohres direkt gemessen.

Gemäß DIN 1314 wird der Überdruck mit dem Formelzeichen p_e gekennzeichnet. Dabei steht der Index e für excedens¹.

¹lat. überschreitend

2.2 Gasgesetze

Die für ein Gas² wichtigen Größen wie Druck, Volumen und Temperatur bestimmen den jeweiligen Zustand eines Gases und werden als thermische Zustandsgrößen bezeichnet.

Für ideale Gase gilt nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte, bei gleichbleibender Temperatur verhalten sich die Dichten σ eines Gases wie die dazugehörigen Drücke p .

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$$

Formel 2.2.1

Das Gesetz von Gay-Lussac besagt, bei gleichbleibendem Druck verhalten sich die Dichten σ eines Gases umgekehrt wie die absoluten Temperaturen T .

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Formel 2.2.2

Aus den Formeln 2.2.1 und 2.2.2 wird das Boyle-Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz gebildet. Ändern sich der Druck und die Temperatur eines Gases gleichzeitig, dann gilt unter Berücksichtigung der allgemeinen Gasgesetze:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1 * T_2}{p_2 * T_1}$$

Formel 2.2.3

²hier Luft

Bei einer Zustandsänderung nehmen einzelne Zustandsgrößen andere Werte an. Ändern sich Druck und Temperatur eines Gases gleichzeitig, dann gilt aus den Gasgesetzen abgeleitet nach der Formel 2.2.3 unter Ausklammerung der Dichten:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1 * T_2}{p_2 * T_1}$$

Formel 2.2.4

2.2.1 Allgemeine Gasgleichung

Der Übergang vom Zustand $_1$ zum Zustand $_2$ einer abgeschlossenen Gasmenge mit Hilfe des Boyle-Mariotteschen und des Gay-Lussacschen Gesetzes ergibt dann für Druck, Volumen und Temperatur beim Übergang vom Zustand p_1, V_1, T_1 zum Zustand p_2, V_2, T_2

$$\frac{p_1 * V_1}{T_1} = \frac{p_2 * V_2}{T_2}$$

Formel 2.2.1.1

Aus der Formel 2.2.1.1 folgt, daß der Wert aus Druck, Volumen und Temperatur für alle Zustände eines Gases konstant ist.

$$\frac{p * V}{T} = const$$

Formel 2.2.1.2

2.2.2 Spezifische Gaskonstante

Wird in die allgemeine Gasgleichung für $V = m/\sigma$ eingesetzt, dann nimmt die Gasgleichung die folgende, erweiterte Form an:

$$\frac{p^*V}{T} = \frac{p^*m}{T^*\delta} = m^* \frac{p}{T^*\delta} = m^* R$$

Formel 2.2.2.1

Die Rechnungen mit der Gasgleichung werden einfacher, wenn mit dem spezifischen Volumen v gearbeitet wird, wobei $v = V/m$ ist. Wird $V = v * m$ in Gleichung 2.2.2.1 eingesetzt, dann lautet die Zustandsgleichung der Gase bezogen auf 1 kg:

$$\frac{p^*V}{T} = R$$

Formel 2.2.2.2

2.2.3 Allgemeine Gaskonstante

Die Gaskonstante R ist von der chemischen Beschaffenheit des idealen Gases abhängig. Diese Abhängigkeit entfällt, wenn Bezug auf das Kilomol genommen wird. Eine Menge von m_{kg} eines Gases, die für alle Gase denselben Rauminhalt V hat, wird bezeichnet als 1 kmol. Bei 0°C und 760 Torr ist das

$$\text{Molvolumen } v_0 = 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

Luft hat bei 0°C eine Dichte von $1,293 \text{ kg/m}^3$. Daraus errechnet sich mit p in kg/m^3 für Luft die

$$\text{Gaskonstante } R_L = 29,27 \text{ mkp/kg grad}$$

Bezieht man die Gleichung aus Formel 2.2.2.2 auf 1 kmol, also auf m_{kg} eines Gases, dann lautet die Gleichung:

2.0 Druckluft

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{p}$$

Formel 2.2.3.1

Da das Molvolumen v_0 für alle idealen Gase bei konstantem Druck und konstanter Temperatur gleich ist, muß auch die Multiplikation von $m \cdot R$ für alle Gase den gleichen Wert haben. Bezeichnet wird dieser Ausdruck als

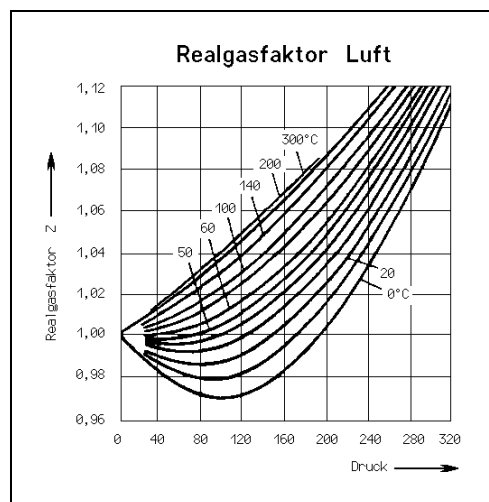
allgemeine Gaskonstante $R_0 = m \cdot R$

und ist, als Zahlenwert bezogen³ auf $(101325 \cdot 22,414 / 273,15)$, eine

universelle Konstante der Physik = 848 mkp/kmol°K.

2.2.4 Realgasfaktor

Gase, die den obigen Gesetzen exakt folgen, nennt man vollkommene oder ideale Gase. Die wirklichen Gase folgen den Gesetzen nur annähernd und zwar um so genauer, je geringer die Drücke sind.



³p in Pascal = N/m²

Diagramm 2.2.4.1

Nähert das Gas sich dem dampfförmigen Zustand oder enthält das Gas einen größeren Anteil an Wasserdampf, so wird durch Einführung eines Realgasfaktors Z (Diagramm 2.2.4.1) eine Korrektur bei der Berechnung des Volumens vorgenommen. Für reine Luft kann bei Absolutdrücken kleiner als 40 bar und Temperaturen kleiner als 50 °C der Realgasfaktor nahe bei 1 liegen und wird daher meist vernachlässigt.

Dämpfe und reale Gase gehorchen der Beziehung $p \cdot v = R \cdot T$ ungenügend. Sofern Dampftafeln oder Dampfdiagramme zur Verfügung stehen, können daraus zusammengehörende Zustandsgrößen entnommen werden. Diese beruhen auf Messungen und Interpolationsrechnungen.

$$V = Z \cdot \frac{R \cdot T}{p}$$

Formel 2.2.4.1

Eine andere Möglichkeit, die realen Zustandsgrößen von Gasen wiederzugeben besteht darin, die thermische Zustandsgleichung mit dem Korrekturfaktor Z aus Diagramm 2.2.4.1 zu ergänzen, so daß bei hohen Drücken oder Temperaturen nur Formel 2.2.4.1 allein gültig sein wird bei der genauen Volumenbestimmung.

2.3 Verdichtung

Aus der allgemeinen Gasgleichung (Formel 2.2.1.1) ist folgerichtig zu erkennen, daß bei der Verdichtung von Luft grundsätzlich Wärme erzeugt wird. Um die Größe der Wärme in der Theorie rechnerisch zu bestimmen, wird der vereinfachte Fall betrachtet, bei dem die Verdichtung theoretisch ohne Wärmezufuhr oder -abfuhr erfolgt.

$$p_1 * V_1 = p_2 * V_2 = const$$

Formel 2.3.1

Da aus jedem Kompressionsraum ein Teil der Verdichtungswärme abgeführt wird, erfolgt der Verdichtungsverlauf in der Praxis zwischen der Adiabate⁴ und Isotherme⁵ als Polytrope⁶.

Aus den Gasgesetzen werden folgende Zusammenhänge abgeleitet:

Die Temperaturänderung in Abhängigkeit vom Druck bei konstantem Volumen als Isochore⁷

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Formel 2.3.2

⁴Exponent κ

⁵Exponent $n = 1$

⁶Exponent $n > \kappa$

⁷Exponent $n = \infty$

Die Volumenänderung in Abhängigkeit der Temperatur bei konstantem Druck als Isobare⁸

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Formel 2.3.3

Die Druckänderung in Abhängigkeit vom Volumen bei konstanter Temperatur als Isotherme

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Formel 2.3.4

Ergänzend zu den o.a. mehr theoretisch interessanten Formeln, sind folgende Gleichungen für die Praxis wichtiger. Die adiabatische Druckänderung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstantem Volumen

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{x}{x-1}}$$

Formel 2.3.5

bzw. die adiabatische Volumenänderung in Abhängigkeit vom Druck bei konstanter Temperatur

$$V_1 = V_2 * \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{x}}$$

Formel 2.3.6

⁸Exponent n = 0

2.0 Druckluft

Die polytropische Druckänderung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstantem Volumen

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Formel 2.3.7

bzw. die polytropische Volumenänderung in Abhängigkeit vom Druck bei konstanter Temperatur

$$V_2 = V_1 * \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Formel 2.3.8

Die Zustandsänderung eines Gases wird ermittelt, indem mit dem Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten Exponent x gerechnet wird. Folgende Unterscheidung wird dabei getroffen:

c_p = spez. Wärme bei konst. Druck bez. auf 1 kg (kcal/kg°C)

c_v = spez. Wärme bei konst. Volumen bez. auf 1 kg (kcal/kg°C)

Das Verhältnis der spezifischen Wärmen $x = c_p/c_v$ ist nach Versuchswerten:

bei 1-atomigen Gasen $x = 1,666 = 5/3$

bei 2-atomigen Gasen $x = 1,400 = 7/5$

bei 3-atomigen Gasen $x = 1,333 = 8/6$

Im folgendem Bild sind die Deutungen der verschiedenen Sonderfälle des allgemeinen polytropischen Gesetzes dargestellt.

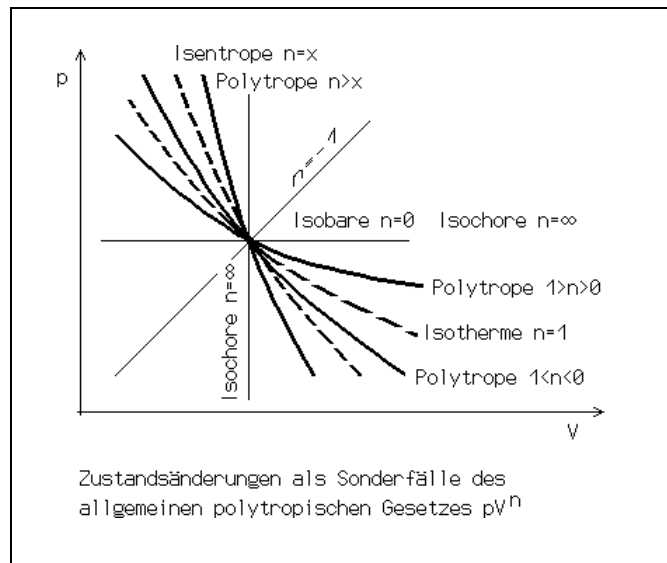


Bild 2.3.1

Die Differenz der auf 1 m^3 bezogenen spezifischen Wärme bei konstantem Druck und Volumen ist eine Konstante. Für ideale Gase gilt unter Verwendung der obigen x -Werte:
 bei 1-atomigen Gasen

$$c_p = \frac{5}{22,4} = 0,22 \text{ kcal/m}^3\text{°C} \quad c_v = 0,13 \text{ kcal/m}^3\text{°C}$$

bei 2-atomigen Gasen

$$c_p = \frac{7}{22,4} = 0,31 \text{ kcal/m}^3\text{°C} \quad c_v = 0,22 \text{ kcal/m}^3\text{°C}$$

bei 3-atomigen Gasen

$$c_p = \frac{8}{22,4} = 0,36 \text{ kcal/m}^3\text{°C} \quad c_v = 0,27 \text{ kcal/m}^3\text{°C}$$

Die spezifische Wärmen der wirklichen Gase weichen von denen der idealen Gase um so mehr ab, je höher die Atomzahl ist. Ferner nehmen die spezifischen Wärmen entgegen dem Verhalten der idealen Gase mit der Temperatur und mit dem Druck zu. Bei Rechnungen über einen

2.0 Druckluft

größeren Temperaturbereich muß daher statt der wahren spezifischen Wärme die mittlere spezifische Wärme c_m eingesetzt werden.

Spezifische Wärmekapazität c_p von trockener Luft

Druck bara	Temperatur °C				
	0	50	100	200	300
1	0,2402	0,2409	0,2418	0,245	0,250
50	0,264	0,256	0,254	0,252	0,253
100	0,288	0,270	0,263	0,257	0,257
150	0,306	0,282	0,271	0,262	0,261
200	0,322	0,292	0,278	0,267	0,265
250		0,299	0,285	0,272	0,269
300		0,303			

Tabelle 2.3.1

2.3.1 Normzustand

Infolge der Wechselbeziehung der Zustandsgrößen untereinander und der hohen Kompressibilität müssen besonders bei Gasen alle Angaben auf einen genau definierten und vereinbarten Zustand bezogen werden. In DIN 1343 ist allgemeingültig der Normzustand der festen, flüssigen und gasförmigen Stoffe festgelegt.

Das Normvolumen V_n ist das auf die Normtemperatur und den Normdruck bezogene Volumen. Es ist derjenige Zustand, der durch die

- Normtemperatur $T_n = 273,15 \text{ °K}$
- Normdruck $p_n = 1,01325 \text{ bar}$

gekennzeichnet ist und wird auch als physikalisches Normvolumen definiert.

$$V_n = V * \frac{T_n}{T_n + t} * \frac{p}{p_n}$$

Formel 2.3.1.1

Davon abweichend wurde mit der ISO 2787 für die Angabe des Luftvolumens festgelegt

- Bezugstemperatur $T_N = 293,15 \text{ °K}$
- Bezugsdruck $p_N = 1,00 \text{ bar}$

und als international gültiger Normalzustand übernommen. Dieser Basisbezug ist als "technischer und atmosphärischer Normalzustand" im Gebrauch und allgemein bekannt.

In der Praxis allerdings wird die Trennung dieser unterschiedlichen Definitionen nicht immer klar und eindeutig gezogen.

Grundsätzlich wird unter Normvolumen der Zustand der Luft beschrieben, der auf die Normtemperatur und den Normdruck bezogen ist.

2.3.2 Luftdichte

In der Praxis wird abweichend vom Volumen auch die Masse der Luft angegeben. Das Volumen wird ermittelt durch Division der Masse m durch die Dichte σ . Für die exakte Definition ist zur Massenangabe immer die dazugehörige Dichte anzugeben. Die Dichte der Luft selbst ist abhängig von der Temperatur und der relativen Feuchte.

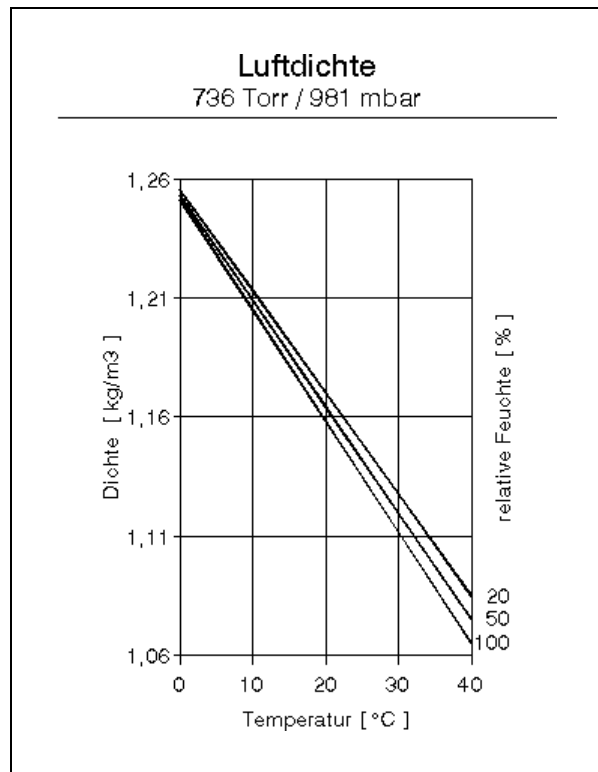


Diagramm 2.3.2.1

Mit den Werten aus Diagramm 2.3.2.1 wird die Luftmasse auf das Volumen umgerechnet. Das Diagramm basiert auf 1 at = 736 Torr.

2.3.3 Absolute Temperatur

Es gibt kein Gas, das auch bei tiefsten Temperaturen den Gasgesetzen folgt, weil jedes Gas bei einer bestimmten Temperatur flüssig wird. Die Gesetze gelten daher nur für sogenannte ideale Gase. Ein Gas nähert sich dem Zustand ideal um so mehr, je geringer der Druck und je höher die Temperatur ist.

Wird ein ideales Gas bei konstantem Druck immer weiter gekühlt, so wird bei $t = -273,15 \text{ °C}$ nach dem Gesetz von Gay-Lussac das Volumen $V_{(-273,15)} = V_0 (1 - 273,15 \text{ °C} / 273,15 \text{ °C}) = 0$. Eine Temperatur unter $-273,15 \text{ °C}$ ist also nicht möglich.

Die Temperatur $-273,15 \text{ °C}$ ist der absolute Nullpunkt, von dem aus nur positive Temperaturwerte gezählt werden. Daraus entsteht die absolute Temperaturskala mit den absoluten Temperaturen T in Grad Kelvin $^{\circ}\text{K}^9$.

Die Temperaturunterschiede in $^{\circ}\text{K}$ und $^{\circ}\text{C}$ sind gleich. Das gilt auch für Temperaturunterschiede im $^{\circ}\text{R}^{10}$ und in $^{\circ}\text{F}^{11}$.

Temperaturumrechnungen

t_C	$= \frac{5}{9} [t_F - 32]$	$= T_K - 273,15$	$= \frac{5}{9} [T_R - 491,67]$
t_F	$= \frac{9}{5} t_C + 32$	$= \frac{9}{5} T_K - 459,67$	$= T_R - 459,67$
T_K	$= t_C + 273,15$	$= \frac{5}{9} T_F + 255,38$	$= \frac{5}{9} [T_R - 32]$
T_R	$= \frac{5}{9} t_C + 491,67$	$= T_R + 459,67$	$= \frac{5}{9} [T_K + 32]$

Tabelle 2.3.3.1

2.4 Verunreinigungen

Hauptsächlich drei Komponenten, Feststoffe, Wassergehalt und Ölanteile belasten nach der Verdichtung die Druckluft in einem erheblichen Maß. Alle Verunreinigungen der Umgebungsluft findet man demnach in der Druckluft in komprimierter Form wieder, sofern sie nicht

⁹Grad Kelvin (Kelvin 1824-1907)

¹⁰Grad Rankine

¹¹Grad Fahrenheit

2.0 Druckluft

vorher ausgeschieden wurden. Hinzu kommen weitere Fremdstoffe, die vom Kompressor selbst oder von den Rohrleitungen und den Druckluftschläuchen stammen.

Verdichtete Luft wird in den unterschiedlichsten Bereichen als Energieträger eingesetzt. Diese oft unterschiedlichen Bereiche der Fertigung erfordern auch differenzierte Qualitäten der Druckluft. Es ist verständlich, daß normale Arbeits- oder Werkluft nicht die Güte oder Qualität der Druckluft beansprucht, wie dies unbedingt erforderlich ist in höherwertigen Bereichen wie der Lebensmittel- oder Getränkeindustrie.

Auch weitere sensible Fertigungsprozesse wie die Chipherstellung in der Elektronikindustrie oder die Förderung von hygroskopischen¹² Stoffen in den chemischen Fabriken stellen äußerst differenzierte Anforderungen an die Druckluft.

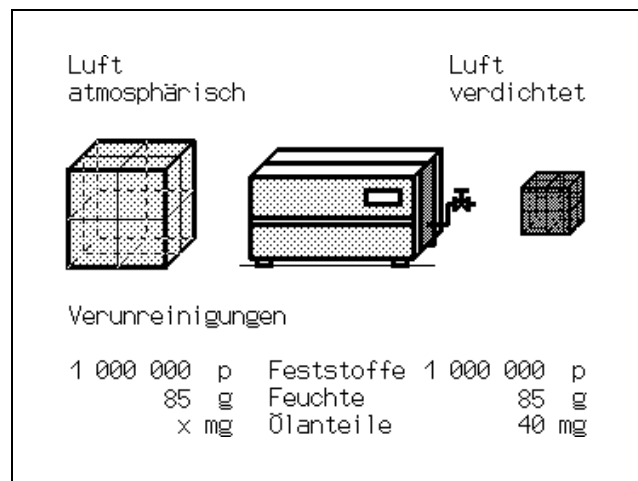


Bild 2.4.1

Werden vom Verdichter 8 m³ Luft angesaugt, um daraus 1 m³ Druckluft mit einem Druck von 8 bar zu erzeugen, dann werden auch alle in der atmosphärischen Luft¹³ enthaltenen Verunreinigungen verdichtet, die dann in 8-facher Konzentration in der Druckluft enthalten sind.

¹²wasserbindende

¹³siehe Tab. 1.6.1.1

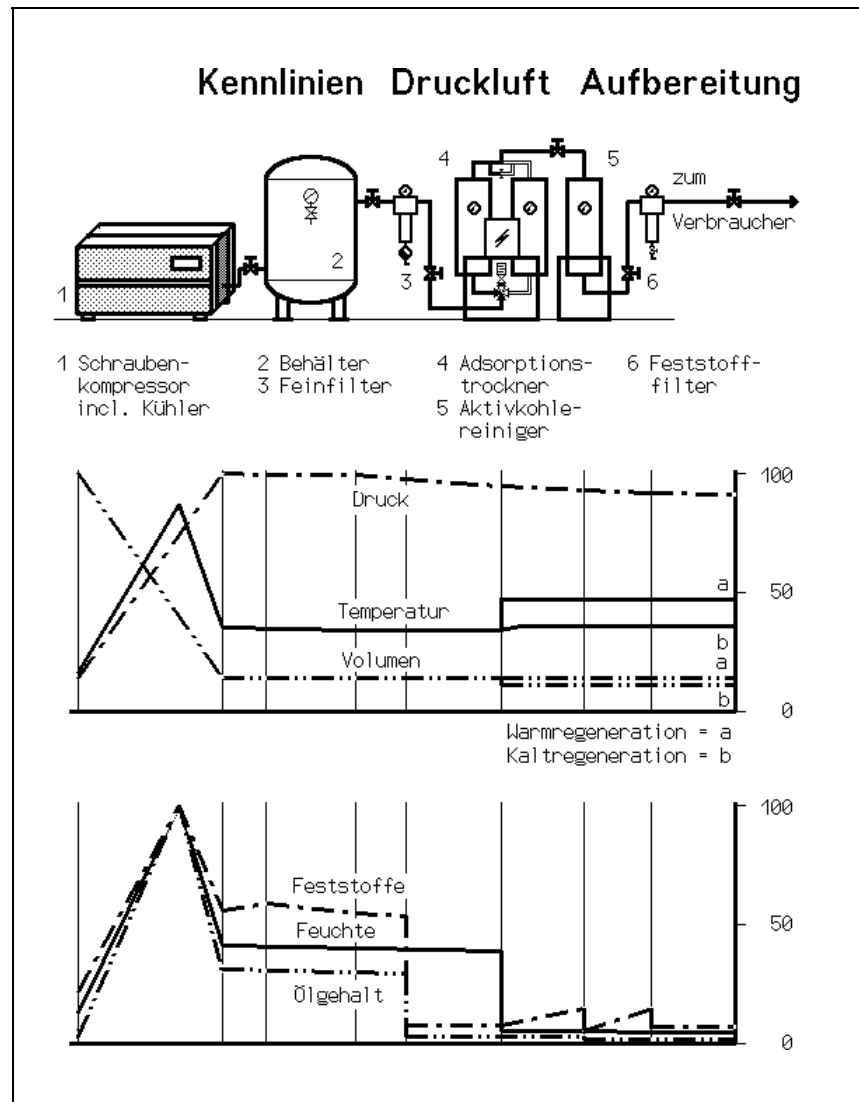


Bild 2.4.2

Die in den letzten Jahren verstärkte Diskussion über das Thema der Umweltbelastung und die damit verbundenen Probleme treffen natürlich auch auf verdichtete Luft zu. Verdichter transportieren die angesaugte Luft mit den Verunreinigungen in erhöhter Konzentration zu den Verbrauchern, um dann bei der Entspannung am Arbeitsplatz frei zu werden. Beeinträchtigungen dieser Art stehen nicht im Einklang zu den Anforderungen, die heute an die Qualität der Druckluft gestellt werden. Das Optimum kann nur über eine gezielte Druckluftaufbereitung erfolgen, die bewusst eingesetzt wird.

Die Problemlösung bleibt nicht beschränkt auf die Aufbereitungskette nach der Verdichtung sondern bezieht sich auf sämtliche Einheiten im Druckluftsystem, angefangen bei der Druckluftansaugung bis hin zum Verbraucher.

2.4.1 Feststoffverunreinigungen

Festkörperschwebstoffe in der Luft werden als Staub bezeichnet. Allgemein weisen die Staubpartikel recht unterschiedliche Größen auf. Zu den Festkörperschwebstoffen gehören auch Blütenstäube, ferner müssen Bakterien und Viren dazu gerechnet werden.

Je nach Größe werden die Stäube in 3 Klassen unterteilt:

- Grobstäube, Korngröße > 10 µm
- Feinstäube, Korngröße 1 - 10 µm
- Feinststäube, Korngröße < 1 µm

Von diesen drei Gruppen sind im wesentlichen nur die Feinststäube zu den Schwebstoffen zu rechnen.

Feinstaub bildet sehr häufig den weitaus größten Anteil an den Festkörperschwebstoffen. Oft sind 80 - 90 % dieser Anteile¹⁴ in der Luft vorhanden. Zum großen Teil sind die Partikel kleiner als 1 µm. Abhängig von der Korngröße ist die Sinkgeschwindigkeit des Staubes. In ruhender Luft kann der Fallweg Bruchteile eines Millimeters für sehr feinen Staub betragen, für sehr groben Staub aber auch mehr als 1 m/s.

Der Staubanteil in der Luft resultiert aus der geographischen Lage und dem Standort der Meßstelle sowie aus den Wetterbedingungen wie Wind, Regen, Schnee.

In der Großstadtluft beträgt die Staubkonzentration oft mehr als 0,2 mg/m³ Luft. In Industriegebieten kann dieser Anteil um ein Vielfaches stärker werden. Bisweilen werden in verhältnismäßig sauberen Gebieten Staubanteile von 5 - 10 mg/m³ und mehr festgestellt. Hohe Industrieschornsteine und geringe Sinkgeschwindigkeit der

¹⁴Gewichtsprozent

freiwerdenden Staubanteile sind die Ursache dafür. In staubigen Betrieben, vor allem auf Baustellen oder in Steinbrüchen kann der Staubanteil einige 100 mg/m^3 und sogar Werte bis etwa 250 g/m^3 erreichen.

Weitere Festkörperpartikel, die ursprünglich nicht in der Luft enthalten sind, bestehen aus Ölkohle, Zunder, Rost sowie aus Metallabrieb. Diese Festkörperpartikel kommen vom Kompressor oder lösen sich von den Innenwandungen der Rohrleitungen.

Feststoffpartikel und Schmieröle oder -fette wirken wie eine Schleifpaste in Pneumatikanlagen, besonders störend durch Verschleißwirkung an empfindlichen Stellen. Besonders verschleißfördernd sind bestimmte Staubarten wie Gußstaub, der bei der Metallbearbeitung in Werkzeugmaschinen entsteht.

Daneben gibt es Staubarten die explosionsgefährlich sind, so besonders der Staub von Aluminium und Magnesium. Andere Stäube sind gesundheitsschädlich wie Quarzstaub oder radioaktiver Staub, andere wiederum haben toxische¹⁵ Wirkung, sind chemisch aggressiv oder besitzen pyrophore¹⁶ Eigenschaften. Manche Arten von angesetztem Staub bilden Verkrustungen in Verbindung mit Wasser oder Feuchtigkeit.

Feststoffe jeglicher Art und Menge im Ansaugbereich der Kompressoren verursachen im Druckluftsystem bei und nach der Verdichtung häufig schwerwiegende Störungen. Die unterschiedlichsten Aufstellorte der Kompressoren erfordern jeweils angepaßte Maßnahmen für die am Kompressor saugseitig installierten Ansaugfilter.

Allein die folgenden, beispielhaften Feststoffarten sollen die Beeinträchtigung für die Druckluft verdeutlichen.

- Im Braun- oder Steinkohlenbergbau ist ein erhöhter Kohlenstaubanteil in der Umgebungsluft. Schutzmaßnahmen der Verdichtersysteme gegen diese Stäube sind hinsichtlich Verschleiß und Explosionsschutz erforderlich.
- Der Chemiebetrieb mit dem Ausstoß von aggressiven Bestandteilen aus der Produktion wie Schwefelstoff erfordert Maßnahmen, die gleichzeitig gezielt der Korrosion entgegenwirken.

¹⁵giftige

¹⁶leicht entzündliche

- In der Papier- und Holzindustrie sind feinste Partikel, die beim Sägen und Schneiden entstehen, oft Ursache für den Ausfall der einzelnen Fertigungsbereiche. Dieser feine Staub in der Druckluft blockiert die nachgeschalteten Werkzeuge und Maschinen.

2.4.2 Wasseranteile

Umgebungsluft enthält stets mehr oder weniger Wasserdampfanteile. Diese Wasseranteile vermischen sich als unsichtbarer Wasserdampf mit atmosphärischer Luft. Im allgemeinen ist diese Luft ungesättigt, d.h., die Lufttemperatur liegt oberhalb des jeweiligen Taupunktes, bei dem es zur Kondensation kommt.

Bei der Kompression mit nachfolgender Abkühlung auf etwa Umgebungstemperatur, also nach der isothermischen Verdichtung, steigt die Taupunktgrenze an. Dabei kondensiert nun das überschüssige Wasser aus der verdichteten Luft, bis der neue Sättigungsgrad erreicht ist. Das zusammenfließende Kondenswasser wird an geeigneter Stelle am Nachkühler der Anlage gesammelt und über automatisch arbeitende Kondensatableiter abgelassen.

Bei der Verdichtung bilden sich in der Luft ebenfalls feinste Nebeltröpfchen. In geeigneten Filtern¹⁷ kann man sie festhalten und ihnen die Gelegenheit geben, zu koalieren¹⁸. Mit Filtern können jedoch nur die Tröpfchenanteile aus dem Luftstrom entfernt werden, nicht aber der gasförmige Wasserdampf. Um auch diesen Wasserdampf aus der Druckluft zu entfernen, müssen gezielt Drucklufttrockner eingesetzt werden.

Die schädliche Wirkung von Wasser in pneumatischen Anlagen beschränkt sich nicht allein auf die Rostbildung. Zusätzlich wird außerdem der Schmierfilm von drehenden oder linearen Antrieben abgewaschen, gleitende Teile klemmen oder fressen und eine Funktionsstörung der Anlagen ist sicher nur eine Frage der Zeit. Kostenintensive Wartung ist die logische Konsequenz. Weiterhin besteht für die im Freien installierten Anlagen die Gefahr des Einfrierens. An bestimmten Berüh

¹⁷siehe Teil 4

¹⁸zusammenschließen

rungsstellen unterschiedlicher Metallarten können sich galvanische Mikroelemente bilden, die zu Oberflächenschäden führen.

2.4.3 Wasserdampf

In der Luft ist stets Wasserdampf enthalten und wird, abhängig von der Temperatur, in mehr oder weniger großen Mengen, bei der Verdichtung der Luft von den Kompressoren mit angesaugt. Liegt eine Übersättigung der Druckluft mit Wasserdampf vor, kondensiert der überschüssige Wasserdampf. Eine Übersättigung ist möglich, wenn ungesättigte Luft abkühlt oder wenn Luft bei etwa gleichbleibender Temperatur komprimiert wird. Die Erwärmung bei der Komprimierung verhindert zunächst eine Übersättigung. Trifft diese warme, feuchte Luft auf eine kalte Oberfläche, kondensiert die überschüssige Menge Wasserdampf aus der Luft wieder aus.

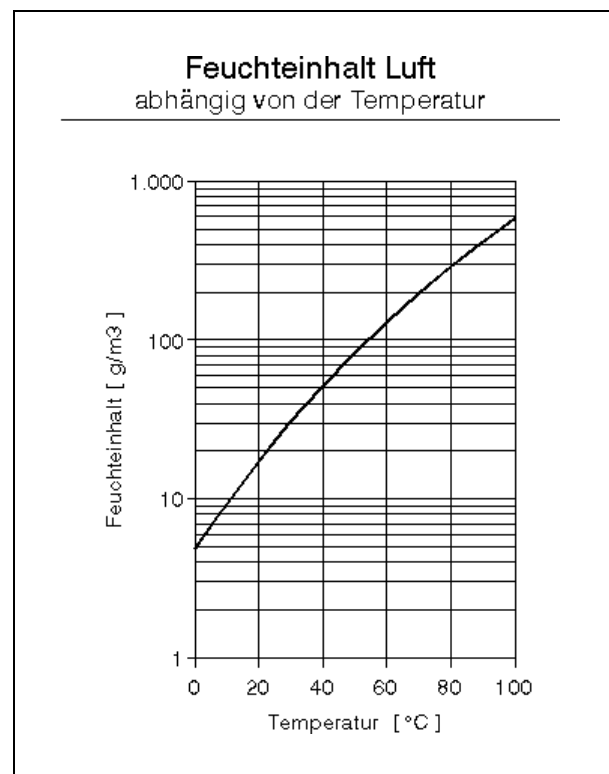


Diagramm 2.4.3.1

Verdunsten und Kondensieren stehen gegenseitig im Gleichgewicht, wenn der Verdampfungsdruck der Flüssigkeit ebenso groß ist wie der Teil des äußeren Druckes, der von dem in der Luft enthaltenen

2.0 Druckluft

Wasserdampf erzeugt wird. Der Taupunkt ist die Lufttemperatur, bei der gasförmiger Wasserdampf in abkühlender Luft zu kondensieren beginnt und sichtbar als Tau niederschlägt.

Aus Diagramm 2.4.3.1 wird ersichtlich, wieviel Wasser oberhalb der Sättigungsgrenze kondensiert oder wieviel Wasser von der ungesättigten Druckluft noch aufgenommen werden kann in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein Beispiel dazu soll diesen Zusammenhang verdeutlichen:

Bezogen auf eine Umgebungstemperatur $T_{um} = 20 \text{ °C}$ und eine relative Feuchte von 60 % beträgt der Feuchteanteil in der Umgebungsluft $10,4 \text{ g/m}^3$. Ein Kompressor mit $100 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftansaugleistung trägt insgesamt $100 \text{ m}^3/\text{h} * 10,4 \text{ g/m}^3 = 1040 \text{ g/h}$ Feuchtigkeit. Bei der Verdichtung auf $p = 7 \text{ bara}$ werden somit aus $100 \text{ m}^3/\text{h}$ Ansaugluft $12,5 \text{ Bm}^3/\text{h}$ Druckluft. Diese Druckluft ist allerdings nicht mehr 60 %, sondern bedingt durch die Verdichtung zu 100 % mit Wasserdampf gesättigt.

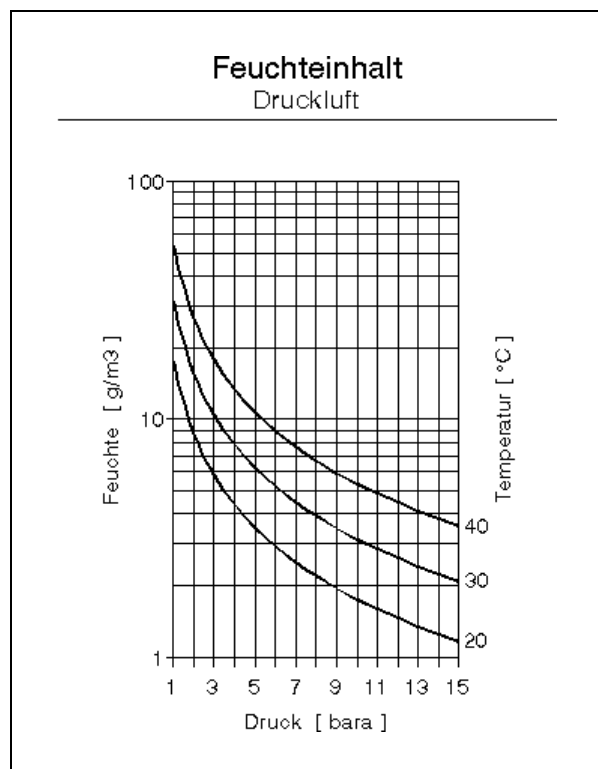


Diagramm 2.4.3.2

Bei einer Verdichterendtemperatur von $T_{\text{end}} = 30 \text{ °C}$ wird mit dieser verdichteten Luftmenge stündlich die temperaturabhängige, gesättigte Wasserfracht von $12,5 \text{ Bm}^3/\text{h} * 30,3 \text{ g/m}^3 = 378 \text{ g/h}$ in das Druckluftnetz gefördert. Die Differenz der Feuchtelast aus der Ansaug- zur Betriebsmenge von $1040 \text{ g/h} - 378 \text{ g/h} = 824 \text{ g/h}$ Wasserfracht wird im Nachkühler des Kompressors abgeschieden.

Häufig sind die Drucklufttemperaturen hinter dem Nachkühler weitaus höher, so daß die Anteile der Wasserfracht im Druckluftsystem über die im Beispiel angegebenen Werte liegen. Aus Diagramm 2.4.3.2 ist der Einfluß der Temperatur auf den Feuchteinhalt der Druckluft ersichtlich.

Pneumatiksysteme ohne Lufttrocknungsanlagen benötigen deshalb außer Wasser- auch Feuchtigkeitsabscheider. Abscheider und Filter, die hierfür geeignet sind, sollten aber erst kurz vor der Entnahmestelle der Druckluft eingesetzt werden, damit die Luft hinter dem Filter möglichst wenig Gelegenheit findet, sich weiter abzukühlen und damit wiederum Kondenswasser auszuscheiden.

Die Entspannung der Druckluft im Pneumatikgerät ist mit einer Abkühlung verbunden. Jedoch besteht wenig Gefahr, daß sich dabei Kondenswasser bildet, denn bei der Expansion sinkt gleichzeitig der Taupunkt proportional zur Entspannung.

2.4.4 Ölanteile

Bisweilen ist ein bestimmter Anteil an Öl in der Druckluft erwünscht oder sogar vorgeschrieben. Pneumatische Maschinen und Geräte erhalten ihre Schmierung durch den Anteil an Öl, der fein zerstäubt als Ölnebel der Druckluft beigegeben wird. Andere Geräte wiederum müssen völlig frei von Öl bleiben, weil sich sonst Kanäle verstopfen oder an kritischen Stellen Beläge bilden könnten und damit der Funktionsablauf gefährdet wäre.

Bei pneumatischen Förderanlagen können Ölanteile dazu führen, daß Schüttgüter zusammenbacken. Von bestimmten Materialien wie Nahrungsmittel und Getränke, aber auch von pharmazeutischen Erzeugnissen, die mit Druckluft in Berührung kommen, müssen selbst kleinste Mengen Öl ferngehalten werden.

2.0 Druckluft

Wenn jedoch mit Ölnebel geschmiert wird, kommt es auf die richtige Ölsorte und auf den Zustand des Öls an. Verschmutztes, rückständereiches oder verharztes Öl hat eine schädliche Wirkung auf die Pneumatik Elemente. Das gleiche gilt für Ölsorten, die unter dem Einfluß des Luftsauerstoffs leicht altern oder Ölschlamm bilden.

Öle der genannten Art und Beschaffenheit müssen aus der Druckluft gefiltert werden. Vor allem handelt es sich dabei um gewöhnliche Schmieröle oder um schwere Motorenöle, deren Eigenschaft in der Druckluft zu wünschen übrig läßt.

Als Erdölprodukte enthalten die normalen Schmieröle im allgemeinen einen, wenn auch geringen, Anteil an Schwefel. Hinzu kommen gewisse Wasserstoffanteile, die sich auf der Metalloberfläche absetzen. Daraus bilden sich unter dem Einfluß von Kondenswasser schwache Säuremischungen, die Dichtungen angreifen und auch auf der Metalloberfläche Korrosionsschäden verursachen.

Bei den verhältnismäßig hohen Verdichtungstemperaturen, vor allem in Kolbenkompressoren, kommt es bei den dafür anfälligen Ölen unter Einwirkung von Wasserstoff und Sauerstoff leicht zur Bildung fester Rückstände, die sich auf den gleitenden Teilen von Pneumatikgeräten als bewegungshemmende Schicht festsetzen. Für die Anwesenheit unerwünschten Öls in der Druckluft gibt es häufig vor allem folgende zwei Ursachen:

1. Die vom Kompressor angesaugte Luft enthält bereits Ölanteile. Vermieden und reduziert werden diese Ölanteile, indem der Ansaugstutzen regen- oder staubgeschützt ins Freie verlegt oder für den Kompressor selbst ein optimaler Aufstellungsort gewählt wird.
2. Der Kompressor gibt Öl an die Druckluft ab, so bei Kolbenkompressoren durch das Schmieröl, das zwischen Kolben und Zylinderwand zum Abdichten dient. Von dem stark auf Scherung beanspruchten Ölfilm lösen sich Ölpartikel und gelangen zwischen Kolben und Zylinderwand vorbei in den Verdichtungsraum. Beim ölgefluteten Rotations- und Schraubenverdichter mit Öleinspritzkühlung ist es dagegen ein vom Ölseparator nicht erfaßter Schmierölanteil, der damit dem Ölkreislauf entzogen und mit der Druckluft in das Leitungsnetz gefördert wird.

Die zweite Ursache ist bei Trockenlaufkompressoren mit ölfrei laufendem Verdichterteil, also bei Kolben- und Schraubenkompressoren

ohne Ölschmierung sowie bei Membrankompressoren, freilich nicht gegeben. Das gleiche gilt für Gebläse und Lüfter, die eine nur niedrig gespannte Druckluft erzeugen.

Daneben stammen weitere, vielfach nur in geringen Mengen auftretende Öl- oder Fettanteile von den jeweiligen Wegeventilen, Zylindern und Reglern, die unter Umständen vor dem Versand eingefettet oder eingeölt wurden.

Den weitaus größten Anteil des in der Druckluft vorhandenen Öls, oft bis zu 99 % oder mehr, trifft man als Schwebetröpfchen an. Ihr Durchmesser beträgt in der Regel weniger als 0,8 µm und geht bis unterhalb 0,1 µm.

Während größere Tröpfchen in geringerem Umfang auftreten und einen Sprühzustand darstellen, bilden die kleineren Mikrotröpfchen einen Ölnebel oder Öldunst. Diese Mikrotröpfchen lassen sich nur mit Hilfe von Hochleistungsfilter aus der Druckluft entfernen. Mit Filter grober Struktur oder Abscheider gelingt dies nicht.

2.4.5 Öldampfgehalt

Ein bestimmter Ölgehalt mit dem unterschiedlichsten Aufbau der Ölmoleküle ist, abhängig von der eingesetzten Verdichterbauart, immer in der Druckluft enthalten.

Öleingespritzte Schraubenverdichter haben den Verdichtermarkt erobert und sind aufgrund vieler Vorteile gegenüber anderen Verdichtersystemen nicht mehr aus der Druckluftherzeugung wegzudenken.

Gezielt wird bei diesem Verdichtersystem der angesaugten Umgebungsluft bei der Komprimierung Öl zugemischt. In der Regel beträgt der Restölgehalt am Druckstutzen der Schraubenverdichter ca. 3 - 15 mg/m³.

Nicht nur allein in den öleingespritzten Schraubenverdichtern, sondern auch in den bewährten Kolbenkompressoren und Vielzellenverdichtern wird mit Öl gekühlt und geschmiert.

2.0 Druckluft

Während öleingespritzte Schraubenverdichter eine maximale Öltemperatur von etwa 85 - 90 °C erreichen, erfolgt die Erhitzung des Kompressoröls im Kolbenkompressor oder Vielzellenverdichter auf einem weitaus höheren Wert.

Selbst ölfrei verdichtende Kompressorsysteme sind nicht immer frei von Ölanteilen in der Druckluft. Zum einen werden bewegliche Teile¹⁹ innerhalb des Verdichters geschmiert, zum anderen ist nicht ausgeschlossen, daß aus der Umgebungsluft Kohlenwasserstoffe angesaugt und damit konzentriert in das Leitungsnetz gefördert werden. Der Dampfgehalt der Kohlenwasserstoffe nimmt bei sinkender Temperatur ab.

Öldampfgehalt abhängig von der Temperatur

Temperatur °C	Dampfdruck Torr	Öldampfgehalt mg/m ³
10	0,00010	0,245
30	0,00037	0,801
60	0,00100	1,941
100	0,00298	5,170

Tabelle 2.4.5.1

Die in der Tabelle 2.4.5.1 und auch in diesem Abschnitt angegebenen Werte beziehen sich auf ein bestimmtes Kompressorschmieröl und können deshalb nicht allgemeingültig betrachtet werden. Basis der o.a. Werte ist ein Verdichteröl mit den technischen Daten:

Flammpunkt	250	250	°C
Gleichgewichtstemperatur	60	150	°C
Dampfdruck	0,0001	0,035	Torr
Dichte bei 15 °C	0,88	0,88	g/ml
mittl. Molekulargewicht	520	520	
Öldampfgehalt	0,002	0,6	mg/l
	2	600	mg/m ³

Tabelle 2.4.5.2

¹⁹z.B. Gleitlager

Bei den auf Mineralöl basierenden Schmierstoffen genügt es oft, den Dampfdruck mit Hilfe des Flammpunktes abzuschätzen. Zu jedem Schmieröl ist das gültige Dampfdruckdiagramm heranzuziehen.

Der Öldampfgehalt von Luft läßt sich bei Kenntnis des mittleren Molekulargewichtes des Öls abschätzen. Auf Basis der Definition

1 Mol eines Gases nimmt bei 273 °K und 760 Torr ein Volumen von 22,4 Liter ein

wird das Volumen in bezug auf mg/l für Öldampf in Luft mit 1,29 g/dm³, 760 Torr und 273 °K aus folgender Formel abgeleitet

$$V = 22,4 * \delta_L * 10^{-3} * \frac{m}{M} * \frac{760}{p} * \frac{T}{273}$$

Formel 2.4.5.1

und nach Vereinfachung, durch Multiplikation der Konstanten, folgt daraus:

$$V = 80,044 * 10^{-3} * \frac{m * T}{M * p}$$

Formel 2.4.5.2

so daß nach der Umstellung die Formel 2.4.5.3 als Basis zur Verfügung steht, um die Sättigung vom Öldampfgehalt im Luftvolumen zu bestimmen, wobei der Kehrwert von 10⁻³ und die Dimension m³/dm³ mit 10³ berücksichtigt wird:

$$V = 0,01243 * 10^{-3} * M * \frac{p}{T}$$

Formel 2.4.5.3

2.0 Druckluft

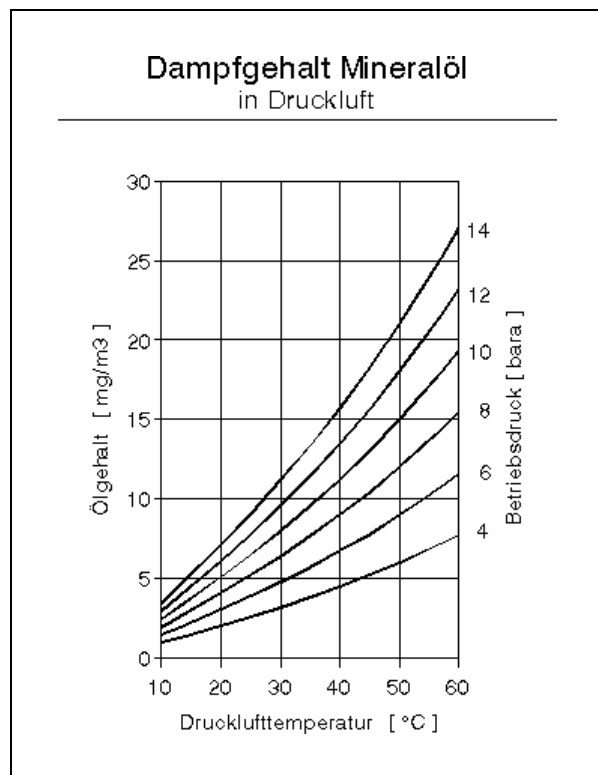
Das Ergebnis ist im folgenden Diagramm 2.4.5.1 festgehalten und zeigt den Öldampfgehalt für Mineralöl²⁰ in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.

Für die Praxis ist allerdings zu bedenken, wie weit die Gasphase mit dem Dampf des Öls wirklich gesättigt ist und bei welchen Temperaturen dies geschieht.

Es stellt sich auch die Frage, ob nicht feinste Öltröpfchen als Nebel im Luftstrom schweben und dadurch einen vielfach größeren Ölgehalt verursachen, als dem theoretischen Sättigungsdampfdruck entsprechen würde.

Wichtig ist auch, daß der Verdichter je nach Temperatur, Druck und System der Verdichtung, das Auftreten von flüchtigen Zersetzungsprodukten mehr oder weniger fördern kann.

Diese Zersetzungsprodukte können unter Einwirkung von Luftsauerstoff und hoher Erwärmung erheblich die Öldampfkonzentration im Luftstrom verfälschen und bei Restölmessungen Werte mit teilweise erheblichen Abweichungen anzeigen.



²⁰Molekulargewicht = 520; Dampfdruck = 0,0001 Torr

2.5 Gasförmige Anteile

An gasförmigen Fremdanteilen enthält die Druckluft vor allem Wasserdampf und fast immer verdunstetes bzw. verdampftes Öl. Andere gas- oder dampfförmige Beimengungen sind normalerweise in der Druckluft im störenden Umfang eigentlich nur äußerst gering enthalten, je nach Aufstellungssituation der Verdichter, wie z.B. Schwefeldioxid²¹, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe²² und andere Spurengase.

Die Gasmoleküle haben dabei eine Größe im Mittel von etwa 0,0002 - 0,005 µm. Um daraus resultierende Beeinträchtigungen für die Verdichtung und nachgeschaltete Aufbereitung auszuschließen, ist bereits bei der Wahl des Aufstellplatzes für eine Kompressorstation auf negative Einflüsse dieser gasförmigen Anteile zu achten. Kompressorhersteller empfehlen deshalb in ihren Bedienungsanleitungen nur reine und auch möglichst kühle Luft anzusaugen.

Gasförmige Anteile in Luft²³

²¹siehe Diagramm 1.6.1

²²siehe Diagramm 1.8.1

²³Quelle: Handbook of Physics and Chemistry

2.0 Druckluft

Stoff	Formel	Mol-Gew. g/mol	Anteil ppm	Anteil mg/m ³
Stickoxid	N ₂ O	46,0055	0,5	1,03
Methan	CH ₄	16,043	2	1,43
Kohlenmonoxid	CO	28,0104	5	
Schwefeldioxid	SO ₂	64,063		
Ozon	O ₃	47,99	0,01	0,02

Tabelle 2.5.1