

**Infoblatt**

# Thermodynamik

Druckluft wird in der Industrie als Energieträger wie Strom aus der Steckdose verwendet. Dabei wird häufig übersehen, welcher Aufwand für die Erzeugung, Aufbereitung und Verteilung von Druckluft erforderlich ist. Zum besseren Verständnis werden hier die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge zu erläutert und auf typische Missverständnisse hingewiesen.

## Zusammensetzung

Unter Druckluft versteht man verdichtete atmosphärische Luft. Die **wesentlichen Bestandteile unbelasteter Luft sind Stickstoff (78 vol-%) und Sauerstoff (21 vol-%)** sowie geringe Mengen weiterer Gase (1 vol-%) (Abb. 1).

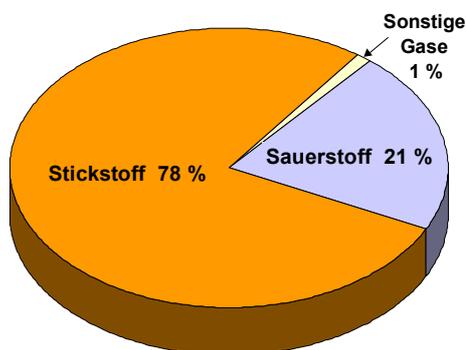


Abb. 1: Zusammensetzung trockener atmosphärischer Luft

In der atmosphärischen Luft zusätzlich enthalten ist Wasser in Form von Wasserdampf, dessen Menge jedoch stark in Abhängigkeit von Temperatur, Volumen und geographischen Bedingungen schwankt. Aus diesem Grunde wird der Wasseranteil der Luft meist getrennt von den übrigen Bestandteilen der Luft angegeben.

## Druck

Wesentlicher Parameter der Druckluft ist der Druck, der typischerweise in den Einheiten bar und Pa (1 bar =  $10^5$  Pa =  $10^5$  N/m<sup>2</sup>) angegeben wird.

Der **absolute Druck** ( $p_a$ ) ist der vom absoluten Nullpunkt aus gemessene Druck. Er wird für alle theoretischen Betrachtungen sowie in der Vakuum- und in der Gebläsetechnik benötigt.

Der **Überdruck** ( $p_{\bar{u}}$ ,  $p_e$ ) ist die praxisgerechte Bezugsgrösse und wird vom atmosphärischen Druck aus bestimmt. Absoluter Druck und Überdruck werden in der gleichen Einheit angegeben. Deshalb ist bei Druckangaben stets darauf zu achten, ob es sich um Absolutdrücke oder Überdrücke handelt. In der Praxis spricht man meist von Überdrücken, da Druckmessgeräte meist den Überdruck, also die Differenz zwischen absolutem und atmosphärischem Druck anzeigen (vgl. Abb. 2). Zur Vermeidung von Verwechslungen kann es sinnvoll sein, bei Druckangaben den Bezug durch einen Index anzugeben.

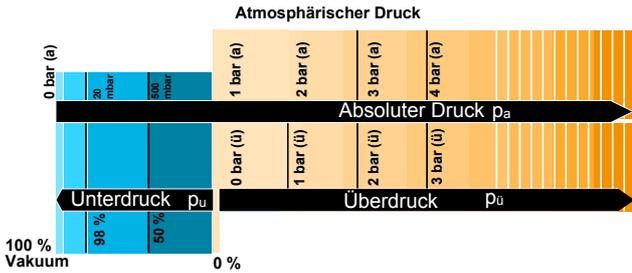


Abb. 2: Überdruck, absoluter Druck und Unterdruck

## Wassergehalt

Die maximale Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf wird durch den Sättigungsdampfdruck  $p_s$  beschrieben. Wie viel Wasser in der Luft aufgenommen werden kann, ist allein eine Funktion der Temperatur. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Aufnahmefähigkeit deutlich zu (Abb. 3).

Bei Abkühlung von Luft besteht deshalb stets die Gefahr, dass der enthaltene Wasserdampf auskondensiert und Kondensat entsteht.

Kondensat kann auch ausfallen, wenn durch die Verdichtung der Sättigungsdampfdruck überschritten wird. Wird atmosphärische feuchte Luft bei konstanter Temperatur verdichtet, so steigt auch der Partialdruck des Wasserdampfes entsprechend dem Anstieg des Gesamtdruckes an. Wird der Sättigungspartialdruck bei dieser Temperatur durch die Verdichtung überschritten, fällt Kondensat aus. Da die Luft den Kompressor mit deutlich erhöhter Temperatur verlässt, fällt das Kondensat erst bei der Rückkühlung der verdichteten Luft aus, wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Nach dem Unterschreiten fällt Kondensat kontinuierlich an, also auch im Nachkühler. Dort entstehen ca. 60-80 % der Kondensatmenge. Eine weitere gezielte Abscheidung

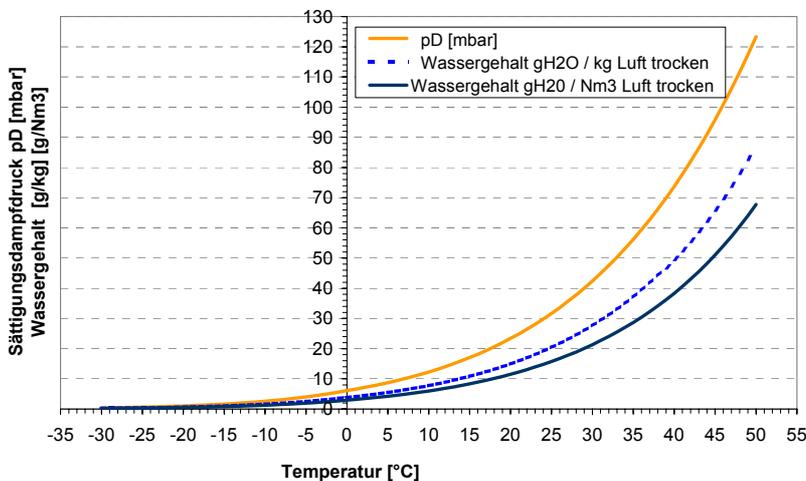


Abb. 3: Sättigungsdampfdruck und Wassergehalt der Luft

und Trocknung der Druckluft erfolgt anschliessend im Drucklufttrockner oder ungewollt in der Druckluftleitung.

Wird Luft mit einer relativen Feuchte von 60 % und einer Temperatur von 15 °C auf einen Druck von 7 bar verdichtet und anschliessend wieder auf 25 °C abgekühlt, so fallen pro Kubikmeter verdichteter Luft 30 g Kondensat an.

Weitere Informationen hierzu finden Sie im Infoblatt Aufbereitung.

## Leistungsbedarf für die Verdichtung

Zur thermodynamischen Beschreibung von Zustandsänderungen von Luft (Verdichtung, Entspannung, Abkühlung) kann in der für die Drucklufttechnik relevanten Temperatur und dem relevanten Druckbereich die Luft als ideales Gas betrachtet werden. Die ideale Gasgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Druck ( $p$ ), Volumen ( $V$ ) und Temperatur ( $T$ ) eines Gases.

Es gilt:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

bzw. bei Bezug auf die Stoffmenge  $n$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

mit  $R$  als der universellen Gaskonstante mit dem Wert  $R = 8,3144 \text{ J}/(\text{mol K})$ . Es gilt demnach, dass das Produkt aus Druck und Volumen der Luft proportional zur Temperatur ist. Mit Hilfe der idealen Gasgleichung können die auftretenden Zustandsänderungen beschrieben werden.

Die beiden wichtigsten Arten von Zustandsänderungen sind die isotherme (Druckänderung bei konstanter Temperatur) und die reversibel adiabate (isentrop) Zustandsänderung (Druckänderung ohne Wärmezufuhr- oder Abfuhr).

Für die isotherme Zustandsänderung gilt:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

mit  $R$  und  $T = \text{const.}$

Die spezifische Arbeit für eine Verdichtung ergibt sich aus der Volumenänderungsarbeit zu

$$w_{12} = -\int_1^2 p \cdot dv = -p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Für die **adiabate** Zustandsänderung gilt:

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

mit  $R = \text{const.}$

Für die Temperatur gilt

$$\frac{T_1}{T_2} = \left[ \frac{v_2}{v_1} \right]^{(\kappa-1)} = \left[ \frac{p_1}{p_2} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

und für die spezifische Arbeit ergibt sich

$$w_{1,12} = \int_1^2 v \cdot dp = \int_1^2 c_p \cdot dT = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Der Isentropenexponent  $\kappa$  hat für Luft im für die Druckluft relevanten Zustandsbereich einen Wert von  $\kappa = 1,4 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ .

Der theoretische Energiebedarf für die Verdichtung der Luft ist somit abhängig vom Verdichtungsverhältnis und der Art der Zustandsänderung. Während die isotherme Verdichtung zu der geringsten spezifischen Arbeit führt, ist der reale Zustandsverlauf bei der Verdichtung (polytrophe Verdichtung) näher an der reversiblen adiabaten Verdichtung.

In der Praxis sind diese optimalen Werte nicht erreichbar, da der Verdichtungsprozess mit Verlusten behaftet ist. Gute Druckluftanlagen zeichnen sich durch spezifische Leistungen aus, die ca. 45 % über den theoretisch möglichen der adiabaten Verdichtung liegen (Abb. 4). Zu berücksichtigen ist dabei, dass mit zunehmender Leistungsgrösse der Anlage der spezifische Leistungsbedarf abnimmt. Die gemachten spezifischen Leistungsangaben beinhalten dabei alle elektrischen und mechanischen Verluste bei der Druckluftherzeugung. Sie sind nicht direkt vergleichbar mit der auf dem Typenschild des Antriebsmotors des Verdichters angegebenen Nennleistung. Die spezifische Leistungsaufnahme einer Druckluftanlage sollte im guten Bereich liegen. Die untere Begrenzungslinie des guten Bereichs wird durch die adiabate Verdichtung beschrieben, die einen Idealfall darstellt und deshalb von ausgeführten Anlagen nicht erreicht werden kann.

Weitere Informationen zur Druckluftherzeugung finden Sie im Infoblatt Erzeugung.

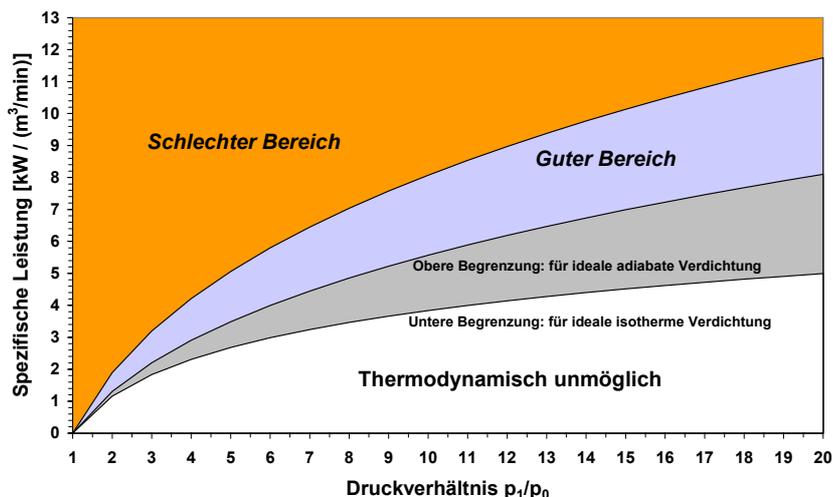


Abb. 4: Spezifischer Leistungsbedarf für die Druckluftherzeugung

## Druckverluste

Nach Erzeugung und Aufbereitung muss die Druckluft in einem Netz zu den Verbrauchsstellen verteilt werden. Zusätzlich zu den in der Aufbereitung entstehenden Druckverlusten treten bei der Druckluftverteilung durch den Rohrwiderstand weitere Druckverluste auf, die einen Energieverlust darstellen. Der Reibungsverlust ist bei turbulenter Strömung deutlich grösser als bei laminarer Strömung (Abb. 5).

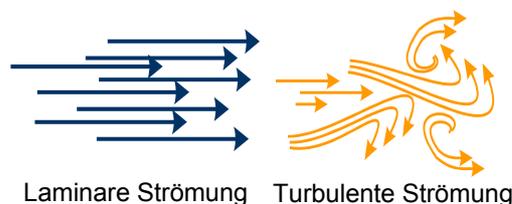


Abb. 5: Laminare und turbulente Strömung

Ob sich in der Rohrleitung eine laminare Strömung einstellen kann, ist dabei im Wesentlichen von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Der Einfluss der geringfügig unterschiedlichen Rohrrauigkeiten ist zu vernachlässigen, entscheidender sind die ggf. durch die Rohrverbindungen entstehenden Querschnittsveränderungen. Im Auslegungsbereich von Druckluftverteilungsnetzen herrscht weitgehend turbulente Strömung in der gesamten Druckluftverteilung vor. Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit steigt jedoch der Turbulenzgrad an. Je grösser die Strömungsgeschwindigkeit ist, umso grösser werden die Strömungsverluste.

Für inkompressible Strömungen ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit aus dem Verhältnis von Volumenstrom und Querschnittsfläche.

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

Zu klein dimensionierte Rohrquerschnitte führen zu grossen Strömungsgeschwindigkeiten und hohen Druckverlusten in der Rohrleitung. Zur Begrenzung dieser Verluste sollte die Strömungsgeschwindigkeit in der Druckluftverteilung möglichst kleiner als 6 m/s sein.

Weitere Informationen zur Druckluftverteilung finden Sie im Infoblatt Verteilung.

## **Druckluftmessung**

Obwohl die Druckluft ein hochwertiger und teurer Energieträger ist, wird meist weder der Druckluftverbrauch noch der Energiebedarf für die Erzeugung und Aufbereitung erfasst. Die Messung und Erfassung des Druckluftverbrauchs stellt jedoch ein Schlüsselement für die Kosten- und Energieoptimierung im Bereich der Druckluft dar. Weitere Einzelheiten dazu erfahren Sie im Infoblatt Messtechnik.

In der Infoblatt-Reihe finden Sie auch zu anderen Themenbereichen weitere Informationen. Diese sollen erste Auskünfte liefern, können die problem-spezifische Beratung durch den Fachmann jedoch nicht ersetzen.

Die Kampagne effiziente Druckluft Schweiz motiviert und unterstützt Betreiber von Druckluftanlagen in der Schweiz bei der Umsetzung von Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Druckluftversorgung. Die Kampagne wird vom Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung geleitet und von Bundesamt für Energie (BfE) und dem Stromsparfonds des Elektrizitätswerks Zürich (ewz) unterstützt. Sie ist eingebunden in das Programm EnergieSchweiz. Mitträger sind die folgenden Unternehmen aus der Druckluftbranche: Airtag, Atlas Copco, Donaldson, Dopag, Kaeser, Oetiker, Prematic, Servatechnik, Vektor.

Weitere Informationen finden Sie unter [www.druckluft.ch](http://www.druckluft.ch)

Dieses Infoblatt wurde im Rahmen der Kampagne „Druckluft effizient“ erstellt, die zwischen 2001 und 2004 in Deutschland durchgeführt wurde. Diese Kampagne wurde von der Deutschen Energie Agentur (dena), dem Fraunhofer Institut System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI, Gesamtprojektleitung) und dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) mit Unterstützung des Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) und Industrieunternehmen durchgeführt (<http://www.druckluft-effizient.de/kontakt/partner/industrie.php>).

© Druckluft effizient / Druckluft Schweiz, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Juni 2006



effiziente Druckluft – eine Kampagne von EnergieSchweiz  
[www.druckluft.ch](http://www.druckluft.ch)