

## 4. Regelung von Kompressoren

Das Ziel der Regelung ist die Minimierung von Energieverbrauch und Verschleiß und die Maximierung der Verfügbarkeit.

Es gibt verschiedene Regelgrößen, abhängig von Bauart, Größe und Einsatzbereich:

- der Verdichtungs-Enddruck (Netzdruck).
- der Saugdruck.
- der geförderte Volumenstrom.
- die aufgenommene elektrische Leistung des Verdichtermotors.
- die Luftfeuchtigkeit hinter dem Verdichter.

Die Regelung des Verdichter-Enddruckes hat gegenüber allen anderen Regelgrößen die größte Bedeutung.

### 4.1 Druckdefinitionen

#### Netzdruck $p_N$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Netzdruck  $p_N$  ist der Druck am Kompressoraustritt hinter dem Rückschlagventil. Dabei handelt es sich um den Druck im Leitungsnetz.

#### Der Netzdruck-Sollwert $p_{Ns}$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Netzdruck-Sollwert  $p_{Ns}$  ist der Druck der im Leitungsnetz mindestens vorhanden sein muß.

#### Systemdruck $p_s$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Systemdruck  $p_s$  ist der Druck im Innern eines Schraubenkompressors bis zum Mindestdruck-Rückschlagventil.

#### Einschaltdruck $p_{min}$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Einschaltdruck  $p_{min}$  ist der Druck, bei dessen Unterschreiten der Kompressor einschaltet.

Der Einschaltdruck  $p_{min}$  sollte mindestens 0,5 bar über dem Sollwert des Netzdrucks  $p_N$  liegen.

#### Ausschaltdruck $p_{max}$ [ bar<sub>ü</sub> ]

Der Ausschaltdruck  $p_{max}$  ist der Druck, bei dessen Überschreiten der Kompressor abschaltet.

Der Ausschaltdruck  $p_{max}$  sollte bei Kolbenkompressoren ca. 20% über dem Einschaltdruck liegen ( z.B. Einschaltdruck 8 bar, Ausschaltdruck 10 bar ).

Bei Schraubenkompressoren sollte der Ausschaltdruck  $p_{max}$  0,5 bis 1 bar über dem Einschaltdruck liegen ( z.B. Einschaltdruck 9 bar, Ausschaltdruck 10 bar ).

# Regelung von Kompressoren

---

## 4.2 Betriebszustände

Der Betriebszustand ist die aktuelle Situation in der sich ein Kompressor befindet. Die Betriebszustände sind die Grundlage für die Kompressorregelungen.

### 4.2.1 Stillstand ( $L_0$ )

Der Kompressor steht still, ist aber betriebsbereit. Bei Druckluftbedarf schaltet er automatisch in den Lastlauf.

### 4.2.2 Leerlauf ( $L_1$ )

Der Antrieb des Kompressor läuft, es wird keine Luft verdichtet. Der Kompressor spart die zur Verdichtung notwendige Energie teilweise ein. Bei Druckluftbedarf schaltet er ohne Verzögerung in den Lastlauf.

Der Leerlaufbetrieb reduziert die Motorschaltspiele und vermindert damit den Verschleiß.

Zur Verwirklichung der Leerlaufregelung werden verschiedene Techniken angewendet:

#### **Umlaufschaltung**

Die Saugleitung wird direkt mit der Druckleitung verbunden. Es treten hohe Druckverluste auf und der Einbau eines Rückschlagventils ist unbedingt erforderlich.

#### **Rückströmschaltung**

Die Saugventile des Kompressors werden während des Verdichtungsvorgangs nicht geschlossen. Die Luft komprimiert nicht, sie strömt zur Ansaugseite zurück.

Die Rückströmschaltung ist auch zur Anlauf-Entlastung geeignet, da schon der erste Arbeitshub voll entlastet ist.

#### **Saugleitungsverschluß**

Ein Ventil verschließt die Saugleitung des Kompressors. Der Ansaugvolumenstrom wird auf Null reduziert und es steht keine Luft für die Verdichtung zur Verfügung. Die Druckverluste sind nur gering.

#### **Druckleitungsverschluß**

Ein Ventil verschließt die Druckleitung des Kompressors. Das Ausschieben der komprimierten Druckluft wird verhindert. Es kann kein Volumenstrom entstehen.

## 4.2.3 Teillast

Die Liefermenge des Verdichters wird dem jeweiligen Bedarf an Druckluft angepaßt. Der Energiebedarf geht bei verringerter Liefermenge zurück. Der Netzdruck  $p_N$  ist konstant.

Es gibt verschiedene Methoden den Volumenstrom zu variieren. Gegebenenfalls können diese auch miteinander kombiniert werden:

### Drehzahl-Regelung

Eine Veränderung der Motordrehzahl variiert die Liefermenge des Kompressors. Sie findet in erster Linie bei Kompressoren mit Verbrennungsmotor Verwendung. Bei elektrisch angetriebenen Kompressoren wird die Drehzahl-Regelung meist mit Hilfe eines Frequenzumrichters realisiert.

Die Liefermenge wird stufenlos von 40-100 % geregelt.

### Zuschaltraum-Regelung ( nur Kolbenkompressoren )

Durch Vergrößerung des schädlichen Raums kommt es zu einer stärkeren Rückexpansion der verdichteten Luft. Öffnet man mehrere Zuschalträume nacheinander, läßt sich die Liefermenge stufenförmig senken. Es gibt auch Varianten, bei denen ein Zuschaltraum stufenlos erweitert werden kann.

### Rückström-Regelung ( nur Kolbenkompressoren )

Die Liefermenge des Kompressors wird durch Öffnen der Saugventile während des Verdichtungshubes reduziert. Die Öffnungszeit der Saugventile bestimmt die Verminderung des verdichteten Volumenstromes.

Es ist eine Teillastregelung von ca. 25 - 100 % der Liefermenge möglich. Bleibt das Saugventil während des gesamten Verdichtungshubes geöffnet, geht die Liefermenge auf Null zurück.

### Saugdrossel-Regelung

Eine verstellbare Drossel in der Ansaugleitung reduziert das Ansaugvolumen. Zur automatischen Regelung verwendet man ein Druckservoventil, das mit dem jeweiligen Netzdruck beaufschlagt wird. Nimmt der Netzdruck ab, so öffnet sich das Drosselventil entsprechend und der Kompressor saugt mehr Luft an, die Liefermenge steigt. Sobald der Netzdruck stabil bleibt schließt das Drosselventil und der Kompressor arbeitet im Leerlauf.

Die Liefermenge variiert stufenlos von 0 - 100 %. Dabei sinkt der elektrische Leistungsbedarf nicht unter 70 %.

## 4.2.4 Lastlauf ( $L_2$ )

Der Kompressor liefert seine maximale Liefermenge. Er verbraucht dabei die maximale Energie.

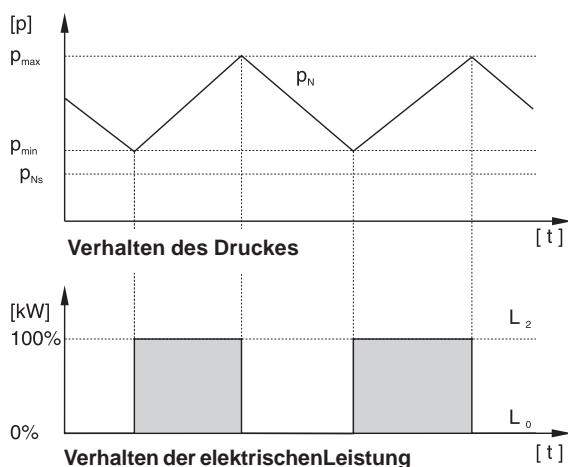
# Regelung von Kompressoren

## 4.3 Regelung einzelner Kompressoren

Die Regelung von Kompressoren verfolgt zwei Ziele: Energieersparnis und Verschleißminimierung.

Um diese Ziele zu erreichen, werden die 4 Betriebszustände der Kompressoren in den verschiedenen Regelungsarten miteinander kombiniert. Welche Regelung zum Einsatz kommt, hängt von den Randbedingungen ab.

### 4.3.1 Aussetz-Regelung



Bei der Aussetzregelung schaltet ein Druckschalter oder ein Kontaktmanometer den Kompressor netzdruckabhängig.

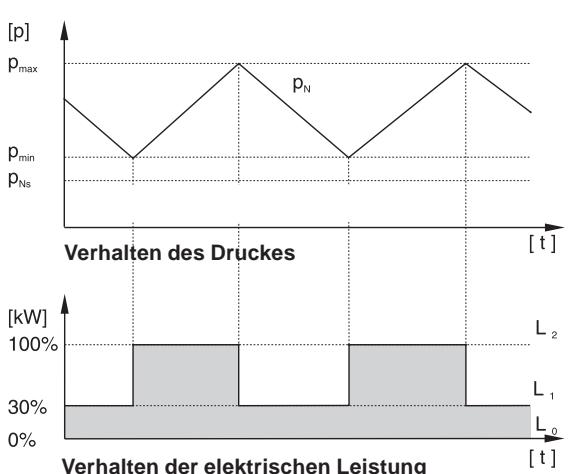
Der Verdichter hat zwei Betriebszustände, **Lastlauf (L<sub>2</sub>)** und **Stillstand (L<sub>0</sub>)**.

Diese Regelung hat die günstigste Energiebilanz aller Regelungsarten. Sie empfiehlt sich, wenn ein großer Druckluftbehälter zur Verfügung steht. Ein großes Speichervolumen reduziert außerdem die Zahl der Motorschaltspiele.

- Der Netzdruk  $p_N$  steigt bis zum Ausschaltdruck  $p_{max}$ . Der Kompressor schaltet in den **Stillstand (L<sub>0</sub>)**.
- Der Netzdruk  $p_N$  fällt auf den Einschaltdruck  $p_{min}$ . Der Kompressor schaltet in den **Lastlauf (L<sub>2</sub>)**.

Bild 4.1 :  
Funktionsdiagramm der Ausschalt-Regelung

### 4.3.2 Leerlauf-Regelung



Ein Druckschalter oder ein Kontaktmanometer schaltet den Kompressor netzdruckabhängig in Last- oder Leerlauf.

Im **Leerlauf (L<sub>1</sub>)** läuft der Antriebsmotor ununterbrochen weiter, ohne daß der Kompressor Druckluft fördert. Der elektrische Leistungsbedarf sinkt auf ca. 30 % des Lastlaufbedarfs.

Der kontinuierliche Lauf des Antriebs minimiert die Motorschaltspiele, die besonders bei großen Motoren erhöhten Verschleiß verursachen.

Der Leerlaufbetrieb wird bei Druckluftnetzen mit relativ kleinem Speichervolumen eingesetzt um die zulässige Schalthäufigkeit des Antriebsmotors nicht zu überschreiten.

- Der Netzdruk  $p_N$  steigt bis zum Ausschaltdruck  $p_{max}$ . Der Kompressor schaltet in den **Leerlauf (L<sub>1</sub>)**.
- Der Netzdruk  $p_N$  fällt auf Einschaltdruck  $p_{min}$ . Der Kompressor schaltet in den **Lastlauf (L<sub>2</sub>)**.

Bild 4.2 :  
Funktionsdiagramm der Leerlauf-Regelung

### 4.3.3 Verzögerte Aussetz-Regelung

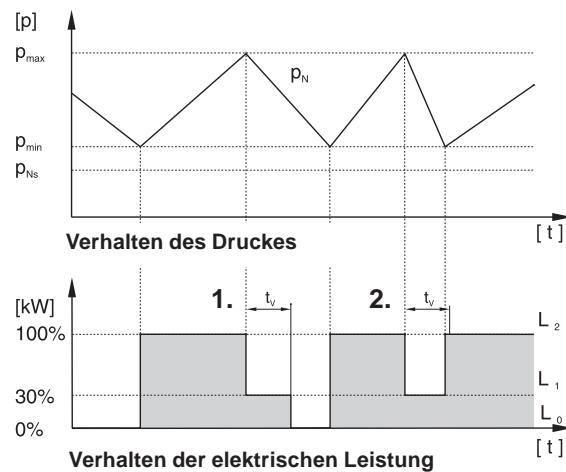


Bild 4.3  
Funktionsdiagramm der verzögerten  
Ausschalt-Regelung

Ein Druckschalter oder ein Kontaktmanometer arbeitet mit einem Zeitelement zusammen und steuert den Kompressor netzdruckabhängig.

Der Kompressor durchläuft die Betriebszustände **Lastlauf** ( $L_2$ ), **Leerlauf** ( $L_1$ ) und **Stillstand** ( $L_0$ ). Die Betriebszustände werden über das Zeitelement  $t_v$  miteinander verknüpft.

Die verzögerte Aussetzregelung verbindet die Vorteile der Aussetzregelung und der Leerlaufregelung miteinander. Sie ist ein Mittelweg mit günstigerem Energieverbrauch als die Leerlaufregelung.

Die verzögerte Ausschalt-Regelung arbeitet mit zwei Schaltvarianten :

#### 1. Variante

- Der Netzdruck  $p_N$  steigt bis zum Ausschaltdruck  $p_{max}$ . Der Kompressor schaltet in den **Leerlauf** ( $L_1$ ).
- Der Netzdruck  $p_N$  hat den Einschaltdruck  $p_{min}$  nach Ablauf der Zeit  $t_v$  nicht erreicht. Der Kompressor schaltet in den **Stillstand** ( $L_0$ ).
- Der Netzdruck  $p_N$  fällt unter den Einschaltdruck  $p_{min}$ . Der Kompressor schaltet in den **Lastlauf** ( $L_2$ ).

#### 2. Variante

- Der Netzdruck  $p_N$  steigt bis zum Ausschaltdruck  $p_{max}$ . Der Kompressor schaltet in den **Leerlauf** ( $L_1$ ).
- Der Netzdruck  $p_N$  erreicht den Einschaltdruck  $p_{min}$  vor Ablauf der Zeit  $t_v$ . Der Kompressor schaltet in den **Lastlauf** ( $L_2$ ).

Es gibt 2 Möglichkeiten der Aktivierung des Zeitelements  $t_v$  :

1. Beim Einschalten des Kompressors ( $p_{min}$ ) startet das Zeitelement  $t_v$ . Hier ergeben sich geringere Leerlaufzeiten und somit geringere Energiekosten als bei 2.
2. Beim Erreichen des Ausschaltdrucks ( $p_{max}$ ) startet das Zeitelement  $t_v$ .

# Regelung von Kompressoren

## 4.3.4 Teillast-Regelung

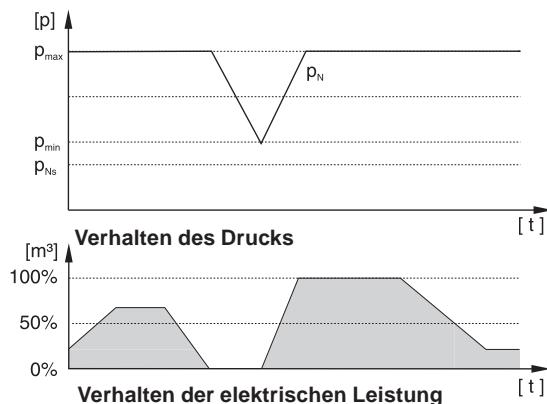


Bild 4.4  
Funktionsdiagramm der Teillast-Regelung

### 4.3.4.1 Stufenlose Leistungsregelung

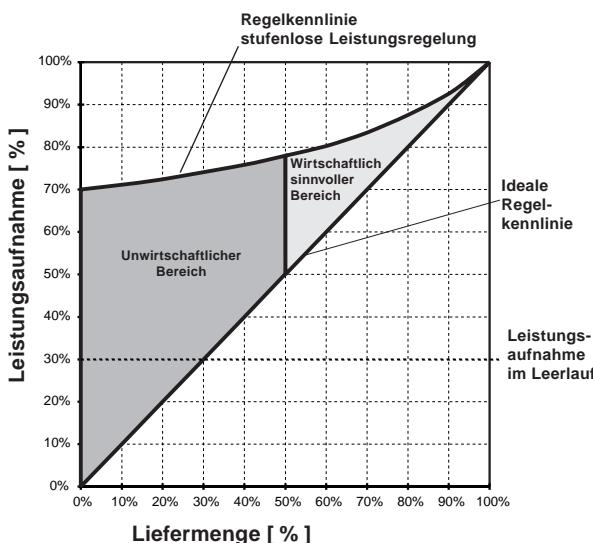


Bild 4.5 :  
Zusammenhang zwischen Liefermenge und Leistungsbedarf beim Einsatz der stufenlosen Leistungsregelung.

### 4.3.4.2 Frequenzregelung

Der Volumenstrom des Verdichters wird dem jeweiligen Bedarf an Druckluft angepaßt.

Der Netzdruck  $p_N$  ist auf Grund der variablen Leistungsregelung weitgehend konstant. Die Schwankungen von  $p_N$  sind, je nach Methode der Teillast-Regelung, unterschiedlich.

Die Teillast-Regelung wird bei Systemen mit kleinem Speicherumfang und/oder starken Verbrauchsschwankungen eingesetzt. Die Anzahl der Schaltspiele sinkt.

Unabhängig von der ARS-Steuerung bietet BOGE optional eine **stufenlose Leistungsregelung** für Schraubenkompressoren mit Öleinspritzkühlung an. Diese Regelung greift in die Vorgänge des Ansaugreglers ein und arbeitet nach dem Saugdrosselprinzip.

Die **stufenlose Leistungsregelung** von BOGE ist werkseitig auf eine Fördermenge zwischen 50 und 100 % der Liefermenge eingestellt. Sinkt die Liefermenge unter 50 %, arbeitet der Kompressor unwirtschaftlich. Je nach Schaltzyklus schaltet der Kompressor aus oder arbeitet im Leerlaufbetrieb weiter.

Die Frequenzregelung ermöglicht eine Liefermengenregelung zwischen 0 % (Leerlauf) und dem Regelbereich von 40 bis 100 % bei einer Leistungsaufnahme zwischen 35 und 110 %. Die Teillast-Regelung erfolgt durch Drehzahländerung des Antriebsmotors der durch einen Frequenzumrichter angesteuert wird.

Sinkt die Liefermenge unter 40 % arbeitet der Kompressor unwirtschaftlich. Je nach Schaltzyklus schaltet der Kompressor aus oder arbeitet im Leerlaufbetrieb weiter. Die Frequenzregelung arbeitet bei ölfrei verdichtenden Schraubenkompressoren am wirtschaftlichsten.

## 4.4. Das ARS-Steuerungskonzept

BOGE-Schraubenkompressoren und superschallgedämmte Kolbenkompressoren sind mit dem modernen **ARS**-Steuerungskonzept ( **Autotronic**, **Ratiotronic**, **Supertronic** ) ausgestattet.

Die **ARS**-Steuerung unterscheidet sich in der Ausstattung und den Überwachungsfunktionen.

**ARS** ist ein integriertes Steuerungs- und Überwachungskonzept, das zwei Ziele anstrebt:

- Energieeinsparung und damit Reduzierung der laufenden Kosten.
- Verlängerung der Lebensdauer des Kompressors durch möglichst geringen Verschleiß.

Die ARS-Steuerung strebt bei Schraubenkompressoren über einen Microcontroller den kostengünstigen Aussetzbetrieb unter Berücksichtigung der max. zulässigen Motorschaltspiele an. Kolbenkompressoren arbeiten nur im wirtschaftlichen Aussetzbetrieb

Alle programmierten Daten werden in einem Speicherbaustein ( EEPROM ) gespeichert, der elektrisch beschrieben und wieder gelöscht werden kann. Die gespeicherten Informationen sind dadurch auch nach einem Spannungsausfall wieder verfügbar.

### Modularer Aufbau

Die ARS-Steuerung setzt sich aus einzeln erhältlichen Standardkomponenten zusammen. Die einzelnen Bauteile können auch nachträglich leicht ergänzt werden. Die Steuerungen lassen sich auf diese Weise optimal den individuellen Ausstattungswünschen des Kunden anpassen. Die schnelle Austauschbarkeit der Steuerungen bei Ausfällen erhöht die Verfügbarkeit des Kompressors. Die zeit- und kostenaufwendige Fehlersuche durch Spezialisten entfällt.

# Regelung von Kompressoren

## 4.4.1 Automatic



Bild 4.6 :  
Die BOGE Automatic für Kolbenkompressoren

Die **Automatic** ist die Steuerung für superschallgedämmte Kolbenkompressoren. Sie bietet:

- Energiesparende Aussetz-Regelung über einen Druckschalter.
- Betriebszustandsanzeige: Lastlauf.
- Betriebsstundenanzeige.
- Netzdruckanzeige.
- Automatischen lastfreien Wiederanlauf nach Spannungsauftakt.
- Anschlußmöglichkeit an die übergeordnete Steuerung mehrerer Kompressoren **MCS**.

## 4.4.2 Autotronic

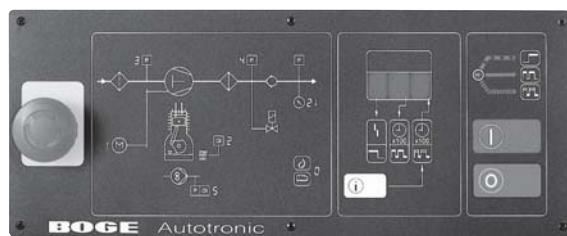


Bild 4.7 :  
Die BOGE Autotronic für Kolbenkompressoren

Die **Autotronic** ist eine intelligente Steuerungs- und Überwachungseinheit für Schrauben- und Kolbenkompressoren. Neben den Möglichkeiten der Automatic bietet sie für Kolbenkompressoren:

- Komfortables und übersichtliches Bedienfeld mit 7-Segment-Anzeige, Leuchtdioden und Fließschema.
- Betriebszustandsanzeige.
- programmierbare Steuerung.
- Schutz der wichtigen Programm-Parameter durch Codeabfrage.
- Integrierten Testmodus für alle Ein- und Ausgänge.
- Anzeige der wichtigsten Störungs- und Warnmeldungen (z.T. Option).
- Betriebsart **Leerlauf** (Option).
- Leerlaufstundenanzeige (Option).

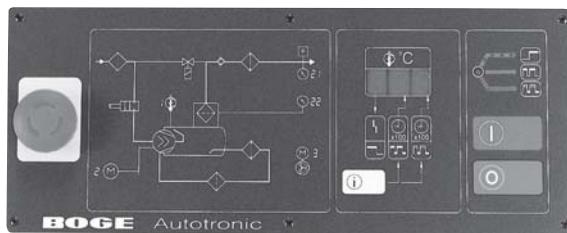


Bild 4.8 :  
Die BOGE Autotronic für Schraubenkompressoren

Für Schraubenkompressoren bietet die **Autotronic** zusätzliche Austattungen :

- dynamische Vollast-Leerlaufregelung (verzögerte Aussetzungsschaltung).
- automatische Wahl der günstigsten Betriebsart.
- automatische Optimierung der Motorschaltspiele.
- Serienmäßige Anzeige der wichtigsten Störungs- und Warnmeldungen.
- Anzeige und Überwachung der Verdichtungs-Endtemperatur.

## 4.4.3 Ratiotronic

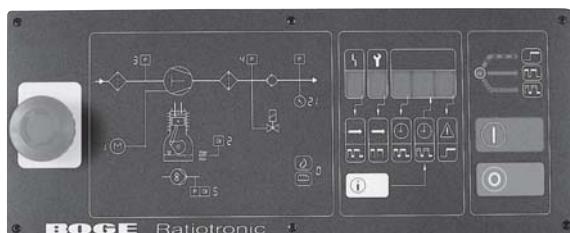


Bild 4.9 :  
Die BOGE Ratiotronic für Kolbenkompressoren

Die **Ratiotronic** ist eine Erweiterung der Autotronic für Schrauben- oder Kolbenkompressoren. Sie bietet folgende zusätzliche Möglichkeiten :

- Anzeige zusätzlicher Störungs- und Warnmeldungen (z.T. Option).
- Vorort- oder Fernbetrieb.
- Externe Anzeige der Betriebsdaten und Meldungen.

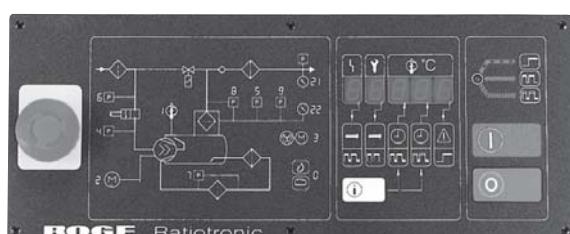


Bild 4.10 :  
Die BOGE Ratiotronic für Schraubenkompressoren

## 4.4.4 Supertronic

Die **Supertronic** ist eine komplexe Bedien- und Überwachungseinheit für Schraubenkompressoren. Im Vergleich zu den anderen Steuerungen hat sie umfangreiche zusätzliche Funktionen :

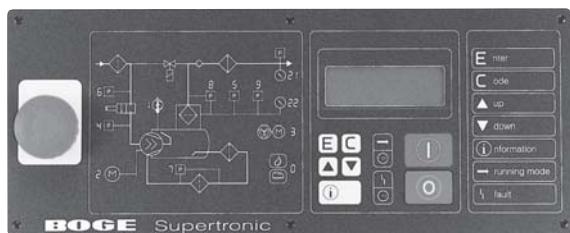


Bild 4.11 :  
Die BOGE Supertronic für Schraubenkompressoren

- Übersichtliche LCD-Anzeige mit 4 x 20 Zeichen mit Klartextausgabe.
- Einstellung des Netzdruckes über Tastatur.
- Umfangreiche Anzeige und Überwachung der wichtigen Betriebsdaten.
- Umfassende Überwachung des Kompressors  
Anzeige der Störungs- und Warnmeldungen in der  
LCD-Anzeige.
- Integrierte, elektronische Echtzeituhr für Ein- / Ausschaltung. Die Bedienung erfolgt über Tastatur.
- Einstellbarkeit aller Betriebsparameter über die Tastatur.
- Zugriffsmöglichkeit auf alle Funktionen mit wenigen zusätzlichen Tasten.

# Regelung von Kompressoren

## 4.5 Regelung von mehreren Kompressoren

Für Druckluftanwender mit hohem, stark schwankendem Verbrauch ist es ungünstig, einen einzelnen Großkompressor zu installieren. In diesen Fällen ist ein Kompressorverbundsystem, das aus mehreren Kompressoren besteht, die Alternative. Dafür spricht eine größere Betriebssicherheit und die höhere Wirtschaftlichkeit.

Betriebe, die stark von Druckluft abhängig sind, können durch ein Kompressorverbundsystem ihre Versorgung zu jeder Zeit sicherstellen. Fällt ein Kompressor aus, oder sind Wartungsarbeiten nötig, übernehmen die anderen Kompressoren die Versorgung.

Mehrere kleine Kompressoren können leichter dem Druckluftverbrauch angepaßt werden als ein großer Kompressor. Darüber hinaus sind die Leerlaufkosten eines großen Kompressors höher als die des kleinen Bereitschaftskompressors eines Verbundsystems. Aus diesen Tatsachen ergibt sich die höhere Wirtschaftlichkeit.

Ein Kompressorverbundsystem wird mit Hilfe einer übergeordneten Regelung wirtschaftlich und verschleißarm gesteuert.

### 4.5.1 MCS 1 und MCS 2

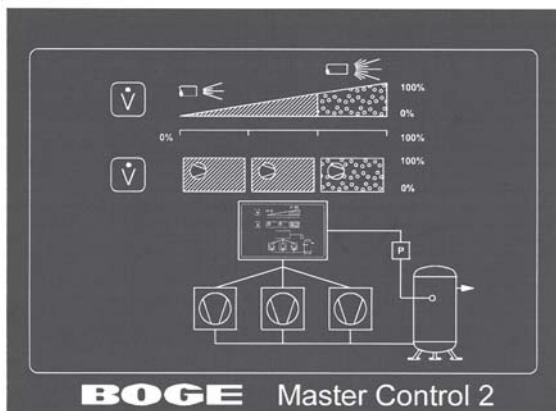


Bild 4.12 :  
Das BOGE Master Control System 2

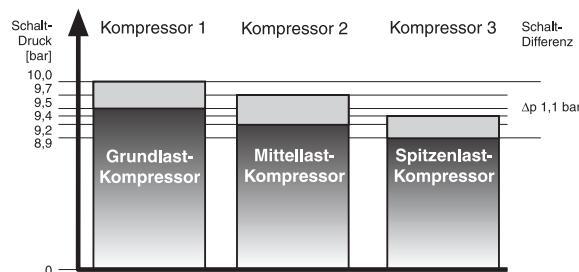


Bild 4.13 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 2

**MCS 1** steuert 2 Kompressoren gleicher Größe als Grundlast und Spitzenlast. Die Kompressoren werden zyklisch getauscht und über eigene Druckschalter ein- und ausgeschaltet. Die Steuerung bietet:

- Zyklisches Vertauschen über eine Schaltuhr.
- Zeitversetztes Zu- bzw. Abschalten der Kompressoren bei Anforderung der Steuerung durch eine Druckstaffelung.
- Gleichmäßige Auslastung der Kompressoren.
- Konstanten Druck im Druckbandbereich.
- Minimale Schaltdifferenz  $\Delta p = 0,8$  bar

**MCS 2** steuert bis zu 3 Kompressoren gleicher Größe als Grundlast, Mittellast und Spitzenlast. Die Kompressoren werden zyklisch getauscht und über eigene Druckschalter ein- und ausgeschaltet. Die Erweiterung auf 3 Kompressoren ist neben der größeren Schaltdifferenz der einzige Unterschied zur MCS 1. Ansonsten bietet sie dieselbe Ausstattung.

- Minimale Schaltdifferenz  $\Delta p = 1,1$  bar

## 4.5.2 MCS 3



Bild 4.14 :  
Das BOGE Master Control System 3

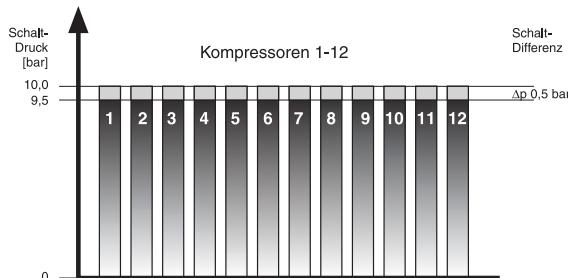
**MCS 3** steuert maximal 4, 8, oder 12 Kompressoren gleicher und/oder unterschiedlicher Größe und Bauart in einem Kompressorverbundsystem. Alle Kompressoren werden dabei über einen gemeinsamen Drucksensor am Druckluftbehälter geregelt.

Die **MCS 3** hat mit 0,5 bar eine sehr kleine Schalldifferenz. Den einzelnen Kompressoren sind keine festen Ein- und Ausschaltdrücke zugewiesen. Alle Kompressoren arbeiten im gleichen Druckbandbereich ( $\Delta p = 0,5$  bar). Die Kompressoren schalten dynamisch-bedarfsabhängig über eingestellte Zwischendruckwerte zu- und ab. Es wird die Druckabfall- bzw. Druckanstiegsgeschwindigkeit gemessen. Die Kompressoren schalten entsprechend dynamisch zu- bzw. ab.

Die Steuerung bietet:

- Dynamische Druckregelung durch Microcontroller in Verbindung mit dem elektronischen Druckregler für eine minimale Schalldifferenz von 0,5 bar.  
(keine Überverdichtung → Energieersparnis)
- Zeitabhängige Einteilung der Kompressoren in Rangstufen für Schichtbetrieb mit unterschiedlichem Druckluftbedarf.
- Individuelle Zuordnung der einzelnen Kompressoren in die Lastbereichsgruppen mit gleichmäßiger Auslastung der Kompressoren.
- Einstellbarer Grundlast-Wechselzyklus.
- Unabhängige Rotation der Kompressoren in den Lastbereichsgruppen.
- Zeitversetztes Zu- bzw. Abschalten der Kompressoren bei Anforderung durch die Steuerung.
- Übersichtliche LCD-Anzeige mit 4 x 20 Zeichen und Klartextausgabe.
- Überprüfungsmöglichkeit aller Ein- / Ausgänge über ein Testmenü.
- Automatische Umschaltung auf die Druckschalter der Einzelkompressoren bei Spannungsausfall.
- Die einzelnen Kompressoren arbeiten ohne die **MCS 3** selbstständig. Sie werden dann von ihren eigenen Druckschaltern gesteuert.

Bild 4.15 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 3



# Regelung von Kompressoren

## 4.5.3 MCS 4



Bild 4.16 :  
Das BOGE Master Control System 4

**MCS 4** steuert maximal 4 oder 8 Kompressoren gleicher und/oder unterschiedlicher Größe und Bauart in einem Kompressorverbundsystem. Alle Kompressoren werden dabei über einen gemeinsamen Drucksensor am Druckbehälter geregelt.

Die Grundlast deckt bei dieser Steuerung üblicherweise der größte Kompressor oder die größte Kompressorkombination. Der kleinste Kompressor bestreitet die Spitzenlast. Kompressoren gleicher Größe wechseln in der Grundlast.

Aus den programmierten Kompressorleistungen und den Informationen des Drucksensors errechnet die **MCS 4** ständig den Druckluftverbrauch. Sie wählt den Kompressor aus, der dem Bedarf am nächsten liegt.

Die Steuerung bietet :

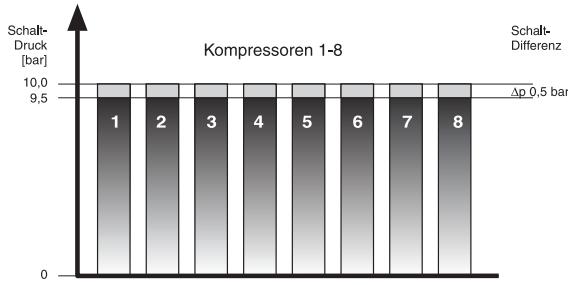


Bild 4.17 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 4

- Bedarfsorientierten Einsatz der verschiedenen Kompressoren und Kompressorkombinationen.
- Optimale Ausnutzung der Vorteile der Schrauben- und Kolbenkompressoren.
- Minimale Schaltdifferenz von 0,5 bar.  
( keine Überverdichtung → Energieersparnis )
- Drei unterschiedliche Druckprofile pro Tag durch ein Schaltuhrprogramm zur Anpassung der Steuerung an unterschiedlichen Druckluftbedarf.
- Zeitversetztes Zu- bzw. Abschalten der Kompressoren bei Anforderung durch die Steuerung.
- Übersichtliche LCD-Anzeige mit 2 x 20 Zeichen und Klartextausgabe.
- Überprüfungsmöglichkeit aller Ein- / Ausgänge über ein Testmenü.
- Automatische Umschaltung auf die Druckschalter der Einzelkompressoren bei Spannungsausfall.
- Die einzelnen Kompressoren arbeiten ohne die **MCS 4** selbstständig. Sie werden dann von ihren eigenen Druckschaltern gesteuert.
- Zwei potentialfreie Schaltuhrkontakte für die Ansteuerung von Zusatzkomponenten.

## 4.5.4 MCS 5



Bild 4.18 :  
Das BOGE Master Control System 5

**MCS 5** steuert maximal 4, 8, oder 12 Kompressoren mit stufenloser Leistungsregelung gleicher und/oder unterschiedlicher Größe und Bauart in einem Kompressorverbundsystem. Alle Kompressoren werden dabei über einen gemeinsamen Drucksensor am Druckluftbehälter geregelt. Der Spitzenlastkompressor regelt entsprechend dem Druckluftbedarf über seine stufenlose Leistungsregelung.

Bei sinkendem Druckluftbedarf schaltet dieser Kompressor aus und der Mittellastkompressor übernimmt nun die Regelung über seine stufenlose Leistungsregelung je nach Rangstufe.

Bis auf die Nutzung der stufenlosen Leistungsregelung ähneln sich die **MCS 3** und die **MCS 5**.

Die Steuerung bietet :

- Anpassung der Liefermenge an den Druckluftbedarf durch Stufenlose Leistungsregelung des Spitzenlastkompressors.
- Minimale Druckschwankungen im Druckluftnetz.
- Dynamische Druckregelung durch Microcontroller in Verbindung mit dem elektronischen Druckregler für eine minimale Schalldifferenz von 0,5 bar.  
( keine Überverdichtung → Energieersparnis )
- Zeitabhängige Einteilung der Kompressoren in Rangstufen für Schichtbetrieb mit unterschiedlichem Druckluftbedarf.
- Individuelle Zuordnung der einzelnen Kompressoren in die Lastbereichsgruppen mit gleichmäßiger Auslastung der Kompressoren.
- Einstellbarer Grundlast-Wechselzyklus.
- Unabhängige Rotation der Kompressoren in den Lastbereichsgruppen.
- Zeitversetztes Zu- bzw. Abschalten der Kompressoren bei Anforderung durch die Steuerung.
- Übersichtliche LCD-Anzeige mit 4 x 20 Zeichen und Klartextausgabe.
- Überprüfungsmöglichkeit aller Ein- / Ausgänge über ein Testmenü.
- Automatische Umschaltung auf die Druckschalter der Einzelkompressoren bei Spannungsausfall.
- Die einzelnen Kompressoren arbeiten ohne die **MCS 5** selbstständig. Sie werden dann von ihren eigenen Druckschaltern gesteuert.

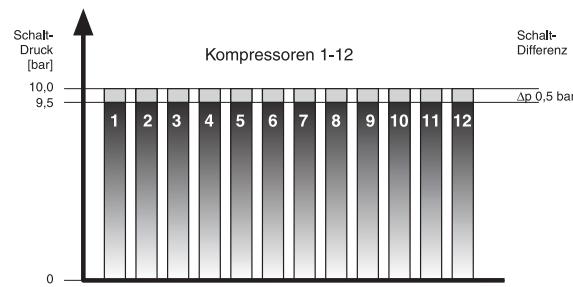


Bild 4.19 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 5

# Regelung von Kompressoren

## 4.5.5 MCS 6

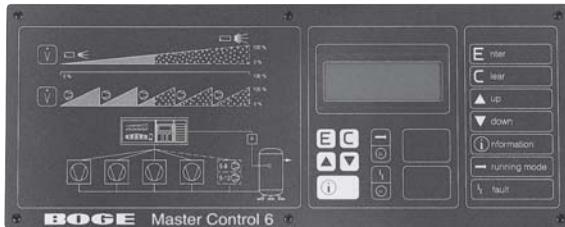


Bild 4.20 :  
Das BOGE Master Control System 6

**MCS 6** steuert maximal 4, 8, oder 12 Kompressoren mit Drehzahl-Frequenzregelung gleicher und/oder unterschiedlicher Größe und Bauart in einem Kompressorverbundsystem. Alle Kompressoren werden dabei über einen gemeinsamen Drucksensor am Druckluftbehälter geregelt. Der Spitzenlastkompressor regelt entsprechend dem Druckluftbedarf über seine Drehzahl-Frequenzregelung.

Bei sinkendem Druckluftbedarf schaltet dieser Kompressor aus und der Mittellastkompressor übernimmt nun die Regelung über seine Drehzahl-Frequenzregelung.

Bis auf die Nutzung der Drehzahl-Frequenzregelung ähneln sich die **MCS 3** und die **MCS 6** Steuerungen.

Die Steuerung bietet :

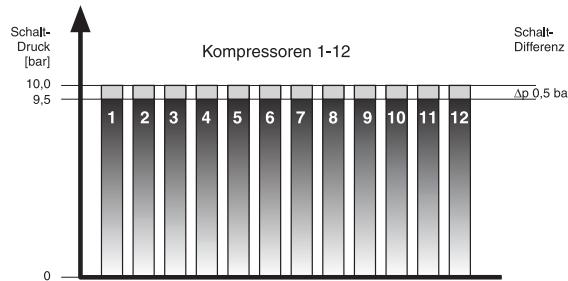


Bild 4.21 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 6

- Anpassung der Liefermenge an den Druckluftbedarf durch Drehzahl-Frequenzregelung des Spitzenlastkompressors.
- Minimale Druckschwankungen im Druckluftnetz.
- Dynamische Druckregelung durch Microcontroller in Verbindung mit dem elektronischen Druckregler für eine minimale Schalldifferenz von 0,5 bar.  
( keine Überverdichtung → Energieersparnis )
- Zeitabhängige Einteilung der Kompressoren in Rangstufen für Schichtbetrieb mit unterschiedlichem Druckluftbedarf.
- Individuelle Zuordnung der einzelnen Kompressoren in die Lastbereichsgruppen mit gleichmäßiger Auslastung der Kompressoren.
- Einstellbarer Grundlast-Wechselzyklus.
- Unabhängige Rotation der Kompressoren in den Lastbereichsgruppen.
- Zeitversetztes Zu- bzw. Abschalten der Kompressoren bei Anforderung durch die Steuerung.
- Übersichtliche LCD-Anzeige mit 4 x 20 Zeichen und Klartextausgabe.
- Überprüfungsmöglichkeit aller Ein- / Ausgänge über ein Testmenü.
- Automatische Umschaltung auf die Druckschalter der Einzelkompressoren bei Spannungsaustritt.
- Die einzelnen Kompressoren arbeiten ohne die **MCS 6** selbstständig. Sie werden dann von ihren eigenen Druckschaltern gesteuert.

## 4.5.6 MCS 7

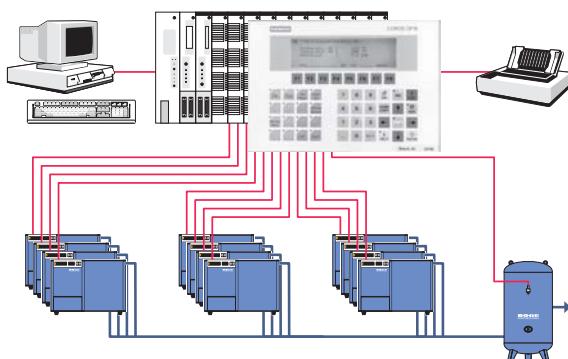


Bild 4.22 :  
Das BOGE Master Control System 7

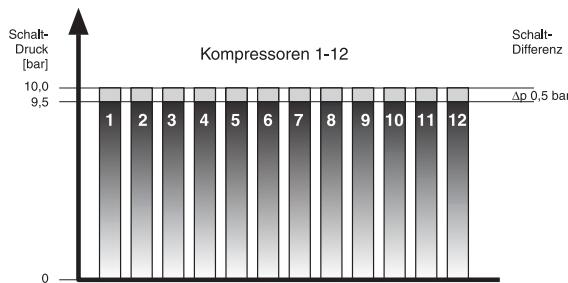


Bild 4.23 :  
Das Schaltdiagramm der BOGE MCS 7

**MCS 7** steuert, regelt und überwacht eine komplette Druckluftstation mit der Siemens-Steuerung **S 5 ( S7 )** und dem Bedienerterminal **OP 15**.

Zur Grundausstattung gehören :

- 8 Kompressoren.
- 2 Kälte-Drucklufttrockner.
- 2 Adsorptionstrockner.
- 10 Bekomaten.
- 2 potentiонаlfreie Schaltkanäle für die Ansteuerung von Zusatzgeräten.

Die **MCS 7** ist in drei Ausführungsvarianten lieferbar :

### Ausführung 1

Die Ausführung 1 bietet ein erweitertes Software-Programm der **MCS 3**. Sie realisiert eine druckabhängige Regelung bis 8 oder 12 Kompressoren gleicher und/oder unterschiedlicher Größe durch Rangstufen und Schaltuhrprogramme.

### Ausführung 2

Die Ausführung 2 bietet ein erweitertes Software-Programm der **MCS 5**. Sie realisiert eine druckabhängige Regelung bis 8 oder 12 Kompressoren gleicher und/oder unterschiedlicher Größe mit stufenloser Leistungsregelung.

### Ausführung 3

Die Ausführung 3 bietet ein erweitertes Software-Programm der **MCS 6**. Sie realisiert eine druckabhängige Regelung bis 8 oder 12 Kompressoren gleicher und/oder unterschiedlicher Größe mit Drehzahl-Frequenzregelung.

Die Steuerung bietet zusätzlich zu den Funktionen der jeweiligen Basissoftware :

- Betriebszustandserfassung für die Kompressoren und die weiteren Komponenten der Kompressorstation.
- Speicherung der Betriebs-, Warnungs- und Störmeldungen. Die Wartung und die Reparatur der Kompressoranlage wird erheblich vereinfacht.
- Steuerung und Überwachung von Komponenten der Druckluftaufbereitung und des Druckluftnetzes.
- BUS-Kopplung über Profibus ( Option )  
Dadurch wird eine Anbindung an eine zentrale Leittechnik ermöglicht.
- Anlagenvisualisierung in übergeordnete Leittechnik ( Option )  
Es können umfangreiche Informationen über die gesamte Druckluftversorgung abgerufen werden.

# Druckluftaufbereitung

## 5. Druckluftaufbereitung

### 5.1 Warum Druckluftaufbereitung ?

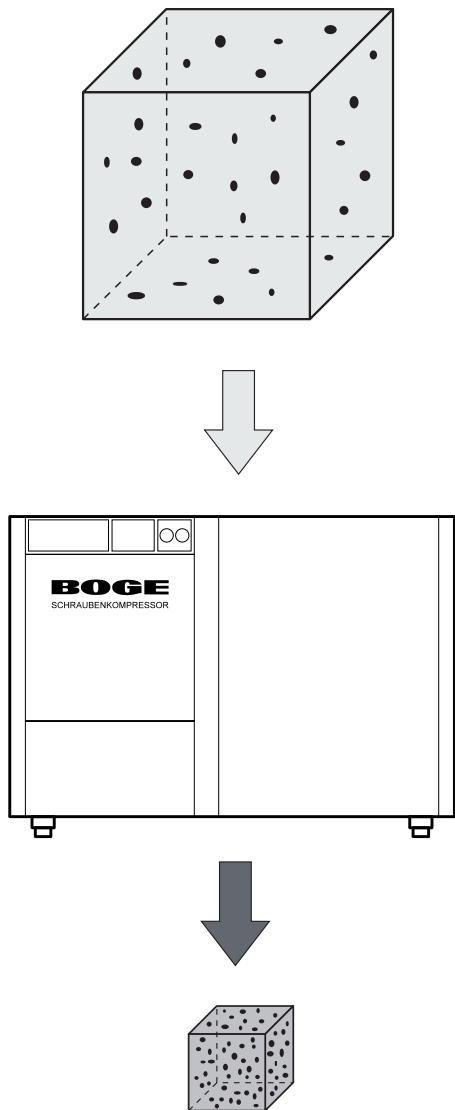


Bild 5.1 :  
Konzentration von Luftverunreinigungen  
bei der Verdichtung

Moderne Produktionstechnik braucht Druckluft. Die Vielfalt der Anwendungen reicht von der nicht aufbereiteten Blasluft bis zur absolut trockenen, ölfreien und sterilen Druckluft.

Die in unserer Umgebungsluft vorhandenen Verunreinigungen sind mit dem bloßen Auge meist nicht sichtbar. Trotzdem können sie die zuverlässigen Funktionen des Druckluftnetzes und der Verbraucher beeinträchtigen und die Qualität der Produkte mindern.

1 m<sup>3</sup> Umgebungsluft enthält eine Vielzahl von Verunreinigungen wie z.B. :

- Bis zu 180 Millionen Schmutzpartikel.  
Größe zwischen 0,01 und 100 µm.
- 5 - 40 g/m<sup>3</sup> Wasser in Form von Luftfeuchtigkeit.
- 0,01 bis 0,03 mg/m<sup>3</sup> Öl in Form von Mineralölaerosolen und unverbrannten Kohlenwasserstoffen.
- Spuren von Schwermetallen wie Blei, Cadmium, Quecksilber, Eisen.

Kompressoren saugen die Umgebungsluft und damit die Luftverunreinigungen an und konzentrieren sie auf ein Vielfaches. Bei einer Verdichtung auf 10 bar<sub>ü</sub> ( 10 bar Überdruck = 11 bar absolut ) erhöht sich die Konzentration der Schmutzpartikel auf das 11-fache. In 1 m<sup>3</sup> Druckluft befinden sich dann bis zu 2 Milliarden Schmutzpartikel. Dabei gelangen noch zusätzlich Schmieröl und Abriebteilchen aus dem Kompressor in die Druckluft.

#### Richtige Druckluftaufbereitung hat Vorteile :

- Erhöhte Lebensdauer der nachgeschalteten Druckluft-Verbraucher.
- Verbesserte, konstante Qualität der Erzeugnisse.
- Kondensat- und rostfreie Druckluftleitungen.
- Weniger Betriebsstörungen.
- Rohrleitungen ohne Kondensatsammler.
- Geringer Wartungsaufwand.
- Geringere Druckverluste durch Leckage und Strömungswiderstände.
- Weniger Energieverbrauch durch geringere Druckverluste.

## 5.1.2 Planungshinweise

BOGE empfiehlt für die verschiedenen Anwendungsbereiche der Druckluft die Aufbereitung entsprechend der Auflistung auf dieser Seite.

Anwendungsgebiet der Druckluft	Qualitätsklassen DIN ISO 8573-1			Drucklufterzeuger	BOGE-Schrauben- und Kolbenkompressoren									
	Öl	Partikel	Wasser		Zyklonabscheider *)	Vorfilter	Kältetrockner	Microfilter	Membrantrockner	Adsorptions- trockner	Vorfilter	Aktivkohle- filter	Aktivkohle- absorber	Stofffilter
allgemeine Brauchluft Blasluft	—	—	—											
Sandstrahlen Einfache Lackierarbeiten	—	3	—											
Allgemeine Werksluft Förderluft Einfaches Farbspritzen Sandstrahlen mit erhöhten Qualitätsanforderungen	5 5 5 5	3 3 3 3	4 4 4 4											
Druckluftwerkzeuge Steuerluft Meß- und Regeltechnik Farbspritzen Konditionierung Fluidicelemente	1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1	4 4 4 4 4 4											
Dentallabor Fotolabor	1 1	1 1	4 4											
Atemluft Instrumentenluft Pneumatik Farbspritzen mit erhöhten Qualitätsanforderungen Oberflächentechnik	1 1 1 1 1	1 1 1 1 1	1-3 1-3 1-3 1-3 1-3									 		
Medizintechnik Förderluft mit erhöhten Qualitätsanforderungen Nahrungs- und Genussmittelindustrie	1 1 1	1 1 1	3-4 3-4 3-4									 		
Brauereien Molkereien Pharmazeutische Industrie	1 1 1	1 1 1	1-3 1-3 1-3									 		

\*) Der Zyklonabscheider kann unter bestimmten Voraussetzungen entfallen.  
Die Qualitätsklassen sind auf Seite 5.12 erklärt.

## 5.1.3 Folgen schlechter Aufbereitung

Bleiben die Verunreinigungen und das Wasser aus der Umgebungsluft in der Druckluft, kann das unangenehme Folgen haben. Das betrifft sowohl das Leitungsnetz, als auch die Verbraucher. Teilweise leiden auch die Produkte unter schlechter Druckluftqualität. In manchen Einsatzbereichen ist der Einsatz von Druckluft ohne entsprechende Aufbereitung gefährlich und gesundheitsschädlich.

### Festkörperpartikel in der Druckluft

- Verschleißwirkung in Pneumatikanlagen.  
Staub und andere Partikel führen zu Abrieb. Wenn Partikel mit Schmieröl- oder Fett eine Schleifpaste bilden, wird diese Wirkung noch verstärkt.
- Gesundheitsschädliche Partikel.
- chemisch aggressive Partikel.

### Öl in der Druckluft

- Alt- und Fremdöl in der Pneumatikanlage.  
Verharztes Öl kann zu Durchmesserreduzierung und Blockaden in Rohrleitungen führen. Das hat erhöhten Strömungswiderstand zur Folge.
- Ölfreie Druckluft.  
In der pneumatischen Förderung kann Öl das Fördergut verkleben und so zu Verstopfungen führen.  
In der Nahrungs- und Genußmittelindustrie, sowie in der Pharmazeutischen Industrie **muß** die Druckluft aus gesundheitlichen Gründen ölfrei sein.

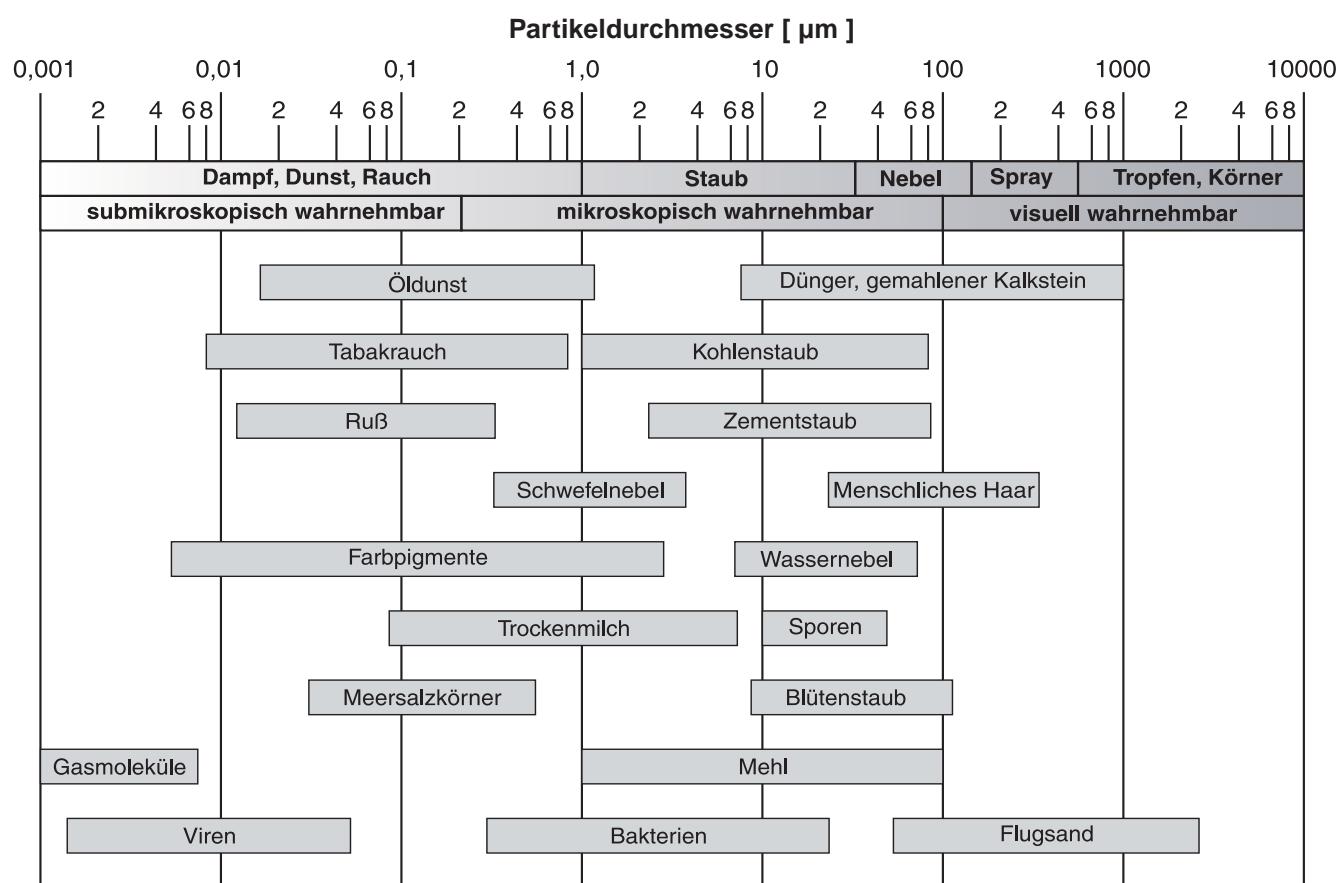
### Wasser in der Druckluft

- Korrosion in der Pneumatikanlage.  
Rost entsteht in den Leitungen und Funktionselementen und führt zu Leckagen.
- Unterbrechen von Schmierfilmen.  
Unterbrochene Schmierfilme führen zu mechanischen Defekten.
- Bildung von elektrischen Elementen.  
Wenn verschiedene Metalle mit Wasser in Berührung kommen, können elektrische Elemente entstehen.
- Eisbildung im Druckluftnetz.  
Bei niedrigen Temperaturen kann das Wasser im Druckluftnetz gefrieren und dort Frostschäden, Durchmesserreduzierung und Blockaden verursachen.

## 5.1.3 Luftverunreinigungen

In unserer Umgebungsluft sind Schmutzpartikel vorhanden, die mit bloßem Auge nicht zu sehen sind. Einen allgemeinen Überblick über die Art, Größe und Konzentration dieser Schmutzpartikel enthält dieses Kapitel.

Konzentration von Partikeln in der Umgebungsluft	Grenzwerte [ mg/m³ ]	Durchschnittswert [ mg/m³ ]
 Auf dem Land	5 - 50	15
 In der Stadt	10 - 100	30
 Im Industriegebiet	20 - 500	100
 In großen Fabrikanlagen	50 - 900	200



# Druckluftaufbereitung

## 5.2 Wasser in der Druckluft

### 5.2.1 Luftfeuchtigkeit

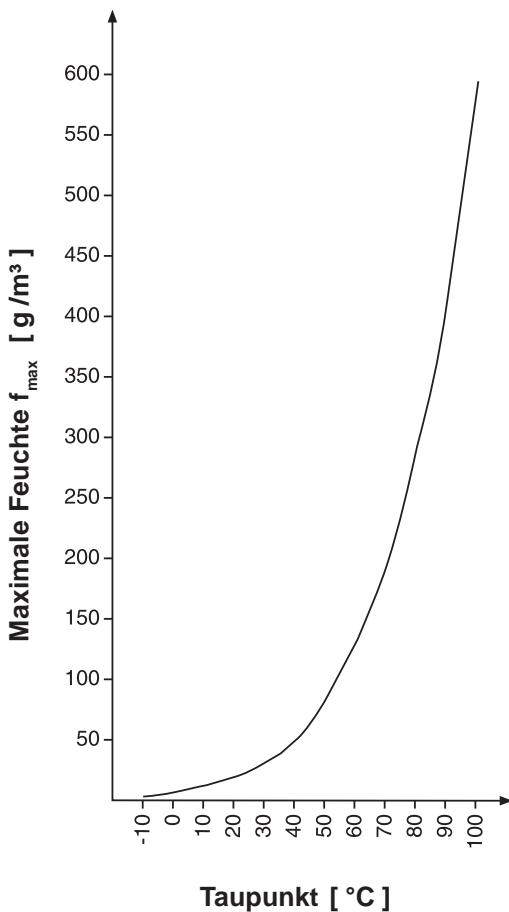


Bild 5.2 :  
Maximale Feuchte  
in Abhängigkeit vom Taupunkt

In der atmosphärischen Luft befinden sich immer gewisse Mengen Wasserdampf. Der Gehalt schwankt zeitlich und örtlich und wird als Luftfeuchtigkeit (Feuchte) bezeichnet. Bei jeder Temperatur kann ein bestimmtes Luftvolumen nur eine Höchstmenge Wasserdampf enthalten. Meist enthält die Umgebungsluft jedoch nicht die maximale Menge Wasserdampf.

#### Maximale Feuchte $f_{\max}$ [ g/m³ ]

Unter der maximalen Feuchte  $f_{\max}$  (Sättigungsmenge) versteht man die maximale Menge Wasserdampf, die  $1 \text{ m}^3$  Luft bei einer bestimmten Temperatur enthalten kann. Die maximale Feuchte ist druckunabhängig.

#### Absolute Feuchte $f$ [ g/m³ ]

Unter der absoluten Feuchte  $f$  versteht man die in  $1 \text{ m}^3$  Luft tatsächlich enthaltene Menge Wasserdampf.

#### Relative Feuchte $\varphi$ [ % ]

Unter der relativen Feuchte  $\varphi$  versteht man das Verhältnis der absoluten zur maximalen Feuchte.

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}} \times 100 \%$$

$\varphi$  = relative Feuchte [ % ]  
 $f$  = absolute Feuchte [ g/m³ ]  
 $f_{\max}$  = maximale Feuchte [ g/m³ ]

Da die maximale Feuchte  $f_{\max}$  temperaturabhängig ist, ändert sich mit der Temperatur die relative Feuchte, auch wenn die absolute Feuchte konstant bleibt. Bei einer Abkühlung bis zum Taupunkt steigt die relative Feuchte auf 100 %.

## 5.2.2 Taupunkte

### Atmosphärischer Taupunkt [ °C ]

Unter atmosphärischem Taupunkt versteht man die Temperatur, auf die **atmosphärische** Luft ( 1 bar<sub>abs</sub> ) abgekühlt werden kann, ohne daß Wasser ausfällt.

Der atmosphärische Taupunkt ist für Druckluftsysteme von untergeordneter Bedeutung.

### Drucktaupunkt [ °C ]

Unter dem Drucktaupunkt versteht man die Temperatur, auf die **verdichtete** Luft abgekühlt werden kann, ohne daß Kondensat ausfällt. Der Drucktaupunkt ist abhängig vom Verdichtungs-Enddruck. Bei sinkendem Druck sinkt auch der Drucktaupunkt.

## 5.2.3 Wassergehalt der Luft

Die folgende Tabelle gibt die maximale Feuchte der Luft bei einem bestimmten Taupunkt an :

Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]	Tau-punkt [ °C ]	max. Feuchte [ g/m <sup>3</sup> ]
+100°	588,208	+76°	248,840	+52°	90,247	+28°	26,970	+4°	6,359	-19°	0,960	-43°	0,083
+99°	569,071	+75°	239,351	+51°	86,173	+27°	25,524	+3°	5,953	-20°	0,880	-44°	0,075
+98°	550,375	+74°	230,142	+50°	82,257	+26°	24,143	+2°	5,570	-21°	0,800	-45°	0,067
+97°	532,125	+73°	221,212	+49°	78,491	+25°	22,830	+1°	5,209	-22°	0,730	-46°	0,060
+96°	514,401	+72°	212,648	+48°	74,871	+24°	21,578	0°	4,868	-23°	0,660	-47°	0,054
+95°	497,209	+71°	204,286	+47°	71,395	+23°	20,386			-24°	0,600	-48°	0,048
+94°	480,394	+70°	196,213	+46°	68,056	+22°	19,252	-1°	4,487	-25°	0,550	-49°	0,043
+93°	464,119	+69°	188,429	+45°	64,848	+21°	18,191	-2°	4,135	-26°	0,510	-50°	0,038
+92°	448,308	+68°	180,855	+44°	61,772	+20°	17,148	-3°	3,889	-27°	0,460	-51°	0,034
+91°	432,885	+67°	173,575	+43°	58,820	+19°	16,172	-4°	3,513	-28°	0,410	-52°	0,030
+90°	417,935	+66°	166,507	+42°	55,989	+18°	15,246	-5°	3,238	-29°	0,370	-53°	0,027
+89°	403,380	+65°	159,654	+41°	53,274	+17°	14,367	-6°	2,984	-30°	0,330	-54°	0,024
+88°	389,225	+64°	153,103	+40°	50,672	+16°	13,531	-7°	2,751	-31°	0,301	-55°	0,021
+87°	375,471	+63°	146,771	+39°	48,181	+15°	12,739	-8°	2,537	-32°	0,271	-56°	0,019
+86°	362,124	+62°	140,659	+38°	45,593	+14°	11,987	-9°	2,339	-33°	0,244	-57°	0,017
+85°	340,186	+61°	134,684	+37°	43,508	+13°	11,276	-10°	2,156	-34°	0,220	-58°	0,015
+84°	336,660	+60°	129,020	+36°	41,322	+12°	10,600	-11°	1,960	-35°	0,198	-59°	0,013
+83°	324,469	+59°	123,495	+35°	39,286	+11°	9,961	-12°	1,800	-36°	0,178	-60°	0,110
+82°	311,616	+58°	118,199	+34°	37,229	+10°	9,356	-13°	1,650	-37°	0,160	-65°	0,00640
+81°	301,186	+57°	113,130	+33°	35,317	+9°	8,784	-14°	1,510	-38°	0,144	-70°	0,00330
+80°	290,017	+56°	108,200	+32°	33,490	+8°	8,234	-15°	1,380	-39°	0,130	-75°	0,00130
+79°	279,278	+55°	103,453	+31°	31,744	+7°	7,732	-16°	1,270	-40°	0,117	-80°	0,00060
+78°	268,806	+54°	98,883	+30°	30,078	+6°	7,246	-17°	1,150	-41°	0,104	-85°	0,00025
+77°	258,827	+53°	94,483	+29°	28,488	+5°	6,790	-18°	1,050	-42°	0,093	-90°	0,00010

# Druckluftaufbereitung

## 5.2.4 Kondensatmenge bei Komprimierung

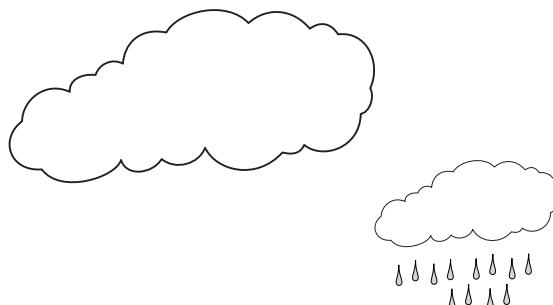
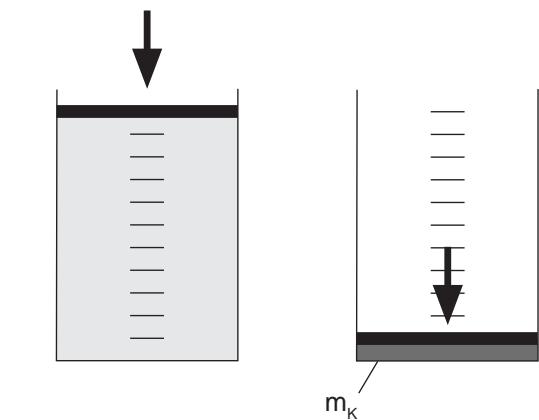


Bild 5.3 :  
Ein nasser Schwamm wird zusammengedrückt

Luft enthält immer Wasser in Form von Dampf. Da Luft im Gegensatz zu Wasser komprimierbar ist, fällt bei der Verdichtung das Wasser in Form von Kondensat aus. Die maximale Feuchte der Luft ist temperatur- und volumenabhängig. Sie ist nicht mengenabhängig.

Die Umgebungsluft kann man sich als feuchten Schwamm vorstellen. Er kann im entspannten Zustand eine bestimmte Menge Wasser aufnehmen. Drückt man diesen Schwamm zusammen, läuft ein Teil des Wassers heraus. Ein Rest Wasser wird auch bei starkem Druck im Schwamm zurückbleiben. Ähnlich verhält es sich mit komprimierter Luft.

Das folgende Beispiel verdeutlicht, mit welcher Kondensatmenge  $m_k$  bei der Komprimierung von Luft zu rechnen ist. Ausgangslage ist ein schwüler Sommertag mit 35° C und 80 % Luftfeuchtigkeit.



$$V_1 = 6,5 \text{ m}^3$$

$$p_1 = 0 \text{ bar}_{\text{ü}} = 1 \text{ bar}_{\text{abs}} \quad p_2 = 10 \text{ bar}_{\text{ü}} = 11 \text{ bar}_{\text{abs}}$$

$$T = 35^\circ \text{ C}$$

$$\varphi_1 = 80 \%$$

$$f_{\text{max}} = 39,286 \text{ g/m}^3$$

$$V_2 = 0,59 \text{ m}^3$$

$$p_2 = 10 \text{ bar}_{\text{ü}} = 11 \text{ bar}_{\text{abs}}$$

$$T = 35^\circ \text{ C}$$

$$\varphi_2 = 100 \%$$

Bild 5.4 :  
Kondensatausfall bei Verdichtung

$$m_k = \frac{V_1 \times f_{\text{max}1} \times \varphi_1}{100} - \frac{V_2 \times f_{\text{max}1} \times \varphi_2}{100}$$

$$m_k = \frac{6,5 \times 39,286 \times 80}{100} - \frac{0,59 \times 39,286 \times 100}{100}$$

$$m_k = \frac{m^3 \times g/m^3 \times \%}{\%} - \frac{m^3 \times g/m^3 \times \%}{\%}$$

$$m_k = 181,108 \text{ g}$$

$m_k$  = Ausgefallenes Kondensat [ g ]

$V_1$  = Volumen bei 0 bar<sub>ü</sub> [ m<sup>3</sup> ]

$V_2$  = Volumen bei 10 bar<sub>ü</sub> [ m<sup>3</sup> ]

$f_{\text{max}1}$  = maximale Feuchte bei 35° C [ g/m<sup>3</sup> ]

$\varphi_1$  = relative Feuchte von  $V_1$  [ % ]

$\varphi_2$  = relative Feuchte von  $V_2$  [ % ]

Da aus der komprimierten Luft nur das Wasser ausfällt, das nicht gespeichert werden kann, steigt die relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  der verdichteten Luft auf 100 %.

Bei der Komprimierung von 6,5 m<sup>3</sup> Luft auf 10 bar Überdruck fallen bei konstanter Temperatur 181,108 g Wasser als Kondensat aus.

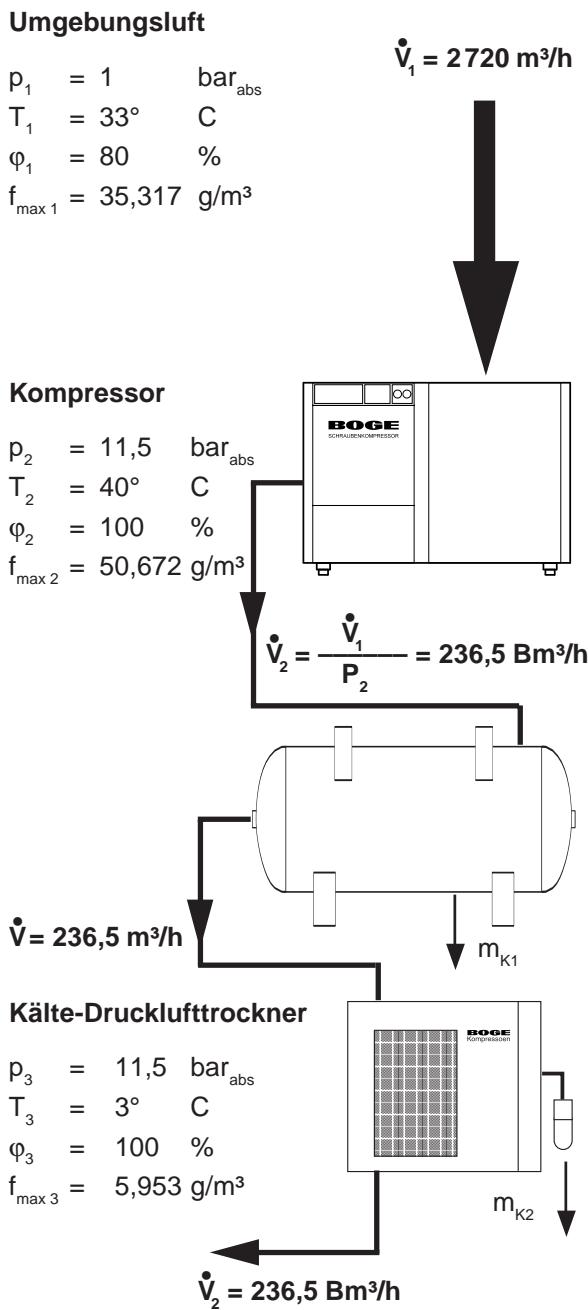
## 5.2.5 Beispiel zur Kondensatmengenberechnung

Ein Beispiel zeigt die Kondensatmenge  $m_k$ , die tatsächlich bei der Verdichtung von Luft anfällt. Dabei fällt das Kondensat an mehreren Stellen der Kompressorstation zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus.

Der Kondensatanfall eines Schraubenkompressors mit einer Liefermenge  $\dot{V}_1 = 2720 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einem Verdichtungsenddruck von  $p_2 = 10,5 \text{ bar}$  wird hier ermittelt. Dem Verdichter nachgeschaltet sind ein Druckluftbehälter und ein Kälte-Drucklufttrockner.

Die Umgebungsluft enthält bei diesen Bedingungen eine bestimmte Menge Wasser :

$$\begin{aligned} m_w &= \dot{V}_1 \times f_{\max 1} \times \varphi_1 / 100 \\ g/\text{h} &= \text{m}^3/\text{h} \times g/\text{m}^3 \times \%/\% \\ m_w &= 2720 \times 35,317 \times 80/100 \\ m_w &= 76849,79 \text{ g/h} \hat{=} 76,85 \text{ l/h} \end{aligned}$$



Bei der **Verdichtung** selbst steigt die Temperatur über den Drucktaupunkt der verdichteten Luft. Es fällt also noch keine Feuchtigkeit aus. Im Nachkühler des Kompressors wird die verdichtete Luft auf  $T_2 = 40^\circ \text{ C}$  abgekühlt. Das erste Kondensat fällt aus und wird in den Druckluftbehälter mitgerissen. Dort beruhigt sich der Volumenstrom und die Wassertröpfchen setzen sich ab. Hier sammelt sich eine beträchtliche Menge Kondensat :

$$\begin{aligned} m_{k1} &= m_w - (\dot{V}_2 \times f_{\max 2} \times \varphi_2 / 100) \\ m_{k1} &= 76849,79 - (236,5 \times 50,672 \times 100/100) \\ m_{k1} &= 64865,86 \text{ g/h} \hat{=} 64,87 \text{ l/h} \end{aligned}$$

Anschließend wird die Druckluft im **Kälte-Drucklufttrockner** auf eine Temperatur abgekühlt, die einem Drucktaupunkt von  $3^\circ \text{ C}$  entspricht. Das Kondensat fällt im Trockner an und wird abgeleitet.

$$\begin{aligned} m_{k2} &= (\dot{V}_2 \times f_{\max 2}) - (\dot{V}_2 \times f_{\max 3}) \\ m_{k2} &= (236,5 \times 50,672) - (236,5 \times 5,953) \\ m_{k2} &= 10576,04 \text{ g/h} \hat{=} 10,58 \text{ l/h} \end{aligned}$$

Bild 5.5 :  
Kondensatanfall bei der Verdichtung mit Trockner

# Druckluftaufbereitung

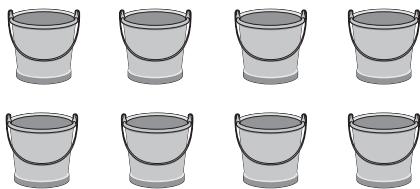


Bild 5.6 :  
In einer Stunde fallen ca. 8 10 l Eimer  
Kondensat an.

Aus der Addition der einzelnen Kondensatströme ergibt sich die Kondensatmenge, die von der Kondensataufbereitung bewältigt werden muß.

$$\text{Kondensatmenge } m_k = m_{k1} + m_{k2}$$

$$\begin{aligned}\text{Kondensatmenge } m_k &= 75441,9 \quad \text{g/h} \\ &= 75,4 \quad \text{l/h}\end{aligned}$$

Bei Dreischichtbetrieb mit einer Auslastung von 100 % läuft der Kompressor 24 Std. täglich. Das bedeutet bei unveränderten Grundvoraussetzungen:

$$\begin{aligned}\text{Kondensatmenge } m_{kt} &= 1810605,6 \quad \text{g/T} \\ &= 1810,6 \quad \text{l/T}\end{aligned}$$

In einem Jahr fällt dann folgende Menge an Kondensat an:

$$\begin{aligned}\text{Kondensatmenge } m_{kj} &= 659060438 \quad \text{g/J} \\ &= 659060 \quad \text{l/J}\end{aligned}$$

## 5.2.6 Kondensatmenge an einem schwülen Sommertag

Die Druckluftqualität muß bei **veränderten Umgebungsbedingungen** immer gleich bleiben. D.h., daß der Drucktaupunkt der verdichteten Druckluft auch an einem schwülen Sommertag mit 40° C Lufttemperatur und 90 % Luftfeuchtigkeit bei 3° C liegen muß.

$$\begin{aligned}\text{Liefermenge } \dot{V}_1 &= 2720 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{Ansaugdruck } p_1 &= 1 \text{ bar}_{\text{abs}} \\ \text{Ansaugtemperatur } T_1 &= 40^\circ \text{C} \\ \text{Relative Feuchte } \varphi_1 &= 90 \% \\ \text{Drucktaupunkt } T_3 &= 2^\circ \text{C}\end{aligned}$$

Unter diesen Bedingungen fällt bei gleicher Druckluftqualität eine sehr viel größere Menge Kondensat an.

$$\text{Kondensatmenge } m_k = 122,6 \quad \text{l/h}$$

Bei Dreischichtbetrieb mit einer Auslastung von 100 % läuft der Kompressor 24 Std. täglich. Das bedeutet bei unveränderten Grundvoraussetzungen:

$$\text{Kondensatmenge } m_{kt} = 2943,3 \quad \text{l/T}$$

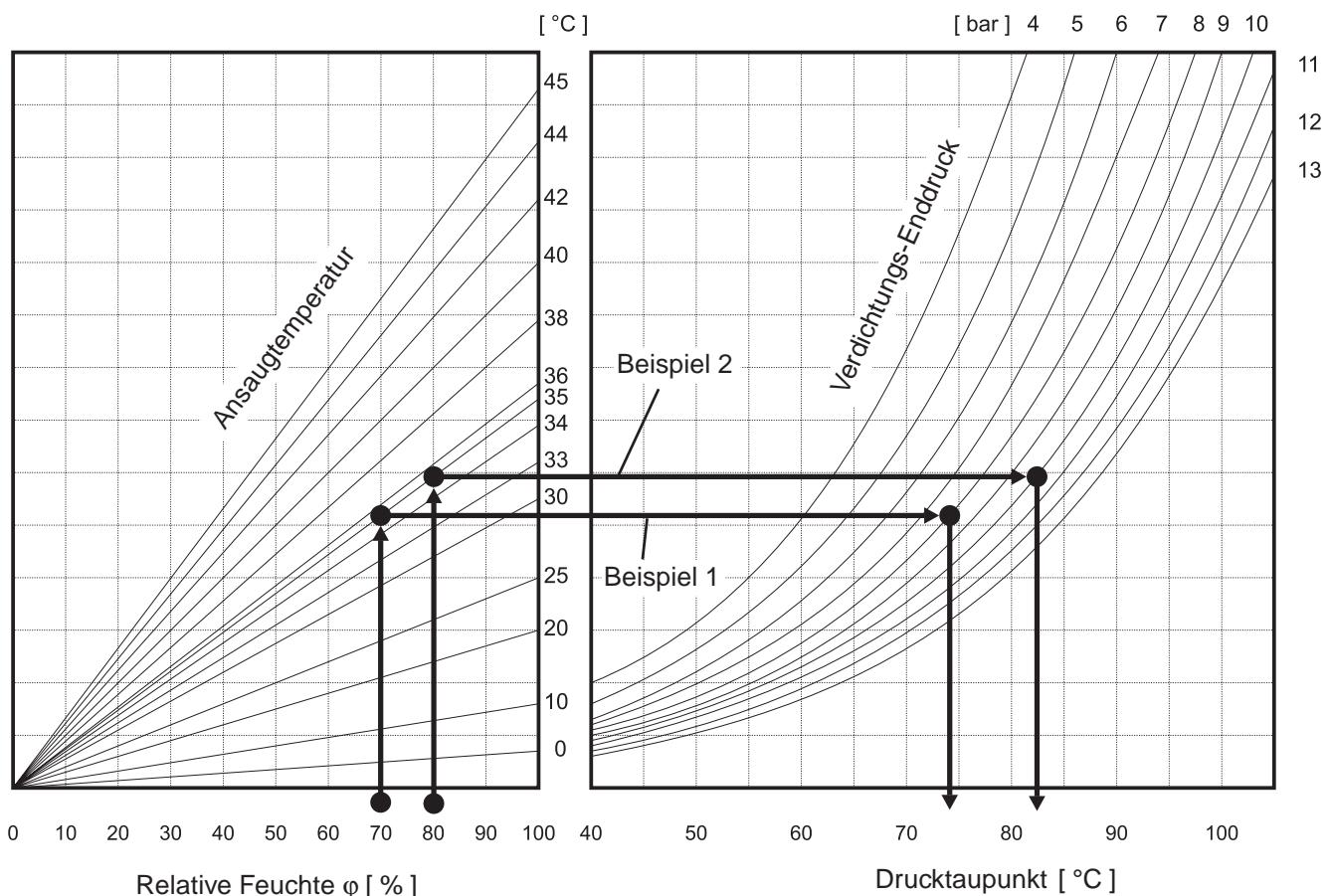
In einem Jahr fällt dann folgende Menge an Kondensat an:

$$\text{Kondensatmenge } m_{kj} = 1071358 \quad \text{l/J}$$

## 5.2.7 Drucktaupunktermittlung

Unter dem Drucktaupunkt versteht man die Temperatur, auf die **verdichtete** Luft abgekühlt werden kann, ohne daß Kondensat ausfällt. Der Drucktaupunkt ist abhängig vom Verdichtungs-Enddruck. Bei sinkendem Druck fällt auch der Drucktaupunkt.

Zur Ermittlung des Drucktaupunktes der Druckluft nach der Verdichtung werden folgende Diagramme herangezogen:



### Beispiel 1

Angesaugte Luft

- relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi = 70\%$
- Ansaugtemperatur  $T = 35^\circ\text{C}$

Verdichtete Luft

- Verdichtungs-Enddruck  $p_u = 8\text{ bar}$
- ⇒ **Der Drucktaupunkt liegt bei ca.  $73^\circ\text{C}$**

### Beispiel 2

Angesaugte Luft

- relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi = 80\%$
- Ansaugtemperatur  $T = 35^\circ\text{C}$

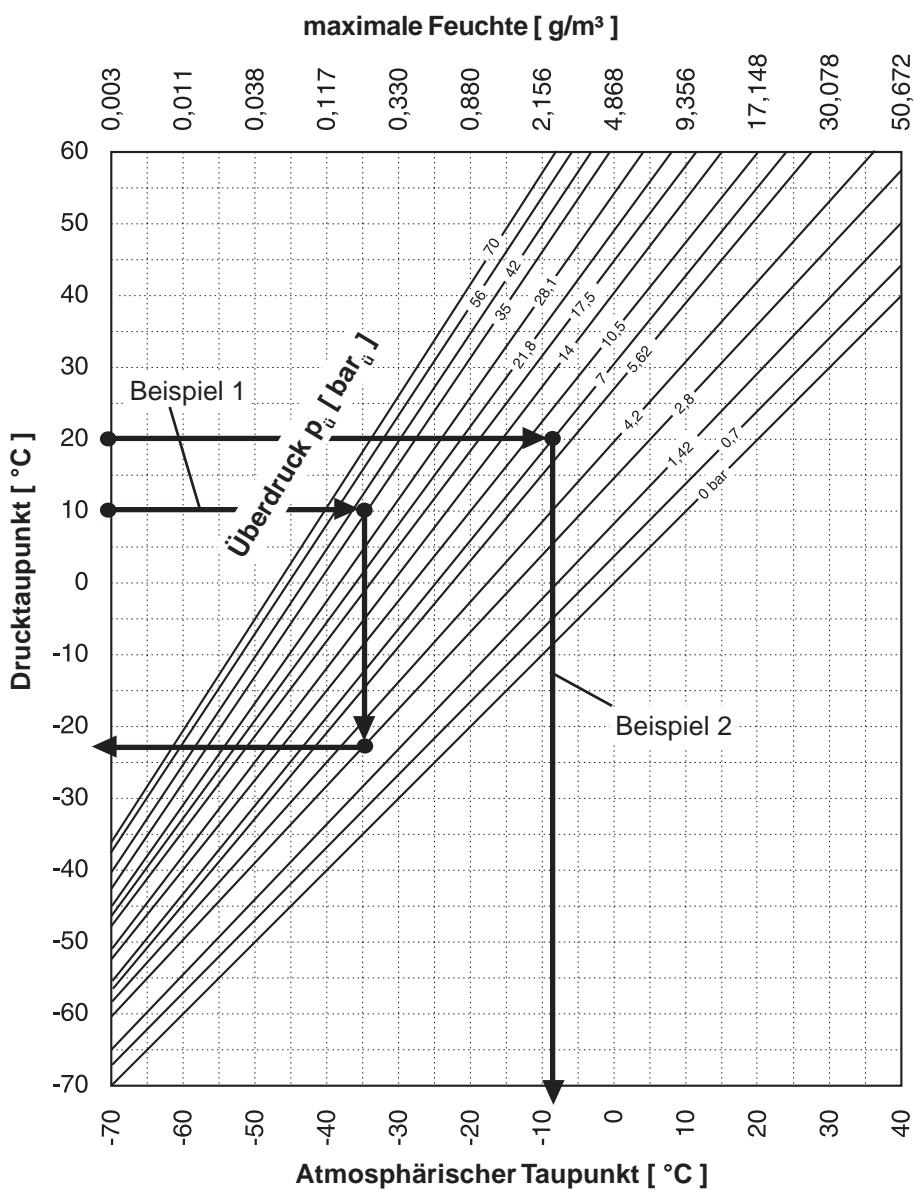
Verdichtete Luft

- Verdichtungs-Enddruck  $p_u = 10\text{ bar}$
- ⇒ **Der Drucktaupunkt liegt bei ca.  $82^\circ\text{C}$**

# Druckluftaufbereitung

## 5.2.8 Drucktaupunkt nach der Entspannung

Wenn Druckluft entspannt, sinkt der Drucktaupunkt. Zur Ermittlung des neuen Drucktaupunktes, bzw. des atmosphärischen Taupunktes nach der Entspannung wird folgendes Diagramm benutzt:



### Beispiel 1

Druckluft

- $p_{\ddot{u}} = 35$  bar Luftdruck
  - Drucktaupunkt 10° C
  - entspannte Druckluft
  - $p_{\ddot{u}} = 4$  bar Luftdruck
- ⇒ Der neue Drucktaupunkt liegt bei ca. -23° C

### Beispiel 2

Druckluft

- $p_{\ddot{u}} = 7$  bar Luftdruck
  - Drucktaupunkt 20° C
  - entspannte Druckluft
  - atmosphärischer Luftdruck  $p_{\ddot{u}} = 0$  bar
- ⇒ Der atmosphärische Taupunkt liegt bei ca. -8° C

## 5.3 Druckluftqualität

### 5.3.1 Qualitätsklassen nach DIN ISO 8573-1

Die Druckluft-Qualitätsklassen nach DIN ISO 8573-1 erleichtern dem Anwender die Definition seiner Anforderungen und die Auswahl der Aufbereitungskomponenten. Die Norm basiert auf den Herstellerangaben, die erlaubte Grenzwerte bezüglich der Druckluftreinheit für ihre Anlagen und Maschinen ermittelt haben.

Die Norm DIN ISO 8573-1 definiert die Qualitätsklassen der Druckluft bezüglich:

#### Ölgehalt

Festlegung der Restmenge an Aerosolen und Kohlenwasserstoffen, die in der Druckluft enthalten sein dürfen.

#### Partikelgröße und Dichte

Festlegung von Größe und Konzentration der Feststoffteilchen, die noch in der Druckluft enthalten sein dürfen.

#### Drucktaupunkt

Festlegung der Temperatur, auf die man die **verdichtete** Luft abkühlen kann, ohne daß der in ihr enthaltene Wasserdampf kondensiert. Der Drucktaupunkt verändert sich mit dem Luftdruck.

Klasse	max. Ölgehalt [ mg/m³ ]	max. Reststaubgehalt		max. Restwassergehalt	
		Partikelgröße [ µm ]	Partikeldichte [ mg/m³ ]	Restwasser [ g/m³ ]	Drucktaupunkt [ °C ]
1	0,01	0,1	0,1	0,003	-70
2	0,1	1	1	0,117	-40
3	1	5	5	0,88	-20
4	5	15	8	5,953	+3
5	25	40	10	7,732	+7
6	—	—	—	9,356	+10

# Druckluftaufbereitung

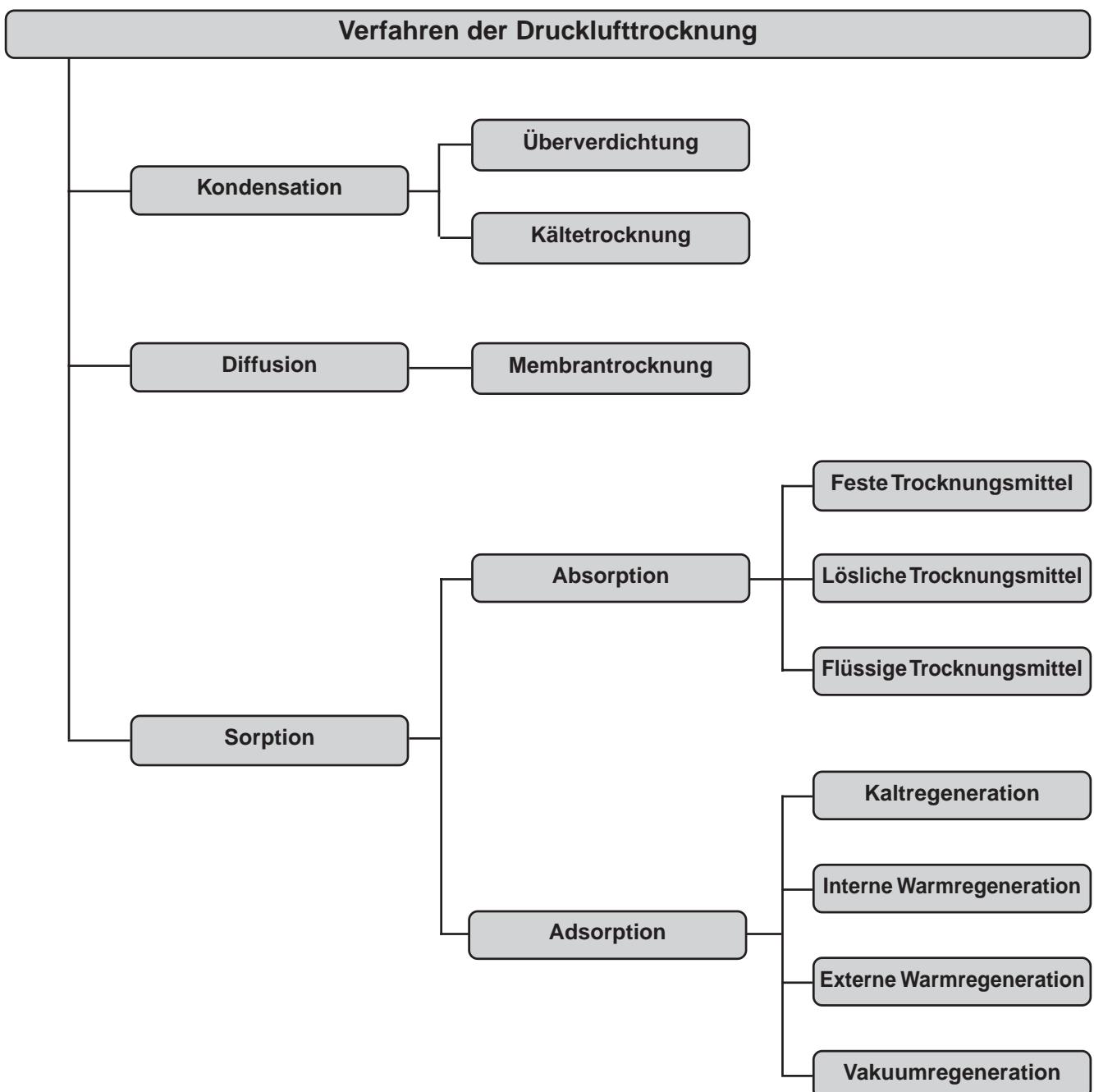
## 5.4 Trocknungsmethoden

In der Übersicht sind die Trocknungsmethoden für Druckluft entsprechend ihrem Arbeitsprinzip aufgeteilt. Grundsätzlich wird zwischen der Kondensation, der Sorption und der Diffusion unterschieden.

**Kondensation** ist die Wasserabscheidung durch die Unterschreitung des Taupunkts.

**Sorption** ist die Trocknung durch Feuchtigkeitsentzug.

**Diffusion** ist die Trocknung durch Molekültransfer.



## 5.4.1 Betriebsbedingungen

Die Durchflußleistung eines Trockner bezieht sich auf den Ansaugzustand der Luft bei der Verdichtung durch einen Kompressor nach PN2 CPTC2, ISO 1217 ( DIN 1945 Teil 1 ).

- Ansaugdruck  $p = 0 \text{ bar}_\text{ü} \triangleq 1 \text{ bar}_\text{abs}$
- Ansaugtemperatur  $T_0 = 293 \text{ K} \triangleq 20^\circ \text{ C}$

Trockner werden nach DIN ISO 7183 auf bestimmte Betriebsbedingungen ausgelegt. Die für den Trockner angegebenen Leistungsdaten sind nur unter diesen Bedingungen richtig :

- Betriebsdruck  $p = 7 \text{ bar}_\text{ü} \triangleq 8 \text{ bar}_\text{abs}$
- Umgebungstemperatur  $t_u = 298 \text{ K} \triangleq 25^\circ \text{ C}$
- Eintrittstemperatur  $t_{\text{Ein}} = 308 \text{ K} \triangleq 35^\circ \text{ C}$

Soll ein Trockner unter anderen Betriebsbedingungen genutzt werden, sind entsprechende Umrechnungsfaktoren zu berücksichtigen. Diese Faktoren unterscheiden sich bei den verschiedenen Trocknungsverfahren.

### Beispiel für die Auslegung eines Kälte-Drucklufttrockners

Umrechnungsfaktoren für Betriebsdruck und Umgebungstemperatur :

Betriebsdruck $p$ [ bar <sub>ü</sub> ]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16
Faktor $f$	0,62	0,72	0,81	0,89	0,94	1	1,04	1,06	1,09	1,1	1,12	1,15	1,17

Umgebungstemperatur $t_u$ [ °C ]	25	30	35	40	43
Faktor $t$	1,00	0,92	0,85	0,79	0,75

Ein BOGE-Kälte-Drucklufttrockner Modell D8 hat eine Durchflußleistung  $L$  von 45 m<sup>3</sup>/h. Er soll bei einer durchschnittlichen Umgebungstemperatur von  $t_u = 40^\circ \text{ C}$  und einem Betriebsdruck von  $p = 10 \text{ bar}_\text{ü}$  betrieben werden.

$$L = 45 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$p = 10 \text{ bar}_\text{ü} \Rightarrow f = 1,09$$

$$t_u = 40^\circ \text{ C} \Rightarrow t = 0,79$$

$$\begin{aligned} L_A &= L \times f \times t \\ L_A &= 45 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,09 \times 0,79 \\ L_A &= 38,75 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

$$L_A = \text{Angepaßte Durchflußleistung} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$L = \text{Durchflußleistung} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$f = \text{Umrechnungsfaktor für } p = 10 \text{ bar}_\text{ü}$$

$$t = \text{Umrechnungsfaktor für } t_u = 40^\circ \text{ C}$$

Der Kälte-Drucklufttrockner hat bei geänderten Betriebsbedingungen eine Durchflußleistung von 38,75 m<sup>3</sup>/h.

# Druckluftaufbereitung

## 5.4.2 Kondensation durch Überverdichtung

Bei der Überverdichtung wird die Luft weit über den benötigten Druck hinaus komprimiert, anschließend abgekühlt und auf den Betriebsdruck entspannt.

Drucktaupunkt [ °C ]	Betriebsdruck [ bar <sub>ü</sub> ]	Volumenstrom [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintrittstemperatur [ °C ]
ca. -70° C	Kompressor abhängig	Kompressor abhängig	–

### Funktionsprinzip

Die Luft kann mit zunehmendem Druck und damit abnehmendem Volumen immer weniger Wasser speichern. Bei der Verdichtung auf einen hohen Druck scheidet viel Kondensat aus. Dieses Kondensat wird abgeleitet. Die absolute Feuchte der Luft nimmt ab. Wird die Druckluft nun entspannt, sinkt die relative Feuchte und damit der Drucktaupunkt.

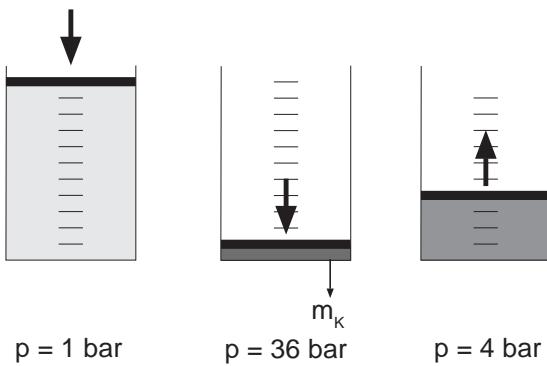


Bild 5.7 :  
Überverdichtung mit anschließender Entspannung

### Beispiel :

Druckluft wird auf 36 bar vorverdichtet. Dabei beträgt der Drucktaupunkt 10° C. Das Kondensat scheidet aus. Nach der Entspannung auf 4 bar hat die Druckluft einen neuen Drucktaupunkt von ca. -23° C.

( siehe Kapitel 5.2.8 Beispiel 1 )

### Eigenschaften

- Einfaches Verfahren mit kontinuierlichem Volumenstrom.
- Keine aufwendige Kühl- und Trocknungsanlagen.
- Wirtschaftlich nur für kleine Liefermengen.
- Sehr hoher Energieverbrauch.

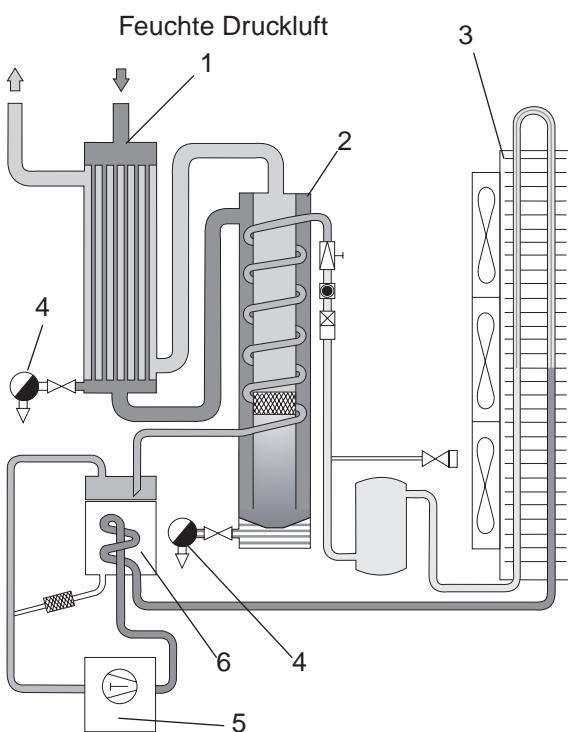
### 5.4.3 Kondensation durch Kältetrocknung

Drucktaupunkt [ °C ]	Betriebsdruck [ bar ü ]	Durchflußleistung [ m³/h ]	Eintrittstemperatur [ °C ]
bis + 2 °C	bis 210	11-35 000	bis +60° C

Bei sinkenden Temperaturen verringert sich die Fähigkeit der Luft, Wasser mit sich zu führen. Um den Feuchtegehalt zu verringern, kann Druckluft in einem Kältetrockner abgekühlt werden.

Die Kältetrocknung ist ein Vorgang, bei dem die Druckluft durch ein Kältemittel in einem Wärmeaustauscher gekühlt wird. Dabei scheidet der in der Druckluft enthaltene Wasserdampf in Form von Kondensat aus. Die ausfallende Kondensatmenge steigt mit der Differenz zwischen der Drucklufeintritts- und Austrittstemperatur.

#### Trockene Druckluft



- 1 = Luft/Luft Wärmeaustauscher
- 2 = Luft/Kältemittel Wärmeaustauscher
- 3 = Kältemittel/Luft Wärmeaustauscher
- 4 = Kondensatableiter
- 5 = Kältekomppressor
- 6 = Ausdampfer

#### Funktionsprinzip

Die Kältetrocknung läuft in zwei Phasen ab. Das geschieht zur Verbesserung des Wirkungsgrades und zur optimalen Nutzung der zugeführten Kälte.

##### 1. Phase

In einem Luft / Luft- Wärmeaustauscher kühlte die bereits durch den Kältetrockner gestromte Druckluft die neu einströmende Luft. Hier fallen 70 % des enthaltenen Wasserdampfes als Kondensat aus.

##### 2. Phase

Die Druckluft durchströmt einen Kältemittel / Luft- Wärmeaustauscher und kühlte fast bis zum Gefrierpunkt ab. Das ausgelaufene Kondensat wird vor der Wiedererwärmung in der ersten Kühlphase abgeleitet.

#### Eigenschaften

- Hohe Wirtschaftlichkeit.  
Für ca. 90 % aller Anwendungsfälle für Trockner ist die Kältetrocknung das wirtschaftlichste Verfahren.
- Abscheidung von Fremdstoffen.  
Nahezu 100 % aller Feststoffpartikel und Wassertropfen, die größer als 3 µm sind, werden abgeschieden.
- Geringer Druckverlust im Trockner.  
Der Druckabfall  $\Delta p$  durch den Trockner liegt bei ca. 0,2 bar.

*Bild 5.8 :  
Funktionsschema eines Kälte-Drucklufttrockners*

# Druckluftaufbereitung

## 5.4.4 Diffusion durch Membrantrocknung

Drucktaupunkt [ °C ]	Betriebsdruck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchflußleistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintrittstemperatur [ °C ]
0 bis -20 °C	5 -12,5	11 - 130	2° bis 60° C

Das Prinzip des Membrantrockners beruht auf der Tatsache, daß Wasser eine speziell beschichtete Hohlfaser über 20000 mal schneller durchdringt als Luft.

Der Membrantrockner besteht aus einem Bündel von tausenden beschichteter Hohlfasermembranen. Diese Hohlfasern sind aus einem festen, temperatur- und druckbeständigen Kunststoff hergestellt. Ihre Innenoberfläche ist mit einer ultradünnen (weniger als eine Lichtwellenlänge) Schicht eines zweiten Kunststoffes beschichtet. Die Hohlfasern ( Membranen ) sind in ein Rohr eingearbeitet, wobei der Innenkanal der Fasern am Ende offen ist.

feuchte Luft

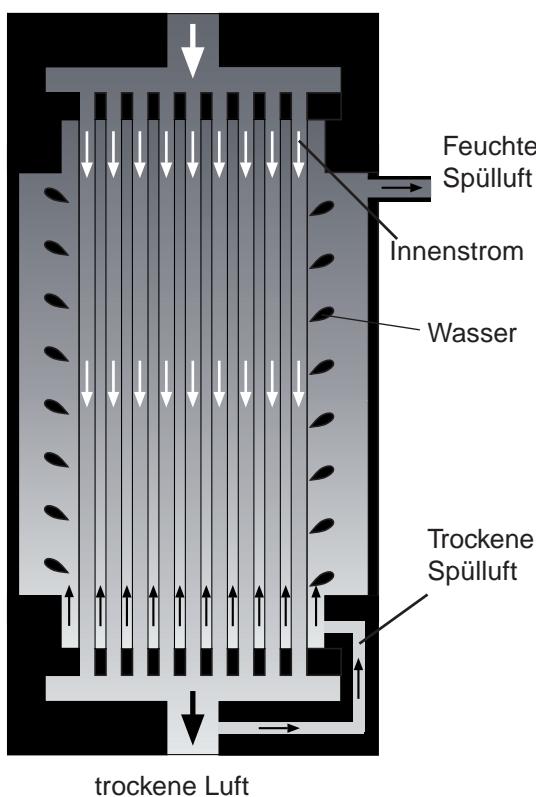


Bild 5.9 :  
Prinzipdarstellung eines Membrantrockners

### Funktionsprinzip

Die feuchte Druckluft durchströmt das Innere der Hohlfasern ( Innenstrom ). Der in der Druckluft enthaltene Wasserdampf dringt dabei durch den beschichteten Mantel der Hohlfasern nach außen. Dazu ist ein Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes zwischen dem Inneren und dem Äußeren der Hohlfaser nötig.

Vom getrockneten Hauptvolumenstrom des Kompressors wird ein SpülLuftstrom abgezweigt und entspannt. Da die maximale Luftfeuchtigkeit volumenabhängig ist, sinkt die relative Luftfeuchtigkeit. Die SpülLuft wird sehr trocken. Der trockene SpülLuftstrom umfließt die Hohlfasern und sorgt für das nötige Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes. Der SpülLuftstrom kann ungefiltert ins Freie entweichen.

### Eigenschaften

- Geringe Partikelbelastung der Luft.  
Dem Membrantrockner muß immer ein Filter vorgeschaltet werden, der Partikel bis zu einer Größe von 0,01 µm ausfiltert. Bei einer Installation direkt hinter dem Kompressor ist dem Filter ein Zyklonabscheider vorzuschalten.
- Geringer Druckverlust im Trockner.  
Der Druckabfall  $\Delta p$  durch den Trockner liegt bei max. 0,2 bar.
- Kompakte Bauweise.  
Der Trockner kann als Teilstück der Rohrleitung installiert werden.
- Kein Wartungsaufwand.  
Im Trockner gibt es keine beweglichen Teile.
- Kein Kondensatausfall bei der Trocknung
- Keine zusätzlichen Energiekosten.
- Geräuschfrei.
- Kein FCKW.
- Keine beweglichen Teile.
- Kein Motor.

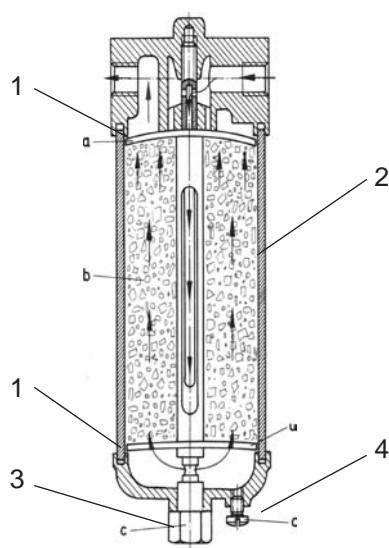
## 5.4.5 Sorption durch Absorption

Drucktaupunkt [ °C ]	Betriebsdruck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchflußleistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintrittstemperatur [ °C ]
Eintrittstemperatur abhängig	–	–	bis 30 °C

Bei der Absorptionstrocknung wird der Wasserdampf durch eine chemische Reaktion mit einem hygrokopischen Trocknungsmittel ausgeschieden. Da die Absorptionsfähigkeit des Trocknungsmittels mit der Zeit nachläßt, ist eine periodische Erneuerung notwendig.

Zu unterscheiden sind dabei 3 unterschiedliche Trocknungsmitteltypen. Die löslichen Trocknungsmittel verflüssigen sich mit fortschreitender Absorption. Die festen und flüssigen Trocknungsmittel reagieren mit dem Wasserdampf, ohne ihren Aggregatzustand zu verändern.

Trocknungsmittel		
Fest	Löslich	Flüssig
dehydrierte Kreide übersaures Magnesiumsalz	Lithiumchlorid Kalziumchlorid	Schwefelsäure Phosphorsäure Glyzerin Triäthylenglykol



- 1 = Sieb
- 2 = Festes Trocknungsmittel
- 3 = Deckel
- 4 = Kondensatablaß

*Bild 5.10 :  
Absorptionstrockner mit festem Trocknungsmittel*

### Funktionsprinzip

Bei der Absorption durchströmt die Druckluft von unten nach oben ein Trocknungsmittelbett. Dabei gibt sie einen Teil des Wasserdampfes an das Trocknungsmittel ab. Ein Ableiter führt das anfallende Kondensat aus einem Bodenbehälter ab. Der Drucktaupunkt wird um 8 - 12 % gesenkt.

### Beispiel

Druckluft gelangt mit einer Eintrittstemperatur von +30 °C in einen Trockner, der mit Kalziumchlorid arbeitet. Hier erreicht man einen Drucktaupunkt zwischen 18 und 22 °C.

### Eigenschaften

- niedrige Eintrittstemperatur.  
Hohe Temperaturen weichen das Trocknungsmittel auf und backen es zusammen.
- Stark korrosive Wirkung der Trocknungsmittel.  
Die getrocknete Druckluft kann Trocknungsmittel ins Druckluftnetz mitreißen. Dort verursacht es erhebliche Schäden.
- Keine Zufuhr von Fremdenergie.

Aufgrund ihrer Eigenschaften konnte sich die Absorptions-trocknung nur in Randbereichen der Drucklufttechnik etablieren. Zu nennen wäre z.B. die Druckluftaufbereitung in Laboratorien.

# Druckluftaufbereitung

## 5.4.6 Sorption durch Adsorption

Die Trocknung der Druckluft durch Adsorption ist ein rein physikalischer Vorgang. Die Luftfeuchtigkeit wird durch Adhäsionskräfte (unausgeglichene molekulare Anziehungskräfte) an das Trocknungsmittel gebunden. An der inneren und äußeren Oberfläche des Adsorptionsmittels lagert sich der Wasserdampf an, ohne daß eine chemische Verbindung stattfindet.

Das Adsorptionsmittel hat eine offene Porenstruktur und eine große innere Oberfläche. Die gebräuchlichsten Adsorptionsmittel sind Aluminiumoxid, Silicagel, Aktivkohle und Molekulsiebe. Für die verschiedenen Regenerationsverfahren werden unterschiedliche Adsorptionsmittel eingesetzt.

Adsorptionsmittel	Eigenschaften der Adsorptionsmittel *)			
	erreichbarer Drucktaupunkt [ °C ]	Eintritts-temperatur [ °C ]	Regenerations-temperatur [ °C ]	Oberfläche [ m²/g ]
Silicagel ( SiO <sub>2</sub> ), roh	- 50	+ 50	120 - 180	500 - 800
Silicagel ( SiO <sub>2</sub> ), kugelförmig	-50	+ 50	120 - 180	200 - 300
Aktiviertes Aluminiumoxyd ( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	- 60	+ 40	175 - 315	230 - 380
Molekulsiebe ( Na, AlO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> )	- 90	+ 140	200 - 350	750 - 800

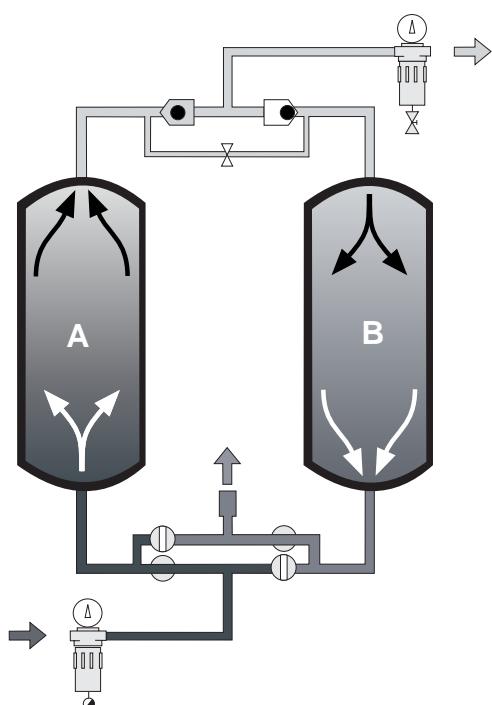
\*) Die Eigenschaften der Adsorptionsmittel ändern sich mit dem Druck und der Temperatur des zu trocknenden Gases

## Funktionsprinzip

Während des Trocknungsvorganges strömt die feuchte Druckluft durch den Adsorptionsmittelbehälter. Der Wasserdampf wird gebunden und die Druckluft dadurch getrocknet. Dieser Prozeß erzeugt Wärme. Wenn die Adhäsionskräfte durch Wasseranlagerungen ausgeglichen sind, muß das Adsorptionsmittel regeneriert werden. D.h., Wasser muß dem Adsorptionsmittel wieder entzogen werden. Aus diesem Grund müssen bei kontinuierlichem Betrieb zwei parallel geschaltete Trocknungsbehälter vorhanden sein. Der aktive Behälter A trocknet die Druckluft, während sie der inaktive Behälter B drucklos regeneriert.

Zur Regenerierung des Adsorptionsmittels werden im wesentlichen folgende Verfahren genutzt :

- die Kaltregeneration
- die interne Warmregeneration
- die externen Warmregeneration
- die Vakuumregeneration



## 5.4.6.1 Kaltregeneration

Druck- taupunkt [ °C ]	Betriebs- druck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchfluß- leistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintritts- temperatur [ °C ]
bis - 70° C	4 - 16	4 - 5600	bis + 60° C

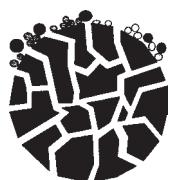
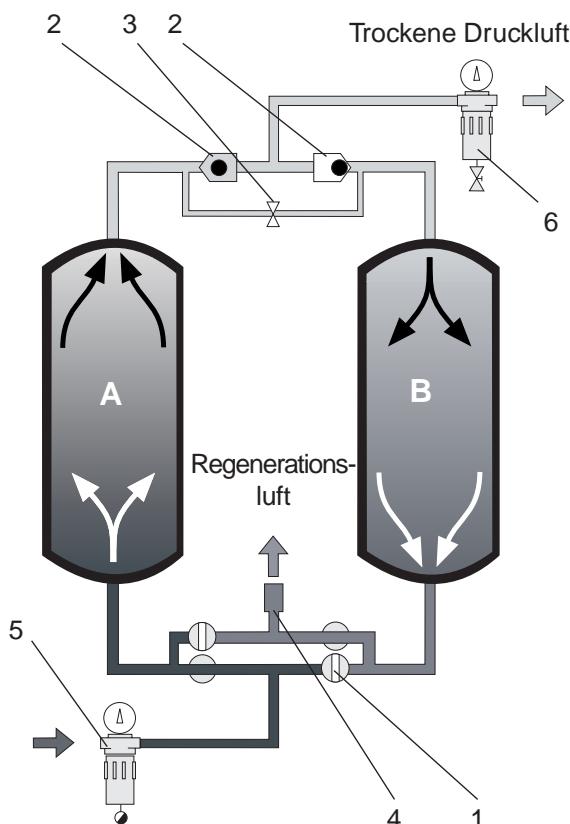


Bild 5.11 :  
Adsorptionsmittel nach 5 min Trocknungszeit



Feuchte Druckluft

- 1 = Ventilblock
- 2 = Rückschlagventil
- 3 = Lochblende
- 4 = Austrittventil
- 5 = Vorfilter
- 6 = Nachfilter

Bild 5.12 :  
Funktionsschema eines Adsorptionstrockners,  
kaltregenerierend

Bei der Kaltregeneration liegen die Trocknungs- und Regenerationszeiten bei ca. 5 min. Aus diesem Grund lagert sich die Feuchte nur an die äußere Oberfläche des Trocknungsmittels an.

Kaltregenerierende Adsorptionstrockner arbeiten nach dem Prinzip des Druckwechselverfahrens. Bei ihnen erfolgt die Desorption (Regenerierung) ohne zusätzliche Wärmezufuhr. Es wird ein Teil des getrockneten Volumenstromes abgezweigt. Dieser Teilstrom entspannt auf einen Druck kurz über 1 bar und ist dadurch extrem trocken. Diese trockene Luft strömt anschließend durch den zu regenerierenden Trocknungsbehälter B. Dabei nimmt sie die im Trocknungsmittel gespeicherte Feuchtigkeit auf und führt sie über ein Austrittsventil ins Freie.

### Eigenschaften

- **Wirtschaftlicher Einsatz bei kleineren Anlagen mit geringen Volumenströmen.**
- Einfacher Aufbau des Trockners.
- Einsetzbar bei hohen Umgebungstemperaturen.
- Geringes Trocknungsmittelvolumen.  
Trocknungs- und Regenerationszeiten ca. 5 Minuten.
- Hohe Betriebskosten.  
Die Regenerationsluft wird dem Druckluftsystem entnommen und kann nicht weiter genutzt werden.
- Regeneration ohne Zufuhr von Fremdenergie.
- Der prozentuale Anteil der Regenerationsluft an der Liefermenge des Kompressors sinkt bei höherem Verdichtungsenddruck.

Verdichtungs- enddruck [ bar <sub>abs</sub> ]	Regenerationsluftanteil [ % ]	
	Drucktaupunkt -25° bis -40° C	Drucktaupunkt -40° bis -100° C
5	25,83	27,14
7	17,22	18,1
10	11,49	12,07
15	7,39	7,77
20	5,46	5,47

Diese Werte sind physikalisch festgelegt und können nicht unterschritten werden. Sie ergeben sich aus dem Zusammenhang zwischen der Luftfeuchte und der Druckluftentspannung.

- Vorfilterung der Eintrittsluft.  
Ein Vorfilter befreit die Druckluft weitgehend von Ölanteilen, Wassertropfen und Schmutzpartikeln.
- Nachfilterung der getrockneten Druckluft.  
Aus dem Trocknungsbehälter mitgerissenes Trocknungsmittel muß wieder aus der Druckluft ausgefiltert werden.

# Druckluftaufbereitung

## 5.4.6.2 Interne Warmregeneration

Druck- taupunkt [ °C ]	Betriebs- druck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchfluß- leistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintritts- temperatur [ °C ]
bis - 40° C	2 - 16	200 - 5600	bis + 50° C

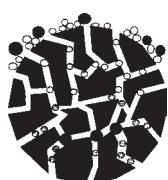
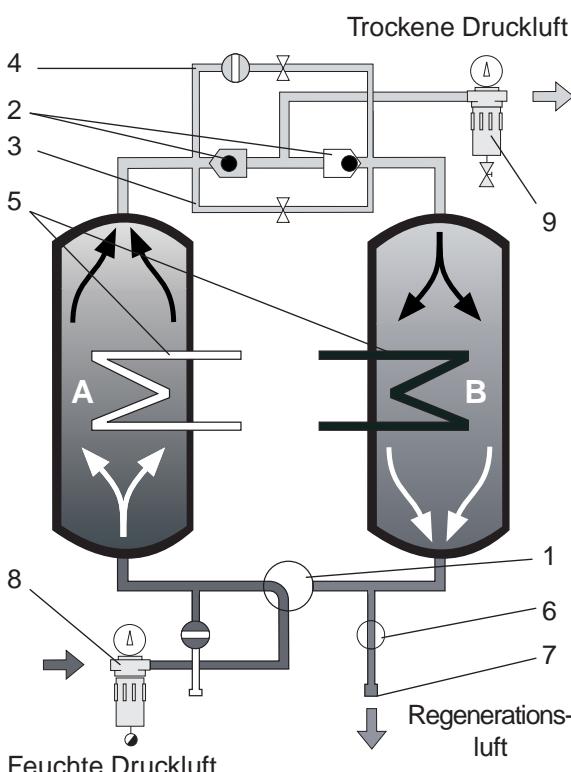


Bild 5.13 :  
Adsorptionsmittel nach 6 - 8 Std. Trocknungszeit



- 1 = Ventilblock
- 2 = Rückschlagventil
- 3 = Umgehungsleitung mit Lochblende **1. Phase**
- 4 = Umgehungsleitung mit Lochblende **2. Phase**
- 5 = Heizung
- 6 = Absperrventil
- 7 = Austrittventil
- 8 = Vorfilter
- 9 = Nachfilter

Bild 5.14 :  
Funktionschema eines Adsorptionstrockners,  
intern warmregenerierend

Bei der Warmregeneration liegen die Trocknungs- und Regenerierungszeiten bei 6 - 8 Std. Während der langen Trocknungsperiode lagert sich die Feuchte an den inneren und äußereren Oberflächen des Adsorptionsmittels an. Um diesen Prozeß umzukehren, muß von außen Wärme zugeführt werden. Bei Überschreiten der Regenerationstemperatur des Trocknungsmittels durch Wärmezufuhr, überwinden die auftretenden Oberflächenenergien die Adhäsionskräfte des Trocknungsmittels und das Wasser verdampft. Ein geringer Regenerationsluftstrom führt die Feuchtigkeit ab.

Die Regenerationstemperatur ist vom Drucktaupunkt der Regenerationsluft abhängig. Je tiefer er liegt, desto niedriger ist die Regenerationstemperatur des Trockners.

Bei der **internen Regeneration** wird die Wärme direkt von einer Heizung im Trocknungsbehälter auf das Adsorptionsmittel übertragen. Sie läuft in zwei Phasen ab:

### 1. Phase

Der Trocknungsbehälter **B** wird langsam durch die interne Heizung auf die notwendige Regenerationstemperatur erwärmt. Ist die Regenerationstemperatur überschritten, löst sich die Feuchtigkeit vom Adsorptionsmittel. Durch eine Umgehungsleitung werden ca. 2 - 3 % des getrockneten Druckluftstroms aus dem Kompressor entspannt und mit leichtem Überdruck durch den Trocknungsbehälter **B** geleitet. Dieser Regenerationsluftstrom nimmt den Wasserdampf auf und transportiert ihn über ein Austrittsventil ins Freie.

### 2. Phase

In einer Kühlphase sinkt die Betriebstemperatur wieder auf die Temperatur des Trocknungsbettes. Zu diesem Zweck öffnet eine zweite Umgehungsleitung. Dann werden ca. 5 % der Liefermenge des Kompressors durch den Trocknungsbehälter **B** geleitet. Die interne Heizung arbeitet zu diesem Zeitpunkt nicht mehr.

### Eigenschaften

- **Wirtschaftlicher Einsatz bei hohen Volumenströmen.**
- Einfacher Aufbau des Trockners.
- Es wird wenig getrocknete Druckluft benötigt um den Trockner zu regenerieren.
- Vorfilterung der Eintrittsluft.  
Ein Vorfilter befreit die Druckluft weitgehend von Ölanteilen, Wassertropfen und Schmutzpartikeln.
- Nachfilterung der getrockneten Druckluft.  
Aus dem Trocknungsbehälter mitgerissenes Trocknungsmittel muß wieder aus der Druckluft ausgefiltert werden.

### 5.4.6.3 Externe Warmregeneration

Drucktaupunkt [ °C ]	Betriebsdruck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchflußleistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintrittstemperatur [ °C ]
bis - 40° C	2 - 16	500 - 15 000	bis + 50° C

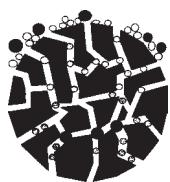
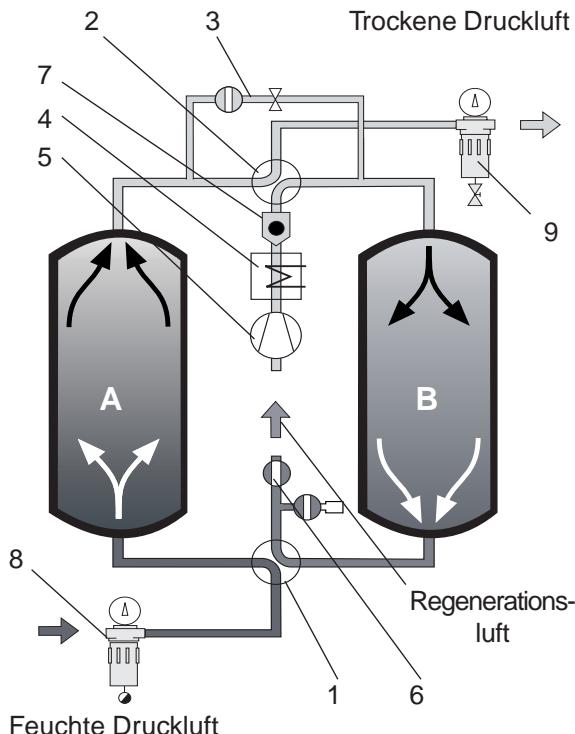


Bild 5.15 :  
Adsorptionsmittel nach 6 - 8 Std. Trocknungszeit



- 1 = Unterer Ventilblock
- 2 = Oberer Ventilblock
- 3 = Umgehungsleitung mit Lochblende **3. Phase**
- 4 = Heizregister
- 5 = Gebläse
- 6 = Absperrventil
- 7 = Rückschlagventil
- 8 = Vorfilter
- 9 = Nachfilter

Bild 5.16 :  
Funktionsschema eines Adsorptionstrockners,  
extern warmregenerierend

Bei der Warmregeneration liegen die Trocknungs- und Regenerierungszeiten bei 6 - 8 Std. Während der langen Trocknungsperiode lagert sich die Feuchte an den inneren und äußereren Oberflächen des Adsorptionsmittels an. Um diesen Prozeß umzukehren muß, von außen Wärme zugeführt werden. Bei Überschreiten der Regenerationstemperatur des Trocknungsmittels durch Wärmezufuhr, überwinden die auftretenden Oberflächenenergien die Adhäsionskräfte des Trocknungsmittels und das Wasser verdampft. Ein Regenerationsluftstrom führt die Feuchtigkeit ab.

Die Regenerationstemperatur ist vom Drucktaupunkt der Regenerationsluft abhängig. Je tiefer er liegt, desto niedriger ist die Regenerationstemperatur des Trockners.

Bei der **externen Regeneration** wird Umgebungsluft durch ein Gebläse angesaugt und in einem Heizregister erhitzt. Sie findet in drei Phasen statt:

#### 1. Phase

Der Trocknungsbehälter **B** wird langsam durch den heißen Luftstrom auf die notwendige Regenerationstemperatur erwärmt. Ist die Regenerationstemperatur erreicht, löst sich das Wasser vom Adsorptionsmittel. Das Gebläse pumpt weiter heiße Regenerationsluft durch den Trocknerbehälter **B**. Dieser Regenerationsluftstrom nimmt den Wasserdampf auf und transportiert ihn über ein Austrittsventil ins Freie.

#### 2. Phase

In einer Kühlphase sinkt die Betriebstemperatur wieder auf die Temperatur des Trocknungsbehälters **B**. Zu diesem Zweck wird das Heizregister des Gebläses abgeschaltet und kalte Umgebungsluft durch den Trocknerbehälter geleitet.

#### 3. Phase

Am Ende der Kühlung fließt trockene, entspannte Druckluft aus dem Kompressor durch den Trocknungsbehälter, damit die Umgebungsluft den Trockner nicht wieder mit Feuchtigkeit belastet.

#### Eigenschaften

- **Wirtschaftlicher Einsatz bei hohen Volumenströmen**
- Höhere Regenerierungstemperaturen ermöglichen einen niedrigeren Drucktaupunkt.
- Geringer zusätzlicher Druckluftverbrauch.  
Die Regenerationsluft wird nur zu einem kleinen Teil aus dem Druckluftsystem entnommen.
- Vorfilterung der Eintrittsluft.  
Ein Vorfilter befreit die Druckluft weitgehend von Ölanteilen, Wassertropfen und Schmutzpartikeln.
- Nachfilterung der getrockneten Druckluft.  
Aus dem Trocknungsbehälter mitgerissenes Trocknungsmittel muß wieder aus der Druckluft ausgefiltert werden.

# Druckluftaufbereitung

## 5.4.6.4 Vakuumregeneration

Druck- taupunkt [ °C ]	Betriebs- druck [ bar <sub>ü</sub> ]	Durchfluß- leistung [ m <sup>3</sup> /h ]	Eintritts- temperatur [ °C ]
bis - 80° C	4 - 16 bar	400 - 7400	bis + 40° C

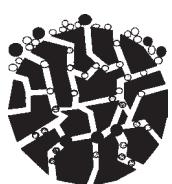
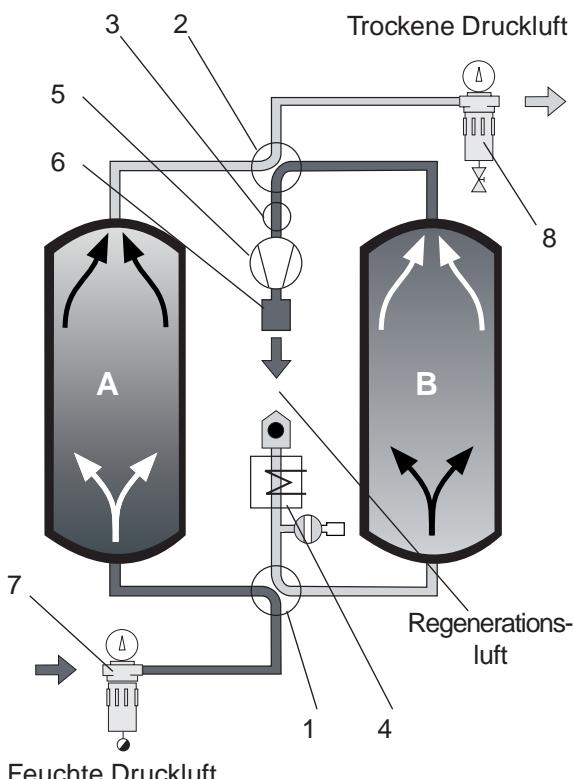


Bild 5.17 :  
Adsorptionsmittel nach 6 - 8 Std. Trocknungszeit



- 1 = Unterer Ventilblock
- 2 = Oberer Ventilblock
- 3 = Absperrventil
- 4 = Heizregister
- 5 = Gebläse
- 6 = Schalldämpfer
- 7 = Vorfilter
- 8 = Nachfilter

Bild 5.18 :  
Funktionsschema eines Adsorptionstrockners,  
Vakuumregenerierend

Die Vakuumregeneration ist eine Variante der externen Warmregeneration. Wie bei der Warmregeneration liegen die Trocknungs- und Regenerierungszeiten bei 6 - 8 Std. Während der langen Trocknungsperiode lagert sich die Feuchte an den inneren und äußereren Oberflächen des Adsorptionsmittels an. Um diesen Prozeß umzukehren, muß von außen Wärme zugeführt werden. Bei Überschreiten der Regenerationstemperatur des Trocknungsmittels durch Wärmezufuhr, überwinden die auftretenden Oberflächenenergien die Adhäsionskräfte des Trocknungsmittels und das Wasser verdampft. Ein Regenerationsluftstrom führt die Feuchtigkeit ab.

Die Regenerationstemperatur ist vom Drucktaupunkt der Regenerationsluft abhängig. Je tiefer er liegt, desto niedriger ist die Regenerationstemperatur des Trockners.

Bei der **Vakuumregeneration** wird Umgebungsluft mit Unterdruck durch den Trocknungsbehälter gesaugt. Dieser Luftstrom erhitzt extern. Die Vakuumregeneration läuft in zwei Phasen ab.

### 1. Phase

Eine Vakuumpumpe saugt Umgebungsluft an. In einem Heizregister wird dieser Luftstrom erhitzt und durch den Trocknungsbehälter gesaugt. Ist die Regenerationstemperatur erreicht, löst sich das Wasser vom Adsorptionsmittel. Der Regenerationsluftstrom nimmt den Wasserdampf auf. Anschließend wird er ins Freie abgeführt.

### 2. Phase

In einer Kühlphase sinkt die Betriebstemperatur wieder auf die Temperatur des Trocknungsbehälters. Zu diesem Zweck wird das Heizregister abgeschaltet und die kalte Umgebungsluft durch den Trocknungsbehälter gesaugt.

### Eigenschaften

- **Wirtschaftlicher Einsatz bei hohen Volumenströmen**
- Kein zusätzlicher Druckluftverbrauch.  
Es wird keine Druckluft zur Regeneration aus dem System entnommen.
- Hohe Standzeiten des Trockenmittels.  
Die thermische Belastung des Trockenmittels ist gering.
- Energiekosteneinsparung durch niedrigere Regenerationstemperatur.
- Vorfilterung der Eintrittsluft.  
Ein Vorfilter befreit die Druckluft weitgehend von Ölanteilen, Wassertropfen und Schmutzpartikeln.
- Nachfilterung der getrockneten Druckluft.  
Aus dem Trocknungsbehälter mitgerissenes Trocknungsmittel muß wieder aus der Druckluft ausgefiltert werden.

## 5.4.7 Anordnung des Kälte-Drucklufttrockners

Für die Anordnung eines Kälte-Drucklufttrockners in einer Kompressorstation gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Die Installation des Trockners **vor** oder **hinter** dem Druckluftbehälter. Eine generelle Festlegung kann man nicht treffen, da beide Varianten Vor- und Nachteile bei bestimmten Anwendungskonstellationen haben.

### 5.4.7.1 Trockner vor dem Druckluftbehälter

Vorteile :

- Getrocknete Luft im Druckluftbehälter.  
Es gibt keinen Kondensatausfall im Druckluftbehälter.
- Gleichbleibende Druckluftqualität.  
Auch bei schlagartiger, hoher Druckluftentnahme bleibt der Drucktaupunkt der Druckluft unverändert.

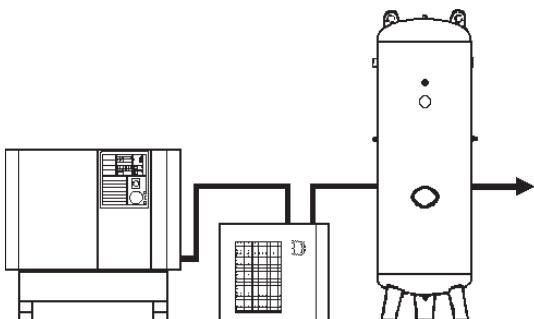


Bild 5.19 :  
Trockner vor dem Druckluftbehälter

Nachteile :

- Große Dimensionierung des Trockners.  
Der Trockner muß nach der effektiven Gesamtliefermenge des vorgeschalteten Kompressors ausgelegt werden. Bei niedrigem Verbrauch ist der Trockner oft überdimensioniert.
- Trocknung pulsierender Druckluft.  
Besonders Kolbenkompressoren liefern bauartbedingt einen pulsierenden Luftstrom. Das belastet den Trockner.
- Hohe Druckluft-Eintrittstemperatur.  
Die Druckluft kommt direkt vom Nachkühler des Kompressors.
- Trocknung eines Teilluftstroms ist nicht möglich.
- Große Kondensatmenge.  
Die gesamte Kondensatmenge beaufschlägt den Trockner.
- Bei Kompressor-Mehrfachanlagen muß jeden Kompressor ein Trockner nachgeschaltet werden.

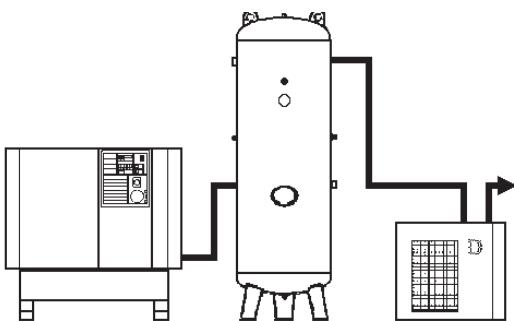
## Fazit

Die Anordnung des Trockners vor dem Druckbehälter ist selten zu empfehlen. Wenn oft mit plötzlichen Bedarfsspitzen zu rechnen ist und die Druckluftqualität nicht leiden darf, empfiehlt sich eine solche Anordnung.

# Druckluftaufbereitung

---

## 5.4.7.2 Trockner hinter dem Druckluftbehälter



### Vorteile :

- Günstige Dimensionierung des Trockners.  
Der Trockner kann nach dem tatsächlichen Druckluftverbrauch, oder einem zu trocknenden Teilstrom der Druckluft dimensioniert werden.
- Trocknung eines beruhigten Volumenstromes.
- Niedrige Druckluft-Eintrittstemperatur.  
Die Druckluft hat Gelegenheit, sich im Druckluftbehälter weiter abzukühlen.
- Kleine Kondensatmengen.  
Die ausgefallenen Kondensattröpfchen sammeln sich im Druckluftbehälter und belasten den Rest des Systems nicht.

*Bild 5.20 :  
Trockner hinter dem Druckluftbehälter*

### Nachteile :

- Kondensat im Druckluftbehälter.  
Feuchtigkeit im Druckluftbehälter führt zu Korrosion.
- Überlastung des Trockners.  
Bei schlagartiger, hoher Druckluftentnahme wird der Trockner überlastet. Der Drucktaupunkt der Druckluft steigt.

### Fazit

BOGE empfiehlt den Trockner in den meisten Fällen hinter dem Druckluftbehälter zu installieren. Dafür sprechen besonders wirtschaftliche Gründe. Es kann üblicherweise ein kleinerer Trockner gewählt werden. Er ist besser ausgelastet.