

Teil 3

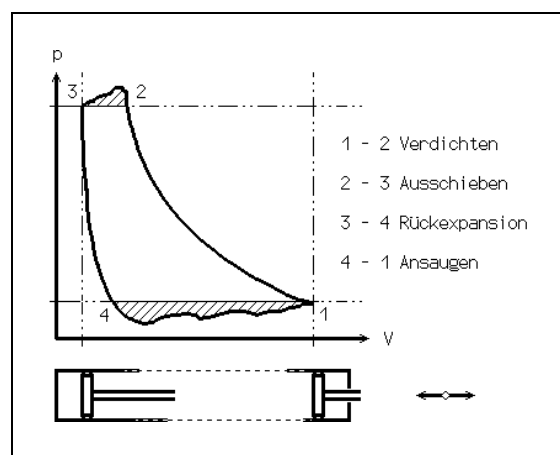
3.0 Kompressoren

Der Zustand eines Gases ist durch den Druck, das Volumen und die Temperatur festgelegt. Dieser Zustand lässt sich auf unterschiedliche Arten ändern.

- Isochore Zustandsänderung: Volumen bleibt konstant
- Isobare Zustandsänderung: Druck bleibt konstant
- Isotherme Zustandsänderung: Temperatur bleibt konstant
- Adiabatische Zustandsänderung: ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung

Lediglich die isotherme und adiabatische Zustandsänderung ist für Kompressoren von besonderer Bedeutung. Die Isotherme¹ erfordert den niedrigsten und die Adiabate² den höchsten Arbeitsaufwand bei der Verdichtung bzw. Kompression von Gasen.

Der wirkliche Verdichtungsprozess verläuft polytrop, d.h., die Verdichtungsline verläuft zwischen der Adiabate und der Isotherme. Je weiter sich die tatsächliche Verdichtung der Isotherme nähert, desto geringer ist die aufzuwendende Verdichtungsarbeit.



¹Exponent $n = 1$

²Exponent $x = 1,4$

Bild 3.0.1

Vereinfacht ist der idealisierte Arbeitsprozeß einer Verdrängermaschine in Bild 3.0.1 dargestellt.

Im Bereich der thermodynamischen Zustandsänderung gelten zwei Hauptsätze. Der erste Hauptsatz beschreibt die Wirkung der Arbeits- und Wärmeänderung entsprechend der Enthalpie. Der zweite Hauptsatz beschreibt den Wärmeaustausch der Entropie. Mit Hilfe der statischen Thermodynamik kann der erste Hauptsatz in den zweiten Hauptsatz eingearbeitet werden.

Bei der Verdichtung der Luft wird eine Zustandsänderung mit zunehmender Entropie durchgeführt. Diese Zustandsänderung erfolgt polytrop. Eine spezielle, in Kompressormaschinen angewendete, polytropische Zustandsänderung ist die der adiabatischen Zustandsänderung ohne Veränderung des Wärmeinhaltes. Die für die Druckänderung notwendige technische Arbeit ergibt sich aus der Differenz der Enthalpien von Zustand₁ und Zustand₂. Die verschiedenen Zustandsänderungen lassen sich im p*V-Diagramm als Fläche³ darstellen.

Die Annäherung an die isotherme einstufige Verdichtung, Linienvverlauf 1-2, wird dabei um so besser, je mehr isobare Zwischenstufen verwendet werden. Technisch realisiert werden zwei- und dreistufige Kompressoranlagen. Eine bei der adiabatischen oder isothermen Verdichtung eingesetzte Arbeit ist notwendig zur Kompression der Luft auf das höhere Druckniveau. Diese Arbeit stellt somit keinen Energieverlust dar. Die isobare Zwischen- und Endkühlung sowie die Kühlung des Öl- und Wasserkreislaufs bringen den erforderlichen Energieeinsatz zum Energieverlust, wenn die abzuführende Wärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Überschlägig gehen etwa 94 % der einem Kompressor zugeführten Energie als Abwärme verloren. Nur etwa 6 % werden mit der Druckluft abgeführt.

Ob die notwendige Wärmeabgabe zum Energieverlust führt liegt im Ermessen der Anlagenbetreiber. Eine Wärmerückgewinnung bei Kompressoren ist Stand der Technik. Die anfallende Wärmemenge wird dabei auf die Kühlmedien übertragen und zu den unterschiedlichen Einsatzstellen transportiert.

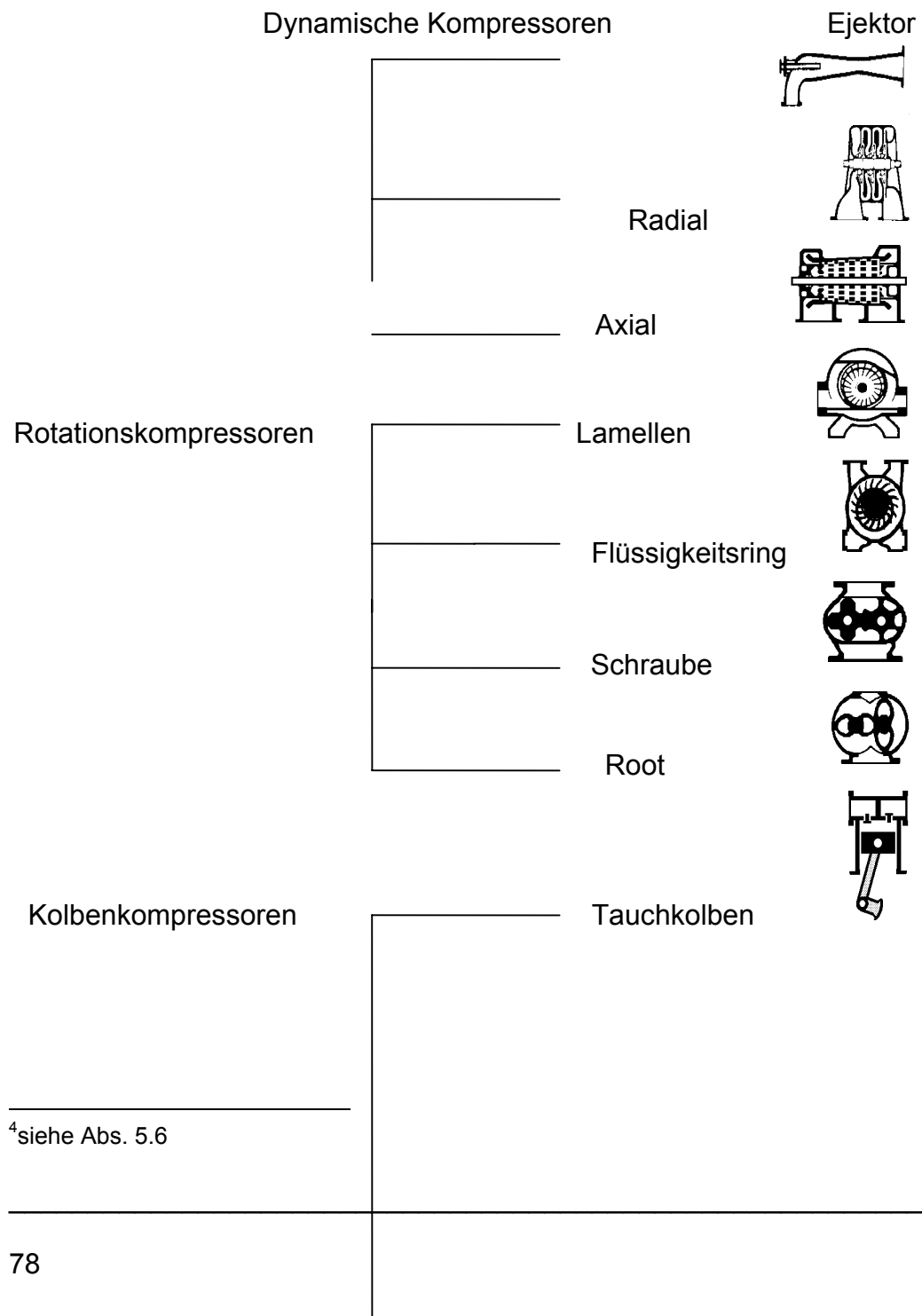
³siehe Bild 3.0.1

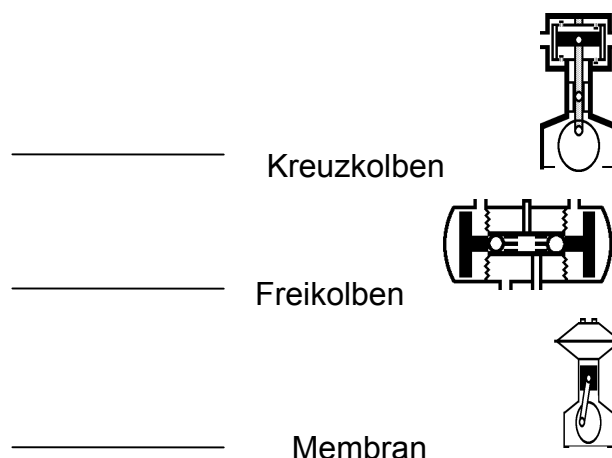
3.0 Kompressoren

Beim öleingespritzten Schraubenkompressor werden z.B. etwa 72 % Abwärme über den Ölkühler, 13 % Abwärme über den Nachkühler und 9 % Abwärme über den Antriebsmotor abgegeben. Diese Wärme steht z.B. der Warmwasser- und/oder Warmlufterzeugung zur Verfügung.

Bei ölfreien Verdichtersystemen wird die Verdichtungswärme zur Desorption vom Adsorptionstrockner⁴ genutzt.

3.1 Übersicht





3.2 Einteilung

Verdichter bzw. Kompressoren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

Die erste Gruppe arbeitet nach dem Prinzip der dynamischen Verdichtung und diese Verdichter sind ölfrei verdichtende Systeme. Die effektive Liefermenge eines Verdichters bei dynamischer Kompression ist vom Betriebsdruck abhängig.

Verdichter, die nach dem Prinzip der dynamischen Kompression arbeiten, sind z.B. Turboverdichter axialer oder radialer Bauart. Durch ein oder mehrere Laufräder wird bei der dynamischen Verdichtung die angesaugte Luft in eine hohe Strömungsgeschwindigkeit versetzt und dabei die kinetische⁵ Energie der Strömungsgeschwindigkeit in Druck umgewandelt.

Zur zweiten Gruppe zählen die Verdichter, die nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten. Hierbei wird ein statischer Druck derart aufgebaut, indem mit Hilfe eines sich bewegenden Teiles in einem geschlossenen Raum ein Luftvolumen angesaugt, verdichtet und ausgestoßen wird.

Zur Gruppe der Verdichter, die nach dem Verdrängungsprinzip arbeiten, gehören z.B. Kolbenkompressoren und Rotationskompressoren. Die Liefermenge dieser Kompressoren wird nicht vom Druck bestimmt, ausgenommen innere Leckageverluste oder der volumetrische Wirkungsgrad.

⁵Bewegung der Moleküle und Atome

3.0 Kompressoren

kungsgrad bewirken eine verminderte Liefermenge. Diese Kompressorsysteme werden in ölfreier, ölgeschmierter und ölgefluteter Ausführung gefertigt.

Überwiegend werden Kompressoren eingesetzt die nach dem Verdrängungssystem arbeiten und zwar in den Ausführungen:

- Kolbenkompressoren ölfrei und ölgeschmiert
- Lamellenkompressoren ölgeschmiert und ölgeflutet
- Schraubenkompressoren ölfrei und ölgeflutet

In den folgenden Kapiteln sind diese Systeme nur schemenhaft skizziert, da zu diesem Thema ausreichende Literatur zur Verfügung steht.

Kompressoren und Druckluftaufbereitung bilden eine Einheit. Fremdstoffe wie Wasser und Staub sind schon in der Umgebungsluft enthalten. Zusätzlich gelangt Öl bei der Kompression in die Druckluft, sofern nicht mit ölfrei verdichtenden Kompressoren gearbeitet wird. Der Einsatz ölfreier Kompressoren ist allerdings stark mit der Verwendungsart der Druckluft verknüpft und nicht in jedem Fall erforderlich.

Vor- und Nachteile ölfreier Kompressoren sollen in diesem Abschnitt nicht näher diskutiert werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die Verwendung ölfreier Kompressoren, dort wo es möglich ist, den Fremdstoff Öl aus der Druckluft fernhält.

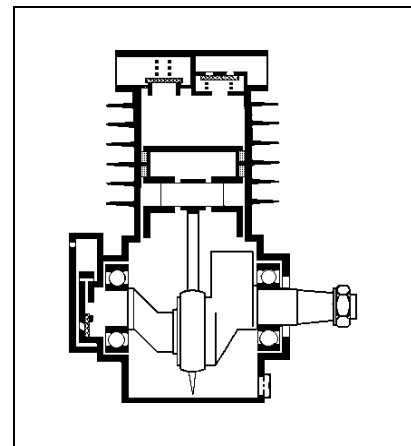
- Falsch wäre aber die Behauptung, daß bei der Verwendung ölfreier Kompressoren auf eine Aufbereitung der Druckluft verzichtet oder diese ganz ausgeschlossen werden kann.
- Richtig ist aber die Annahme, daß auch beim Einsatz ölgeschmierter Kompressoren Druckluft bis zur Sterilluft aufbereitet werden kann.

Die Feststellung "Kompressor und Aufbereitung bilden eine Einheit" ist also unabhängig von der Kompressorbauart. Diese Feststellung gilt grundsätzlich.

3.2.1 Kolbenkompressoren

Der Kolbenkompressor besteht im Prinzip aus einem Kurbelgehäuse mit Kurbelwelle und Pleuelstange, Kolben und Zylinder sowie Saug- und Druckventil.

Durch die rotierende Bewegung der Kurbelwelle und dadurch erzeugte Hin- und Herbewegung des Kolbens wird über ein Ansaugfilter Luft aus der Atmosphäre angesaugt und über das geöffnete Saugventil in den Zylinderraum gezogen. Drückt der Kolben bei der aufwärts gerichteten Hubbewegung die angesaugte Umgebungsluft in dem Zylinderraum zusammen, schließt das Ansaugventil und die Luft wird in dem Zylinder verdichtet.



3.0 Kompressoren

Bild 3.2.1.1

Die Luft wird dabei auf einen Teil ihres ursprünglichen Volumens zusammengedrückt, bei gleichzeitiger Erhöhung des Druckes im Zylinder um ein Mehrfaches. Der erhöhte Druck im Zylinder wirkt auf ein federbelastetes Druckventil. Übersteigt der im Zylinder eingeschlossene Druck die Federkraft des Druckventils, öffnet dieses Ventil und die Druckluft wird aus dem Zylinder ausgestoßen.

Es gibt differenzierte Arten der Verdichtung. Entweder wird die verdichtete Luft sofort in das nachgeschaltete Druckluftnetz gedrückt, dann handelt es sich um eine einstufige Verdichtung oder aber weitere Stufen der Verdichtung schließen sich der ersten Stufe an, dann liegt eine mehrstufige Verdichtung der Luft vor.

Ein zweistufiger Kompressor besteht im Prinzip aus zwei einstufigen Kompressoren, die auf einem gemeinsamen Kurbelgehäuse in Reihe geschaltet sind. In dem ersten wird die Luft vom Druck der freien Atmosphäre auf einen Druck verdichtet, der gleich der Quadratwurzel des absoluten Enddruckes ist. Bei der zwei- oder auch mehrstufigen Verdichtung wird dementsprechend die mechanische Beanspruchung der druckbelasteten Bauteile reduziert und dadurch eine längere Lebenszeit der Kolbenkompressoren erreicht.

Zwischen der ersten und der zweiten Stufe des Kompressors wird ein Zwischenkühler gesetzt. Ohne Zwischenkühler würde die Verdichtungsarbeit in der zweiten Stufe an dem warmen und vergrößerten Luftvolumen fortgesetzt und auf die Verdichterendtemperatur wirken wie bei einer einstufigen Verdichtung. Die Abkühlung in dem Zwischenkühler erlaubt die Verdichtung auf den Enddruck bei verkleinertem Luftvolumen. Ein weiterer Vorteil der zweistufigen Verdichtung ist die reduzierte Endtemperatur der Luft durch die Kühlung nach der Verdichtung.

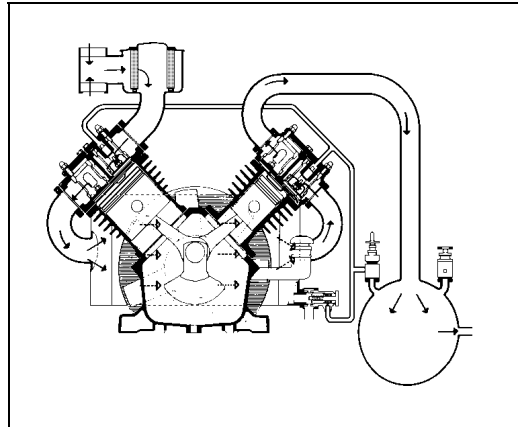


Bild 3.2.1.2

Eine zweistufige Verdichtung auf $p = 9$ bar wird mit einer Endtemperatur von $T_2 = 110$ °C erreicht, gegenüber einer Temperatur von $T_1 = 240$ °C bei der einstufigen Verdichtung. Eine solch hohe Temperatur wie bei der einstufigen Verdichtung bringt natürlich Probleme mit sich, nicht nur hinsichtlich der Kompressorschmierung.

Kolbenkompressoren gibt es in den verschiedensten Ausführungen. Basis ist das komplette Kompressoraggregat, zusammengebaut mit einem Elektromotor als Antriebseinheit und den grundsätzlichen Zubehöerteilen wie Ansaugfilter, Zwischen- und Nachkühler, automatischer Entwässerung und Sicherheitsventilen. Ein wichtiger Faktor ist die integrierte Regelungsart, die für den Aussetz- und Leerlaufbetrieb des Kompressors geeignet sein muß.

Das Signal für die Regelung liefert ein auf die Betriebssituation eingestellter Druckwächter mit einem unteren und oberen Grenzwert für den Druck. Wird der untere Grenzwert erreicht, fördert der Kompressor automatisch solange durchgehend Druckluft in das System, bis der obere Schalterpunkt erreicht und damit die Abschaltung des Kompressors bewirkt wird.

Die Aussetzregelung setzt bei Erreichen der oberen Schaltergrenze den Kompressor still. Diese Art der Regelung wird eingesetzt, wenn der Druckluftverbrauch sehr stark schwankt und unregelmäßig ist. Diese Regelungsart ist die wirtschaftlichste, jedoch darf dabei die maximale Schalzhäufigkeit des Elektromotors nicht überschritten werden.

3.0 Kompressoren

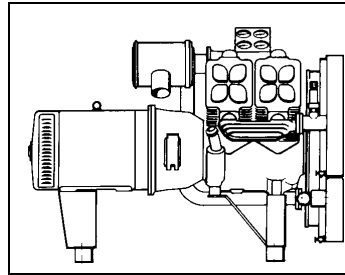


Bild 3.2.1.3

Die Leerlaufregelung wird dann eingesetzt, wenn eine kurze Stillstandzeit und dadurch bedingt eine große Schalzhäufigkeit des Kompressors dieses erfordert. Bei Erreichen der oberen Schaltgrenze wird die Förderung auf "Null" gesetzt. Der Kompressor läuft dann mit geringem Stromverbrauch im Leerlauf weiter.

Die Kombination aus Aussetz- und Leerlaufregelung wird heute als Standard gewählt mit der erweiterten Funktion, die Leerlaufperiode zeitlich zu bestimmen. Dadurch wird bei hohem Luftverbrauch mit entsprechend vielen Schaltvorgängen eine automatische Anpassung an die Betriebssituation möglich.

Fast alle Kompressorenhersteller bieten heute über diese herkömmlichen Steuerungsmöglichkeiten hinaus maßgeschneiderte Verbundsysteme für individuelle Betriebsverhältnisse an.

Einstufige Kolbenkompressoren sind anzutreffen im niedrigen Druckbereich bei kleinen Fördermengen. Zwei- und mehrstufige Kolbenkompressoren werden in der Regel bei höheren Enddrücken benötigt.

Bis zu mittleren Fördermengen werden Kolbenkompressoren nur als luftgekühlte Verdichter, darüber hinaus wahlweise als luftgekühlte und auch wassergekühlte Verdichter gefertigt.

Das Diagramm 3.2.1.1 zeigt die Motorwellenleistung von Kolbenkompressoren in Abhängigkeit der Förderleistung und dem Betriebsüberdruck. Als Basis für dieses Diagramm wurden Kolbenkompressoren herangezogen mit einer Drehzahl von 1450 min^{-1} eines international namhaften Verdichterherstellers.

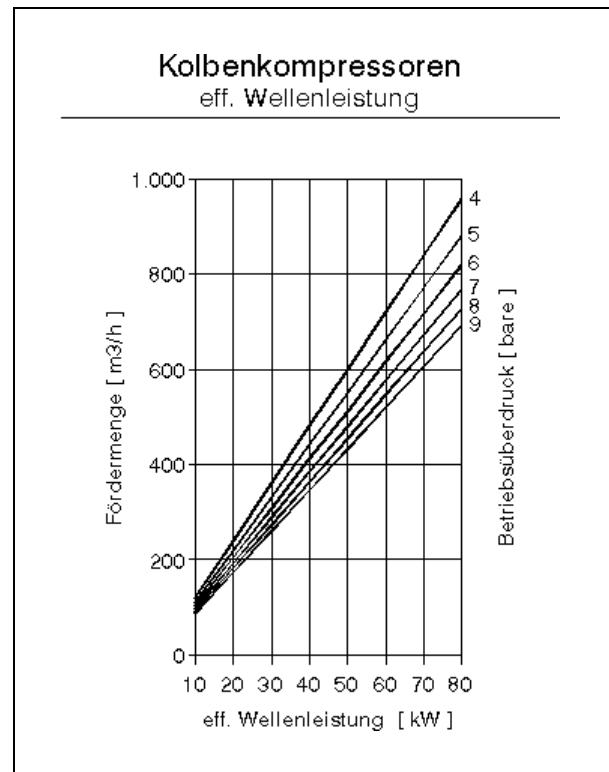


Diagramm 3.2.1.1

Die im Diagramm angegebenen Wellenleistungen sind nicht auf einen bestimmten Typ bezogen, sondern sind gemittelte Werte aus einer einheitlichen Baureihe.

3.2.2 Lamellenkompressoren

3.0 Kompressoren

Der Lamellen- oder Rotationsverdichter besteht aus einem zylindrischen Gehäuse, in dem ein Rotor exzentrisch gelagert ist. In diesem Rotor sind Längsschlitze zur Aufnahme der Lamellen eingelassen. Bei der Rotation werden die Lamellen durch die Fliehkraft gegen die Zylinderinnenwand gedrückt.

Laufringe fangen die Fliehkräfte der Lamellen bei der Rotation auf. Der Innendurchmesser der Laufringe ist dabei etwas kleiner als der Zylinderdurchmesser. Lamellenkompressoren gibt es in ölgeschmierter und in ölgefluteter Ausführung. In beiden Fällen wird Verdichteröl nicht nur allein zur Schmierung, sondern auch zur Abdichtung zwischen den einzelnen Lamellen und der Gehäuseinnenwand genutzt.

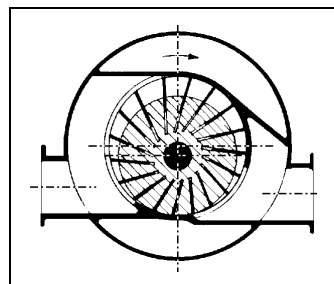


Bild 3.2.2.1

Bei ölgefluteten Lamellenkompressoren wird eine erhebliche Ölmenge in den Verdichterraum eingebracht. Mit dieser Ölmenge wird die bei der Verdichtung entstehende Wärme abgeführt, so daß die Verdichtertemperatur nur ca. $T = 80 - 90 \text{ °C}$ beträgt. Das eingespritzte Öl wird nach der Verdichtungsarbeit durch Abscheider gefiltert und dem Kreislauf nach der Abscheidung wieder zugeführt.

Ölgeschmierte Lamellenkompressoren dagegen erreichen im Verdichterraum sehr hohe Temperaturen in Abhängigkeit vom Enddruck. Bei der Kompression verkracken die Verdichteröle derart, daß die Restölanteile in der Druckluft sich zwar ausfiltern lassen, allerdings nur zu Lasten der reduzierten Standzeit von nachgeschalteten Filterelementen.

Die einzelnen Lamellen, entweder aus phenolharz imprägnierten Kunststoffen oder gehärtetem Stahl gefertigt, bilden mit der zylindrischen Außenwand Zellen, die sich bei der Drehung des Rotors vergrößern und auf der Gegenseite verkleinern. Auf der Ansaugseite wird Umgebungsluft durch Vergrößerung der Zellen angesaugt und bei der Rotation zur Druckseite transportiert. Durch die Verkleinerung der Zellen wird die Luft kontinuierlich verdichtet.

Lamellenkompressoren werden als anschlussfertige Kompaktaggregate zur Druckluftherzeugung geliefert. Die Aufstellung der einstufigen, einwelligen Verdichter kann ohne Fundament erfolgen. In der Regel sind diese Verdichter komplett ausgerüstet mit Nachkühler, Abscheider und allen erforderlichen Sicherheitseinrichtungen. Kompressoren dieser Bauart sind ohne Ventile, sind dafür aber mit einer dem Verdichterenddruck angepaßten Steuerkante versehen.

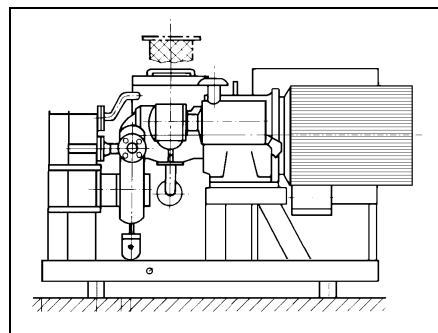


Bild 3.2.2.2

Die Anpassung an die Betriebssituation erfolgt über eine Saugdrosselregelung. Wird bei Nennbetrieb des Verdichters der Druckluftverbrauch geringer, steigt der Druck im System an. Sobald der Druck im System einen voreingestellten Wert erreicht, wird über einen Regler eine Saugdrossel aktiv, die das Ansaugvolumen reduziert, annähernd proportional der verringerten Druckluftabnahme.

Die Leistungsaufnahme des Antriebsmotors ist der Betriebssituation entsprechend angepaßt. Je kleiner der Druckluftverbrauch wird, um so mehr steigt der Druck im System an. Erreicht der am Druckwächter eingestellte Grenzwert den maximalen Schaltpunkt, öffnet die Regelung ein integriertes Entlastungsventil und der Druck im Kompressor sinkt auf etwa 3 bar.

Zum Verbrauchersystem ist der Verdichter durch ein Rückschlagventil getrennt, saugseitig wird über die Drosselung das Ansaugvolumen auf den geringsten Wert gesetzt. Der Kompressor arbeitet jetzt im geschlossenen Kreislauf bzw. Leerlauf bei minimaler Leistungsaufnahme, die etwa 22 % der Nennleistung beträgt. Lamellenkompressoren, ob luft- oder wassergekühlt, werden immer weniger eingesetzt im industriellen Bereich. Der maximale Druckbereich erreicht in der Regel $p_e = 10$ bar. Die Fördervolumen decken den mittleren Bedarf ab.

3.2.3 Schraubenkompressor

Das Arbeitsprinzip der Schraubenkompressoren ist seit über 100 Jahren bekannt. Fast 75 Jahre allerdings dauerte es, bis die vielfältigen Möglichkeiten dieser Verdichterbauart erkannt, aber auch die technologischen Voraussetzungen zur industriellen Fertigung geschaffen wurden. Heute sind Schraubenkompressoren sehr weit verbreitet und verdrängen in zunehmenden Maße die bewährten Kolben-, Rotationsverdichter und andere Verdichtersysteme. 1943 wurde der erste Prototyp eines Schraubenkompressors gebaut. Es handelte sich dabei um einen ölfreien Verdichter mit berührungslos gegeneinanderlaufenden Rotoren. Der Hauptläufer treibt dabei über ein Synchrongetriebe den Nebenläufer an.

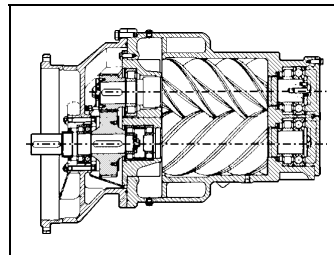


Bild 3.2.3.1

1946 wurde das symmetrische Kreisprofil von SRM entwickelt. Dieses ist mehrfach verbessert worden bis zum asymmetrischen Profil und noch heute unter dem Namen SRM-Profil geläufig. In Verbindung mit der Firma Holroyd konnten im März 1955 die ersten Schraubenkompressoren unter wirtschaftlichen Perspektiven gefertigt werden. Schon bald erwarb sich der Schraubenkompressor den Ruf einer betriebs-sicheren Maschine. Der Durchbruch allerdings erfolgte erst 1960 in Verbindung mit intensiven Versuchen, Öl und andere Flüssigkeiten in die Kompressionsräume einzuspritzen, um ungereinigte und explosive Gase bei der Verdichtung zu beherrschen.

Die Einspritztechnik führte zur Entwicklung der Schraubenkompressoren ohne Synchrongetriebe mit Öleinspritzkühlung, da die Läufer wegen der Schmierung des eingespritzten Öls berührungslos gegeneinander laufen konnten. Etwa 85 % und mehr vom gesamten Druckluftbedarf muß dem Verbraucher nicht ölfrei zugeführt werden. Allein daraus ist die Bedeutung für diesen Verdichtertyp zu erkennen.

Schraubenkompressoren sind mit zwei spindelförmigen ineinandergreifenden Rotorläufern ausgestattet. Der Hauptläufer wird in der Regel mit vier, der Nebenläufer mit sechs Gängen gefertigt, wobei der Hauptläufer etwa 85 % - 90 % der an der Kupplung von der Antriebsmaschine aufgenommenen Energie in Druck- und Wärmeenergie umsetzt.

Der Nebenläufer sorgt lediglich für die Abdichtung des Arbeitsraumes zwischen Saug- und Druckseite. Haupt- und Nebenläufer erzeugen bei der Rotation zwischen den Läufergängen und den Zylinderwänden der Verdichterstufe einen zum Ende hin immer kleiner werdenden v-förmigen Raum für die angesaugte Luft. Bevor die vorlaufende Kammer die Auslaßkante verschließt, erreicht die folgende Kammer diese Auslaßkante.

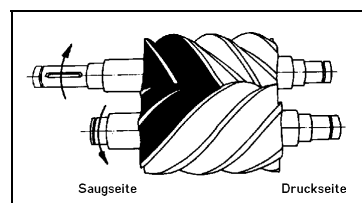


Bild 3.2.3.2

Das Bild 3.2.3.2 zeigt das Ansaugen. Die Luft tritt durch die Einlaßöffnung in die saugseitig offenen Schraubengänge der Rotoren.

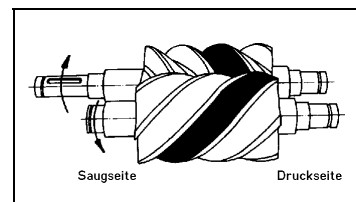
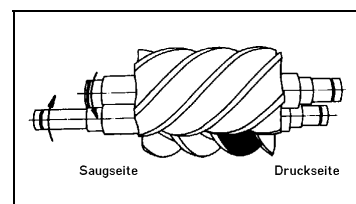


Bild 3.2.3.3

Beim Verdichten wird durch fortschreitende Drehung der Rotoren die Lufteinlaßöffnung verschlossen und das Volumen bei steigendem Druck verkleinert. Gleichzeitig wird bei diesem Vorgang Öl in das System eingespritzt.



3.0 Kompressoren

Bild 3.2.3.4

Alle Kammern komprimieren auf diese Weise kontinuierlich die Luft fast pulsationsfrei auf den Enddruck. Durch die schnelle Folge der sich füllenden und entleerenden Arbeitsräume entsteht der Eindruck einer pulsationsfreien Strömung.

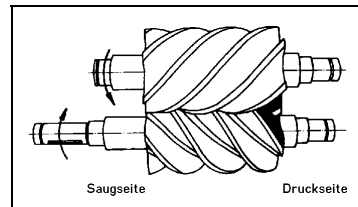


Bild 3.2.3.5

Mit dem Ausströmen ist die Verdichtung beendet und gleichzeitig der Enddruck erreicht. Die dabei entstehende Wärmeenergie wird vom eingespritzten Öl aufgenommen und im Ölkühler abgeführt. Die weiteren Aufgaben vom eingespritzten Öl bestehen darin, über einen Schmierfilm den nicht angetriebenen Läufer mitzunehmen und über den Dichteffekt die inneren Leckagen zu vermindern. Einstufig werden diese Schraubenkompressoren mit Öleinspritzkühlung im Druckbereich eingesetzt bis $p_e = 13$ bar.

Gebaut werden diese Verdichter als Kompaktanlagen mit einem geschlossenen Ölkreislauf. Problematisch war in den Anfangsjahren die Abscheidung des Öles aus der Druckluft, da die eingespritzten Öl-mengen beachtlich waren. Nach vielen Abscheideexperimenten mit allen nur möglichen Bauarten und Füllmaterialien der Abscheider gelang der Durchbruch mit Grobabscheidung durch genügend groß gewählte Beruhigungsräume und die ergänzende Feinabscheidung durch Fiberglaspatronen.

Schraubenkompressoren wie in Bild 3.2.3.6 saugen Luft über ein Ansaugfilter (Pos. 1) und Verschmutzungsanzeige (Pos. 2) an. Nach Passieren des Ansaugreglers (Pos. 3) gelangt die Luft in die Kompressorstufe (Pos. 4) und wird hier verdichtet. In den Verdichtungsraum wird kontinuierlich Öl mit ca. 55 °C dosiert eingespritzt. Dieses Öl hat die Funktionen: Kühlen, Dichten und Schmieren. Das Öl nimmt beim Verdichtungsprozess entstehende Wärme auf und erreicht ca. 85 °C. Das Öl dichtet aber auch den Spalt zwischen den Läuferpaaren und dem Gehäuse, es schmiert die Lager und Schraubenflanken sowie das Getriebe. Im kombinierten Druckluft/Öl-Behälter (Pos. 5) werden unter Ausnutzung von Strömungsumlenkungen Öl und Druckluft mit einem

Abscheidegrad von mehr als 95 % mechanisch getrennt. Ein Ölabscheider (Pos. 6) übernimmt die Restabscheidung. Die Restölwerte sind bei diesem Verdichtersystem reduziert auf etwa $3 - 15 \text{ mg/m}^3$.

Die Druckluft gelangt dann über ein Mindestdruck-Rückschlagventil (Pos. 7) in den Nachkühler (Pos. 8) und wird hier auf die Temperatur von $10 - 15 \text{ °C}$ über Ansaugtemperatur gekühlt und anschließend über das Absperrventil (Pos. 9) ins Betriebsdruckluftnetz gegeben. Das im Ölabscheider separierte Öl wird in einem Ölkühler (Pos. 10) von 85 °C auf 55 °C zurückgekühlt. Es passiert ein Ölfilter (Pos. 12), um die Kompressorstufe vor Fremdkörper zu schützen. Im Ölkreislauf ist zusätzlich ein thermostatisches Ölregelventil (Pos. 11) angeordnet.

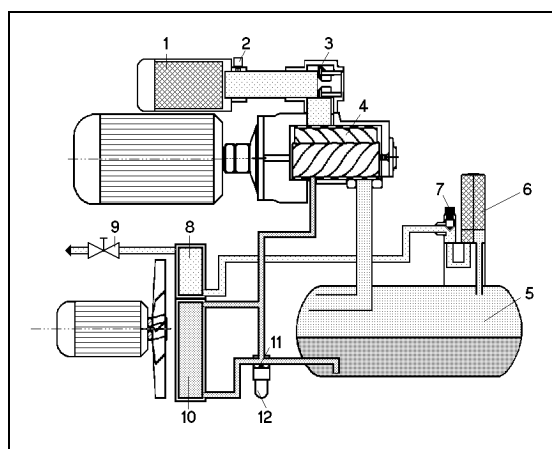


Bild 3.2.3.6

Heute ist der öleingespritzte Schraubenkompressor der populärste Vertreter der Gattung Verdichter auf dem Weltmarkt und aus der Industrie nicht mehr wegzudenken. Die wenigen rein rotierend bewegten Teile des Schraubenkompressors haben den Ruf als betriebssichere Maschine begründet. Damit aber nicht genug, kehrt man die Drehrichtung um, so ist die Schraubenmaschine ein Expansionsmotor, dessen Wirkungsgrad beachtlich ist. Alle diese Faktoren haben dazu beigetragen, das System Schraube fest in die Druckluftherzeugung zu verankern.

Schraubenkompressoren werden gefertigt für kleine bis mittlere Förderolumenbereiche und überschneiden dabei die Bereiche, die bis vor kurzem noch den Turboverdichtern vorbehalten waren. Kleinere Leistungsbereiche der Schraubenkompressoren werden in luftgekühlter, größere in luft- oder wassergekühlter Ausführung gebaut. Alle heute auf dem Markt angebotenen Verdichtereinheiten bestehen in der Regel zumindest aus:

3.0 Kompressoren

- dem Antrieb mit der gekoppelten Übersetzung zur Anpassung an die Kompressordrehzahl,
- Regel- und Sicherheitsarmaturen, um die Drucküberwachung zu automatisieren,
- Kühler zwischen den einzelnen Verdichterstufen bei mehrstufiger Verdichtung und
- einem zusätzlichen Nachkühler zur Reduzierung der Endtemperatur einschließlich Kondensatabscheider und Kondensatableiter zur Ausschleusung des abgeschiedenen Kondensats.

Darüber hinaus sind die Verdichter auf einem Grundrahmen aufgebaut und in eine schalldämmende Box untergebracht. Moderne Systeme werden heute in Kombination mit Wärmerückgewinnungsmodulen im Baukastensystem anschlussfertig geliefert.

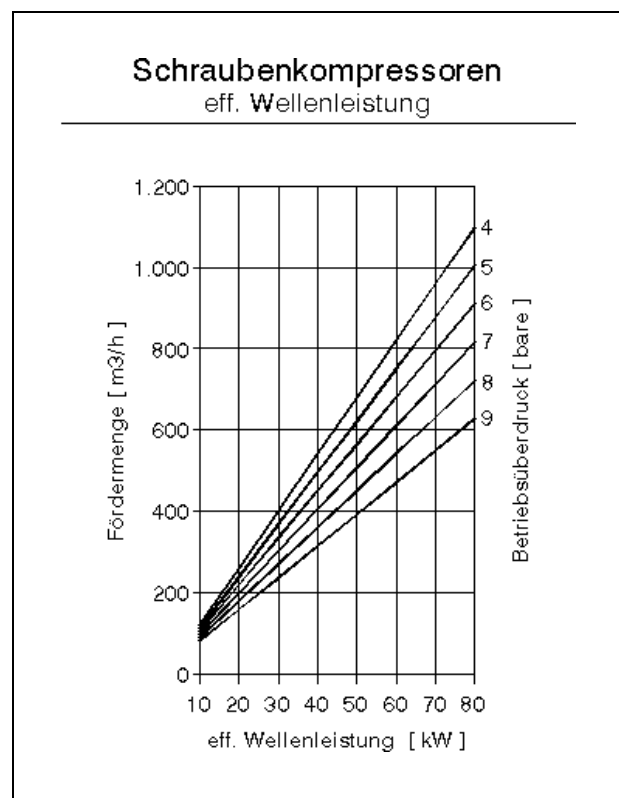


Diagramm 3.2.3.1

Diagramm 3.2.3.1 zeigt die Abhängigkeit der Wellenleistung vom Betriebsdruck und der Fördermenge auf der Basis der unterschiedlichsten

Leistungskurven von zwei nationalen Herstellern der Schraubenkompressorblöcke.

3.3 Kompressorzubehör

Kompressoren saugen Umgebungsluft an und verdichten diese auf den Enddruck. Bei diesem Vorgang wird die Luft erwärmt, mit Öl angereichert, durch Feststoffe belastet und mit Feuchtigkeit durchsetzt. Verunreinigungen und Belastungen gelangen ungehindert in das System, wenn nicht über Ansaugfilter und Nachkühler mit Ableiter schon am Kompressor eine Vorabscheidung gegeben wäre.

3.3.1 Ansaugfilter

Jeder Kompressor wird mit einem Ansaugfilter auf der Saugseite ausgerüstet, um die in der Umgebungsluft enthaltenen Feststoffverunreinigungen aus dem Druckluftsystem fernzuhalten. Ansaugfilter werden weitgehendst dem Verwendungszweck angepaßt. Diese unterscheiden sich in der Art und Form als auch in der Größe beträchtlich. Die gängigsten Ansaugfilter beruhen auf folgenden Grundprinzipien:

- Zyklone, die den Staub durch Zentrifugalkräfte ausschleudern
- Naßluftfilter, die den Staub durch eine Flüssigkeit binden
- Trockenfilter, die eine siebende Wirkung ausüben

Die Filterwirkung, durch den Entstaubungsgrad charakterisiert, gibt an, welcher Prozentsatz des in der Luft enthaltenen Staubes zurückgehalten wird, bezogen auf AFI-Prüfstaub-Zusammensetzung.

Prüfstaub-Zusammensetzung	Korngrößen	Anteil
Straßenstaub	0 - 5 µm	28 %

⁶kurze Baumwollfäden

Ruß Baumwoll-Linters ⁶	5 - 10 µm	13 %
	10 - 20 µm	11 %
	20 - 40 µm	13 %
	40 - 80 µm	7 %
	0,08 µm	25 %
		3 %

Tabelle 3.3.1.1

3.3.2 Nachkühler

Die im Abschnitt 3.2 beschriebenen Kompressortypen haben als gemeinsames Merkmal die Ölschmierung. Für viele Druckluftanwender war Öl nicht nur unerwünscht sondern auch unter Umständen gefährlich. Die Zahl der aufgetretenen Brände und Explosionen in Luftverdichtern blieb aber im Verhältnis zur Anzahl der betriebenen Verdichter äußerst gering, doch gaben die Folgen der Unfälle in der Vergangenheit Anlaß, ausreichende Sicherheitsmaßnahmen einzuführen. Die VGB 16 und die DIN 51506 tragen diesem Sicherheitsbedürfnis Rechnung.

Das Kompressoraggregat wird deshalb mit einem Nachkühler ergänzt, damit negative Folgen beim Betrieb mit dem Kompressor ausgeschlossen sind und ein gefahrloser Umgang mit dem Medium Druckluft gewährleistet ist. Ungekühlte Druckluft wird im Leitungsnetz bei der natürlich ablaufenden Temperatursenkung durch kondensierten Wasserdampf, vermischt mit den Öl- und den Feststoffpartikeln, ein aggressives, schmutziges Gemisch bilden. Korrosion ist die Folge. Viele Störungen bei fast allen Anwendungen bis hin zum Produktionsausfall resultieren hieraus.

Der im Kompressor integrierte Nachkühler ist deshalb die erste wichtige Stufe der Druckluftaufbereitung, denn dieser kühlt die heiße, aus dem Kompressor strömende Druckluft stark ab. Dabei kondensieren bereits bis zu 2/3 der in der Druckluft enthaltenen Öl-, Wasser- und sonstigen Dämpfe. Eine wirksame Wasserabscheidung ist nur durch Kühlung der Druckluft zu erreichen, weil hierbei auch das dampfförmig in der Druckluft enthaltene Wasser ausfällt. Öl-/Wasser-Abscheider allein können eine wirksame Wasserabscheidung nicht erreichen.

Nachkühler, in wasser- und luftgekühlter Ausführung, reduzieren die Temperatur der Druckluft je nach Kühlmedium theoretisch bis auf etwa 25 - 40 °C Austrittstemperatur am Druckstutzen der Verdichter. Druck

Luft ist am Druckstutzen des Kompressors grundsätzlich gesättigt. Diese verdichtete Luft enthält bei einem Druck von 7 bar und einer angenommenen Temperatur von 35 °C einen Feuchteanteil von etwa 40 g/m³.

In der Praxis werden vielfach ungünstigere Werte, d.h. höhere Druckluftaustrittstemperaturen festgestellt, da einerseits die Kühler verschmutzt oder andererseits zu knapp bemessen sind. Austrittstemperaturen von 45 °C sind immer häufiger festzustellen. Dabei spielt die sogenannte Kondensationswärme eine entscheidende Rolle. Wird ein Kühler für die Durchschnittsbedingung von $T_u = 15$ °C bei einer relativen Feuchte von 60 % ausgelegt, aber im Sommer bei Temperaturen von $T_u = 25$ °C genutzt bei der dann höheren relativen Feuchte von z.B. 75 %, muß unter Berücksichtigung der so geänderten Wärmeinhalte von 9,6 kcal/m³ auf 18,7 kcal/m³ mit einer um zusätzlich 5 °C angestiegenen Druckluftaustrittstemperatur gerechnet werden.

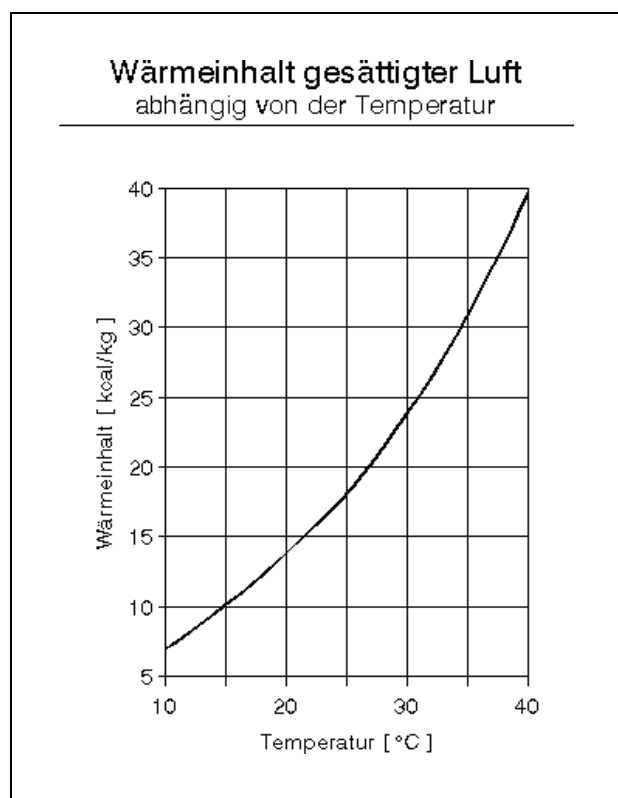


Diagramm 3.3.2.1

Ein zu knapp ausgelegter Nachkühler erreicht dann nicht die erforderliche Abkühlung, wenn diese am meisten gebraucht wird sondern schafft zusätzliche Probleme für nachgeschaltete Einheiten. Kondens

3.0 Kompressoren

wasser in Rohrleitungen und damit an den Verbraucherstellen führt zwangsläufig zu Korrosionen in pneumatischen Zylindern und Druckluftmotoren, beeinträchtigt damit die Funktion von Steuer- und Regelungseinrichtungen und verursacht letztendlich Betriebsstörungen und Produktionsausfälle.

Hohe Temperaturen der Druckluft bedeuten auch hohe Konzentrationen an Feuchtigkeit und Ölanteile, wie dies anhand von Tabellen und Diagrammen zusammenhängend⁷ dargestellt wird.

3.3.3 Abscheider

Durch die Abkühlung der Druckluft im Nachkühler bildet sich Kondensat, das aus dem Luftstrom entfernt werden muß. Mit einem Zyklonabscheider hinter dem Nachkühler wird das Kondensat aus dem Druckluftvolumenstrom getrennt und dann mit Hilfe eines Kondensatableiters diskontinuierlich aus dem System ausgeschleust.

Die mit Wassertröpfchen und Aerosolen beladene Druckluft strömt über einen Drallgeber in den Abscheider, wodurch eine rotierende Luftströmung entsteht. Durch die Fliehkraft werden die Wasser- und Aerosoltröpfchen an die Abscheiderwand geschleudert und strömen nach unten in den Kondensatsammelraum. Wie beim natürlichen Zyklon erfährt die Druckluft unten im Abscheider eine zentral nach oben zum Austritt hin gerichtete Umlenkung.

Zyklonabscheider⁸ sind wirkungsvoll und wartungsfrei, da sie nicht verschmutzen.

3.3.4 Ableiter

Überall dort, wo Kondensat anfällt, muß dieses auch abgeleitet werden, damit es nicht erneut vom Luftstrom mitgerissen wird. Um das zeitraubende und mit kostspieligem Druckluftverbrauch verbundene Ausblasen

⁷siehe Teil 1 und Teil 2

⁸siehe Teil 4; Abs. 4.2.1

von Abscheidern und sonstigen Kondensatstellen zu vermeiden, sind automatische Kondensatableitersysteme entwickelt worden. Mechanische und elektrische Ableitersysteme sind der Stand der Technik.

Ableiter müssen speziell auf die Bedürfnisse des Druckluftkondensats abgestimmt sein, da dies ein Gemisch von Wasser, Öl und Schmutzteilchen ist, welches weitaus schwierigere Betriebsverhältnisse bildet als z.B. reines Wasserkondensat aus Dampfanlagen. Kondensat aus Druckluftsystemen muß differenziert betrachtet werden:

- Ölgeschmierte Verdichtersysteme erzeugen als Nebenprodukt ein Kondensatgemisch aus Öl und Wasser mit einem ph-Wert im neutralen Bereich
- Ölfreie Verdichtersysteme dagegen verursachen ein Kondensat mit einem ph-Wert im sauren Bereich

Ableiter funktionieren nicht immer zuverlässig, weshalb der Begriff "automatische Kondensatableiter" nur vorsichtig benutzt werden sollte. Dickflüssige, stark verschmutzte Öl-/Wasser-Gemische sind die Ursache für Funktionsstörungen, deshalb sind regelmäßige Kontrollen bei der Wartung notwendig.

Alternativ bietet sich die Ableitung mittels Magnetventilen an, mit denen zeitgesteuert in Intervallen das Kondensat ausgeschleust wird. Problematisch ist die Anpassung der Öffnungszeit der Magnetventile. Diese erfolgt druckabhängig, wobei das Druckniveau im System aber nicht permanent konstant ist. Mit dem Kondensat wird deshalb auch immer mehr oder weniger Druckluft mit Verlust abgeleitet.

Elektronische Kondensatableiter⁹ haben sich auf dem Markt durchgesetzt. Dieses System überwacht mit einem integrierten Sensor die Kondensatmenge im Sammelraum und paßt die Öffnungszeit der angesammelten Kondensatmenge an. Mit diesem System wird der Druckluftverlust auf ein zu vernachlässigendes Minimum reduziert bzw. fast ganz ausgeschlossen.

⁹siehe Teil 4

3.0 Kompressoren

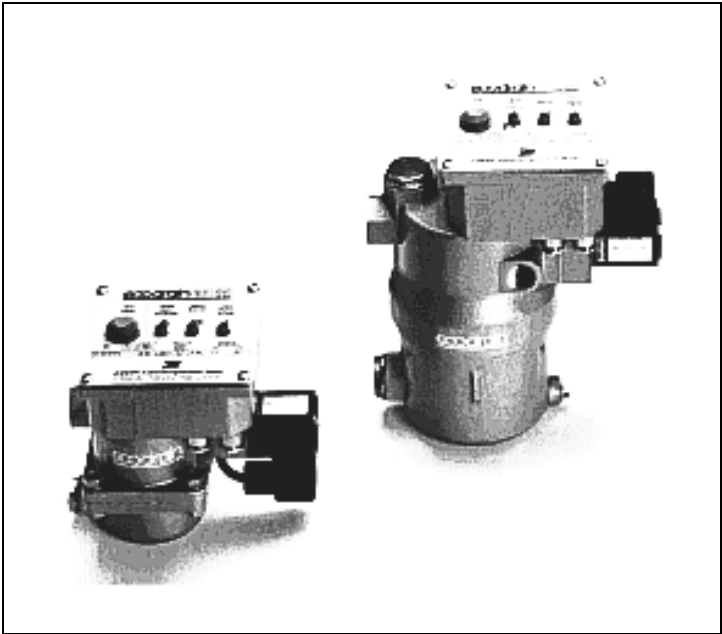


Abb. 3.3.4.1