

# Teil 4

### 4.0 Filtern

Durch vermehrte und verstärkte Anwendungen der Druckluft sind die Anforderungen an die Druckluftqualität von Jahr zu Jahr gestiegen. Druckluft wird in vielen Bereichen der Technik eingesetzt, in der pharmazeutischen Industrie bei der Erzeugung von Impfstoffen oder Antibiotika, in zahlreichen Betrieben der Nahrungs- und Getränkeindustrie, in den mit Druckluft ausgestatteten Krankenhäusern und nicht zuletzt bei der Fertigung in der Elektronikindustrie. All diese Druckluftanwender sind auf mehr oder weniger gereinigte Druckluft angewiesen.

Die Qualitätsanforderungen sind relativ und von Fall zu Fall unterschiedlich. Je nach Einsatzort der Anlage kommt es zu Verunreinigungen, die in mannigfacher Form auftreten können und zwar als feste oder flüssige Schwebstoffe oder im gasförmigen Zustand. Entsprechend dem Verwendungszweck der Druckluft wählt man die Filter so aus, daß vorwiegend bzw. ausschließlich die einen oder die anderen Bestandteile zurückgehalten werden.

Dabei spielt der jeweils noch zulässige Widerstand der einzelnen Filtermaterialien eine wichtige Rolle. Von entscheidender Bedeutung wird die Wahl des richtigen Filtertyps und -materials, wenn Verunreinigungen in der Luft gefährlich sind wie etwa Stäube aus Insektenvertilgungsmitteln oder schädlich bzw. giftig wie Bakterien und Viren. Ebenso bei bestimmten Metallverbindungen wie Beryllium- oder Lithiumderivate<sup>1</sup> oder radioaktiven Substanzen.

Entsprechend individuell ist die Wahl der jeweils zu treffenden Aufbereitungsmaßnahme. Eine Spezifizierung nach Güteklassen ist dabei schwierig, da jeweils unterschiedliche Parameter zu berücksichtigen sind wie:

- Staub
- Feuchtigkeit
- Öl
- Keime und Bakterien
- Gasanteile

---

<sup>1</sup>Devirate = abgeleitete Verbindungen

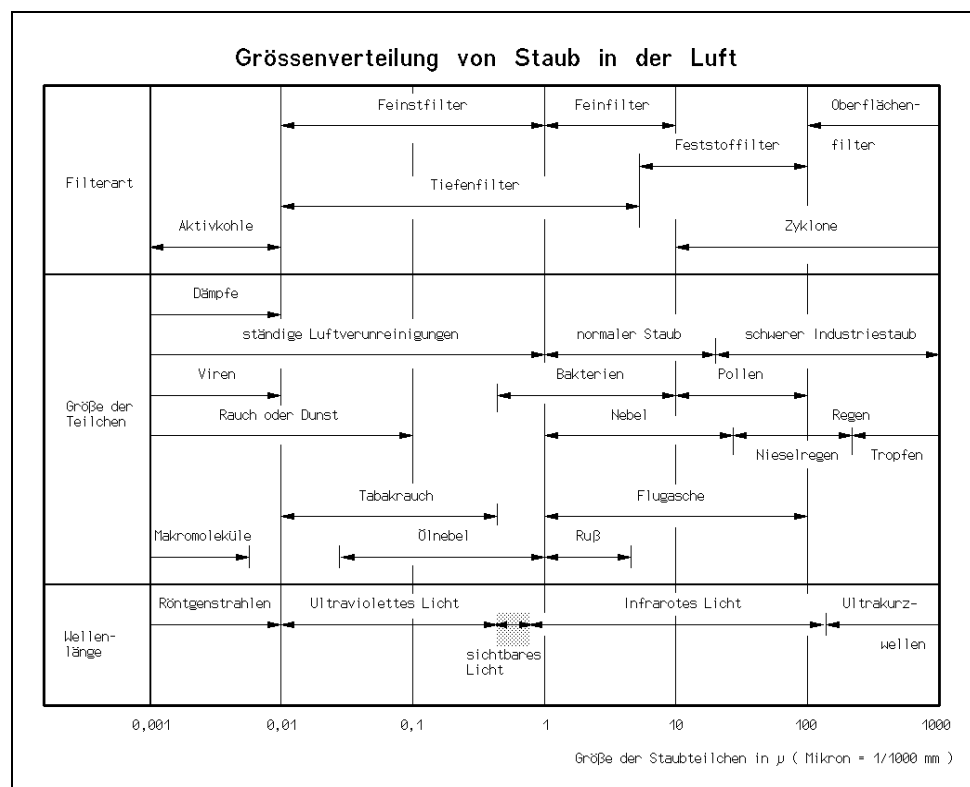
---

Beim Einsatz trockener und staubfreier Druckluft wird diese wirkungsvoller, effektiver und letztendlich wirtschaftlicher, da Störungen eliminiert werden. Wasser, Öl, Fremdgase und Stäube verursachen primär und sekundär Schäden, da sie in den Rohrleitungen und Armaturen Korrosion verursachen, in Verbindung mit Emulsionen Schmirgeleffekte bewirken sowie zu Verstopfungen und Vereisungen führen können. Um diese Störfaktoren auszuschalten, werden Aufbereitungssysteme, eben Trockner und Filter, eingesetzt.

Je nach Bauart des Kompressors und dem Ort seiner Aufstellung kann Druckluft als Grenzwert bis zu

- 250 mg/m<sup>3</sup> Staub
- 85 g/m<sup>3</sup> Wasserdampf
- 15 mg/m<sup>3</sup> Öl

enthalten und ist für ein anspruchsvolles Druckluftsystem unbrauchbar. Der Ölgehalt der Druckluft setzt sich zusammen aus dem kondensierten, flüssigen bzw. aerosolförmigen Öl und dem verdampften, gasförmigen Öl.



## 4.0 Abscheider

---

Diagramm 4.0.1

Flüssigkeitströpfchen in Gas oder Luft können vom Durchmesser sehr unterschiedliche Größen aufweisen. Man unterteilt deshalb Aerosole in zwei Gruppen:

- **Spray:** Flüssige Teilchen mit einem Durchmesser von 10 Mikron oder mehr wird als Spray definiert. Spray ist mit den verschiedenen mechanischen Abscheidern relativ leicht aus dem Druckluftstrom zu entfernen.
- **Nebel:** Flüssige Teilchen mit einem Durchmesser von 10 Mikron oder weniger werden als Nebel bezeichnet. Als Nebel oder Aerosol werden Tröpfchen bezeichnet, deren Masse so klein ist, daß sie im Gasstrom schweben. Nebel ist aus dem Druckluftstrom nur äußerst schwer auszuscheiden und erfordert feinere Filtersysteme.

Nebel entsteht auf folgende Art:

- Meist durch rasche Abkühlung mit anschließender Kondensierung der Flüssigkeitsteile aus dem Medium
- Zwei oder mehr Gase reagieren zu einem Produkt, das bei Reaktionstemperatur und niedrigem Dampfdruck kondensiert

Abscheidewirkung von Nebel

	Brownsche Bewegung	Trägheitswirkung	Sperr-effekt
Oberflächen-geschwindigkeit m/min	5 - 12	120 - 150	120 - 150
Leistung Partikel > 3 µm	praktisch 100 %	praktisch 100 %	praktisch 100 %
Leistung Partikel < 3 µm	55 - 99 %	90 - 98 %	15 - 30 %
Druckabfall mmWS	125 - 400	150 - 200	25 - 50

Tabelle 4.0.1

Wenn eine genügend große Anzahl solcher Nebeltröpfchen vorhanden ist, werden Massenanziehungskräfte wirksam und die Nebeltröpfchen verbinden sich, sie koalieren. Auf diese Weise entstehen mit der Zeit

---

Tropfen, deren Masse so groß ist, daß die Auftriebskräfte in der Luft kleiner sind als die Gewichtskräfte und die Nebel sinken.

## 4.1 Abscheidesysteme

Abscheider und Filter sind grundsätzlich Bestandteil einer Druckluftstation. Eine Fragestellung beinhaltet deshalb nicht den Sinn warum, sondern wie gefiltert werden muß.

Die heute fast ausschließlich angewandten Abscheide- und Filtrationssysteme zur Druckluftaufbereitung werden in vier Hauptgruppen unterteilt:

- Abscheidung
- Trennung
- Koaleszenz
- Adsorption

Diese Hauptgruppen sind nachstehend zur ersten Orientierung nur übersichtlich skizziert. Die ausführlichere Erläuterung ist in den dann folgenden Abschnitten gegeben.

### 4.1.1 Abscheidung

Die Aufgabe der Abscheidung besteht darin, die Tröpfchen in einer zur Druckluft relativen Bewegung so zu einer festen Oberfläche zu bringen, daß sie dort niederschlagen, haften bleiben und schließlich abfließen können.

### 4.1.2 Trennung

Die verunreinigte Luft wird bei der mechanischen Trennung durch mehrere Lagen Filterpapier aus Mikrofasern geführt, wobei die staubförmigen Verunreinigungen in den sich verjüngenden Poren angelagert werden.

### 4.1.3 Koaleszenz

Feinste Öl- und Wasseraerosole<sup>2</sup> koalieren<sup>3</sup> in einem sehr dichten Faserservlies eines Filterelementes und agglomerieren<sup>4</sup> zu immer größer werdenden Tropfen, die sich im Filtergehäuse sammeln. Dieser Vorgang wird als Koaleszenz bezeichnet.

### 4.1.4 Adsorption

Die Druckluft kann je nach Anforderung in einer weiteren Phase auch von gasförmigen Verunreinigungen getrennt werden, indem sie durch eine Aktivkohleschicht<sup>5</sup> geführt wird. Aktivkohle adsorbiert<sup>6</sup> Gasmoleküle, die Geruchs- und Geschmackswahrnehmungen hervorrufen können.

Eine Aktivkohleschicht kann als Filter oder Adsorber zur Auswahl stehen. Bei Aktivkohlefilter wird Aktivkohle als Element<sup>7</sup> eingesetzt. Kürzere Verweilzeiten und geringere Druckluftqualitäten gegenüber dem Adsorber resultieren daraus.

---

<sup>2</sup>Tröpfchen

<sup>3</sup>zusammenschließen

<sup>4</sup>ballen, häufen

<sup>5</sup>siehe Abs. 6.4

<sup>6</sup>bindet

<sup>7</sup>siehe Abs. 4.7.3

Grundsätzlich werden für höchste Qualitätsansprüche Aktivkohle-adsorber ausgewählt, da diese aufgrund der längeren Verweilzeit der Druckluft im Adsorber eine optimale Selektion ermöglichen.

## 4.2 Abscheider

Unter Nebel wird die Dispersion einer Flüssigkeit in einem Trägergas verstanden. Nebel besteht aus Tröpfchen mit recht unterschiedlichen Durchmessern. Durch Definition ist festgelegt, daß diese Tröpfchen einen Durchmesser von mehr als 1 Mikrometern haben. Nebeltröpfchen gelangen in Druckluft

- durch Kondensieren von Wasserdampf
- durch Koalieren von Öldampf.

Die Größe der Nebeltröpfchen ist für die Abscheidung von entscheidender Bedeutung. Der Tropfendurchmesser, die Dichte der Tropfenflüssigkeit und die Zähigkeit der Luft bestimmen die Sinkgeschwindigkeit der Flüssigkeitströpfchen in ruhender Luft. Als Orientierungswert gilt für:

- 0,1 mm Durchmesser 24 m/s
- 0,01 mm Durchmesser 0,3 m/s
- 0,001 mm Durchmesser 0,003 m/s

Um die Nebeltröpfchen zu einer schnellen Bewegung zu zwingen, müssen ganz erhebliche Kräfte aufgewendet werden. Um dies zu erreichen, wird die Nebelluft scharf beschleunigt oder verzögert, wodurch an den Nebeltröpfchen starke Massenkräfte wirksam werden. Diese Massenkräfte treiben die Tröpfchen mit erhöhter relativer Geschwindigkeit durch die Luft. Die damit erreichbaren Geschwindigkeiten sind unmit

## 4.0 Abscheider

---

telbar proportional zu den Kräften, d.h., eine Kraft vom 10-fachen Tropfengewicht erhöht die Geschwindigkeit auf das 10-fache der Sinkgeschwindigkeit. Die für die Tröpfchenabscheidung in Druckluft erforderlichen hohen Beschleunigungen können z.B. durch scharfes Umlenken schnell strömender Nebelluft erreicht werden, wodurch größere Flüssigkeitspartikel ausgeschleudert und abgeschieden werden.

Nach dem Verwendungszweck der Druckluft wählt man die Abscheider so aus, daß der erforderliche Reinheitsgrad optimal erreicht wird. Abscheider sind hinter dem Nachkühler des Kompressors nach der VGB 16 vorgeschrieben. Die wichtigsten in der Industrie eingesetzten mechanischen Abscheider sind:

- Zyklonabscheider
- Prallabscheider
- Drallabscheider
- Drahtgestricke

### 4.2.1 Zyklonabscheider

Zyklonabscheider sind Grobabscheider und mit einem Drallgeber ausgerüstet. Dieser Drallgeber bewirkt, daß eine extrem hohe radiale Beschleunigung mit entsprechend großer Fliehkraft auftritt und eine rotierende Luftströmung innerhalb des Zyklonabscheiders entsteht. Diese Fliehkräfte können auf das Vielfache des Eigengewichtes eines Tröpfchens ansteigen.

Durch die dabei entstehende Fliehkraft werden die Feststoffpartikel sowie die Öl- und Wassertröpfchen an die innere Abscheidewand geschleudert und fließen aufgrund der Schwerkraft nach unten in den Kondensatsammelraum.

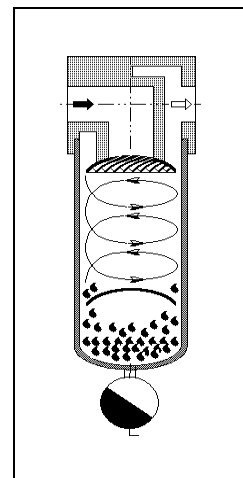


Bild 4.2.1.1

Eine Trennkappe verhindert, daß die abgeschiedene Flüssigkeit vom Luftstrom wieder mitgerissen wird. Ein Kondensatableiter, an der tiefsten Stelle des Kondensatsammelraumes angebaut, schleust das Kondensat aus dem Abscheider.

Zyklone dieser Bauart werden in ähnlichen Fällen eingesetzt wie die Drallabscheider, können jedoch kleinere Grenztröpfchen abscheiden. Verbunden sind damit allerdings höhere Druckverluste. Der Abscheidegrad eines Zyklons liegt bei etwa 98 - 99 %, die Grenztröpfchen bei ca. 20 - 50 Mikron.

## 4.2.2 Prallabscheider

Prallflächenabscheider mit horizontaler oder vertikaler Anströmung werden vorzugsweise dann eingesetzt, wenn Flüssigkeitströpfchen mit einem sehr feinen Tropfenspektrum aus dem Luftstrom getrennt werden sollen. Prallflächenabscheider neigen zur Verkrustung und müssen deshalb regelmäßig gespült werden.

Bei der Prallabscheidung werden die Nebeltröpfchen scharf abgebremst bzw. verzögert und/oder scharf umgelenkt und somit einer starken, zu den Stromlinien des Trägergases normal stehenden Beschleunigung ausgesetzt.

Die Prallabscheidung ist bekanntlich das Abscheideprinzip, nach dem eine sehr große Anzahl von Nebelabscheider arbeitet. Dieses Arbeitssprinzip kommt z.B. in Drahtgestricken, Füllkörpersäulen, Filter aus Watte oder Filz und vielen anderen Stoffen zur Anwendung.

Bei einer Prallabscheidung werden Tröpfchen nur in einem relativ engen Durchmesserbereich abgeschieden. Prallflächenabscheider erreichen eine Abscheiderate bis zu maximal 99,9 %. Der Abscheidegrad für die Grenztropfen bei vertikaler Anströmung beträgt etwa 40 Mikron, bei horizontaler Anströmung ca. 10 - 20 Mikron.

### 4.2.3 Drallabscheider

Drallabscheider sind eine besondere Bauart der Zyklone. Als Axialzyklone ohne Strömungsumkehr werden diese Abscheider im rauhen Betrieb eingesetzt, wenn dabei beachtliche Flüssigkeitsmengen in Form von großen Tropfen aus dem Druckluftsystem abgeschieden werden müssen, die ebenso auch Feststoffteile enthalten können.

Der Abscheidegrad von Drallabscheidern liegt bei 98 - 99 %, die Grenze der Tropfengröße bei etwa 50 - 100 Mikron.

### 4.2.4 Drahtgestricke

Einsatzfälle für Drahtgestricke sind in letzter Zeit erheblich zurückgegangen. Abscheidesysteme dieser Art sind wegen der Verkrostungsgefahr periodisch zu spülen. Die Druckverluste sind stark abhängig von der Flüssigkeitsbelastung.

Mit Drahtgestrickpaketen sind Abscheidegrade von 99,9 % zu erreichen bei Grenztropfen von 6 - 20 Mikron.

## 4.2.5 Abscheidewirkung

Abscheidesysteme werden mit den unterschiedlichsten Leistungen angegeben. Prozentangaben bis zu 99,9999 % sind dabei keine Seltenheit. Klarheit dazu schafft nur eine exakte Definition.

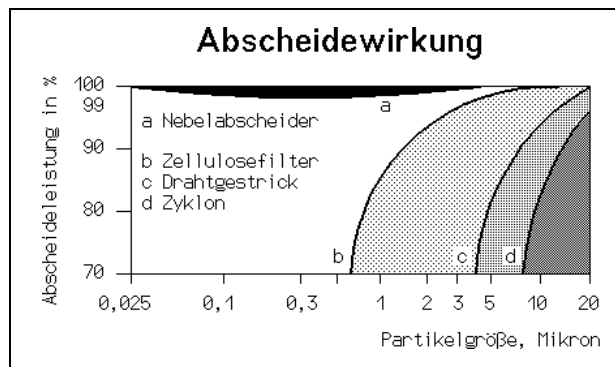


Bild 4.2.5.1

Häufig sind diese Prozentangaben bezogen auf die Gesamtgewichtsbasis. Wird die Abscheideleistung nach der Partikelgröße angegeben, dann ergibt sich ein vollständig anderes Bild für die Abscheidewirkung.

Das Bild 4.2.5.1 zeigt unterschiedliche Abscheidesysteme im Vergleich zu einem Tiefenfilterelement mit einem Abscheidegrad von 99 % bei 3 Mikron. Dieses Bild zeigt die Bereiche, in denen einzelnen Filterbauarten ihre spezifischen Leistungsstärken haben.

In den folgenden Tabellen wird die Differenz der Abscheideleistung nach dem Gesamtgewicht und der Partikelgröße in der Druckluft mit Zahlenwerten dargestellt.

Angenommene Partikelgewichte und -verteilung

Partikelzahl	Größe	Gewicht %	Gesamtgewicht
50	20,0	29	145.000
1.750	7,5	60	300.000
10.700	2,0	8	40.000
67.500	0,75	3	15.000
$\Sigma$ 80.000			$\Sigma$ 500.000

Tabelle 4.2.5.1

Abscheideleistung nach Partikelgewicht und -größe

abgeschiedene Partikel $\mu$	Gewicht %	Größe %
20,0	$\frac{145.000}{500.000} = 29,0$	$\frac{50}{80.000} = 0,1$
7,5	$\frac{445.000}{500.000} = 89,0$	$\frac{1.800}{80.000} = 2,3$
2,0	$\frac{485.000}{500.000} = 97,0$	$\frac{12.500}{80.000} = 15,7$
0,75	$\frac{500.000}{500.000} = 100,0$	$\frac{80.000}{80.000} = 100,0$

Tabelle 4.2.5.2

Die in den Tabellen aufgeführten Zahlenwerte basieren auf den Angaben aus Abschnitt 1.6.1.

### 4.3 Filtration

Die Beschreibung der Filtration und die dabei auftretenden Mechanismen gelten in diesem Abschnitt ausschließlich für flüssige Öltröpfchen, sofern nicht ausdrücklich von Feststoffpartikeln gesprochen wird. Die Öltröpfchen werden im folgenden auch als Partikel oder Teilchen bezeichnet.

### 4.3.1 Partikeltechnologie

Beim Nebel ist die flüssige Ölphase in einzelne kleine Teilchen dispergiert<sup>8</sup>. Diese werden von einer kontinuierlichen Phase, dem Dispersionsmittel<sup>9</sup>, umschlossen. Derartige Systeme heißen disperse Systeme. Für den Fall, daß die mittlere Partikelgröße kleiner als 0,1 µm ist, spricht man von einem Aerosol.

Ein Aerosol wird definiert als ein quasistabiles und quasihomogenes System im Sinne der physikalischen Chemie, das in diesem Fall aus Luft und sehr vielen in dieser Luft suspendierten<sup>10</sup> Teilchen besteht. Jedes dieser Teilchen ist ein relativ stabiles und identifizierbares System.

Während das Dispersionsmedium Luft durch die physikalischen Größen Druck, Temperatur und chemische Zusammensetzung eindeutig definiert ist, ist eine vollständige Beschreibung der Teilchen meistens nicht möglich. Eine derartige Teilchenbeschreibung wird bestimmt durch

- die Oberfläche,
- die Charakterisierung des Einzelteilchens, die aufgrund der großen Anzahl und der komplexen Formen schwierig ist,
- die chemische Zusammensetzung,
- die Beschreibung des Kollektivs, die wiederum ohne Kenntnisse der Einzelteilchen nicht möglich ist.

Aus praktischen Gründen wird daher die Beschreibung bestimmter Eigenschaften beschränkt, so daß sich Auswahl und Definition der Parameter nach der Fragestellung richtet, die für die Charakterisierung eines Aerosols erforderlich ist. In der Praxis wird dazu die Häufigkeit des Auftretens von Teilchen im Kollektiv ermittelt.

Zur genauen Kennzeichnung der dispersen Phase wird bei vielen praktischen Problemlösungen die Konzentration  $C$ <sup>11</sup> und die relative Häufig

---

<sup>8</sup> aufgeteilt

<sup>9</sup> hier Druckluft

<sup>10</sup> unlösliche

<sup>11</sup> Anzahl der Partikel je Volumeneinheit

keit  $y_h$ <sup>12</sup> benötigt. Für die Festlegung der Partikeldurchmesser wird der geometrische mittlere Durchmesser  $x$  der definitionsgemäß kugelförmigen Teilchen herangezogen.

### 4.3.2 Abscheidedynamik

Die überwiegende Zahl bekannter Veröffentlichungen zum Thema Partikelabscheidung in Faserfiltern setzt voraus, daß die in der Faserschicht abgeschiedenen Partikel keine strukturellen Veränderungen hervorrufen. Damit werden Filter auf der Grundlage des unbeladenen Zustandes ausgelegt.

Die Kenntnisse dieser sogenannten stationären Abscheidephase sind jedoch in der Praxis nicht ausreichend, um eine effektive Beurteilung und optimale Auslegung der Filter vorzunehmen. Dazu ist es erforderlich, die dynamische Phase zu berücksichtigen. Sie umfaßt alle zeitlichen Änderungen infolge permanenter Filterbelastung, die sich letztendlich im zeitlichen Verlauf von Druckverlust und Abscheidegrad auswirken. Bedeutsam für deren Änderung sind Fragen der Filterstruktur, auf die es zum gegenwärtigen Stand des Wissens keine befriedigenden Antworten gibt. Folgende Fragen stehen demnach offen:

- Größe und Intensität der Druckverlustzunahme bei einer gleichzeitigen Abnahme des Abscheidegrades
- Gegenseitige Beeinflussung von Druckverlust und Abscheidegrad
- Strukturänderung, Sättigungsverhalten und Regenerierung des Filters
- Haftwahrscheinlichkeit der Partikel

Die Partikelabscheidung an der Faser wird in der stationären Phase durch zwei grundsätzliche Teilabschnitte bestimmt:

- Die Partikel müssen in den Einflußbereich der Faseroberfläche gelangen und

---

<sup>12</sup>Partikeldurchmesserverteilung

- an dieser Faseroberfläche anhaften

Die dynamische Abscheidephase setzt Betrachtungen von Filtersystemen voraus und führt zu folgenden weiteren Vorgängen:

- Agglomeration<sup>13</sup> der anhaftenden Partikel an der Faseroberfläche infolge Koaleszenz, diese bilden
- Flüssigkeitsbrücken und -felder zwischen den Fasern.
- Durch Verdrängung der Flüssigkeit aus der gesättigten Faserschicht wird die Faser reaktiviert zur erneuten Partikelabscheidung.

## 4.4 Filtrationswirkung

Filterelemente, die eine Abscheidung von Feststoff- und Flüssigkeitsbestandteilen aus der Druckluft bewirken, beruhen auf der Kombination unterschiedlichster physikalischer Kräfte, je nach Art und Weise der Filtration. Genutzt werden bei der Filtration die

---

<sup>13</sup>Anhäufung

---

## 4.0 Abscheider

---

- Brownsche Molekularbewegung<sup>14</sup>
- Trägheitskräfte
- Siebwirkung
- elektrostatische Wirkung.

Falls sich die Teilchen bei Umströmung einer Faser an deren Oberfläche absetzen, können sämtliche nachfolgend erwähnten Mechanismen gleichzeitig wirken. Die Angabe einer allgemeingültigen mathematischen Beziehung ist sehr schwierig. Dies ist der Grund, warum nur empirische<sup>15</sup> Lösungen einzelner oder mehrerer kombinierter Mechanismen vorliegen.

Der gesamte filtertechnisch interessante Reynoldssche-Zahlenbereich umfaßt sowohl den Bereich der zähen Zylinderumströmung ( $Re < 1$ ) als auch den sogenannten Übergangsbereich ( $Re > 1 - 10^3$ ) bis hin zur Potentialströmung ( $Re > 10^3$ ).

Ein wichtiger Bereich der Tiefenfiltration liegt bei kleineren Reynoldsschen Zahlen ( $Re < 1$ ). Die Umströmung eines Zylinders im Bereich der schleichenden Strömung ist derart, daß die Geschwindigkeit in unmittelbarer Fasernähe wesentlich geringer ist als die Anströmgeschwindigkeit im ungestörten Bereich vor der Faser. Dies gilt sowohl für das Fluid als auch für die mittransportierten Partikel.

Hinzu kommt, daß die Partikelauftreffgeschwindigkeit auf der Zylinderoberfläche vom Auftreffort und damit vom Startpunkt im ungestörten Strömungsbereich vor dem Zylinder abhängt und somit eine Geschwindigkeitsverteilung aufweist. Dadurch beträgt die effektive Aufprallgeschwindigkeit tatsächlich nur ein Bruchteil der Anströmgeschwindigkeit und nimmt mit zunehmender Entfernung vom Staupunkt gleichmäßig zu.

Der Abscheidevorgang wird idealisiert betrachtet an einem senkrecht zu seiner Achse angeströmten Kreiszyylinder. Die Abscheidung von Teilchen an der Zylinderoberfläche ist die Folge von zwei kontinuierlich ablaufenden Vorgängen bei der Filtrationswirkung:

- Der Transport der Teilchen zur Zylinderoberfläche.
- Dem Anhaften dieser Teilchen an der Zylinderoberfläche.

---

<sup>14</sup>intermolekulare Kräfte

<sup>15</sup>auf Erfahrung basierende

Wesentliche Transporteffekte beruhen auf der Wirkung von Trägheitskräften, Sedimentation<sup>16</sup>, Brownscher Bewegung oder elektrischen Kräften. Damit ein Partikel an einer Faser anhaftet, sind vier Bedingungen notwendig:

- Die elastische Energie nach dem Stoß muß kleiner oder höchstens gleich der Haftenergie sein, die es festzuhalten vermag.
- Eine Zerkleinerung bzw. Zerstäubung darf nicht auftreten.
- Die auf abgeschiedene Partikel wirkenden Strömungskräfte dürfen nicht größer sein als die Haftkräfte.
- Bereits abgeschiedene Partikel dürfen nicht durch den Stoß nachfolgender Partikel abgelöst werden.

### 4.4.1 Brownsche Molekularbewegung

Die Brownsche Molekularbewegung oder Diffusion<sup>17</sup> ist eine zufällige Wärmebewegung kleinster Mediummoleküle mit Einfluß auf Fremdstoffpartikel, die sich im Medium befinden. Je kleiner diese Fremdstoffpartikel sind, desto größer ist der Einfluß der Molekülbewegung auf diese Teilchen, verursacht durch oszillierende<sup>18</sup> Luftmoleküle im Zusammenstoß mit diesen Partikeln.

Dabei hat ein Partikel mit 1 Mikrometer Durchmesser eine 15-fache Bewegungsenergie gegenüber einem Partikel mit dem Durchmesser von 5 Mikrometer. Praktisch bedeutet das, je kleiner die Partikel sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß diese Partikel mit einer Filterelementfaser zusammenstoßen und dadurch ausgefiltert werden.

Filterelemente, die die Brownsche Molekularbewegung nutzen, erreichen in der Praxis eine verbesserte Filtrationsleistung für kleinste auszuscheidende Partikelgrößen. Für die Abscheidung von Partikeln unter 3 Mikrometer werden Filterelemente gefertigt, die mehr als 99,99 % aller Partikel ausfiltern. Öl wird in der Fasertiefe gespeichert, die Flüssigkeit

---

<sup>16</sup>Stoffabsetzung

<sup>17</sup>selbstständige Vermischung

<sup>18</sup>schwingende

## 4.0 Abscheider

---

sigkeitspartikel addieren sich zu Tropfen, die zusammenhängend als Flüssigkeitsfilm an den Fasern zur tiefsten Stelle des Filters fließen. Angemessene Strömungsgeschwindigkeiten verhindern, daß ausgeschiedene Flüssiganteile dem Luftstrom folgen und mitgerissen werden.

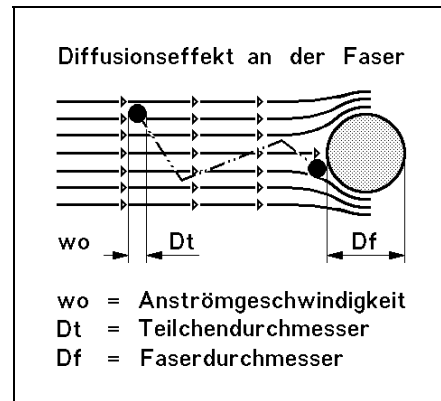


Bild 4.4.1.1

Infolge der Brownschen Bewegung folgen die Aerosolteilchen nicht den Stromlinien des Gases um die Faser herum. Sie diffundieren aus dem Bereich dieser Stromlinien in Richtung zur Faseroberfläche, wo sie sich absetzen. Die Intensität der Brownschen Bewegung wächst mit der sinkenden Teilchengröße und damit wächst auch die Diffusionsabscheidung für kleinste Teilchen.

Der Diffusionseffekt der Teilchenanlagerung gilt vor allem für die Teilchen, die kleiner als 1 Mikrometern sind. Er wird durch ihre thermische Bewegung verursacht. Dabei bleiben einige Teilchen bei Berührung mit der Faser haften. Das so entstandene Konzentrationsgefälle ist die Ursache für einen Diffusionsfluß in Richtung der Faseroberfläche. Dieser Effekt hängt vor allem von der Teilchengröße  $D_t$  und der Gasflußgeschwindigkeit  $w_0$  ab.

Der Einfluß der Temperatur geht in die Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität der Luft mit ein. Bei kleinen und sehr kleinen Aerosolteilchen ist der Diffusionskoeffizient eine Funktion der mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle, welche indirekt proportional dem Luftdruck sind.

## 4.4.2 Trägheitswirkung

---

Partikel, die größer als ca. 3 Mikron sind, folgen aufgrund ihrer Trägheit nicht dem Luftstrom im Faserbett. Diese Partikel bleiben an den Fasern hängen und werden dadurch ausgefiltert.

Bei Filtrationen für Abscheideleistungen bis 3 Mikron genügen Filtersysteme, die auf Basis der Trägheitswirkung beruhen.

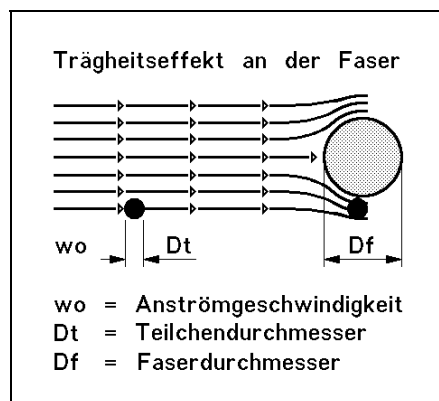


Bild 4.4.2.1

Bei Umströmung der Faser biegt sich die Gasstromlinie um die Faser herum und das schwere Teilchen bewegt sich infolge der Trägheit bei größeren Geschwindigkeiten gradlinig, so daß es unter günstigen Bedingungen gegen die Faser stoßen kann.

Dieser Effekt ist proportional dem Quadrat der Teilchengröße und Strömungsgeschwindigkeit. Die Abhängigkeit der Temperatur wird über die Viskosität des Gases erfaßt.

### 4.4.3 Siebwirkung

Partikel können einer Druckluftstromlinie folgen und dabei auch ohne Trägheitswirkung gesammelt werden, wenn der Luftstrom nahe einer Faser verläuft. Schwebt zum Beispiel ein Partikel mit einem Durchmesser von 1 Mikron in einem Luftstrom mit 0,5 Mikron Entfernung an einer Faser vorbei, wird dieser Partikel die Faser berühren und dadurch aus dem Luftstrom ausgefiltert.

## 4.0 Abscheider

---

Bei der Diffusionsabscheidung wird vorausgesetzt, daß die Aerosolteilchen lediglich Massenpunkte sind, welche kein Endmaß besitzen. Falls jedoch in Betracht gezogen wird, daß das Teilchen eine Kugel mit einem definiertem Durchmesser  $D_t$  ist, muß zusätzlich ein weiterer Mechanismus, der Sperreffekt, erwogen werden.

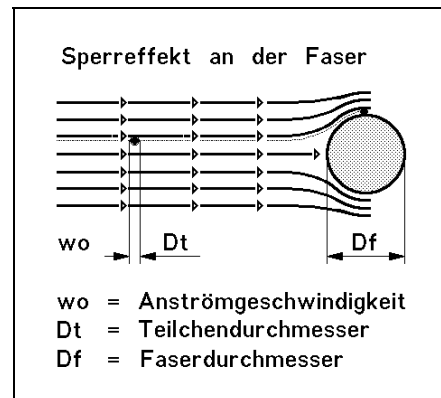


Bild 4.4.3.1

Das Teilchen ist aufgefangen, wenn es sich der Faseroberfläche derart nähert, daß die Entfernung dessen Halbmesser  $0,5 D_t$  gleicht oder kleiner ist. Der Effekt ist demnach proportional zur Partikelgröße  $D_t$ .

### 4.4.4 Elektrostatische Wirkung

Der Abscheidegrad an der Faser innerhalb des Filters differiert vom Abscheidegrad einer isoliert betrachteten Faser. Die Faser im Verbund hat stets einen höheren Abscheidegrad als eine isoliert betrachtete Faser. Der Abscheidegrad im Faserverbund ist eine Funktion der Filterporosität bzw. des Packungskoeffizienten.

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ist höher und es kommt zu Änderungen im Geschwindigkeitsfeld um die einzelne Faser herum infolge des Einflusses benachbarter Fasern. Die Lage der einzelnen Fasern zueinander im Verbund ist rein zufällig und absolut chaotisch.

Beim Durchgang des Gases durch diesen Faserverbund wird eine permanente Umlenkung des Gasstromes erzwungen. Die stetige Reibung des Fluids an der Grenzschicht dieser Faseroberfläche, baut eine elek

trostatische Ladung an der Faseroberfläche auf. Kleinste Partikel bis 0,1  $\mu\text{m}$  können aufgrund der elektrostatischen Wirkung abgeschieden werden.

## 4.5 Kennwerte Filtration

Die Filtration eines dispersen Systems ist ein Separationsprozeß<sup>19</sup>, bei dem sich der disperse Anteil<sup>20</sup> vom Dispersionsmittel Fluid<sup>21</sup> durch den Filter trennt. Hierbei sorgt die Druckluft dafür, daß das Fluid durch den Filter hindurchströmen kann.

Gemäß der Struktur der porösen Stoffe werden die Filter eingeteilt in

- Faserfilter
- Porenfilter
- Kornfilter

Ein Faserfilter besteht aus einer verhältnismäßig dünnen Faserschicht, deren Fasern mit etwa gleicher Dicke senkrecht zur Gasströmung in ungefähr gleicher Entfernung angeordnet sind. Ein Porenfilter ist z.B. ein Membranfilter, ein Kornfilter besteht aus kugelförmigen Filtrationselementen, sogenannten Schüttungen.

Eine effektive Beurteilung der Filterleistung läßt sich nur dann durchführen, wenn die Kennwerte der Filtration zu dieser Beurteilung herangezogen werden. Die wichtigsten Kennwerte sind:

- Abscheidegrad
- Druckverlust
- Durchdringungskoeffizient
- Koeffizient der Filterqualität

Abscheidegrad und Druckverlust sind funktionsmäßig voneinander abhängig gemäß  $E = f(\Delta p)$ .

Für die Effizienz<sup>22</sup> der Filtration ist es daher wichtig, Filter auszuwählen, die einen maximalen Abscheidegrad bei minimalem Druckverlust haben und bei diesen beiden Größen während der Betriebszeit konstant bleiben, d.h. sich zeitlich nicht verändern.

---

<sup>19</sup>Verfahren zur Abscheidung

<sup>20</sup>feste oder flüssige Partikel, hier Öltröpfchen

<sup>21</sup>hier Druckluft

<sup>22</sup>Wirksamkeit

## 4.5.1 Abscheidegrad

Zur Beschreibung der Abscheidung definiert man einen Abscheidegrad  $E$  als das Verhältnis der je Zeiteinheit auf einem Filtermedium abgetrennten Teilchenmenge zu der je Zeiteinheit anströmenden Teilchenmenge.

$$E = \frac{\Sigma P * V - \Sigma P * h}{\Sigma P * V}$$

Formel 4.5.1.1

$$E = 1 - \frac{\Sigma P * h}{\Sigma P * V} * 100$$

Formel 4.5.1.2

Dieser Ausdruck wird fälschlicherweise als Wirkungsgrad eines Filters bezeichnet. Der Begriff Wirkungsgrad ist jedoch definiert als das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand und trifft daher für die Filtration nicht zu.

## 4.5.2 Druckverlust

Der als Druckdifferenz vor und hinter dem Filter auftretende Druckverlust  $\Delta p = p_2 - p_1$  ist nach dem Abscheidegrad  $E$  die zweite bedeutende Grundgröße des Filters. Der Druckabfall technischer Filter aus Faservlies ist vor allem der Gasflußgeschwindigkeit durch den Filter proportional.

Falls  $\Delta p$  für eine bestimmte Geschwindigkeit bekannt ist, kann diese ohne Schwierigkeit in jede beliebige andere Geschwindigkeit umgerechnet werden. Der Druckabfall  $\Delta p$  ist ebenfalls proportional zur Filterschichtdicke.

## 4.0 Abscheider

---

Bei Einsatz eines Mehrschichtfilters ist der Gesamtdruckverlust durch die Summe der partialen Druckabfälle der einzelnen Schichten gegeben. Weiter hängt  $\Delta p$  von dem Wert des Packungsdichtekoeffizienten ab. Dieser wächst mit Abnahme der Entfernung zwischen den Filterfasern. Schließlich hängt  $\Delta p$  auch immer von der Temperatur des durchströmenden Gases ab, da dessen Viskosität mit der Temperatur wächst.

Die bei realen Faserfiltern gemessenen Differenzdrücke  $\Delta p$  sind immer kleiner als die theoretisch berechneten infolge von Ungleichheit der Filterstruktur.

Der Differenzdruck stellt den Druckverlust dar, der über den gesamten Filter gemessen wird und als Leistungsverlust von erheblicher Bedeutung ist. Dieser Druckverlust setzt sich zusammen aus:

- Druckverlust des Filtergehäuses
- Druckverlust durch das eingesetzte Element
- Druckverlust infolge Beladung mit flüssigen Aerosolen
- Druckverlust über eingelagerte Feststoffpartikel

Der Druckverlust steigt überproportional mit der Durchflußmenge, mathematisch beschrieben durch den Energiesatz von Bernoulli nach:

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} \omega_2^2 - \frac{\rho}{2} \omega_1^2$$

Formel 4.5.2.1

Wenn  $p = \text{konstant}$  ist, lautet die Kontinuitätsgleichung

$$V = \omega * A$$

Formel 4.5.2.2

womit der Druckverlust beschrieben wird mit dem Ausdruck

$$\Delta p \approx V^2$$

Formel 4.5.2.3

---

Da sowohl die Dichte als auch der Querschnitt konstante Größen sind wird der Ausdruck ergänzt in bezug auf den Betriebszustand mit der Formel 4.5.2.4.

$$\Delta p \approx \left( \frac{V}{p} \right)^2$$

Formel 4.5.2.4

Mit dieser Formel wird die Abhängigkeit von Durchflußmenge  $V$  und Absolutdruck  $p$  vom Druckverlust  $\Delta p$  bestimmt.

### 4.5.3 Durchdringungskoeffizient

Der Durchdringungskoeffizient  $p_F$  gibt das Konzentrationsverhältnis der Aerosolteilchen hinter und vor dem Filter an. Er steht in Beziehung mit dem Abscheidegrad  $E$  gemäß

$$p_F = 1 - E$$

Formel 4.5.3.1

und kann experimentell bestimmt werden. Er ist von zahlreichen Parametern abhängig, wie Faserdurchmesser  $D_f$ , Teilchendurchmesser  $D_t$ , Strömungsgeschwindigkeit  $w_o$ , Konzentration und Filterdicke.

### 4.5.4 Koeffizient Filterqualität

Da über die Qualität des Filters Druckverlust und Abscheidegrad entscheiden, wird der Koeffizient der Filterqualität  $K_v$  eingeführt, als Verhältnis des negativen Logarithmus des Durchdringungskoeffizienten  $p_F$  und des Druckabfalles  $\Delta p_{760}$ .

$$K_v = \frac{-\log p_F}{\Delta p_{760}}$$

Formel 4.5.4.1

Diese Größe stellt die Materialkonstante für ein bestimmtes Filtrationsmaterial dar und ist abhängig von der Gasdurchflußgeschwindigkeit  $w_o$  durch das Filter, der Faserdicke  $D_f$ , der Porosität und anderen Größen, dagegen bleibt die Filterschichtdicke ohne Einfluß auf diese Materialkonstante, die experimentell bestimmt wird.

### 4.5.5 Filtrationskinetik

Während des Filtrationsvorganges ändern sich sowohl Abscheidegrad  $E$  als auch Druckverlust  $\Delta p$ , so daß der gesamte Prozeß instationär wird. Sobald sich die Filterstruktur mit einer Schicht der abgeschiedenen Aerosole bedeckt, vergrößert sich der Faserdurchmesser und damit der Packungsdichtekoeffizient, d.h. die Durchlässigkeit des Systems für das Dispersionsmittel wird verringert.

Dies hat einen nachteiligen Anstieg des Druckverlustes zur Folge. Gleichzeitig steigt aber mit der Verringerung des freien Querschnittes der Abscheidegrad, da nun auch Partikel mit kleineren Durchmessern zurückgehalten werden. Diese sogenannten sekundären Filtrationsvorgänge sind für die praktische Nutzung, insbesondere mit Blick auf die Ökonomie, von großer Wichtigkeit.

## 4.6 Filtereinteilung

Bei der Filtration werden Fremdstoffe aus der Druckluft entfernt. Auf der Saugseite des Kompressors werden Staub und nebelartige Bestandteile ausgefiltert.

Druckseitig werden Filter eingesetzt um Staub, Schmutzpartikel, Ablagerungen, Flüssigkeiten und Nebel auszufiltern.

Filter erreichen Abscheideraten bis zu 100 % bei Partikelgrößen von ca. 1 Mikrometern. Um diese feinen Filter nicht mit groben Partikeln zu belasten, werden vor diesen Filtern mechanische Grobabscheider gesetzt.

Nach dem Abscheidemechanismus unterscheidet man zwei Filtertypen:

- Oberflächenfilter
- Tiefenfilter

Bei der Oberflächenfiltration steht die Siebwirkung als Abscheidemechanismus im Vordergrund. Die Verunreinigungen werden, soweit sie größer als die definierten Poren sind, an der Oberfläche des Filtermaterials abgeschieden und bilden im Laufe der Betriebszeit einen sogenannten Filterkuchen. Dies hat den Nebeneffekt zur Folge, daß zum geringen Teil auch kleinere Partikel als die lichte Porenweite abgeschieden werden.

Da sich die Verunreinigungen hauptsächlich an der Oberfläche absetzen, ist eine einfache Regeneration derart aufgebauter Filterelemente möglich.

In der Tiefenfiltration werden Faservliese verwendet, die aus einem Gewirr von feinsten Einzelfasern bestehen. Es liegen demnach keine definierten Porenweiten vor. Derartige Filtermaterialien wirken nicht nur als Sieb, um hauptsächlich Partikel entsprechend der Porengröße zurückzuhalten sondern es werden Verunreinigungen abgeschieden, die

## 4.0 Abscheider

---

wesentlich kleiner sind als die Faserbestände. Hierfür ist eine Kombination von mehreren Abscheidemechanismen verantwortlich:

- Direkter Stoß
- Adsorption
- Elektrische Aufladung
- Diffusion
- Siebwirkung
- Bindung durch van der Waalsche Kräfte

### 4.6.1 Oberflächenfilter

Beim Oberflächen- oder Siebfilterelement erfolgt die Abscheidung von Partikeln an einer Oberfläche, die quer zur Strömungsrichtung liegt.

Im Idealfall ist ein Oberflächenfilterelement mit absolut gleichmäßigen Poren versehen, die auch exakt gleichmäßige Abstände voneinander haben.

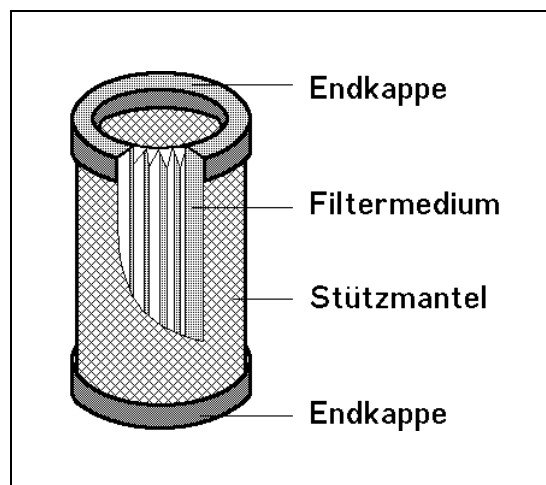


Bild 4.6.1.1

Die Teilchen, die größer als die Poren sind, werden ausgesiebt und an der Oberfläche zurückgehalten. Die Abscheidung ist absolut und die Durchlaßrate abhängig von der Porenweite.

Die Oberfläche hat die Wirksamkeit eines Siebes, das durch seine Öffnungen die im Aerosol dispergierten festen Partikel am Durchtritt hindert. Demzufolge sind die Durchmesser der Strömungskanäle kleiner

als die Durchmesser der abzuscheidenden festen Partikel, so daß Oberflächenfilter allein für das Disperionsmittel durchlässig sind.

Aus diesen Eigenschaften folgt, daß beim Betrieb eines Oberflächenfilters im allgemeinen ein sehr hoher Druckverlust auftritt, der sich nur durch Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit in erträglichen Grenzen hält. Die Oberflächenfiltration ist bei der Abscheidung flüssiger Partikel ohne Bedeutung.

Die Feststofffiltration erfolgt ausschließlich auf der Oberfläche und dadurch sind diese Filterelemente entsprechend leicht zu regenerieren. Als Filterelementwerkstoff kommen dünnwandige Sinterrohre zum Einsatz oder imprägnierte Zellulose-Acetate, die sternförmig gefaltet sind.

Diese Oberflächenfilterelemente können selbstverständlich nur dann eine Filtrationswirkung erzielen, wenn die abzuscheidenden Bestandteile als Feststoffpartikel oder in Tropfenform vorliegen. Eine Trocknung mit diesen Filterelementen, d.h. Entfernen der Wasserdampfphase aus der Druckluft, ist nicht möglich.

Die kompletten Filter selbst bestehen in der Regel aus einem zweigeteilten Gehäuse, in dem das Filterelement über eine Befestigungsmöglichkeit fixiert ist. Eine Zugankerbefestigung ist allen anderen Arten der Befestigung vorzuziehen, da nur so Temperatur- und Druckschwankungen während des Betriebes sicher aufgefangen werden.

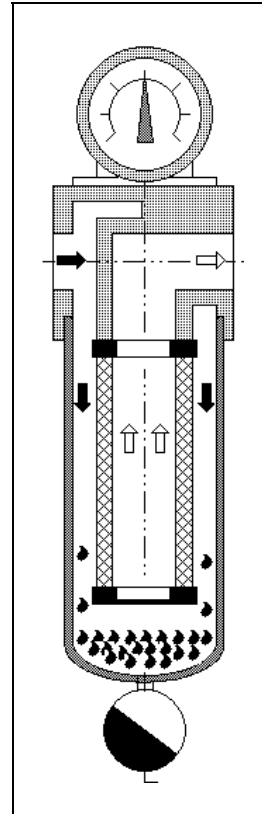


Bild 4.6.1.2

Die vom Filterelement ausgeschiedenen Partikel und Kondensattropfen fallen der Schwerkraft folgend in den Kondensatsammelraum. Bei Erreichen der maximalen Füllstandshöhe wird das Kondensat über einen automatisch öffnenden Ableiter ins Freie geschleust.

Oberflächenfilterelemente werden in einem Filtergehäuse grundsätzlich von außen nach innen angeströmt. Eine umgekehrte Strömungsrichtung würde die abgeschiedenen Partikel im Elementinnern aufbauen und über die ansteigende Feststoffansammlung wirksame Filterfläche zusetzen.

### 4.6.2 Tiefenfilter

Tiefenfilterelemente bestehen im allgemeinen aus einer mehr oder weniger dicken Schicht von Fasern. Das Gefüge der Tiefenfilterelemente

besteht aus einzelnen Fasern, die zufällig miteinander verschlungen sind und so eine poröse Struktur ergeben.

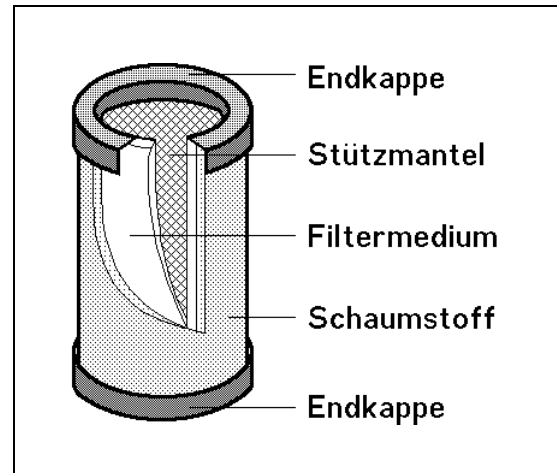


Bild 4.6.2.1

Zwischen den Fasern bilden sich labyrinthartige Gänge bzw. Öffnungen, die weder eine einheitliche, noch meßbare Größe besitzen. Die darin befindlichen Strömungskanäle weisen Durchmesser auf, die teilweise weitaus grobmaschiger sind als die Durchmesser der aus einem dispersen System auszuscheidenden Partikel. Die Abscheidung erfolgt entlang des gesamten Weges, den das Aerosol durch das Tiefenfilterelement zurücklegt.

Die Filtration mit Tiefenfilterelementen beruht im wesentlichen auf dem Prinzip der zufälligen Anlagerung von Partikeln mit dem Einfluß der verschiedenen, sich überlagernden physikalischen Effekte. Tiefenfilterelemente scheiden Partikel im Faserbett nahe der Filterelementoberfläche ab. Die Strömungsrichtung ist dabei von innen nach außen. Primär werden diese Filter eingesetzt, um die Wasser- und Ölkondensatphase aus der Druckluft zu filtern.

Bei der Durchströmung von innen nach außen lagert sich die Naßphase an das Filterelementmaterial an. Die Ansammlung kleinster Teilchen zu immer größeren Tropfen läßt diese dann aufgrund der Strömungsrichtung von innen nach außen, dabei der Schwerkraft folgend, in den Kondensatsammelraum fließen.

Die Ablagerung erfolgt an der Oberfläche der Faser vornehmlich durch Oberflächenkräfte. Da diese verhältnismäßig klein sind, muß dafür Sor

## 4.0 Abscheider

ge getragen werden, daß sich die abgeschiedenen Partikel durch Strömungskräfte nicht wieder von der Haftfläche lösen.

Diese Forderung läßt sich am ehesten durch eine geringe Strömungsgeschwindigkeit realisieren. Um eine möglichst große Abscheideleistung zu realisieren, ist eine möglichst große Oberfläche je Volumeneinheit erforderlich. Die Einheit für diesen Wert<sup>23</sup> wird definiert mit  $\text{m}^2/\text{m}^3$ .

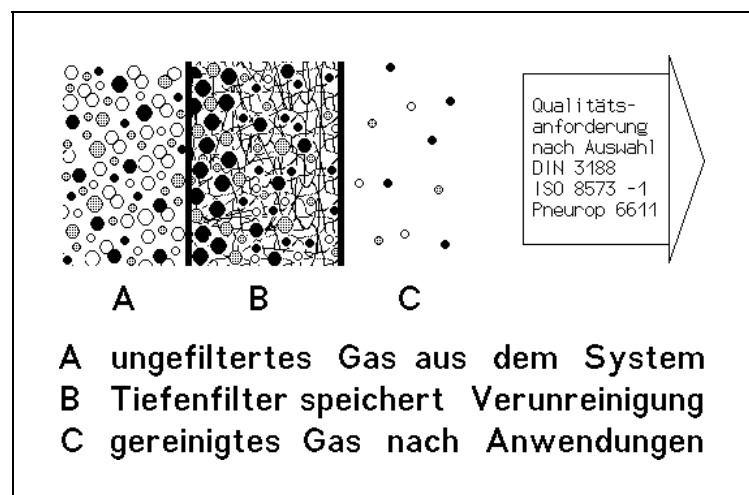


Bild 4.6.2.2

Das Bild 4.6.2.2 zeigt, wie klassische Tiefenfilter funktionieren und warum diese, bei Filtration fester Partikel, bereits nach kurzer Standzeit stark vorbelastet werden. Das zu reinigende Fluid durchdringt die Filterstruktur, die zu entfernenden festen Bestandteile bleiben in den tiefen Schichten des Filters hängen. Mit zunehmender Belegung erhöht sich der Strömungswiderstand und begrenzt den Durchfluß, so daß der Differenzdruck im Element ansteigt.

Bei der Filtration flüssiger Partikel agglomerieren<sup>24</sup> die abgeschiedenen Partikel zu größeren Tropfen und verlassen die Filterstruktur. Partikel, die tief im Element eingelagert sind, lassen sich nicht mehr entfernen.

Durch die Faserstruktur und damit verbundene große Speicherkapazität erreichen diese Filterelemente eine relativ lange Standzeit bis zur Sättigung, danach werden diese Tiefenfilterelemente ausgetauscht.

<sup>23</sup>geeignet für Elementvergleich

<sup>24</sup>häufen

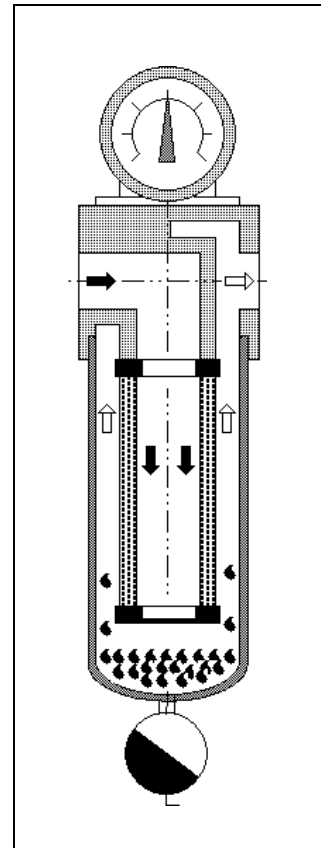


Bild 4.6.2.3

Die Materialien bzw. Werkstoffe dieser Tiefenfilterelemente sind Kunststoffe, Metall- oder Glasfasern sowie gewebte oder gewickelte Systeme<sup>25</sup>. Sternförmig gefaltete Filterelemente mit großer Oberfläche sind anderen Ausführungen überlegen, trotz Reduzierung der effektiven Elementtiefe auf wenige Millimeter.

Abscheidungen von Partikeln unter ca. 0,5 Mikron sind mit diesen Materialien möglich. Alle Materialien kennzeichnen die nicht definierte Porenweite. Eine Abscheiderate zu definieren ist erst möglich nach einem Abscheidetest.

---

<sup>25</sup>Zellulosepatronen

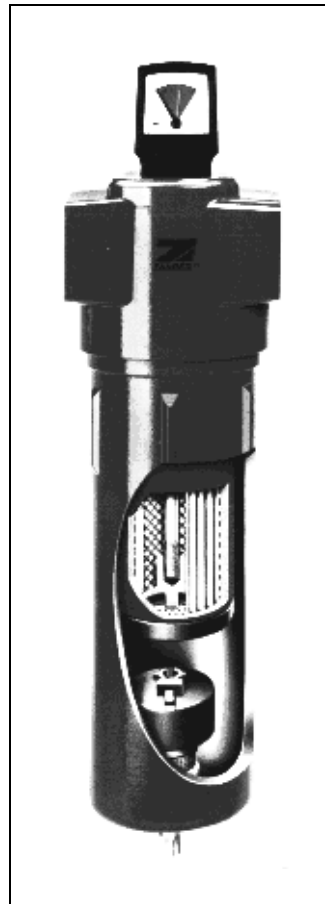


Abb. 4.6.2.1

## 4.7 Ölabscheidung

Bei Verwendung eines ölgeschmierten Kompressors ohne Filtration gelangt der Stoff Öl in das angeschlossene Druckluftnetz mit einer an

genommenen Konzentration von  $c = 10 \text{ mg/m}^3$ . Mit einer effektiven Tiefenfiltration wird dagegen eine Restölkonzentration von  $0,01 \text{ mg/m}^3$  erreicht bei sonst gleichen Bedingungen.

Zur Bestimmung des Restölgehaltes in aufbereiteter Druckluft gibt es bis heute keine Norm. So ist die ISO/TC 118/SC 4 N 40 E nur eine Empfehlung des Normenausschusses Maschinenbau<sup>26</sup> im Deutschen Institut für Normung<sup>27</sup>. Sie orientiert sich an der zur Zeit praktizierten Prüfmethode, aus der die PNEUROP-Richtlinie 6611/1984 und die ISO 8573.1 hervorgeht.

Die Anforderungen hinsichtlich des Ölgehaltes in Druckluft gibt die ISO 8573.1 für technische Anwendungen<sup>28</sup> gemäß Tabelle 4.7.1.1 wie folgt an:

Ölgehalt nach ISO 8573.1

Klasse	Ölgehalt $\text{mg/m}^3$
1	0,01
2	0,1
3	1
4	5
5	25

Tabelle 4.7.1.1

Demnach wird ölfreie Druckluft definiert mit den Werten von

einem Restölgehalt $< 0,01 \text{ mg/m}^3$ und einem Abscheidegrad $> 99,9 \%$
---

Die Angabe  $\text{m}^3$  bezieht sich hierbei auf atmosphärische Luft bei einem Druck von 1013 mbar und einer Temperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ölfilter arbeiten nur dann störungsfrei, wenn diese regelmäßig gewartet werden. Da diese Wartung durch den Betreiber vorgenommen werden muß, sind im Umgang mit den Ölfiltern Fehler als Unsicherheitsfaktoren vorbeugend einzugrenzen.

---

<sup>26</sup>NAM

<sup>27</sup>DIN

<sup>28</sup>siehe Teil 10

Bei genauer Betrachtung kann selbst bei Verwendung ölfreier Verdichter keine absolute Ölfreiheit der Druckluft erreicht werden, da der Kompressor die Umgebungsluft mit unterschiedlicher Qualität ansaugt und die darin enthaltenen Verunreinigungen konzentriert.

### 4.7.1 Öltropfenabscheidung

Dampfförmiges Öl kondensiert durch einfache Kühlung nur soweit, daß der reduzierte Restölwert nur für wenige Anwendungsfälle akzeptiert werden kann. Das kondensierte Öl, das bei der Abkühlung an den inneren Wandungen der Druckluftleitung niederschlägt, wird beim Einsatz üblicher Tiefenfilter bis nahezu 100 % abgeschieden und fließt in den Ölsumpf des Filters.

Der Teil des kondensierten Öls, der im Luftstrom feinste Öltröpfchen bildet, gelangt dagegen immer vollständig auf das Filtermaterial und soll dort zurückgehalten werden. Daher ist für die Beurteilung von Filtern, vor allem der aerosolförmige Ölgehalt, die sogenannte Ölnebelkonzentration, vor und hinter dem Filter von Bedeutung.

Die kritische Ölpartikelgröße beträgt 0,15 - 0,45 µm, auch wenn durchschnittlich ein Wert von 0,3 µm in der Literatur angegeben wird. Dies ist jedoch abhängig von Art, Viskosität, Temperatur und Menge der dem Filter zugeführten Ölpartikel.

Solche Filter, die gegenüber der kritischen Ölpartikelgröße ein gutes Abscheideverhalten zeigen, sind auch bei anderen Größen wirksam:

- Kleinere Partikel werden infolge der Brownschen Molekularbewegungen von den Faserfiltern zurückgehalten,
- größere Partikel hauptsächlich durch den Trägheitseffekt.

## 4.7.2 Ölnebelabscheidung

Ölnebel sind allerfeinste Tröpfchen in einem System, sichtbar als Aerosole. Da Öl eine Kohlenwasserstoffverbindung ist, kann Öl im gasförmigen Zustand nicht existieren. Der gas- oder dampfförmige Zustand bezieht sich grundsätzlich immer auf die Kohlenwasserstoffe, die je nach Temperatur aus dem Flüssigöl auskondensiert sind. Der Anteil von kondensierten Kohlenwasserstoffen, Ölnebel oder Spray in der Druckluft ist abhängig von der im Kompressor eingesetzten Ölsorte und von der Verdichtungstemperatur im Kompressor.

Moderne Kompressoren sind in der Regel mit luft- oder wassergekühlten Nachkühlern ausgerüstet. Mit diesen Nachkühlern wird die Verdichtungstemperatur nach dem Kompressor auf eine niedrige Gebrauchstemperatur abgekühlt. Bei dieser Kühlung kondensieren Kohlenwasserstoffe teilweise aus. Die Restölmenge schwankt in der Regel zwischen 5 - 20 mg/m<sup>3</sup> je nach Verdichterbauart.

Bei Druckluftfiltern wird grundsätzlich zwischen zwei Funktionen des Filterelementes unterschieden: Dem Ausfiltern und dem Sieben. Die Siebelemente halten vor allem grobe Partikel ausschließlich auf der Oberfläche des Elementes zurück<sup>29</sup>. Beim Ausfiltern werden auch feinere Partikel oder Ölteilchen sowohl auf der Oberfläche, als auch auf dem Weg durch das Filterelement<sup>30</sup> abgeschieden. Die aus feinen Fasern aufgebauten Filtermaterialien scheiden entsprechend ihrer Faserdicke feine Partikel aus. So können mit Hilfe moderner Technologien Fasern hergestellt werden, deren Durchmesser kleiner als 2 µm sind.

Die für die meisten Druckluftanwender wichtigste Aussage bei der Beurteilung von Druckluftfiltern betrifft das Rückhaltevermögen der Filter<sup>31</sup> gegenüber dem in der Druckluft enthaltenen Öl. Die radiale Bauart der Filterelemente hat sich mit in der von innen nach außen geführten Strömung bewährt. Kompaktheit, große Durchströmungsflächen bei optimaler Schichthöhe und günstiges dynamisches Verhalten zeichnen diese Filterelemente im besonderen Maße aus.

In Abbildung 4.7.2.1 ist die Abscheidung von Ölnebel dargestellt. Die komprimierte Luft tritt zunächst durch die innere Schicht des Filterelementes (Pos. 4), welche dem Filtermedium eine Abstützung verschafft

---

<sup>29</sup>Oberflächenfiltration

<sup>30</sup>Tiefenfiltration

<sup>31</sup>Abscheidegrad

## 4.0 Abscheider

---

und darüber hinaus die Wirkung eines integrierten Vorfilters hat. Größere Staub- und Flüssigkeitspartikel werden zurückgehalten und damit ein hoher Abscheidegrad gewährleistet. Die kleineren Flüssigkeitspartikel werden durch die Faser des Filtermaterials (Pos. 5) eingefangen und bilden durch Koaleszenz größere Tröpfchen,

Diese Tröpfchen, die sich neben größeren Tröpfchen in der komprimierten Luft befinden, stoßen gegen eine äußere Schicht geringerer Dichte (Pos. 6), die die Tröpfchen sammelt, wenn diese sich von der Faser lösen. Innerhalb der zellenartigen Struktur sinken diese nun größeren Tropfen infolge der Schwerkraft in Richtung der unteren Endkappe (Pos. 1) und bilden den sogenannten nassen Gürtel (Pos. 9) im unteren Bereich des Filterelementes.

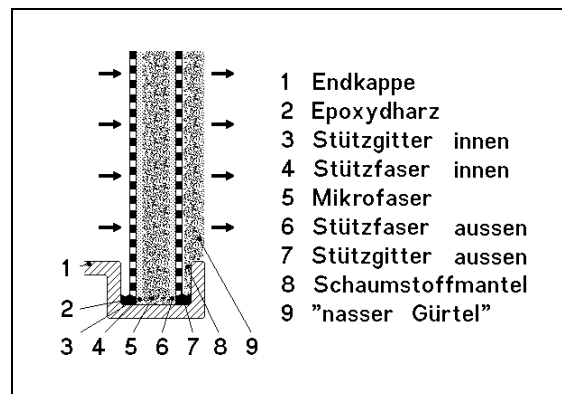


Bild 4.7.2.1

Die gereinigte Luft tritt oberhalb des nassen Gürtels hindurch, da hier der Strömungswiderstand geringer ist. Dadurch bildet sich eine beruhigte Zone ohne Luftzirkulation im unteren Bereich des Filterelementes. Die abgeschiedenen Tropfen fallen vom unteren Teil des Filterelementes durch die beruhigte Zone, ohne vom Luftstrom mitgerissen zu werden. Auf dem Boden des Filtergehäuses werden sie gesammelt und über einen Abfluß ausgeschleust.

### 4.7.3 Öldampfabscheidung

In der Dampfphase befindet sich das Öl als Molekül in der Druckluft und wird daher von mechanischen Filtern nicht abgeschieden. Die Menge des Öldampfes, siehe Diagramm 4.7.3.1, ist abhängig von der Temperatur und kann bei ungünstigen Verhältnissen einen höheren Wert ausmachen als die Öltröpfchen- oder Ölnebelkonzentration.

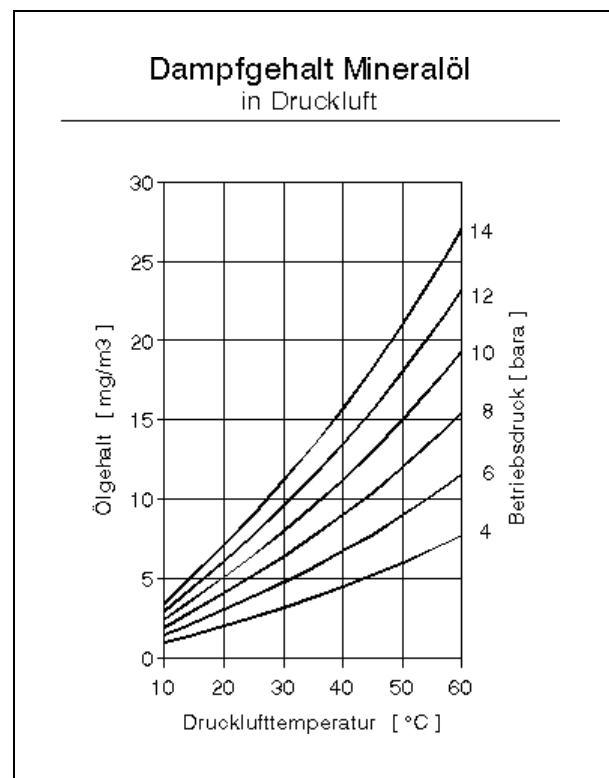


Diagramm 4.7.3.1

Der Abscheidegrad eines Filters verschlechtert sich mit steigender Temperatur<sup>32</sup>. So strömt bei einer Temperatur von 20 °C bis zu zehnmal mehr Öl durch ein Filter als bei 10 °C. Deshalb ist gerade bei Tiefen- und Hochleistungsfiltern darauf zu achten, daß diese an Stellen niedriger Temperatur installiert werden. Durch ausreichende Kühlung kondensiert dampfförmiges Öl. Das kondensierte Öl kann durch Tiefenfilter problemlos aus der Druckluft ausgefiltert werden.

<sup>32</sup>siehe Abs. 4.7.4

## 4.0 Abscheider

---

Die in der Druckluft verbleibenden Öldämpfe werden reduziert durch Einsatz nachgeschalteter Aktivkohleabsorptionsfilter. Mit diesen Filtern werden Restölgehalte bis zu  $0,005 \text{ mg/m}^3$  erreicht. Eine derartig aufbereitete Druckluft ist als technisch ölfrei einzustufen.

Aktivkohlefilterelemente sind vom Erscheinungsbild identisch mit anderen Filterelementen. Gleiche geometrische Formen garantieren den problemlosen Einsatz in Standardfiltergehäusen und deren Austauschbarkeit.

Aktivkohlefilterelemente der unterschiedlichsten Art und auch Ausführung sind bekannt, wie

- gemahlene Aktivkohle eingebettet in ein Tiefenfilterbett aus Borosilicat-Glasfasergewebe (Bild 4.7.3.1)
- gekörnte Aktivkohle von Nadelfilz umhüllt als sternförmiges Element
- gepreßter Aktivkohleblock in Form eines Hohlzylinders.

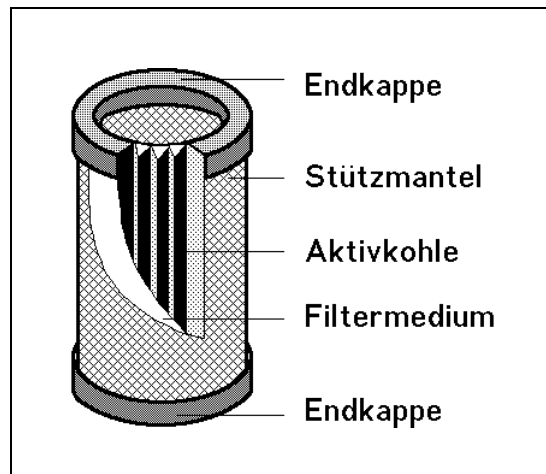


Bild 4.7.3.1

Aktivkohle<sup>33</sup> wird vorzugsweise dann eingesetzt, wenn ein Maximum ölfreier Druckluft für den Anwendungsfall erforderlich ist. Der angegebene Restölgehalt wird allerdings nur dann erreicht, wenn die Betriebsbedingungen eingehalten werden. Voraussetzung für die optimale Abscheidung ist

---

<sup>33</sup>Siehe Teil 6

- eine niedrige Eintrittstemperatur im Bereich der Filtration
- eine maximale relative Feuchte der Druckluft von ca. 60 %
- eine Vorfiltration mit einem Tiefenfilter

Die Aktivkohlefilterelemente werden in handelsübliche Filtergehäuse eingebaut zu einem Kompletfilter. Aktivkohle adsorbiert den Öldampf aus der Druckluft bis zur Sättigung.

Da die Aktivkohlemenge der Aktivkohlefilter relativ gering ist, kann die Standzeit für die Aktivkohlefilterelemente auch nur begrenzt sein für die Aufnahme von Öldampf. Bedingt durch die Geometrie der Elemente sind Standzeiten von 300 - 400 Betriebsstunden realistisch bei der optimalen Abscheidung unter normalen Einsatzbedingungen.

Die Überwachung der Aktivkohlefilterelemente gestaltet sich in der Praxis einfach. Bewährt haben sich Ölprüfindikatoren, die die Ölkonzentration durch Farbumschlag anzeigen. Die Anzeigegenauigkeit dieser Indikatoren liegt bei ca. 70 - 80 %. Wird diese Anzeigegenauigkeit auf den Restölgehalt von  $0,005 \text{ mg/m}^3$  bezogen, kann ein Ölprüfindikator für die unproblematische Anwendung als geeignete optische Überwachung akzeptiert werden. Exakte, hochempfindliche Meßinstrumente werden im rauen Betrieb nicht eingesetzt.

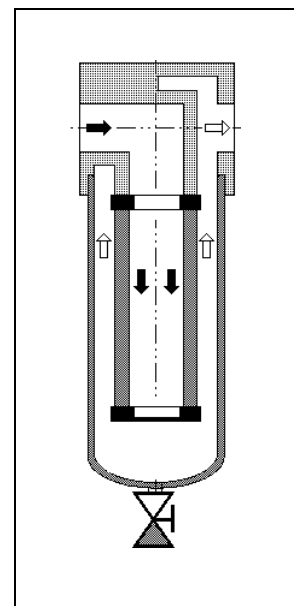


Bild 4.7.3.2

Alternativ zu Aktivkohlefilter werden Aktivkohleadsorber eingesetzt. Diese Adsorber bestehen aus einem Behälter mit Aktivkohle als Schüt

## 4.0 Abscheider

---

tung. Strömungsverteiler oder Siebböden am Ein- und Austritt des Behälters fixieren die Aktivkohle.

Mit Adsorber wird ein Restölgehalt bis zu  $0,003 \text{ mg/m}^3$  erreicht. Ausschlaggebend ist dabei die durch die Geometrie des Adsorbers bestimmte Verweilzeit der Druckluft im Aktivkohlebett<sup>34</sup>. Über die relativ lange Kontaktzeit wird die definierte Qualität erreicht.

Ein Aktivkohleadsorber wird immer dann eingesetzt, wenn höchste Qualitätsanforderung an die aufbereitete Druckluft gestellt wird, die mit Filter nicht erzielt werden kann.

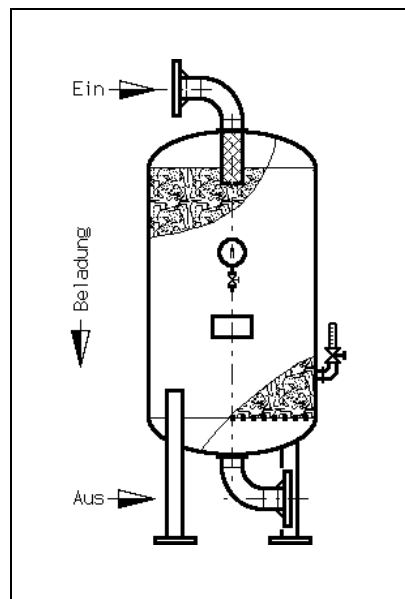


Bild 4.7.3.3

Die Standzeit der im Adsorber eingefüllten Aktivkohleschüttung erreicht bei normaler Belastung 8.000 - 10.000 Betriebsstunden.

## 4.7.4 Restölbestimmung

Die üblichen Methoden der Restölbestimmung können nur die restlichen Ölaerosole nach dem Filter ermitteln. Der Restölgehalt des in Dampfform befindlichen Öls wird nicht berücksichtigt. Dieser kann aus

---

<sup>34</sup>siehe Abs. 6.4

den Berechnungsgrundlagen<sup>35</sup> für den maximalen Öldampfgehalt in der Druckluft bestimmt werden. Der Restölgehalt nach einem Filter ist demnach durch den Öldampfgehalt des Öls gegeben, wobei dieser Öldampfgehalt wiederum eine Funktion der Temperatur ist. Daher ist ein Vergleich von Filterelementen nur bei gleicher Temperatur zulässig.

Mit dem Filtermaterial Borosilicat-Glasfasergewebe können Restölgehalte bei mineralischen Schmiermitteln bis zu  $0,01 \text{ mg/m}^3$  bei einem Betriebsdruck von  $p = 7 \text{ bar}$  und einer Referenztemperatur von  $t = 20 \text{ °C}$  erreicht werden.

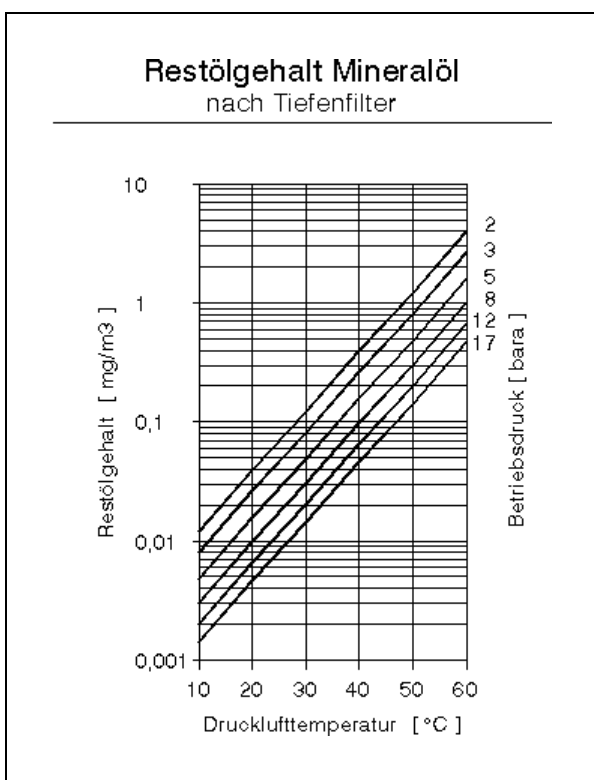


Diagramm 4.7.4.1

Die Milligrammangaben für den Restölgehalt beziehen sich dabei nach ISO 554 auf das entspannte Volumen in  $\text{m}^3$  und ist gültig für ein Öl mit dem Molekulargewicht von ca. 300. Abweichende Restölwerte bei höheren Betriebstemperaturen und differenzierten Betriebsdrücken sind im Diagramm 4.7.4.1 für Mineralöl bzw. im Diagramm 4.7.4.2 für Synthetiköl vergleichsweise dargestellt.

<sup>35</sup>siehe Abs. 2.4.5

## 4.0 Abscheider

Da für unterschiedliche technische Gase und Druckluft entsprechende Berechnungsgrundlagen vorliegen<sup>36</sup>, lässt sich der Restölgehalt für fast alle Anwendungen bestimmen.

Synthetisches Öl hat im Gegensatz zum mineralischen Öl ein wesentlich niedrigeres Verdampfungsverhalten, dafür ist der jeweilige Partialdruck des Schmiermittels maßgeblich.

Eine exakte Bestimmung des Restölwertes kann nur bei Kenntnis der verwendeten Ölsorte mit den ölspezifischen Parametern durchgeführt werden. Entscheidend für die Qualität der Druckluft ist der Restölgehalt, angegeben in  $\text{mg}/\text{m}^3$  oder auch ppm. Dieser Wert wird für die verschiedenen Anforderungen festgelegt.

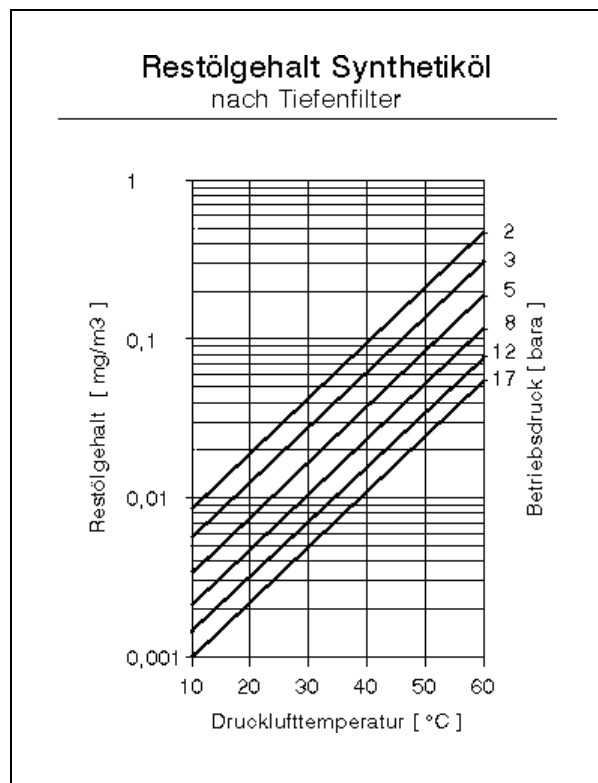


Diagramm 4.7.4.2

Der Restölgehalt in Druckluft ist bei gegebenem Abscheidegrad des Filters abhängig von der Beladung. Diagramm 4.7.4.3 zeigt den Zusammenhang der Restölkonzentration abhängig von der Beladung für ein Feinfilter.

<sup>36</sup>siehe Teil 2

Mit Abnahme der Beladung fällt die Restölkonzentration exponentiell ab bis auf den theoretischen Wert =  $0,01 \text{ mg/m}^3$ . Unterhalb dieses Wertes ist der Einfluß der Dampfphase größer als die in Tröpfchenform vorliegende Konzentration.

Der Wert von  $0,01 \text{ mg/m}^3$  wird in der Praxis als Grenzwert für die Restölkonzentration bestimmt. Um einen Restölgehalt von  $0,01 \text{ mg/m}^3$  sicher zu erreichen, kann bei dem vorgegebenen Abscheidegrad die Beladung maximal  $3 \text{ mg/m}^3$  betragen.

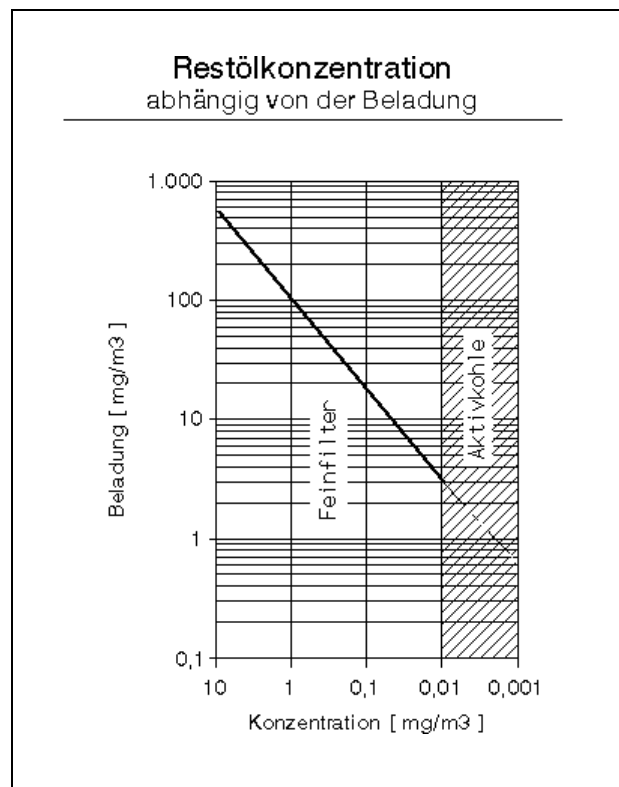


Diagramm 4.7.4.3

Zur Bestimmung des Restölgehaltes in der Druckluft werden unterschiedlichste Methoden angewandt. Die Methode der Restölbestimmung muß für alle, die mit dieser Aufgabe betraut sind, nachvollziehbar sein.

Der Nachweis von Öl in Gasen unter Betriebsbedingungen ist bis heute noch immer ein Problem, da die zur Zeit angewendeten Methoden eine unzureichende Genauigkeit haben und zudem keine reproduzierbaren Ergebnisse liefern.

## 4.0 Abscheider

---

Zur Zeit werden mehrheitlich folgende Filtertestverfahren angewandt:

- Methylenblau-Test
- Natriumflammen-Test
- D.O.P.-Test

Verschiedene Meßverfahren führen zwangsläufig zu verschiedenen Ergebnissen, so daß die ermittelten Restölgehalte in der Druckluft nicht oder nur bedingt miteinander verglichen werden können.

Mit der ISO 8573.2 wird eine Methode zur Bestimmung des Restölgehaltes in der Druckluft beschrieben, die sowohl dem Filterhersteller als auch dem Druckluftanwender die Möglichkeit gibt, reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Die Druckluft wird dabei gefiltert und dann über einen Druckregler zu einem Aerosol-Generator geführt. Das im Generator erzeugte konstante Öl-/Luft-Gemisch durchströmt ein Filter, wobei als Kenngröße der Druckverlust an einem Differenzdruckmanometer kontrolliert wird. Hinter dem Filter erfolgt die Aufteilung der Druckluft in einen Haupt- und Probenstrom.

Der Probenstrom wird durch den Testfilter geleitet mit dem Ziel, die in der Druckluft enthaltenen Öltröpfchen vollständig auszufiltern. Die Parameter wie Temperatur und Druck sind bei der Messung zu überwachen mit entsprechenden Geräten, um den Betriebszustand zu ermitteln und anschließend auf Nennbedingungen umzurechnen.

## 4.8 Filterauswahl

Filter werden überwiegend empirisch ausgelegt, Erfahrung und Experiment stehen bei der Dimensionierung neuer Geräte an erster Stelle. Es stellt sich die Frage, inwieweit bei dieser Vorgehensweise alle Einflußgrößen und Zusammenhänge richtig erfaßt werden und wie theoretische Ansätze eine Auslegungshilfe bieten können. Dies beinhaltet die Feststellung, bis zu welchem Maße eine analytische Berechnung zulässig ist.

Zur Materialbeschreibung eines Filters gehören weiterhin immer folgende Angaben:

- Art des Materials
- Flächengewicht
- Schichtdicke
- Volumenstrom je Flächeneinheit
- Druckverlust bei Nennvolumenstrom
- Zulässige statische Druckdifferenz

### 4.8.1 Auswahlkriterien

Filtermaterialien sollen sich vor allem durch Eigenschaften wie

- geringer Druckverlust
- gute Abscheidewirkung
- homogener, stabiler Druckaufbau
- günstiges Speichervermögen

## 4.0 Abscheider

---

auszeichnen. In bestimmten Fällen können jedoch noch andere Qualitäten eine bedeutende Rolle spielen wie chemische und thermische Beständigkeit. Daher wird die Filterauswahl im Verhältnis zu der optimalen Anforderung immer einen Kompromiß erfordern.

Bei der Auswahl des Filtermaterials stellt die Beseitigung der aus der dynamischen Phase herrührenden Sekundäreffekte<sup>37</sup> eine vorrangige Aufgabe dar. Sie bestimmt daher die Ausgangskonzeption des Filters. Zu einer primären Maßnahme zählt bei Kenntnis der Stoffwerte der abzuschheidenden Ölpartikel die Beachtung der Filterstruktur und der Faseroberfläche. Hier stehen Fasern verschiedener Materialien zur Verfügung.

Mit der Wahl des geeigneten Filterstoffes stellt sich die Frage nach der Stabilität der Packung. Ihre Lösung ist sowohl in der konstruktiven Filterausführung wie auch in der Formbeständigkeit der Faserschicht zu suchen. Letztere kann bei der Bestimmung optimaler Filterparameter und Anströmgeschwindigkeiten wesentlich beeinflusst werden.

In Faserschichten, die mit hoher Geschwindigkeit angeströmt werden, macht sich ab einer bestimmten spezifischen Beladung eine Kompression des Filtermaterials bemerkbar, die zu einem verfälschten Bild des Filterverhaltens führt und durch entsprechend große Packungsdichten<sup>38</sup> ausgeglichen werden kann. Durch die Wahl hoher Packungsdichten sollte die Filterlänge jedoch nicht zu kurz ausfallen.

---

<sup>37</sup>siehe Abs. 4.3.2

<sup>38</sup>siehe Abs. 4.5.3

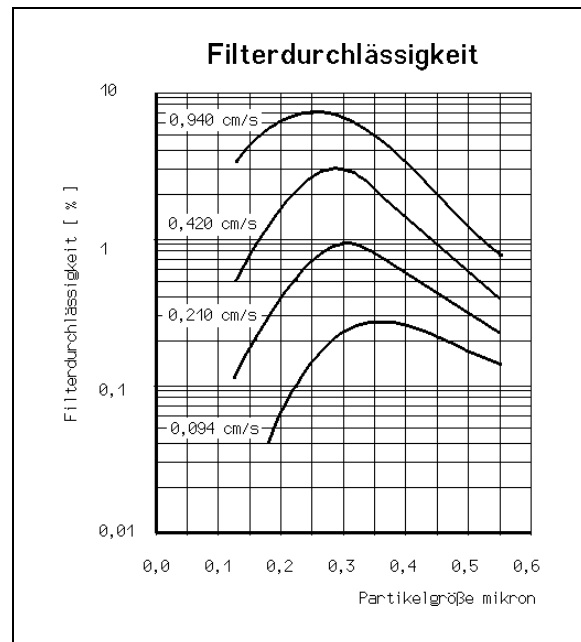


Diagramm 4.8.1.1

Für eine gute Abscheideleistung sind ausreichende Schichtdicken weit- aus größer als 1 mm erforderlich. Im Zusammenhang mit der Eliminierung der Oberflächeneffekte auf der Austrittseite des Filterelements ist die Anbringung eines Schaumstoffmantels um das Stützgitter eine brauchbare Lösung. Bei üblichen Anströmgeschwindigkeiten verhindert diese stark poröse Schicht die Zerplattungsvorgänge und bewirkt eine bessere Drainage der austretenden Flüssigkeit.

Der Schaumstoffmantel beeinflusst ein Wiederabscheiden von Partikeln kleiner als 6 Mikron nicht. In diesem Bereich hat sich die unmittelbare Nachschaltung eines auf die Hauptabscheideschicht abgestimmten Fasermaterials als günstig erwiesen. Diagramm 4.8.1.2 verdeutlicht die Wirksamkeit des Schaumstoffmantels bei der Anströmgeschwindigkeit von 0,1 m/s.

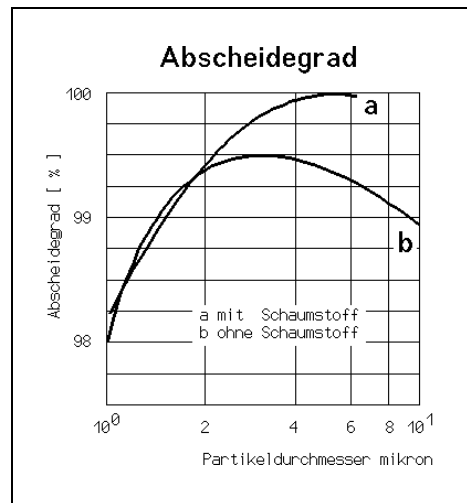


Diagramm 4.8.1.2

Kaskadenförmige<sup>39</sup> Filterkombinationen, deren einzelne Filterschichten einen in Strömungsrichtung abnehmenden Faserhalbmesser besitzen, haben im Vergleich zu einzelnen Schichten höhere Abscheidegrade bei relativ geringem Druckverlust. Derartige Varianten bieten in der stationären Phase Verbesserungen.

Aus der Sicht der Filterdynamik führt diese Kombination durch den sich verzögernden Transport abgeschiedener Flüssigkeit in den unterschiedlichen Faserschichten zu sehr hohen Sättigungsdruckverlusten. Die Höhe der Abscheidegradabnahme wird weitgehend von der Schicht mit der feinsten Faserstärke bestimmt. Ferner werden die Sekundäreffekte nicht eingeschränkt.

## 4.9 Fasermaterialien

Filter werden für die vielfältigsten Anwendungen eingesetzt mit den unterschiedlichsten Materialien für das Element, wie Sinterbronze, Keramik, Faservlies, Filz, Tuch, Glaswolle, PTFE, Metall und viele mehr.

---

<sup>39</sup>stufenförmig

Die für die Ölfiltration wichtigsten Materialien werden nachfolgend beschrieben.

### 4.9.1 Nadelfilze

Nadelfilze bieten aufgrund der Struktur des Filtermediums ein gleichmäßiges Aufteilen des Luftstromes bei der Durchströmung des Filterstoffes, da bei Nadelfilzen die Fasern mit einem mittleren Durchmesser zwischen 10 - 30 Mikron gleichmäßig über das gesamte Filtervolumen verteilt sind.

### 4.9.2 Faservlies

Um den Restölgehalt in der Druckluft so gering wie möglich zu halten, wurden Filter mit gestuften Abscheidequalitäten entwickelt. Dabei hat sich gerade im Bereich der Fein- bzw. Feinstabscheider das Faservlies bewährt. Dieses bietet mit 95 % Porosität<sup>40</sup> sowohl hinreichend Raum für die durchströmende Luft und damit einen geringeren Druckverlust, als auch größeren Platz für die einzulagernden Öltröpfchen.

Das instabile Faservlies wird innen und außen durch gelochte Edelstahlbleche stabilisiert. Eine vorgeschaltete gröbere Faserschicht schützt das Faservlies vor groben Verunreinigungen und erhält somit die Filtereigenschaften. Für die Filtration und für die Analyse von aerodispersen Systemen sind heutzutage Filter aus dünnen organischen und anorganischen Fasern als das wirksamste Filtrationsmaterial zu betrachten. Sie sind gekennzeichnet durch einen hohen Abscheidegrad bei einem niedrigen Differenzdruck.

Die einzelnen Fasern eines Vliesstoffes sind wirtl zueinander angeordnet und teilen so die kontinuierliche Trägerphase beim Durchströmen vielfach auf. Die dispergierten Partikel stoßen im Gegensatz zu Gewebefilter mit systematischer Struktur häufiger auf eine Faser, so daß die Haftwahrscheinlichkeit größer ist. Außerdem weisen Filter aus

---

<sup>40</sup>Hohlvolumen

Vliesstoffen bei gleichem Abscheidegrad einen 30 % geringeren Druckverlust auf als Gewebefilter.

### 4.9.3 Filterstandzeit

Die Frage der Standzeit von Faserschichten ist in der Hauptsache aus wirtschaftlicher Sicht interessant.

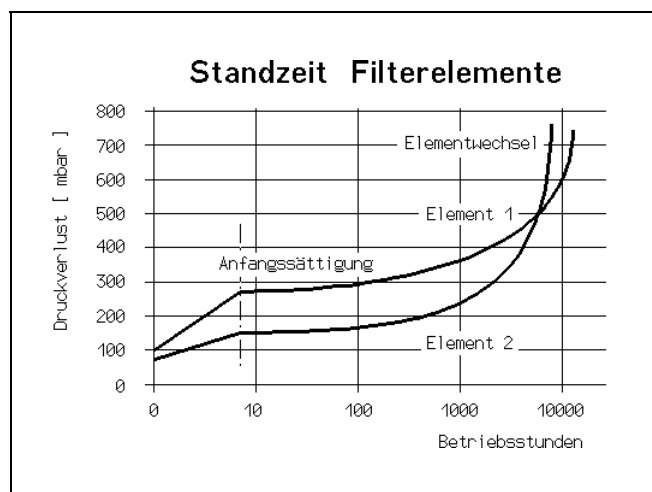


Diagramm 4.9.3.1

Die Beurteilungskriterien stehen in enger Wechselwirkung mit der konstruktiven Filterausführung und den Einsatzbedingungen. Bei vernachlässigbarem Gehalt an festen Partikeln in der Luft kann die Standzeit der Faserschicht mehrere Jahre betragen. Praktisch jedoch üben diese festen Partikel einen entscheidenden Einfluß auf die Deformation der Faserstruktur und demzufolge auf die Lebensdauer der Faserschicht aus.

Durch die Verdrängung der Flüssigkeit aus der Faserschicht verläßt nur ein Teil der Feststoffpartikel diese Schicht. Die restlichen Mengenteile lagern sich im Filtermedium ein und bewirken so eine Druckverluststeigerung. Die daraus resultierenden Beanspruchungen der Fasern führen unter Umständen zu Beeinträchtigungen der Funktionsweise des Filters. Zur Reduzierung der Feststoffbelastung für Tiefenfilter wird die

sem ein Oberflächenfilter vorgeschaltet zur Abscheidung von groben Feststoffpartikeln und Flüssigkeitstropfen.

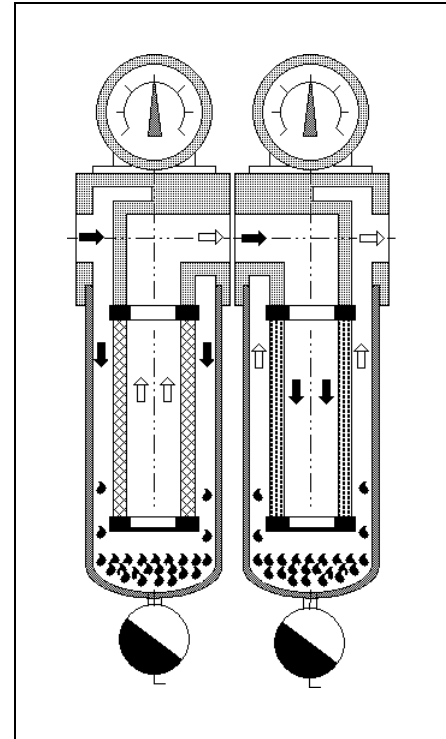


Bild 4.9.3.1

Die Installation eines Differenzdruckmanometers ist ratsam, damit eine kontinuierliche optische Kontrolle möglich ist und erkannt wird, wenn der Filter beladen und damit zugesetzt ist.

Trotz aller Maßnahmen für eine optimale Anpassung der Filter an die Betriebssituation können effektive Standzeiten der Filterelemente nicht angegeben werden, da sich der Differenzdruck über die Laufzeit nur langsam aufbaut und der Gehalt an Feststoffen in der Druckluft immer verschieden ist.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht muß der Betreiber einer Filterstation den Zeitpunkt des Elementwechsels bestimmen. Mit Kenntnis der relevanten Daten ist dieser Zeitpunkt überschlägig festzulegen.

Mit einer Differenzdruckmessung ist der Druckverlust über den Filter zu ermitteln. Damit sind zwei Werte fixiert, der Druck vor dem Filter  $p_1$  und der Druck nach dem Filter  $p_2$ . Diese Werte dienen zur überschlägigen Festlegung des Leistungsverlustes entsprechend  $P_V = 1 - p_2^2 / p_1^2$ .

## 4.0 Abscheider

---

Die installierte Motorleistung  $P_i$  des Verdichters<sup>41</sup> ist ein weiterer Basiswert. Der Leistungsverlust über den momentanen Druckverlust des Filters kann als Zahlenwert von der Motorleistung abgeleitet werden. Multipliziert mit den Stromkosten  $K_p$  sind die Betriebskosten zum Druckverlust rechnerisch definiert.

Die Investitionskosten  $K_E$  für ein neues Filterelement ist den Betriebskosten gegenüberzustellen. Mit der Formel 4.9.3.1 werden die definierten Kriterien erfaßt und der Zeitpunkt des Elementwechsels  $t_{Ew}$  bestimmt.

$$t_{Ew} = \frac{K_E}{\left(1 - \frac{p_2^2}{p_1^2}\right) * P_i * K_p}$$

Formel 4.9.3.1

Wirkungsgrade sind in der angegebenen Formel nicht enthalten. Diese sollten zusätzlich berücksichtigt werden. Einmal ist die installierte Motorleistung zur effektiven Wellenleistung des Verdichters zu beachten und darüber hinaus die Charakteristik der Standzeit der Filterelemente nach Diagramm 4.9.3.1.

Die Alternative besteht darin, einen maximalen Druckverlust im Betrieb entsprechend der Anwendung für das Element zu bestimmen, bei dem dann der Elementwechsel zu erfolgen hat.

---

<sup>41</sup>siehe Diagramm 3.2.3.1

---

## 4.10 Filterzubehör

Der wirkungsvolle Einsatz von Filter und Abscheider in Druckluftsysteme ist nur dann zu kontrollieren, wenn durch geeignetes und sinnvolles Zubehör die Filter oder Abscheider ergänzt werden. Filterelemente werden belastet mit den unterschiedlichsten Stoffen. Im Laufe der Betriebszeit müssen die flüssigen Stoffe<sup>42</sup> kontinuierlich aus dem System ausgeschleust werden. Automatische Kondensatableiter sind die dafür geeigneten Einheiten. Feste Stoffe werden im Filterelement gespeichert und beeinflussen die Standzeit der Elemente. Zur Überwachung dieser Standzeit sind Differenzdruckmanometer sinnvoll.

### 4.10.1 Kondensatableiter

Überall dort, wo Kondensat anfällt, muß dieses auch abgeleitet werden. Automatische Kondensatableitersysteme sind dafür entwickelt worden. Die Einteilung erfolgt dabei in mechanische Schwimmerventile und elektrische oder elektronische Kondensatableiter.

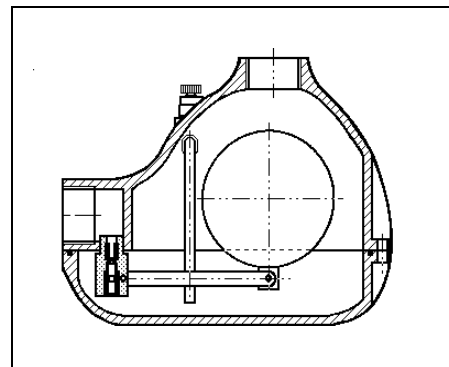


Bild 4.10.1.1

Schwimmerventile, Bild 4.10.1.1, müssen speziell auf die Bedürfnisse des Druckluftkondensats abgestimmt sein, da dieses eine Emulsion von Wasser, Öl und Schmutzteilchen ist, welches ein weitaus kritischeres Betriebsverhältnis darstellt als Dampfkondensat. Anfallendes Kondensat

---

<sup>42</sup>Kondensate

## 4.0 Abscheider

---

sat wird gesammelt und die Auftriebskraft eines Schwimmers genutzt, um den Ventilsitz zu öffnen. Aufgrund der durch die Baugröße des Schwimmers begrenzten Auftriebskraft lassen sich Ventildurchmesser von 0,5 - 2 mm realisieren. Dabei liegt die Hublänge des Ventilstößels bei ca. 25 - 50 % des Sitzdurchmessers. Systembedingte Probleme sind vorprogrammiert, es ist unbestritten, daß Schwimmerventile nicht immer funktionieren. Die Ursachen können sein:

- Dickflüssige Emulsion,
- Verschmutzung oder Verharzen und Verkleben

Als Alternative bietet sich die Ableitung mittels Magnetventile an. Diese Ventile werden über eine Zeitsteuerung intervallweise für 1 - 10 Sekunden geöffnet und leiten das Kondensat ab. Der Kondensatanfall ist in Druckluftstationen allerdings nicht immer kontinuierlich sondern wechselt permanent. Im Gegensatz zu den Schwimmerventilen, die keine Druckluft verbrauchen, wird bei jedem Öffnungsvorgang eine undefinierte Druckluftmenge unnötigerweise als Verlust verbraucht.

Außer der Tatsache, daß Betriebsstörungen nicht angezeigt werden, kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Durch die im Magnetventil entstehenden hohen Geschwindigkeiten, in Verbindung mit mehrfachen Umlenkungen, werden im Kondensat enthaltene Ölpartikel mikrodispers zerschlagen und durch die Luftreibung negativ geladen. Die Folge daraus ist die Bildung von stabilen Emulsionen, deren Aufbereitung mit hohen Kosten verbunden ist.

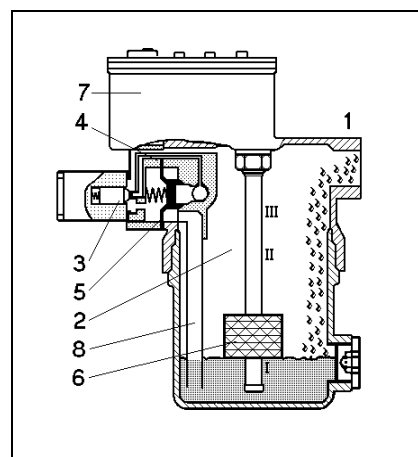


Bild 4.10.1.2

Eine optimale, sichere Lösung der Kondensatableiter-Probleme ist mit dem Einsatz niveaugesteuerter, elektronischer Schwimmerableiter

---

(Bild 4.10.1.2) gegeben. Bei diesem Ableiter wird der Füllstand des Kondensats über ein Niveauschwimmer-Sondensystem erfaßt, das mit drei Kontakten belegt ist.

Sobald der Niveauschwimmer (Pos. 6), vom Kondensat getragen, Kontakt II erreicht, wird die elektrische Steuerung des Systems das Magnetventil (Pos. 3) öffnen und das Kondensat über ein Steigrohr (Pos. 8) ohne Luftverlust ableiten. Der Kondensatspiegel sinkt und erreicht in einer voreingestellten Zeit den Kontakt I und bewirkt, daß das Magnetventil schließt. Wird in der voreingestellten Zeit der Kontakt I nicht erreicht, signalisiert die Steuerung in festen Zyklen Schaltspiele. Dadurch ist die komplette Entleerung des Kondensatsammelraumes sichergestellt. Mit dem Kontakt III gibt die Steuerung den Hauptalarm bei gleichbleibenden Öffnungsintervallen aus. Ein Überfluten des Systems ist damit ausgeschlossen. Da dieser niveaugesteuerte Schwimmerableiter mit einem zeitabhängigen Reinigungszyklus arbeitet, sind eingetrocknete Kondensate bei langem Stillstand nicht zu erwarten.

## 4.10.2 Differenzdruckmanometer

Um Filter und deren Elemente kontinuierlich zu kontrollieren werden Differenzdruckmanometer eingesetzt. Der Verschmutzungsgrad eines Filters ist verbunden mit dem Anstieg des Differenzdruckes im Filterelement. Die wesentlichen Ansprüche an ein Differenzdruckmanometer in einer Druckluftstation sind:

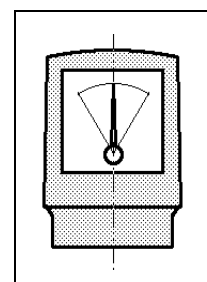


Bild 4.10.2.1

- einfache Handhabung
- druckloser Anzeigenbereich
- Druckstoßanzeige

## 4.0 Abscheider

---

- kondensatfreies Anzeigefeld

Differenzdruckmanometer mit einem Membran-Magnet-System erfüllen diese Anforderung. Membrane und Magnet bilden eine Einheit und sind so montiert, daß die Membrane zum Filtergehäuse und der Magnet zum Manometergehäuse zeigt. Mit der Membrane werden Filtergehäuse und Manometergehäuse sauber getrennt.

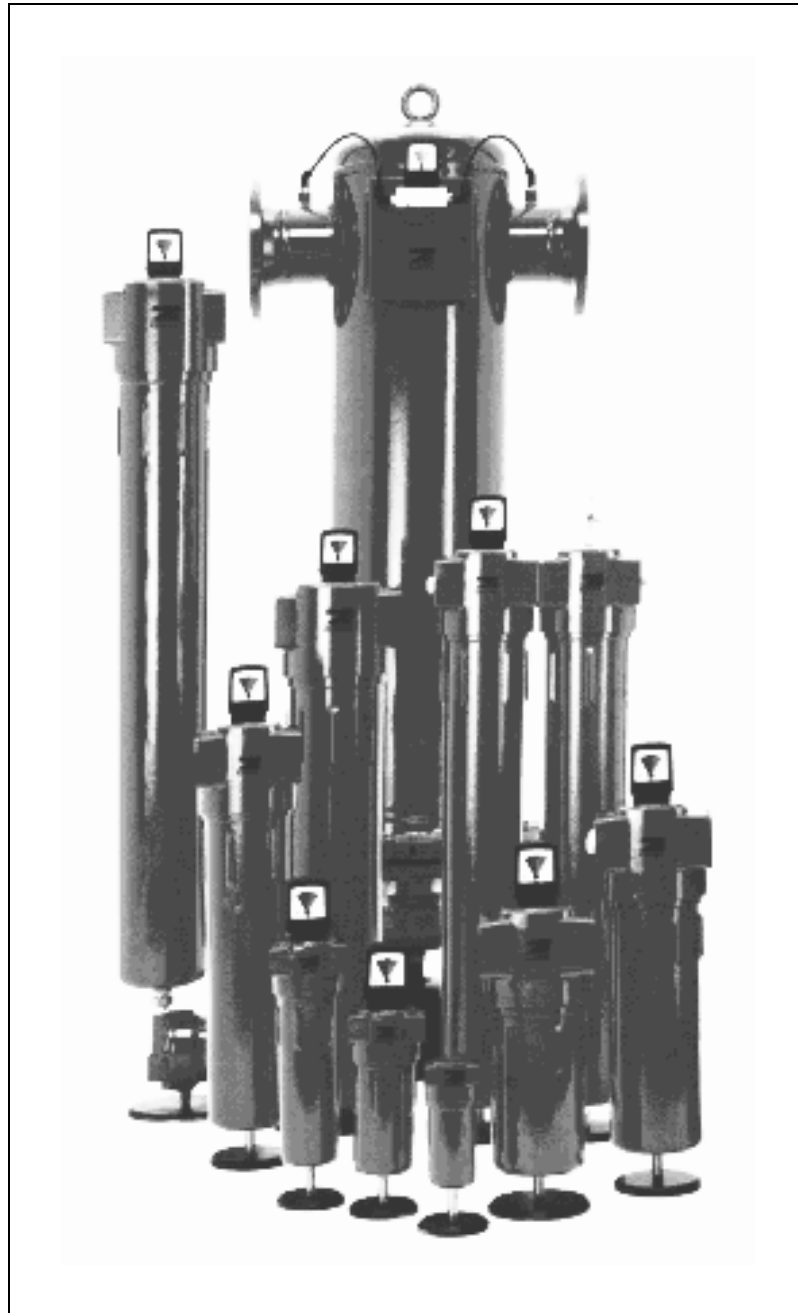


Abb. 4.10.2.1

Der im Filterelement wirksame Druckverlust überträgt die differenzierte Druckhöhe vom Filterein- und -austritt. Proportional zur differenzierten Druckhöhe wird die Membrane bewegt und damit auch das Magnet. Die Bewegung wird auf einen Zeigermechanismus übertragen und sichtbar gemacht. Ein zusätzlicher Schleppzeiger markiert den maximal gemessenen Differenzdruck. Druckstöße sind damit einfach zu kontrollieren.