

4 Mechanische Verfahrenstechnik

4.1 Übersicht und Grundlagen

4.1.1 Einleitung

Die Mechanische Verfahrenstechnik behandelt die Verfahren, bei denen Änderungen von Stoffen durch **Einwirkung mechanischer Energie** erfolgt. Diese Energie kann in verschiedenen Formen eingeleitet werden, wobei mechanische Energie immer mit der **Wirkung von Kräften** zu tun hat. Hierbei kann es sich beispielsweise um die Schwerkraft, Fliehkraft, Trägheitskraft, Druckkraft, Widerstandskraft, Haftkraft, Reibungskraft, magnetische oder elektrische Feldkraft handeln.

Bei der Umwandlung der Stoffe geht es um die **Veränderung** derer **Eigenschaften** oder **Zusammensetzung**. An Eigenschaften sind vor allem die Größe und die Form von Bedeutung. Die Zusammensetzung beinhaltet auch Trennaufgaben zwischen Feststoffen und Flüssigkeiten/Gasen.

Die Mechanische Verfahrenstechnik läßt sich entsprechend Abb.4.1.1 in einige Teilgebiete unterteilen:

Teilgebiete der Mechanischen Verfahrenstechnik		Abschnitt
Meßtechnik		(4.2)
Trennverfahren:	Trennen von Fest-Fest-Gemischen	4.3
	Gasreinigen = Trennen von Gas-Fest/Flüssig-Gemischen	4.4
	Trennen von Suspensionen	4.5
	Trennen von Emulsionen	4.6
Stoffaufbereiten:	Zerkleinern	4.7
	Stoffvereinigern (Stückigmachen)	4.8
	Mischen	4.9
Fördern und Lagern		6

Abb.4.1.1: Teilgebiete der Mechanischen Verfahrenstechnik

Sowohl bei den Trennverfahren als auch beim Stoffaufbereiten kann man die Verfahren und Apparate nach dem Aggregatzustand der vorliegenden Stoffe unterscheiden. Daher wird jedes dieser Teilgebiet in mehreren Abschnitten behandelt.

Auf die Meßtechnik wird nur kurz im Rahmen der charakterisierenden, zu messenden Größen eingegangen, da dies sonst den Rahmen dieses Faches sprengen würde.

Das Fördern und Lagern von Stoffen wird getrennt in Kapitel 6 behandelt.

4.1.2 Begriffserklärungen

Teilchen = Partikel: Bezeichnung der einzelnen Elemente ("Stückchen", "Bausteine") eines Stoffes, einer Materie.

Phase: Physikalisch gleichartiger Bereich von Materie, innerhalb dessen jedes Volumenelement gleiche Eigenschaften aufweist.

Disperses System: Stoffgemenge, das aus mindestens zwei Phasen besteht, der **Dispersionsmittelp phase** und der **dispersen Phase**. Das Dispersionsmittel besteht aus zusammenhängender Materie, die disperse Phase besteht aus mindestens einer Art von Teilchen, die sich nicht alle berühren.

Monodisperse System: System in dem alle dispersen Teilchen gleiche Größe und Form haben. In der Technik selten vorzufinden.

Polydisperses System: System in dem die dispersen Teilchen unterschiedliche Größen haben.

□ Aufgabe:

Verwende die obigen Begriffe zur Beschreibung nachfolgender Systeme. Welche Aggregatzustände liegen vor?

Bierschaum; Milch, Lackspray, Zigarettenrauch, nasser Schwamm, Perlenkette.

■ **Lösung:**

Gemenge:	System	Dispersionsmittel	Aggregatzustand	disperse Phase	Aggregatzustand

4.1.3 Partikel und Eigenschaften

○ Partikel

Je nach Aggregatzustand der Teilchen oder Partikel verwendet man unterschiedliche Bezeichnungen (Abb.4.1.3.1) für diese.

Aggregatzustand	fest	flüssig	gasförmig (in Flüssigkeit)	gasförmig/flüssig (als Hohlraum)
Teilchen	Korn	Tropfen	Blase	Pore

Abb.4.1.3.1.: Benennung von Partikeln

In der Mechanischen Verfahrenstechnik ist der **feste Aggregatzustand** besonders wichtig, da bei den meisten Verfahrensschritten Körner vorzufinden sind. Die Bezeichnung **Korn** verwendet man für für kleinste Feststoffteilchen hin bis zu einer Größe von einigen Zentimetern.

○ Eigenschaften

Die Eigenschaften der Partikel (und somit der Phase und des Gemenges) hängen stark von deren Größe ab. Betrachtet man zwei disperse Systeme, die sich nur durch die Größe der Partikel der dispersen Phase unterscheiden, so stellt man bei den kleineren Partikeln fest:

- Die **Homogenität** des Stoffes nimmt zu
- Die **Festigkeit** der Einzelpartikel und des Stoffes nimmt zu
- Die **Haftkräfte** wirken stärker als die Massenkräfte
- Die **Löslichkeit** und **chemische Reaktionsfreudigkeit** nehmen zu
- Die **Sinkgeschwindigkeit** in Flüssigkeiten und Gasen nimmt ab
- Es sind weniger **Hohlräume** zwischen den Teilchen
- Der **Durchströmungswiderstand** nimmt zu
- Die Neigung zum **Verklumpen** nimmt zu
- Die **Explosionsgefahr** nimmt zu

□ Aufgabe:

Gib zu den genannten Eigenschaften jeweils ein Beispiel.

■ Lösung:

Die Ermittlung der Größe der Partikel ist somit eine wichtige Aufgabe der Mechanischen Verfahrenstechnik, die **Partikelmeßtechnik** beschäftigt sich hiermit. Bei festen Stoffen spricht man auch von **Korngrößenanalyse**.

Da die festen Stoffe am häufigsten in der Mechanischen Verfahrenstechnik vorzufinden sind, sollen sie hier näher beschrieben werden.

4.2 Kennzeichnung körniger Stoffe

4.2.1 Korngröße und Form

Die Festlegung der Größe eines einfachen, geometrisch regelmäßig geformten Partikels, wie beispielsweise einer Kugel oder eines Würfels, erfolgt durch Angabe einer kennzeichnenden Abmessung wie Durchmesser oder Kantenlänge.

Die meisten Körner sind unregelmäßig geformt, so daß zur Kennzeichnung der Größe ein geeignetes Maß gefunden werden muß. Hierzu wird eine **physikalische Eigenschaft** des Partikels gemessen, die eindeutig auf die Korngröße schließen läßt. Als physikalische Größe, die man **Dispersitätsgröße** oder **Feinheitmerkmal** nennt, kann eine der folgenden Eigenschaften ermittelt werden:

- Ein **geometrisches Merkmal** (charakteristische Länge, Oberfläche, Projektionsfläche, Volumen).
- Die **Masse** des Partikels.
- Die **Sinkgeschwindigkeit** des Partikels in einem Fluid (Flüssigkeit oder Gas).
- Die **Intensität** von **Störungen** eines elektrischen oder magnetischen **Feldes**.

Eine häufige Methode zur Ermittlung der Größe von Feststoffpartikeln ist die **Siebung** oder **Siebanalyse**. Dispersitätsgröße ist hier die **Siebmaschenweite** d.h. die Größe der hohlen Flächen im Sieb, durch die ein Teilchen durchfällt oder zurückgehalten wird.

Bei Kugeln würden sich genaue Durchmesser ergeben, bei unregelmäßig geformten Partikeln spielt die Form der Teilchen eine Rolle.

Allgemein muß man bemerken, daß sich mit unterschiedlichen Meßverfahren am gleichen Partikel unterschiedliche Dispersitätsgrößen ergeben. Diese hängen demzufolge von dem Meßverfahren ab. Unterschiedlich ermittelte Dispersitätsgrößen können jedoch rechnerisch verglichen werden anhand von sogenannten **Formfaktoren**, auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll.

4.2.2 Korngrößenverteilung

Liegt ein System von vielen Feststoffpartikeln vor, so spricht man von einem **Haufwerk**. Die einzelnen Teilchen innerhalb dieses Haufwerks unterscheiden sich durch ihre Korngröße. Um das Haufwerk zu kennzeichnen, betrachtet man die Größe der einzelnen Körner und deren Schwankungen in sogenannten **Korngrößenverteilungen**. Diese charakterisieren das Haufwerk und lassen auf dessen Eigenschaften schließen. Korngrößenverteilungen werden allgemein graphisch dargestellt, wobei man zwischen **Dichteverteilungen** und **Summenverteilungen** unterscheidet.

○ Dichteverteilung

Dichteverteilungen eines Haufwerkes (Abb.4.2.2.1) zeigen, mit welcher Häufigkeit eine bestimmte Korngröße in dem Haufwerk vorhanden ist.

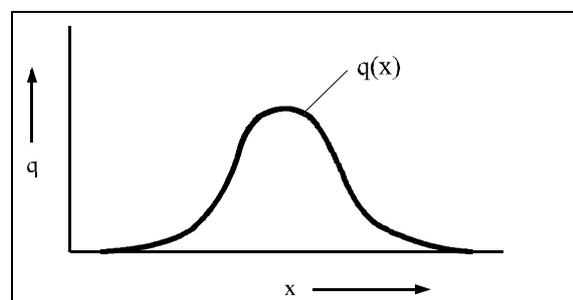


Abb.4.2.2.1: Dichteverteilung

Daraus ergibt sich demnach die Menge an Teilchen einer bestimmten Korngröße in einem Haufwerk.

Zum Erstellen einer Dichteverteilung wird die Korngröße x in mehrerer Intervalle oder Klassen Δx_i eingeteilt (Abb.4.2.2.2). Für jedes Intervall wird dann die Menge $\Delta \hat{Q}_i$ an Partikeln betrachtet, die diese Größe haben. Diese Teilmenge bezieht man auf die Gesamtmenge an Partikeln und berechnet die relative Kornmenge ΔQ_i in dem Intervall. Diese relative Kornmenge geteilt durch die Intervallbreite

ergibt die Mengenanteildichte Δq_i , die in einem Diagramm (Korngröße, Mengenanteildichte) als Rechteck über der Intervallbreite Δx_i aufgetragen wird. Betrachtet man für den **Mittelwert** von jedem Intervall die Mengenanteildichte Δq_i und **verbindet** diese Punkte miteinander, so erhält man die Dichteverteilung $q(x)$.

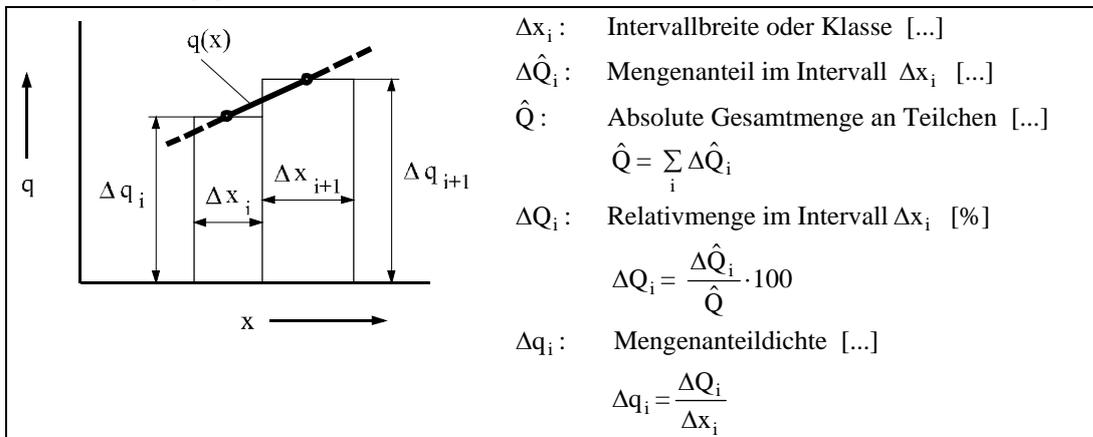


Abb.4.2.2.2: Konstruktion einer Dichteverteilung

Die gesamte Fläche unter der Dichteverteilung beträgt 100% (oder 1). Der relative Mengenanteil in einem differentiellen d.h. sehr kleinen Teilchenintervall dx beträgt:

$$dQ = dq(x) \cdot dx$$

Der Mengenanteil an Teilchen einer bestimmten Korngröße entspricht daher einer Fläche unterhalb der Dichteverteilung.

Der absolute Mengenanteil des Haufwerkes in der Klasse dx errechnet sich zu $d\hat{Q} = \frac{dQ \cdot \hat{Q}}{100}$

Die Menge wird am häufigsten als Anzahl oder als Masse gemessen. Man bezeichnet die entsprechenden Dichteverteilungen dann als **Anzahldichteverteilung** beziehungsweise als **Massendichteverteilung**.

○ Summenverteilung

Summenverteilungen eines Haufwerkes zeigen den Mengenanteil an Teilchen deren Korngröße zwischen dem kleinsten Wert und dem Wert liegt, für den man die Summenverteilung betrachtet.

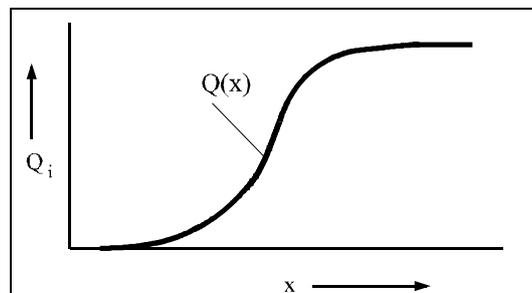


Abb.4.2.2.3: Summenverteilung

Bei der Summenverteilung wird die Korngröße x ebenfalls in mehrerer Intervalle Δx eingeteilt. Für die kleinste Klasse Δx_1 wird der relative Mengenanteil ΔQ_1 an Teilchen dieser Klasse als Rechteck in ein Diagramm (Korngröße, relative Mengenanteile) eingetragen. Bei dem nächsten Intervall Δx_2 trägt man als Mengenanteil die Summe der ersten beiden Klassen $\Delta Q_1 + \Delta Q_2$ auf. Für jede weitere Klasse trägt man jeweils die Summe aller relativen Mengenanteile aller Klassen (kleinerer Korngrößen) auf (Abb.4.2.2.4).

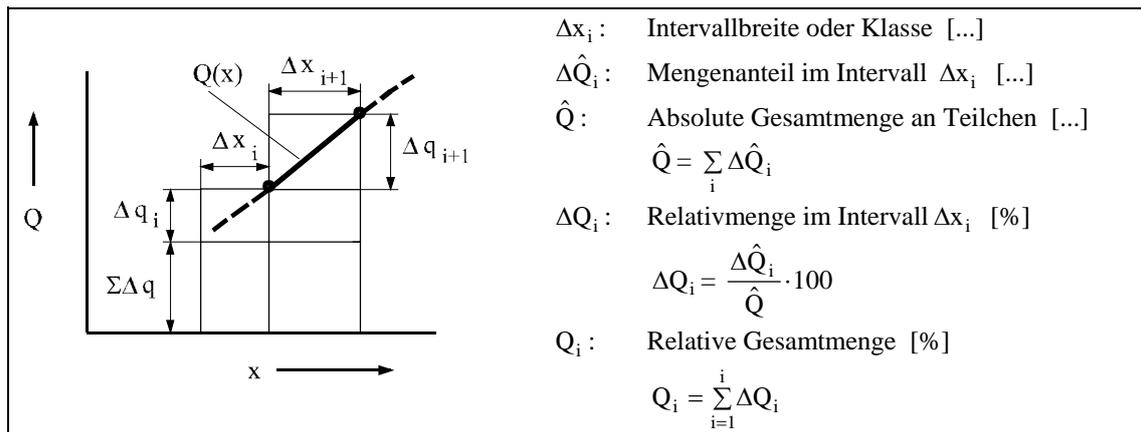


Abb.4.2.2.4: Erstellen einer Summenverteilung

Die Summenverteilung ist die Verbindungslinie aller eingezeichneten Rechtecke, wobei jeweils die **größten Werte jeder Klasse** (obere rechte Ecken) **verbunden** werden. Dies ist erforderlich, da alle Teilchen der Summenverteilung unterhalb und innerhalb dieses Intervalls kleiner als der größte Wert des Intervalls sind.

Der maximale Wert für die relativen Mengenanteile muß 100% (oder 1) betragen. Der Mengenanteil an Partikeln eines Haufwerkes, die kleiner als eine bestimmte Korngröße sind, läßt sich leicht ermitteln, indem man den Wert der Summenverteilung für die entsprechende Korngröße abliest.

Mathematisch errechnet sich der relative Mengenanteil unterhalb einer Größe x_j zu:

$$Q_i = \sum_{i=1}^i \Delta Q_i$$

Der absolute Mengenanteil des Haufwerkes an Teilchen kleiner x_j beträgt dann:

$$\hat{Q}_i = \frac{Q_i \cdot \hat{Q}}{100}$$

Technisch verwendet werden vor allem die Mengenarten Anzahl und Masse, so daß man hauptsächlich **Anzahlsummenverteilungen** und **Massensummenverteilungen** vorfindet.

Summenverteilungen werden allgemein mehr verwendet als Dichteverteilungen, da sie leichter zu erstellen und leichter abzulesen sind.

□ **Aufgabe:**

Ein Haufwerk bestehend aus Glaskugeln wurde mit einem Verfahren ausgemessen, das den Durchmesser der Kugeln mißt, die Anzahl der Kugeln mit ähnlichen Korngrößen zählt und in entsprechende Klassen einträgt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab.4.2.2.1 eingetragen. Berechne die fehlenden Werte und zeichne die Anzahldichteverteilung und die Anzahlsummenverteilung des Haufwerkes.

Kornklasse		Anzahl	Klasse	Mittelwert	Relative Anzahl	Relative Gesamtanzahl	Anzahlanteildichte
x_u	bis x_o	$\hat{\Delta Q}_i$	Δx_i	$x_u + \frac{\Delta x_i}{2}$	ΔQ_i	Q_i	Δq_i
[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[1/mm]
0	1	12					
1	2	33					
2	4	226					
4	6	653					
6	8	1029					
8	12	2325					
12	16	461					
16	20	61					
$\Sigma:$				$\Sigma:$		$\Sigma:$	

Tab.4.2.2.1: Ergebnisse einer Korngrößenanalyse

■ **Lösung:**

Kornklasse		Anzahl	Klasse	Mittelwert	Relative Anzahl	Relative Gesamtanzahl	Anzahlanteildichte
x_u	bis x_o	$\hat{\Delta Q}_i$	Δx_i	$x_u + \boxed{}$	ΔQ_i	Q_i	$\Delta q_i = \frac{\Delta Q_i}{\Delta x_i}$
[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[1/mm]
0	1	12					
1	2	33					
2	4	226					
4	6	653					
6	8	1029					
8	12	2325					
12	16	461					
16	20	61					
$\Sigma:$				$\Sigma:$		$\Sigma:$	

○ Kennzeichnende Größen

Häufig reicht zur Kennzeichnung eines Haufwerks die Angabe von einem oder wenigen **Zahlenwerten** aus. Hierbei muß man zwischen **Lageparametern** und **Streuungsparametern** unterscheiden.

Lageparameter geben an, in welchen Korngrößenbereich die Partikel eines Haufwerkes sich hauptsächlich befinden, wo die Teilchengröße "liegt".

Neben der kleinsten und der größten Korngröße interessieren vor allem **mittlere Maße**, wobei man unter anderem zwischen **Modalwert** und **Medianwert** unterscheidet.

- Der **Modalwert** x_h ist die **häufigste Teilchengröße**. In der Dichteverteilung $q(x)$ (Abb.4.2.2.7) ist es die Korngröße, die dem Maximum der Kurve entspricht. In der Summenverteilung $Q(x)$ (Abb.4.2.2.8) erkennt man den Modalwert am Wendepunkt der Kurve.

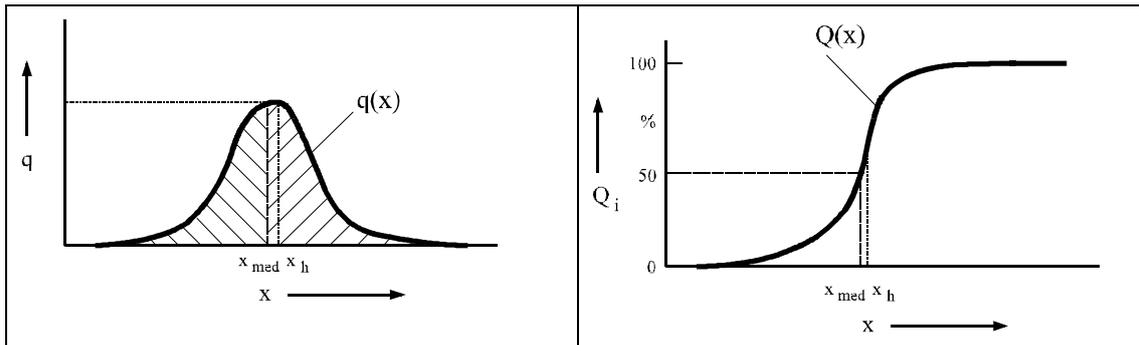


Abb.4.2.2.7: Modal- und Medianwert in der Dichteverteilung

Abb.4.2.2.8: Modal- und Medianwert in der Summenverteilung

- Der **Medianwert** x_{med} oder die **Halbwertkorngröße** ist die Teilchengröße, die die Fläche unterhalb der Dichteverteilung $q(x)$ (Abb.4.2.2.7) in zwei gleich große Flächen unterteilt. In der Summenverteilung $Q(x)$ (Abb.4.2.2.8) entspricht der Medianwert der Korngröße, für die die relative Gesamtmenge Q_i gleich 50% ist.

Der Modalwert x_h und der Medianwert x_{med} haben normalerweise unterschiedliche Zahlenwerte.

Daneben gibt es noch weitere mittlere Maße wie beispielsweise **arithmetische** oder **gewogene mittlere Partikelgröße**, denen alle schwierigere mathematische Berechnungen (Integrationen der Verteilungsfunktionen) zugrunde liegen. Auf diese soll hier nicht eingegangen werden.

Alle Korngrößen eines Haufwerks schwanken um solche Mittelwerte. Häufig reicht die Angabe eines Lageparameters aus, um die Korngrößenverteilung eines Haufwerkes ausreichend zu beschreiben.

Soll ein Haufwerk genauer beschrieben werden, bedarf es zusätzlich einem zweiten Zahlenwert, einem **Streuungsparameter**.

Streuungsparameter sind ein Maß für die **Abweichungen** aller Korngrößen vom **Mittelwert**, sie beschreiben die **Breite** der Verteilung.

Streuungsparameter sagen etwas darüber aus, wie nahe kleinste und größte Partikel am Mittelwert liegen. Sind alle Partikelgrößen eng beieinander, ist der Streuungsparameter klein. Dann ist der Verlauf der Summenverteilung steil und die Dichteverteilung hat eine schmale und hohe Spitze.

Bei breiten Verteilungen d.h. wenn kleinste und größte Partikel weit auseinander liegen, ist der Streuungsparameter groß. Die Summenverteilung verläuft dann sehr flach und die Dichteverteilung ist sehr breit und niedrig.

Die Streuungsparameter sind häufig Relativmaße, die mathematische Funktionen wie **Varianz** oder **Standardabweichung** und ein mittleres Maß berücksichtigen. Auf deren Berechnung soll hier nicht eingegangen werden.

□ Aufgabe:

Ermittle den Modalwert und den Medianwert der Verteilung aus der Aufgabe Seite IV.6.

■ Lösung:

4.3 Trennen von Fest-Fest-Gemischen

Zum Trennen von körnigen Haufwerken, sogenannten **Schüttgütern**, müssen die einzelnen Partikel sich durch mindestens ein **Partikelmerkmal** unterscheiden. Ist dies die **Größe**, so spricht man von **Klassieren**. Handelt es sich um **andere stoffliche Merkmale** d.h. um beliebige **chemische oder physikalische Eigenschaften**, so spricht man von **Sortieren**.

4.3.1 Klassieren

Klassieren bedeutet Trennen eines körnigen Haufwerkes in mindestens zwei Klassen aufgrund unterschiedlicher **Teilchengrößen**.

Klassieren kann aus folgenden Gründen erforderlich sein:

- man braucht die Teilchengrößenverteilung eines Haufwerkes
- das Produkt muß in einem vorgeschriebenem Teilchengrößenbereich liegen
- der feinere Anteil muß abgetrennt werden, beispielsweise um den Wirkungsgrad nachfolgender Zerkleinerungsapparate zu erhöhen.

Kennzeichnend für eine Klassierung sind die **Trenngrenze** und **Trennschärfe**.

Die **Trenngrenze** ist die **Teilchengröße**, bei der die Trennung zwischen zwei Klassen erfolgt. Die Stoffmenge, deren Teilchen größer als die Trenngrenze ist, bezeichnet man als **Grobgut**, die kleineren Teilchen als **Feingut**.

Die **Trennschärfe** sagt etwas über die Genauigkeit des Trennvorganges aus. Sie ist ein Maß für die **Güte der Trennung** d.h. sie besagt, wieviele Teilchen, die theoretisch dem Grobgut angehören, ins Feingut gelangt sind, und umgekehrt.

○ Siebklassieren

Beim Siebklassieren gelangt das Siebgut auf ein Sieb, durch das die feinen Teilchen durchfallen. Die Maschenweite des Siebes legt die Trenngrenze fest.

Siebklassieren ist ein sehr häufig verwendetes Trennverfahren. Es liefert von allen Klassierverfahren die beste Trennschärfe. Je nach Bauweise können die Apparate kontinuierlich oder diskontinuierlich betrieben werden. Eine Auftrennung des Aufgabegutes in mehr als zwei Fraktionen ist möglich wenn mehrere Siebe verwendet werden. Bei Trockensiebungen können Haufwerke mit einer Trenngrenze bis zu ca 50 µm getrennt werden.

Besonders bei feinkörnigen Haufwerken verstopfen die Siebmaschen relativ schnell. Dies verlangsamt die Trennung da weniger Löcher für den weiteren Durchgang zur Verfügung stehen. Desweiteren neigen feine Teilchen zum Agglomerieren da die Haftkräfte zwischen den Teilchen groß sind. Diese können sogenannte Brücken bilden und die Maschen verstopfen, außerdem kommt es zu einer Verfälschung des Trennvorganges da die Agglomerate später wieder zerfallen können. Um Verstopfungen und Agglomeratbildungen zu vermeiden, verwendet man unterschiedliche **Siebhilfen**:

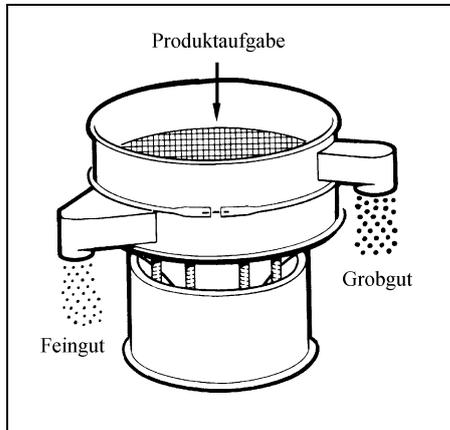
- **Bürsten**: Unterhalb des Siebes bewegen sich periodisch Bürsten durch das Sieb und drücken die eingeklemmten Teilchen aus den Maschen.
- **Ballklopfreinigung**: Spezialgummibälle oder -würfel springen von unten gegen das Sieb.
- **Trennmittel**: Durch Zugabe von kleinen Mengen an extrem feinen Stoffen (z.B. hochdisperse Kieselsäure) können manchmal die Haftkräfte zwischen den Partikeln verringert werden.
- **Luftstrahlsiebung**: Ein scharfer Luftstrahl (bis zu 120 m/s) bläst von unten durch das Sieb.
- **Naßsiebung**: Durch Besprühen des Siebes mit Wasser oder durch Spülen des Haufwerkes (Herstellen einer Suspension) werden bei schwierigen Gütern die Haftkräfte überwunden und der Feinanteil wird durch die Siebmaschinen geführt.

Neben der Trenngröße ist eine wichtige Kenngröße von Siebmaschinen der **Siebgutstrom**. Dies ist die Masse an Siebgut, die pro Zeit getrennt werden kann. Großmaschinen verarbeiten bis zu 1000 t/h mit Siebflächen von bis zu 60 m².

Häufig wird als Kenngröße auch der **spezifische Siebgutstrom** verwendet d.h. der Siebgutstrom pro Fläche.

- Schwingsiebmaschinen

Diese Siebvorrichtungen findet man am häufigsten. Das Sieb wird in seinem Rahmen durch Unwuchtmotoren oder Magnetvibratoren in Schwingungen gebracht. Die verschiedenen Bauformen unterscheiden sich durch die Bewegungen des Siebes, die linear, kreisend oder ellipsenförmig sein kann. Eine eventuelle Schrägstellung des Siebes beeinflusst zusätzlich die Bewegungen des Siebgutes. Kontinuierlich arbeitende Schwingsiebmaschinen haben meistens geneigte Siebe, damit das Siebgut bewegt wird.



Zum Betrieb kann man allgemein festhalten daß bei der Siebung von feinen Partikeln hohe Frequenzen und kleine Amplituden gewählt werden sollten, da eine kleine Bewegung der Teilchen ausreicht.

Bei groben Gütern hingegen ist eine große Transportgeschwindigkeit vorteilhaft, die man durch Schwingungen kleiner Frequenz und hoher Amplitude erzielt.

Abb.4.3.1.1: Schwingsiebmaschine

- Taumelsiebmaschinen

Mehrere zylindrische Siebrahmen, die übereinander angeordnet sind, werden in eine schwingende und gleichzeitig taumelnde Bewegung versetzt. Taumelsiebe sind sehr anpassungsfähig an unterschiedliche Siebgüter, da sie leicht demontierbar sind und mit Sieben verschieden großer Maschenweite zusammengebaut werden können.

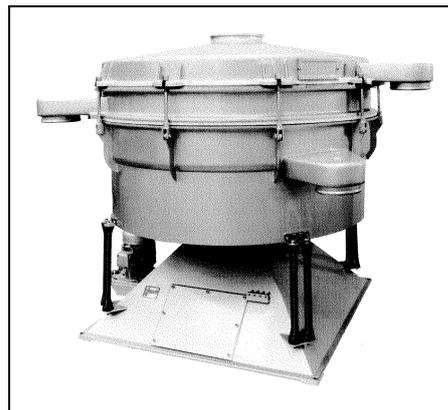


Abb.4.3.2.2: Taumelsiebmaschine

- Mehrdecksiebmaschinen

Diese Sonderart der Schwingsiebmaschinen ermöglicht es schwierige Güter zu trennen. Diese werden durch mehrere Siebe getrennt wobei am Ende der Trennvorgänge nur zwei oder drei Fraktionen entnommen werden. Hierbei wird der Grobgutanteil von allen Sieben zusammengeführt, so daß man eine sehr hohe Trennschärfe erzielt.

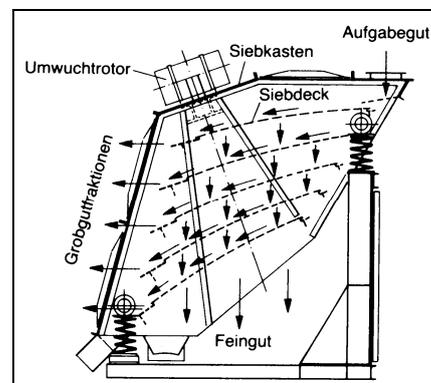


Abb.4.3.2.3: Mehrecksiebmaschine

- Trommelsiebmaschinen

Das eigentliche Sieb ist der Mantel eines horizontal leicht geneigten Zylinders. Durch die Drehbewegung der Trommel bewegt sich das Gut hindurch und wird getrennt. Dabei kann das Siebgut durch den Einsatz unterschiedlicher Siebmaschenweiten in mehrere Fraktionen aufgeteilt werden.

○ Sichten

Beim **Sichten** oder **Windsichten** wird das Sichtgut einem Luftstrom zugeführt, wobei die feinen Partikel der Luftströmung folgen können und die groben nicht. Das Unterscheidungsmerkmal der Teilchen ist somit die **Sinkgeschwindigkeit** der Partikel im Luftstrom, die für Teilchen aus gleichem Stoff von der Größe und der Form der Partikel abhängt.

Sichter werden ebenfalls zum Trennen verschiedener Stoffe verwendet, siehe hierzu den Abschnitt 4.3.2 Sortieren.

Alle Sichter bestehen aus einem **Sichtraum**, in dem die Trennung stattfindet, einem **Abscheider** oder **Entstauber**, um den abgetrennten Feinanteil von der Luftströmung zu trennen und einem **Ventilator** zur Erzeugung der Luftströmung. Bei manchen Sichtern kann das Siebgut auch im Luftstrom verteilt in den Apparat strömen, beispielsweise bei einer pneumatischen Förderung.

Die Sichtluft kann im Kreislauf geführt werden (**Umluftsichter**) oder es wird permanent frische Luft angesaugt (**Durchflußsichter**), die nach der Abscheidung des Feinanteils austritt.

Man unterscheidet Windsichter nach den Kräften, die auf die einzelnen Partikel wirken, in **Schwerkraftsichter** und **Fliehkraftsichter** oder **Zentrifugalsichter**, bei denen Zentrifugalkräfte auftreten. Die Fliehkraftsichter unterteilt man in **Spiralwindsichter** und **Streusichter**, bei denen die Partikel von kreisend strömender Luft getrennt werden, und **Abweisradsichter**, in denen das Siebgut über rotierende Einbauten in die Luftströmung verteilt wird.

Desweiteren werden Sichter nach der Strömungsrichtung der Luft unterschieden in **Gegenstrom-, Umlenk- und Querstromsichter**.

Viele in der Praxis gebaute Sichter sind nicht eindeutig in diese Kategorien einzuteilen. Oft werden Apparate entwickelt, in denen verschiedene Strömungsformen zu finden sind und mehrere Kräfte wirken.

Um eine gute Trennung zu ermöglichen, ist es wichtig die Trennbedingungen konstant zu halten, d.h. die Strömungsgeschwindigkeiten und Kräfte auf die Partikel dürfen sich nicht ändern. Das Sichtgut muß gleichmäßig in die Luftströmung verteilt werden, damit feine Partikel nicht an groben haften und mit diesen abgeschieden werden.

- Schwerkraftsichter

Bei den Schwerkraftsichtern fällt das Sichtgut entweder einem aufsteigenden Luftstrom entgegen (Abb.4.3.2.?), wobei die feinen Teilchen mit der Luft weiterströmen, oder die Luft strömt quer (Abb.4.3.2.?) zu den Feststoffpartikeln und bewegt diese je nach Masse mehr oder weniger mit.

Eine hohe Trennschärfe wird in sogenannten Zickzacksichtern (Abb.4.3.2.?) erzielt, da in jedem Abschnitt Verwirbelungen der Luft auftreten, so daß die Partikel nahe der Trenngrenze öfters einer Trennung unterworfen werden. Je weiter nach unten man sich von der Aufgabestelle entfernt, desto weniger Feinanteil ist im Grobgut, und umgekehrt nach oben.

Ein Beispiel für Schwerkraftsichter ist der Steigsichter in Abb.4.3.2.?

- Spiralwindsichter

Spiral (wind) sichter gehören der Gruppe der Fliehkraft- oder Zentrifugalkraftsichter an, mit denen die besten Trennschärfen erreicht werden. Das Sichtgut wird in einen Luftstrom dosiert, der einen zylindrischen Sichtraum spiralförmig von außen nach innen durchbläst. Die groben Feststoffpartikel können den Umlenkungen der Strömung nicht folgen und werden an der Außenwand abgeschieden, die feinen werden nach innen mitgerissen. Verstellbare Leitschaufeln im Sichtraum (wie in Abb.4.3.2.?) können die Trenngröße verändern, da sich die Strömungsverhältnisse ändern. Bei dieser Bauart bewegt das Grobgut sich an der Außenwand entlang, sammelt sich an einer Stelle und wird ausgetragen (mit einer Schnecke).

- Abweiradsichter und Streusichter

Abweiradsichter und Streusichter sind ebenfalls Fliehkraftsichter und erzielen somit ebenfalls gute Trennschärfen, insbesondere bei feinen Sichtgütern. Die Apparate haben rotierende Einbauten, entweder ein Sichtrad oder einen Streuteller.

Sichträder in Abweiradsichtern (Abb.4.3.2.?) erzeugen durch ihre Drehbewegung eine Wirbelströmung, in der vorbeigeführtes Sichtgut entweder der Strömung folgen kann oder -bei zu großen Teilchen- aufgrund seiner Trägheit abgeschieden wird.

Rotierende Streuteller in Streusichtern (Abb.4.3.2.?) dispergieren das Sichtgut in eine Luftströmung, wobei wiederum die feinen Partikel mitgerissen werden, während die Teilchen mit höherer Zentrifugalggeschwindigkeit die Strömung durchqueren können.

- Umlenksichter

Eine Sonderart von Zentrifugalsichtern sind Umlenksichter, bei denen Partikel durch starke Umlenkung der Luftströmung dieser nicht folgen können und abgeschieden werden. Die Umlenkung kann konstruktiv unterschiedlich ausgeführt werden, beispielsweise durch eine Prallplatte wie in (Abb.4.3.2.?). Umlenksichter werden häufig am Ende einer pneumatischen Förderstrecke eingesetzt, um störendes Feingut (z.B. Abrieb) abzutrennen.

○ Stromklassieren oder Hydroklassieren

Für feine Teilchen werden als Trennhilfen auch Flüssigkeiten verwendet, wobei meistens Wasser eingesetzt wird. Trenngröße ist hier die **Sedimentationsgeschwindigkeit** oder **Sinkgeschwindigkeit** in der Flüssigkeit. Bei Partikeln aus gleichem Stoff ist diese von der Form und Größe der Teilchen abhängig.

Die Apparate zum Stromklassieren sind ähnlich aufgebaut wie die Windsichter. Man unterscheidet auch hier **Schwerkraft-** und **Fliehkraftsichter**, wobei man die Schwerkraftklassierer noch nach der Strömungsrichtung in **Horizontalstrom-** und **Aufstrom-** oder **Vertikalstromklassierer** unterteilt.

- Horizontalstromklassierer

Bei diesen Schwerkraftklassierern unterscheidet man zwischen Geräten ohne und Geräte mit bewegten Teilchen. In nicht bewegten Geräten durchströmt eine Suspension den Schwerkraftklassierer, wobei die feinen Teilchen in Schwebelage bleiben und der Strömung folgen, während die groben Teilchen früher den Apparat verlassen. Eine typische Bauform ist der Spitzkasten (Abb.4.3.1.), der die Partikel in mehrere Kornklassen aufteilt.

Bewegte Geräte fördern das abgeschiedene Grobgut mit bewegten Einbauten aus der Suspension. Im Rechenklassierer (Abb.4.3.1.) beispielsweise fließt das Feingut über den Rand des Behälters, während das Grobgut mit Hilfe eines über den Boden kratzenden Rechens entnommen wird. Rechenklassierer werden häufig in der Erzaufbereitung verwendet.

- Aufstromklassierer oder Vertikalklassierer

Im Aufstromklassierer strömt das Wasser den Teilchen entgegen, so daß die Sedimentationsgeschwindigkeit verringert wird. Einfache Apparate bestehen aus einem Trennraum, während aufwendigere Klassierer aus mehreren Kammern aufgebaut sind. In diesen liegen unterschiedliche Aufströmgeschwindigkeiten vor, so daß mehrere Fraktionen verschiedener Korngröße abgeschieden werden.

- Fliehkraftklassierer

Die wichtigste Bauform von Fliehkraftklassierern ist der Hydrozyklon (Abb.4.3.1.). Die Suspension strömt tangential in einen zylindrischen Behälter, der nach unten in einen Konus übergeht und in dessen Mittelachse ein Rohr eingebaut ist, durch das die Flüssigkeit den Behälter verläßt. Die groben Teilchen können der spiralförmigen Strömung nicht folgen, die nach unten immer größere Zentrifugalkomponenten aufweist (da der Durchmesser kleiner und die Strömung stark abgelenkt wird beim Eintritt in das Ausströmrohr). Die feinen Teilchen verlassen den Hydrozyklon mit der Strömung.

4.3.2 Sortieren

Sortieren bedeutet Trennen eines körnigen Haufwerkes dessen Partikel sich durch andere stoffliche Merkmale (chemische oder physikalische Eigenschaften) unterscheiden als die Größe.

Man unterscheidet dabei zwischen Absetzen, Flotieren, Magnetsortieren und Elektrosortieren.

- Dichtesortieren

Zum Trennen von Teilchen unterschiedlicher Dichte in einem Haufwerk kann naß oder trocken sortiert werden. Das Fluid wird meistens in pulsierenden Stößen aufgegeben, wobei die meisten Apparate die Schwerkraft zum Trennen ausnutzen. Durch bewegte Einbauten wird die Trennung sicher gestellt.

Beim Naßsortieren wird häufig eine Flüssigkeit benötigt, deren Dichte zwischen den Dichten der zu trennenden Teilchen liegt. Hierzu werden Suspensionen von sehr fein gemahlenden, schweren Feststoffen in Wasser hergestellt. Die Sinkgeschwindigkeit dieser feinen Teilchen muß klein sein im Vergleich zu den Bewegungen des aufgegebenen Gutes, die Suspension verhält sich wie eine homogene Flüssigkeit.

- Magnetsortieren

Leicht magnetisierbare Feststoffe werden mit Elektromagneten aus einem Gemenge von Teilchen gezogen.

- Elektrosortieren

Beim Elektrosortieren wird ein Haufwerk in elektrisch leitende und nichtleitende Partikel getrennt. Bei diesem recht neuen Verfahren werden die Partikel in einem Hochspannungsfeld aufgeladen und dadurch von der Behälterwand als positivem Pol angezogen. Sie geben dort ihre Ladung ab, bleiben nicht mehr haften und werden entfernt.

- Flotieren

Flotieren bedeutet Sortieren von Stoffteilchen die von einer Flüssigkeit unterschiedlich stark benetzt werden. Beim Flotieren wird eine Suspension aus Wasser, Chemikalien und dem zu trennenden Schüttgut. Die Chemikalien werden so gewählt, daß ein Anteil der Feststoffteilchen schwer benetzbar wird d.h. die Partikel reagieren wasserabweisend (Hydrophob). Von unten steigen Luftblasen auf, von denen diese wasserabweisenden Teilchen mitgerissen werden.

An der Oberfläche sammelt sich dann ein Schaum, der die hydrphoben Teilchen des Schüttgutes enthält. Die hydrophylen Teilchen setzen sich in der Suspension ab und werden mit anderen Trennverfahren vom Wasser gewonnen.

Die Flotation ist das wichtigste Trennverfahren bei der Erzaufbereitung. Die meisten Mineralien (Kupfer, Blei, Zink) werden so getrennt, wobei durch die Auswahl geeigneter Flotationsmittel die einzelnen Mineralstoffe nacheinander abgeschieden werden. Man spricht von selektiver Flotation. Auch bei der Steinkohlaufbereitung kommen Flotationsverfahren zum Einsatz, um Kohle und Gestein zu trennen.

4.4 Gasreinigen (Entstauben)

Unter **Gasreinigen** oder **Entstauben** versteht man das Trennen von **festen** oder **flüssigen** Teilchen aus einem **Gasstrom**.

Gasreinigen ist entweder erforderlich um ein reines Gas (als Produkt oder Abgas) zu erhalten oder um die festen bzw. flüssigen Partikel aus einem Gasstrom zu gewinnen. Die beladene Luft die entstaubt werden soll bezeichnet man allgemein als **Rohgas**, die gereinigte Luft als **Reingas**. Dem ist jedoch anzumerken, daß dieses Reingas normalerweise nicht vollkommen "rein" ist: Gasreinigen ist immer ein Trennverfahren, d.h. es befindet sich meistens Feingut im Reingas. Bei vielen Stoffen sind es gerade diese sehr feine Teilchen, die besonders gefährlich sind. Sie sind "lungengängig", werden von den Filtern des Menschen nicht zurück gehalten und können sehr gesundheitsschädlich sein. So sind beispielsweise sehr feine Asbestpartikel (Fasern oder Staub) krebserregend, genauso der Staub des Zigarettenrauchs.

Deswegen müssen im Rahmen des Gesundheit- und des Umweltschutzes oft die giftigen, gesundheits- und umweltgefährdenden Partikel aus den Abgasen abgeschieden werden.

Hierbei müssen gesetzlichen Auflagen d.h. maximal erlaubten Mengen eingehalten werden. Betroffen sind neben festen und flüssigen auch gasförmige Schadstoffe. Dabei sind folgende Bezeichnungen wichtig:

- **Emission:** Gesamtheit an Schadstoffen, die aus einer Anlage ausgestoßen werden
- **Immission:** Gesamtheit an Schadstoffen in der Luft, gemessen an einer beliebigen Stelle. Die Immission setzt sich aus den Emissionen mehrerer Anlagen zusammen.

Für die einzelnen Schadstoffe sind nachfolgende Werte gesetzlich festgelegt:

- **MAK:** Maximale Arbeitsplatzkonzentration. Die maximale Konzentration an Schadstoffen in der Luft am Arbeitsplatz, z.B. in der Anlage oder neben einem Reaktor.
- **MIK:** Maximale Immissionskonzentration: Maximale Konzentration an Teilchen in der Luft an einem Ort, z.B. in einem Industriegebiet oder einem Wohngebiet.

Zur Funktionsweise der Gasreinigung ist zu sagen, daß grundsätzlich in jedem Entstauber die festen bzw. flüssigen Partikel andere Bahnen beschreiben müssen als die Gasströmung, damit sie abgetrennt werden können. Anschließend müssen die abgeschiedenen Teilchen aus dem Trennraum entfernt werden.

Je nach Art der Abscheidung unterteilt man die Apparate zum Gasreinigen in **Schwerkraft-, Umlenk-, Fliehkraft-, Naß-, Gewebe- und Elektroentstauber** oder **-abscheider**.

4.4.1 Schwerkraftentstauben

In Schwerkraftabscheidern bewegen die Partikel sich unter der Wirkung der Erdanziehungskraft einer Gasströmung **entgegen (Gegenstromsichter)** oder **quer** zu dieser (**Querstromsichter**).

Damit kleine Partikel abgeschieden werden können, müssen die **Gasgeschwindigkeiten** sehr **gering** sein. Dies führt zu sehr großvolumigen Apparaten. Schwerkraftentstauber werden daher hauptsächlich zur Vorabscheidung von groben Stäuben oder Flüssigkeitstropfen verwendet.

Typische Querstromabscheider sind Absetzgaszüge (Abb.4.4.1.1).

Aus der Geometrie und dem Gasvolumenstrom errechnet sich die Trennkorngröße. Je länger und niedriger der Apparat ist und desto geringer die Gasgeschwindigkeit ist, um so kleinere Teilchen werden abgeschieden.

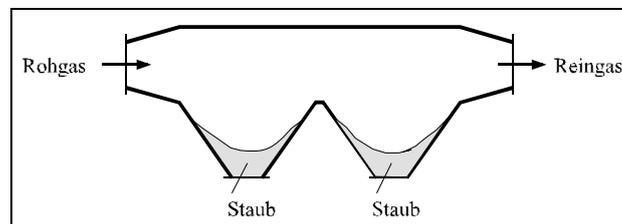


Abb.4.4.1.1: Absetzgaszug

Gleiches gilt für die Staubkammer (Abb.4.4.1.2), die in mehrere Horden unterteilt ist, um niedrigere Räume zu schaffen.

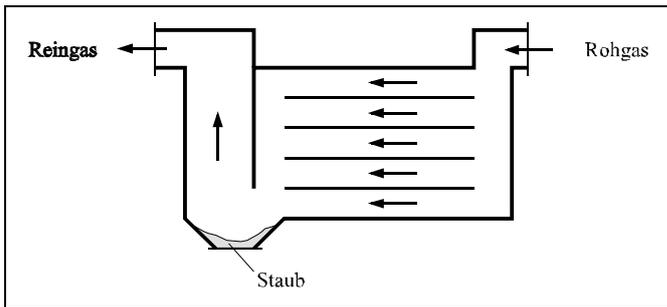


Abb.4.4.1.2: Staubkammer

Bei Gegenstromsichtern sind große Apparatedurchmesser erforderlich, damit kleine Teilchen abgeschieden werden können. Die hierzu erforderlichen geringen Strömungsgeschwindigkeiten werden nur durch große Behälterquerschnitte erreicht.

4.4.2 Umlenkentstauben

In Umlenkentstaubern (Abb.4.4.2.1) führen starke Umlenkungen der Gasströme dazu, daß die flüssigen oder festen Teilchen aufgrund ihrer Trägheit der Strömung nicht folgen können.

Neben der Fliehkraft wird in den Umlenkabscheidern fast immer auch die Schwerkraft ausgenutzt.

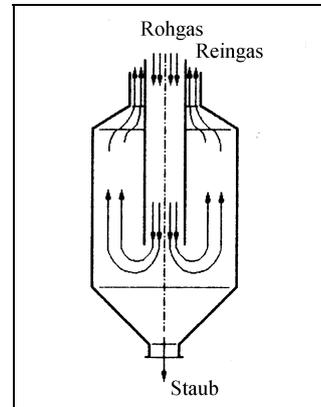
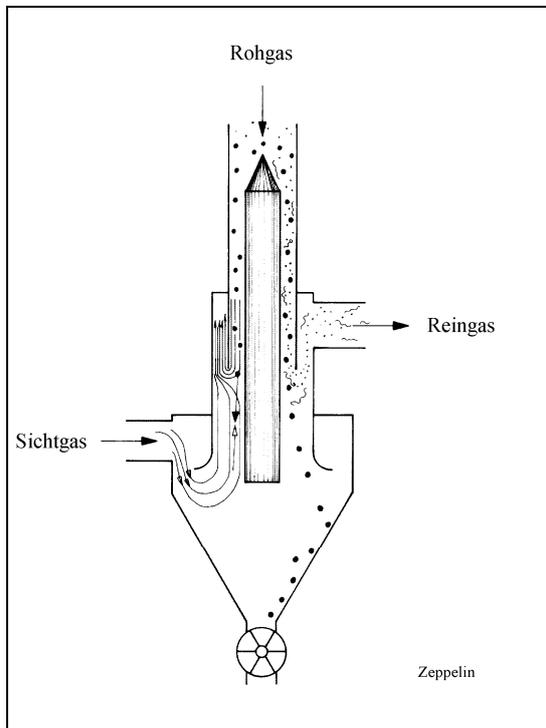


Abb.4.4.2.1: Umlenkentstauber



Die Umlenkentstauber werden meistens zur Vorabscheidung von groben Partikeln aus einem Gas verwendet, häufig vor der Zuführung in einen Abscheider mit höherem Wirkungsgrad, in dem feinere Teilchen abgeschieden werden können. Sie werden auch häufig am Ende einer pneumatischen Förderstrecke eingesetzt, um störendes Feingut (z.B. durch Abrieb in der Förderstrecke) abzutrennen.

In Abb.4.4.2.2 ist ein Umlenkabscheider dargestellt, der auf dem Dach eines Lagersilos installiert wird. Das pneumatisch geförderte Produkt wird abgeschieden und fällt über eine **Zellenradschleuse** in das Silo, der Abrieb (Staub, Fasern) wird als Feingut mit der Luft weiter gefördert (Reingas) und muß in einem weiteren Abscheider von der Luft abgetrennt werden.

Abb.4.4.2.2: Umlenkensichter

4.4.3 Fliehkraftentstauben

Die wichtigsten Fliehkraftabscheider sind Gaszyklone (zur Funktionsweise siehe Abschnitt 4.3.1), (Abb.4.4.3.1), die auch allgemein die **wichtigsten Gasabscheider** sind.

Ihre Vorteile gegenüber anderen Apparaten liegen in der **einfachen Bauweise** ohne bewegte Teile und dem sicheren, **wartungsfreien** Betrieb. Auch heiße Gase sowie Gase unter hohem Druck können gereinigt werden.

Sehr feine Teilchen können allerdings nicht abgetrennt werden. Häufig werden Zyklone deshalb als **Vorabscheider** vor anderen Abscheidern verwendet.

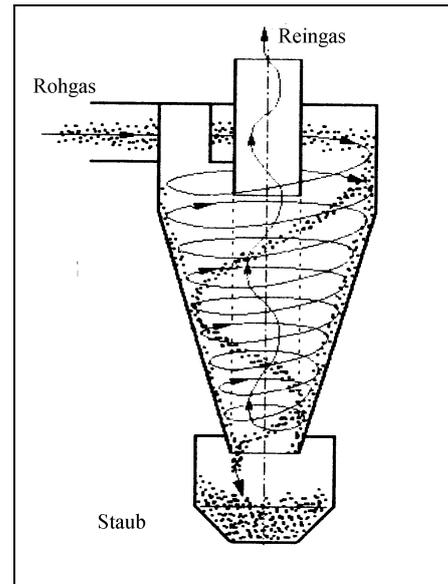


Abb.4.4.3.1: Gaszyklon

4.4.4 Naßentstauber

Bei der **Naßentstaubung** treffen die im Gasstrom verteilten **Partikel** auf eine **Flüssigkeit** und bleiben an dieser haften.

Als Flüssigkeit wird fast immer Wasser verwendet. Voraussetzung für die Abscheidung ist die **Benetzbarkeit** der Partikel mit Wasser d.h. die Teilchen müssen an der Wasseroberfläche haften bleiben. Die Benetzbarkeit des Wassers kann unter Umständen durch Zugabe geeigneter Stoffe verbessert (erhöht) werden.

Um eine möglichst große Oberfläche des Wassers zu haben, werden **Tropfen** hergestellt. Diese sind ungefähr 100 mal größer als die Partikel die abgeschieden werden sollen. Die Abscheidewirkung (Abb.4.4.4.1) erfolgt dadurch daß die Partikel im Gasstrom aufgrund ihrer **Trägheit** die Wassertropfen nicht umströmen können und auf diese prallen.

Mit **zunehmender Relativgeschwindigkeit** zwischen Gas (mit Partikeln) und Wassertropfen wird die **Abscheidung verbessert**.

Naßabscheider können je nach Bauweise kleinste Partikel zwischen 0.1 und 2 mm (**Trennkorngröße**) abscheiden, d.h. sie sind auch zur **Feinstentstaubung** geeignet.

Neben der Trennkorngröße ist der **Abscheidegrad** des Naßentstaubers von Bedeutung d.h. der Anteil an abgeschiedenen Partikeln bezogen auf die Gesamtmenge an Partikeln im Gasstrom. Dieser liegt bei Naßentstaubern allgemein recht hoch.

Aufgrund dieser Eigenschaften werden Naßentstauber häufig nach der Trockenentstaubung eingesetzt, um einen Gasstrom quasi restlos zu reinigen.

Es ist zu beachten daß die abgeschiedenen Partikel sich anschließend im Wasser befinden und normalerweise noch aus diesem abgetrennt werden müssen. Insbesondere bei Schadstoffen die die Umwelt gefährden können muß beachtet werden, daß aus einem **Abluftproblem** kein **Abwasserproblem** wird.

Da die Abtrennung von **sehr feinen Teilchen** und das Erreichen von **hohen Abscheidegraden hohe Geschwindigkeiten** und **fein verteilte Flüssigkeitstropfen** (große Oberfläche) erfordern, haben Naßabscheider einen **hohen Energieverbrauch**.

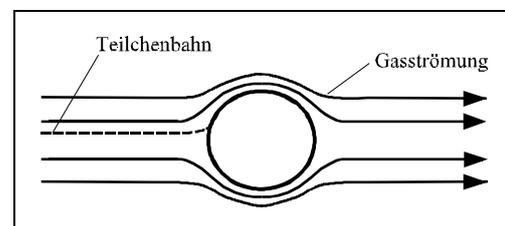


Abb.4.4.4.1: Abscheidung durch Trägheitseffekt

Eine Unterteilung der verschiedenen Naßabscheider erfolgt nach den Druckverlusten und dem Energieverbrauch in den Apparaten. Man unterscheidet dabei **Waschtürme**, **Strahlwäscher**, **Wirbelwäscher**, **Rotationszerstäuber** und **Venturi-Wäscher**. Abb.4.4.4.2 zeigt einen Überblick dieser Apparate mit ihren jeweiligen Eigenschaften.

Typ	Trennkorngröße [μm]	Abscheidegrad [%]	Wasser-Luft-Verh. [l/m^3]	Energieaufwand [$\text{kWh}/1000\text{m}^3$]
Waschturm	0.7 - 2	50 - 85	0.05 - 5	0.2 - 1.5
Strahlwäscher	0.6 - 0.9	90 - 98	5 - 20	1.2 - 3
Wirbelwäscher	0.6 - 1	90 - 95	3 - 6	1 - 2
Rotationszerstäuber	0.1 - 0.5	90 - 98	1 - 3 (je Stufe)	2 - 6
Venturi-Wäscher	0.05 - 0.4	96 - 98	0.5 - 6	1.5 - 6

Abb.4.4.4.2: Einteilung von Naßentstaubern

○ Waschtürme

In vertikalen Kolonnen oder Türmen wird die Waschflüssigkeit in Tropfen verteilt, die durch den aufsteigenden Gasstrom fallen (Abb.4.4.4.3).

Die Geschwindigkeitsunterschiede sind relativ gering und somit auch die Abscheidegrade. Da die Druckverluste gering sind ist der Energieaufwand insgesamt auch recht gering. Die Trennkorngröße liegt zwischen 0.7 und 2 μm und ist damit größer als bei den nachfolgenden Apparaten.

Die Abscheidung kann verbessert werden indem die Kolonne mit sogenannten **Füllkörpern** gefüllt wird. Dies sind kleine Stücke (z.B. kurze Zylinder) aus einem Metall oder Keramik, die als Haufwerk in der Kolonne liegen. Der Gasstrom muß zwischen den Hohlräumen hindurch strömen und die Flüssigkeit hindurch tropfen oder rieseln. Der Kontakt zwischen den beiden Stoffströmen wird dadurch verbessert.

Durch die Füllkörperschüttung steigt der Energieverbrauch allerdings an, außerdem ist die Schüttung empfindlich gegen Verstopfungen und Verkrusten.

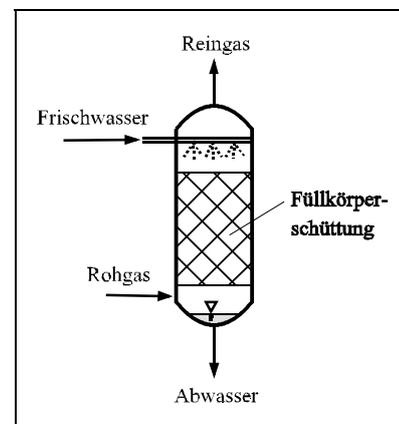


Abb.4.4.4.3: Waschturm

○ Strahlwäscher

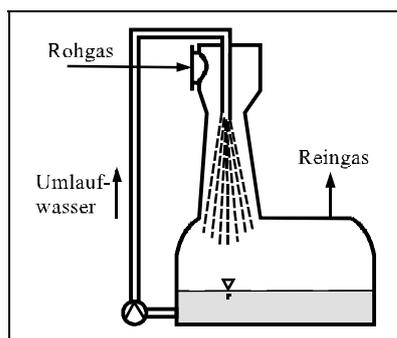


Abb.4.4.4.4: Wasserstrahlpumpe

Strahlwäscher (Abb.4.4.4.4) funktionieren nach dem Prinzip der **Wasserstrahlpumpe**: die Waschflüssigkeit wird mit Druck über eine Düse in den Apparat gespritzt. Der Wasserstrahl reißt das Gas um sich herum mit und erzeugt dadurch einen Unterdruck. Das Rohgas mit den Partikeln wird angesaugt.

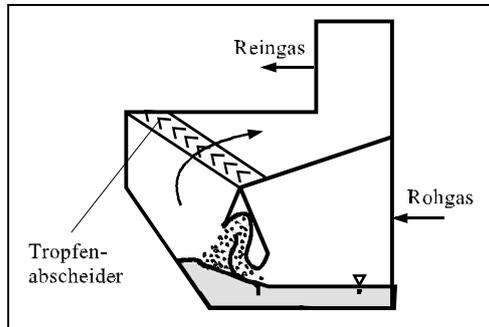
Der Wasserstrahl breitet sich aus und verteilt sich im Gas, die Partikel werden an den Tropfen abgeschieden.

Das Reingas verläßt den Apparat, die Flüssigkeit wird gesammelt und wiederum durch die Pumpe gepumpt. Die Flüssigkeit wird im geschlossenen Kreislauf geführt, der Schlamm wird kontinuierlich oder periodisch entnommen.

Die Abscheidegrade sind besser als bei Waschtürmen, auch können kleinere Partikel abgeschieden werden. Allerdings ist die benötigte Flüssigkeitsmenge im Verhältnis zur Luftmenge hoch, so daß relativ viel Energie zum Betreiben der Pumpe benötigt wird. Vorteilhaft bei dem Apparat ist daß neben der Abscheidung von Partikeln auch Bestandteile des Gases ausgewaschen werden können.

○ Wirbelwäscher

Beim Wirbelwäscher (Abb.4.4.4.5) wird der Gasstrom über eine Wasseroberfläche geblasen, wirbelt diese auf und reißt Tropfen auf seinem Weg durch eine Verengung (Kanal) mit. Eine erste Abscheidung findet beim Auftreffen des Gasstromes auf das Wasser statt. Hauptsächlich werden die Partikel dann im Kanal und direkt dahinter an das Wasser gebunden.



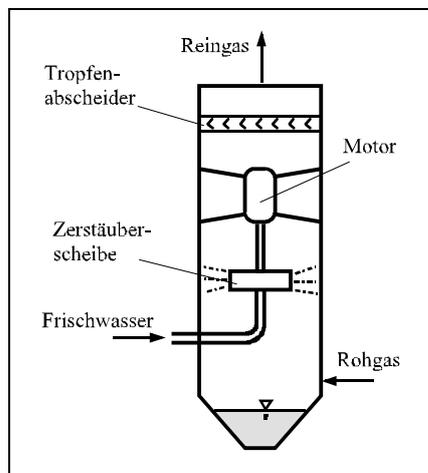
Die Apparate sind gekennzeichnet durch ihre einfache Bauweise ohne bewegte Teile und den wartungsfreien Betrieb (kaum Verstopfungen). Trennkorngröße und Abscheidegrad sind ähnlich wie beim Strahlwäscher, der Wasserverbrauch ist geringer. Das Wasser bleibt immer im Apparat, nur der abgesetzte Schlamm muß entfernt werden.

Abb.4.4.4.5: Wirbelwäscher

Ein Nachteil des Wirbelwäschers liegt darin daß die Funktionsweise des Apparates von dem Volumenstrom des Gases abhängt: bei zu geringem Durchsatz ist die Geschwindigkeit zu klein und die Wassertropfen werden nicht mitgerissen. Bei zu hohem Durchsatz wird die Wasseroberfläche so stark herab gedrückt, daß zu wenig Wasser mitgerissen wird.

○ Rotationszerstäuber

In Rotationszerstäubern (Abb.4.4.4.6) wird die Flüssigkeit über drehende Einbauten (meistens eine Scheibe) in Tropfen dispergiert, die sich normalerweise quer zur Gasströmung bewegen. Die Partikel aus dem Gas bleiben an den Flüssigkeitstropfen hängen, die Tropfen fließen an der Gehäusewand herab und sammeln sich in einem Abscheideraum.



Die Tropfengrößenverteilung kann an den Gasdurchsatz und die Beladung des Gases d.h. die Anzahl der Partikel im Gas angepaßt werden. Flüssigkeitsmenge und Drehzahl der rotierenden Einbauten bestimmen die Anzahl und Größe der Tropfen. Der Druckverlust des Gases ist gering, da zusätzlich jedoch viel Energie zum Zerstäuben der Flüssigkeit erforderlich ist liegt der Energiebedarf insgesamt relativ hoch, besonders wenn hohe Abscheidegrade gefordert sind. Hierzu gibt es Bauformen mit zwei drehenden Scheiben, in denen auch sehr kleine Trennkorngrößen von bis zu 0.1 µm abgeschieden werden.

Insgesamt sind die Apparate aufwendig gebaut, was vor allem durch die bewegten Teile bedingt ist.

Abb.4.4.4.6: Rotationszerstäuber

○ Venturi-Wäscher

Dem Venturi-Wäscher liegt die Venturi-Düse (Abb.4.4.4.7) zugrunde: im engeren Querschnitt einer Düse steigt die Gasgeschwindigkeit und der Druck sinkt (gegebenenfalls bis in den Unterdruckbereich). Dieser Zusammenhang ergibt sich aus der

Bernouilli-Gleichung: $p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konst.}$

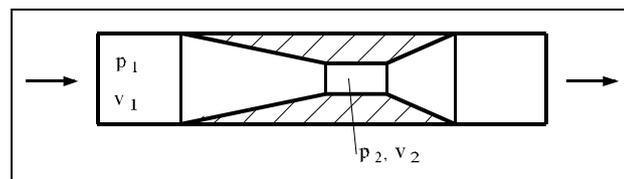
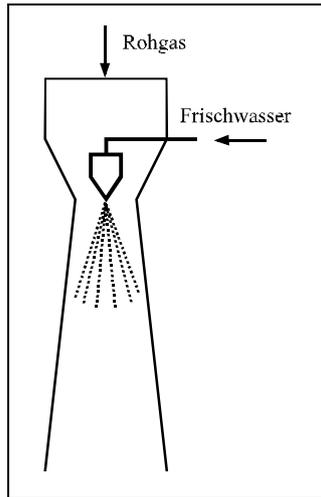


Abb.4.4.4.7: Venturi-Düse



An der engsten Stelle des Apparates, der wie eine Venturi-Düse gebaut ist, wird die Waschflüssigkeit in den Wäscher (Abb.4.4.4.8) gegeben. Sie wird angesaugt, von der Gasströmung mitgerissen und durch die hohen Scherkräfte der schnellen Gasströmung in Tropfen zerteilt. Diese vermischen sich intensiv mit dem Gasstrom. Die Partikel aus dem Gas bleiben an den Tropfen hängen und werden beispielsweise in einem dahinter geschalteten Hydrozyklon abgeschieden.

Der Apparat ist sehr **einfach gebaut** und somit kostengünstig herzustellen, er ist **unempfindlich** und braucht **wenig Platz**. Es können **sehr feine Partikel** (bis zu $0,05 \mu\text{m}$) abgeschieden werden, die ansonsten nur mit Gewebe- oder Elektrofilter abgetrennt werden können. Allerdings erfordern sehr kleine Partikel entsprechend große Gasgeschwindigkeiten, was große Druckdifferenzen und somit **hohe Betriebskosten** (Energieaufwand) bedeutet. Der Abscheidegrad ist allgemein sehr hoch.

Abb.4.4.4.8: Venturi-Wäscher

Aufgrund ihrer guten Eigenschaften finden Venturi-Wäscher **sehr weit verbreitet** Verwendung, wobei es verschiedene Bauformen gibt.

Da die Flüssigkeit durch die Gasströmung mitgerissen und zerstäubt wird, hängt die Güte der Trennung -ebenso wie beim Wirbelwäscher- von dem **gleichmäßigen Gasvolumenstrom** ab. Gegebenenfalls müssen Schwankungen durch Verstellmöglichkeiten des Düsenquerschnitts oder zusätzliches Ansaugen von Sekundärluft ausgeglichen werden.

4.4.5 Gewebeentsstauben

Bei der **Gewebeentsaubung** wird ein partikelhaltiger Gasstrom durch einen **porösen Filterstoff** geleitet, wobei die Partikel im Filter abgeschieden werden.

Die Abscheidung kann durch verschiedene Effekte erfolgen:

- **Sperrwirkung**: die Strömungsquerschnitte im Filterstoffes sind kleiner als die im Gasstrom geführten Partikel, so daß diese nicht passieren können.
- **Trägheitseffekte**: die Partikel können aufgrund ihrer Trägheit den Umlenkungen des Gasstromes durch die Hohlräume im Filter nicht folgen (besonders bei hohen Geschwindigkeiten).
- **Diffusionseffekt**: durch die Zufallsbewegungen sehr kleiner Partikel ($< 0,5 \mu\text{m}$) (Brown'sche Molekularbewegung) im Gasstrom treffen diese auf Filtermaterial und bleiben daran haften (nur bei sehr geringen Geschwindigkeiten ($< 0,25 \text{ m/s}$)).
- **Elektrostatische Anziehung**: das Filtermaterial oder die Partikel können elektrostatisch aufgeladen sein, so daß kleine Partikel ($< 5 \mu\text{m}$) haften bleiben können. Größere dagegen prallen eher ab oder werden bei höheren Gasgeschwindigkeiten mitgerissen.

Gewebefilter gelten als **Hochleistungsabscheider**, in denen **feine Partikel** bis $0,01 \mu\text{m}$ abgeschieden werden können. Ähnliche Trennkorngrößen werden nur mit Elektrofiltern oder einzelnen Naßentstaubern erzielt.

Die **Abscheidegrade** ($> 98 \%$) sind relativ **hoch** und entsprechen somit meistens den gesetzlichen Auflagen (Vorschriften). Deshalb werden Gewebeentstauber häufig als **Endabscheider** verwendet. Desweiteren kommen Gewebefilter zum Einsatz wenn die Partikel nicht benetzbar sind, nicht naß werden dürfen und aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften nicht elektrisch abgeschieden werden können.

Die Gewebefilter lassen sich nach Art des Filtrervorganges in **Speicherfilter** und **Abreinigungsfilter** unterteilen.

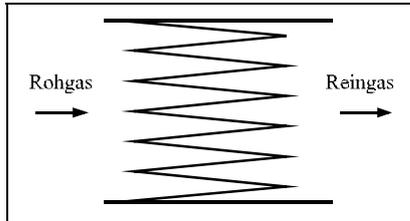
○ Speicherfilter

In Speicherfiltern erfolgt die Trennung durch eine sogenannte **Tiefenfiltration**. Das Rohgas strömt durch ein Filtermaterial, das aus **Gewebe** oder **Fasermatten** mit **hoher Porosität** (Anteil Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen, hier > 90%, z.T. > 99 %) besteht. Als Materialien werden Metallfasern, Glas, Wolle, Kunststoffe verwendet. Die Partikel im Gasstrom werden durch die bereits angeführten Effekte abgeschieden und bleiben im Filter hängen.

Speicherfilter eignen sich bei **niedrigen Partikelbelastungen** (einige mg/m^3 Gas) des Rohgases.

Trennkorngröße und **Abscheidegrad** hängen von dem **Durchmesser** der **Filterpartikel**

(ca 5 - 50 μm), der **Porosität** des Filtermaterials, der **Filterfläche** und der **Gasgeschwindigkeit** ab.



Durch Verwendung von sogenannten **Taschenfiltern** (Abb.4.4.5.1) wird die zur Verfügung stehende Filterfläche vergrößert.

Abb.4.4.5.1: Taschenfilter

Im Laufe der Betriebszeit scheiden sich immer mehr Partikel im Filter ab, so daß der Anteil an Hohlräumen abnimmt und der Druckverlust ansteigt. Der Filters wird dann unverwendbar und wird meistens **weggeworfen**.

Es gibt sehr unterschiedliche Größen und Formen, die in vielen verschiedenen Apparaten Verwendung finden beispielsweise in Spritz- und Lackierkabinen, in Fahrzeugfiltern, bei Küchenhauben und in Klimaanlage.

○ Abreinigungsfilter

Bei Abreinigungsfiltern findet eine **Oberflächenfiltration** statt. Die Porosität des Filters (70 - 90 %) ist geringer als bei den Speicherfiltern. Das Rohgas strömt hindurch und scheidet seine Partikel hauptsächlich an der Oberfläche des Filters ab. Es bildet sich ein sogenannter **Filterkuchen** d.h. eine Schicht aus abgeschiedenen Partikeln, die sich auf der Oberfläche des Filtermaterials sammeln und in der Folge die **eigentliche Filterschicht** darstellen.

Im Laufe der Zeit werden immer weitere Partikel abgeschieden und die Filterschicht wächst. Dadurch steigt der **Druckverlust** an, so daß das Filter **gereinigt** (Abb.4.4.5.2) werden muß. Dies erfolgt entweder periodisch oder bei Erreichen eines bestimmten Druckverlustes durch mechanisches **Klopfen** (oder Rütteln) oder durch einen **Luftdruckstoß** aus entgegengesetzter Richtung (wird in letzter Zeit häufiger verwendet).

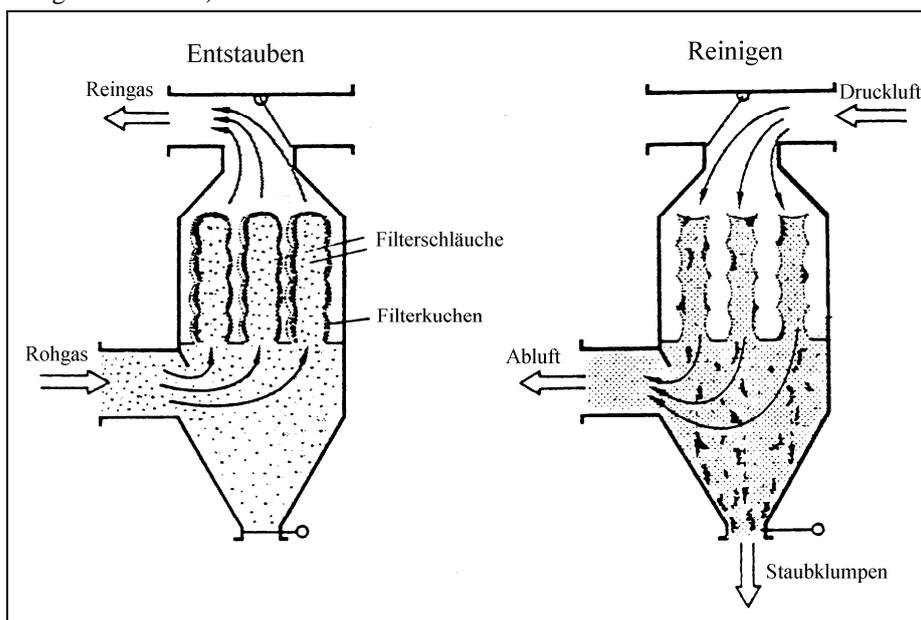


Abb.4.4.5.2: Entstauben und Reinigen eines Schlauchfilters

Abreinigungsfilter werden bei **hohen Partikelbelastungen** (bis ca 100 g/m^3) verwendet. Je nach Rohgasvolumenstrom und Partikelbelastung werden unterschiedlich große Filterflächen benötigt. Häufig bestehen die Apparate daher aus mehreren Kammern, die jeweils aus einer bestimmten Anzahl an einzelnen Filterflächen aufgebaut sind. Es wird ein **kontinuierlicher Betrieb** der Anlage ermöglicht indem mindestens zwei Kammern abwechselnd durchströmt und gereinigt werden.

Bei den Bauformen von Abreinigungsfilter unterscheidet man zwischen **Flächenfiltern** und **Schlauchfiltern**. Flächenfilter bestehen aus mehreren plattenförmigen, senkrecht stehenden Filterelementen, die von außen nach innen von Rohgas durchströmt werden. Bei den Schlauchfiltern (Abb.4.4.5.2) hat das Filtertuch eine Schlauchform, die meistens von innen nach außen durchströmt wird.

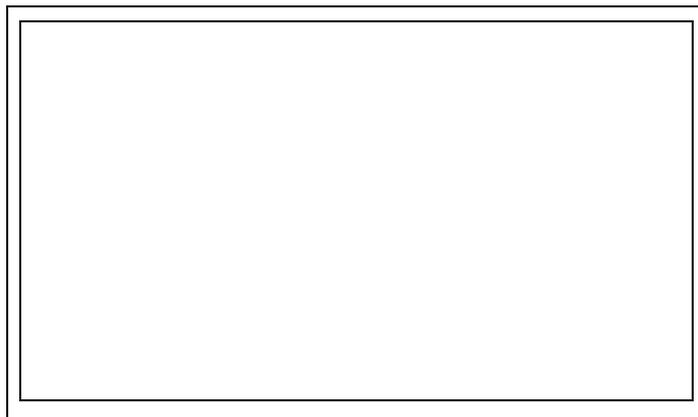
Als Filtermaterialien werden **Gewebe** und **Faserstoffe** aus Synthefasern (z.B. Polyamid, Polyester) und **gesinterte Lamellen** aus Kunststoffen verwendet. Die Oberflächen sind z.T. beschichtet um eine Tiefenfiltration zu verhindern und das Trennen des Filterkuchens vom Filter zu erleichtern.

Abreinigungsfilter werden vielseitig bei Entstaubungsaufgaben in allen Industriezweigen eingesetzt: in der Baustoff-, Metall-, chemischen, keramischen und Lebensmittel-Industrie.

4.4.5 Elektroabscheiden

In **Elektroabscheidern** werden Partikel elektrostatisch aufgeladen und in einem Hochspannungsfeld von einer Elektrode angezogen und abgeschieden.

Der Elektroabscheider, auch **Elektrofilter** genannt, besteht im einfachsten Fall aus einem Rohr in dessen Mitte sich ein Draht befindet. Dieser **Sprühdraht** oder diese **Sprühelektrode** ist der negative Pol eines Hochspannungsfeldes (10 - 100 kV). Hier werden durch eine sogenannte Corona-Entladung freie **Elektronen** erzeugt (Abb.4.4.5.1), die sich mit den **Gasmolekülen** zu Ionen verbinden. Diese



ionisierten Gasmoleküle bleiben an den Partikeln im Rohgas haften. Die so entstandenen, **negativ geladenen Gebilde** werden von der **positiven Elektrode**, die das Rohr darstellt, angezogen. Die Partikel mit den ionisierten Gasmolekülen entladen sich an der Rohrwandung, die man auch als **Niederschlagselektrode** bezeichnet, und bilden eine Staub- oder Flüssigkeitsschicht.

Abb.4.4.5.1: Elektroabscheider

Da diese Schicht das elektrische Feld verschlechtert müssen die Rohre von Zeit zu Zeit gereinigt werden, beispielsweise durch **Abklopfen, Rütteln** oder **Abspülen**.

Mit Elektrofiltern können Trennkorngrößen zwischen $0,01$ und $50 \mu\text{m}$ abgeschieden werden mit sehr hohen Abscheidegraden von 95 bis zu 99,9 %. Die maximale Beladung der Rohgase mit Partikel beträgt 100 g/m^3 . Der Energieverbrauch liegt zwischen 0,1 und $2 \text{ kWh}/1000 \text{ m}^3$ Rohgas.

Vom Aufbau her unterscheidet man **Rohrelektroabscheider** und **Plattenelektroabscheider**:

Rohrelektrofilter bestehen aus mehreren Rohren von ca 10 bis 30 cm Durchmesser und Längen zwischen 2 und 5 m. In jedem Rohr ist mittig eine Sprühelektrode befestigt. Das elektrische Feld ist somit axialsymmetrisch, so daß die gleichmäßige d.h. **gute Trennbedingungen** vorliegen. Das trockene Reinigen stellt sich schwierig dar, so daß bei Rohrelektroabscheider die Rohrwände meistens **abgespült** werden. Die Apparate werden besonders zum Abscheiden von **flüssigen Partikeln** verwendet.

Plattenelektrofilter sind aus vertikal im Abstand von 20 bis 35 cm parallel angeordneten Blechplatten aufgebaut. Die Platten können 5 bis 20 m hoch und 7 bis 15 m hoch sein. wischen den Platten sind in Abständen von 10 bis 20 cm Sprühdrähte gespannt. Das elektrische Feld ist dadurch nicht so gleichmäßig wie bei Rohrelektrofiltern, dem gegenüber ist der gesamte Apparat **einfacher aufgebaut** und läßt sich **leichter reinigen**. Plattenelektroabscheider sind daher die am **häufigsten** verwendeten Elektroabscheider.

Teilchen, die kleiner als der Mittelwert sind, ordnet man dem **Feingut** zu, größere Teilchen gehören dem **Grobgut** an.