

B T R E N N V E R F A H R E N

1 Einleitung

Nachfolgende Abb.1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Trennprinzipien und veranschaulicht die Funktionsweise dieser Trennvorgänge.

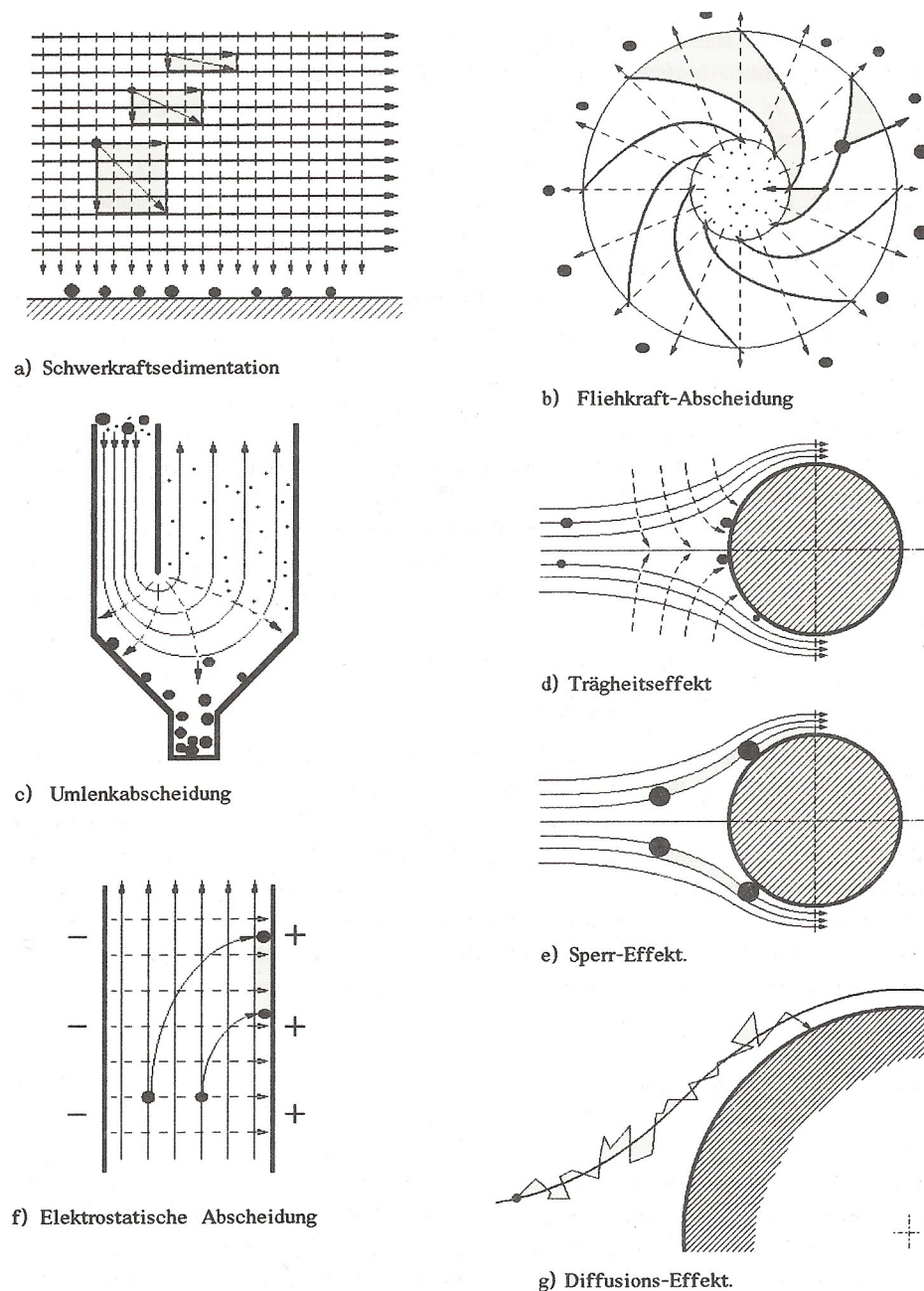


Abb.1: Trennvorgänge (Quelle: Stieß/ Mechanische Verfahrenstechnik 2)

2 Sedimentation

2.1 Einzelpartikel

Wenn ein **einzelnes Partikel** in einer Flüssigkeit absinkt d.h. **sedimentiert**, wirken mehrere Kräfte auf es.

F_G: Gewichtskraft

F_A: Auftrieb

F_T: Trägheitskraft

F_w: Widerstandskraft (Strömungskraft)

Nach einer kurzen Beschleunigungsstrecke sinkt das Partikel mit konstanter Geschwindigkeit ab. Somit (ohne Beschleunigung) wird die **Trägheitskraft null**.

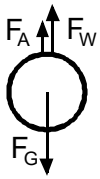


Abb.2: Kräfte bei der
Schwerkraft-
Sedimentation

Wenn man von einer **Kugelform** des Partikels ausgeht, berechnen sich die Kräfte wie folgt:

$$F_G =$$

$$F_A =$$

Strömungswiderstand eines Körpers bei gleichmäßiger Bewegung durch ein Fluid.

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot w_G^2 \cdot A$$

F_w : Strömungswiderstand in N

c_w : Widerstandsbeiwert ohne Einheit

ρ_F : Dichte des Fluids in kg/m³

w_G : Sinkgeschwindigkeit in m/s

A : Projektionsfläche in m²

Aus dem zunächst aufgestellten Kräftegleichgewicht lässt sich die Geschwindigkeit herleiten:

$$w_G^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_F} \cdot \frac{d \cdot g}{c_w}$$

(Gl.1)

Der Widerstandsbeiwert c_w hängt von der Umströmung des Partikels ab. Dies wird durch die **Reynoldszahl Re** beschrieben.

Für die Umströmung von Kugeln gilt:

Die **Reynoldszahl** beschreibt die Umströmungsverhältnisse eines Körpers in einem Fluid.

$$Re = \frac{w_F \cdot d}{\nu}$$

Re : Reynoldszahl einer Kugel ohne Einheit

w_F : Geschwindigkeit in m/s

d : Durchmesser der Kugel in m

ν : kinematische Viskosität des Fluids in m^2/s

Die **kinematische Viskosität** ist das Verhältnis von dynamischer Viskosität zu Dichte.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

ν : kinematische Viskosität des Fluids in m^2/s

η : dynamische Viskosität des Fluids in Pa s

ρ : Dichte des Fluids in kg/m^3

Die Reynoldszahl Re ist von der **Geschwindigkeit** und der so genannten **charakteristischen Partikelgröße** (für Kugeln der Durchmesser) abhängig.

In Abb.3 ist für glatte Einzelkugeln der Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynoldszahl dargestellt.

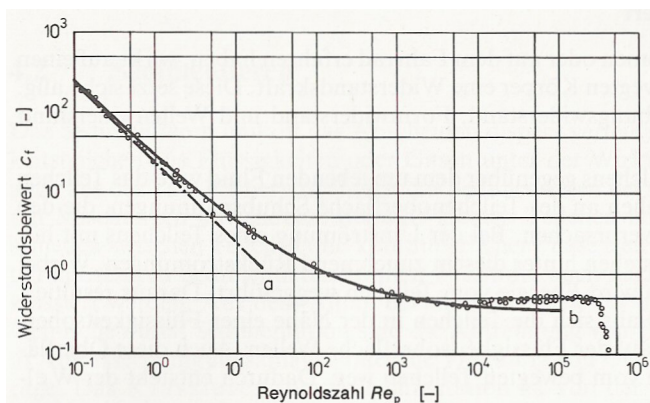


Abb.3: Widerstandsbeiwert (a: Gesetz von Stokes, b: Näherungsgleichungen, markierte Punkte experimentell und theoretisch bestimmt (Quelle: M.Zogg: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik)

Man unterscheidet dabei den so genannten **Stokes-Bereich** ($0 < Re < 0,5$), den **Newton-Bereich** ($10^3 < Re < 2,5 \cdot 10^5$) und dazwischen den **Übergangsbereich**. Es gibt mehrere Näherungsgleichungen, die den Kurvenverlauf mathematisch beschreiben.

Bei kleinen Reynoldszahlen liegen **laminare Strömungen** vor, bei Reynoldszahlen über 1000 hat man es meistens mit **turbulenten Strömungen** zu tun.

Ohne im Detail auf die Reynoldszahl einzugehen, soll jedoch darauf hingewiesen werden, dass die Reynoldszahl Re und somit der Widerstandsbeiwert c_w von der Geschwindigkeit abhängt. Somit ist das Lösen von Gl.1 grundsätzlich nicht so einfach, wie es vielleicht zunächst aussieht.

Bei Sedimentationsvorgängen liegen fast immer laminare Strömungsverhältnisse vor, mit Reynoldszahlen Re kleiner als 1. Hier gilt das Gesetz von Stokes (Gl.2):

Gesetz von Stokes
$$c_w = \frac{24}{Re} \quad (Gl.2)$$

Man erhält somit für Gl.1 letztendlich:
$$w_G = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho}{\nu \cdot \rho_F}$$

In dieser Gleichung erkennt man, dass die Sedimentationsgeschwindigkeit im Schwerfeld dem Quadrat des Kugeldurchmessers proportional ist.

2.2 Partikelschwarm

Die disperse Phase besteht meistens aus vielen Partikeln, die sich gegenseitig beeinflussen.

Die absinkenden Teilchen verdrängen dabei das Fluid. Der **Absetzvorgang** wird dadurch **behindert**.

Die Sedimentationsgeschwindigkeit eines Partikelschwarms hängt dabei vom **Volumenanteil der Teilchen** ab.

Der Absetzvorgang wird bereits bei recht niedrigen Konzentrationen behindert.

Die wirkliche Sedimentations- oder Absetzgeschwindigkeit wird über Versuche oder durch Berechnungen bestimmt.

Für kugelförmige Partikel und laminare Strömungsverhältnisse erhält man:

Absetzgeschwindigkeit eines kugelförmigen Partikelschwarms in einer laminaren Strömung.

$$w_A = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2 \cdot \Delta\rho \cdot k}{\nu \cdot \rho_F}$$

w_A : Absetzgeschwindigkeit in m/s

d : Partikeldurchmesser in m

$\Delta\rho$: Dichteunterschied Fluid-Partikel in kg/m^3

ν : kinematische Viskosität des Fluids in m^2/s

ρ_F : Dichte des Fluids in kg/m^3

k : Konzentrationsbeiwert ohne Einheit

Anwertsche für den Konzentrationsbeiwert k liegen für Massenanteile zwischen $w = 5\%$ und $w = 10\%$ bei $k = 0,6$ bis $k = 0,5$. (Quelle: Hemming/ Verfahrenstechnik).

Anmerkung:

Der **Massenanteil** oder **-gehalt** eines Stoffes ist das Verhältnis der Masse dieses Stoffes zur Gesamtmasse einer Mischung.

$$w = \frac{m_i}{\sum m_i}$$

w : Massenanteil oder -gehalt ohne Einheit (oder in %)

m_i : Masse an Stoff i in kg

$\sum m_i$: Gesamtmasse der Mischung in kg

2.3 Trennflächenbelastung und Trennkorngröße

Der **Trenneffekt** hängt von der **Trennflächenbelastung** (Abb.4) ab.

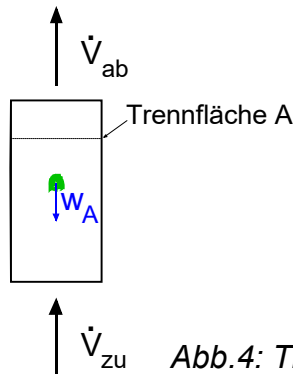
Die **Trennflächenbelastung** ist das Verhältnis des Volumenstroms der geklärten Flüssigkeit zur Trennfläche.

$$\dot{q} = \frac{\dot{V}_{ab}}{A}$$

\dot{q} : Trennflächenbelastung
in $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s}) = \text{m/s}$

\dot{V}_{ab} : Volumenstrom in m^3/s

A : Trennfläche in m^2



Wenn die Absetzgeschwindigkeit w_A der Partikel größer ist als die Geschwindigkeit des entgegenströmenden Fluids, werden die Partikel abgetrennt.

Ist die Trennflächenbelastung zu hoch, werden nicht alle Partikel abgetrennt. Ein Teil der Partikel wird dann mit der Strömung aus dem Trennbereich genommen.

Abb.4: Trennflächenbelastung

Man geht davon aus, dass die **Trennkorngröße** x_T die Partikelgröße ist, bei der die Absetzgeschwindigkeit gleich der Trennflächenbelastung ist. Die **Trennkorngröße** berechnet sich aus der Absetzgeschwindigkeit der Partikel im Schwarm zu

$$x_T = d = \sqrt{\frac{18 \cdot \nu \cdot \rho_F \cdot \dot{q}}{g \cdot \Delta \rho \cdot k}} = \sqrt{\frac{18 \cdot \nu \cdot \rho_F \cdot w_A}{g \cdot \Delta \rho \cdot k}}$$

Außerdem kann man mit der Formel für die Trennflächenbelastung die **erforderliche Trennfläche** aus der Absetzgeschwindigkeit der Partikel berechnen.

2.4 Anwendungen

In diesem und den nächsten Kapiteln sind die meisten Abbildungen der Abschnitte „Anwendungen“ nachfolgendem Buch entnommen:

Dr.-Ing. Eckhard Ignatowitz
Chemietechnik
Europa-Lehrmittel Nr.: 70415

Die Funktionsweisen und Zusatzinformationen zu den Apparaten sind gut in dem Buch beschrieben. Da das Buch sich mit vielen Bereichen der Technik (Chemieanlagen, Elektrotechnik, Maschinen und Apparate, Werkstofftechnik, Aufbereitungstechnik, Umwelttechnik u.a.) befasst, kann es als Nachschlagewerk nur empfohlen werden.

Sedimentationsvorgänge treten bei Verfahren zu nachfolgenden Trennaufgaben auf:

- Trennen von Fest-Fest-Gemischen
- Trennen von Suspensionen
- Trennen von Emulsionen
- Gasreinigen

2.4.1 Trennen von Fest-Fest-Gemischen

Sortieren:

Unterschiedliche Teilchen (Partikel) können in einer Flüssigkeit nach ihrer Dichte getrennt werden.

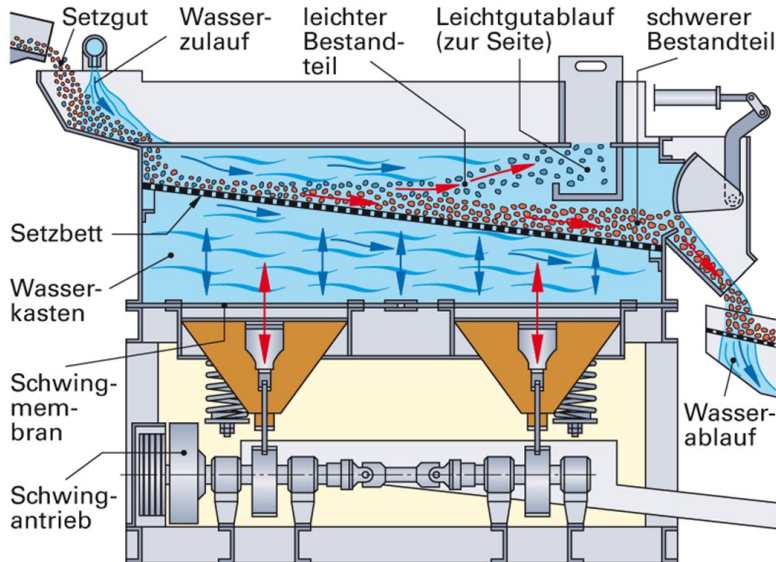


Abb.5: Nasssortierende Schwingsetzmaschine (Quelle: Europa-Lehrmittel)

Trennen von Erzen und Gestein:

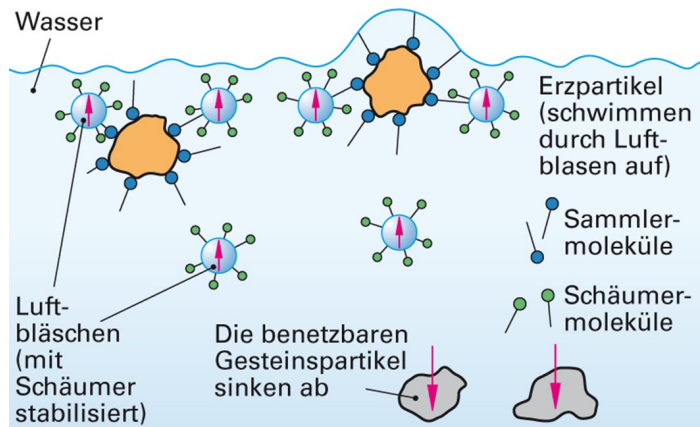


Abb.6: Prinzip der Aufschwimm-/ Absink-Trennung bei der Flotation (Quelle: Europa-Lehrmittel)

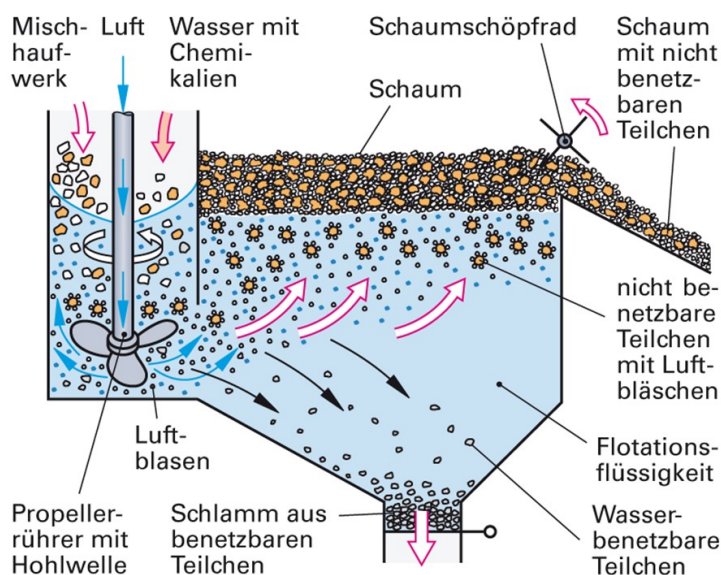


Abb.7: Schematischer Aufbau eines Flotationsapparats (Quelle: Europa-Lehrmittel)

Windsichten:

Mit Hilfe eines Gases, in der Regel Luft, werden Teilchen nach ihrer Dichte getrennt.

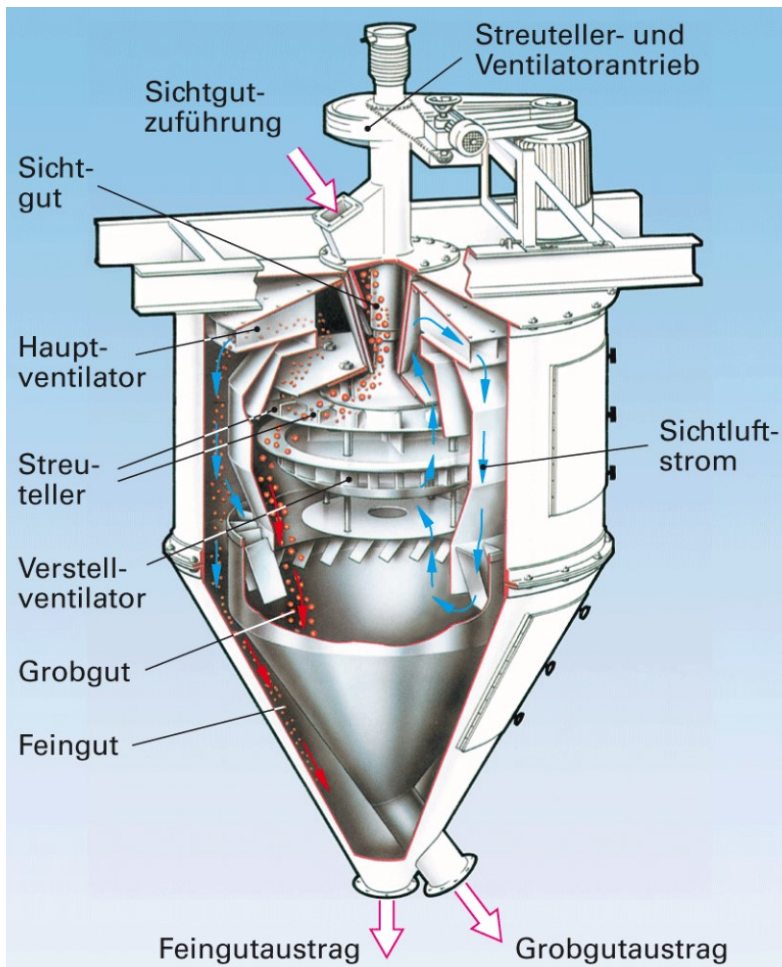


Abb.8: Streutellersichter (Quelle: Europa-Lehrmittel)

Stromklassieren:

Mit Hilfe einer Flüssigkeit/eines Gases werden Teilchen nach ihrer Größe getrennt.

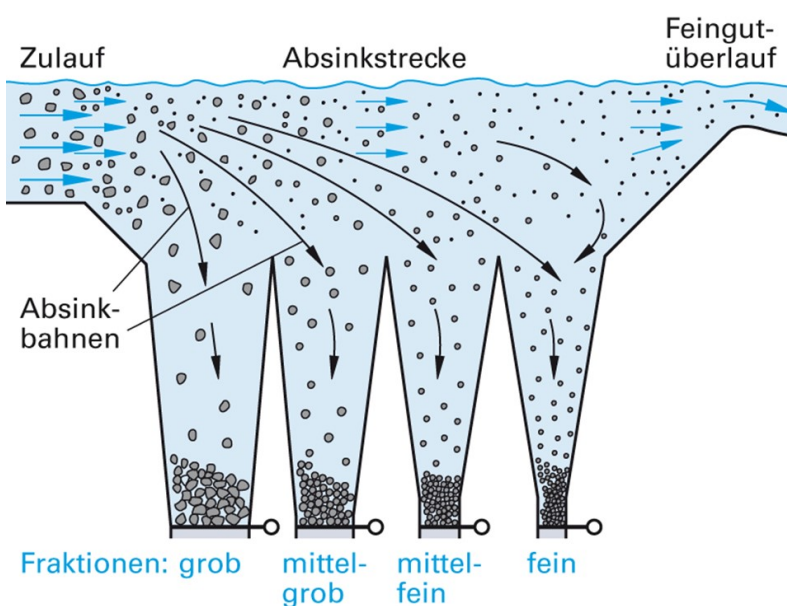


Abb.9: Absetzklassierer
(Quelle: Europa-Lehrmittel)

2.4.2 Trennen von Suspensionen

Flockung:

Mittels Chemikalien (Flockungsmittel), werden sehr kleine Teilchen (kolloide Partikel) zu größeren Teilchen (Koagulate) gebunden, die sich in der Flüssigkeit absetzen.

In Kläranlagen werden beispielsweise Phosphate (PO_4^{3-} -Ionen) mittels Eisen-III (Fe^{3+} -Ionen)

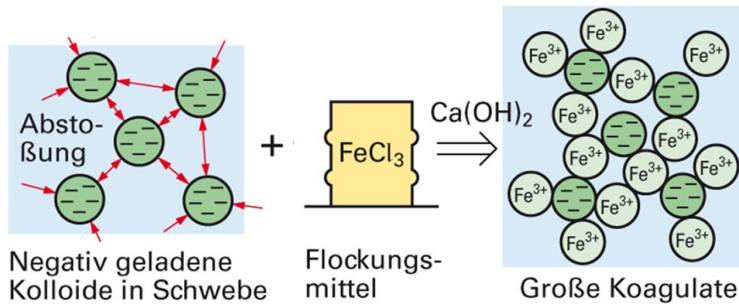


Abb.10: Vorgänge bei der Flockung (Quelle: Europa-Lehrmittel)

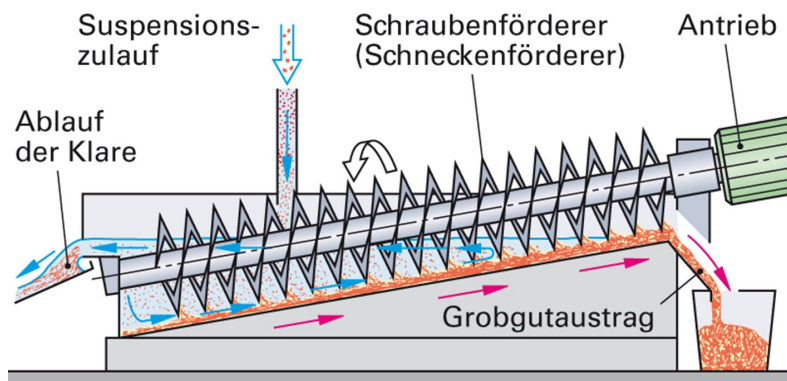


Abb.11: Sandfang, Spiralklassierer (Quelle: Europa-Lehrmittel)

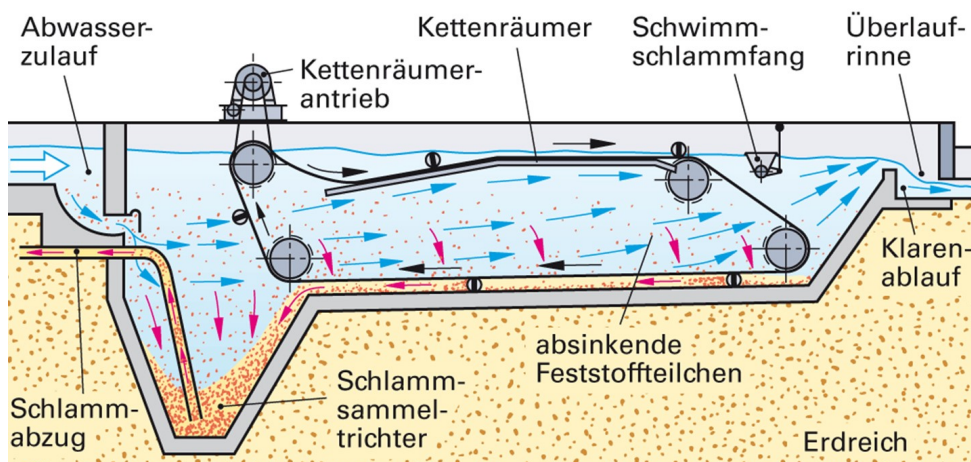


Abb.12: Rechteckklärbecken (Quelle: Europa-Lehrmittel)

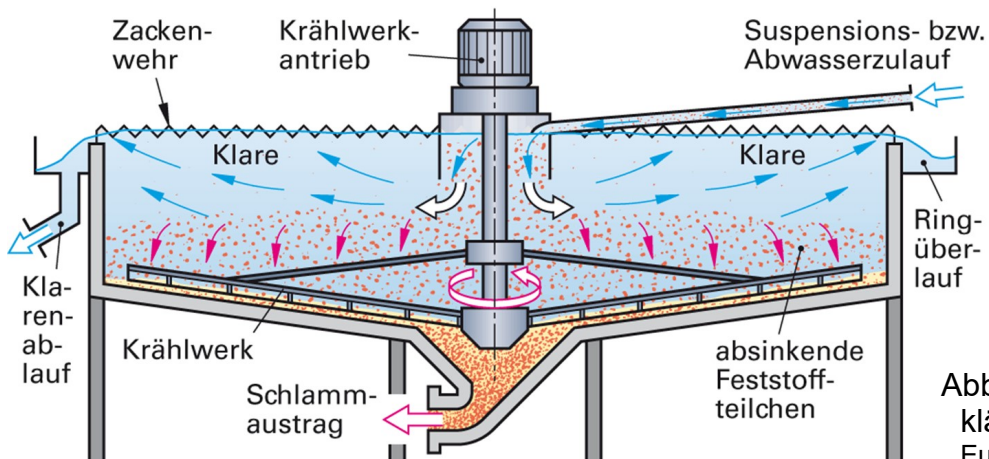


Abb.13: Rundklärbecken (Quelle: Europa-Lehrmittel)

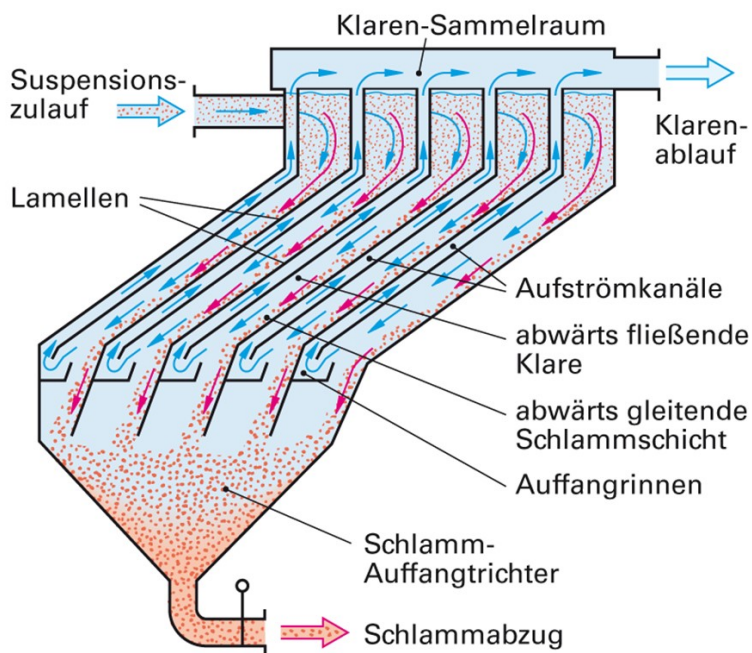


Abb.14: Lamellenklärer (Quelle: Europa-Lehrmittel)

2.4.3 Trennen von Emulsionen

Dekantieren:

Trennen von zwei Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte

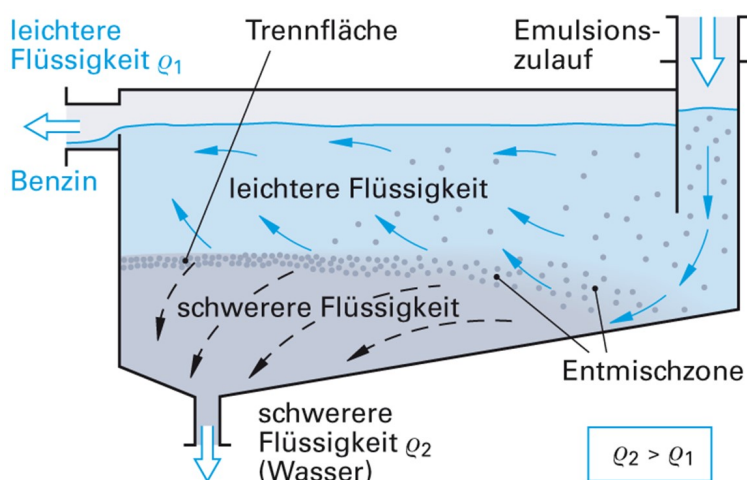


Abb.15: Dekantierbehälter
(Quelle: Europa-Lehrmittel)

2.4.4 Gasreinigen

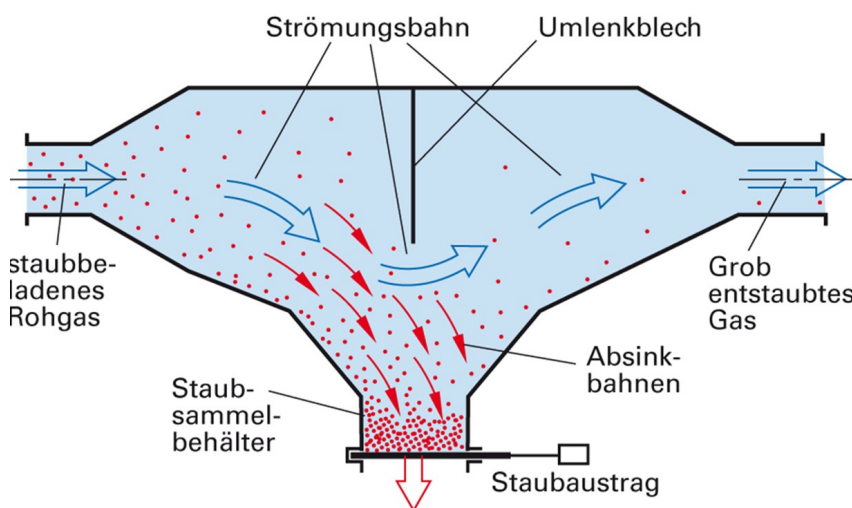


Abb.16: Absetzgaszug
(Quelle: Europa-Lehrmittel)

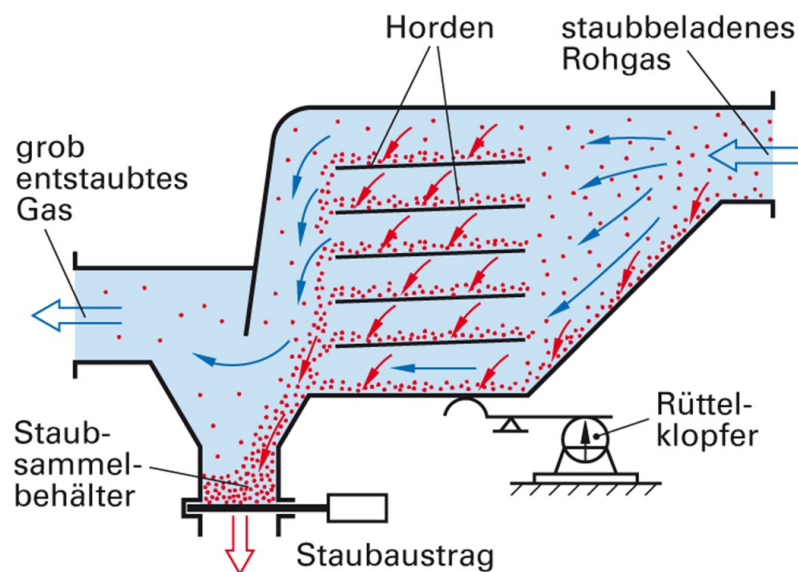


Abb.17: Staubkammer
(Quelle: Europa-Lehrmittel)

3 Fliehkraftsedimentation

3.1 Einzelpartikel

Ein Partikel, das mit **konstanter Drehzahl n** rotiert, unterliegt in radialer Richtung der Zentrifugalbeschleunigung a_z . Folglich wirkt auf das Partikel eine Kraft, es ist die **Zentrifugalkraft F_z** :

$$F_z = m \cdot a_z$$

$$= m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \text{mit } v = \omega \cdot r$$

$$F_z = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad \text{mit } \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (n: \text{Drehzahl})$$

$$\text{oder } F_z = m \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot r$$

Man erkennt:

Mit zunehmendem Radius steigt die Zentrifugalkraft.

Mit zunehmender Drehzahl steigt die Zentrifugalkraft im Quadrat.

Weitere Kräfte, die auf das Partikel wirken:

F_G : Gewichtskraft (im Allgemeinen sehr klein gegenüber der Zentrifugalkraft)

F_A : Auftrieb (vernachlässigbar klein)

F_T : Trägheitskraft (vernachlässigbar klein. Die zeitliche Änderung des Radiuses führt zu einer Änderung der Sedimentationsgeschwindigkeit. Diese ist jedoch klein gegenüber der Zentrifugalbeschleunigung)

F_w : Widerstandskraft (Strömungskraft)

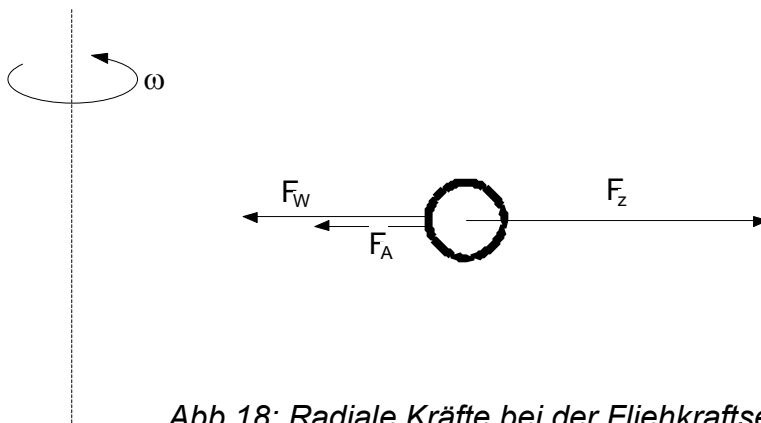


Abb.18: Radiale Kräfte bei der Fliehkraftsedimentation

Kräftegleichgewicht der drei in radialer Richtung wirkenden Kräfte:

$$F_z - F_A - F_w = 0$$

Daraus erhält man für kugelförmige Partikel:

$$\boxed{w_z^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_F} \cdot \frac{d \cdot r \cdot \omega^2}{c_w}} \quad (Gl.3)$$

Man erkennt:

- Mit zunehmendem Radius r steigt die Sedimentationsgeschwindigkeit im Fliehkraftfeld.
- Mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit ω (bzw. Drehzahl n) steigt die Sedimentationsgeschwindigkeit im Fliehkraftfeld im Quadrat.

Die Geschwindigkeitsgleichung für die Fliehkraftsedimentation (Gl.3) ähnelt der Geschwindigkeitsgleichung für die Schwerkraftsedimentation (Gl.1).

Durch Vergleich der Sinkgeschwindigkeit im Zentrifugalfeld zu der im Schwerkraftfeld ((Gl.3) zu (Gl.1)) erhält man:

$$\frac{w_Z^2}{w_G^2} = \frac{r \cdot \omega^2}{g}$$

Man führt daher die **Schleuderzahl z** ein:

Die **Schleuderzahl** ist das Verhältnis der Zentrifugalbeschleunigung zur Fallbeschleunigung.

$$z = \frac{r \cdot \omega^2}{g}$$

z : Schleuderzahl ohne Einheit

r : Radius in m

ω : Winkelgeschwindigkeit in rad/s

g : Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Als Radius r wird meistens der Innenradius des Rotors genommen.

Durch Umwandeln der Winkelgeschwindigkeit (aus Gl.3) erhält man letztendlich für die Sinkgeschwindigkeit bei der Fliehkraftsedimentation bzw. in einem Zentrifugalfeld:

$$w_Z^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_F} \cdot \frac{d \cdot z \cdot g}{c_W}$$

3.2 Anwendungen

Sedimentationsvorgänge im Fliehkraftfeld treten bei Verfahren zu nachfolgenden Trennaufgaben auf:

- Trennen von Fest-Fest-Gemischen
- Trennen von Suspensionen
- Trennen von Emulsionen
- Gasreinigen

3.2.1 Trennen von Fest-Fest-Gemischen

Sortieren

Bei der Schwertrübesortieren werden unterschiedliche Feststoffteilchen mittels einer Flüssigkeit getrennt.

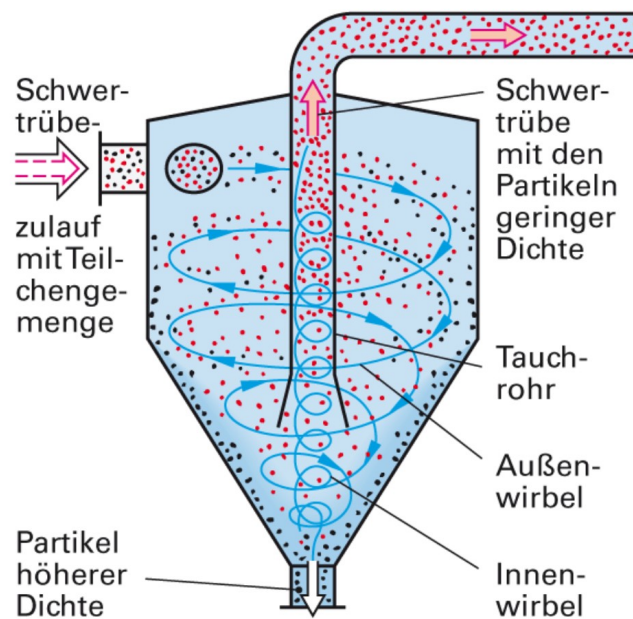
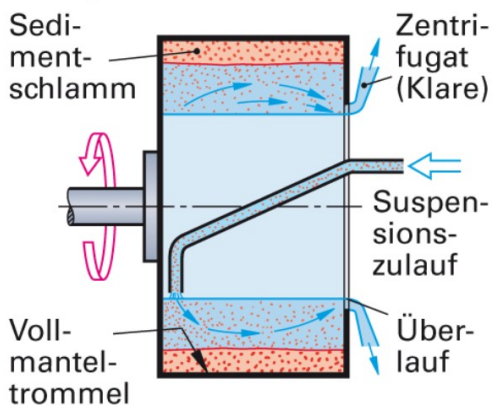


Abb.19: Hydrozyklon (Quelle: Europa-Lehrmittel)

3.2.2 Trennen von Suspensionen

Zentrifugieren

Prinzipieller Aufbau



Kennzeichen:

- Vollmantel-trommel
- Zentrifugat strömt über ein Schälrohr oder Überlauf ab
- kein Entfeuchten des Sediments möglich
- Auch für zusammenbackende Sedimente geeignet

Abb.20: Sedimentierzentrifuge (Vollmantelzentrifuge) (Quelle: Europa-Lehrmittel)

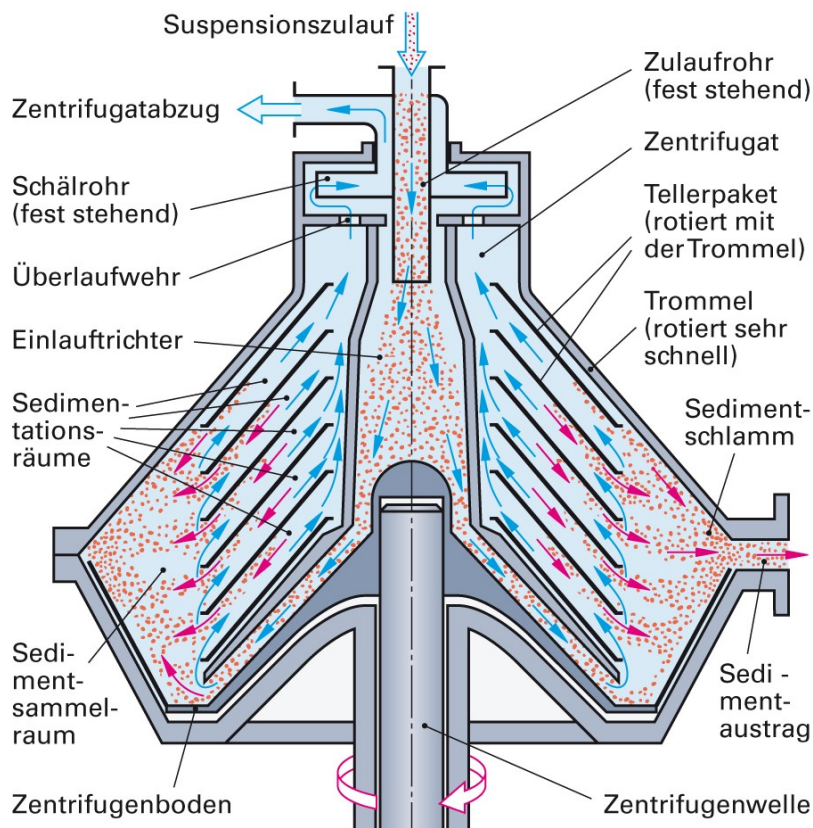


Abb.21: Wirkprinzip der Tellerzentrifuge (Quelle: Europa-Lehrmittel)

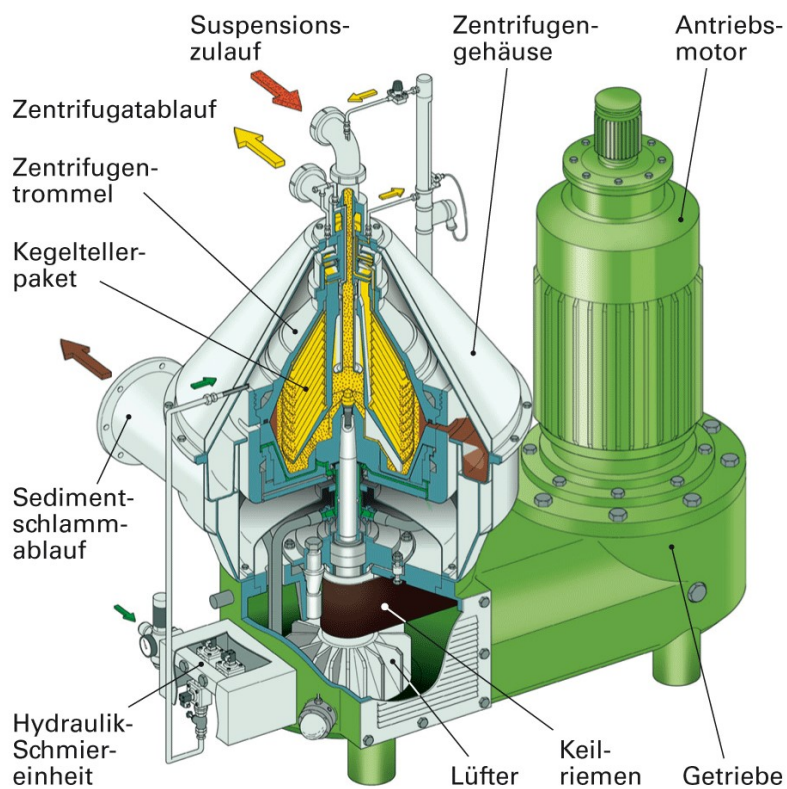


Abb.22: Industrietytische Tellerzentrifuge (Quelle: Europa-Lehrmittel)

3.2.3 Trennen von Emulsionen

Zentrifugieren

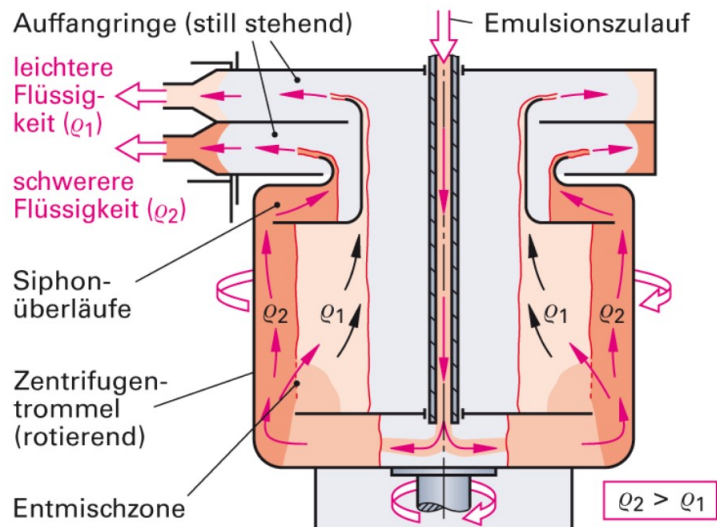


Abb.23: Zentrifugieren einer Emulsion in einer Vollmantelzentrifuge (schematisch)
(Quelle: Europa-Lehrmittel)

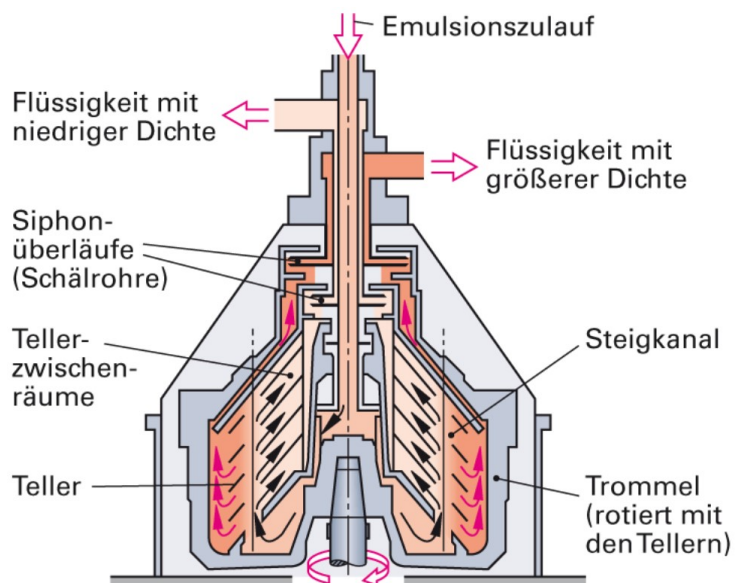


Abb.23: Zentrifugieren einer Emulsion in einer Tellerzentrifuge (Quelle: Europa-Lehrmittel)

3.2.4 Gasreinigen Fliehkraftabscheidung

Einer der am häufigsten in der Industrie eingesetzten Apparate zur Gasreinigung.

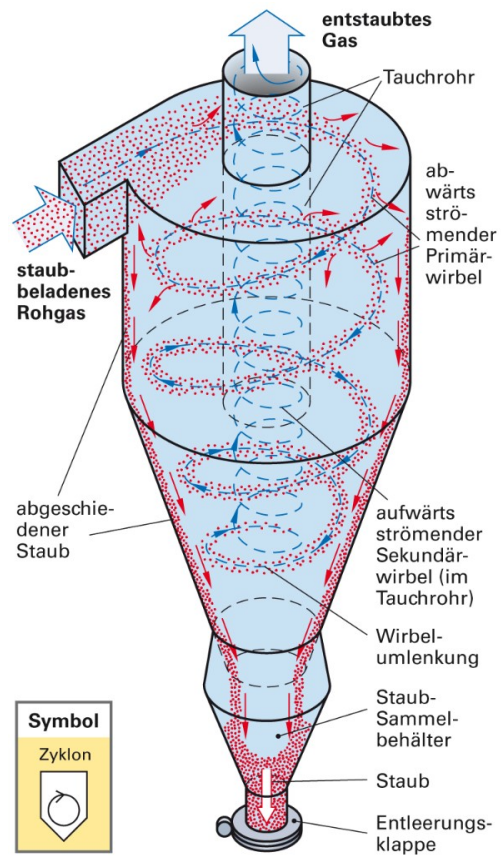


Abb.24: Staubabscheidung in einem Zyklon
(Quelle: Europa-Lehrmittel)



Abb.25: Industrieller Zyklon (Quelle: www.alibaba.com)

4 Umlenkabscheidung

4.1 Funktionsweise

Wenn Partikel sich nicht geradlinig, sondern auf gekrümmten Bahnen durch Apparate oder Leitungen bewegen, wirken folgende Kräfte auf sie:

F_G: Gewichtskraft (im Allgemeinen sehr klein gegenüber der Zentrifugalkraft)

F_Z: Zentrifugalkraft

F_A: Auftrieb (meistens vernachlässigbar)

F_T: Trägheitskraft

Neben der Schwerkraft wirkt hauptsächlich die Zentrifugalkraft:

$$F_Z = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

Die Zentrifugalkraft wird **größer** mit **zunehmender Umfangsgeschwindigkeit** und wird **größer** mit **kleiner werdenden Krümmungsradien** der Umlenkung.

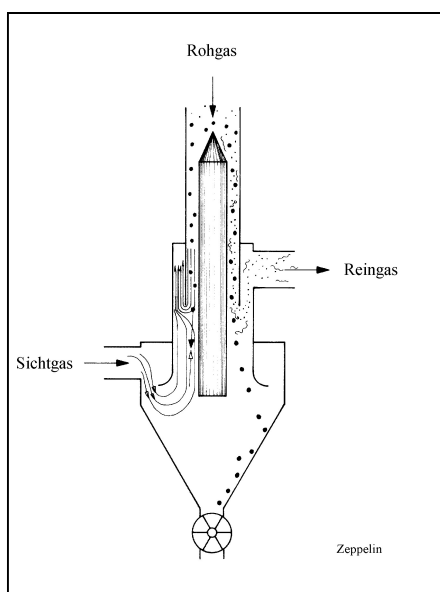
Um hohe Zentrifugalkräfte zu erzielen, setzt man daher nachfolgende konstruktive Maßnahmen ein:

- Verengungen der Strömungsquerschnitte.
- Scharfe Umlenkungen der Gas- oder Flüssigkeitsströmung.
- Erzeugung einer Drehströmung.

Umlenkabscheidung erfolgt, physikalisch betrachtet, durch Zentrifugalkraft. Die technisch verwendeten Apparate unterscheiden sich jedoch konstruktiv von den Zentrifugalabscheidern, daher werden sie separat betrachtet.

4.2 Anwendungen

Allgemein werden Umlenkabscheider oft zum Vorabscheiden großer Partikel verwendet. Die feineren Partikel werden anschließend mit wirkungsvolleren, aber auch aufwendigeren und kostenintensiveren Apparaten entfernt.



In Abb.26 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.26: Umlenksichter

5 Filtration

5.1 Suspensionen

Filtrieren von Suspensionen bedeutet Trennen durch **Zurückhalten** der **Feststoffteilchen** mit Hilfe einer **porösen Schicht (Filterschicht oder Filtermittel)**.

Gegenüber den Sedimentationsverfahren ist beim Filtrieren **kein Dichteunterschied** zwischen Feststoffpartikeln und Flüssigkeit erforderlich. Des Weiteren können auch **sehr kleine Partikel** und solche mit sehr **geringen Dichteunterschieden** besser abgetrennt werden, da diese sehr lange Zeiten zum Sedimentieren brauchen. Insgesamt ist der Abscheidvorgang schneller, des Weiteren ist die **Trennung vollständiger**, insbesondere ist der **Gehalt an Restfeuchte** im Feststoff geringer. Ein weiterer Vorteil ist der **geringe Platzbedarf** gegenüber großflächigen Becken, allerdings sind die **Kosten** zum Filtrieren **größer**.

Zur Erzeugung einer Strömung der Suspension durch die poröse Schicht hindurch ist eine **Druckdifferenz** erforderlich. Diese kann durch den **statischen Druck** der Suspension erzeugt werden, größere Druckdifferenzen erhält man durch eine **Pumpe** oder durch **Unterdruck** d.h. Absaugen der gereinigten Flüssigkeit, des **Filtrates**.

Nach Art der Abscheidemechanismen unterscheidet man zwischen der **Oberflächenfiltration** und der **Tiefenfiltration**.

5.1.1 Oberflächenfiltration

Beim **Oberflächenfiltrieren**, auch **kuchenbildendes Filtrieren** genannt, werden die Feststoffpartikel von einer porösen Schicht, dem Filtermittel, zurückgehalten, deren **Poren kleiner** als die Partikelabmessungen sind.

Grundsätzlich ähnelt der Vorgang einem Absieben.

5.1.2 Tiefenfiltration

Beim **Tiefenfiltrieren** werden Feststoffteilchen im Inneren des Filtermittels abgetrennt. Sie bleiben durch molekulare Anziehungskräfte an dem Filtermittel haften. Dabei lassen sich auch Teilchen abtrennen, die **kleiner** sind **als** die **Poren** d.h. Hohlräume im Filtermittel.

Ein natürliches Vorbild für Tiefenfiltration ist die Reinigung von Schmutzwasser beim Sickers durch Erdschichten.

Im Laufe der Trennung sammeln sich immer mehr Feststoffpartikel an, es bildet sich ein sogenannter **Filterkuchen**. Mit zunehmender Kuchendicke steigt allerdings auch der Druckverlust, so daß der Vorgang sich stark verlangsamt. Schließlich muß der Trennungsvorgang unterbrochen und der Filterkuchen **entfernt** werden. Bei Apparaten mit **kontinuierlicher** Betriebsweise verwendet man **bewegte Filtermittel** (Band, Trommel), die verschiedene Zonen durchlaufen (Abscheidung, Entfernen des Kuchens).

Die Restfeuchtigkeit im Filterkuchen enthält häufig noch gelöste Stoffe, die entfernt werden müssen, um einen reinen Feststoff zu erhalten. Hierzu wird der Filterkuchen **gewaschen** d.h. eine Waschflüssigkeit wird hindurch gedrückt, die die Restfeuchte verdrängt.

Eine Gegenüberstellung von kontinuierlich und periodisch arbeitenden Apparaten zeigt, dass der Vorteil diskontinuierlicher Betriebsweise darin liegt, dass man bei unterschiedlichen Suspensionen die Zeiten für die einzelnen Vorgänge beliebig verändern können. Kontinuierliche Apparate hingegen eignen sich besonders bei konstanten Betriebsbedingungen in Prozessen, wo größere Mengen gleicher Produkte hergestellt werden.

Als Filtrationsmittel werden Gewebe aus Naturprodukten, Kunstfasern oder Metallen sowie poröse Platten aus keramischen Stoffen, Kunststoffen oder gesinterten Metallen verwendet.

5.2 Emulsionen

Emulsionen werden hauptsächlich durch Fliehkraftabscheider getrennt.

Die **Ultrafiltration** ist das bekannteste Filtrationsverfahren zum Trennen von Emulsionen.

5.3 Gasströme

Partikelhaltiger Gasströme werden bei der **Gewebeentstaubung** durch einen **porösen Filterstoff** geleitet, wobei die Partikel im Filter abgeschieden werden.

Die Abscheidung kann durch verschiedene Effekte erfolgen:

- **Sperrwirkung**: die Strömungsquerschnitte im Filterstoff 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.

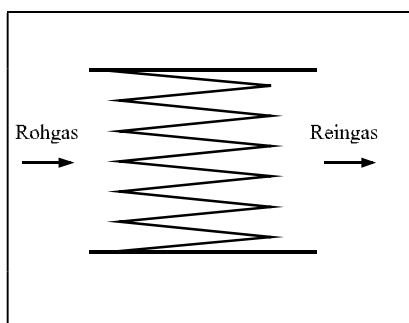
Die **Abscheidegrade** (> 98 %) sind relativ **hoch** und entsprechen somit meistens den gesetzlichen Auflagen (Vorschriften). Deshalb werden Gewebeatstauber häufig als **Endabscheider** verwendet. Des Weiteren kommen Gewebefilter zum Einsatz, wenn die Partikel nicht benetzbar sind, nicht nass werden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

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

5.3.1 Speicherfiltration

In Speicherfiltern erfolgt die Trennung durch eine so genannte **Tiefenfiltration**. Das Rohgas strömt durch ein Filtermaterial, das aus **Gewebe** oder **Fasermatten** mit **hoher Porosität** (Anteil Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen, 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/m³ 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 so genannten **Taschenfiltern** (Abb.27) wird die zur Verfügung stehende Filterfläche vergrößert.

Abb.27: 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 Filter 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.

5.3.2 Abreinigungsfiltration

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 so genannter **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** werden muss. Dies erfolgt entweder periodisch oder bei Erreichen eines bestimmten Druckverlustes durch mechanisches **Klopfen** (oder Rütteln) oder durch einen **Luftdruckstoß** aus entgegengesetzter Richtung.

Abreinigungsfilter werden bei **hohen Partikelbelastungen** (bis ca. 100 g/m³) 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 hat das Filtertuch eine Schlauchform, die meistens von innen nach außen durchströmt wird.

Als Filtermaterialien werden **Gewebe** und **Faserstoffe** aus Synthesefasern (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.

5.4 Anwendungen

Filtrationsvorgänge treten bei Verfahren zu nachfolgenden Trennaufgaben auf:

- Trennen von Suspensionen
- Trennen von Emulsionen
- Gasreinigen

5.4.1 Trennen von Suspensionen

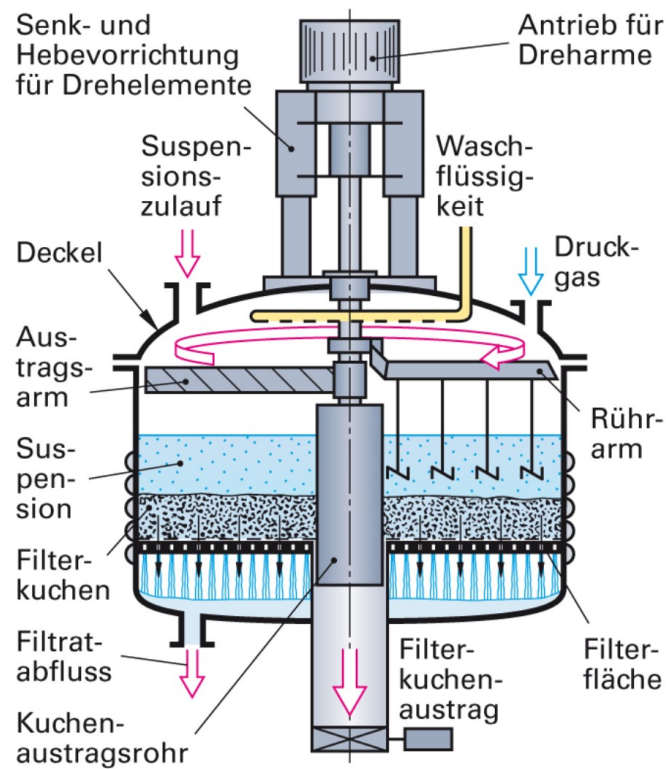
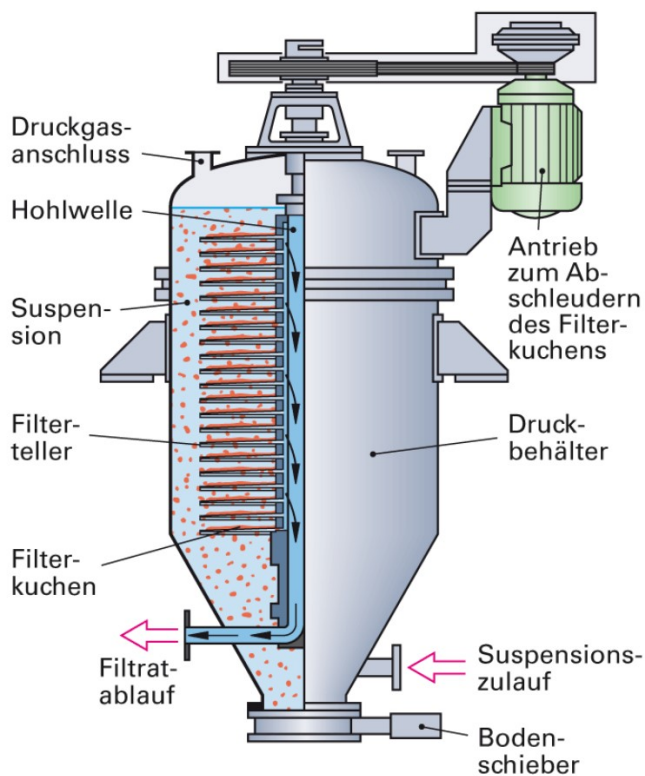


Abb.28: Filter-Drucknutsche
(Quelle: Europa-Lehrmittel)



Einzelner Filterteller

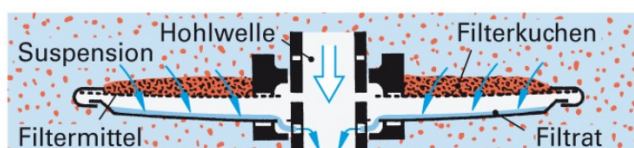


Abb.29: Tellerfilter (Plattenfilter)

(Quelle: Europa-Lehrmittel)

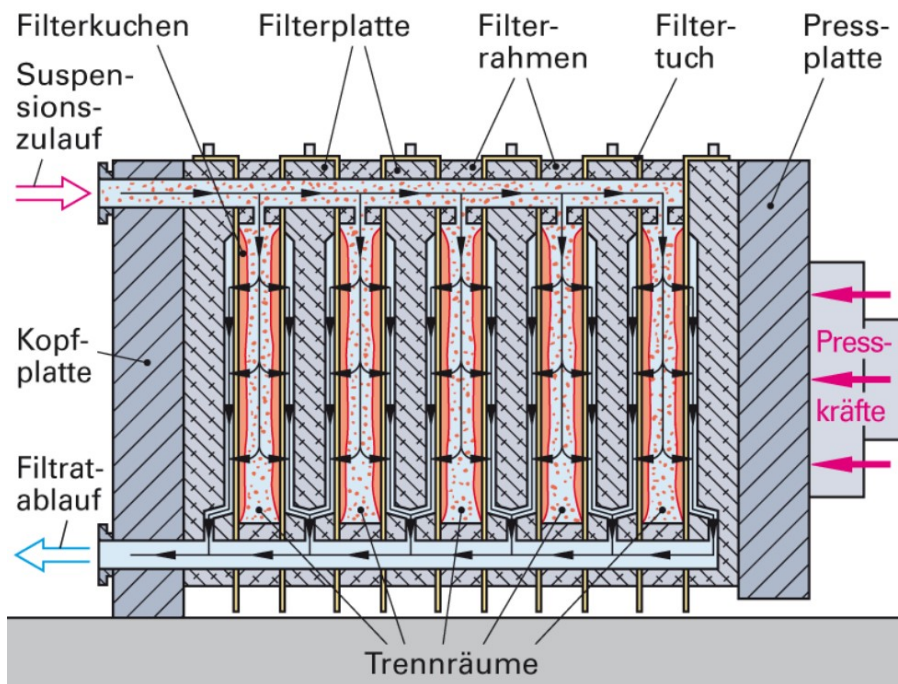


Abb.30: Rahmenfilterpresse (Quelle: Europa-Lehrmittel)

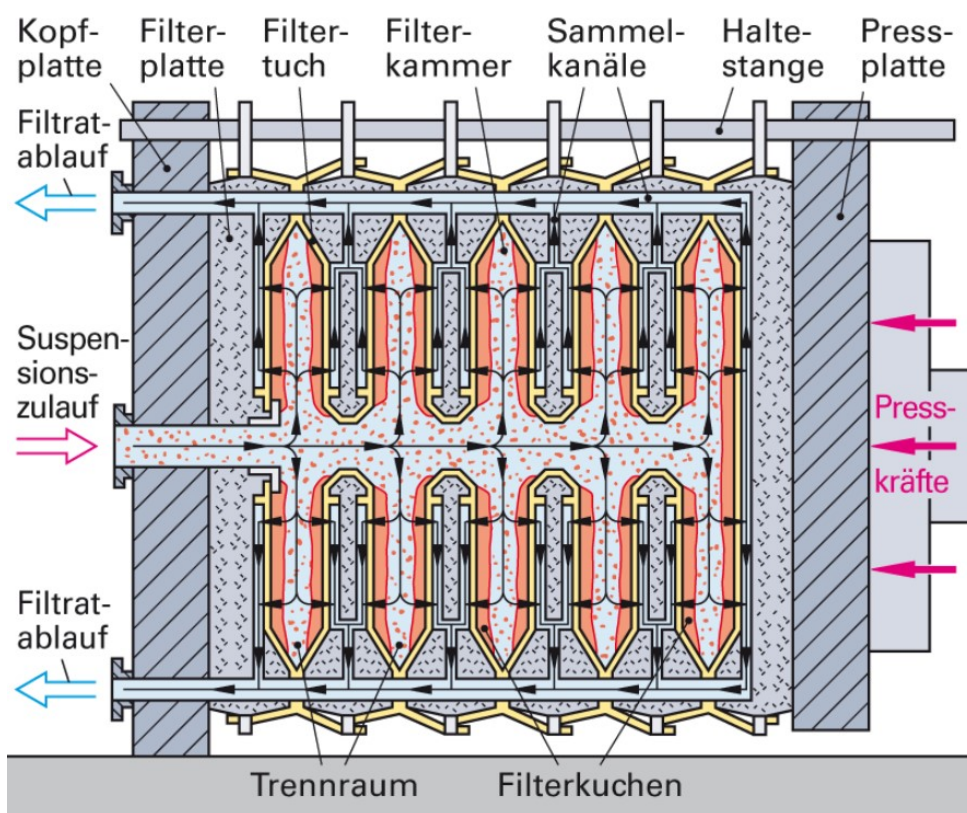


Abb.31: Kammerfilterpresse (Quelle: Europa-Lehrmittel)

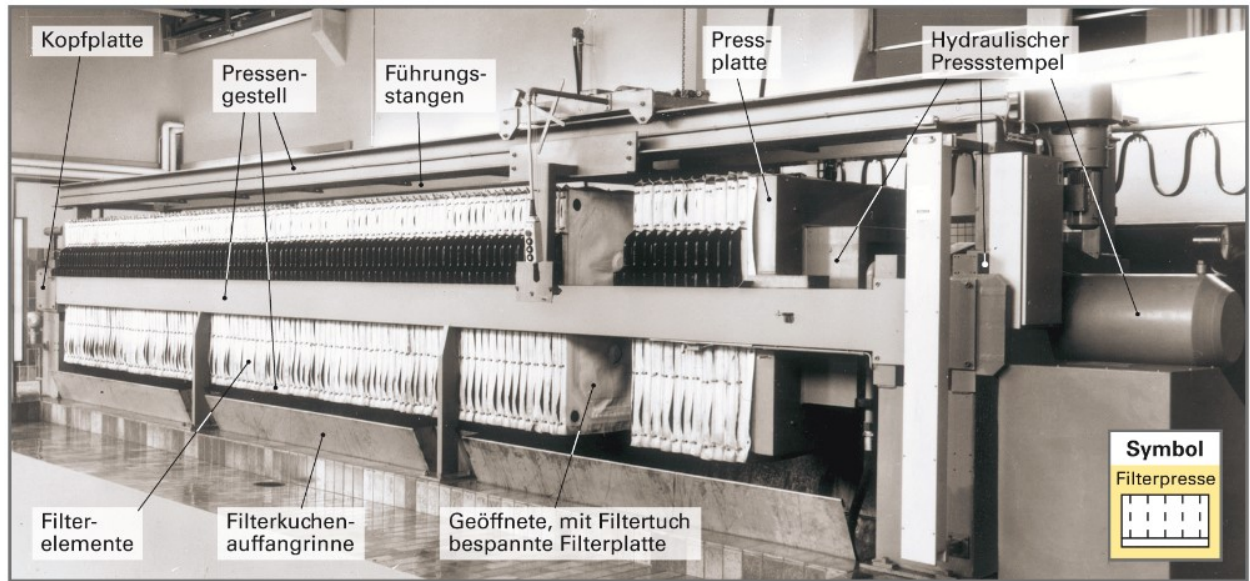


Abb.32: Kammerfilterpresse (Quelle: Europa-Lehrmittel)

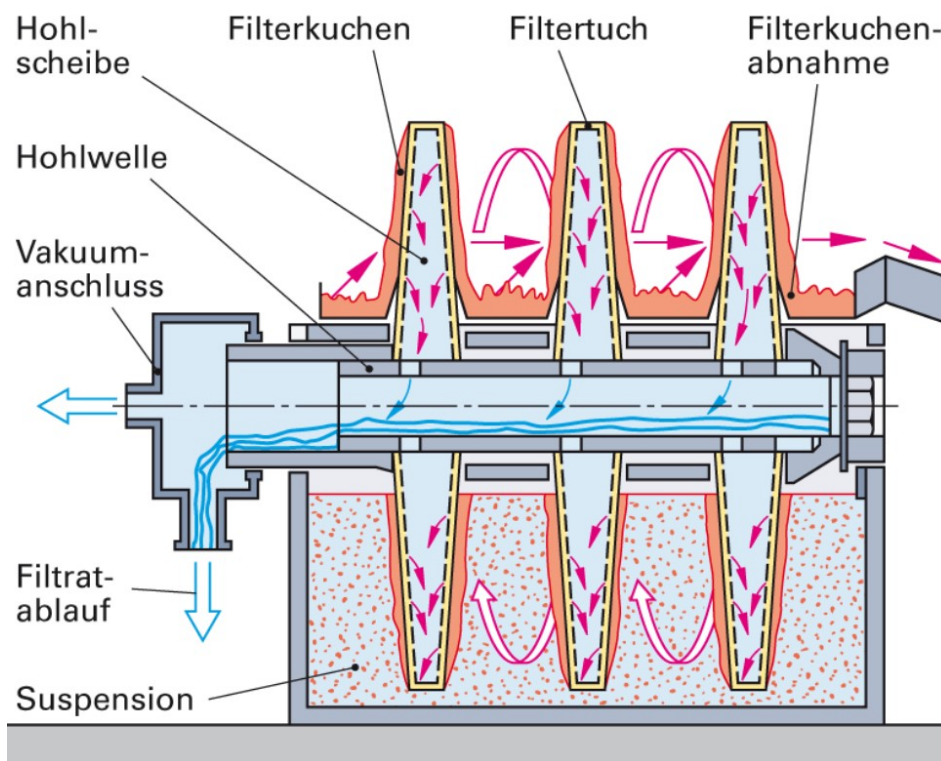


Abb.33: Vakuum-Scheibenfilter (Quelle: Europa-Lehrmittel)

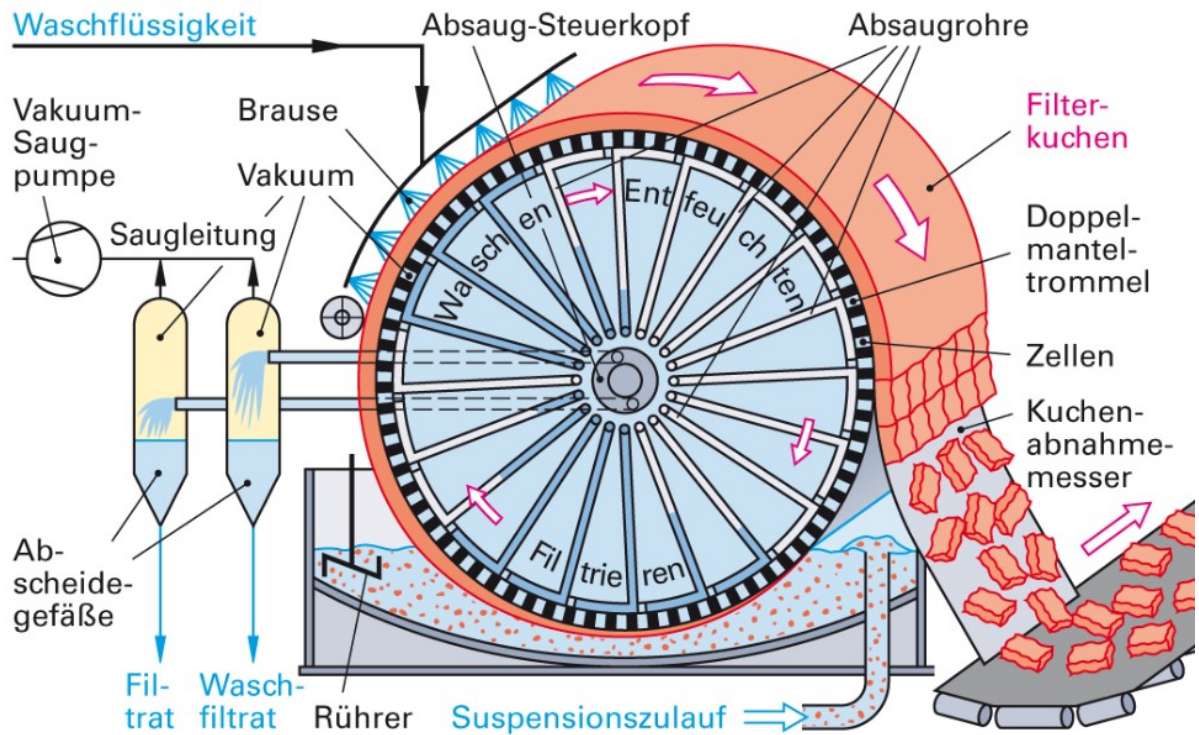


Abb.34: Vakuum-Trommelfilter (Quelle: Europa-Lehrmittel)

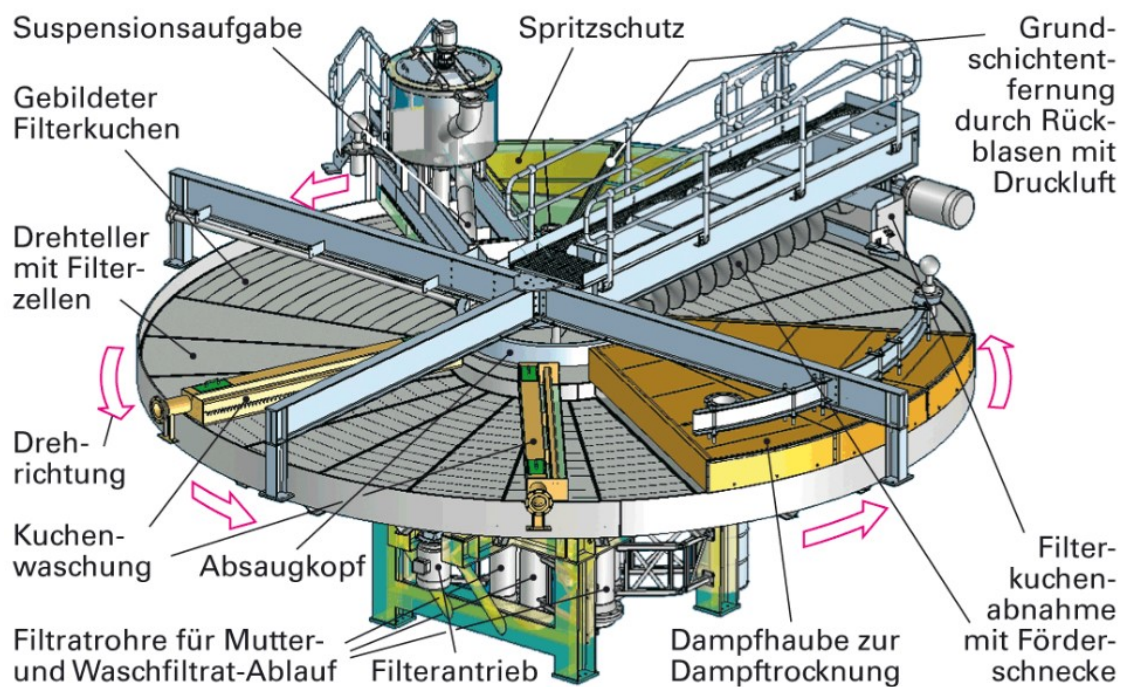


Abb.35: Planzellenfilter (Quelle: Europa-Lehrmittel)

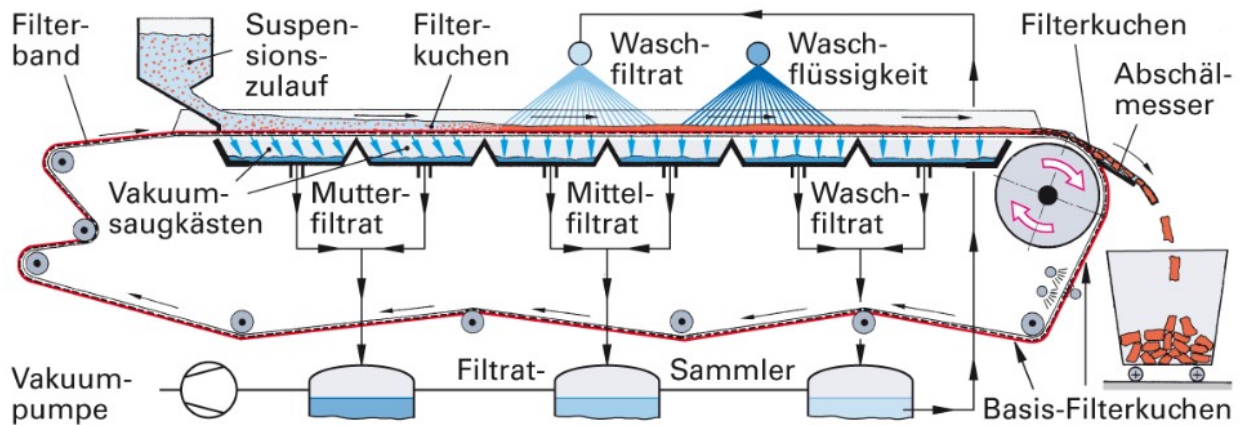


Abb.35: Bandfilter (Quelle: Europa-Lehrmittel)

5.4.2 Trennen von Emulsionen

Ultrafiltration

Mittels Membrantechnik werden Makromoleküle (2 und 100 nm) aus einer Flüssigkeit abgetrennt.

Anwendungen hat man in der Medizin (Dialyse) und immer häufiger sowohl in der Trinkwasseraufbereitung als auch in der Abwasserreinigung.

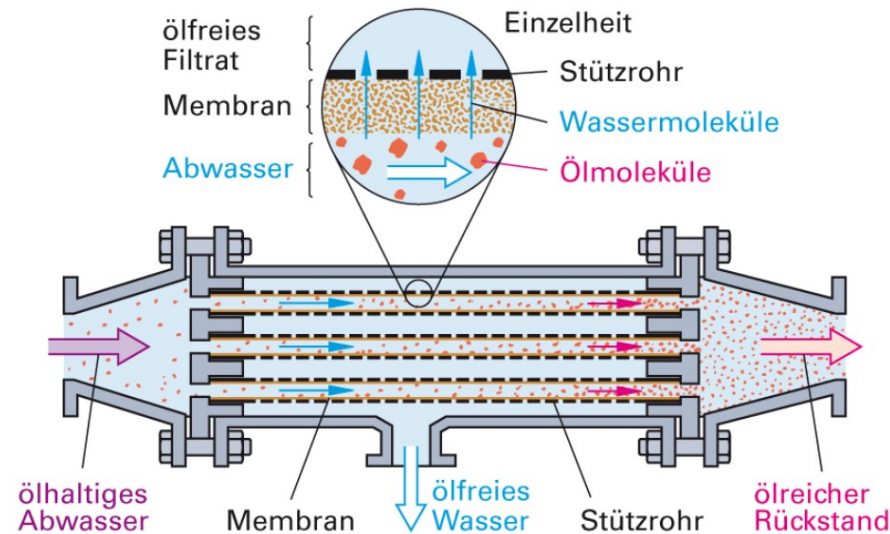


Abb.36: Ultrafiltrations-Rohrbündelmodul (Quelle: Europa-Lehrmittel)

5.4.3 Gasreinigen

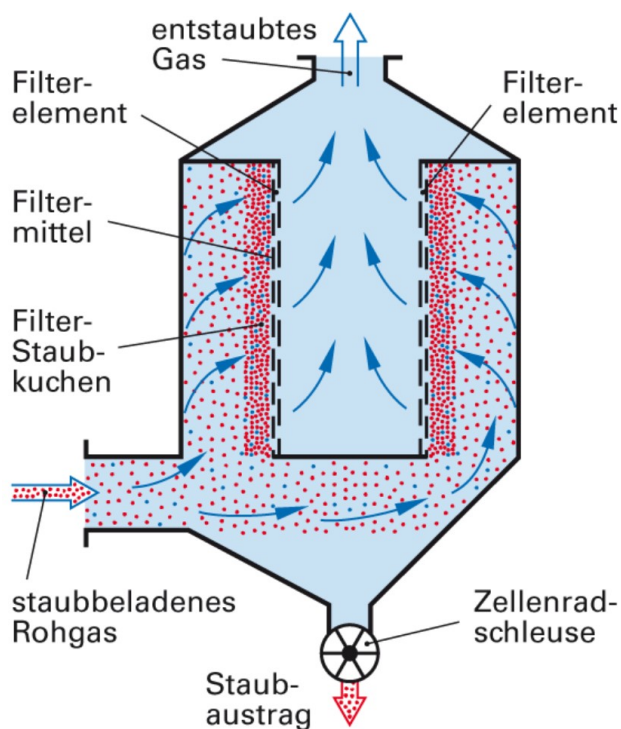


Abb.37: Filtrationsentstaubung (Quelle: Europa-Lehrmittel)

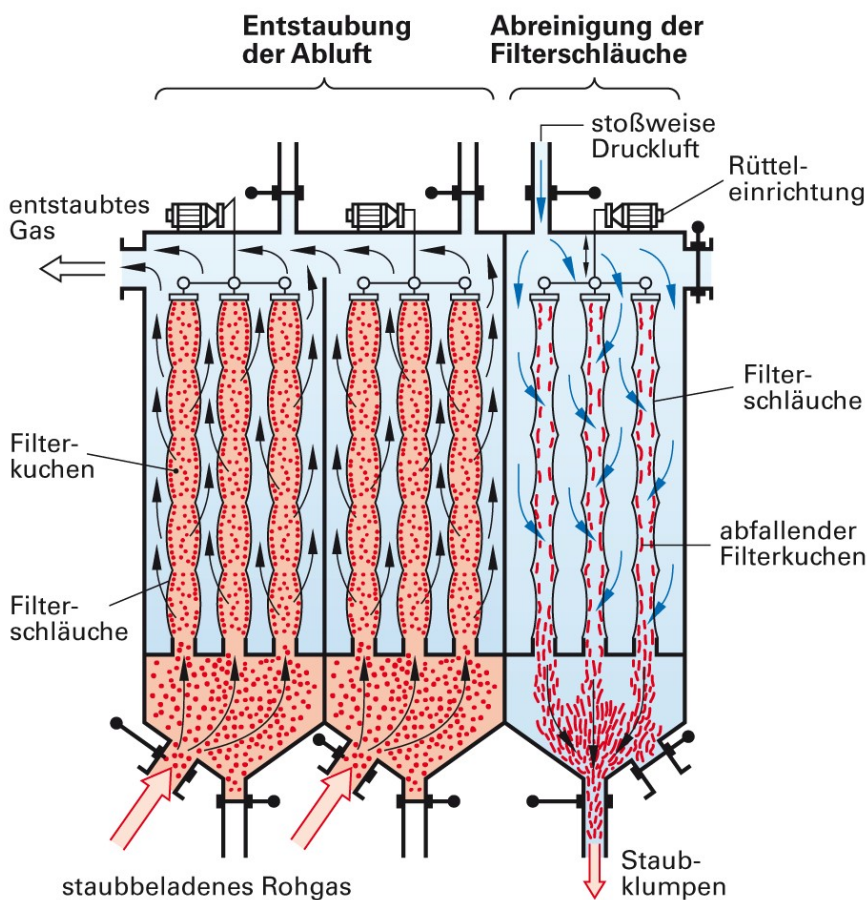


Abb.38: Schlauchfilter-Batterie (Quelle: Europa-Lehrmittel)

6 Nassentstaubung

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.39) erfolgt dadurch, dass die Partikel im Gasstrom aufgrund ihrer **Trägheit** die Wassertropfen nicht umströmen können und auf diese prallen.

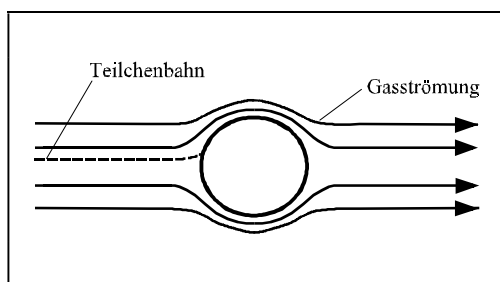


Abb.39: Abscheidung durch Trägheitseffekt

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 μm (**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 darauf geachtet 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**.

Eine Unterteilung der verschiedenen Nassabscheider erfolgt nach den Druckverlusten und dem Energieverbrauch in den Apparaten. Man unterscheidet dabei nachfolgend (in Abb.40) dargestellte Bauarten:

Waschtürme, Strahlwäscher, Wirbelwäscher, Rotationszerstäuber und Venturi-Wäscher.

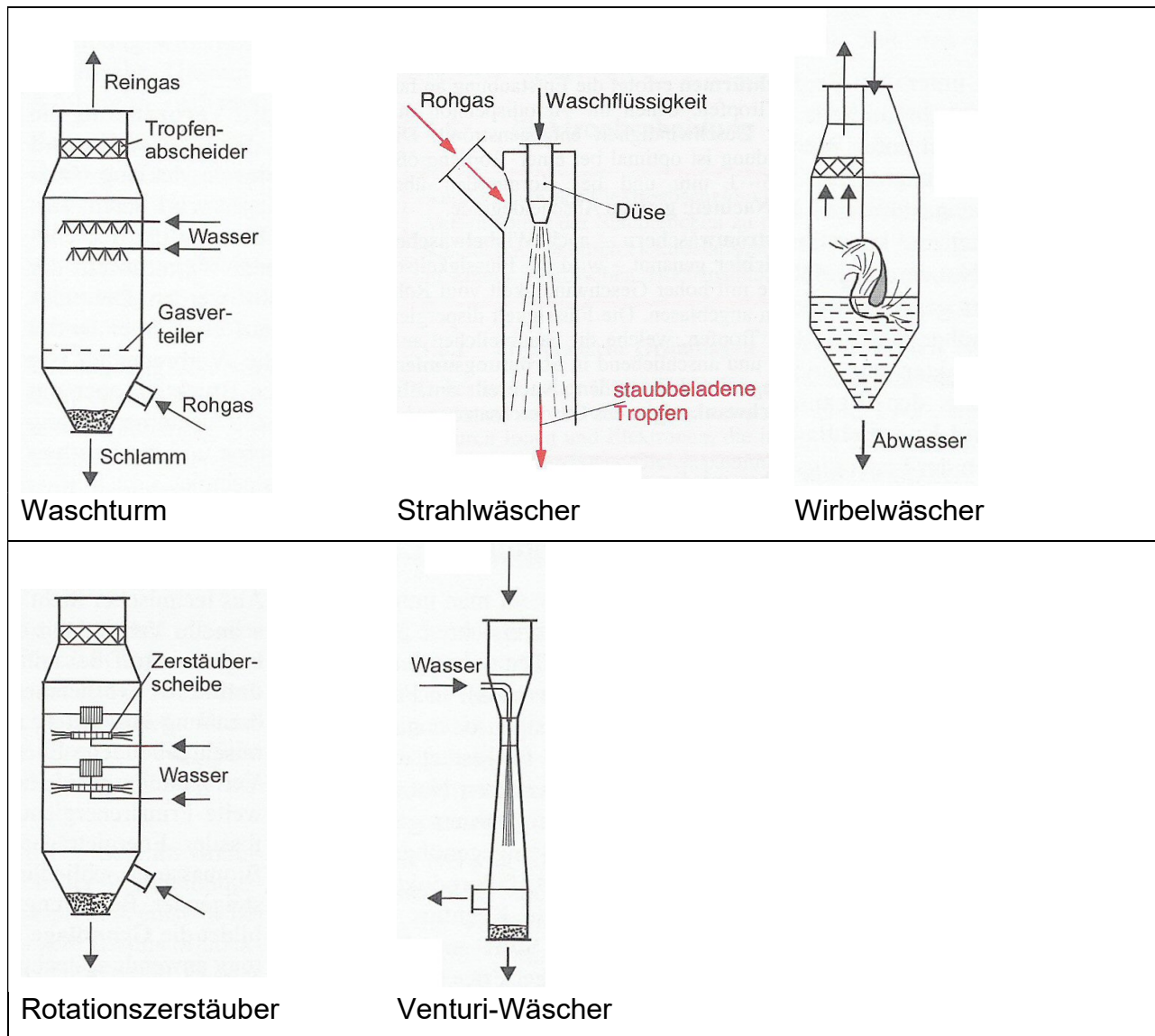


Abb.40: Einteilung von Nassentstaubern (Quelle: Schwister / Taschenbuch der Umwelttechnik und Hemming / Verfahrenstechnik)

Abb.41 gibt einen Überblick dieser Apparate mit ihren jeweiligen Eigenschaften.

Typ	Trennkorngröße [μm]	Abscheidegrad [%]	Wasser-Luft-Verhältnis [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 - 1,0	90 - 95	3 - 6	1 - 2
Rotations-Zerstäuber	0,1 - 0,5	90 - 98	1 - 3 (je Stufe)	2 - 6
Venturi-Wäscher	0,05 - 0,4	96 - 98	0,5 - 6,0	1,5 - 6

Abb.41: Eigenschaften von Nassentstaubern (Quelle: Hemming / Verfahrenstechnik und Dau / Einführung in die Verfahrenstechnik)

Nassentstaubungsvorgänge wird demzufolge zum Gasreinigen verwendet.

7 Elektroabscheidung

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 so genannte Korona-Entladung freie **Elektronen** erzeugt (Abb.42), 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 **Niederschlagslektrode** bezeichnet, und bilden eine Staub- oder Flüssigkeitsschicht.

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

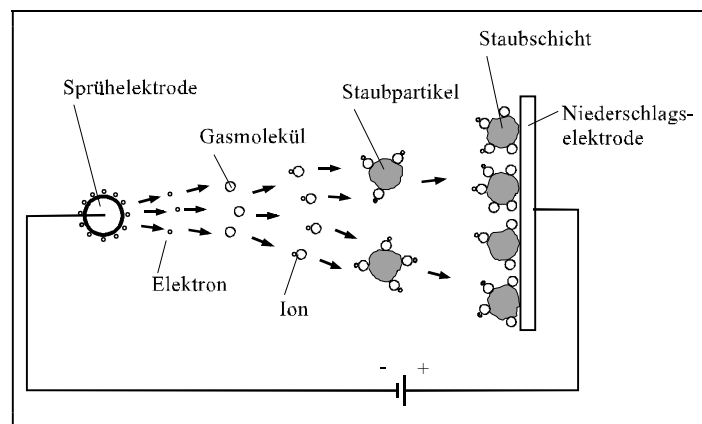


Abb.42: Elektroabscheider

Mit Elektrofiltern können Trennkorngrößen zwischen 0,01 und 50 μm abgeschieden werden, dies 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 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 breit und 7 bis 15 m hoch sein. Zwischen 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.

Elektroabscheidung wird demzufolge zum Gasreinigen verwendet.

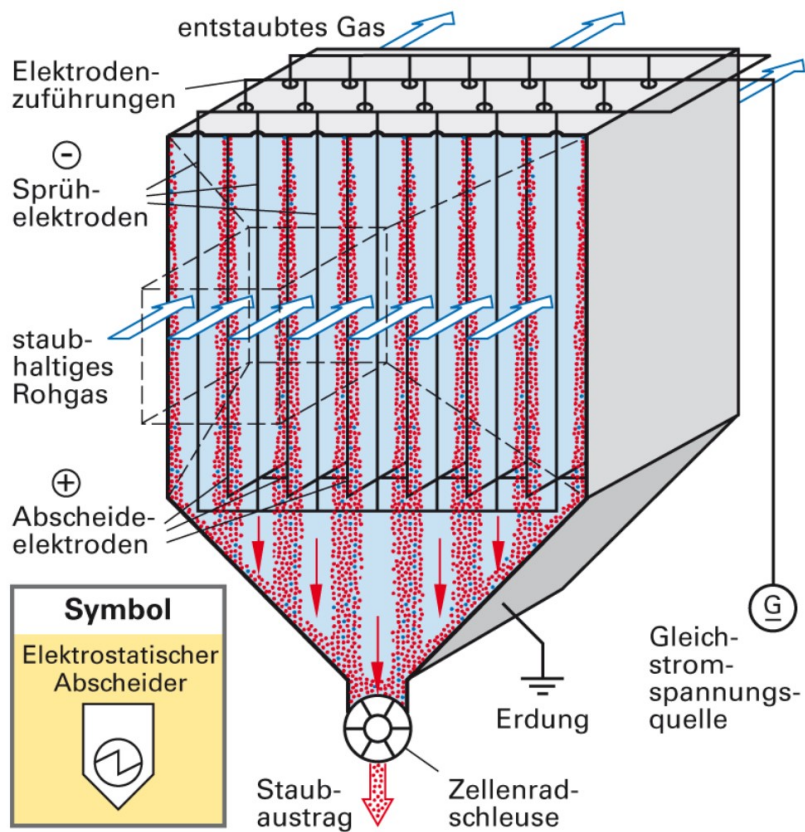


Abb.43: Platten-Elektrofilter (Quelle: Europa-Lehrmittel)