

Abscheiden: EntschlÄmmen und Entstauben (Trennverfahren II)

## 1 Einleitung

## 2 EntschlÄmmen

2.1 Apparate

2.2 Absetz- und Schwarmgeschwindigkeit

2.3 Absetzleistung und spezifische KlÄrflÄchenleistung

## 3 Entstauben

3.1 Apparate

3.2 Theorie der Zyklone (Aero- und Hydrozyklone)

3.2.1 Trennfaktor (BeschleunigungsverhÄltnis)

3.2.2 Absetzgeschwindigkeit

3.2.3 TrennkorngrÖÙe (GrenzkorngrÖÙe, Druckverlust und Durchsatz)

3.2.4 Absetzzeit, Verweilzeit

3.2.5 Abscheidegrad

3.2.6 Strömungsgeschwindigkeiten- und VerhÄltnisse in Hydro- und Aerozyklonen

3.2.7 Durchmesservergleich zwischen Hydro- und Aerozyklon

## 3.3 Theorie der Elektrofilter

3.3.1 Abscheidevorgang

3.3.2 Wanderungsgeschwindigkeit (Absetzgeschw.)

3.3.3 Spezifische NiederschlagsflÄche

3.3.4 Abscheidegrad (Entstaubungsgrad, Trenngrad)

1 EinleitungAbscheiden:

- EntschlÄmmen: Trennung von Partikeln aus Flüssigkeiten

im Schwerkraftfeld: Absetzen, Sedimentieren, Klären, Eindicken, Filtern

im Zentrifugalfeld: Zentrifugieren, Sedimentieren, Filtrieren  
 ↳ TC II/5

mit Differenzdruck: Filtrieren

- Entstauben: Trennung von Partikeln (Tröpfchen) aus Gasen

Trennung durch	Trennapparat	Trennbereich $\mu\text{m}$	Druckverlust mbar	Abscheidegrad %	Energiebedarf kWh/1000 m <sup>3</sup>
Schwerkraft, auch Prall oder Stoß	<i>AbsetzrÄume</i> Absetzkammern Prallfilter T, (F)	>150	0,5	<80	
Zentrifugalkraft	<i>Zyklone</i> (F), T Feinzyklone, Multi- zyklone, Grobzyklone	>10 (>2)	5 bis 15	70 bis 98	
Siebwirkung	<u>Porenfilter</u> Gewebefilter, Filterkerzen (T), Sandschichtfilter	>0,2 (>0,1)	2 bis 20	>99	0,4 bis 0,8
Benetzung	<i>Nassabscheider</i> <i>WÄscher</i> (F, T) → VenturiwÄscher, Sprühabscheider, Desintegratoren	>1 (>0,1)	10 bis 150	>99	5 bis 6
Elektrische Feldkräfte	<u>Elektrofilter</u> <i>VEGRJ</i> F, T trockene EGR nasse EGR	>2 (>0,03)	0,2 bis 1	>99	0,05 bis 1

Tab. 1 Abscheiden von Staub und Tropfen. – F auch für feuchte Gase geeignet; T auch für Tropfenabscheidung geeignet; (...) Angaben beziehen sich nur auf Sonderfälle.

Suspensionen (Partikel in Flüssigkeit)	grob	fein	trübe	Suspensioide
$d_K [\mu\text{m}]$	> 100	100...0.5	0.5...0.1	0.1...0.001

Trennung von Suspensionen:  $\longrightarrow$  EntschlÄmmen

Emulsionen: Tröpfchen (disperse Phase) in einer Flüssigkeit (Dispersionsphase), Trennung in Zentrifugen

SchÄume: Gasblasen in einer Flüssigkeit. Schaumbildung: Flotation auf Seen und Flüssen (Umwelt); Schaumbekämpfung: Zentrifugen, Ultraschallbestrahlung

StÄube, Rauch, Nebel (Aerosole): feste Partikel oder Tröpfchen in Gasen

StÄube / Nebel	Wasser verdüst	Zement	Kohle	Farbstoffe Pigmente	Fließbett- und Flugstaubverf. sowie bei pneu- mat. Fördern
$d_K [\mu\text{m}]$	40..200	10..100	10.. 100	2...10	bis 5 mm

Rauch/ Nebel	ZnO	Hütten- rauch	Ölnebel	NH <sub>4</sub> Cl H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Kondensation v. DÄmpfen; oder feste Teilchen + Tröpfchen durch chem. Reaktion
$d_K [\mu\text{m}]$	0.03...0.3	0.01...1	0.05...1	0,1..1	0,005...3

$d_K \approx 3 \mu\text{m}$ : kritische Teilchengröße bei Aerosolen im Schwerfeld, wegen Brown'scher Molekularbewegung.

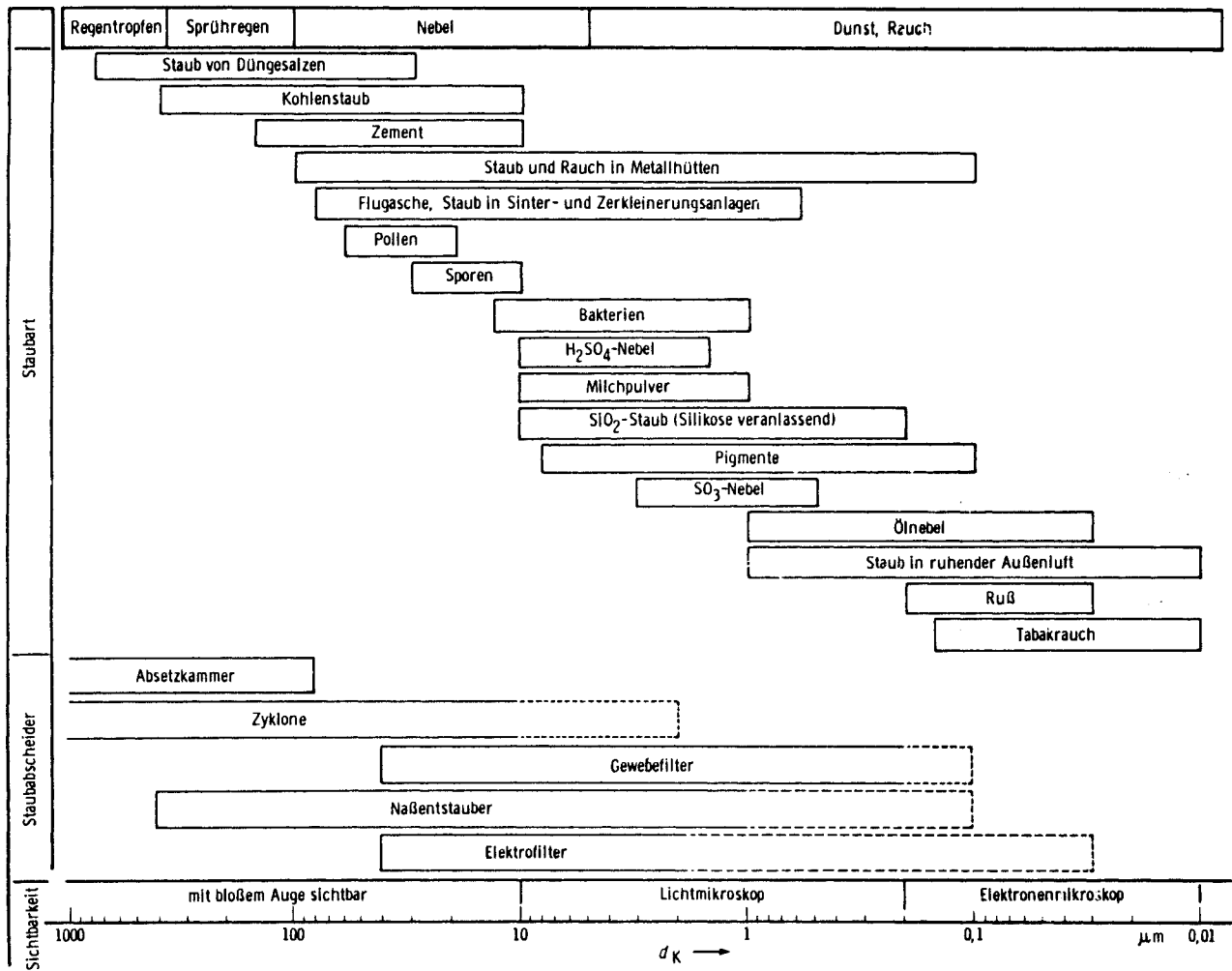


Abb. 1 Korngrößenbereiche industrieller Stäube und zugehörige Abscheider

Folgerung: Abscheiden erlangt zunehmend Bedeutung im Bereich des Umweltschutzes

## 2 EntschlÄmmen

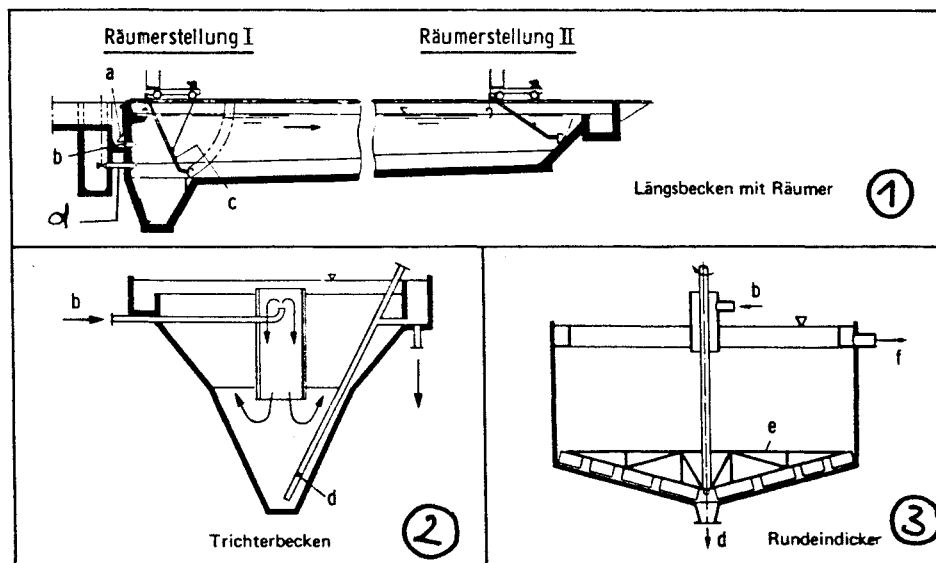
zunehmend kontinuierlich (d.h. R¼ckstand wird stÄndig entfernt);

halbkontinuierlich: R¼ckstand wird periodisch entfernt

Dekantieren: Gewinnen der sich absetzenden R¼ckstÄnde (z. B. Pigmente, Mineralien, Salze)

AbschlÄmmen: Gewinnen der klaren Suspensionsfl¼ssigkeit

### 2.1 Apparate



**Abb. 2** Absetzbecken – a) Einlaufschürze; b) Zulauf; c) RÄumerschild; d) SchlÄmmabzug; e) KrÄhlwerk; f) geklÄrte Fl¼ssigkeit.

- 1 f¼r kommunale und industrielle Abwasserreinigung; quasi-kontinuierlich
- 2 f¼r die KlÄrung kommunaler AbwÄsser
- 3 sehr gute KlÄrwirkung; bis  $> 130$  m Durchmesser; bis 3000 t Feststoff/Tag; besonders in der Zellstoff- und R¼benzuckerindustrie; auch Mehretagen-Eindicker
- 4 Hydrozyklone ( $\rightarrow$  TC II/5) : Durchmesser  $\approx 1$  bis 100 cm

## 2.2 Absetz- und Schwarmgeschwindigkeit

Es gelten - im Prinzip - die Formeln für die Sinkgeschwindigkeit  $u_{rel}$  und der Trennkorngröße  $d_T$  beim Klassieren ( $\rightarrow$  TC II/3, Tab. 1 ). Allerdings muß diese  $u_{rel}$  i.a. stark korrigiert werden, da die Absetzgeschw.  $u_a \ll u_{rel}$  sind. Dies ist durch Sedimentationsstörungen bedingt, wobei drei Absetzphasen durchlaufen werden:

1. Absetzphase (Klärung ohne WW zwischen den Partikeln)  
(d.h. ungestörte Absetzphase) :

$$u_a = f(d_K, \text{Partikelform, Partikelgrößenverteilung}).$$

2. Absetzphase (Zwischenzone mit WW zwischen Partikeln):

- Partikel-Wechselwirkungen (WW)
- Grenzflächenvorgänge
- Ausweichströme verdrängter Flüssigkeit zwischen den sinkenden Partikeln
- das sinkende Partikel-Kollektiv bildet scharfe Grenzfläche Schlamm/Klärflüssigkeit. Es sinkt mit der Schwarmgeschwindigkeit  $u_{Sch}$  ab:

$$u_{Sch} \ll u_a \approx u_{rel} \quad , \quad \text{wenn}$$

$$u_{Sch} = u_a e^{-ac_{Sus}}$$

$c_{Sus}$  : Suspensionskonz.;  
 $a$  : Konstante

z. B.  $c_{Sus} = 50 \text{ Vol.}\%$  :  $u_{Sch} = 0.02 u_a$

Angenähert ist:

$$u_{Sch} \approx u_{rel} \left( \rho_f = \rho_{Sus} \cdot \gamma = \gamma_{Sus} \right)$$

### 3. Absetzphase

- Kompression (Verdichtung) des Schlammes

$u_{Sch}$ : z. Z. nicht berechenbar  $\Rightarrow$  Absetzversuche in Standgläsern

Disperse Phase	Feinsalz	Lithopone Weißpigment (ZnS/ BaSO <sub>4</sub> )	Rohkreide gemahlen	Kaolin Ton	Rotschlamm
$u_{Sch}$ [m/h]	2 bis 6	1,4	0,2	0,08	0,25 bis 0,3

für  $u_{Sch} < 0.05$  m/h: Einsatz von Schwerkraften ist unwirtschaftlich

Erhöhung der Absetzgeschwindigkeit  $u_a$  durch:

- Koagulation : Bildung von Mikroflocken
- Flockung : Bildung von Makroflocken

erreichbar durch Flockungsmittel (Kalkmilch, Eisenchlorid, Al-sulfat, aktive Kieselsäure, wasserlösliche fadenförmige Polymere, wie Polyamide, Polyacrylate) sowie durch spezielle Eintragungsvorrichtungen und Paddelrührwerke.

Die flockigen Schäume sind sehr wasserhaltig und zerfallen teilweise in Wehren und Kreiselpumpen.

Zusammensetzung des Schlammes Feststoffe	Flüssigkeit	$u_{Sch}$ m/h	$\dot{s}$ m <sup>2</sup> /(t h)
Feinsalz	Salzsole	2 bis 6	2,7 bis 3,9
Schwerspat, fein gemahlen	H <sub>2</sub> O	1,0	2,3 bis 5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3 H <sub>2</sub> O, gefällt	Aluminatlösung	0,15 bis 0,5	8 bis 19
Lithopone	verd. Lösung	1,4	20
Eisenoxid-Farbe	verd. Lösung	1 bis 1,2	24
CaCO <sub>3</sub> , gefällt	NaOH-Lösung	0,15 bis 0,25	40
Rohkreide, fein gemahlen	H <sub>2</sub> O	0,2	70
Titanweiß (TiO <sub>2</sub> )	verd. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,1 bis 0,3	70 bis 80
Kalkmilch 8-10%		0,2	112
Kaolin, Ton	H <sub>2</sub> O	0,08; 0,7 mit CaO Zusatz	120 bis 160
Rotschlamm (BAYER-Verf.)	Aluminatlösung	0,25 bis 0,3	185
Feinbraunkohle	H <sub>2</sub> O		> 300

Tab. 2 Typische Werte für die Absetzgeschwindigkeit  $u_{Sch}$  und die spezifische Klärflächenleistung  $\dot{s}$ .

## 2.3 Absatzleistung und spezifische Klärflächenleistung

a) ungestörte Absatzphase (verdünnte Suspensionen)

$$\dot{V}_{in} = k S u_a \quad (1a)$$

$\dot{V}_{in}$  = Absatz(Durchsatz-)leistung

$k$  = Sicherheitsfaktor ( $k=0,7$  bis  $0,8$ )

$S$  = Klärfläche

$u_a = u_{rel}$  : Absatzgeschw.

$$S = \frac{1}{k} \frac{\dot{V}_{in}}{u_a} \quad (1b)$$

b) bei gestörter Absatzphase (3. Absatzphase) gilt:

$$S = \frac{1}{k} \frac{\dot{V}_{in}}{u_{Sch,max}} \quad u_{Sch,max} : \text{max. Schwarmgeschwindigkeit} \ll u_a \quad (2)$$

Klärflächenbelastung  $q$

$$q = \frac{\dot{V}_{in}}{S} \quad \text{in } \frac{\text{m}^3}{\text{h m}^2} \quad q = 2 \text{ bis } 6 \text{ m}^3 / (\text{h m}^2) \quad (3)$$

Verweilzeit (Durchflußzeit)  $t_v$

$$t_v = \frac{V_{\text{Becken}}}{\dot{V}_{in}} \quad (4a)$$

$$t_v = \frac{b \cdot l \cdot h}{\dot{V}_{in}} \quad b, l, h = \text{Breite, Länge und Höhe des Klärbeckens} \quad (4 b)$$

$$t_v = \text{bis } 2h \text{ (Kommunalbereich)}$$

Folgerung aus Gl.(1a):

wegen  $\dot{V}_{in} \sim S$  : mögl. große Klärfläche, Höhe des Beckens geht nicht ein (  $\rightarrow$  Mehretagen-Becken)



spezifische Klärflächenleistung  $\dot{S}$

$$\dot{S} = \frac{S}{\dot{V}_{in} C_{s,in} t_v^2} \quad \text{in} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{t h}} \quad (5 \text{ a})$$

$C_{s,in}$  = Feststoffkonz. der Zulaufsuspension

$\dot{S}$  ist umso besser, je kleiner der Zahlenwert von  $\dot{S}$  ist.

mit  $\dot{V}_{in}$  aus (2) folgt aus (5 a):

$$\dot{S} = \frac{1}{k u_{sch,max} C_{s,in} t_v^2} \quad (5 \text{ b})$$

$$\dot{S} \sim \frac{1}{u_{sch,max}} \Rightarrow \text{Tab. 2}$$

### 3 Entstauben

Sehr viele industrielle Prozesse sind mit der Staubentwicklung behaftet:

- Kraftwerke
- Eisen- und Metallhütten
- Röst- und Zementöfen
- Müllverbrennungsanlagen
- Zerkleinerungs-, Sieb- und Sintermaschinen
- Gewinnung von Pigmenten, Farbstoffen, Füllstoffen

Die Abscheidung von Stäuben und Nebeln aus Gasen muß erfolgen:

- wegen Umweltschutz
- um nachgeschaltete Apparate vor Erosion, Verstopfung und sonstige Schäden zu bewahren
- zur Gewinnung von staubförmigen Produkten (z.B. metallhaltige Stäube)

Prinzip der Entstaubungsverfahren:

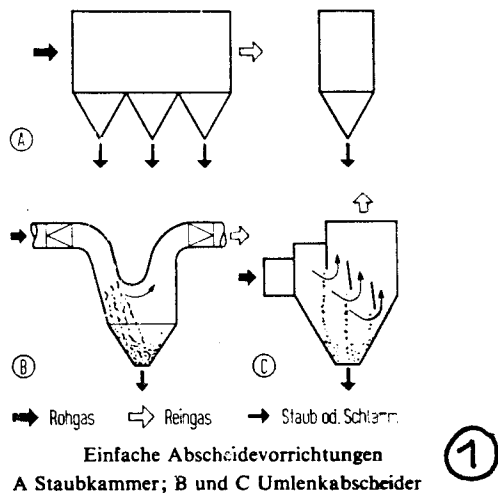
Erzeugen von  $u_{rel}$  zwischen Partikel und Trägergas durch äußere Kräfte.

Für die Entstauberauswahl müssen u. a. beachtet werden:

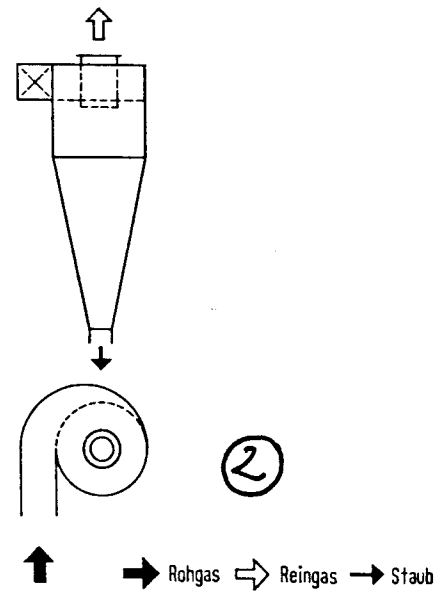
- geograph. Höhe und meteorologische Bedingungen am Aufstellort
- Umweltschutz oder zur Materialrückgewinnung
- Anzahl der Entstauber
- Gastemperatur
- physik., chem. Eigenschaften des Gases und Feststoffteilchen
- Rohgasstaubgehalt ( $\text{g/m}^3$ )
- Rohgas-Staubkörnung
- Staubkonz. am Austritt (Sichtbarkeitsgrenze bei  $50 \dots 100 \text{ mg/m}^3$ ) (Reingasstaubgehalt)
- gesetzliche Emissionswerte:  $\leq 150 \text{ mg/m}^3$  \*  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 bar
- Kosten, Ersatzteilbedarf und bisherige Erfahrungen bei ähnlichen Anwendungsfällen

### 3.1 Apparate

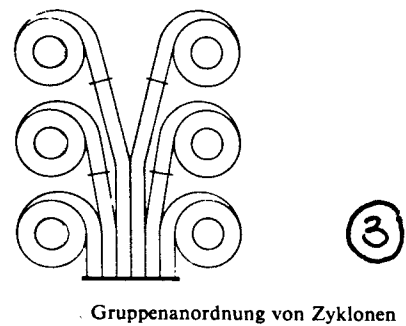
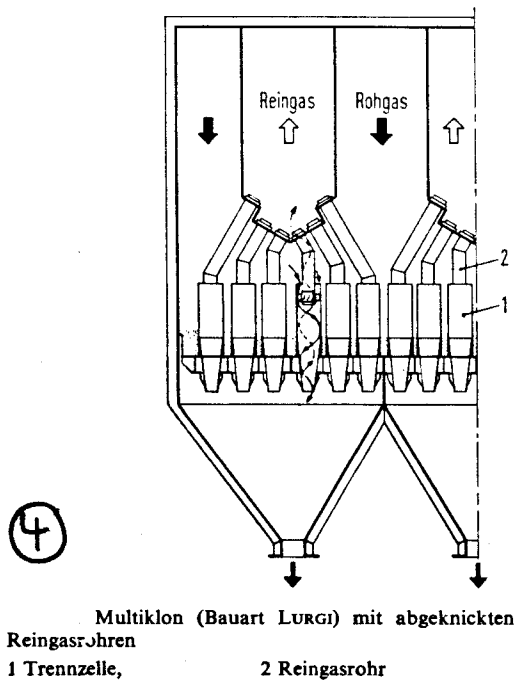
#### Absetzkammern



#### Zyklone (Fliehkraftabscheider)

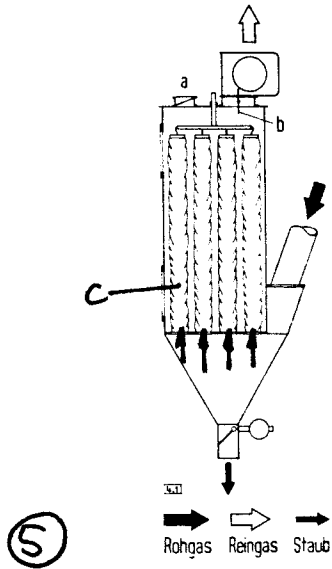


Zyklon mit tangenalem Gaseintritt,

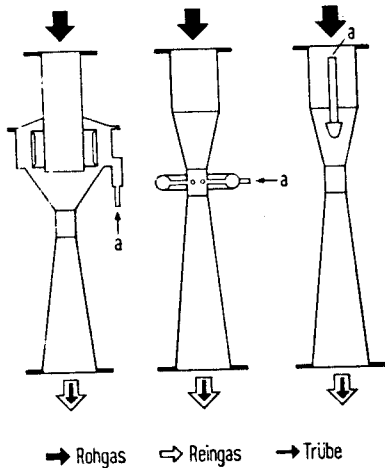


(Vielzellenabscheider, Multizyklon)

Schlauchfilter



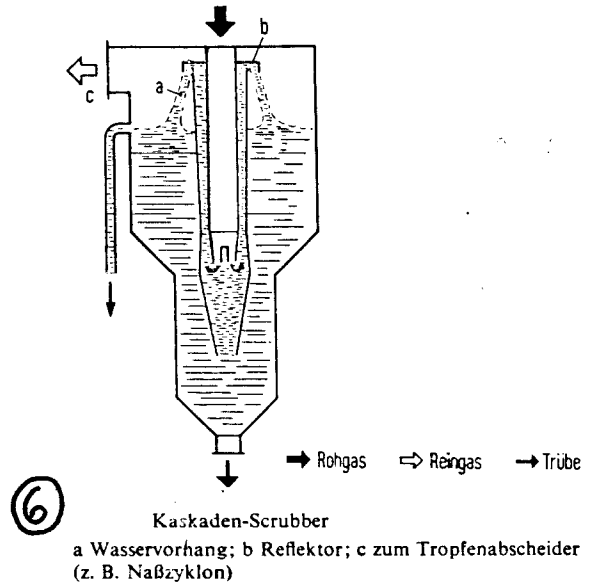
Filterkammer mit Schlauchfiltern  
 a Spüllufteintritt; b Reingasklappe  
 c Gewebeschlände



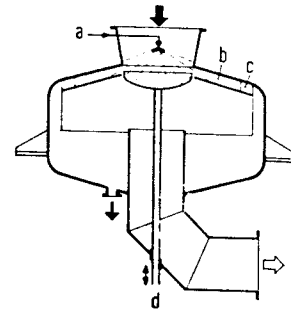
Verschiedene Venturi-Bauarten  
 a Waschwasserzuführung

Abb. 3 Staubabscheider

Wäscher (Naßentstauber)

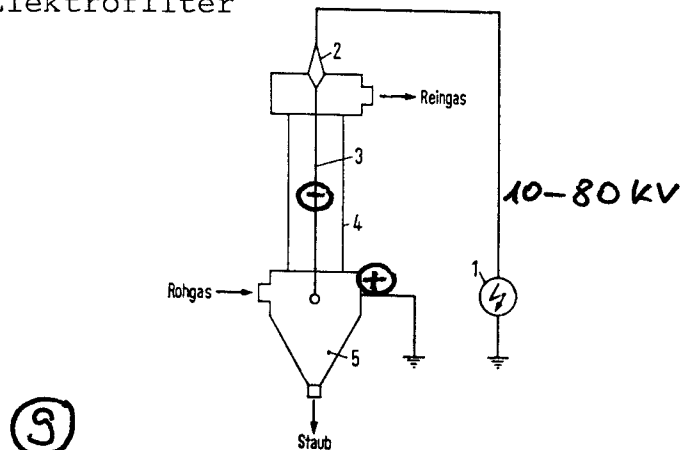


Kaskaden-Scrubber  
 a Wasservorhang; b Reflektor; c zum Tropfenabscheider  
 (z. B. Naßzyklon)



Radialstromwäscher (Bauart LURGI)  
 a Flüssigkeitszufuhr durch Sprühdüse; b radialer Venturikörper; c Drallschaufeln; d Regelvorrichtung

Elektrofilter



Grundform des Elektrofilters (EGR)  
 1 Hochspannungserzeuger; 2 Isolator; 3 Sprühdraht;  
 4 Rohrelektrode; 5 Staubsammelbunker

- 1 schlechter Wirkungsgrad, nehmen viel Raum ein  $\Rightarrow$  verdrängt durch Zyklone und andere Filter
- 2 unkomplizierte Bauweise, hohe Betriebssicherheit, geringer Platzbedarf, niedrige Kosten, für größte Gasmengen, Grobstäube ( $> 5\mu\text{m}$ ), hohe Rohgasstaubgehalte ( $>$  mehrere  $100\text{ g/m}^3$ ), Vorentstaubung (zur Entlastung von Filtern), Gase können hohe Temp. aufweisen, Abscheidegrad für nicht zu hohe Anforderungen, Durchmesser (Aerozyklone):  $\approx 50$  bis  $600\text{ cm}$ .
- 3 bei sehr hohem Rohgasstaubgehalt und für sehr große Rohgasmengen, jedoch komplizierte Rohgaszuführungs- und Reingassammelleitungen; Durchmesser der Einzelzyklone  $\approx 1\text{ m}$
- 4 für Entstaubung großer Gasmengen bis mehrere  $100\text{ m}^3/\text{s}$ ; Durchmesser der Entstauberelemente:  $\approx 5$  bis  $30\text{ cm}$ ; einfache Zu- und Ableitungen, geringer Raumbedarf, niedrige Investitionskosten beliebige Grundrißformate und Bautiefen, wegen abgeknickten Reingasrohren (keine Ansatzbildung)
- 5 für hohe Anforderungen an den Entstaubungsgrad; für  $d_K$  bis  $\approx 0.1\mu\text{m}$ ; Reingasstaubgehalte  $\leq 30\text{ mg/m}^3$ ; Prallwirkung, Diffusion, Gravitation, elektrostatische Kräfte; das Rohgas durchströmt die Schläuche von innen nach außen; Filtergewebe soll mögl. gut gasdurchlässig sein und hohes Rückhaltevermögen für Partikel besitzen.

Luftfilter: Matten aus Metallspänen, Glas- oder chem. Fasern, Papier

Filterkerzen: poröse, keramische, metallische oder Kunststoff-Formkörper; Gas strömt durch Hohlzylinder von außen nach innen; für Feinstreinigung von Gasen mit sehr geringem Staubgehalt.

- 6 für Feinststäube ( $\leq 2\mu\text{m}$ ), die mehrere  $100\text{ mm WS}$  Druckverlust erfordern; neben Abscheidung von Stäuben wird das Rohgas gekühlt und gasförmige Verunreinigung absorbiert  $\Rightarrow$  Abwasserprobleme (Nebelschwaden durch im Abwasser gelöste Gase, Frost- und Korrosionsschäden, Toxizität).
- 7 ohne bewegte Teile, hohe Entstaubungsgrade auch für Feinststäube ( $\leq 2\mu\text{m}$ ); durch große Gasgeschw. von  $20$  bis  $300\text{ m/s}$  intensive WW zwischen Gas und Waschwasser; Wasserbedarf:  $0.3$  bis  $1\text{ l/m}^3$ , bei Kühlung oder Auswaschung bis  $5\text{ l}$ ; in der chem. Technik weit verbreitet.
- 8 für große Rohgasmengen: Venturi-Wäscher in Rechteck-Ausführung, gute Verteilung des Waschwassers über den (großen) Querschnitt durch Sprühdüse

9 Aufwand für Personal, Material, Betrieb und Wartung ist sehr gering, da Anlagen automatisiert sind; geringer Verschleiß (Erosion), da  $u$  und  $\Delta p$  gering sind; zahlreiche Anwendungsgebiete, weite Verbreitung z. B. chem. Industrie ( $\text{SO}_2$ -haltige Gasreinigung), Eisenhütten- und Stahlwerke (Gichtgas, Konverterabgase), Zementwerke, Rauchgase, Müllverbrennungsanlagen, Luftreinigung (Tabakrauch).

### 3.2 Theorie der Zyklone (Aero- und Hydrozyklone)

#### 3.2.1 Trennfaktor (Beschleunigungsverhältnis)

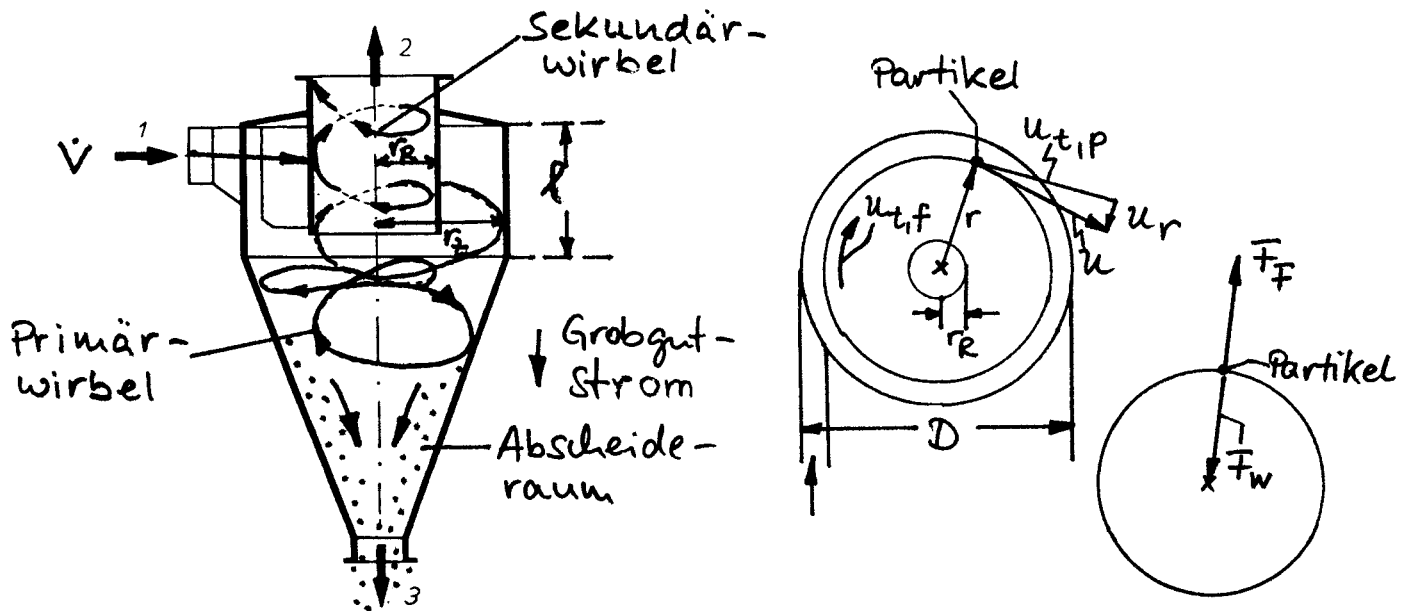


Abb. 4 Standardaerozyklon und Berechnungsgrundlagen  
 1 Rohgaseintritt; 2 Reingasaustritt über axiales Tauchrohr; 3 Staubaustritt

- $\dot{V}$  : Luftdurchsatz
- $u_{t,p}$  : tangentielle oder Umfangsgeschw. der Partikel auf einer Kreisbahn mit dem Radius  $r$
- $D$  : Durchmesser des zylindr. Wirbelraums
- $u_r$  : radiale Geschw. der Partikel
- $u$  : absolute Geschw. der Partikel
- $u_{t,f} \neq u_{t,p}$  : Umfangsgeschw. des Fluids  $f$  (Strömung)
- $a(r)$  : Zentrifugalbeschleunigung in radialer Richtung
- $l$  : Höhe der Trennkammer

Für die Zentrifugalkraft (Fliehkraft)  $F_F$  gilt:

$$F_F = m_s a(r) = m_s \frac{u_{t,p}^2}{r} \equiv \rho_s v_s \frac{u_{t,p}^2(r)}{r} \quad (6)$$

Der Trennfaktor (Beschleunigungsverhältnis) ist:

$$z \equiv \frac{a(r)}{g} = \frac{u_{t,p}^2(r)}{r g} \quad (7)$$

Aerozyklone:  $z \approx 4$  bis 200

Hydrozyklone:  $z \approx 10^3$  bis  $10^4$

Bemerkung zu Gl.(7):

Wegen der Gefahr von Verstopfungen liegt die untere Grenze für den Aerozyklon-Durchmesser bei  $D > 5$  bis 30 cm.

### 3.2.2 Absetzgeschwindigkeit

Bei den Hydrozyklonen gilt die Kräftebilanz analog zur laminaren Sedimentation:

$$F_W = F_F - F_A \quad (8a)$$

oder

$$\text{mit } w_K(\text{Re}) = 24/\text{Re} \left[ \text{analog Gl. (8b), TCII/3} \right]$$

$$u_{\text{rel}} \equiv u_a = \frac{d_K^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \eta} a(r) \quad \text{Hydrozyklone (8b)}$$

worin die Fallbeschleunigung  $g$  durch  $a(r) \equiv z g = \frac{u_{t,p}^2}{r}$  ersetzt wurde.

Nach Gl.(8b) folgt sofort die Begründung der besseren Trennwirkung bei größerem  $z > 1$ , infolge erhöhtem  $u_a (\approx z)$ .

Für Aerozyklone spielt der Auftrieb  $F_A$  in der Kräftebilanz keine Rolle ( $F_A=0$ ):

$$F_W = F_F \quad (8c)$$

oder für den laminaren Bereich ( $w_K = \frac{24}{Re}$ ) folgt aus Gl. (8c):

$$u_{rel} \equiv u_a = \frac{d_K^2 \rho_s}{18 \eta} a(r) \quad \text{Aerozyklone} \quad (8d)$$

### 3.2.3 Trennkorngröße

Für Hydrozyklone ergibt sich die Trennkorngröße  $d_T$  aus der Bedingung

$$u_{rel} = q \quad (9a)$$

worin mit Gl. (8b) für  $a(r) = Z g$  folgt:

$$d_T = \sqrt{\frac{18 \eta \cdot q}{(\rho_s - \rho_f) Z g}} \quad (9b)$$

$\Rightarrow d_T \sim \frac{1}{Z}$  : bessere Trennwirkung (Z groß) kleineres  $d_T$

Mit  $Z g = (D/2)^{-1} u^2$  und  $\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{Sus} u^2$  ergibt sich aus Gl. (9b):

$$d_T = \sqrt{\frac{18 \eta q D \rho_{Sus}}{(\rho_s - \rho_f) 4 \Delta p}} \quad (9c)$$

$\Delta p$  : Druckverlust im Hydrozyklon

$$\Delta p \sim u^2 \sim \dot{v}^2 / D^4$$

Halbempirisch gilt für  $\dot{v}$ :

$$\dot{v} = \alpha D^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_{Sus}}} \Rightarrow q = \frac{\dot{v}}{r D \ell} = \frac{\alpha}{\pi} \frac{D}{\ell} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_{Sus}}} \quad (9d)$$



Gl.(9d) in Gl.(9c):

$$d_T = \sqrt[4]{\frac{\alpha \cdot 18 \gamma}{4 \pi (\rho_s - \rho_f) \sqrt{\ell}} \frac{D}{\sqrt{\Delta p}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{sus}}{\Delta p}}} \quad (9e)$$

Hydrozyklone

$\rho_{sus}$  : Dichte der Suspension  
 $\rho_f$  : Dichte der Flüssigkeit

Gl.(9c) ist noch stark vereinfacht und  $d_T \sim \frac{D}{\sqrt{\ell}} \sim \frac{D}{\sqrt{D}} \sim \sqrt{D}$  gilt nur für einen schmalen Baugößenbereich.

Bei Aerozyklone gilt folgendes:

Im Kräftegleichgewicht  $F_w = F_F$  ändert die Partikel ihre radiale Lage nicht. Durch die axiale Geschw.-komponente des Fluids (Gasdurchfluß  $\dot{V}$ ,  $F_G$  und Sekundärströmungen) wird sie jedoch nach unten gedrückt und abgeschieden.

Für die Grenzkorngröße  $d_T$  gilt die Bedingung:

$$u_{rel} = u_{t,p} \quad (10a)$$

Mit Gl.(8d) folgt für  $a(r) = \frac{u_{t,p}^2}{r}$

$$d_T = \sqrt{\frac{12 \nu r \rho_f}{\rho_s u_{t,p}}} \quad (10b)$$

Eine genauere Berechnung führt zu:

$$d_T = \sqrt[3]{\frac{\nu \rho_f (r_z - r_R)}{\pi N u_{t,p} \rho_s}} \quad (10c)$$

Aerozyklone

$r_z - r_R$  : Absetzweg

$N \approx 1,5$  : Zahl der Umläufe des Gases um das Tauchrohr

Druckverlust und Durchsatz

$$\Delta p = W \frac{1}{2} S_f u_D^2 \quad (11a)$$

$u_D$ : fiktive axiale Gasgeschwindigkeit

mit

W: Widerstandsziffer

$$u_D = \frac{\dot{V}}{\pi D^2/4} \quad (11b)$$

folgt

$$\Delta p = W \frac{8}{\pi^2} S_f \frac{\dot{V}^2}{D^4} \quad (11c)$$

⇒ für große Durchsätze steigt  $\Delta p \sim \dot{V}^2$  ( $D = \text{const.}$ ) stark an.  
 Größeres D ist jedoch schlecht, da wegen  $a(D) \sim 1/D^{2p_1+1}$  der  
 Trennfaktor Z stark abnimmt ⇒ Multizyklone (Aero- oder  
 Hydrozyklone), d.h. Parallelschaltung vieler kleinerer Zykclone.

### 3.2.4 Absetzzeit, Verweilzeit

Für Aerozyklone gelten:

Absetzzeit  $t_a$  des Staubes

$$t_a \equiv \frac{r_Z - r_R}{u_a} \quad (12a)$$

Verweilzeit  $t_v$  des Gases im Aerozyklon:

$$t_v \equiv \frac{V_Z}{\dot{V}} = \frac{A l}{A u} = \frac{2\pi r_Z N}{u_{t,p}} \quad (12b)$$

$$\boxed{t_v = t_a} \quad (12c)$$

$t_v < t_a$  : Staub setzt sich unvollständig ab

$t_v > t_a$  : unnötig lange Verweilzeit

aus Gln. (12a) und (12b) folgt aus (12c) für die Dimensionierung  
 von Aerozyklonen:

$$\boxed{\frac{r_Z}{r_R} = \frac{1}{1 - \frac{2\pi N u_a}{u_{t,p}(r)^{0.4}}} \quad (12d)}$$

### 3.2.5 Abscheidegrad

Es gelten die Gln. (1), (2a), (2b) für Trenngrad  $T$ , Gesamtstaubungsgrad (Fraktionsentstaubungsgrad)  $T_{ges}$  und Durchlaßgrad  $P$  ( $\rightarrow$  TC II/3):

$$T_{ges} = 1 - P \equiv 1 - \frac{c_{K,FG}}{c_{K,in}} \quad (13)$$

$$\equiv 1 - \frac{c_{K,ex}}{c_{K,in}}$$

$c_{K,FG} \equiv c_{K,ex}$ : Staubkonz. im Reingas  
(g/cm<sup>3</sup>)

$c_{K,in}$ : Staubkonz. im Rohgas  
(g/cm<sup>3</sup>)

$T_{ges}$  lässt sich bisher nicht berechnen, da er von vielen Einflußgrößen abhängt:

$$T_{ges} = f(d_K, z^{a_1} t_V^{a_2} c_{K,in}^{a_3} \frac{1}{\gamma_f^{a_4}} \frac{1}{(v_z - v_R)^{a_5}})$$

Koagulation, Zermahlung harter Partikel )  
 $T_{ges}$  nimmt zu     $T_{ges}$  fällt

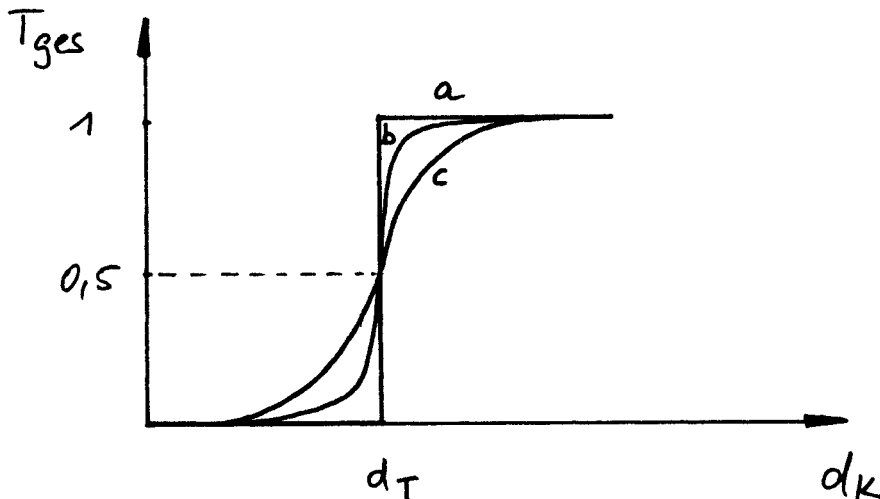


Abb. 5 Kennlinien des Fraktionsentstaubungsgrades  $T_{ges}(d_K)$

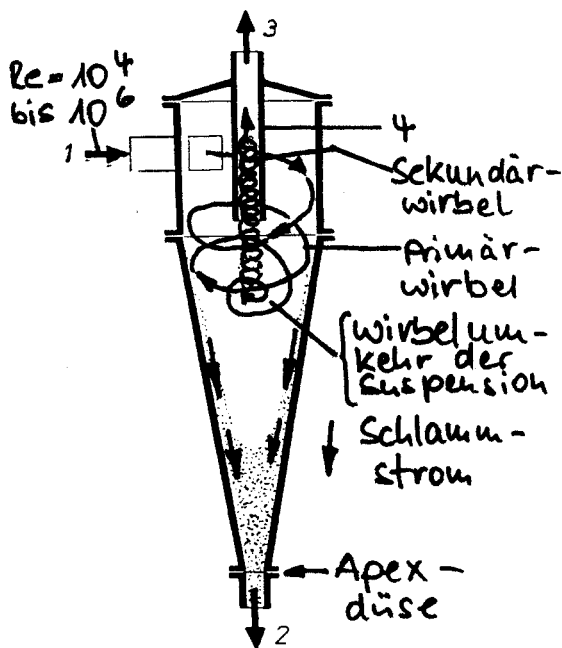
a: theor. Entstaubungskurve (alle Körner mit  $d_K > d_T$  werden abgeschieden, alle Körner mit  $d_K < d_T$  gelangen ins Reingas)

b,c: reale Kennlinien, je steiler die Kurve, umso trennschärfer

Erklärung für  $T_{ges}(d_K)$  : im Bereich des Stokes'schen Gesetzes der Zyklone gilt  $u_{rel} \sim d_K^2$

### 3.2.6 Strömungsgeschwindigkeiten- und Verhältnisse in Hydro- und Aerozyklonen

Die spiralförmig kreisende Umlaufströmung (Spiralströmung, logarithmische Spirale) bildet eine stabile Wirbelsenke mit einem Luftkern an der Kegelachse, der etwa den Durchmesser des axialen Tauchrohrs (Wirbelsucher) hat.



Das dreidimensionale Strömungsfeld weicht von einer idealen\* Wirbelsenke ab durch:

- Zustrom
- Wandreibung
- innere Reibung des Fluids
- Abstrom
- Zyklon-Kegel

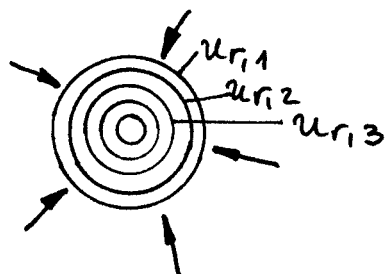
→ es gibt nur Näherungsrechnungen.

Abb 6 Hydrozyklon

- 1 Suspensionseintritt (Einlauf); 2 Schlammaustritt (Unterlauf);
- 3 Austritt der Klarflüssigkeit durch den Wirbelsucher (Überlauf)
- 4 Tauchrohr (Wirbelsucher)

\* ideale Wirbelsenke:

Kombination aus Wirbel und Senke



$$u_{r,1} < u_{r,2} < u_{r,3}$$

$$r \cdot u_r = \text{const}$$

Zwischen der Umfangsgeschwindigkeit  $u_{t,f}$  ( $\neq u_{t,p}$ ) des Fluids und der radialen Koordinate  $r$  des Zyklons gilt:

$$\boxed{u_{t,f} r^{p_1} = c_1} \quad \text{Hydro- und Aerozyklone} \quad (14)$$

$c_1$ : Konstante

$p_1 = f$  (Anwesenheit von Partikeln)

$p_1 = 1$  : reibungsfreie Wirbelströmung (Erhaltung des Drehmoments)

$0.5 \leq p_1 \leq 0.85$ : reibungsbehaftete Wirbelströmung

$p_1 = 0.5$  : Industriezyklone (z.B. auch Planeten, Elektronen)

$p_1 = -1$  : starre Körper (z.B. Zentrifugen), Wirbelkern  
(auch Partikel in Zentrifugen,  $\rightarrow$  TC II/5)

Gl.(14) in Gl.(6) für  $p_1=0.5$ :

$$\underline{\underline{a(r)}} = \frac{u_{t,f}^2}{r} = \frac{c_1^2}{r^{2p_1+1}} = \underline{\underline{\frac{const}{r^2}}} \quad (15a)$$

oder mit Gl.(7):

$$z(r) = \frac{a(r)}{g} = \frac{c_1^2}{g r^{2p_1+1}} = \frac{const}{g r^2} \quad (15b)$$

Folgerung aus Gln.(15):

1.  $a$  und  $Z$  sind abhängig von  $r$
2. Trennfaktor  $Z$  umso größer, je kleiner Zyklonradius und konische Verjüngung des Zyklon

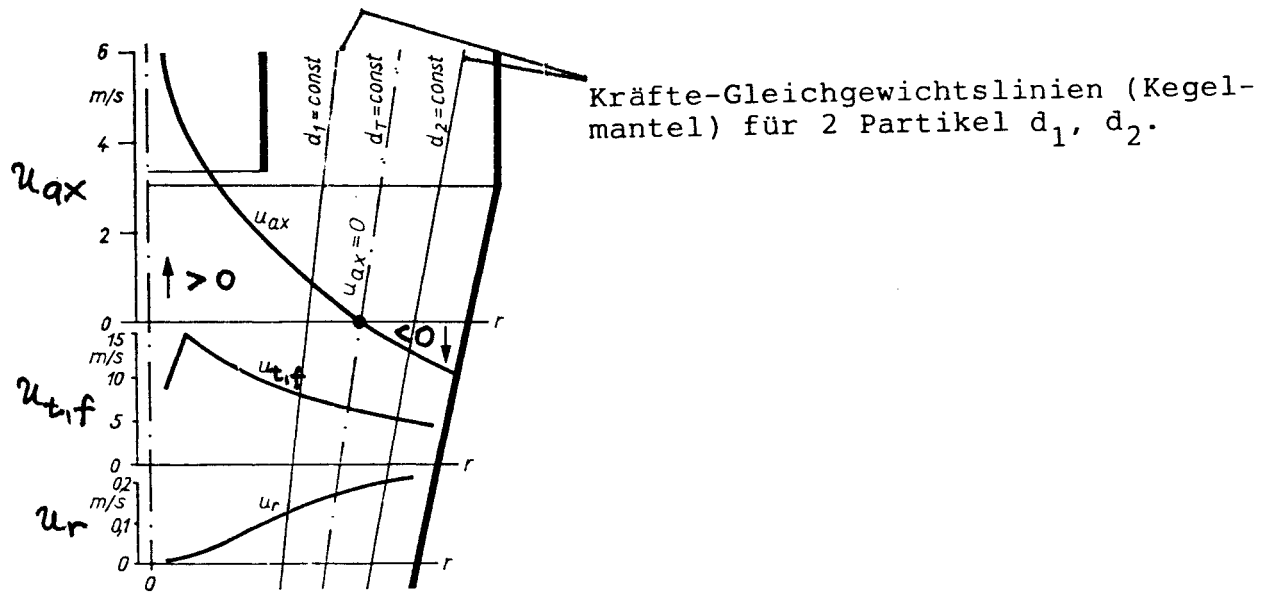


Abb. 7 Strömungsgeschwindigkeiten im Hydrozyklon  
 $u_{t,f}$  Tangentialgeschwindigkeit (Umfangsgeschw.);  $u_{ax}$  Axialgeschw.;  $u_r$  Radialgeschw.;  $r$  radiale Koordinate

Partikel mit  $d_1 < d_T$  haben  $u_{ax} > 0$  : zum Überlauf

Partikel mit  $d_2 > d_T$  haben  $u_{ax} < 0$  : zum Unterlauf

$p_1 = 0.5$  und Gl.(14): 
$$u_{t,f} = \frac{\text{const.}}{\sqrt{r}} \quad (15c)$$

### 3.2.7 Durchmesservergleich zwischen Hydro- und Aerozyklon

Aus Gl.(8b) und Gl.(15a) folgt für Hydrozyklone H :

$$u_{a,H} \sim (\rho_s - \rho_f) \frac{1}{r_H^2} \quad (16a)$$

Aus Gl.(8d) und Gl.(15a) folgt für Aerozyklone A :

$$u_{a,A} \sim \rho_s \frac{1}{r_A^2} \quad (16b)$$

Für  $u_{a,H} = u_{a,A}$  folgt aus Gln. (16a) und (16b):

$$\frac{r_H}{r_A} = \sqrt{1 - \frac{\rho_f}{\rho_s}} < 1 \quad (16c)$$

Beispiel:  $\rho_s > 2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$\rho_f = \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \frac{r_H}{r_A} = \sqrt{0.5} = 0.71$$

$$\Rightarrow \boxed{D_{\text{Hydrozyklon}} < D_{\text{Aerozyklon}}}$$

(16d)

### 3.3 Theorie der Elektrofilter

#### 3.3.1 Abscheidvorgang

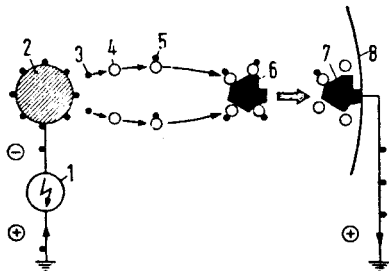


Abb. 3 Vereinfachte Darstellung des Abscheidvorganges  
 1 Hochspannungserzeuger; 2 Sprühelektrode; 3 Elektronen; 4 Neutalmoleküle; 5 ionisierte Moleküle; 6 geladenes Staubteilchen; 7 abgeschiedenes Staubteilchen; 8 Niederschlagselektrode

#### 3.3.2 Wanderungsgeschwindigkeit (Absetzgeschw.)

Die Absetzgeschw.  $u_a$  der geladenen Staubpartikel erfolgt mit der Kräftebilanz:

$$F_W = F_E \quad (17)$$

$F_E$  die auf ein geladenes Teilchen wirkende Kraft im elektrischen Feld

$$F_E = n_{\text{max}}(d_K) e E \quad (18a)$$

$E$  el. Feldstärke  
 $e$  Elementarladung

mit

$\epsilon_0$  absolute Dielektrizitätskonstante

$$n_{\text{max}}(d_K) = 4\pi\epsilon_0 \frac{E}{e} \left[ \left( 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right] \frac{d_K^2}{4} \quad (18b)$$

$n_{\max}$  : max. Anzahl von Elektronen, die eine Partikel mit  $d_K$  der relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  an ihrer Oberfläche aufgenommen hat.

$$F_W = w(\text{Re}) \frac{1}{2} \rho u^2 \frac{\pi}{4} d_K^2 \Rightarrow \text{mit } w = 24/\text{Re}$$

$$F_W = 3\pi\eta u_a d_K \quad (19)$$

Gln. (19) und (18a) in (17):

$$3\pi\eta u_a d_K = n_{\max}(d_K) e E$$

$$u_{a,th} = \frac{n_{\max}(d_K) e E}{3\pi\eta d_K} \sim d_K \quad (20a)$$

$u_{a,th}$  : theor. Absatzgeschw. (Wanderungsgeschw.) der Partikel

für Schwebeteilchen mit  $d_K < 2\mu\text{m}$ : bis 10  $u_{a,th} \neq f(d_K)$  infolge des elektrischen Winds

$$\Rightarrow u_{a,exp} \approx 3 \text{ bis } 18 \text{ m/s} \quad \text{in techn. Anlagen} \quad (20b)$$

### 3.3.3 Spezifische Niederschlagsfläche

für den Röhrenfilter gilt:

$$f \equiv \frac{A}{\dot{V}} = \frac{2\pi r \cdot l}{u_f \pi r^2} = \frac{2l}{r u_f} = \frac{2}{r} t_V \quad (21)$$

A : Niederschlagsfläche

f : spezifische Niederschlagsfläche  $\frac{\text{m}^2}{\text{m}^3/\text{s}}$

r : Radius des Röhrenfilters

l : Elektrodenlänge

$u_f$  : Gasgeschwindigkeit

$\dot{V}$  : Gasvolumenstrom (Gasdurchsatz) des Rohgases

$t_V$  : Verweilzeit des Gases im Elektrofilter



### 3.3.4 Abscheidegrad (Entstaubungsgrad, Trenngrad)

nach Gl.(13) ist :

$$T(d_K) \equiv 1 - \frac{c_{K,ex}}{c_{K,in}} = 1 - e^{-\left[\frac{A u_a (d_K)}{\dot{V}}\right]^a} \quad (22)$$

$a = 0.5$  bis  $1$  : "Sicherheitsfaktor"  
(empirisch)

$u_a$  nach Gl.(20a), besser empirisch nach (20b).

Herleitung von Gl.(22) für  $a=1$

$$-\frac{dc_K}{dt} = u_a \frac{A}{V} c_K$$

$$\int_{c_{K,in}}^{c_{K,ex}} \frac{dc_K}{c_K} = -u_a \frac{A}{V} \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{c_{K,ex}}{c_{K,in}} = -u_a \frac{A}{V/t} = -u_a \frac{A}{\dot{V}}$$

$$\Rightarrow \frac{c_{K,ex}}{c_{K,in}} = e^{-u_a \frac{A}{\dot{V}}}$$

$$T = 1 - \frac{c_{K,ex}}{c_{K,in}} = 1 - e^{-u_a \frac{A}{\dot{V}}}$$

$\hat{=} \text{Gl}(22)$  für  $a=1$