

## Zyklonabscheider

### Literatur:

- E. Muschelknautz (Stuttgart), CIT 44 (1972), Nr. 1+2, S. 63-71
- Druckverlust und Abscheidegrad in Zyklonen, VDI Wärmeatlas, 6. Aufl., 1991
- Stieß, Mechanische Verfahrenstechnik, Kap. 7

## 1. Einführung

### ***Einsatzfelder und Einsatzbedingungen***

- Trennteilchengröße:  $x_{TR} \rightarrow \text{min. } 1...5 \mu\text{m}$
- Arbeitstemperatur: Taupunkt  $\dots > 1000^\circ\text{C}$  (Heißgasentstaubung)
- Arbeitsdruckbereich:  $p = 0,001...10 \text{ MPa}$
- Konzentrationsbereich im Einlauf:  $c_{Roh} < 1000 \text{ g/m}^3$
- Erreichbare Reingaskonzentration:  $c_{Rein} = 100...200 \text{ mg/m}^3$
- Tropfenabscheidung möglich!
- Arbeiten zum Zyklon: Prof. Bohnet (Braunschweig)  
Prof. Molerus (Erlangen / Nürnberg)

**Wirkprinzip:** Zentrifugalkraftquerstromabscheidung

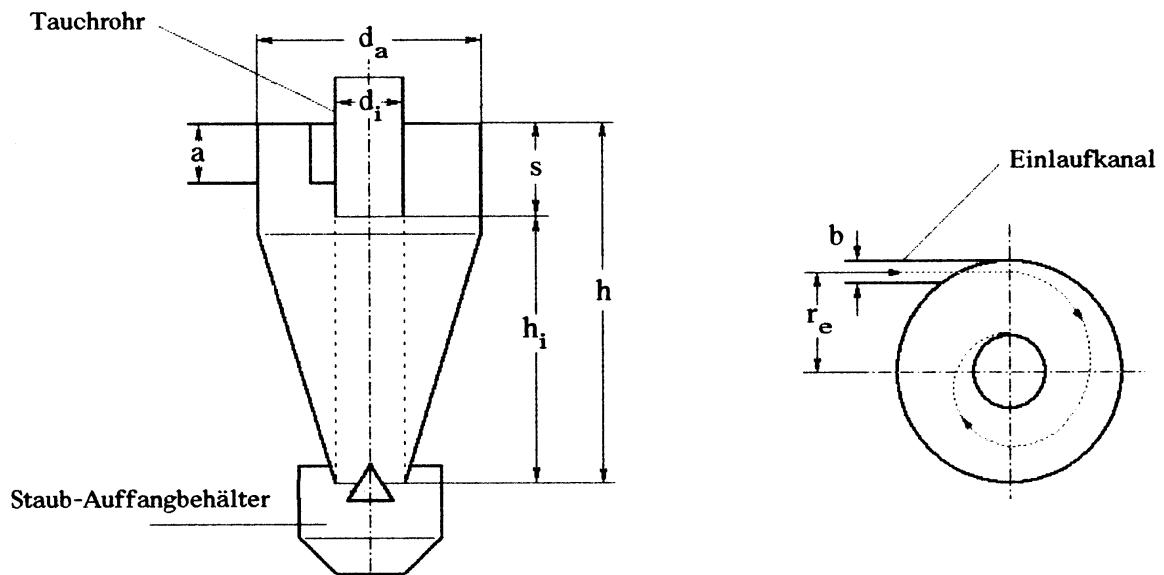


Abb.: Aufbau und Hauptmaße eines Aerozyklones

Durch eine tangentielle Zuführung oder axiale Zuführung mit Umlenkschaufeln wird im Zyklon eine dreidimensionale und stark turbulente Wirbelströmung erzeugt. Die so den Partikeln aufgeprägte Zentrifugalkraft führt zur Abscheidung der Partikel an der Zyklonwand.

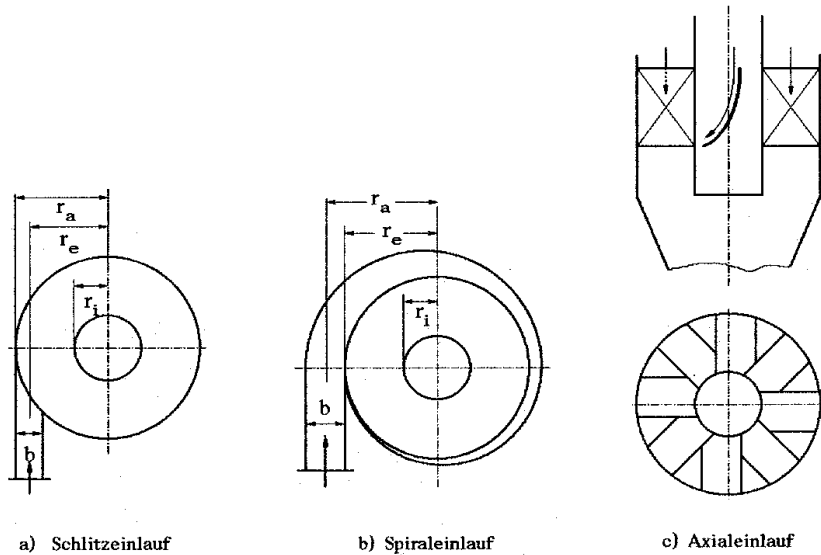


Abb.: Einlaufformen von Zyklonen

## 2. Modellierung eines Zyklonabscheiders

Die Wirbelströmung im Zyklon kann in zwei Abschnitte unterteilt werden:

1. Festkörperwirbel im Inneren der Tauchrohrebene:

$$\omega \cdot r = \text{const.} \quad (1)$$

2. Potentialwirbel außerhalb der Tauchrohrebene

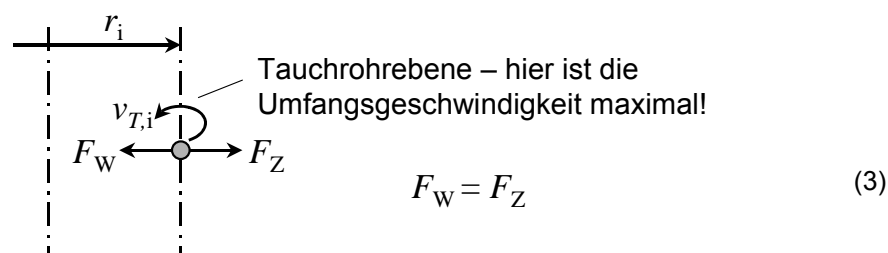
$$\omega \cdot r^n = \text{const.} \quad (2)$$

Für Zyklonabscheider liegen Messwerte für  $n$  in Bereichen von:

$$\begin{aligned} n &= 0,5 \dots 0,8 && \text{für Aerozyklone} \\ n &= 0,7 \dots 0,8 && \text{für Hydrozyklone} \end{aligned}$$

### Herleitung der Trennteilchengröße im Aerozyklon

Annahme: Das Kräftegleichgewicht an der Tauchrohrebene von Zentrifugalkraft und Widerstandskraft gegenüber der radialen Geschwindigkeitskomponente ist für die realisierbare Trennteilchengröße entscheidend.



Die auf ein Partikel wirkende Zentrifugalkraft lautet:

(Annahme: Partikel bewegen sich mit Umfangsgeschwindigkeit auf der Tauchrohrebene)

$$F_Z = m \cdot a_Z = m_p \cdot \omega^2 r_i \quad (4)$$

Mit der Tangentialgeschwindigkeit an der Tauchrohrebene  $v_{T,i} = \omega r$  folgt:

$$F_Z = \frac{\pi}{6} x_{TR}^3 \cdot \rho_s \cdot \frac{v_{T,i}^2}{r_i} \quad (5)$$

Die Widerstandskraft eines Partikels lautet allgemein:

$$F_W = \frac{\rho_s}{2} v^2 \cdot A_p \cdot c_w \quad (6)$$

Mit  $c_w = \frac{24}{\text{Re}}$  (für laminare Strömung) ergibt sich:

$$F_W = 3\pi\eta_g \cdot x_{TR} \cdot v_{T,i} \quad (7)$$

Damit folgt aus (3)  $F_W = F_Z$ :

$$3\pi \cdot \eta_g \cdot x_{TR} \cdot v_{r,i} = \frac{\pi}{6} x_{TR}^3 \cdot \rho_s \cdot \frac{v_{T,i}^2}{r_i} \quad (8)$$

$$\boxed{x_{TR}^2 = \frac{18 \cdot \eta_g \cdot v_{r,i}}{\rho_s \cdot v_{T,i}^2}} \quad \text{erstmalig formuliert von BARTH} \quad (9)$$

Bei der Modellierung hat es sich bewährt, den Tauchrohrradius als Bezugsgröße zu wählen. Dadurch ergeben sich für einen Aerozyklon folgende Größenverhältnisse:

$$R = \frac{r_a}{r_i} \quad R_e = \frac{r_e}{r_i} \quad H_i = \frac{h_i}{r_i} \quad H = \frac{h}{r_i}$$

$$\text{Flächenverhältnis Eintritt/Austritt:} \quad F = \frac{A_E}{A_i} = \frac{a \cdot b}{\pi \cdot r_i^2}$$

$$\text{Umfangsgeschwindigkeitsverhältnis:} \quad U = \frac{v_{T,i}}{v_i} \quad \text{mit} \quad v_i = \frac{\dot{V}_Z}{\pi \cdot r_i^2}$$

Weiterhin werden zur besseren Handhabbarkeit einige Umformungen und Normierungen eingeführt.

1. Erweitern mit 1, d. h. mit  $\frac{v_i}{v_i}$  (Tauchrohrgeschwindigkeit)
2. Einsetzen des Umfangsgeschwindigkeitsverhältnisses  $U$

$$x_{TR}^2 = \frac{18 \cdot \eta_g}{\rho_s} \cdot \frac{v_i^2}{v_{T,i}^2} \cdot \frac{v_{r,i} \cdot r_i}{v_i^2} \quad (10)$$

$$x_{TR}^2 = \frac{18 \cdot \eta_g}{\rho_s} \cdot \frac{1}{U^2} \cdot \frac{v_{r,i} \cdot r_i}{v_i^2} \quad (11)$$

Die mittlere Radialgeschwindigkeit an der Tauchrohrebene  $v_{r,i}$  und die mittlere Tauchrohrgeschwindigkeit  $v_i$  lassen sich als Funktion des Gasvolumenstromes  $\dot{V}_Z$  angeben.

$$v_{r,i} = \frac{\dot{V}_Z}{2\pi \cdot r_i \cdot h_i} \quad (\text{Kontinuitätsgleichung}) \quad (12)$$

$$v_i = \frac{\dot{V}_Z}{\pi \cdot r_i^2} \quad (13)$$

Durch Einsetzen in (11) und mit  $H_i = \frac{h_i}{r_i}$  ergibt sich nach Ziehen der Wurzel:

$$\boxed{x_{TR} = \sqrt{\frac{9 \cdot \eta_g}{\rho_s} \cdot \frac{1}{U \cdot \sqrt{H_i}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot r_i^3}{\dot{V}_Z}}}} \quad \text{Trennpartikelgröße eines Aerozyklons} \quad (14)$$

nach BARTH, MUSCHELKNAUTZ

Eine geringe Trennteilchengröße kann erreicht werden durch:

- großes  $H_i \rightarrow$  schlanker Zyklon
- kleines  $r_i \rightarrow$  kleiner Zyklondurchmesser
- großes  $U$
- großer Volumenstrom

### **Umfangsgeschwindigkeitsverhältnis**

Für das Umfangsgeschwindigkeitsverhältnis gibt MUSCHELKNAUTZ folgende Gleichung an:

$$U = \left( \alpha \frac{F}{\text{Re}} + \lambda H \right)^{-1} \quad \alpha - \text{Einlaufbeiwert} \quad \lambda - \text{Reibungsbeiwert} \quad (15)$$

Sowohl  $\alpha$  als auch  $\lambda$  sind von der Feststoffbeladung  $\mu$  abhängig.

$$\mu = \frac{m_s}{m_g} \quad (15)$$

Für den Einlaufbeiwert  $\alpha$  gilt in Abhängigkeit der Einlaufgeometrie:

- Schlitzeinlauf:  $\alpha = 1 + 0,36 \sqrt{F} \mu^{0,45} \quad (15)$
- Spiraleinlauf:

Für den Reibungsbeiwert  $\lambda$  gilt:  $\alpha = 1 - \left( 0,54 - \frac{0,153}{F} \right) \sqrt[3]{\mu} \quad (15)$

- $\mu < 1$   $\lambda = 0,005(1 + 2\sqrt{\mu})$
- $\mu > 1$   $\lambda = 0,005(1 + 3\sqrt{\mu})$
- $\mu = 0$   $\lambda = 0,005$

### **Berechnung des Druckverlustes eines Aerozyklons**

$$\Delta p_z = \Delta p_E + \Delta p_H + \Delta p_i \quad E - \text{Einlauf} \quad H - \text{Hauptströmung} \quad i - \text{Tauchrohr} \quad (16)$$

$$\Delta p_z = \frac{\rho_g}{2} v_i^2 \cdot (\zeta_E + \zeta_H + \zeta_T) \quad (17)$$

Nach Löffler gilt:

- Schlitzeinlauf:  $\zeta_E = 0$
- Spiraleinlauf:  $\zeta_E = \left( 1 + \frac{\pi}{4R^2} \left( 1 - \frac{1}{\alpha^2} \right) \right) / F$
- $\zeta_H = \frac{U^2}{R} (1 - \lambda \cdot H \cdot U)^{-1}$
- $\zeta_i = 2 + 3U^{\frac{4}{3}} + U^2$

### Modellierung des Abscheideverhaltens

Das Abscheideverhalten kann mit einer Trennfunktion  $T(x)$  beschrieben werden (auch Trenn- oder Fraktionsabscheidegradkurve genannt).

Für die Berechnung des Gesamtabscheidegrades  $\eta_{\text{ges}}$  gilt:

$$\eta_{\text{ges}} = g = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T(x) \cdot q_A(x) dx \quad \text{A – Aufgabegut, } g - \text{Grobgutanteil} \quad (18)$$

Bei der Partikelabtrennung mittels Zyklon sind in Abhängigkeit der Gutbeladung  $\mu$  zwei Phänomene zu beobachten.

1. unterhalb einer gewissen Gutbeladung – diese wird als Grenzbeladung  $\mu_{\text{Gr}}$  bezeichnet – werden die Partikel größenselektiv nach den Sinkgeschwindigkeiten getrennt.
2. Oberhalb der Grenzgutbeladung  $\mu_{\text{Gr}}$  wird der Partikelanteil  $\mu_{\text{Gr}}$  beim Zykloneintritt spontan abgeschieden. Diese Partikel „rutschen“ als sogenannte Gutsträhne an der Zyklonwand in die Staubbehälter. Dieser Mechanismus ist nicht größenselektiv (Teilung).

Die Ursache für diesen Effekt ist die Turbulenzdämpfung der Strömung bei Eintritt in den Zyklon. Dadurch wird die „Tragfähigkeit“ der Strömung herabgesetzt und die „überschüssigen“ Partikel fallen aus.

Die Abschätzung der Grenzgutbeladung kann mit einer rein empirischen Gleichung nach Muschelknautz / Klose erfolgen:

$$\mu_{\text{Gr}} \approx 0,1 \left[ \frac{2r_i}{M_{1,3}} \right]^{1,5} \quad (19)$$

$M_{1,3}$  - 1. vollständiges Anfangsmoment der 3. Verteilung =  $x_{m,3}$  (mittlere Partikelgröße)

Weiterhin gibt Muschelknautz die folgende Beziehung an:

$$\mu_{\text{Gr}} \approx 0,1 \frac{R}{R-1} \sqrt{\frac{\alpha F}{R_e}} U^{\frac{2}{3}} H_1 \left[ \frac{x_{\text{TR}}}{x_{50,3}} \right]^2 \quad (20)$$

Folglich ergibt sich der Gesamtabscheidegrad zu:

- Für  $\mu > \mu_{\text{Gr}}$

$$\eta_{\text{ges}} = 1 - \frac{\mu_{\text{Gr}}}{\mu} + \frac{\mu_{\text{G}}}{\mu} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T(x) \cdot q_A(x) dx \quad (21)$$

- Für  $\mu \leq \mu_{\text{Gr}}$  gemäß (18)

$$\eta_{\text{ges}} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} T(x) \cdot q_A(x) dx \quad (21)$$

Für die Berechnung der Trennfunktionen werden nur auf Messungen basierende Näherungsgleichungen angegeben. Für einen Aerozyklon mit tangenbialem Einlauf gibt SPILGER als Näherungsgleichung an:

$$T(x) = \left( 1 + 9,14 \cdot \left[ \frac{x}{x_{TR}} \right]^{5,3} \right)^{-0,53} \quad (22)$$

Laut VDI-Wärmeatlas (Muschelknautz) gilt für  $T(x)$  unter Annahme einer RRSB als Aufgabegutverteilung:

$$T(x) = 1 - R(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{1,3 \cdot x_{50,A}} \right)^{1,2} \right] \quad (23)$$

## Konstruktive und anwendungstechnische Aspekte

### Typische Zyklonparameter

- Trennpartikelgröße            min > 1...5  $\mu\text{m}$
- Durchmesser                    2...5 cm
- Volumenstrom                 1...200000  $\text{m}^3/\text{h}$
- Druckverlust                  500...2000 Pa (MVT-Buch: 300...2500 Pa)
- Druckverlustbeiwert         10...20 (5...40)

### Übliche geometrische Proportionen

- $d_a = 2 \text{ cm} \dots 5 \text{ m}$
- $\frac{d_a}{d_i} = 1,5 \dots 4,0 \rightarrow \frac{d_i}{d_a} = 0,25 \dots 0,67$
- $\frac{h}{d_i} = 4 \dots 7,5$
- $\frac{s}{d_i} = 1,5 \dots 2,1$
- $\frac{h_{\text{Konus}}}{d_i} = 3 \dots 6$
- $\frac{d_{\text{Einlauf}}}{d_i} = 0,5 \dots 1,5$

## 2. Symbole

Die Strömungsgeschwindigkeiten in Zyklonen können in folgende Komponenten zerlegt werden:

- $\omega$       Winkelgeschwindigkeit
- $v_T$      Umfangs- bzw. Tangentialgeschwindigkeit
- $v_a$      Axialgeschwindigkeit
- $v_r$      Radialgeschwindigkeit
- $v_i$      mittlere Tauchrohrgeschwindigkeit