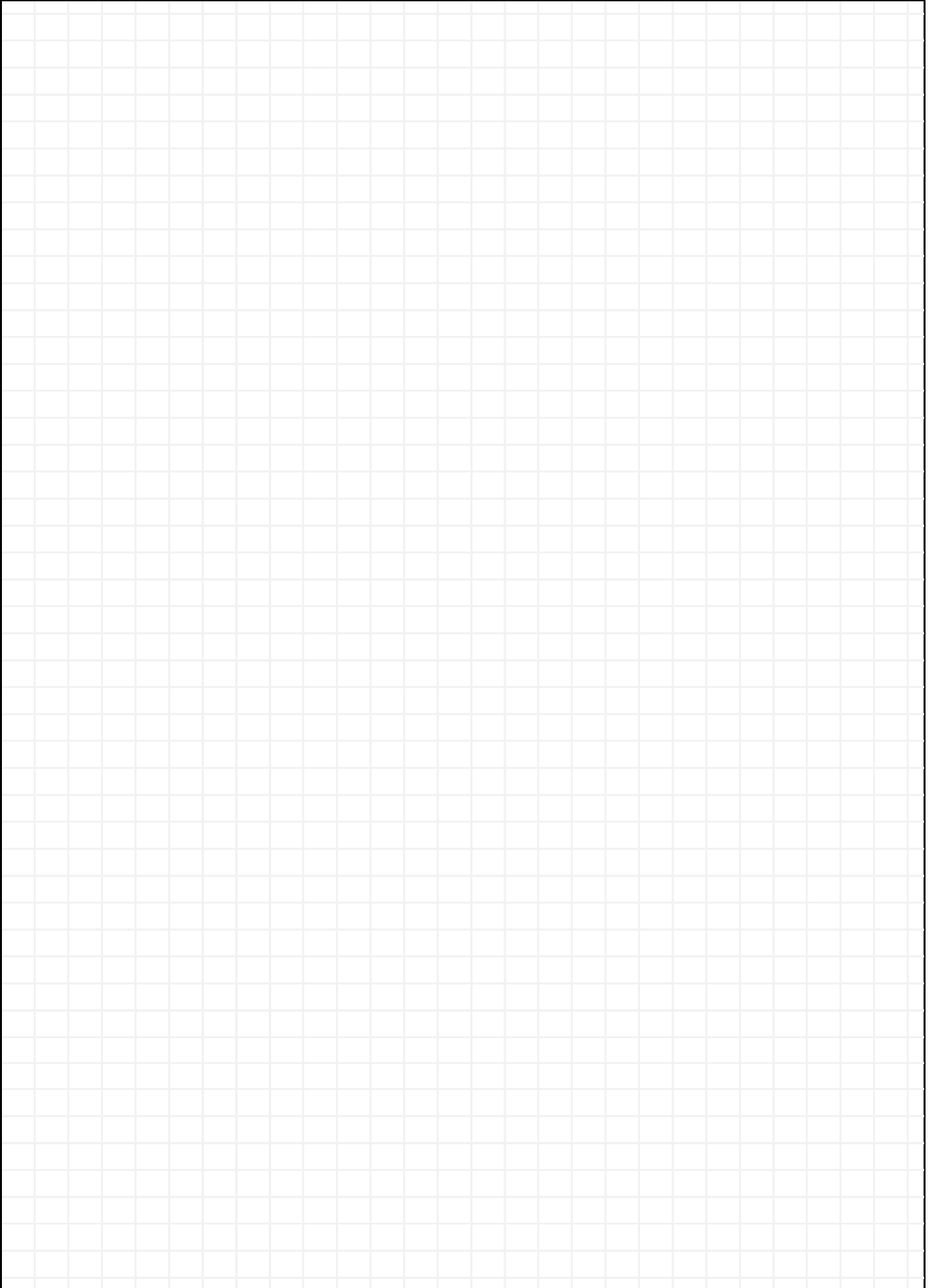


<b>Zerkleinerung</b>	<b>2.1</b>
<b>Stofftrennung</b>	<b>2.2</b>
<b>Sedimentation</b>	<b>2.2.1</b>
Auslegung horizontal durchströmtes Becken	2.2.1.1
<b>Filtration</b>	<b>2.2.2</b>
Kuchenfiltration	2.2.2.1
<b>Mischen</b>	<b>2.3</b>
<b>Homogenisieren</b>	<b>2.3.1</b>
<b>Suspendieren</b>	<b>2.3.2</b>

<b>Anhang</b>	<b>A2</b>
<b>Zerkleinerungskonstanten, Re(Ar)-Diagramm</b>	<b>A2.1</b>
<b>Zwietering-Konstanten</b>	<b>A2.3.2</b>

# Beispiele



Ziel der Zerkleinerungstechnik ist es, mit vertretbarem Energieaufwand und erträglichen Verschleiß der Maschinen, ein Feststoff auf eine gewünschte Feinheit nach Produktspezifikationen zu bringen.

## Notizen

### Spezifische Zerkleinerungsarbeit: Allgemein

$$e_{\text{Mühle}} = \frac{W}{m} = \frac{P}{\dot{m}} \quad \frac{W}{kg/s}$$

### Spezifische Zerkleinerungsarbeit nach Kick

$$e_{\text{Kick}} = c_{\text{Kick}} \cdot \log\left(\frac{x_{80,\alpha}}{x_{80,\omega}}\right) \quad \frac{W}{kg/s}$$

$$x_{80\omega} \geq 5 \cdot 10^{-2} m$$

$$c_{\text{Kick}} = 1,151 \cdot \frac{c_{\text{Bond}}}{\sqrt{5 \cdot 10^{-2} m}} \quad \frac{m^2}{s^2}$$

### Spezifische Zerkleinerungsarbeit nach Bond

$$e_{\text{Bond}} = c_{\text{Bond}} \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{x_{80,\omega}}} - \sqrt{\frac{1}{x_{80,\alpha}}} \right) \quad \frac{W}{kg/s}$$

$$5 \cdot 10^{-5} m \lesssim x_{80\omega} \lesssim 5 \cdot 10^{-2} m$$

$$c_{\text{Bond}} = \text{tabelliert siehe A2.1} \quad \frac{m^{2,5}}{s^2}$$

### Spezifische Zerkleinerungsarbeit nach von Rittinger

$$e_{\text{Ritt}} = c_{\text{Ritt}} \cdot \left( \frac{1}{x_{80,\omega}} - \frac{1}{x_{80,\alpha}} \right) \quad \frac{W}{kg/s}$$

$$x_{80\omega} \lesssim 5 \cdot 10^{-5} m$$

$$c_{\text{Ritt}} = 0,5 \cdot c_{\text{Bond}} \cdot \sqrt{5 \cdot 10^{-5} m} \quad \frac{m^3}{s^2}$$

### Kugelmühle - Kritische Drehzahl

$$n_{\text{Krit}} = \sqrt{\frac{g}{4 \cdot \pi^2 \cdot r}} \quad \frac{1}{s}$$

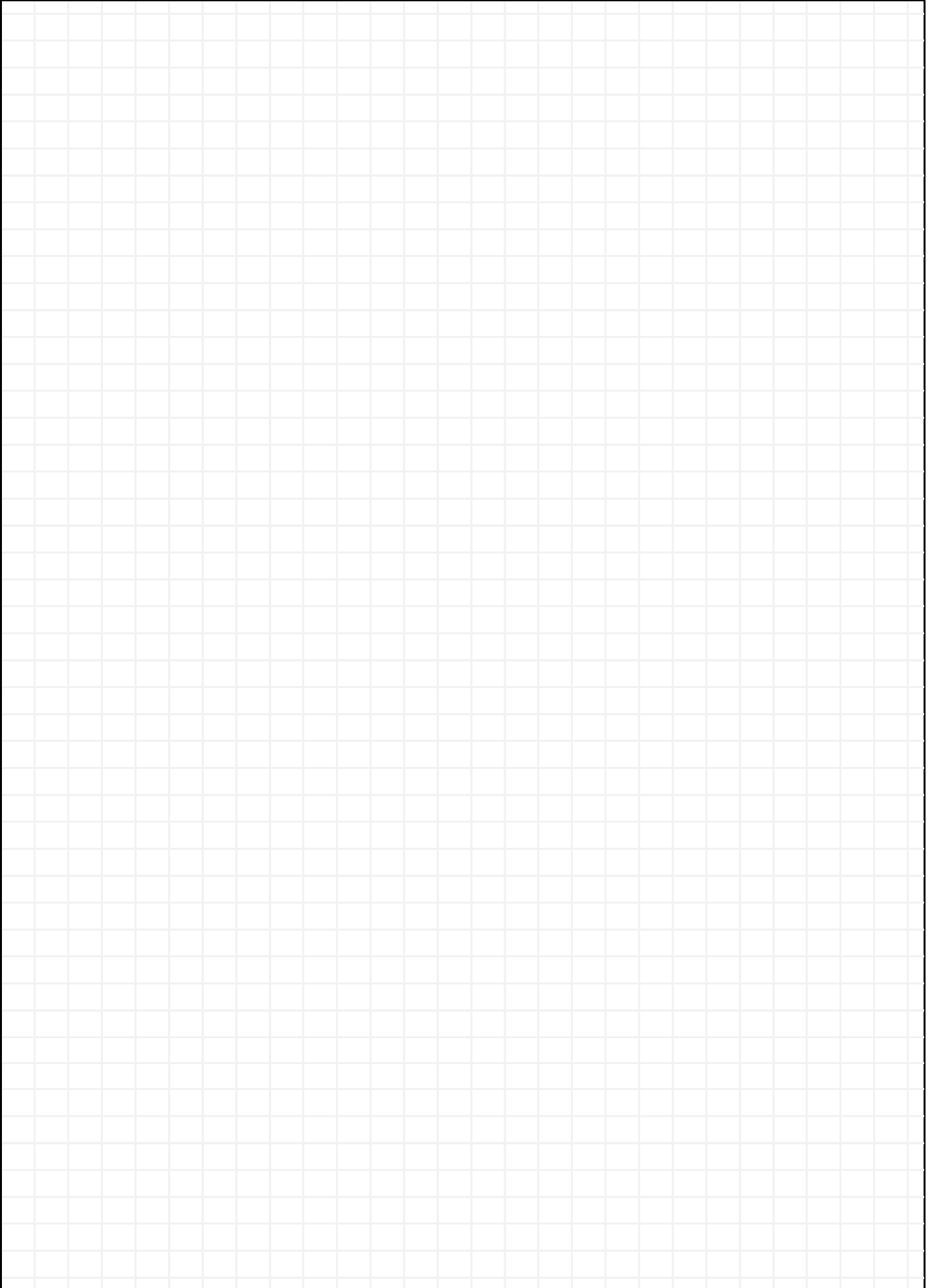
Kaskadenbewegung:  $n = 0,6 \dots 0,7 \cdot n_{\text{Krit}}$

Kataraktbewegung:  $n = 0,8 \dots 0,9 \cdot n_{\text{Krit}}$

### Zerkleinerungsgrad

$$Z = \frac{x_{80,\alpha}}{x_{80,\omega}} \quad -$$

# Beispiele



Ziel der Stofftrennung ist es, homogen verteilte Stoffgemische in Reinstoffe zu verwandeln. Dazu werden Stoffeigenschaften ausgenutzt, in denen sich die enthaltenen Reinstoffe unterscheiden.

## Sedimentation

2.2.1

Notizen

### Gewichtskraft

$$F_G = m \cdot g = \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot \rho_P \cdot g \quad N$$

### Auftriebskraft

$$F_{\text{Auf}} = m_{\text{Fluid}} \cdot g = \frac{\pi}{6} \cdot d_P^3 \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \quad N$$

### Reibungskraft

$$F_{\text{Reib}} = c_{\text{Reib}} \cdot \frac{\rho_{\text{Fluid}}}{2} \cdot v_P^2 \cdot A_{\perp} \quad N$$

$$c_{\text{Reib}} = \frac{24}{\text{Re}_P}$$

laminarer Bereich:  $\text{Re}_P \lesssim 1$

$$c_{\text{Reib}} = \frac{1}{3} \cdot \left( \sqrt{\frac{72}{\text{Re}_P}} + 1 \right)^2 \quad \text{emp} \quad 1$$

Übergangsbereich:  $1 \lesssim \text{Re}_P \lesssim 10^4$

$$c_{\text{Reib}} = 0,44$$

turbulenter Bereich:  $\text{Re}_P \gtrsim 10^4$ ; für starre Kugeln

### Trägheitskraft

$$F_{\text{Träg}} = V_P \cdot (\rho_P + c_m \cdot \rho_{\text{Fluid}}) \cdot \frac{dv_P}{dt} \quad N$$

$c_m = 0,5$ ; für starre Kugeln

### Bewegung eines (Einzel-)Teilchens im Schwerekraftfeld

$$\frac{dv_P}{dt} = \frac{g \cdot |\rho_P - \rho_{\text{Fluid}}|}{\left(\rho_P + \frac{\rho_{\text{Fluid}}}{2}\right)} - \frac{3 \cdot c_{\text{Reib}} \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot v_P^2}{4 \cdot d_P \cdot \left|\rho_P + \frac{\rho_{\text{Fluid}}}{2}\right|} \quad \frac{m}{s^2}$$

$dv_P/dt = 0$ : stationäre Sinkgeschwindigkeit - keine Beschleunigung

$$\vec{v}_P = \frac{|\rho_P - \rho_{\text{Fluid}}| \cdot g \cdot d_P^2}{18 \cdot \eta_{\text{Fluid}}} \quad \frac{m}{s}$$

Laminarer Bereich:  $\text{Re}_P \lesssim 0,2$  |  $\text{Ar} \lesssim 3,6$ ; alias Stokes-Gleichung

$$\vec{v}_P = \frac{\text{Re}_P \cdot \eta_{\text{Fluid}}}{\rho_{\text{Fluid}} \cdot d_P} \quad \frac{m}{s}$$

Übergangsbereich:  $0,2 \lesssim \text{Re}_P \lesssim 10^4$  |  $3,6 < \text{Ar} < 10^{10}$

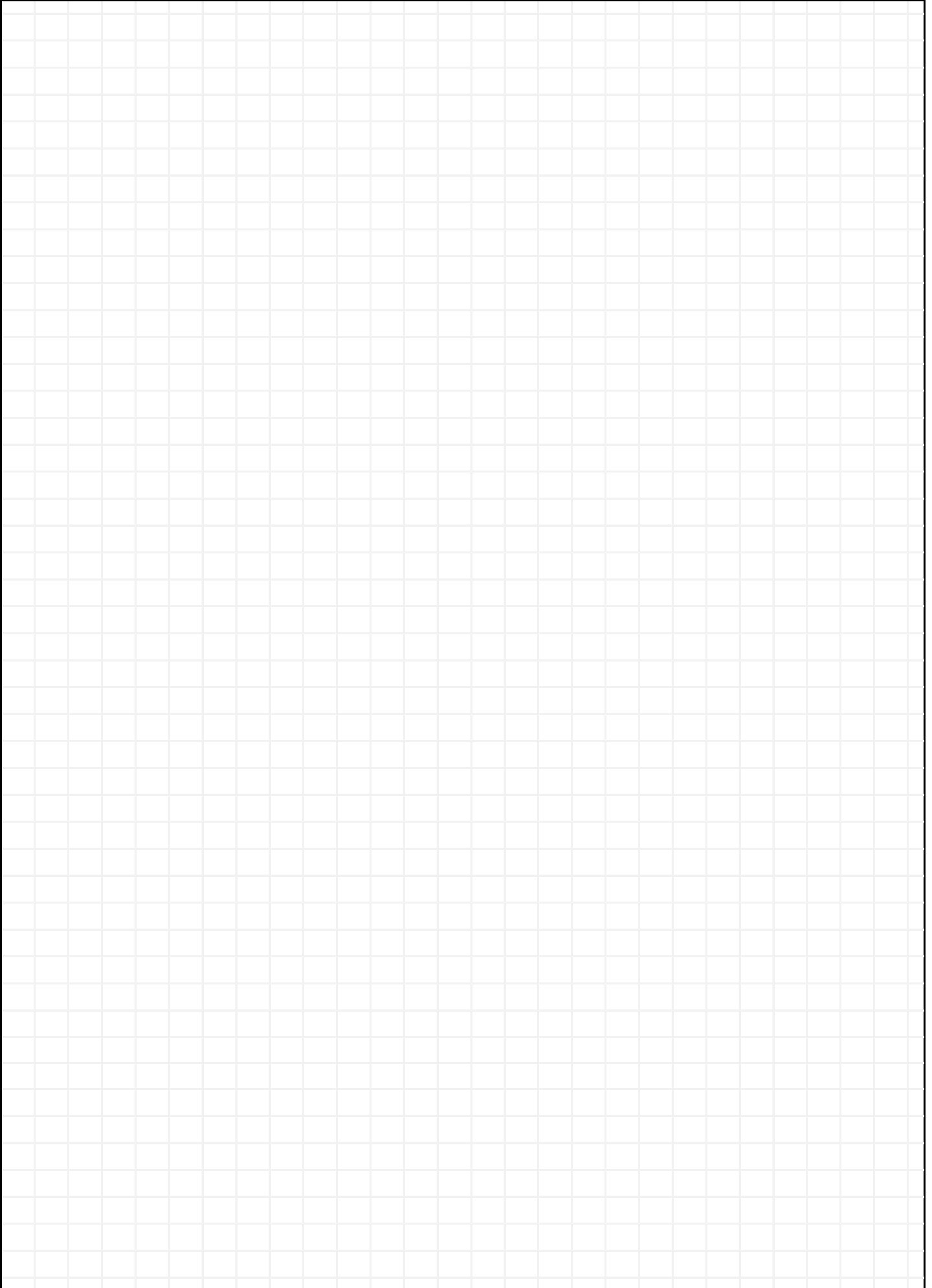
$$\text{Re}_P = 18 \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{\sqrt{\text{Ar}}}{9}} - 1 \right)^2 \quad \text{emp} \quad 1$$

Näherungsgleichung

1: nach H. Martin: CIT 1980, Vol.52, S.200 (Wiley)

Herleitung für ein  
starres, glattes,  
kugelförmiges Teilchen

# Beispiele



Ziel der Stofftrennung ist es, homogen verteilte Stoffgemische in Reinstoffe zu verwandeln. Dazu werden Stoffeigenschaften ausgenutzt, in denen sich die enthaltenen Reinstoffe unterscheiden.

## Sedimentation

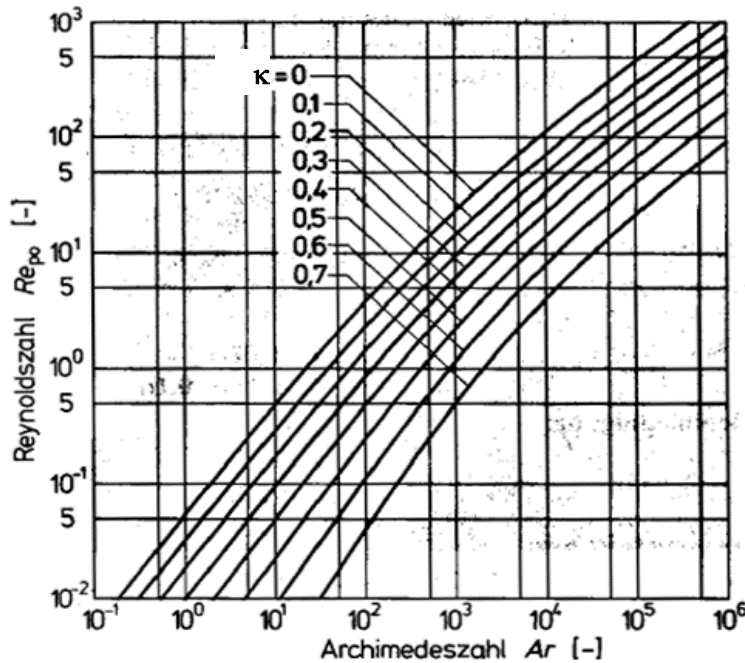
2.2.1

Notizen

### Teilchenvolumenanteil für die Sinkgeschw. im Teilchenschwarm

$$\kappa = \frac{X}{X + \frac{\rho_P}{\rho_{\text{Fluid}}}}$$

X: Massebeladung



1

### Auslegung eines horizontal durchströmtes Klärbeckens

2.2.1.1

#### Länge eines Rechteckklärbeckens

$$l_B = \frac{\dot{V}_{\omega 1}}{v_P \cdot b} \quad m$$

für laminare Strömung im Becken  $Re < 2000$

$\dot{V}_{\omega 1}$  : klarer Überlauf

#### Durchströmgeschwindigkeit

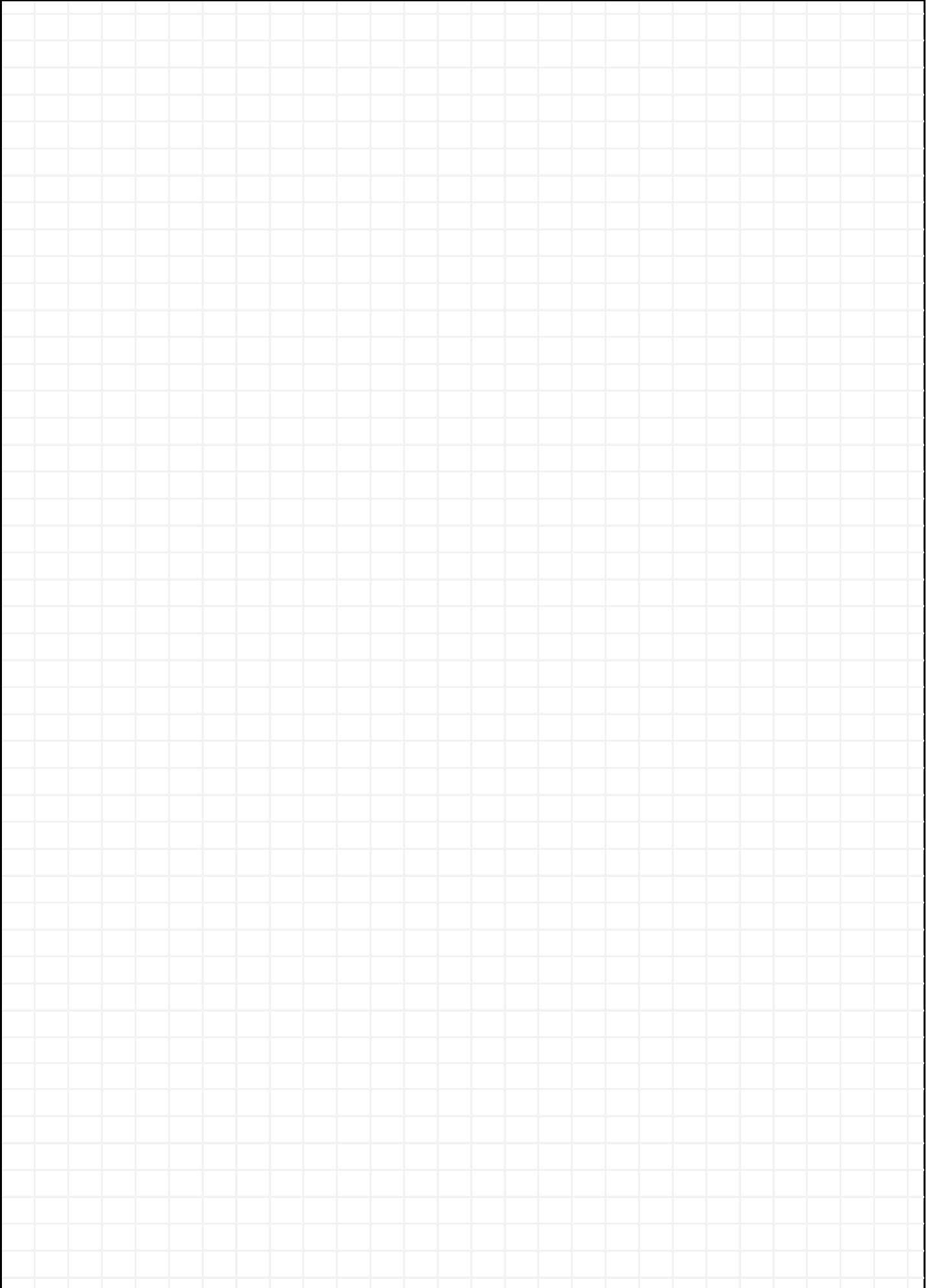
$$v_P = \frac{\dot{V}_{\omega 1}}{A_{O, \text{Klär}}} \quad \frac{m}{s}$$

#### Hydraulischer Durchmesser

$$d_{\text{hydr}} = \frac{4 \cdot A_{\perp}}{u_{\text{ben}}} \quad m$$

1 Zogg: "Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik":1993, Seite S.142 (Teubner Verlag)

# Beispiele





Ziel der Stofftrennung ist es, homogen verteilte Stoffgemische in Reinstoffe zu verwandeln. Dazu werden Stoffeigenschaften ausgenutzt, in denen sich die enthaltenen Reinstoffe unterscheiden.

## Filtration

2.2.2

Notizen

### Druckverlust in einer Schüttung (Carman-Kozeny-Gleichung)

$$\Delta p_{\text{Sch}} = \left( \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot d_{32}^2} \right) \cdot \eta_F \cdot l \cdot \frac{\dot{V}_{\text{Filt}}}{A} \cdot c_{\text{KSch}} \quad Pa$$

bei laminarer Strömung

$c_{\text{KSch}} = 125 \dots 200$

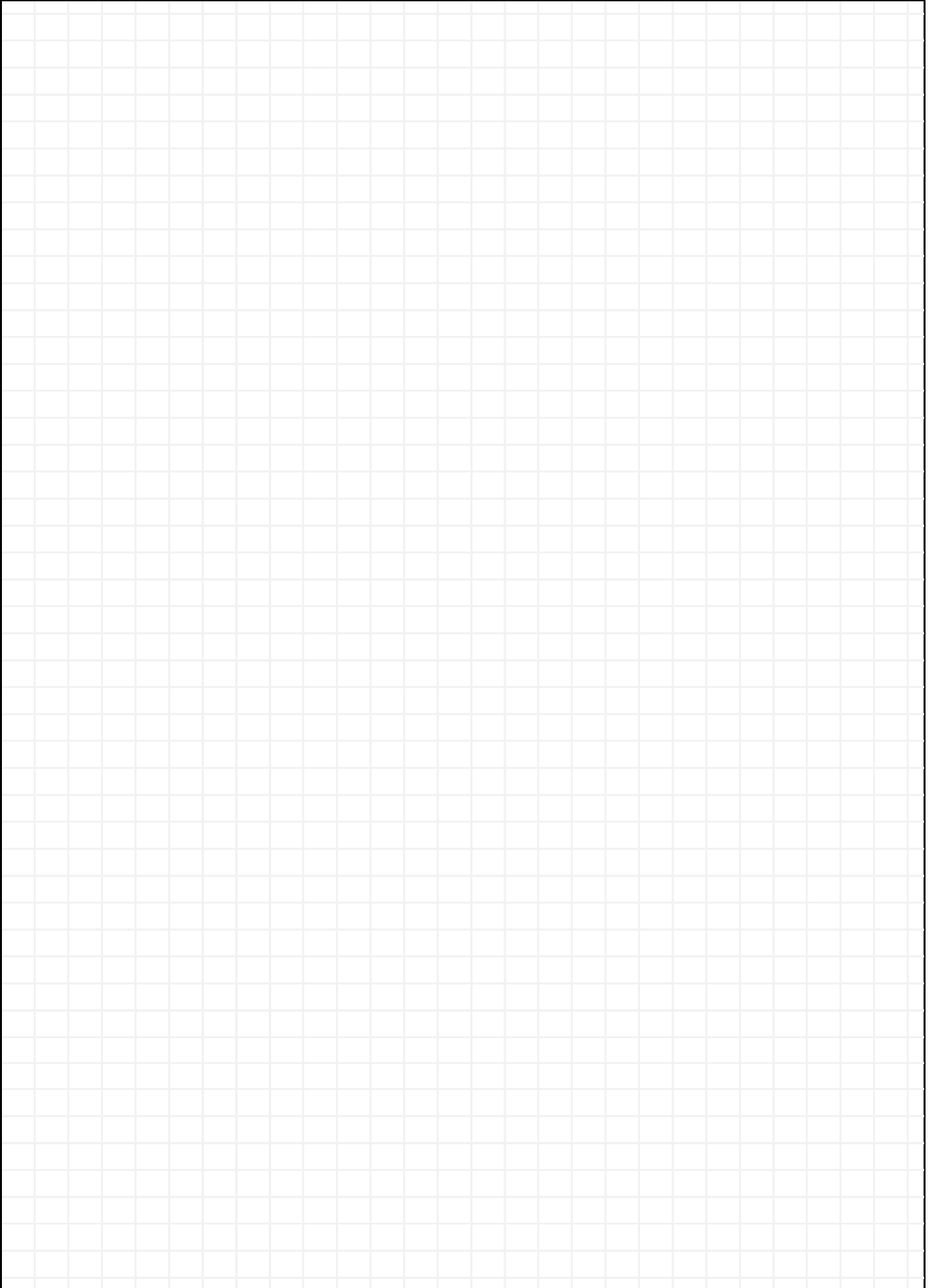
### Differentielle Filterkuchengleichung

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\Delta p}{\eta_{\text{Fluid}} \cdot (\alpha \cdot \gamma \cdot l + \beta)} \quad \frac{m}{s}$$

$\alpha, \beta, \gamma$  müssen experimentell bestimmt werden

$$\alpha = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{c_{\text{KSch}}}{d_{32}^2} \quad \frac{1}{m^2}$$

# Beispiele



Ziel der Stofftrennung ist es, homogen verteilte Stoffgemische in Reinstoffe zu verwandeln. Dazu werden Stoffeigenschaften ausgenutzt, in denen sich die enthaltenen Reinstoffe unterscheiden.

## Filtration

2.2.2

Notizen

### Kuchenfiltration

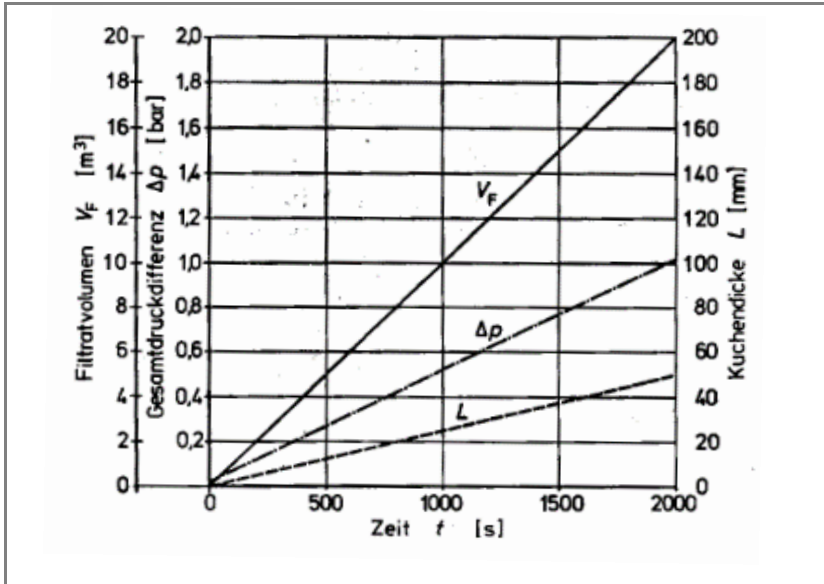
2.2.2.1

#### Filterkuchengleichung (Konstanter Durchsatz)

$$\Delta p = \frac{\dot{V}_{\text{Filt}}}{A} \cdot \eta_{\text{Fluid}} \cdot \left( \alpha \cdot \frac{\dot{V}_{\text{Filt}}}{A} \cdot \gamma \cdot t + \beta \right) \quad Pa$$

bei  $t = 0 \rightarrow l = 0$

#### Beispiel



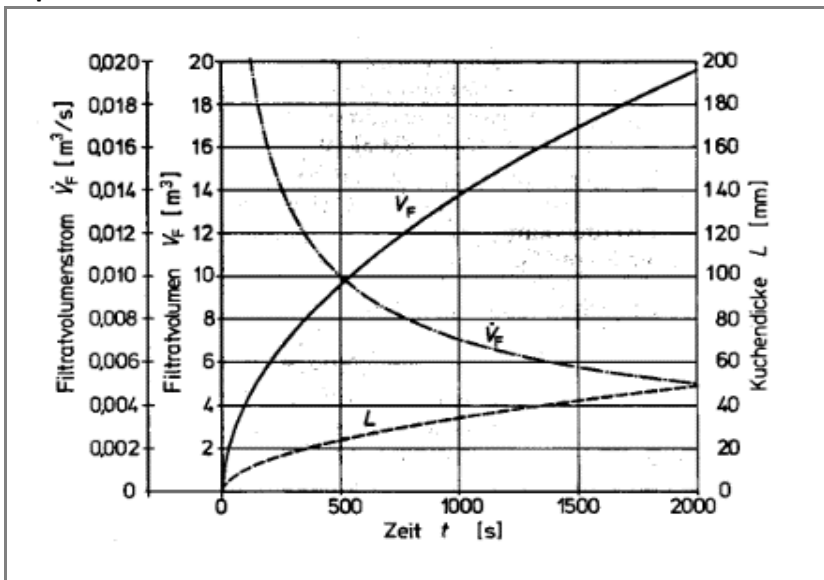
1

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= 0,01 \text{ m}^3/\text{s}, \varepsilon = 0,6, \\ \alpha_w &= 10^{12} \text{ 1/m}^2, f_M = \\ &10^9 \text{ 1/m}, \rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3, \\ \rho_F &= 1000 \text{ kg/m}^3, \\ \eta_F &= 0,001 \text{ Pas}, X_s = 0,01, \\ X_a &= 0, A = 5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

#### Filterkuchengleichung (Konstanter Differenzdruck)

$$t = \frac{\eta_{\text{Fluid}} \cdot \beta}{\Delta p} \cdot l + \frac{\eta_{\text{Fluid}} \cdot \alpha \cdot \gamma}{\Delta p} \cdot \frac{l^2}{2} \quad s$$

#### Beispiel

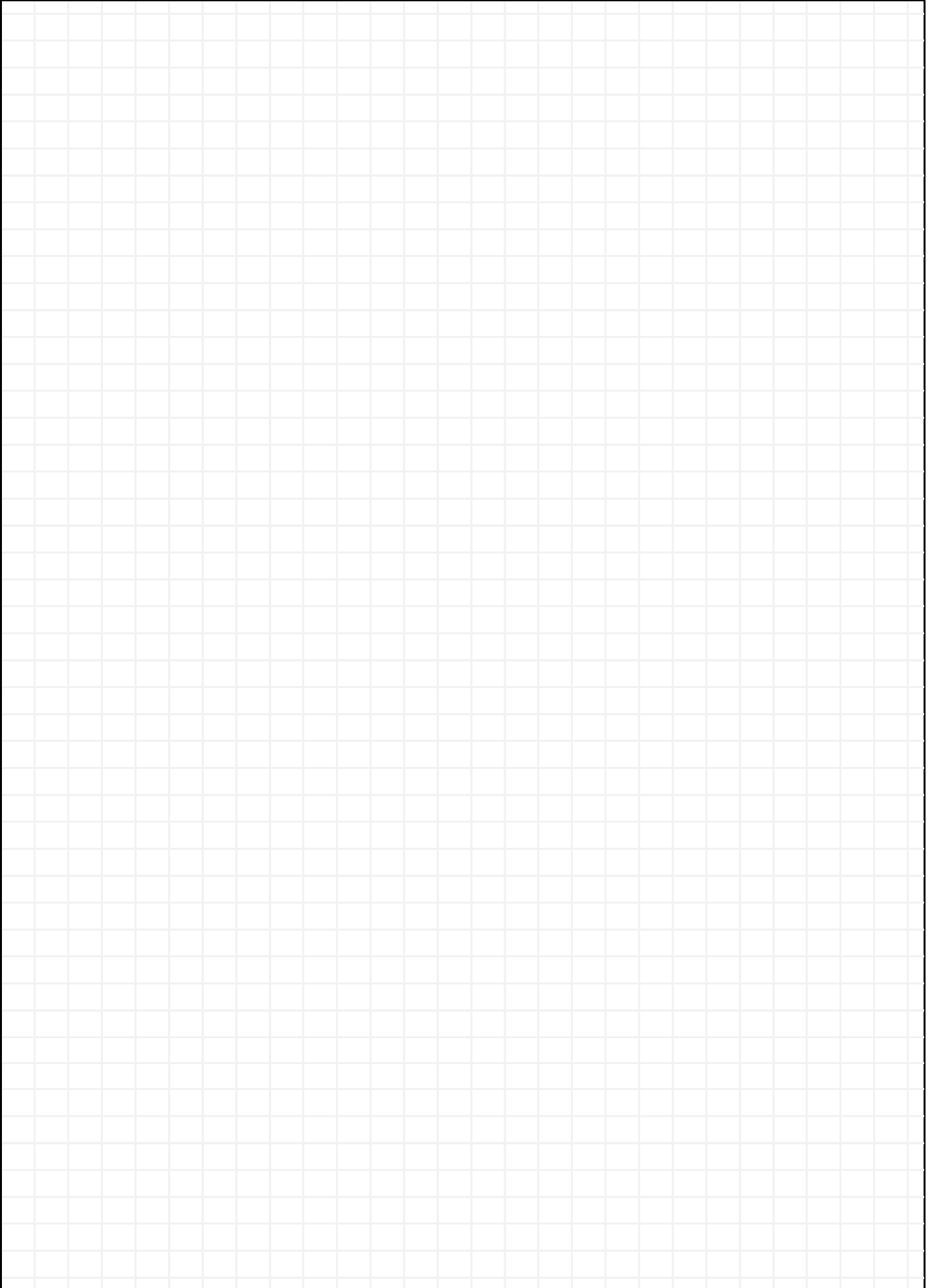


1

$$\begin{aligned} \dot{V}_F &= 0,01 \text{ m}^3/\text{s}, \varepsilon = 0,6, \\ \alpha_w &= 10^{12} \text{ 1/m}^2, f_M = \\ &10^9 \text{ 1/m}, \rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3, \\ \rho_F &= 1000 \text{ kg/m}^3, \\ \eta_F &= 0,001 \text{ Pas}, X_s = 0,01, \\ X_a &= 0, A = 5 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\Delta p = 0,5 \text{ bar}$$

# Beispiele



Mischen ist das Zusammenführen mehrerer Komponenten (g,l,s) mit dem Ziel ein homogenes Produkt zu erhalten.

## Homogenisieren

2.3.1

Notizen

### Umfangsgeschwindigkeit - Rührer

$$v_{\text{Rührer}} = \omega \cdot r_{\text{Rührer}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r \quad \frac{m}{s}$$

### Winkelgeschwindigkeit - Rührer

$$\omega_{\text{Rührer}} = 2 \cdot \pi \cdot n = \frac{v_{\text{Rührer}}}{r_{\text{Rührer}}} \quad \frac{1}{s}$$

### Rührerleistung

$$P_{\text{Rührer}} = Ne \cdot \rho_L \cdot n^3_{\text{Rührer}} \cdot d^5_{\text{Rührer}} \quad W$$

Ne - Zahl im turbulenten Bereich ist konstant

### Rührer - Reynoldszahl

$$Re_{\text{Rührer}} = \frac{n \cdot d_2^2 \cdot \rho}{\eta}$$

### Mischzeit

$$\Theta = \frac{5,2}{n \cdot Ne^{1/3}} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \quad s$$

für Axialrührer im turbulenten Bereich

## Suspendieren

2.3.2

### Suspendierdrehzahl (Zwietering-Gleichung)

$$n_{js} = c_{\text{Zwiet}} \cdot \frac{d_p^{0,2}}{d^{0,85}} \cdot \left(\frac{g \cdot (\rho_s - \rho_L)}{\rho_L}\right)^{0,45} \cdot \nu^{0,1} \cdot X^{0,13} \quad \frac{1}{s}$$

für kugelförmige Partikel

$c_{\text{Zwiet}}$  siehe Anhang A2.3.2

d in m; g in  $m/s^2$ ;  $\rho$  in  $kg/m^3$ ;  $\nu$  in  $m^2/s$ ; X in %

!Werte in korrekter Einheit einsetzen!

Notizen

Zerkleinerungskonstanten

A2.1

c <sub>Bond</sub> -Konstanten	Nass	Trocken	Dichte
	$m^{2,5}/s^2$		$kg/m^3$
Kohle	409	548	1630
Gips	294	394	2690
Eisenerz	556	745	3690
gebrannter Ton	51	69	2320
Glimmer	4842	6488	2890
Feldspat	420	563	2590

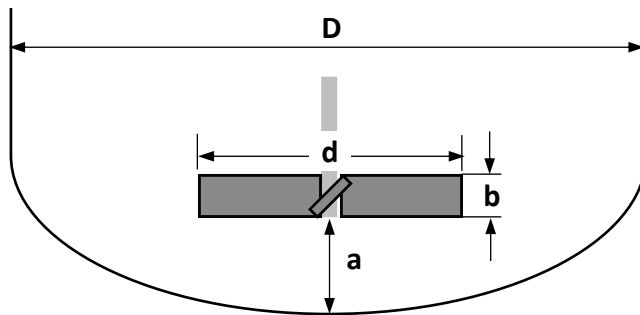
1

1: Zogg:"Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik":1993, Seite S.56 (Teubner Verlag)

2: Zogg:"Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik":1993, Seite S.142 (Teubner Verlag)

Zwietering-Konstanten ( $c_{Zwiet}$ ) für Klöpperböden

A2.3.2



Rührertyp	d	b	a	$c_{Zwiet}$
A310	D/2,4	-	D/4	6,9
	D/2			7,1
30° Schrägblattrührer	D/3	D/2,5	D/4	6,4
			D/6	7,1
			D/8	7,2
45° Schrägblattrührer	D/3,3	D/2,1	D/4	4,5
			D/8	4,3
	D/3	D/3,5	D/4	4,8
			D/6	4,6
	D/2,5	D/2,8	D/8	4,2
			D/4	4,7
	D/2	D/3,5	D/8	3,4
			D/4	5,2
	D/2	D/6	D/6	4,2
			D/8	3,7
	D/2	D/6	D/4	5,5
			D/8	5,5
	D/1,7	D/3,5	D/4	6,7
			D/6	5,1
	D/1,7	D/4,3	D/8	4,4
D/4			6,8	
D/1,4	D/5	D/8	3,8	
		D/4	5,4	
D/3	D/4	D/8	4,5	
		D/4	4,4	
D/3	D/4	D/6	4,1	
		D/8	3,7	
90° Schrägblattrührer	D/3	D/5	D/4	4,4
			D/6	4,1
			D/8	4,1

1: Paul/Atiemo-Obeng/Kresta:"Handbook of Industrial Mixing":2004, Seite S.560 (Wiley)





