

Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2022

6. Dispergieren

Lernziele zu Kapitel 6

- Wissen:
 - Mechanismen der Dispergierung
 - Dispergierapparate und -maschinen
 - grundsätzliche Zusammenhänge
- Fähigkeiten:
 - Auswahl geeigneter Dispergierapparate

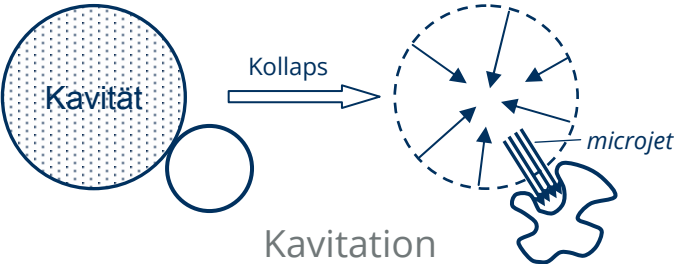
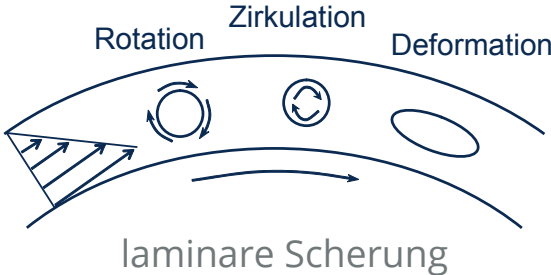
6.1 Dispergieren

- Dispergieren in Strömungsfeldern -

Dispergieren in Strömungsfeldern

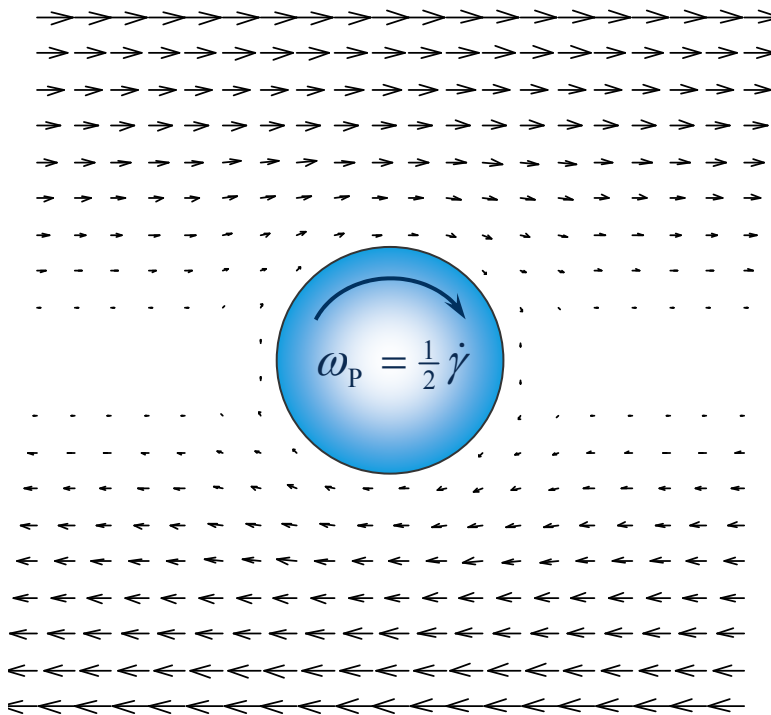
- Dispergieren
 - = gleichmäßiges Verteilen einer dispersen in einer kontinuierlichen Phase
„gleichmäßig“ → gute Vermischung und kleine Partikel
- betrifft
 - Blasen- und Tropfenzerkleinerung
 - „Homogenisieren“ geflockter Suspensionen
 - Aufbruch von Feststoffagglomeraten und – aggregaten
- Dispergierung in Strömungen
 - **laminares Scherfeld** → Verformung durch Druck- und Scherkräfte
 - **laminare Dehnströmung** → *Stretching*
 - **turbulente Strömungen** → hochfrequente Druckstöße im Trägheitsbereich ($x > 20l_D$) und Scherkräfte im Dissipationsbereich ($x < 5l_D$)
 - **Kavitationsfelder** → intensive, lokale Druckstöße durch kollabierende Kavitationsbläschen (ähnlich wie bei Turbulenz)

Dispergieren in Strömungsfeldern



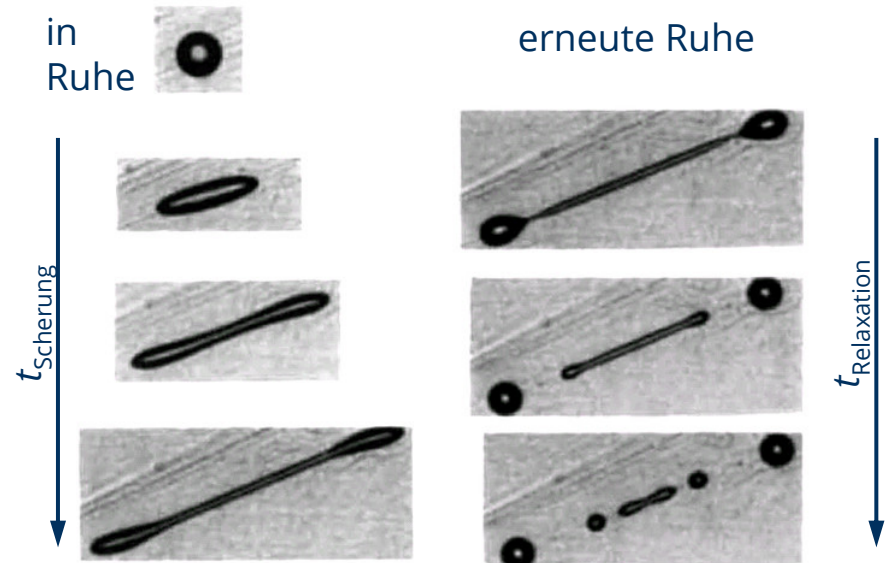
Tropfen in laminarer Scherströmung

Kugel im idealen Scherfeld



$$\mathbf{v}^\infty: v_x = \dot{\gamma} \cdot y$$

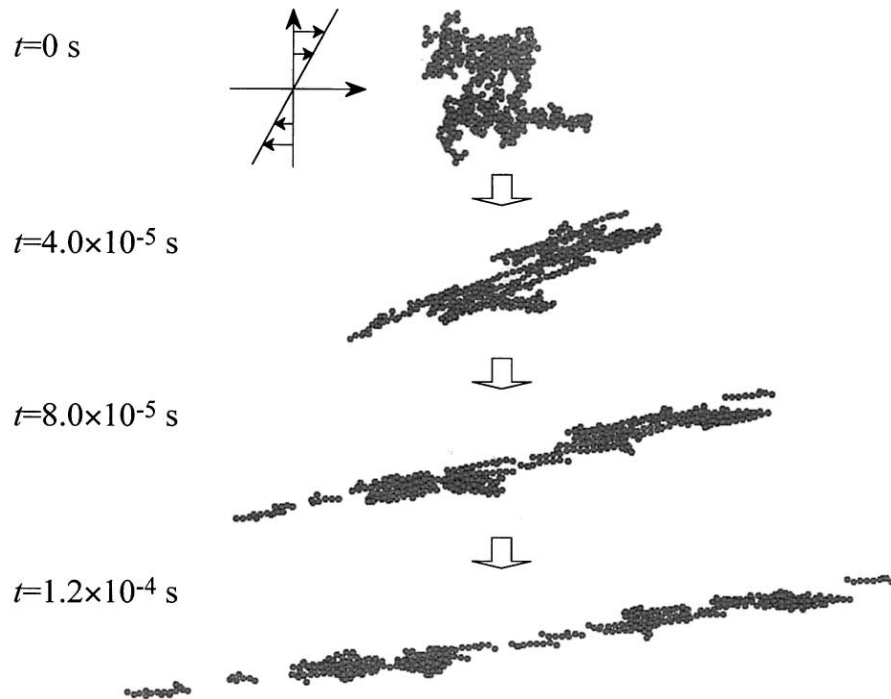
Tropfen im realen Scherfeld



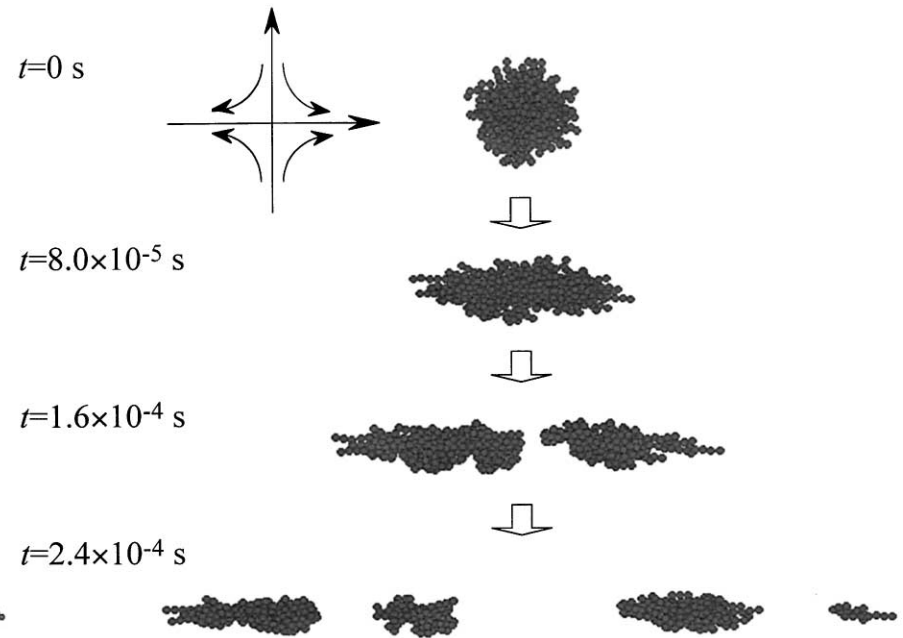
Stone et al., *J. Fluid Mech.*, **173**:131–158, 1986

Flocken in laminarer Scher- und Dehnströmung

laminare Scherströmung



laminare Dehnströmung



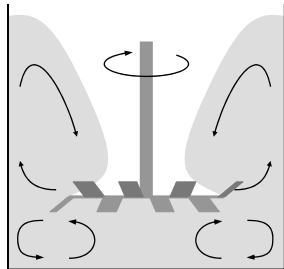
K. Higashitani et al., *Chem. Eng. Sci.*, 56(9):2927-2938, **2001**; doi: 10.1016/S0009-2509(00)00477-2

6.2 Dispergieren

-Dispergierpraxis-

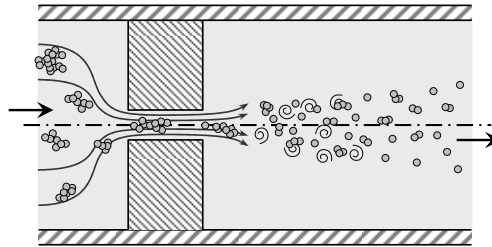
Dispergiertechniken

Scheibensysteme (Dissolver)



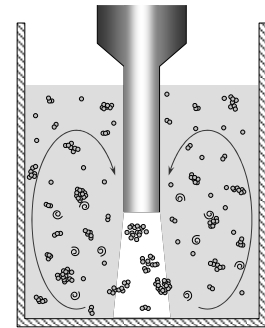
laminare Scherung in
hochviskosen Medien

Hochdrucksysteme (Düsen, Blenden, ...)



Dehnströmung in Düse,
Turbulenz im Nachlauf
(für Emulsionen)

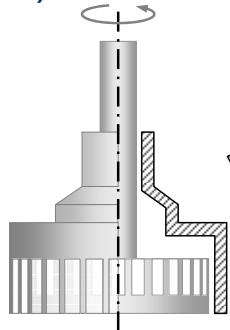
Ultraschalldispergierer



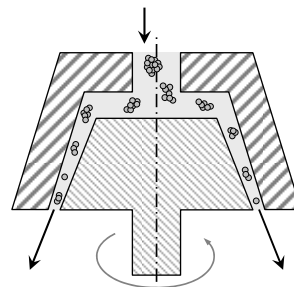
Dispergieren durch Kavitation
(Emulsionen & Agglomerate)

Rotor-Stator-Systeme

a) Zahnkranzdispergierer

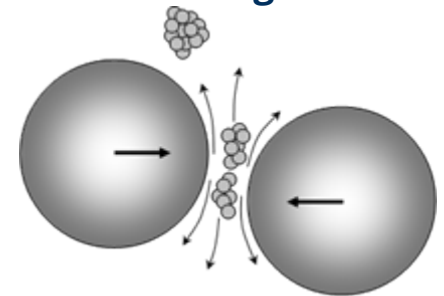


b) Kolloidmühlen



turbulente Strömung von meist niedrig viskosen Medien
(Emulgieren & Desagglomerieren)

Rührwerkskugelmöhlen



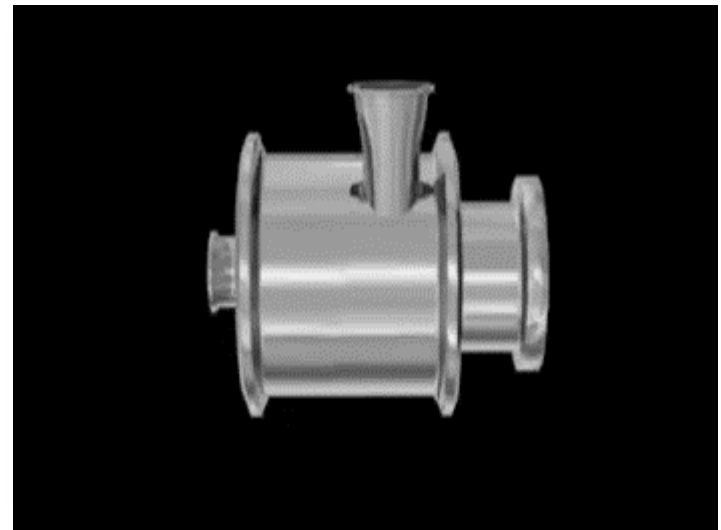
Dehnströmung zur
Desagglomeration

Dispergiermaschinen – Beispiele

Kreisdissolver für Großchargen
(u.a. für Farben, Klebstoffe, Kosmetika)



Rotor-Stator-System für kont. Betrieb
(u.a. Dispergieren, Emulgieren, Mischen)

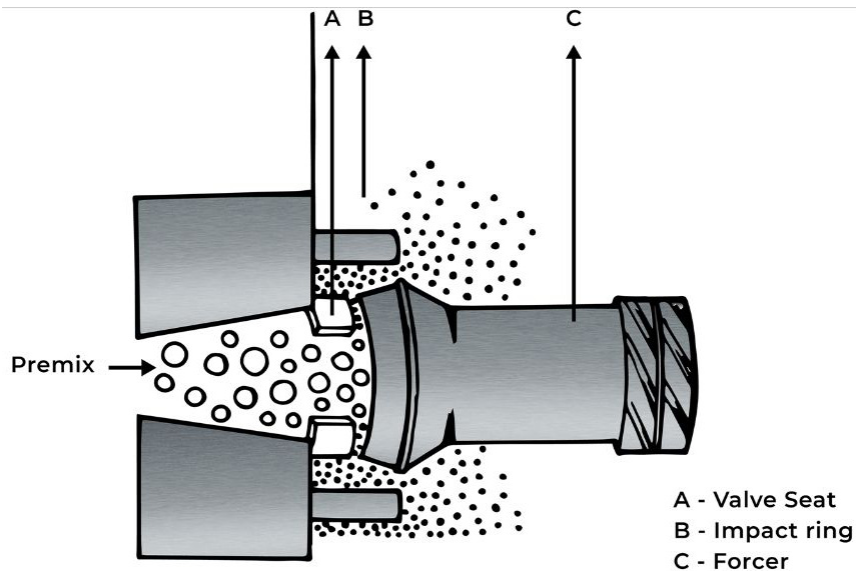


www.niemann.de/produkte/kreis-dissolver-kdv/standard-kdv

<https://www.ytron.com/en/products/ytron-z-homogenizer>

Dispergiermaschinen - Beispiele

Hochdruckdispergierer für kont. Betrieb
(bis 2800 bar & 4 l/min, u.a. für Nanolipide)



<http://de.microfluidicscorp.com/microfluidizer-%C2%AE-processors/pilot-scale-and-production-equipment/production-scale-m-700-series/>

Yadav & Kale, *J. Pharm. Innovation*, 15:690-701, **2020**

Ultraschalldispergierer für kont. Betrieb
(16 kW, u.a. für Emulgieren, Zellaufschluss, Dispergieren)



https://www.hielscher.com/i16000_p.htm

Grundlagen des Dispergierens

- allgemein:
 - Zerfall wenn Beanspruchung > Zusammenhalt des Partikels
 - Zerfall wird begünstigt durch Verformung
 - Beanspruchung ist abhängig vom Strömungsregime und der Größenskale
 - Beanspruchungsintensität variiert lokal
 - stets unterliegt nur ein Bruchteil der Partikel der max. Beanspruchung
- „Zusammenhalt“
 - Tropfen/Blasen: Oberflächenspannung bzw. Kapillarkraft
 - Trägheitsbereich → Weber-Zahl: $We = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{OF-Kraft}} = \frac{\text{kinet. Energie}}{\text{OF-Energie}} = \frac{\rho u^2 L}{\sigma}$
 - laminare Scherung bzw. Dissipationsbereich → Kapillarzah: $Ca = \frac{\text{Reibungskraft}}{\text{OF-Kraft}} = \frac{\eta u}{\sigma} = \frac{\rho \dot{\gamma} L}{\sigma}$
 - Agglomerate: Zugfestigkeit σ_T (verringert sich bei wiederholter Beanspruchung)
 - entscheidend Fragmentierungszahl: $Fa = \tau_{\text{disp}} / \sigma_T$

Einfluss von Leistung und Zeit

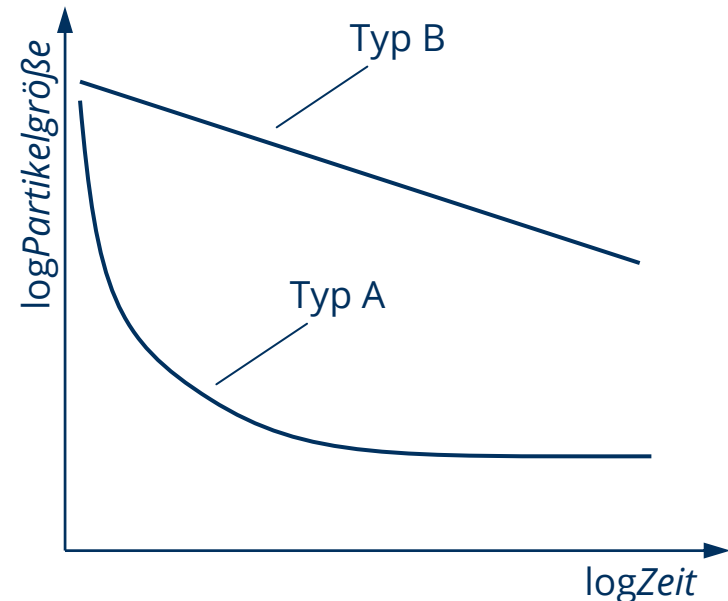
- Typ A
 - schwache Bindungskräfte (z.B. Dispergierung von großen Flocken, meist: $x \gg 10\mu\text{m}$)
 - stationäre Endgröße x_∞ abh. von spezif. Leistungseintrag ε

$$x \sim \varepsilon^{-n}$$

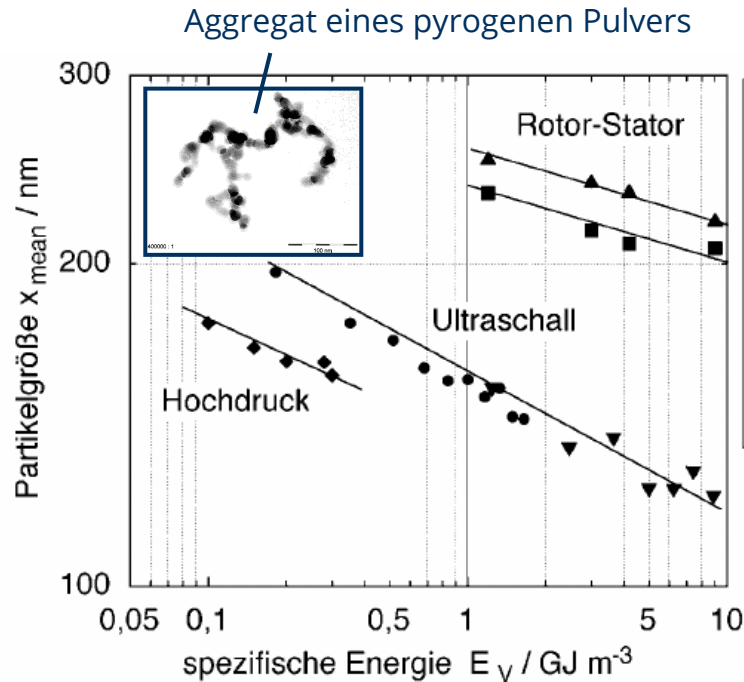
- Typ B
 - starke Bindungskräfte (z.B. Emulsionen & Agglomerate $< 10\mu\text{m}$)
 - Partikelgröße x abh. Energiedichte

$$E_V = P_V \cdot t, P_V = \varepsilon \cdot \rho_{\text{SUS}}$$

$$x \sim E_V^{-\alpha}$$



Beispiel: Dispergierung pyrogener Pulver



Pohl et al., *Chem. Ing. Tech.*, 77(3):258-262, **2005**.

Energiedichte für Batchprozesse:

$$E_V = \eta_{\text{nenn}} \cdot P_{\text{nenn}} \cdot t / V_{\text{Sus}} \quad (\text{z.B. R-S, US})$$

Energiedichte für kontin. Prozesse:

$$E_V = \eta_{\text{nenn}} \cdot P_{\text{nenn}} / \dot{V}_{\text{Sus}} \quad (\text{z.B. HD-Düse})$$

(für HD-Systeme gilt: $E_V = \Delta p$)

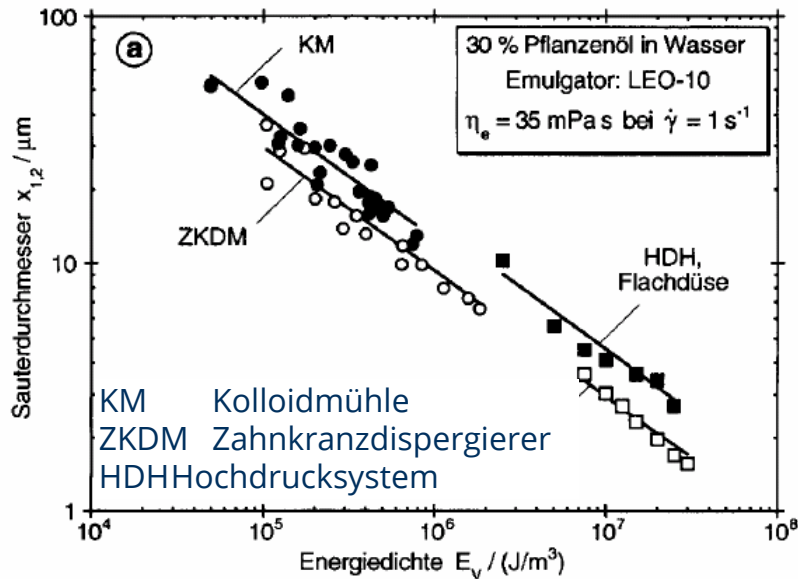
empirisches Zerkleinerungsgesetz:

$$x_{\text{mean}} \propto E_V^{-\alpha}$$

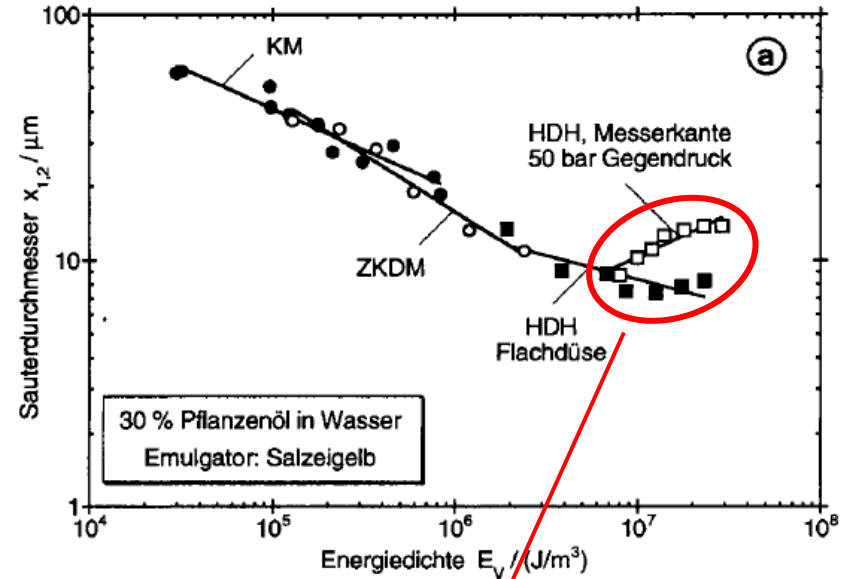
mit $\alpha = 0.08 \dots 0.15$ (gültig für $x_{\text{agg}} \gg x_p$)

Beispiel: Emulgieren

- empir. Emulgiergesetz $x_{av} \propto E_V^{-\alpha}$ mit $\alpha = 0.25 \dots 0.4$



Karbstein & Schubert, Chem. Ing. Tech.,
67(5):616-619, 1995.



Koaleszenz!
hohe Kollisionsrate bei hohem Düsendurchfluss
außerdem: langsam diffundierender Emulgator

6.3 Dispergieren

- Emulgieren und Blasendispergieren -

Emulgieren und Blasendispergieren

- Emulgieren
 - Herstellen stabiler Emulsionen für pharmazeutische Produkte (Salben), Kosmetika (Cremes), Lebensmittel (Dressing)
 - (instabile) Emulsionen als Kühlmittel
 - instabile Emulsionen für Stoffaustauschprozesse (Absorption)
- Blasendispergierung
 - Flotation von Erzschlämmen, Altpapierpulpen, Abwässern
 - „Belüftung“ von biotechnologischer Reaktoren (aerobe Abwasserbehandlung, Fermentation)
 - chemische Reaktionen (Hydrierung)
 - Gaswäsche
- gemeinsames Merkmal: fluide Partikel
 - innere Viskosität und flexible Oberfläche mit Grenzflächenspannung
 - (oszillierende) Deformation und Aufbruch
 - Koaleszenz
 - Grenzflächenstabilisierung durch grenzflächenaktive Substanzen

Dispergieren fluider Partikel im Trägheitsbereich

- Trägheitsbereich ($12 \cdot l_D < x < 0.1 \cdot A$)
 - Partikelbeanspruchung durch Druckschwankungen
 - Schwankungsgeschwindigkeit: $\overline{u'^2} = C_1 \cdot \varepsilon^{\frac{2}{3}} x^{\frac{2}{3}}$
- Dispergierung, wenn ...
 - äußere Beanspruchung > Zusammenhalt
 - destruktiv: Deformation durch Druckstöße
 - stabilisierend: Grenzflächenenergie (und innere Reibung falls $\eta_P / \eta_F > 1$)
- durch Tropfenzerfall bestimmte maximale Partikelgröße
 - stabilisierende und destruktive Effekte im Gleichgewicht $\rightarrow We = We_{krit}$
 - Weber-Zahl im Trägheitsbereich: $We = \frac{\rho \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot x^{5/3}}{\sigma}$
 - maximale Partikelgröße: $x_{max} = \left(\frac{We_{kr} \cdot \sigma}{\rho} \right)^{3/5} \cdot \varepsilon_{max}^{-2/5}$
 - falls berechnetes $x_{max} < 12 \cdot l_D \rightarrow$ kein Trägheitsbereich $\rightarrow x_{max} \approx 10 \cdot l_D = 10 \cdot \frac{v^{3/4}}{\varepsilon^{1/4}}$
 - für gegebenen Apparat gilt: $x_{ST} \sim x_{max}$

Begaste Rührkessel

- vollturbulente Strömung: $Ne = konst.$

- mittlere Dissipationsrate: $\bar{\varepsilon} = C \cdot Ne \cdot \frac{d_R}{h_F} \cdot d_R^2 \cdot n^3$

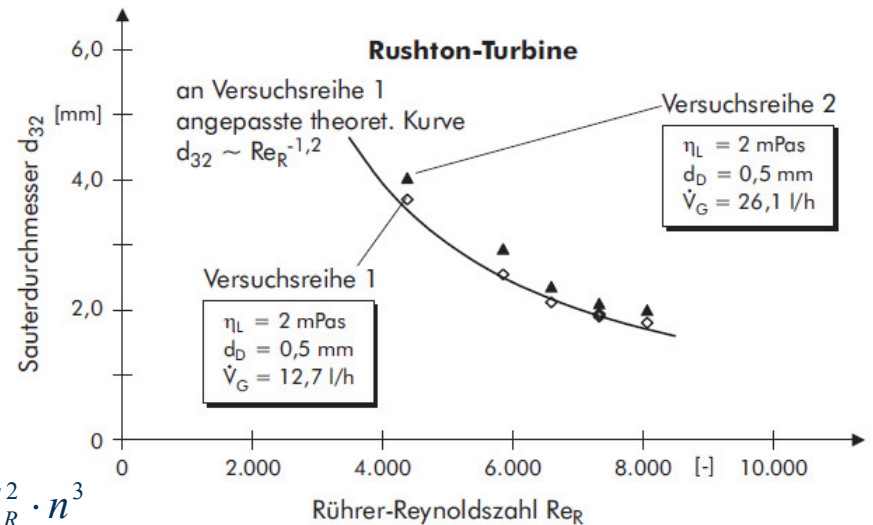
- maximale Dissipationsrate: $\varepsilon_{max} \sim \bar{\varepsilon} \quad \varepsilon_{max} \sim d_R^2 \cdot n^3$

- maximale Partikelgröße: $x_{max} = \left(\frac{We_{kr} \cdot \sigma}{\rho} \right)^{3/5} \cdot \varepsilon_{max}^{-2/5} \sim \left[\frac{We_{kr}^3 \cdot \sigma^3}{\rho^3} \cdot \frac{1}{d_R^4 n^6} \right]^{1/5}$

bzw.

$$x_{max} \sim \left[\frac{We_{kr}^3 \cdot \sigma^3 \cdot d_R^8 \cdot \rho^3}{\eta^6} \cdot \frac{\eta^6}{\rho^6 d_R^{12} n^6} \right]^{1/5}$$

- Abhängigkeit von Re_R : $\frac{x_{max}}{d_R} \sim \left(\frac{\sigma \cdot d_R \cdot \rho}{\eta^2} \right)^{3/5} \cdot Re_R^{-6/5}$



Felsmann, Dissertation TU München 2003, S. 97

Existenzbereich von Tropfen/Blasen in turbulenten Strömungsfeldern

- **maximale** Partikelgröße bestimmt **durch Dispergierung** großer Partikel im turbulenten Strömungsfeld

$$x_{\max, \text{Disp}} \sim \varepsilon^{-2/5}$$

- **maximale** Größe auch bestimmt **durch Absetzen/Aufrahmen** der Partikel
 - Entmischung falls Sedimentation > turbulente Rückvermischung

- Phasenseparation falls:
$$\frac{P_{\text{kin}}}{P_{\text{Sed}}} = \frac{\rho_{\text{Sus}} \cdot V_{\text{Sus}} \cdot \varepsilon}{g \Delta \rho \cdot \varphi_{V, \text{Sus}} \cdot V_{\text{Sus}} \cdot v_{S, \text{eff}}} = \frac{\rho_{\text{Sus}} \cdot \varepsilon}{g \Delta \rho \cdot \varphi_{V, \text{Sus}} \cdot v_{S, \text{eff}}} \ll 1$$

d. h., wenn $v_{S, \text{eff}} \gg \text{const.} \cdot \varepsilon$ bzw. $x^2 \gg \text{const.} \cdot \varepsilon$

- max. Partikel in der Dispergierzone: $x_{\max, \text{Sed}} \sim \varepsilon^{1/2}$

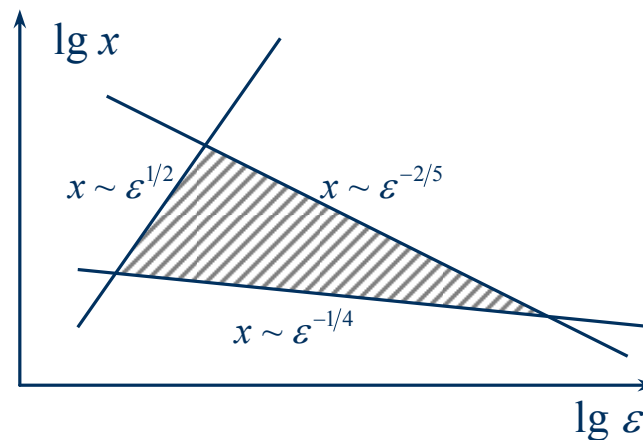
- **minimale** Größe bestimmt **durch Koaleszenz** der Blasen oder Tropfen

- Koaleszenz bei Kollision und ausreichend langem Kontakt
- lange Kontaktzeiten wenn attraktive WW > kinet. Energie der Mikrowirbel

- Koaleszenz, falls:
$$\frac{E_{\text{kin}}}{E_{\text{attr}}} = \frac{\rho \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot x^{11/3}}{A(h) \cdot x} \ll 1 \rightarrow x_{\min} \sim \varepsilon^{-1/4}$$

Existenzbereich von Tropfen/Blasen in turbulenten Strömungsfeldern

- Zusammenfassung der Grenzen:



- Abweichungen:
 - grenzflächenaktive Substanzen → verhindern Koaleszenz
 - Rückwirkung der Teilchenbewegung und Dispergierung auf Turbulenz → Einfluss der Partikelkonzentration bei hohen Konzentrationen
 - Dispergierung durch andere Mechanismen

6.4 Dispergieren

- Literaturverweise -

Literatur zum Dispergieren

Handbücher und Monographien:

- F. Schubert, (Hrsg.): *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Bd. 1*; Wiley-VCH, Weinheim, **2003**; doi:10.1002/3527603352;
→ Kap. 3.3.3.3 & 3.3.3.4
- F. Babick: *Suspensions of colloidal particles and aggregates*; In series: *Particle Technology Series, vol. 20*. Springer, **2016**; doi: 10.1007/978-3-319-30663-6
→ Kap. 5.1

wissenschaftliche Überblicksartikel:

- H. P. Schuchmann, T. Danner: Emulgieren. Mehr als nur Zerkleinern. *Chem. Ing. Tech.*, 76(4):364-375, **2004**; doi:10.1002/cite.200406163