

# Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

## *Folien zur Vorlesung*

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

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

# 4.4 Fließverhalten

## *- Suspensionen und Emulsionen -*

# Suspensionsviskosität

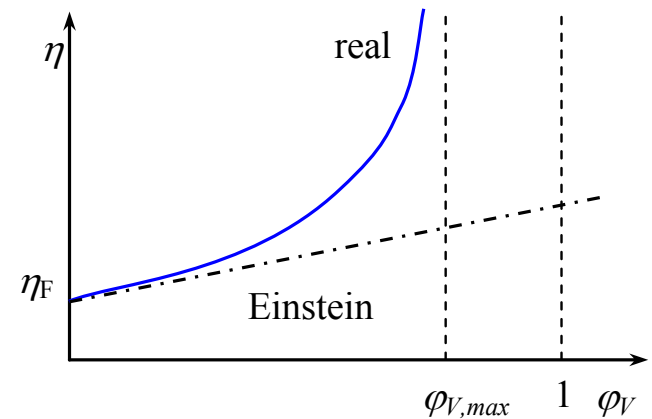
- es gilt:  $\eta_S > \eta_F$
- entscheidend: Feststoffvolumenanteil  $\varphi_V$
- Einstein (1906 & 1911)

- original: 
$$\eta_S/\eta_F = \frac{1 + \frac{1}{2} \varphi_V}{(1 - \varphi_V)^2}$$

- **vereinfacht:** 
$$\eta_S/\eta_F = 1 + \frac{5}{2} \varphi_V$$

- Eilers (1941): 
$$\eta_S/\eta_F = \left( 1 + \frac{K \cdot \varphi_V}{1 - \varphi_V/\varphi_{V,max}} \right)^2$$

- bei hohen Partikelkonzentrationen
  - nicht-Newtonsches Fließen
  - Einfluss der Partikelform
  - Einfluss der interpartikulären Wechselwirkungen



maximale Packungsdichte  $\varphi_{V,max}$  abh. von Form, Polydispersität und interpartikuläre Wechselwirkungen

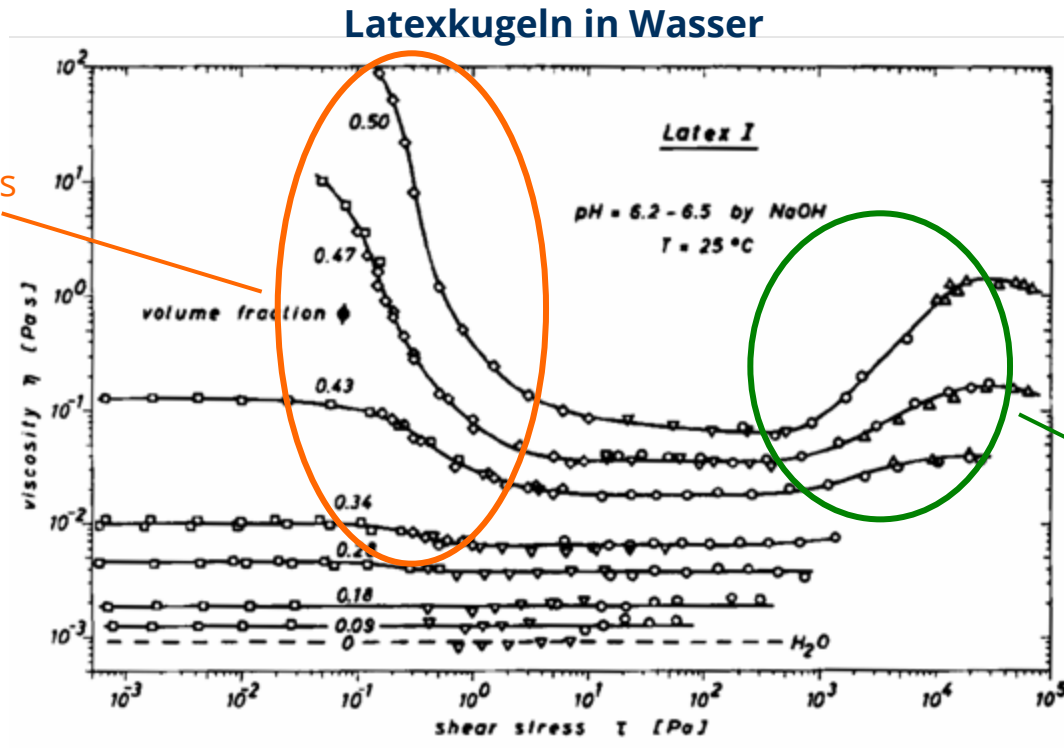
Der Einstein-Koeffizient

$$K_E = \lim_{\varphi_V \rightarrow 0} \frac{1}{\varphi_V} \cdot \left( \frac{\eta_S}{\eta_F} - 1 \right)$$

ist abhängig von der Partikelform; er wird auch als *Formfaktor* oder *intrinsische Viskosität* bezeichnet

# Fließverhalten von Suspensionen – Beispiel 1

Scherverdünnung  
(pseudoplastisches  
bzw. strukturviskoses  
Fließen)

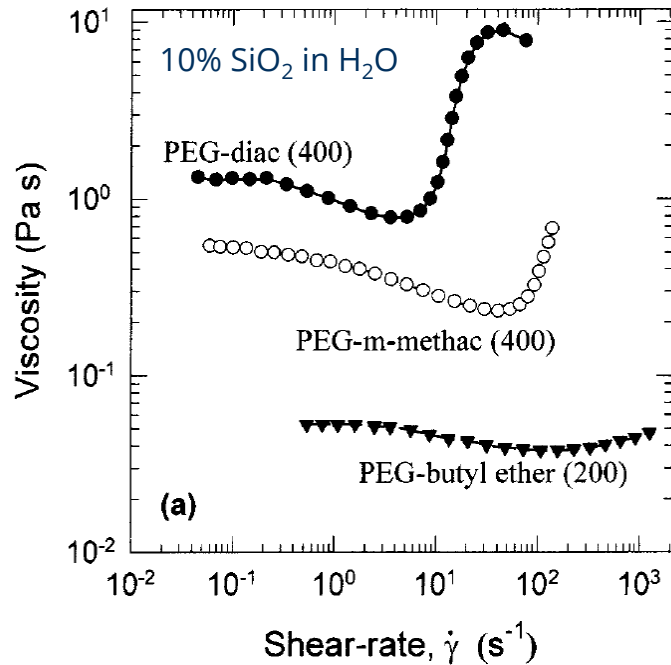


Scherverdickung  
(dilatantes Fließen)

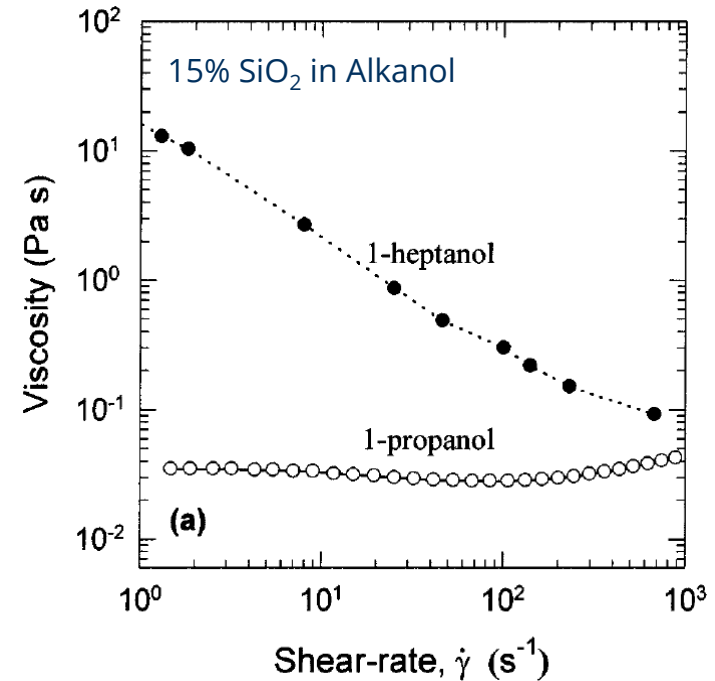
Bildquelle: H. M. Laun, *Angew. Makromol. Chem.*, 123/124:335-359, 1984.

# Fließverhalten von Suspensionen – Beispiel 2

## Einfluss der Grenzfläche

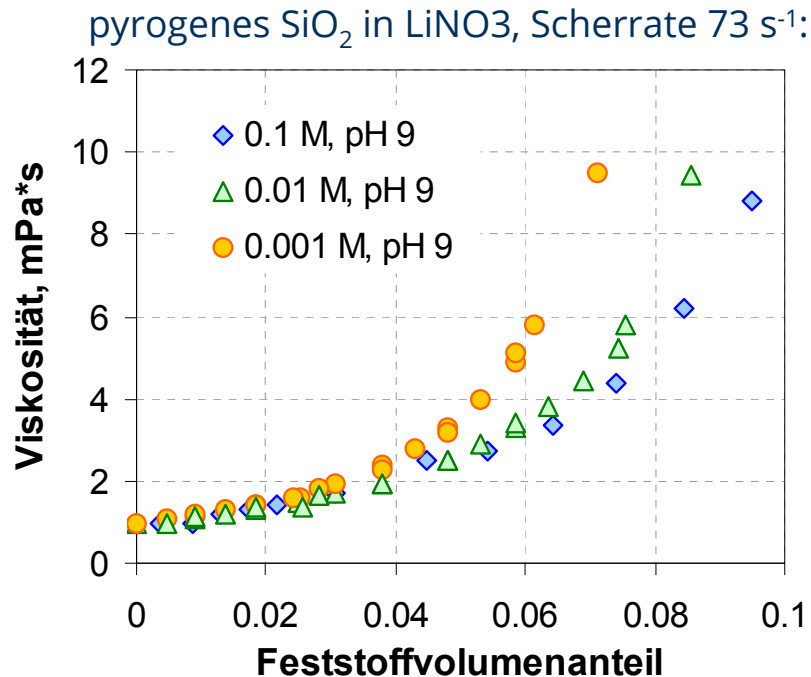


## Einfluss des Lösemittels



Bildquelle: S. R. Raghavan et al., *Langmuir*, 16:7920-7930, 2000.

# Fließverhalten von Suspensionen – Beispiel 3



- Konzentration  $\uparrow \rightarrow$  Viskosität  $\uparrow$
- abh. von interpartikulären Wechselwirkungen
- solange keine Agglomeration: Salzgehalt  $\uparrow \rightarrow$  Viskosität  $\downarrow$  (= elektroviskoser Effekt)

# Berechnungsgleichungen (Auswahl)

- Eilers (1941):  $\eta_S/\eta_F = \left(1 + \frac{K \cdot \varphi_V}{1 - \varphi_V/\varphi_{V,\max}}\right)^2$
- Mooney (1951):  $\eta_S/\eta_F = \exp\left(\frac{K \cdot \varphi_V}{1 - k \cdot \varphi_V}\right)^2$
- Krieger & Dougherty (1959):  $\eta_S/\eta_F = (1 - \varphi_V/\varphi_{V,\max})^{-K \cdot \varphi_{V,\max}}$
- Happel (1957):  $\eta_S/\eta_F = 1 + \frac{\frac{11}{2} \varphi_V \cdot \left(4\varphi_V^{\frac{7}{3}} + 10 - \frac{84}{11} \varphi_V^{\frac{5}{3}}\right)}{10\left(1 - \varphi_V^{\frac{10}{3}}\right) - 25\varphi_V \left(1 - \varphi_V^{\frac{4}{3}}\right)}$
- Frankel & Acrivos (1967):  $\eta_S/\eta_F = C \cdot \left(1 - (\varphi_V/\varphi_{V,\max})^{1/3}\right)^{-1}$
- Quemada (1977):  $\eta_S/\eta_F = (1 - \varphi_V/\varphi_{V,\max})^{-2}$
- Batchelor (1977):  $\eta_S/\eta_F = 1 + \frac{5}{2} \varphi_V + 6.2 \varphi_V^2 + \dots$

## Befund

zahlreiche Modelle für die Suspensionsviskosität z.T. mit ähnlichem, z.T. mit unterschiedlichem funktionalen  $\varphi_V$ -Einfluss

## Fragen

¿woraus resultieren die Unterschiede?

¿gibt es keine Aussagen zu nichtnewtonschen Effekten?

## Überlegung

Suspensionsrheologie ←  
 Konzentrationseffekte ←  
 Suspensionsstruktur ←  
 Partikelwechselwirkung

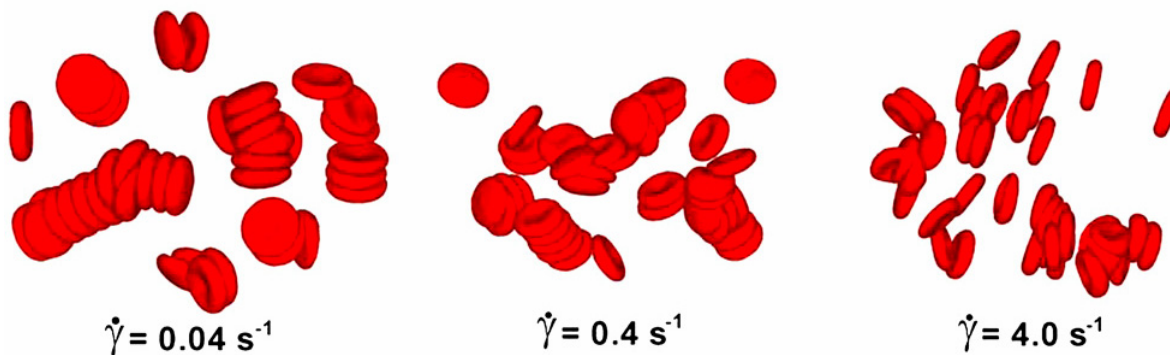
Barnea & Mizrahi, *Chem. Eng. J.*, 5(2):171-189, **1973** / Vorbau, *Diplomarbeit*, TU Dresden, **2007**.

# Effekte auf mikroskopischer Ebene

- strukturelle Effekte
  - Grundkonfiguration entsprechend der Polydispersität und den Partikelwechselwirkungen
  - Ausrichtung von nicht-kugeligen Partikeln im Scherfeld
  - scherinduzierte Rotation von Clustern und Kugelpaaren
  - Brownsche Bewegung: mindert Ausrichtung und Anordnung
    - ← Einfluss der Partikelgröße
  - sowohl scherinduzierte Clusterbildung als auch Clusterzerstörung
- hydrodynamische Effekte
  - viskose Kopplung (Partikel  $i$  beeinflusst Partikel  $j$  und Fluid  $\mathbf{v}(\mathbf{r})$  und umgekehrt)
  - temporäre Beständigkeit von Clustern
  - viskose & inertielle Störungen des Geschwindigkeitsfeldes
    - ← Einfluss der Partikelgröße
  - richtungsabhängige Normalspannungen
- sonstige Effekte
  - Partikelmigration im Scherfeld

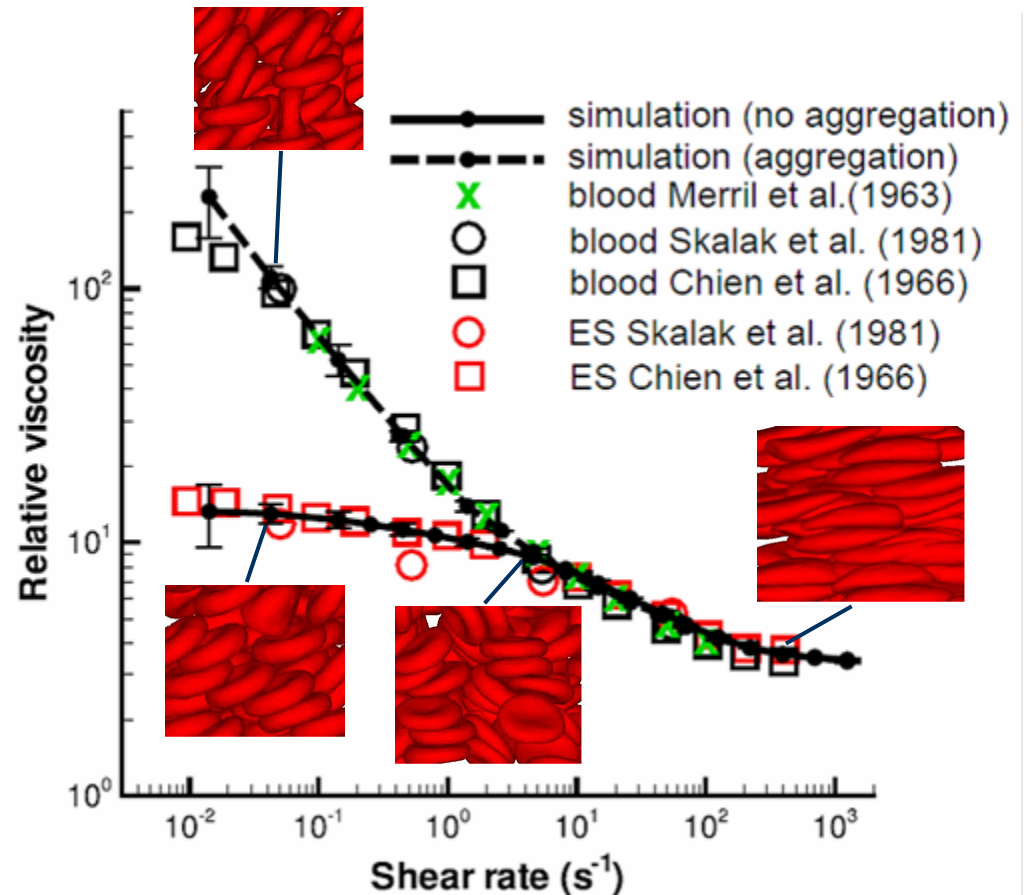
# Scherverdünnung von Suspensionen

- hohe Scherraten begünstigen Vereinzelung von Partikeln bzw. Zerfall von Agglomeraten
  - bei Rotation von Clustern und Agglomeraten dissipiert mehr Energie als in Summe an allen vereinzelt Partikeln
- hohe Scherraten begünstigen Ausrichtung der Partikel im Scherfeld
  - Scherkräfte und Energiedissipation sind an ausgerichteten Partikeln reduziert
- Beispiel rote Blutkörperchen (10 Vol.%, Fedosov et al. 2011)



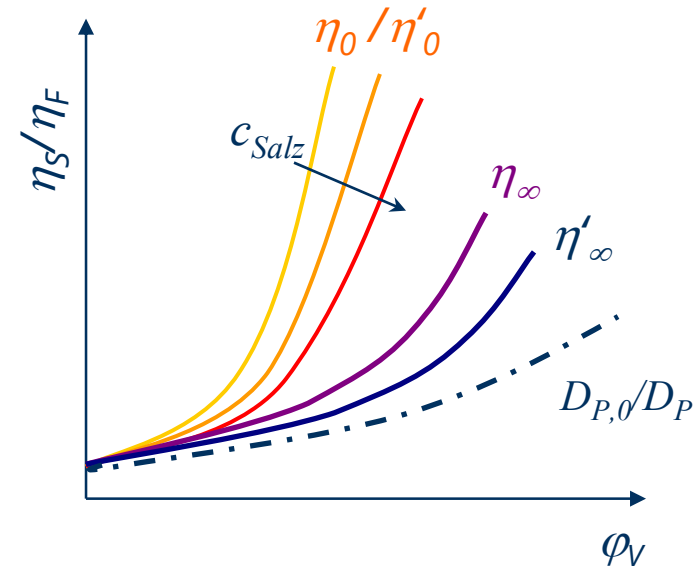
# Scherverdünnung von Blut

- Fedosov et al., *PNAS*, 108(29):11772-11777, **2011**.
- simulierte und exp. Daten für Blut (blood) & Suspensionen aus roten Blutkörpern (ES), je 49%
- im Blut sind rote Blutkörper aggregiert



# Nicht-Newton'sches Fließen von wässrigen Suspensionen

- Einflussfaktoren
  - Feststoffvolumenanteil
  - pH-Wert und Salzgehalt
  - Partikelform & Polydispersität
- Grenzviskositäten
  - ... für stationäre Messung
    - Nullscherung  $\rightarrow \eta_0$
    - hohe Scherraten  $\rightarrow \eta_\infty$
  - ... für oszillatorische Messung
    - niederfrequent  $\rightarrow \eta'_0$
    - hochfrequent  $\rightarrow \eta'_{\infty}$



Grenzviskositäten für geringe Scherraten bzw. Frequenzen sind deutlich stärker von Suspensionsstruktur beeinflusst als jene für hohe  $\dot{\gamma}$  bzw.  $\omega$  oder als die Diffusion der Einzelpartikel

Horn et al., *J. Colloid Interface Sci.*, 225:166-178, **2000**; doi:10.1006/jcis.1999.6705

# Vergleich von Suspensionen und Emulsionen

- feste Kugeln

- hydrodynam. Mobilität:  $\mu_{\text{hd}} = \frac{1}{6\pi\eta_{\text{F}}a}$
- intrins. Viskosität:  $K_{\text{E}} = \frac{5}{2}$  (Einstein 1911)

- Gasblasen in Flüssigkeiten:

- hydrodynam. Mobilität:  $\mu_{\text{hd}} = \frac{1}{4\pi\eta_{\text{F}}a}$
- intrins. Viskosität:  $K_{\text{E}} = 1$

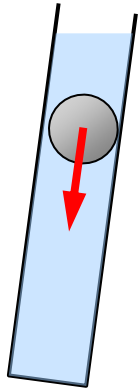
- Emulsionstropfen

- hydrodynam. Mobilität:  $\mu_{\text{hd}} = \frac{1}{6\pi\eta_{\text{F}}a} \cdot \frac{3+3\eta_{\text{P}}/\eta_{\text{F}}}{2+3\eta_{\text{P}}/\eta_{\text{F}}}$
- intrins. Viskosität:  $K_{\text{E}} = \frac{1+\frac{5}{2}\eta_{\text{P}}/\eta_{\text{F}}}{1+\eta_{\text{P}}/\eta_{\text{F}}}$  (Taylor 1932)
- Verformung bei hohem  $\dot{\gamma}$  bzw.  $Ca = \frac{\eta_{\text{F}}\dot{\gamma}a}{\sigma} \gg 0.01 \rightarrow$  viskoelastische Effekte

# 4.5 Fließverhalten - *Rheometrie* -

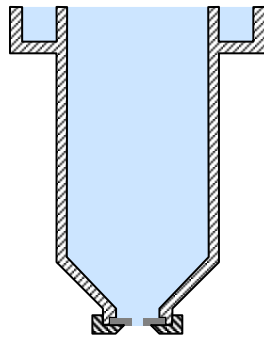
# Viskosimeter

Kugelfallviskosim.



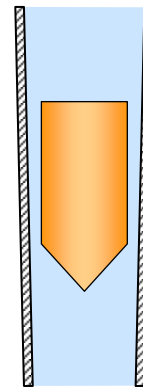
Geschwindigkeit einer abrollenden Kugel

Auslaufbehälter



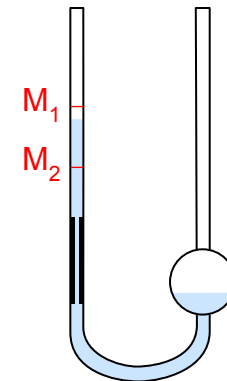
Auslaufzeit

Schwebekörper



Schwebekörperposit<sup>n</sup> im strömenden Fluid

Kapillarrohr



Druckverlust-Durchsatz-Messung

Relativmessung, d.h. Vergleich mit Kalibrierfluid

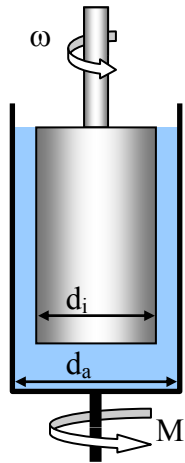
Absolutmessung für hohe Viskositäten

Hoffmann, *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2012.

# Rotationsviskosimeter / Rheometer

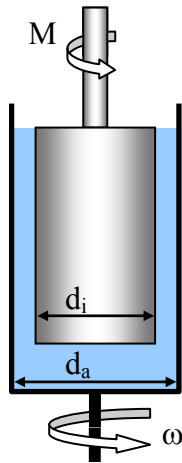
konzentr. Zylinder

Searle-Typ



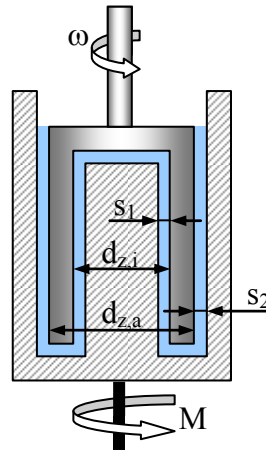
$$\dot{\gamma} = \frac{r_i \omega}{r_a - r_i}$$

Couette-Typ



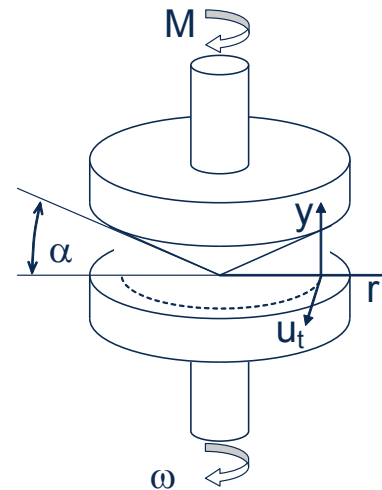
$$\dot{\gamma} = \frac{r_a \omega}{r_a - r_i}$$

Doppelspalt



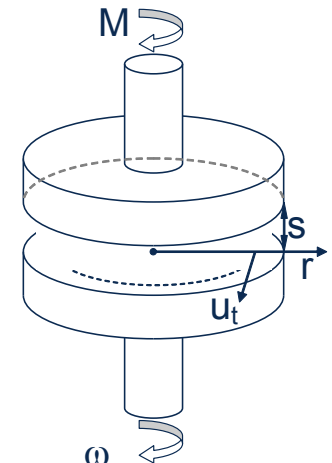
$$\dot{\gamma} = \frac{r_{z,i} \omega}{s_1} = \frac{r_{z,a} \omega}{s_2}$$

Kegel-Platte



$$\dot{\gamma} = \frac{r \omega}{r \cdot \sin \alpha} = \frac{\omega}{\alpha}$$

Platte-Platte



$$\dot{\gamma} = \frac{r \omega}{h}$$

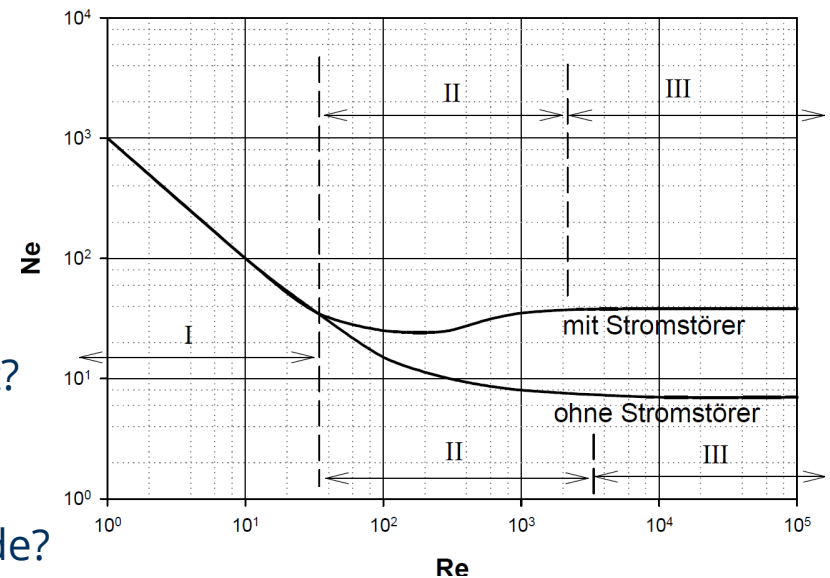
Hoffmann, *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2012.

# Selbststudium zur Rheometrie

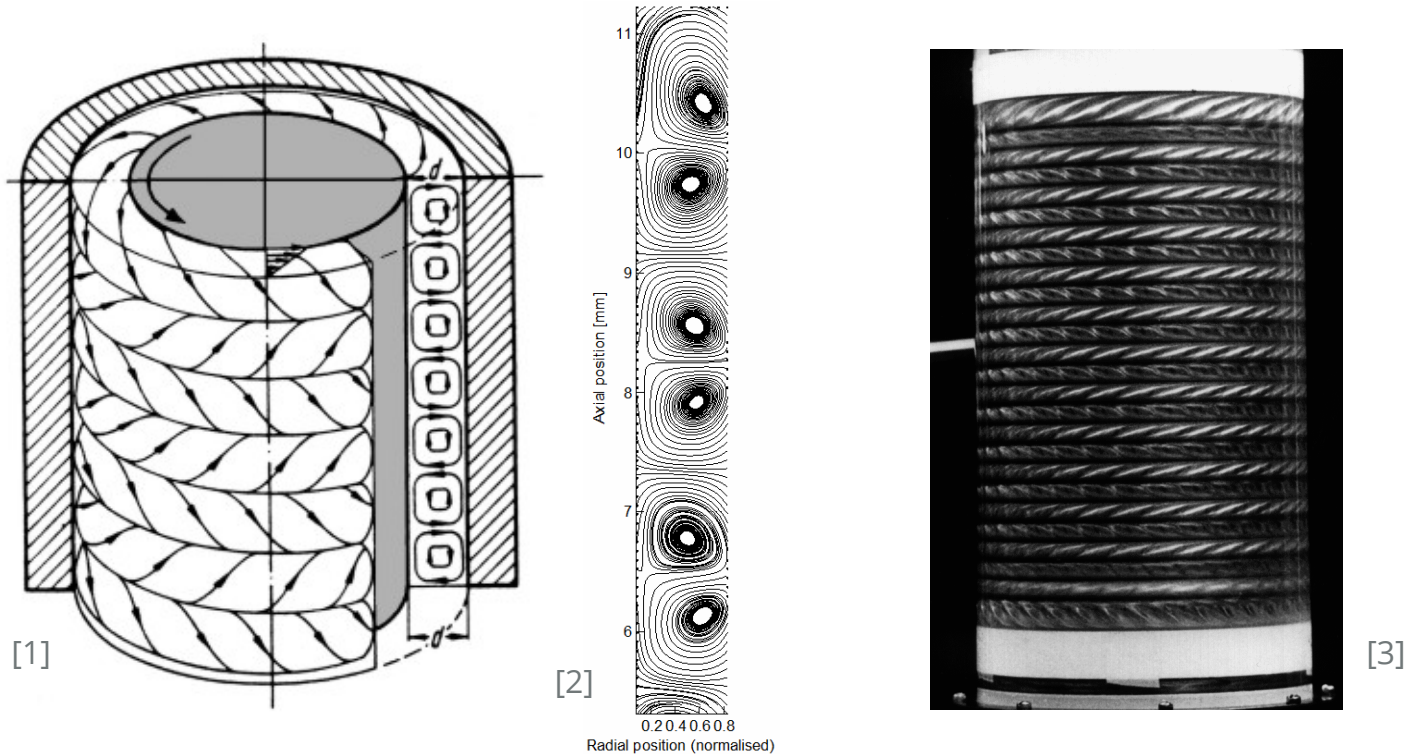
- Informieren Sie sich über die Funktionsweise und die typischen Anwendungsgebiete von Kapillarviskosimetern!
- Wie heißt das physikalische Gesetz (Berechnungsmodell), das zur Auswertung von Messdaten der Kapillarviskosimeter herangezogen wird?
- Informieren Sie sich, wie man mit Hilfe eines Rührwerkes mit integriertem Drehmomentaufnehmer die Viskosität unbekannter Flüssigkeiten messen kann!
- Für welche Analyseaufgaben werden die verschiedenen Rotationsviskosimeter genutzt?
- Schlagen Sie nach, was unter Taylor-Wirbeln verstanden wird und wann sie auftreten!

# Viskositätsermittlung am Rührwerk

- benötigt:
  - Rührwerk mit Drehzahlregelung und Drehmomentmessung
  - Referenzflüssigkeit mit bekannter Viskosität
- Datenanalyse:
  - basierend auf Maßstabsübertragung mittels dimensionsloser Leistungscharakteristik
  - Stoffdaten der Referenzflüssigkeit
  - Dichte der Testflüssigkeit
- Vorüberlegungen:
  - ¿Maßstabübertragung bzgl. Viskosität?
  - ¿für welche Strömungsregime ist dies überhaupt denkbar?
  - ¿anwendbar für nicht-newtonsche Fluide?



# Taylor-Wirbel



- geordnete Wirbelstrukturen im zylindrischen Scherspalt
- ausgelöst durch Zentrifugalkräfte in Searle-Viskosimetern falls  $Re = \frac{\rho \bar{r} \omega s}{\eta} > 41,3 \sqrt{\frac{\bar{r}}{s}}$

[1] nach: Schlichting, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, 1979

[2] CC BY-SA 3.0, Dholm 2010, [https://commons.wikipedia.org/wiki/File:Taylor-Couette\\_Streamlines\\_Re%3D950.png](https://commons.wikipedia.org/wiki/File:Taylor-Couette_Streamlines_Re%3D950.png)

[3] unbekannte Quelle

# Literatur zu Kapitel 4

- G. Böhme, *Strömungsmechanik nichtnewtonscher Fluide*. Teubner Studienbücher, Stuttgart, **2000**; [doi:10.1007/978-3-322-80140-1](https://doi.org/10.1007/978-3-322-80140-1)
- R.P. Chhabra, J.F. Richardson, *Non-Newtonian flow in the process industries. Fundamentals and engineering applications*. Butterworth Heinemann, Oxford and more, **1999**; [doi:10.1016/B978-0-7506-3770-1.X5000-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3770-1.X5000-3); → Chapt. 1 & 2
- M. Rütten, *Verallgemeinerte newtonsche Fluide*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2019; [doi:10.1007/978-3-662-56226-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56226-0); → Kap. 3
- R. G. Larson, *The structure and rheology of complex fluids*. Oxford University Press, New York & Oxford, **1999**; → Chapt. 1 & 6
- D. Lerche, R. Miller, M. Schäffler, *Dispersionseigenschaften. 2D-Rheologie, 3D-Rheologie, Stabilität*. Eigenverlag, Potsdam, **2015**; ISBN 978-3-00-045864-4; → Kap. 5
- G. Naue (Hrsg.): *Technische Strömungsmechanik I*, 3. Aufl., aus der Reihe: Verfahrenstechnik. Dt. Verl. der Grundstoffindustrie, Leipzig, **1983**; → Kap. 11
- J. Hoffmann (Hrsg.), *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, München, **2012**.
- W. Boyes (ed): *Instrumentation reference book, 4<sup>th</sup> ed.*; Butterworth-Heinemann, Boston, **2010**; [doi:10.1016/B978-0-7506-8308-1.00007-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8308-1.00007-3); chapt. 7