

Strömungsprobleme der Mechanische Verfahrenstechnik

Folien zur Vorlesung

NUR ZUM PERSÖNLICHEN GEBRAUCH!

PD Dr.-Ing. habil. Frank Babick, 1. April 2021

4. Fließverhalten von Partikelsystemen

Lernziele zu Kapitel 4

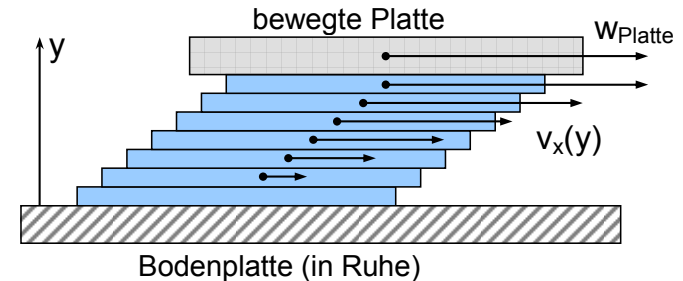
- Wissen:
 - Grundbegriffe
 - Klassifizierung nicht-newtonschen Fließverhaltens
 - Messtechnische Bestimmung des Fließverhaltens
- Fähigkeiten:
 - Identifizierung des Fließverhaltens aus Messdaten
 - Berechnung des Druckverlustes bei nicht-newtonscher Rohrströmung
 - Abschätzung der Viskosität von Suspensionen & Emulsionen

4.1 Fließverhalten

- Grundlagen -

Couette-Strömung und Viskosität

- Couette-Strömung
 - ebene Scherströmung zwischen zwei parallelen Oberflächen
 - $v_x(y) = \dot{\gamma} \cdot y, \quad v_y = v_z = 0$
 - $\dot{\gamma}$ = Scherrate
 - näherungsweise in einigen Rotationsviskosimetern
- Kraft- bzw. Impulsübertragung von bewegter auf ruhende Platte
 - Schubspannung τ
 - wobei $\tau \sim \dot{\gamma}$
- dynamische Viskosität η :
 - $\eta = \tau / \dot{\gamma}$
- kinematische Viskosität ν :
 - $\nu = \eta / \rho$



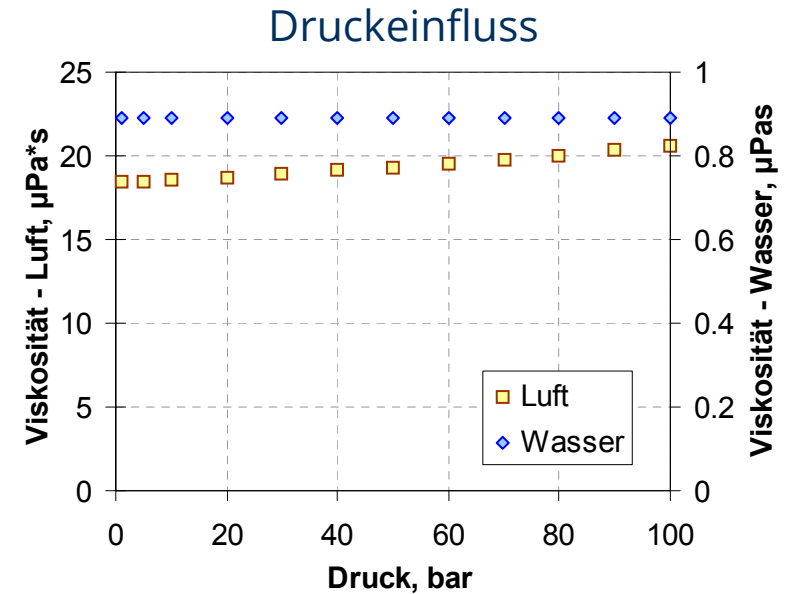
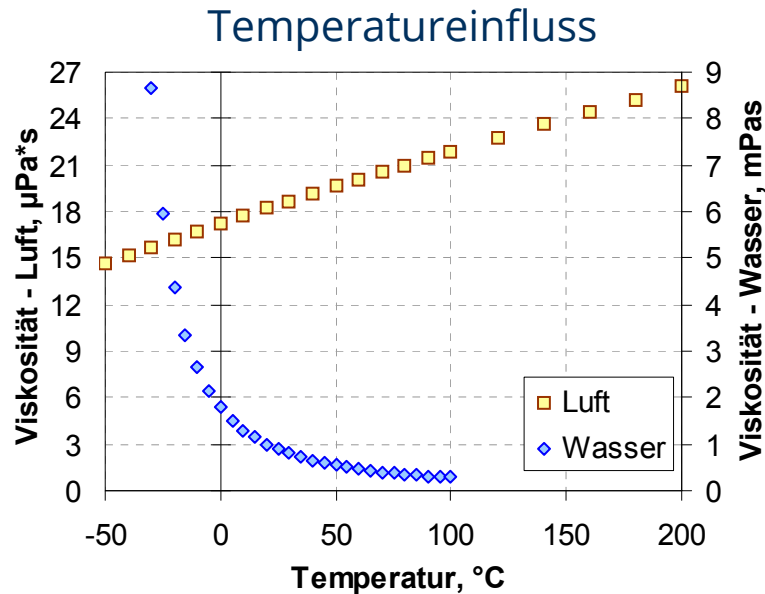
- i) Couette-Strömung ist laminar
- ii) Couette-Strömung basiert auf der Annahme einer belastungsunabh. Viskosität (Newtonsches Fluid)
- iii) im allg. Fall ist laminare Strömung nicht eben und die Viskosität abh. von der lokalen Scherrate

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

Viskositäten ausgewählter Fluide

- Gase:
 - tr. Luft 25 °C (1 bar): $\eta_{25} = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\nu_{25} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Flüssigkeiten
 - Wasser 25 °C: $\eta_{25} = 0.89 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\nu_{25} = 0.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 - Ethanol 25 °C: $\eta_{25} = 1.1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - Sonnenblumenöl: $\eta_{25} = 0.04 \dots 0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - Glycerin 25 °C: $\eta_{25} = 1.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - Honig (25°C): $\eta_{25} \approx 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - Zinn (300°C): $\eta_{300} \approx 1.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- ausgeprägte Temperaturabhängigkeit (positiv für Gase, negativ für Flüssigkeiten)
 - Wasser 20 °C & 30 °C: $\eta_{20} = 1.00 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_{30} = 0.80 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 - tr. Luft (1 bar): $\eta_{20} = 1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\eta_{30} = 1.87 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

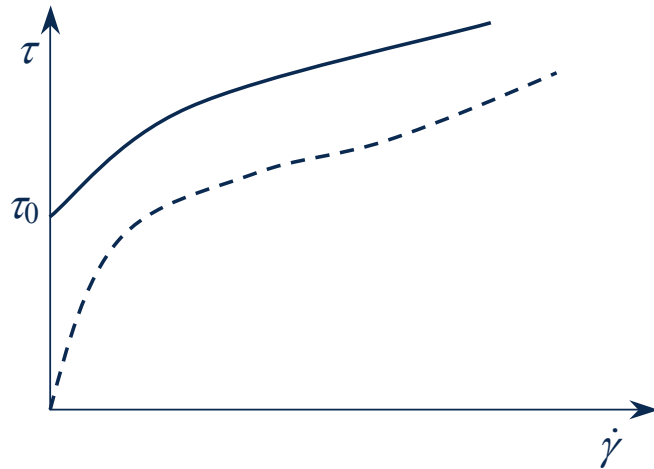
Einfluss von Temperatur und Druck auf die Viskosität



- dynamische Viskosität besitzt ausgeprägte Temperaturabhängigkeit
- ist jedoch kaum vom Druck abhängig – auch nicht bei Gasen

Fließfunktion und Viskositätsfunktion

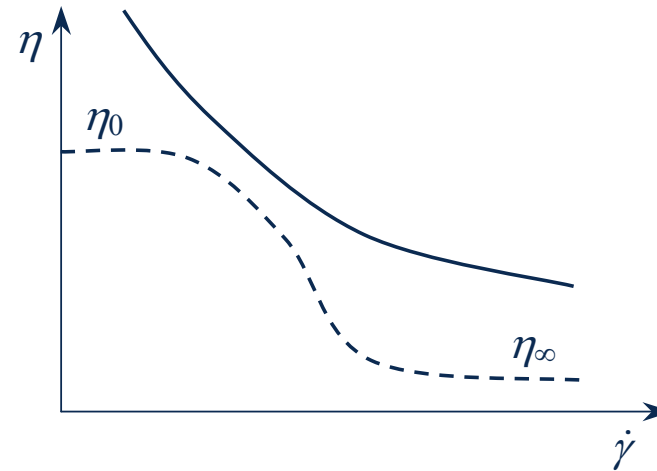
Fließfunktion



Fließgrenze: $\tau_0 = \tau(\dot{\gamma} = 0)$

$\tau_0 > 0$: kein Fließen ohne ausreichend hohe Beanspruchung (z.B. bei Zahnpasta)

Viskositätsfunktion



untere Grenzviskosität: $\eta_0 = \eta(\dot{\gamma} = 0)$

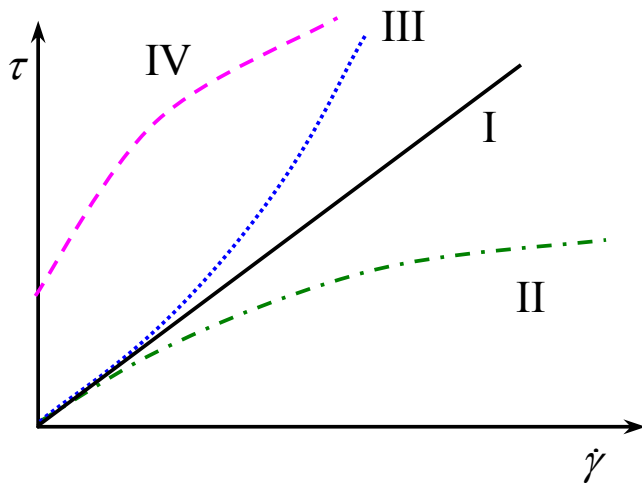
obere Grenzviskosität: $\eta_\infty = \eta(\dot{\gamma} \rightarrow \infty)$

für Newtonsche Fluide ist $\eta = \text{const.}$

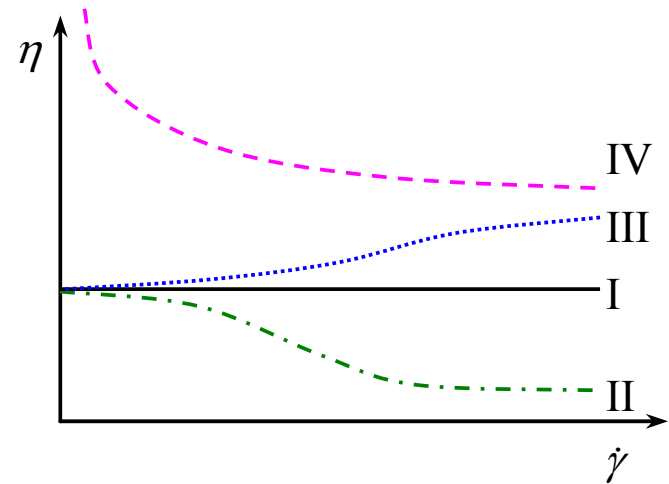
4.2 Fließverhalten

- belastungsabhängiges Nicht-Newtonsches Fließen -

Belastungsabhängiges Fließverhalten



- I Newtonsches Fluid
(Wasser, Glycerin, Luft)
- II pseudoplastisches^a Fluid
(Polymerlösungen, Lacke, Kaolinsuspensionen)



- III dilatantes Fluid
(Stärkelösungen, nasser Sand)
- IV Fluid mit Fließgrenze
(Pasten, Butter, kosmetische Cremes, Druckfarbe)

^aauch: *strukturviskos*

Nicht-Newtonisches Fließen im Experiment



A pool filled with non-newtonian fluid

Alesis69

www.youtube.com/watch?v=f2XQ97XHjVw



Can You Walk on Water? (Non-Newtonian Fluid Pool)

Hong Leong Bank

www.youtube.com/watch?v=D-wxnID2q4A

Empirische Fließgesetze

- ohne Fließgrenze:
 - Ostwald-de-Waele: $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$
 - populär, geeignet zur Anpassung von Messdaten
 - einfache Interpretation: $n < 1$: pseudoplastisch, $n > 1$: dilatant
- mit Fließgrenze
 - Bingham: $\tau = \tau_0 + k_0 \cdot \dot{\gamma}$
 - Bulkley-Herschel: $\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$
 - Casson: $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{k_0 \cdot \dot{\gamma}}$

Ostwald-de-Waele-Fluide (*power-law fluid*)

- Fließgesetz: $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad \Longrightarrow \quad \log \tau = \log k + n \cdot \log \dot{\gamma}$
 k Konsistenz, n Fließindex
- scheinbare Viskosität: $\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$
- Rohrreibung
 - Reynoldszahl $Re^* = \frac{\rho_f \cdot \bar{u}^2}{k \cdot (\bar{u}/D)^n} \cdot \frac{8n^n}{(6n+2)^n} = \frac{\rho_f \cdot D^n \bar{u}^{2-n}}{\frac{k}{8} \left(\frac{6n+2}{n} \right)^n}$
 - lam. Rohrreibungsbeiwert $\lambda_{\text{lam}} = 64/Re^*$
- Kugelumströmung
 - Reynoldszahl $Re_p^* = \frac{\rho_f \cdot u_{\text{rel}}^2}{k \cdot (u_{\text{rel}}/d)^n}$
 - Widerstandsbeiwert im Stokes-Bereich: $c_{W,\text{Stokes}} = \frac{24}{Re_p^*} \cdot \frac{n^2 - n + 3}{3^{3-2n} \cdot n^{3n}}$

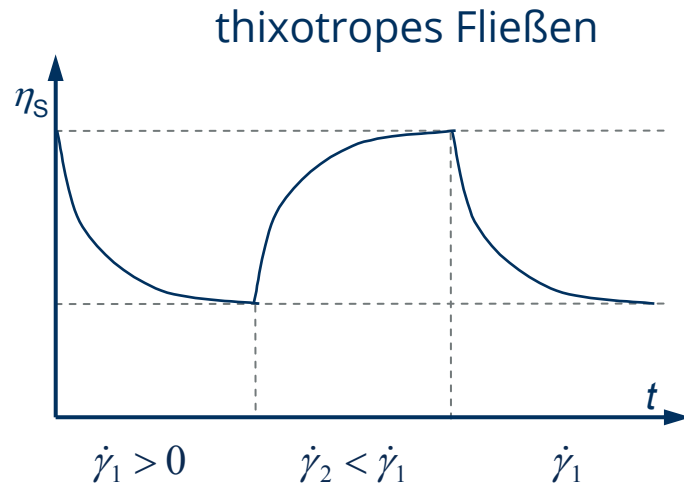
4.3 Fließverhalten

– *Strukturkinetik und Viskoelastizität* –

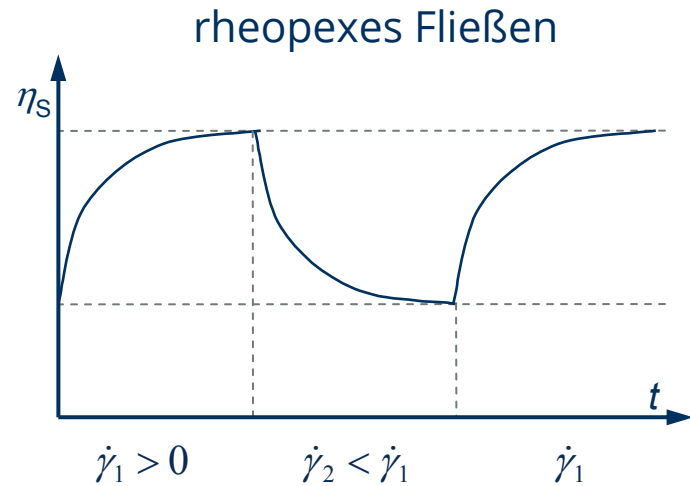
Zeitabhängiges Fließverhalten

- Erklärungen:
 - bei fortgesetzter Beanspruchung Veränderung der inneren Struktur
→ **strukturkinetische Fluide**
 - bei Beanspruchung elastische Deformation und viskoses Fließen
→ **viskoelastische Fluide**
- Strukturkinetische Fluide
 - rein viskoses Verhalten → konstante Belastung führt zu konstantem Fließen
 - Zeiteffekte resultieren aus Adaption der inneren Struktur (Anordnung und Orientierung von Makromolekülen oder Partikel) an äußere Belastung
- Viskoelastische Fluide
 - elastische Eigenschaften überlagern viskose → bei kurzzeitiger kleiner Verformung dominiert der elastische Anteil (d.h. reversible Verformung)
 - Normalspannungen werden relevant
 - erkennbar bei Wechselbeanspruchung oder plötzlicher Belastungsänderung

Strukturkinetisches Fließverhalten



- beim Fließen Strukturabbau
→ Reduzierung der Viskosität
- bei Entlastung
Strukturregeneratⁿ
→ Verfestigung
- oft bei pseudoplastische Fluiden
(Gele, Pasten, Blut, Ketchup)



- beim Fließen Strukturaufbau
→ Viskositätserhöhung
- bei Entlastung Strukturzerfall
→ Viskositätsabnahme
- oft bei dilatanten Fluiden
(Seifensole, Visco-Kupplungen)

Viskoelastisches Fließen

- elastischer Festkörper:
 - Beanspruchung → reversible Verformung; sofort in Endzustand
 - Hookscher Körper: $\tau = G \cdot \gamma$
- viskoses Fluid:
 - Beanspruchung → irreversible, stetige Verformung; kein Endzustand
 - Newtonsches Fluid: $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$
- viskoelastisches Fluid
 - Beanspruchung → partiell reversibler Verformung; kein Endzustand
 - z.B. Gele, Kunststoffschmelzen
 - Maxwell-Körper:
(lineare Visokoelastizität) $t_R \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}$
 - Messung: Oszillationen mit kleinen Amplituden

Oszillationsversuche

Vorgabe:

Scheramplitude γ

Scherfrequenz f

Probenantwort:

Schubspannung τ

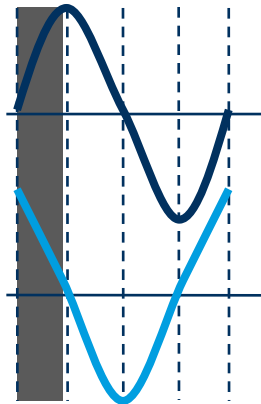
Phasenverschiebung δ

komplexer Schubmodul G^*

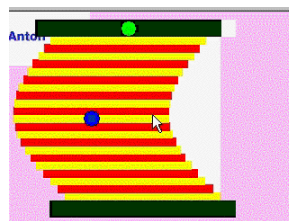
$$G^* = \frac{\tau(t)}{\gamma(t)}$$

$$G^* = G' + i \cdot G''$$

viskos

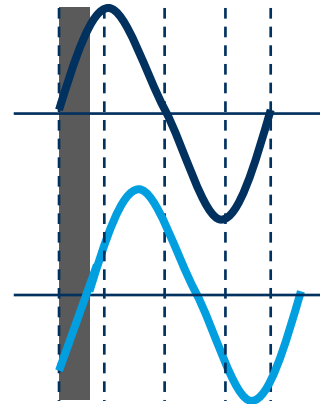


90°

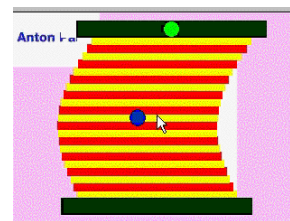


Verlustmodul G''
idealviskoses Fluid

viskoelastisch

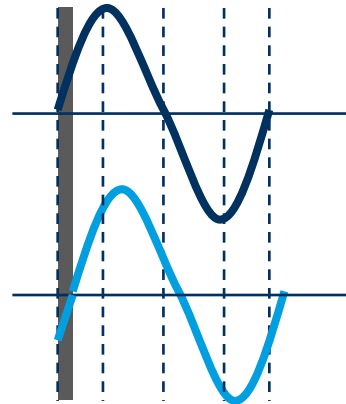


>45°

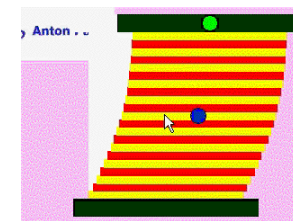


$G'' > G'$
viskoelastische Flüssigkeit

viskoelastisch

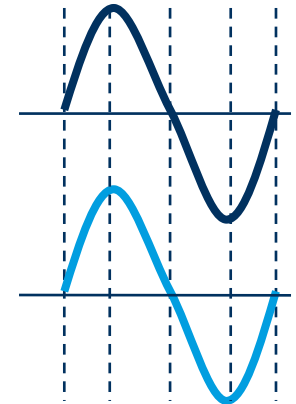


<45°

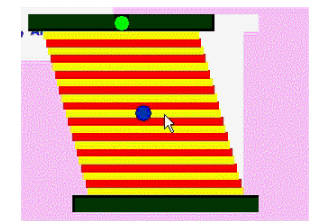


$G' > G''$
viskoelastischer Festkörper

elastisch



0°



Speichermodul G'
idealelastischer Festkörper

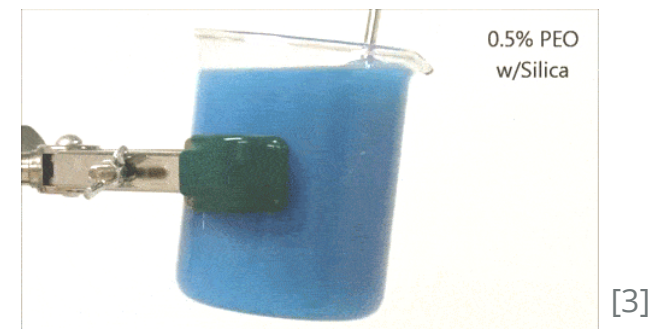
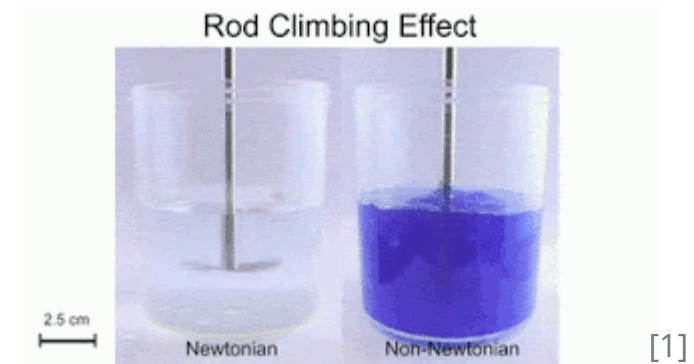
Spezielle Effekte nicht-newtonscher Fluide

- Weissenberg-Effekt
 - Normalspannungen drücken Fluid zur Rotationsachse
- Barus-Effekt
 - Normalspannungen führen zur erheblichen Strahlweitung am Blendenaustritt
- Syphon-Effekt
 - Dehnviskosität hält Strahl zusammen (Dehnverfestigung)
- Turbulenzunterdrückung
 - Schon bei geringsten Polymerkonzen. (vermutlich wegen Dehnverfestigung)

[1] <http://sciencefiction-nastragull.blogspot.com/2016/05/the-weissenberg-effect-or-rod-climbing.html>

[2] Oishi et al., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 166(3-4):165-179, **2011**, doi:10.1016/j.jnnfm.2010.11.001

[3] <https://media.giphy.com/media/51h9Uq2DO46pW/giphy.gif>



Beispiele nicht-Newton'schen Fließens

(n. Chhabra & Richardson, *Non-Newtonian flow in the process industries*, 1999)

Technisches Fluid	Fließverhalten	Nutzen des nicht-newton'schen Fließens
Zahnpaste	Bingham	bleibt auf den Borsten, aber fließt beim Bürsten
Bohrschlämme (für Erdöl)	Bingham, pseudoplast.	„trägt“ Dreckpartikel, gute Schmierung
Anstrichfarben	thixotrop	fließt beim Streichen, aber tropft nicht von Wand
Tapetenkleister	pseudoplastisch, viskoelastisch	Einfaches Auftragen, gute Haftung
Polymerschmelzen	pseudoplastisch, viskoelastisch	geringe Schubkräfte bei hoher Last, stabile Fäden
nasser Zement	dilatant	Verfestigung (Netzwerkbldung) durch kleine Impulse
Drucktinten	pseudoplastisch	geringer Druckverlust in enge Düsen bei hohem Durchsatz, zerläuft nicht auf der Oberfläche