

„Alles fließt“

Physik 1 für Chemiker und Biologen Besprechung der 8. Vorlesung

*"I am an old man now, and when I die and go to heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is quantum electrodynamics, and the other is the **turbulent motion of fluids**. And about the former I am rather optimistic."*



https://de.wikipedia.org/wiki/Horace_Lamb

Sir Horace Lamb
(1849-1934)

Aus der aktuellen Forschung:
Drehmomente auf molekularer Skala!

Besprechung:

- Druck und Auftrieb
- Bernoulli-Gleichung
- Viskose Fluide
- Kapillarkraft

Prof. Dr. Ralf Jungmann

Jungmann@physik.lmu.de

Prof. Dr. Jan Lipfert

Jan.Lipfert@lmu.de

Teaching online vs. offline



- In der Weihnachtsferien habe ich ein „Studio“ in meinem Büro aufgebaut! Einige technische Details funktionieren noch nicht perfekt, aber wir hoffen dass die nächsten Vorlesungen so zuverlässig aufgezeichnet werden können.
- Die online Vorlesungen behandeln jeweils einen Themenblock (und sind daher unterschiedlich lang), offline gingen die Themen z.T. über mehrere Vorlesungen. Insgesamt behandeln wir aber die gleichen Themen wie in der Vergangenheit.

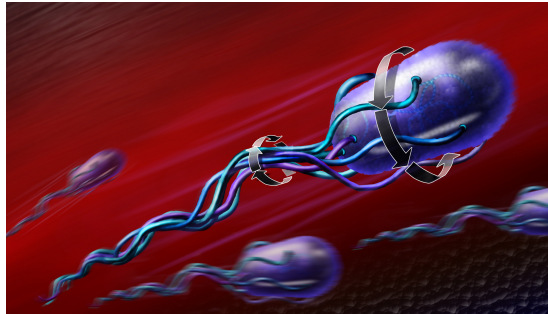
Beispiel aus der aktuellen Forschung:

Drehmomentsmessungen auf der molekularen Skala

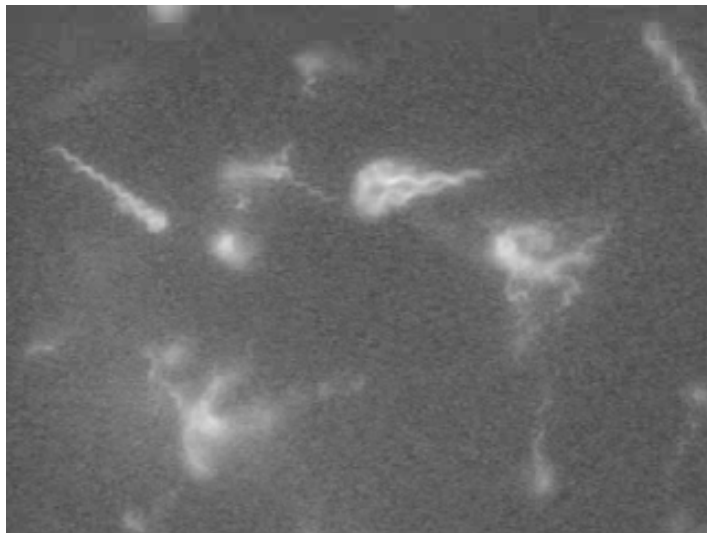


Drehmomente in der Molekularbiologie (1/2)

Klassisches Beispiel: Bakterielle Flagellen



Sowa & Berry, *Quat. Rev. Biophys* (2008)

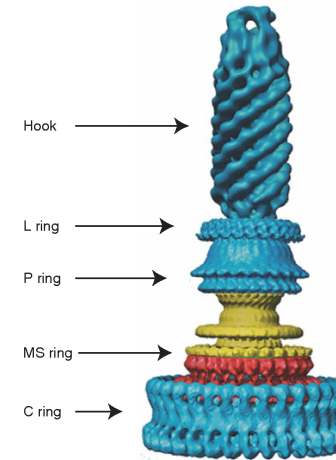


Schwimmende *E. coli* Bakterien
(Flagellen sind fluoreszierend gefärbt)

Quelle: Howard Berg Lab @ Harvard

<http://www.rowland.harvard.edu/labs/bacteria/movies/>

17.12.18



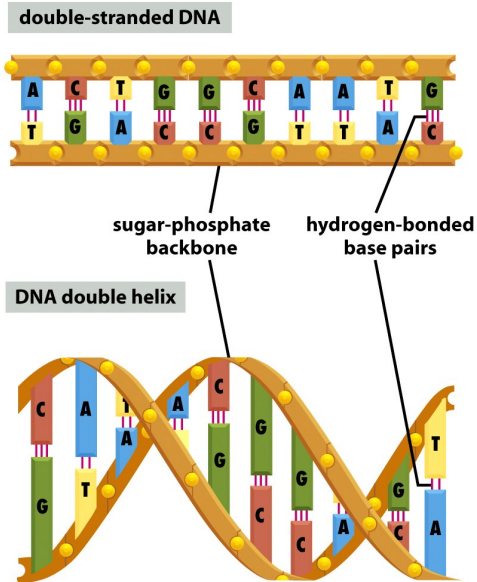
Animation des flagellaren Motors
<https://www.youtube.com/watch?v=xEVq7jCT4kw>



Prof. Dr. Jan Lipfert

4

Drehmomente in der Molekularbiologie (2/2)



Unsere genetische Information ist in der Form von doppelsträngiger DNA gespeichert

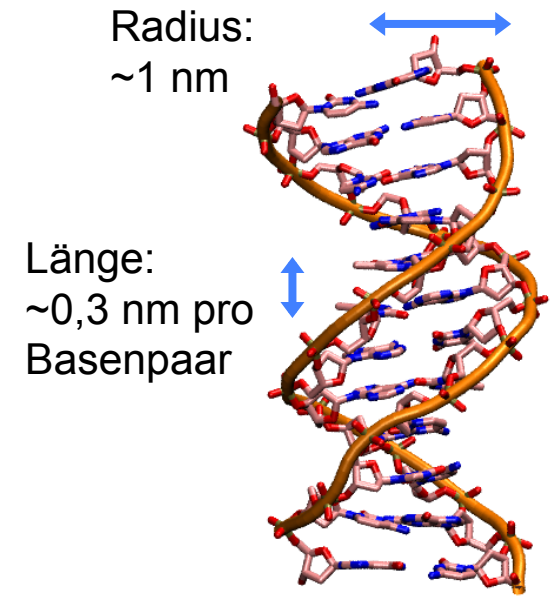
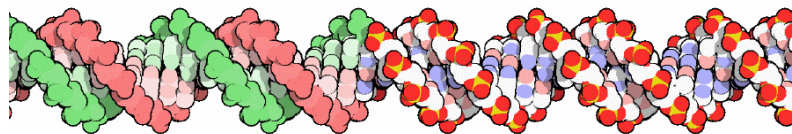
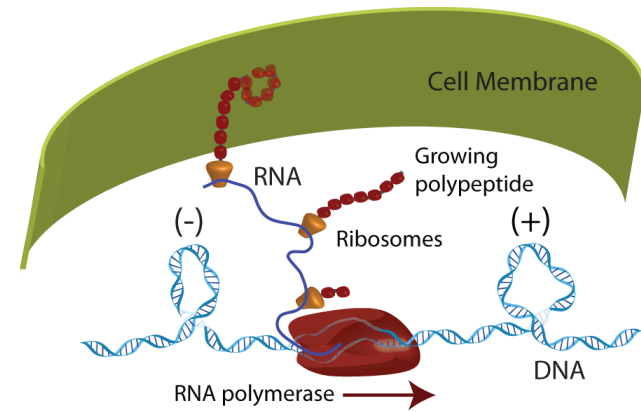


Figure 1-2d,e *Molecular Biology of the Cell*, Fifth Edition (© Garland Science 2008)

Die Helizität der DNA hat wichtige Auswirkungen für ihre Transkription und Replikation:

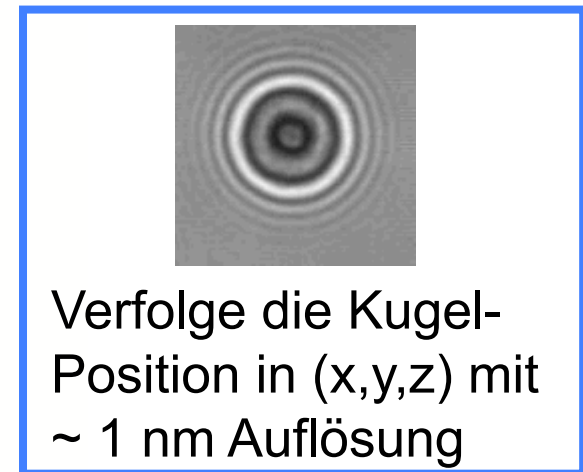
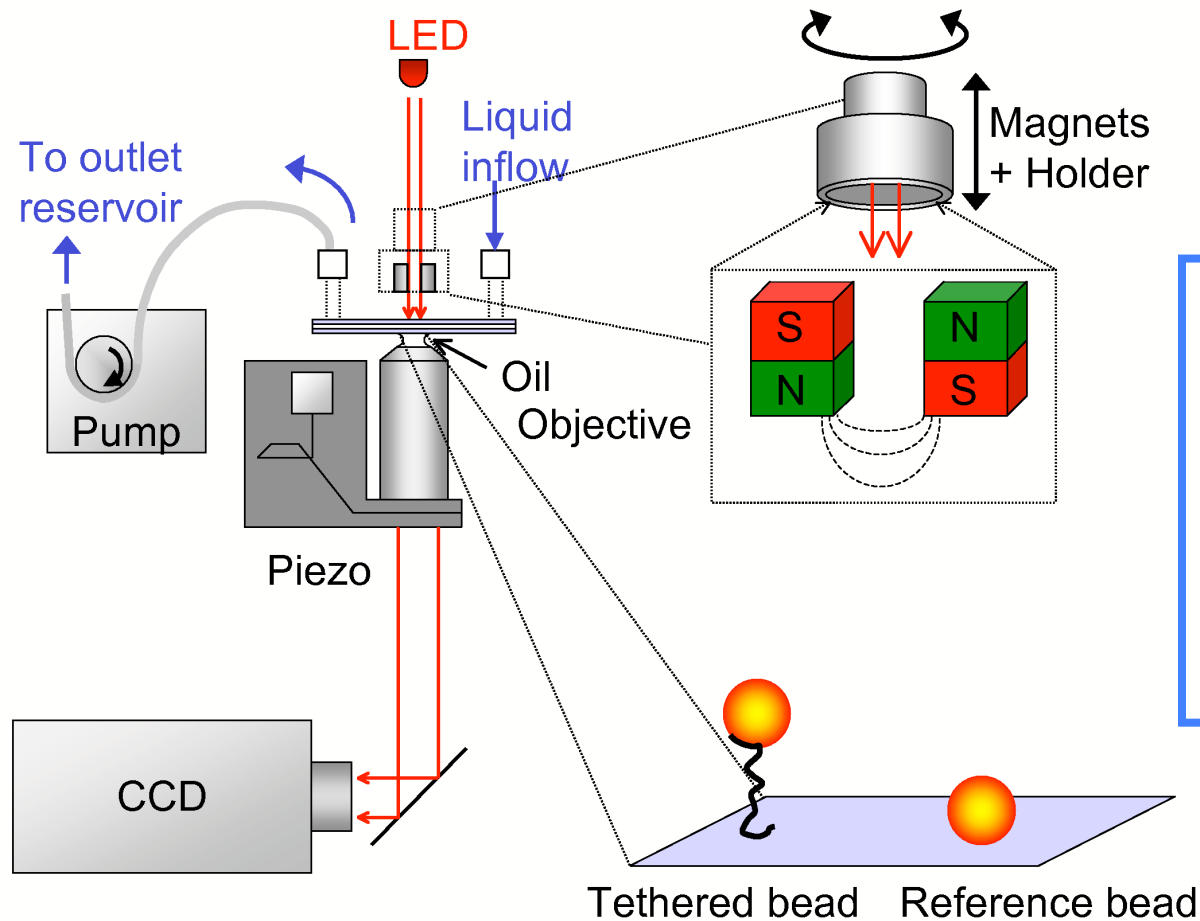


Liu & Wang, *PNAS* (1987)

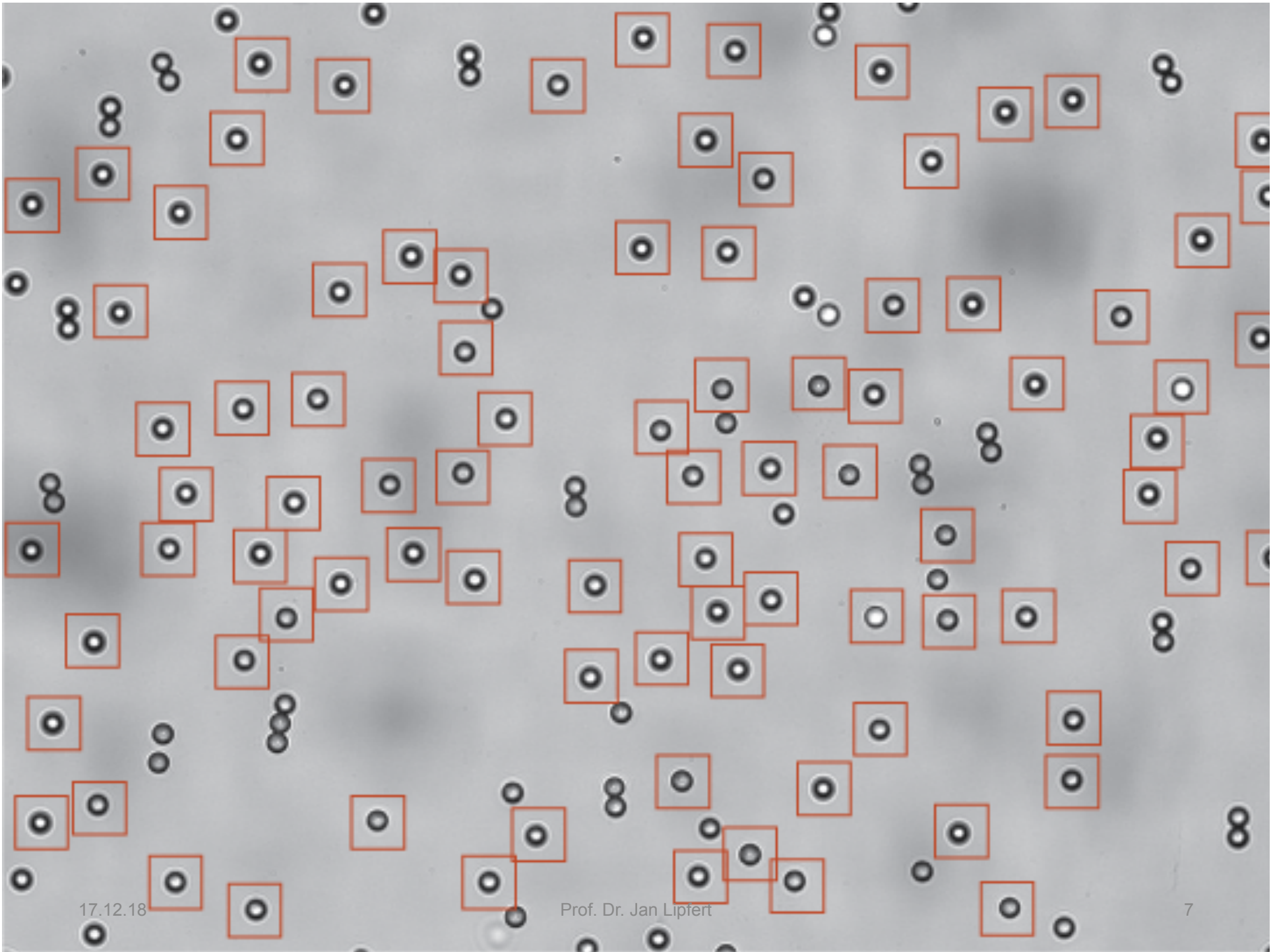


Koster, Crut, et al., *Cell* (2010)

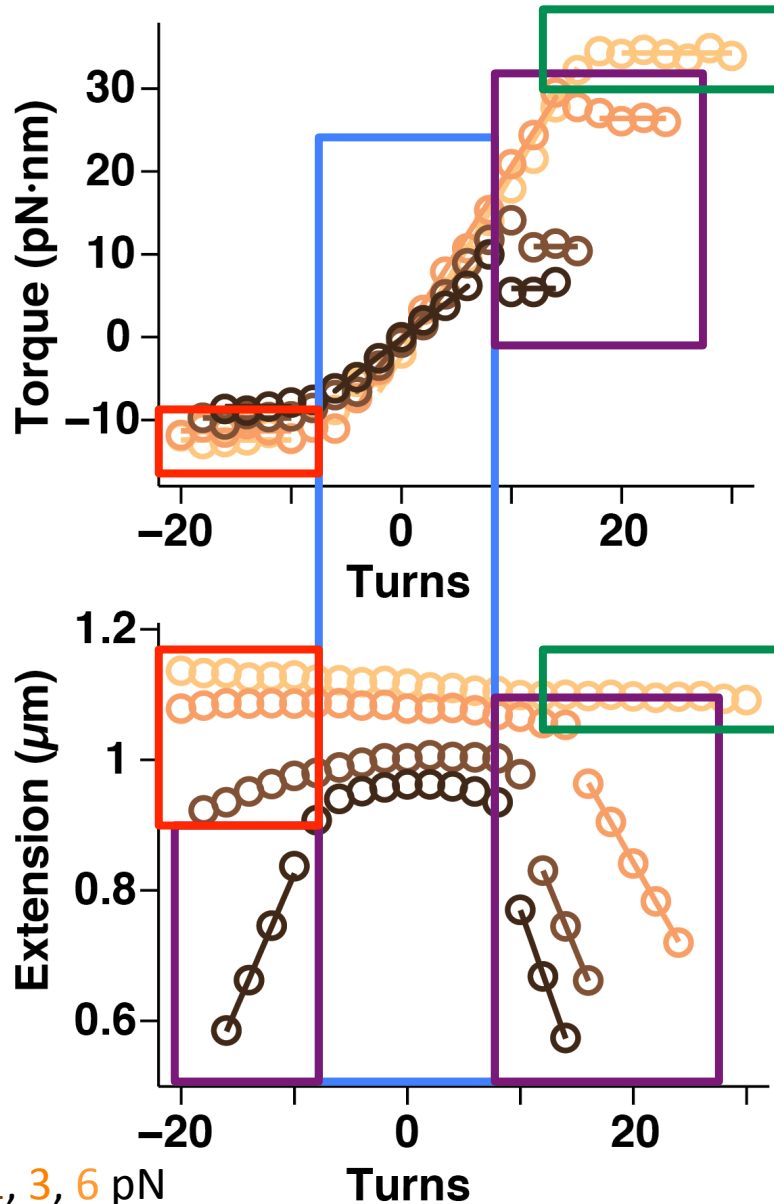
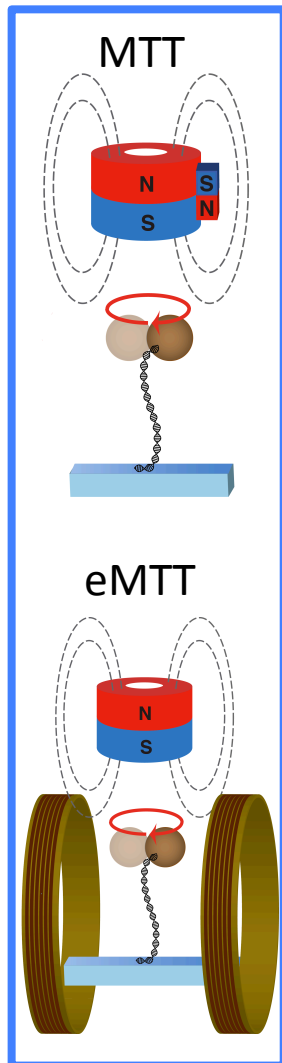
Einzelmolekülmessungen mit magnetischen Pinzetten



Vilfan, Lipfert, Koster, Lemay & Dekker, Springer Handbook of Single-Molecule Biophysics (2009)

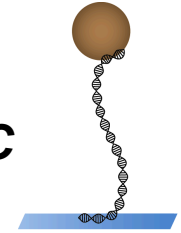


Drehmomentsmessungen an DNA

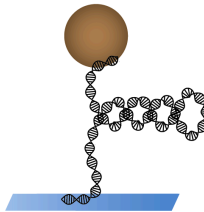


Kraft: $F = 0.5, 1, 3, 6$ pN

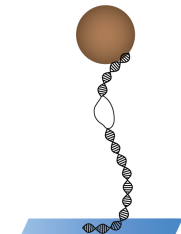
Elastisches Regime:
Bestimme die
Drehpersistenzlänge C



“**Buckling**” Übergang
bei einem kritischen
Drehmoment;
Unterhalb ~ 1 pN
symmetrisch



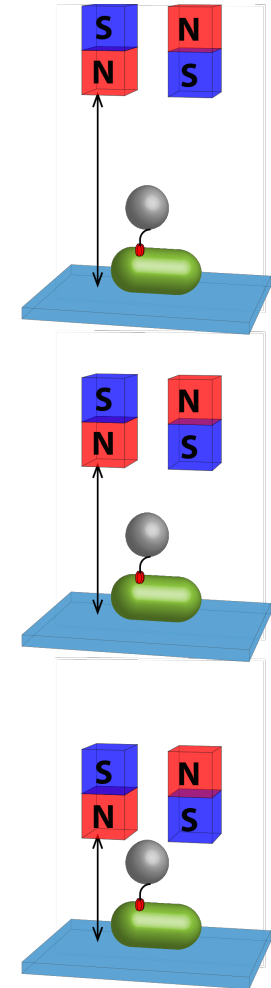
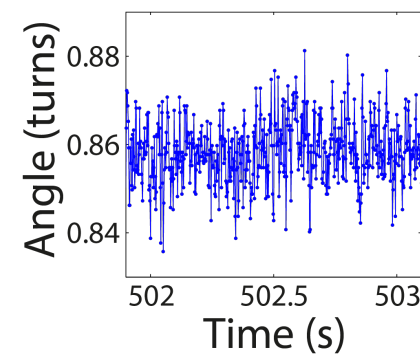
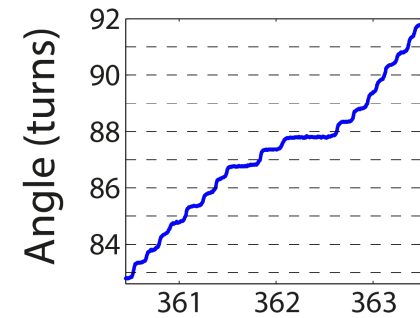
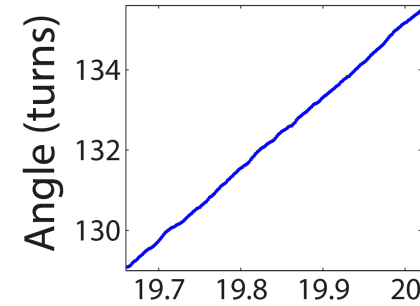
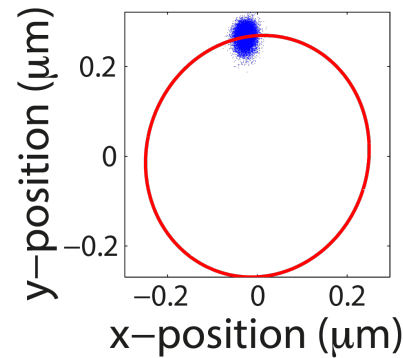
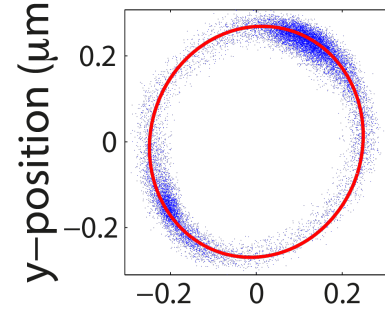
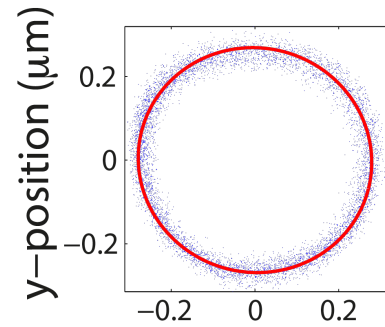
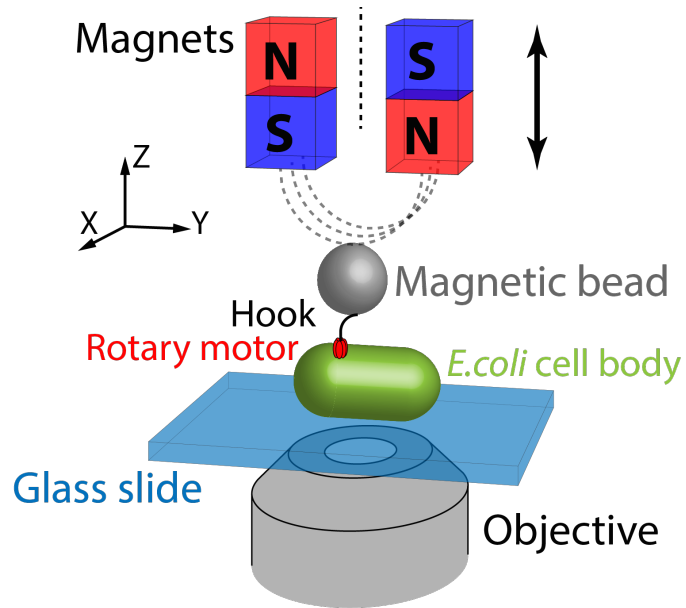
Für $F > 1$ pN, **schmilzt**
die DNA bei einem
Schmelzdrehmoment
von ca. -11 pN·nm



Für $F > 5$ pN, ändert die DNA
ihre Konformation zu **P-DNA** bei
Überdrehung

Drehmomentsmessungen an *E. coli*

E. coli Zellen werden an einer Oberfläche immobilisiert und magnetische Kugeln spezifisch an den flagellaren Motorkomplex gekoppelt:



Van Oene, et al., *Scientific Reports* (2017)



Zusammenfassung: Druck & Auftrieb

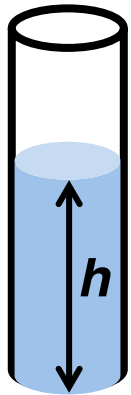
- Druck:

$$p = \frac{F}{A}$$

Einheit:

$$[p] = \text{N/m}^2 = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2) = \text{Pa}$$

- Schweredruck:

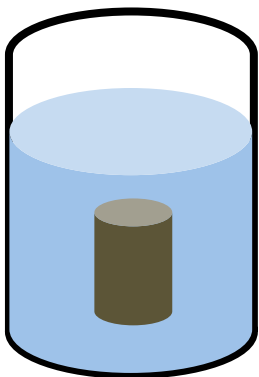


$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Hydrostatisches Paradoxon:

Druck ist nur von der Höhe der Flüssigkeitssäule, nicht aber von der Form des Gefäßes oder Flüssigkeitsmenge abhängig.

- Auftrieb:



$$F_{\text{Auftrieb}} = g \cdot \rho_{\text{Fluid}} \cdot V$$

Volumen des verdrängten Fluids

Archimedisches Prinzip:

Auftriebskraft = Gewichtskraft des verdrängten Fluids

Verständnisfrage: Auftrieb 1

Ein Pinguin schwimmt (nicht: taucht!) erst in Salzwasser (Dichte 1030 kg/m^3) und dann in Süßwasser (Dichte 1000 kg/m^3). In welchem Fall ist die Auftriebskraft auf den Pinguin größer?



<https://de.wikipedia.org/wiki/Pinguine>

A) Im Salzwasser.

B) Im Süßwasser.

C) In beiden gleich groß.

$$F_g = F_{\text{Auftrieb}}$$

Eingetauchte Volumen ist in Salzwasser kleiner.

Verständnisfrage: Auftrieb 2

Ein Pinguin taucht (nicht: schwimmt!) erst in Salzwasser (Dichte 1030 kg/m^3) und dann in Süßwasser (Dichte 1000 kg/m^3). In welchem Fall ist die Auftriebskraft auf den Pinguin größer?



<https://en.wikipedia.org/wiki/Penguin>

- A) Im Salzwasser.
- B) Im Süßwasser.
- C) In beiden gleich groß.

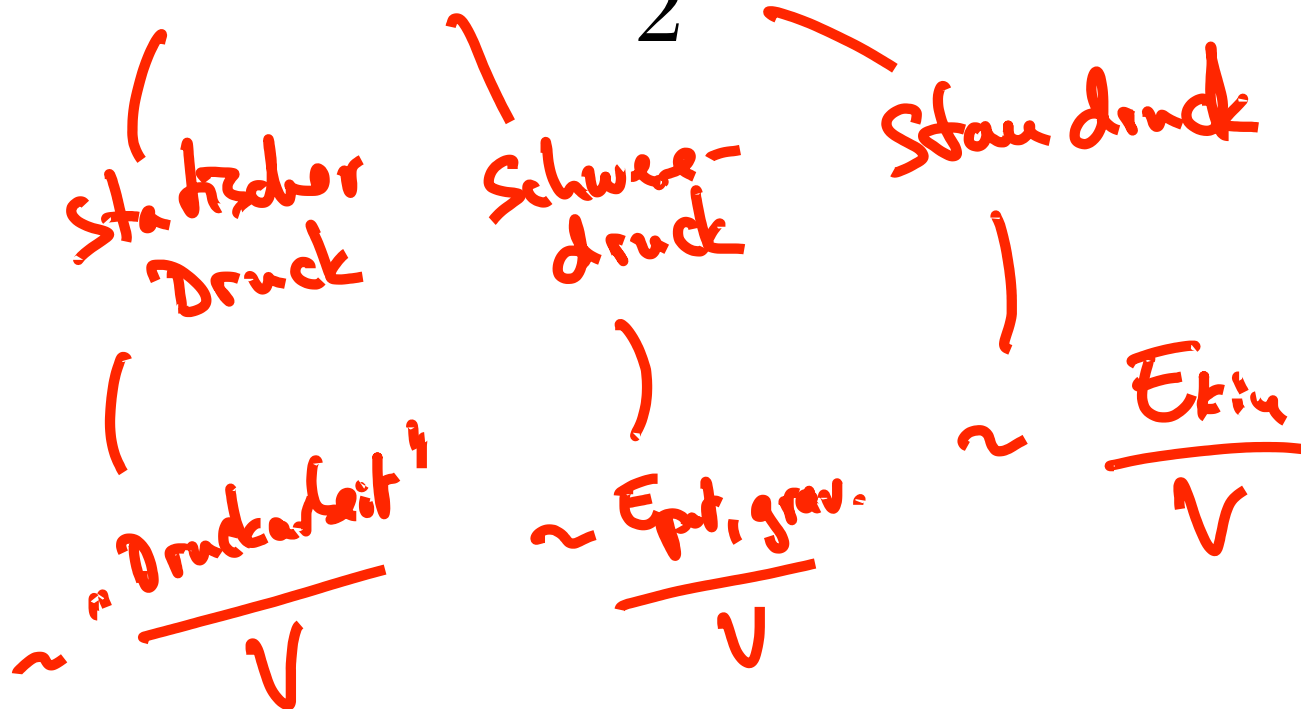
Verdränge V_{Pinguin}

$$F_{\text{Auftrieb}} = \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \cdot V_{\text{Pinguin}}$$

Zusammenfassung: Bernoulli-Gleichung

Für die Strömung eines inkompressiblen und reibungsfreien Fluides ("ideales Fluid") gilt:

$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$$



https://de.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli

Daniel Bernoulli
(1700-1782)

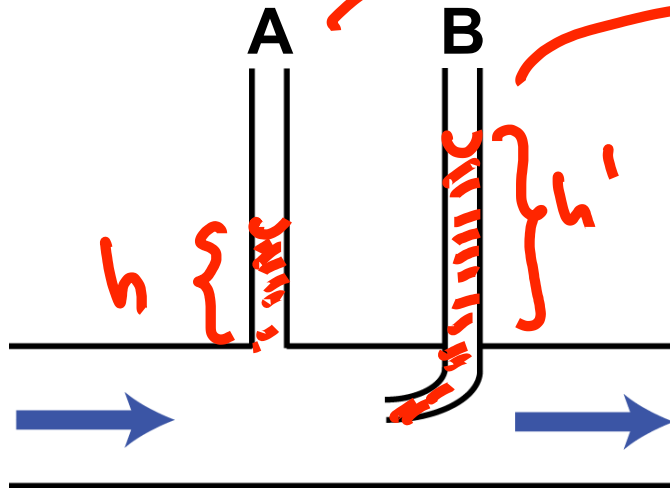
Verständnisfrage: Strömung im Rohr 1

Im Rohr in der Skizze strömt ein ideales Fluid von links nach rechts.
In welchem Staurohr steht das Fluid höher?

A) Staurohr A

B) Staurohr B ✓

C) In beiden gleich hoch.



$$\rho \cdot g \cdot h = p$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p = \rho \cdot g \cdot h'$$

Verständnisfrage: Strömung im Rohr 2

Durch das Rohr in der Skizze strömt ein ideales Fluid von links nach rechts. Ordnen Sie die Rohrabschnitte nach der **Volumenflussrate dV/dt** :

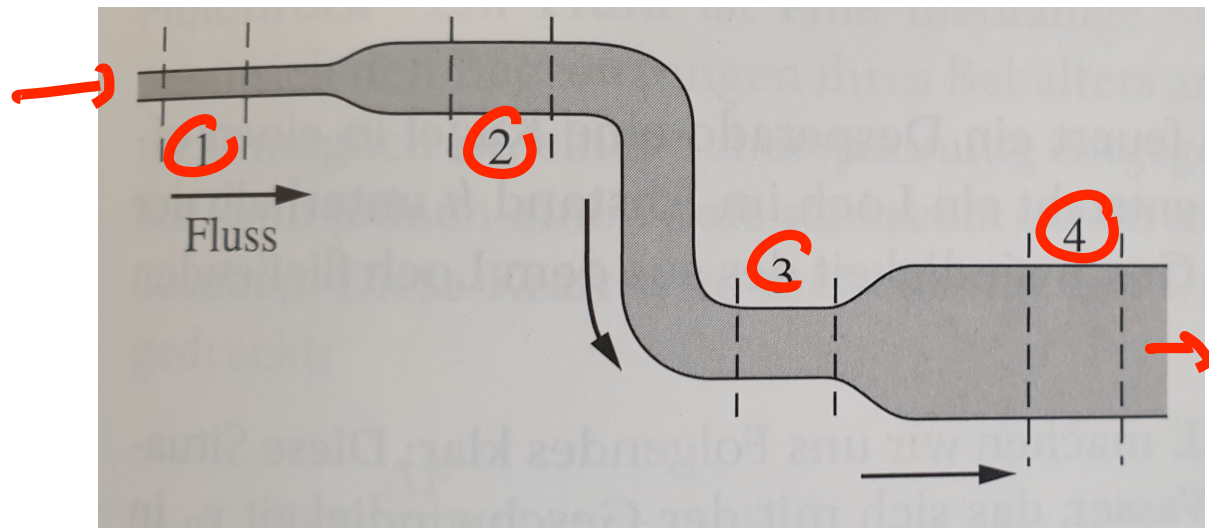
A) $1 > 2 = 3 > 4$

B) $1 < 2 = 3 < 4$

C) $1 = 2 > 3 = 4$

D) $1 = 2 < 3 = 4$

E) Alle gleich ✓



Kontinuitätsgleichung

Verständnisfrage: Strömung im Rohr 3

Durch das Rohr in der Skizze strömt ein ideales Fluid von links nach rechts. Ordnen Sie die Rohrabschnitte nach der **Strömungsgeschwindigkeit v** :

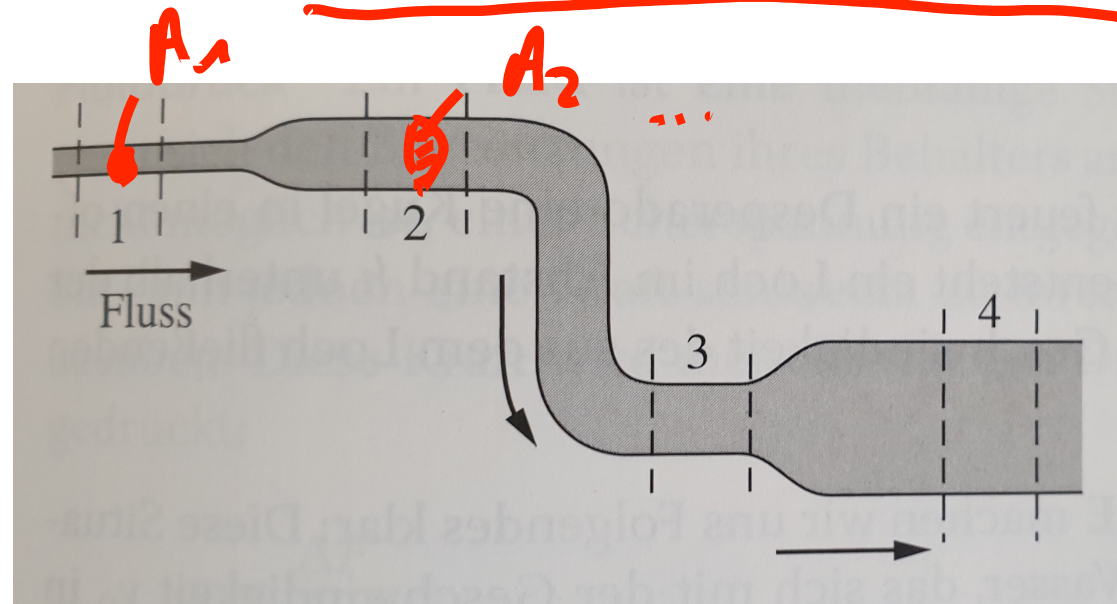
A) $1 > 2 = 3 > 4$ ✓

B) $1 < 2 = 3 < 4$

C) $1 = 2 > 3 = 4$

D) $1 = 2 < 3 = 4$

E) Alle gleich



$$\frac{dV}{dt} = \text{const.} = A \cdot v$$

$$A_1 < A_2 = A_3 < A_4$$

Verständnisfrage: Strömung im Rohr 4

Durch das Rohr in der Skizze strömt ein ideales Fluid von links nach rechts. Ordnen Sie die Rohrabschnitte nach der statischen Druck p :

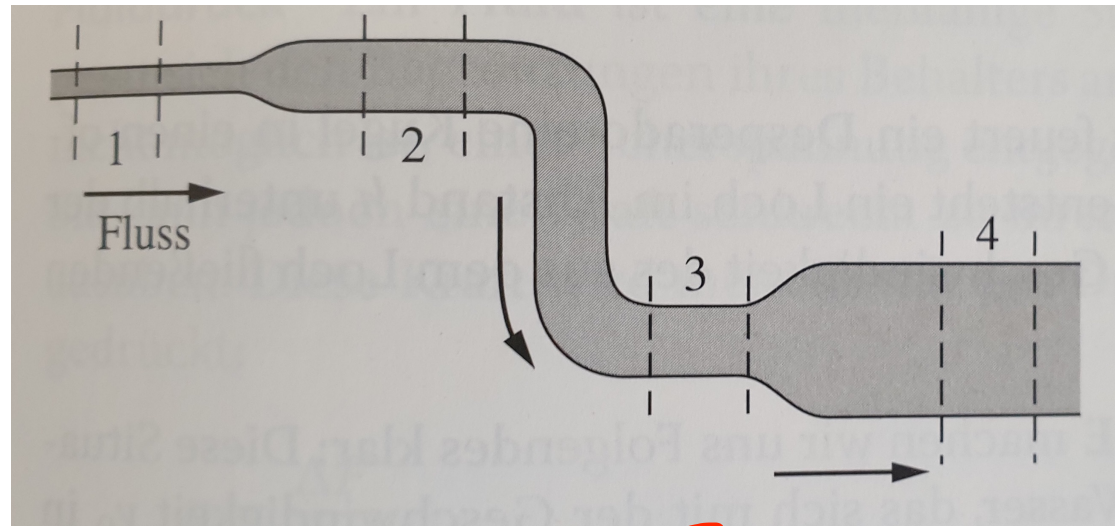
A) $1 > 2 = 3 > 4$

B) $1 < 2 = 3 < 4$

C) $1 > 2 > 3 > 4$

D) $1 < 2 < 3 < 4$ ✓

E) Alle gleich



$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$$

$p_1 < p_2$ wegen $v_1 > v_2$ ($A_1 < A_2$)

$p_2 < p_3$ wegen ~~$v_2 > v_3$~~ $h_2 > h_3$

$p_3 < p_4$ wegen

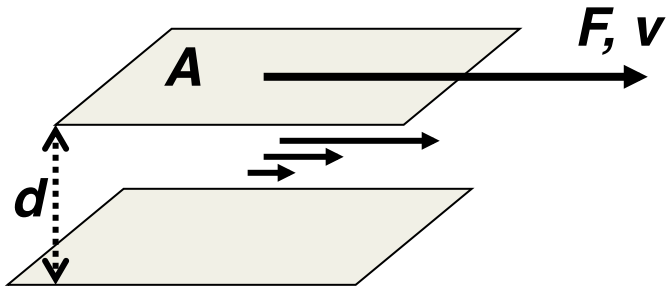
$v_3 > v_4$
($A_3 < A_4$)

Zusammenfassung: Viskose Reibung

Reale Fluide haben Viskosität, d.h. es kommt zu Energieverlusten und Reibung, wenn das Fluid strömt

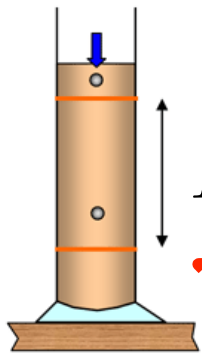
Wichtige Fälle (gelten für hohe Viskosität, kleine Geschwindigkeiten):

- Fluid zwischen zwei Platten:



$$F_{\text{Reibung}} = -\eta \cdot A \cdot \frac{v}{d}$$

- Kugel in einem viskosen Fluid (Stokes):

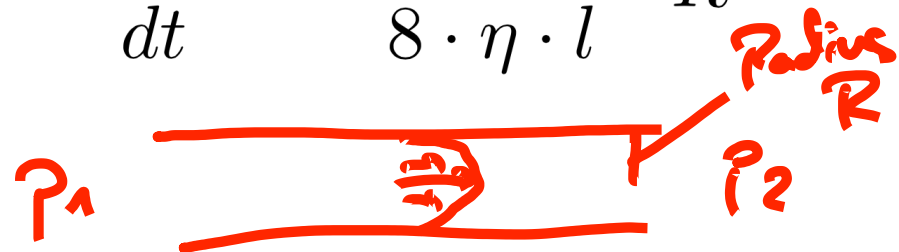


$$F_R = -6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

(resourcefulphysics.org)
http://tap.iop.org/mechanics/drag_forces/page_39518.html

- Flussrate durch ein Rohr (Hagen-Poiseuille):

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi(p_1 - p_2)}{8 \cdot \eta \cdot l} R^4$$



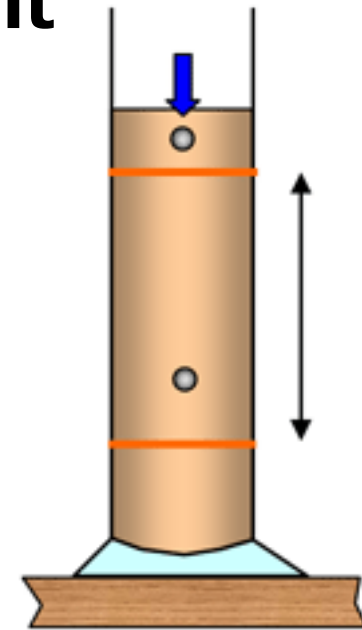
Verständnisfrage: Sedimentationsgeschwindigkeit

Wir lassen Kugeln aus dem gleichen Material, aber unterschiedlicher Größe (Radius) in einem viskosen Fluid fallen. Welche Kugel fällt/sinkt schneller?

A) Die Kugel mit dem größeren Radius. ✓

B) Die Kugel mit dem kleineren Radius.

C) Beide Kugeln sinken gleich schnell.



(resourcefulphysics.org)
http://tap.iop.org/mechanics/drag_forces/page_39518.html

Anwendung der Stokes-Reibung: Sedimentationsgeschwindigkeit

Stokesreibung:

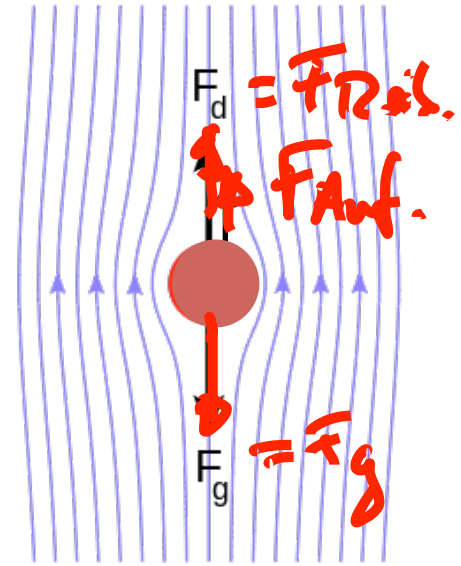
$$|F_R| = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

Schwerkraft:

$$|F_G| = \rho_K \cdot V \cdot g$$

Auftriebskraft:

$$|F_A| = \rho_{Fl} \cdot V \cdot g$$



https://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche_Gleichung

$$F_g - F_{Auftrieb} \sim R^3 \text{ (Volumen)}$$

$$F_{Reibung} \sim R \cdot v$$

$$v \sim R^2$$

$$F_g - F_{Auf.} = F_{Reib}$$

Kräftegleichgewicht!