

„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

Zwischenstand: Zeitplan der Vorlesung

25.10.	Übersicht; Wofür Physik?
08.11.	Einheiten, Messen, Messfehler
15.11.	Bewegungen in 1, 2 und 3D; Kräfte, Masse, Trägheit;
22.11.	Kreisbewegung, Zentripetalkraft; Reibung
29.11.	Gravitation; Arbeit, Energie, Leistung
06.12.	Impuls, Stöße
13.12.	Drehbewegungen, Drehimpuls
20.12.	Flüssigkeiten, Druck; Fluide und Strömungen, Kapillarkraft
10.01.	Schwingungen (harmonische, gedämpfte, getriebene)
17.01.	Wellen (Ausbreitung, Superposition)
24.01.	Thermodynamik & statistische Physik
31.01.	Moderne Physik und Spezielle Relativitätstheorie
07.02.	Klausurwiederholung / Fragestunde

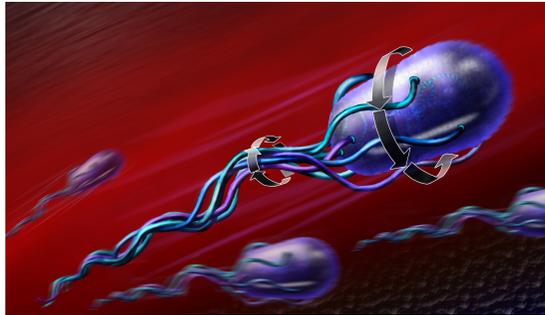
Beispiel aus der aktuellen Forschung:

Drehmomentsmessungen auf der molekularen Skala

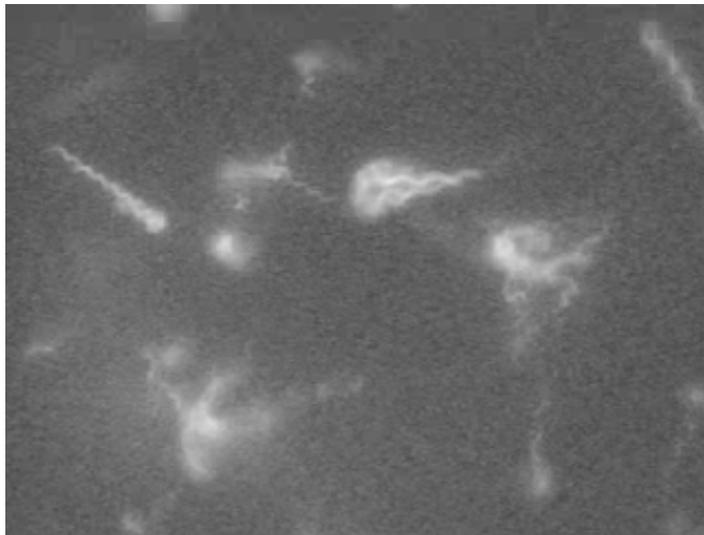


Drehmomente in der Molekularbiologie (1/2)

Klassisches Beispiel: Bakterielle Flagellen



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

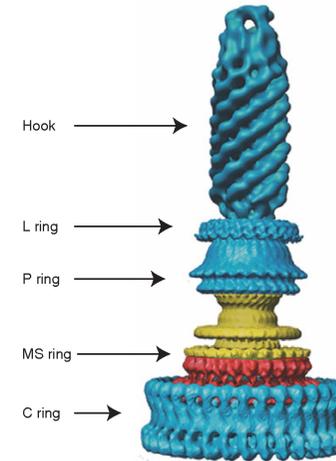


Schwimmende *E. coli* Bakterien
(Flagellen sind fluoreszierend gefärbt)

Quelle: Howard Berg Lab @ Harvard

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

20.12.21



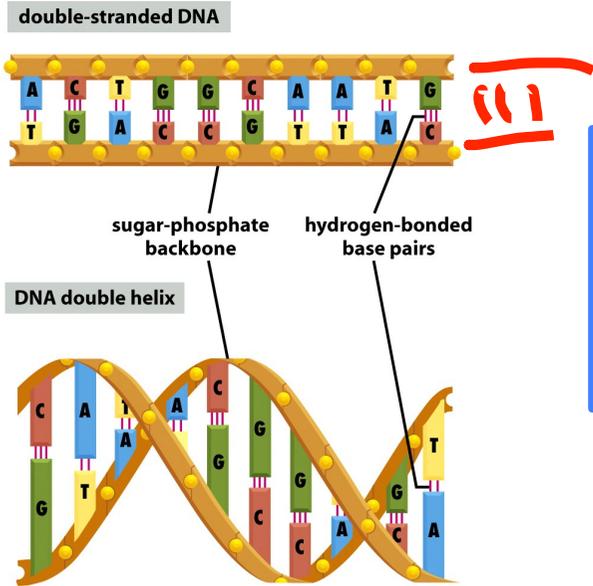
Animation des flagellaren Motors
<https://www.youtube.com/watch?v=xEVq7jCT4kw>



Prof. Dr. Jan Lipfert

4

Drehmomente in der Molekularbiologie (2/2)



Unsere genetische Information ist in der Form von doppelsträngiger DNA gespeichert

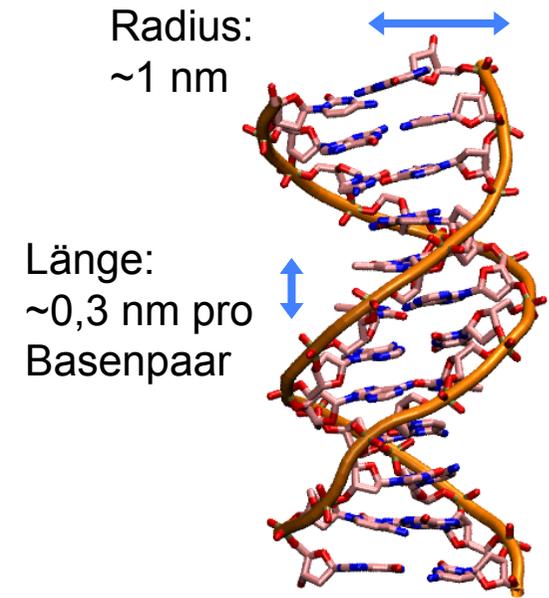
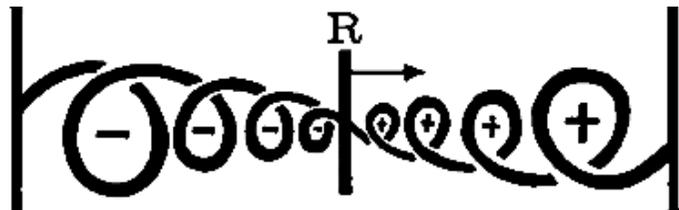
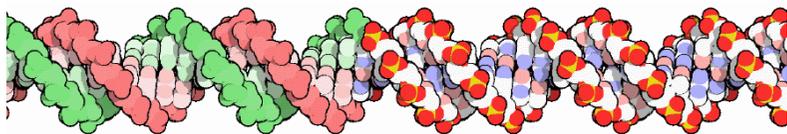
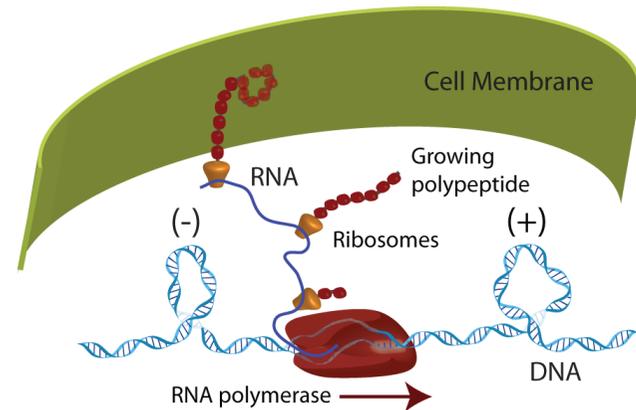


Figure 1-2d,e *Molecular Biology of the Cell*, Fifth Edition (© Garland Science 2008)

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

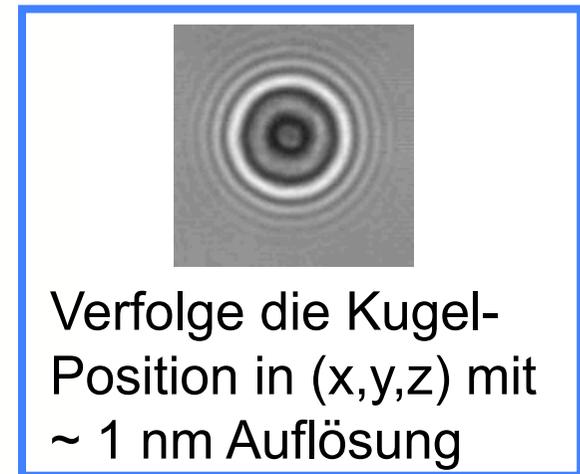
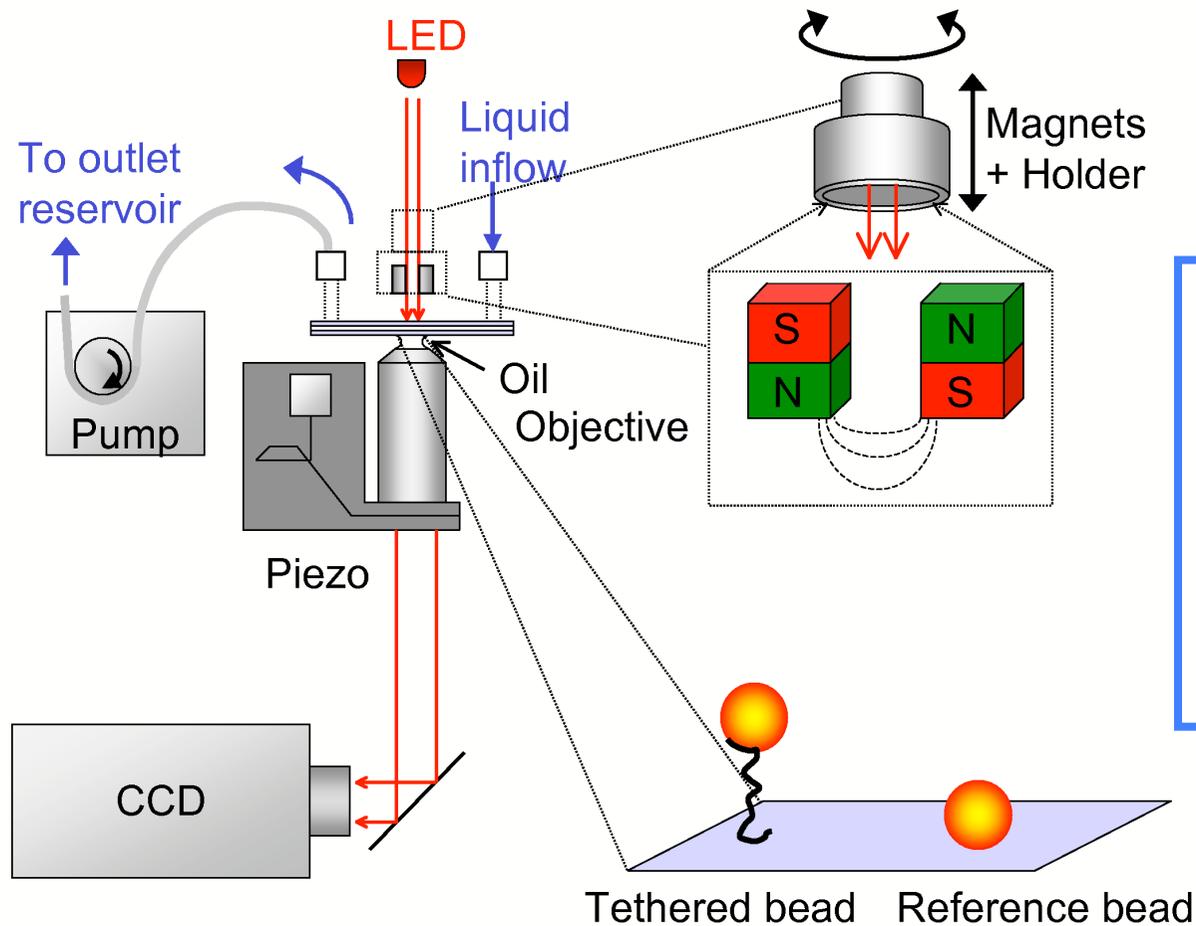


Liu & Wang, *PNAS* (1987)

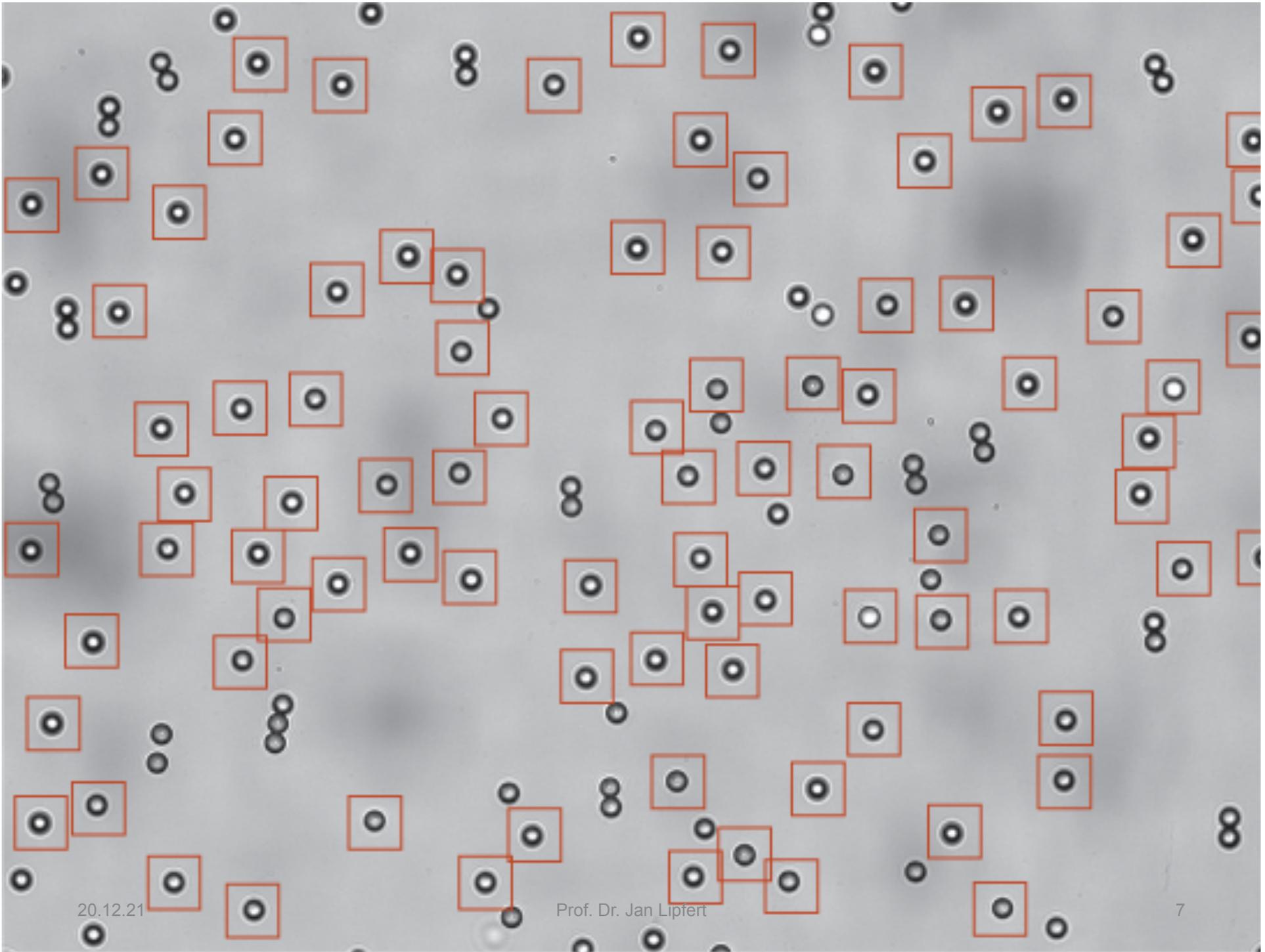


Koster, Crut, et al., *Cell* (2010)

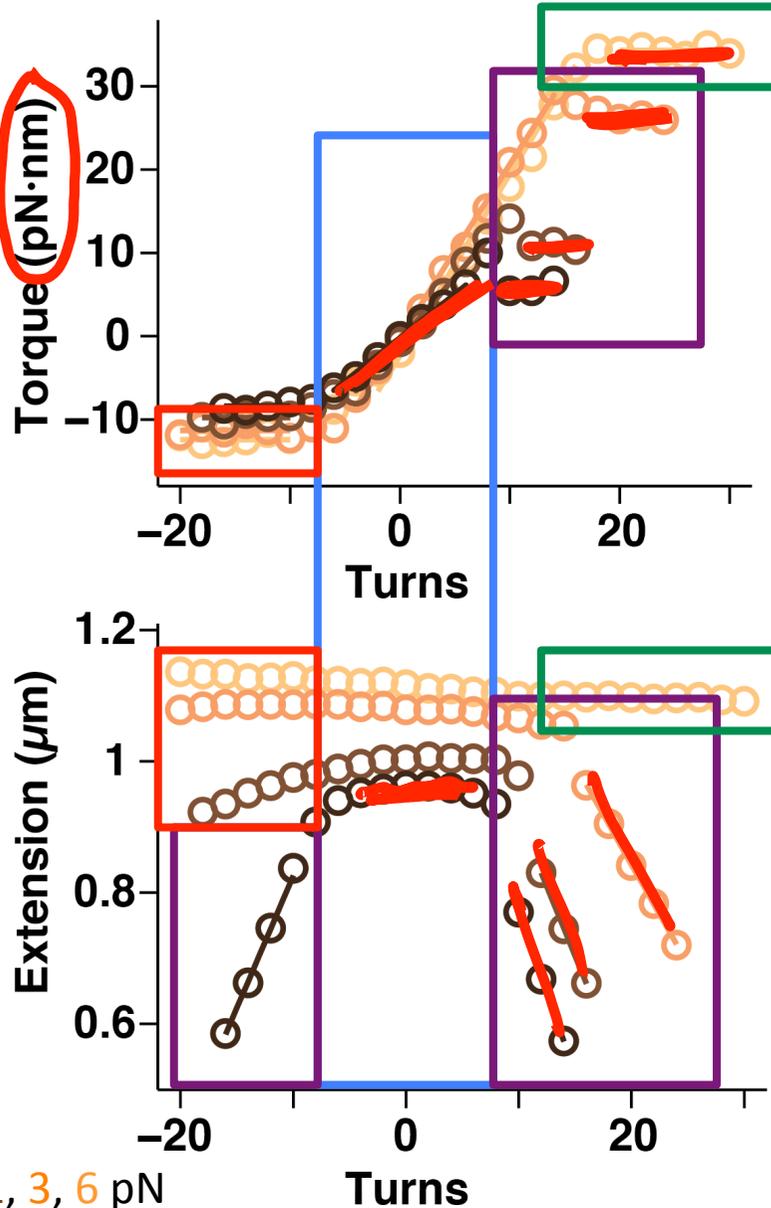
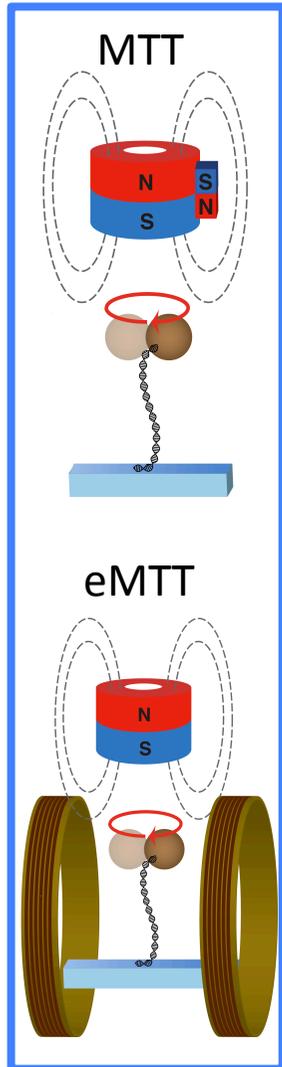
Einzelmolekülmessungen mit magnetischen Pinzetten



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

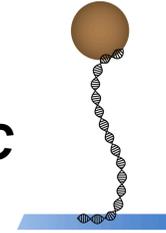


Drehmomentsmessungen an DNA

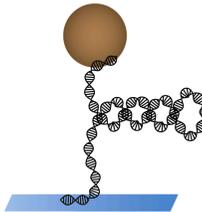


Kraft: $F = 0.5, 1, 3, 6$ pN

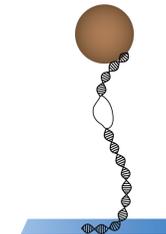
Elastisches Regime:
Bestimme die
Drehpersistenzlänge C



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



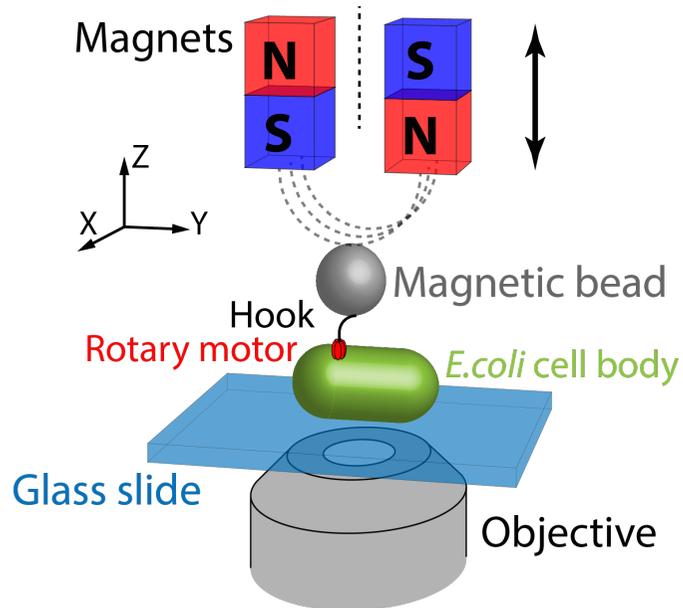
Für $F > 1$ pN, **schmilzt**
die DNA bei einem
Schmelzdrehmoment
von ca. -11 pN·nm



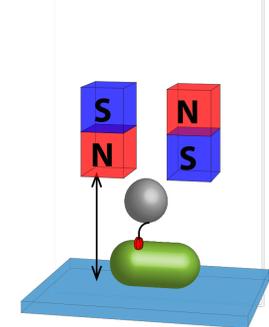
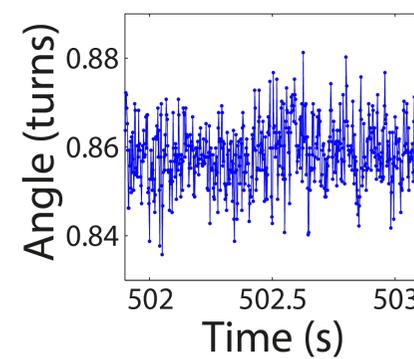
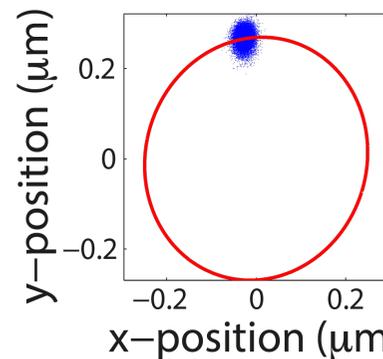
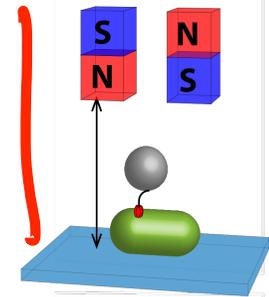
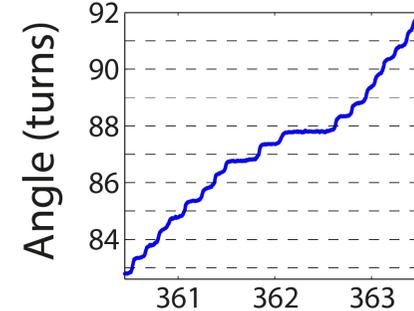
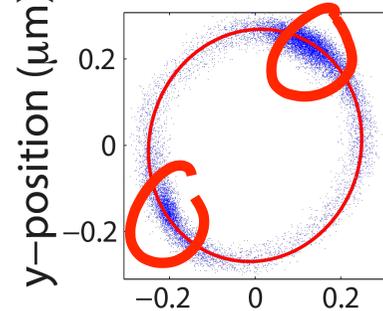
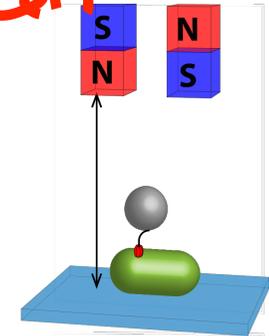
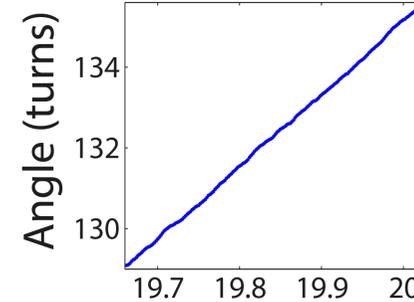
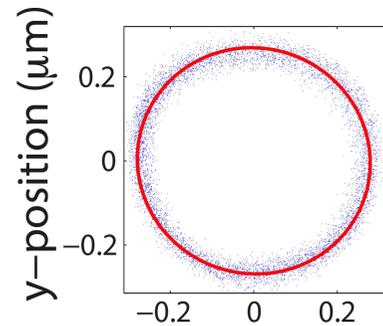
Für $F > 5$ pN, ändert die DNA
ihre Konformation zu **P-DNA** bei
Überdrehung

Drehmomentsmessungen an *E. coli*

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



Winkel \uparrow \rightarrow Zeit



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



Zusammenfassung: Druck & Auftrieb

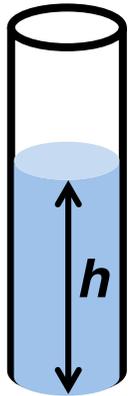
- Druck:

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

Einheit:

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

- Schweredruck:

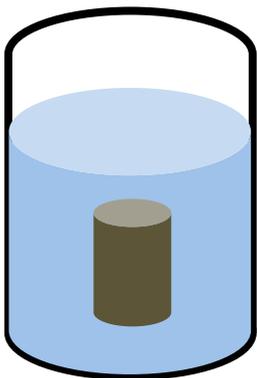


$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

Hydrostatisches Paradoxon:

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

- Auftrieb:



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

Archimedisches Prinzip:

Auftriebskraft = Gewichtskraft des verdrängten Fluids

*Volumen
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.

Schwimmbedingung:

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

Eingetauchte Volumen ist im 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.

Verdrängte Volumen
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:

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

Statischer
Druck

$$\sim \frac{\rho \cdot \text{Druckarbeit}}{v}$$

Schweredruck

$$\sim \frac{\rho \cdot g \cdot h}{v}$$

Staudruck

$$\sim \frac{\rho \cdot v^2}{v}$$



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

Daniel Bernoulli
(1700-1782)

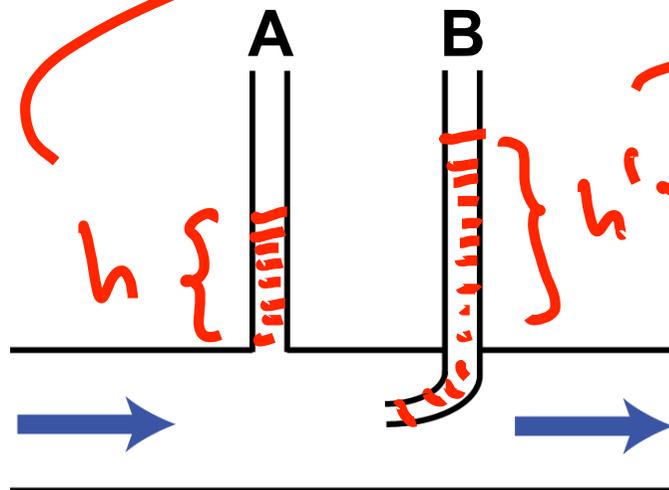
Verständnisfrage: Strömung im Rohr 1

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** :

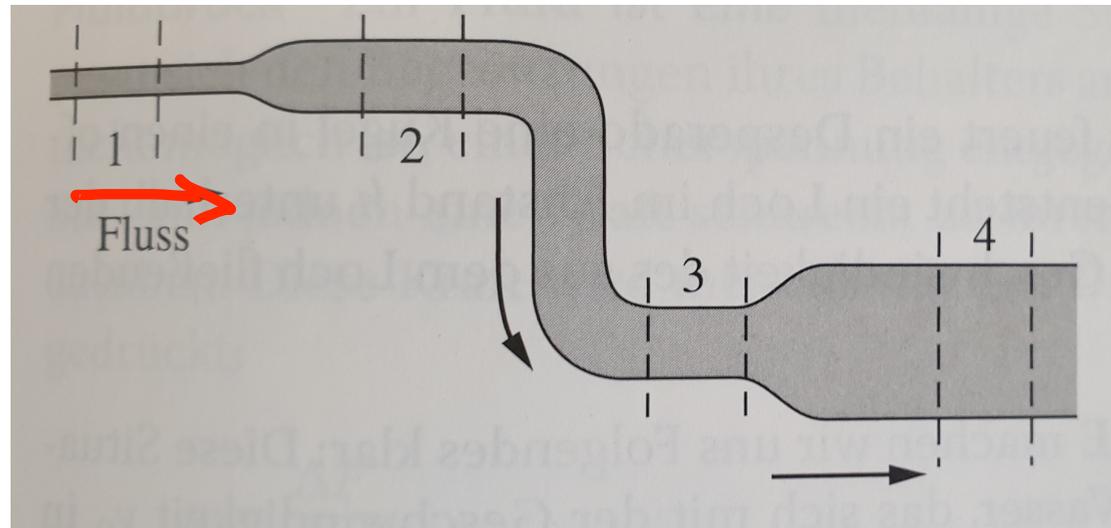
A) $1 > 2 = 3 > 4$

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** :

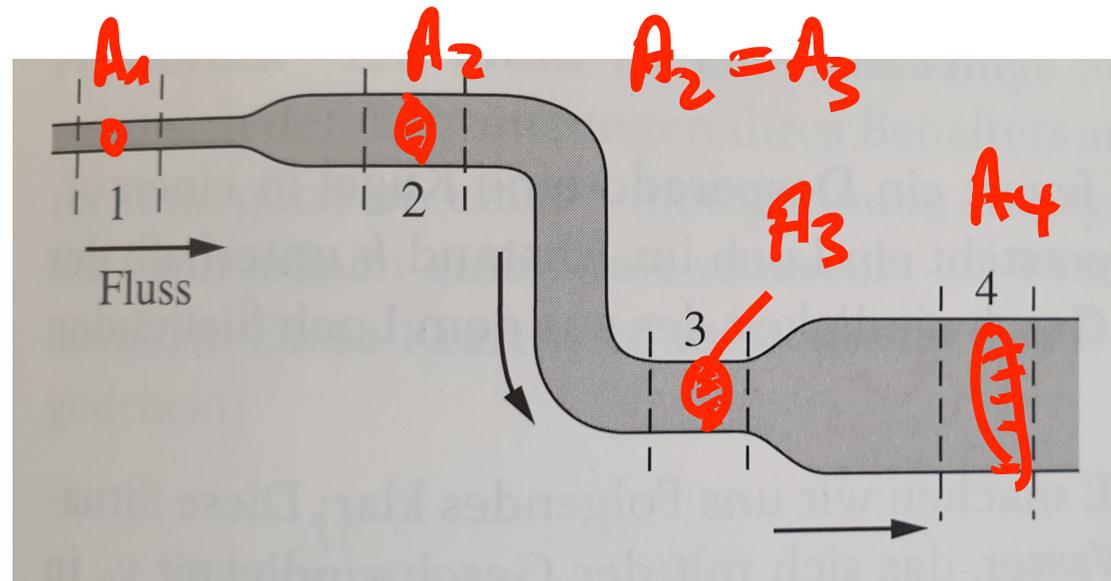
A) $1 > 2 = 3 > 4$ ✓

B) $1 < 2 = 3 < 4$

C) $1 = 2 > 3 = 4$

D) $1 = 2 < 3 = 4$

E) Alle gleich



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

Querschnittsfläche

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** :

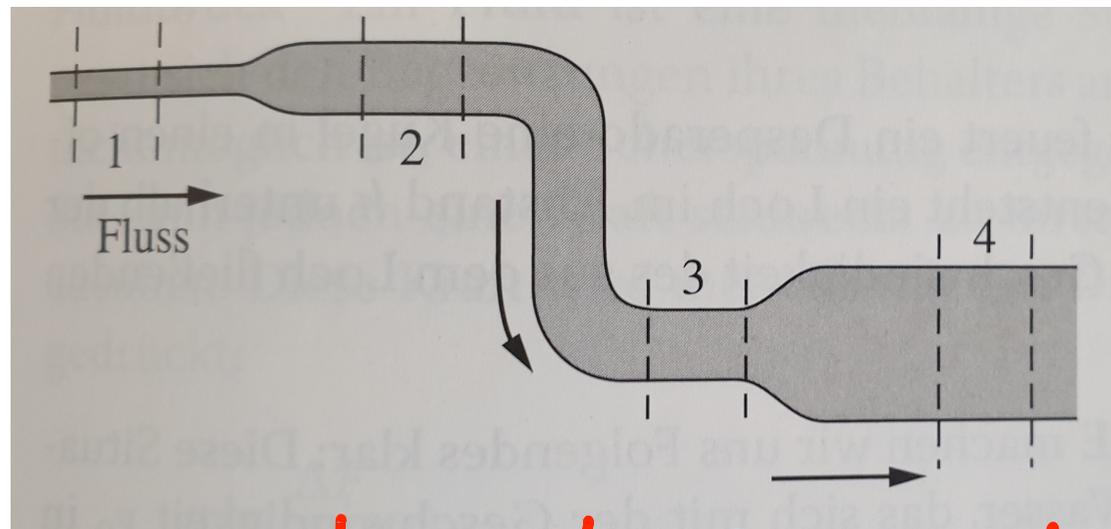
A) $1 > 2 = 3 > 4$

B) $1 < 2 = 3 < 4$

C) $1 > 2 > 3 > 4$

D) $1 < 2 < 3 < 4$ ✓

E) Alle gleich



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

$$p_1 < p_2 \quad \text{wegen } v_1 > v_2 \quad (A_1 < A_2)$$

$$p_2 < p_3 \quad \text{wegen } h_2 > h_3$$

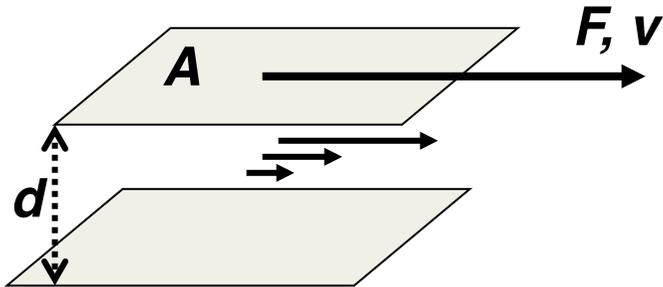
$$p_3 < p_4 \quad \text{wegen } v_3 > v_4 \quad (A_3 < A_4)$$

Zusammenfassung: Viskose Reibung

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

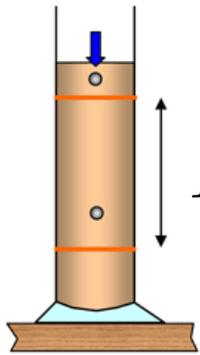
Wichtige Fälle (gelten für hohe Viskosität, kleine Geschwindigkeiten):

- Fluid zwischen zwei Platten:



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

- Kugel in einem viskosen Fluid (Stokes):



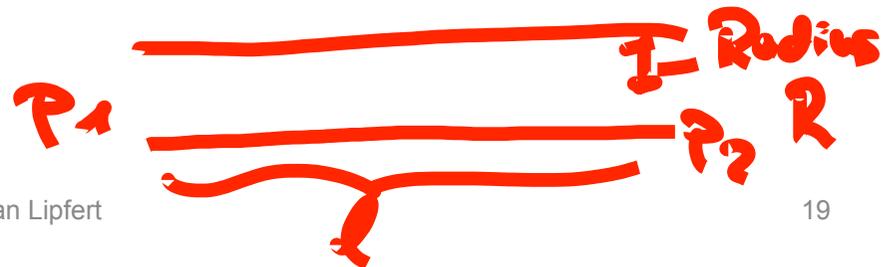
$$F_R = -6\pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

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

20.12.21

- Flussrate durch ein Rohr (Hagen-Poiseuille):

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



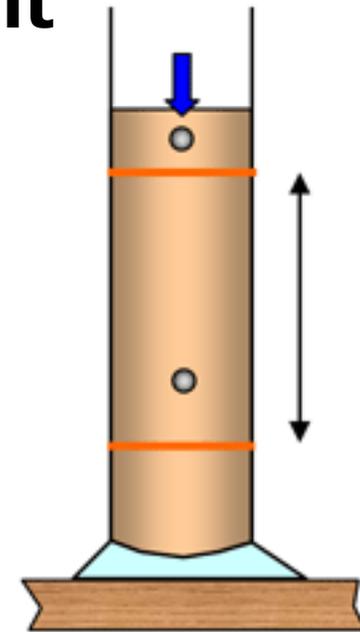
Prof. Dr. Jan Lipfert

19

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:

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

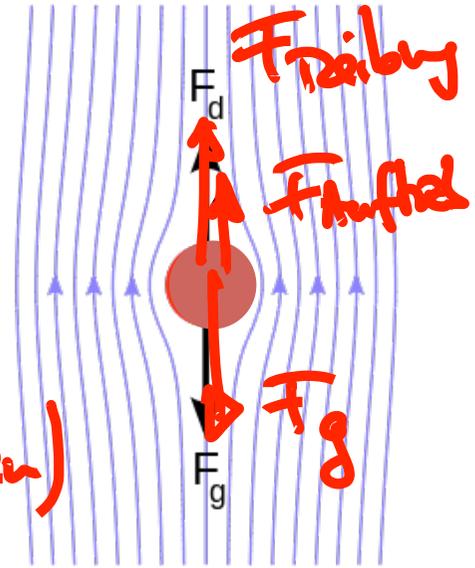
Auftriebskraft:

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

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

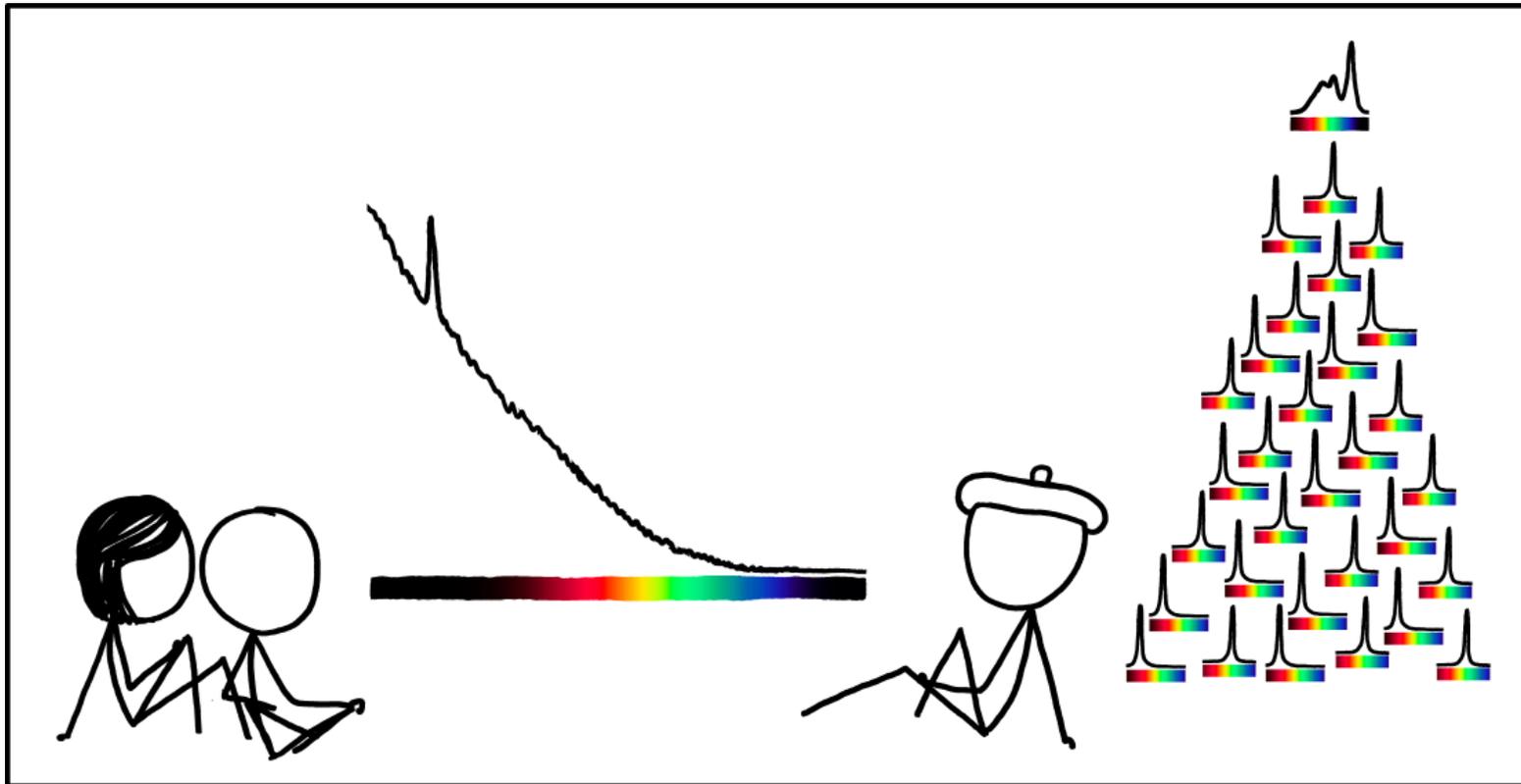
$$F_{\text{Reibung}} \sim R \cdot v$$

$$\Rightarrow v \sim R^2$$



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

Frohe Weihnachten und einen guten Rutsch ins neue Jahr 2022!



<https://xkcd.com/1308/>