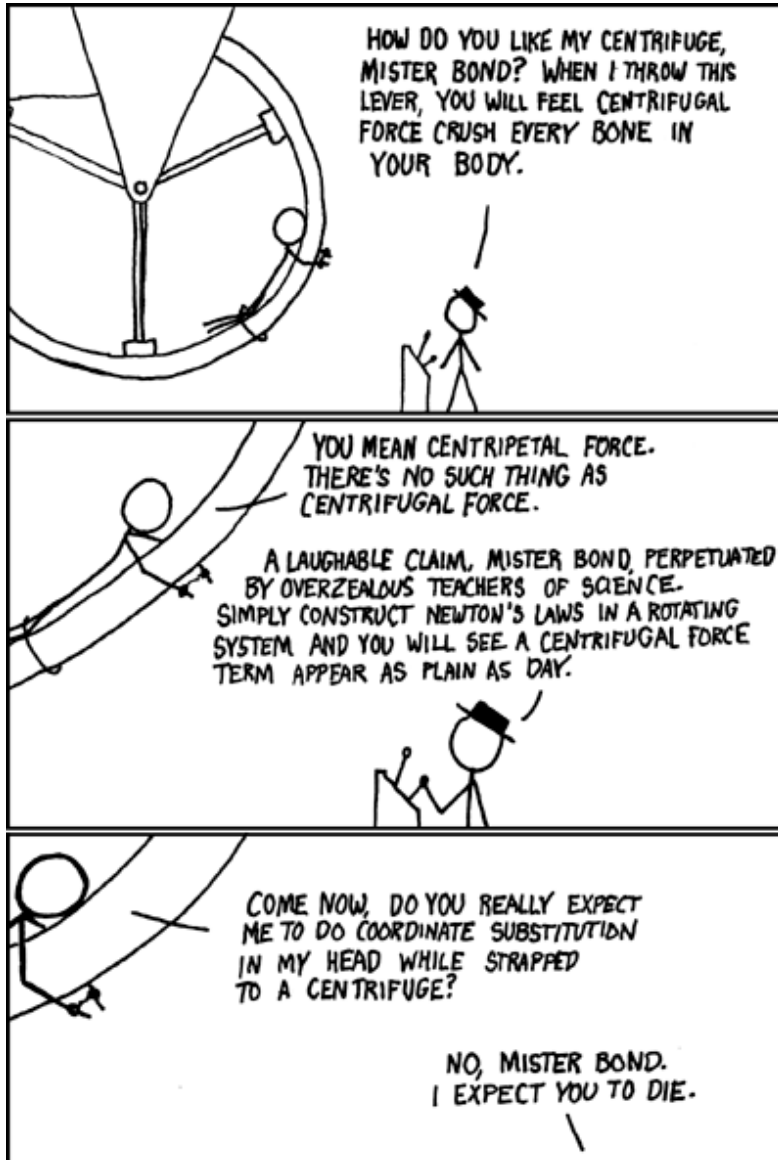


„May the force be with you!“

Physik 1 für Chemiker und Biologen

4. Vorlesung



<https://xkcd.com/123/>

Heute:

- Allgemeines zu Kräften
- Kreisbewegungen & Zentrifugalkraft
- Reibungskräfte: Festkörper & Fluide

Prof. Dr. Ralf Jungmann

Jungmann@physik.lmu.de

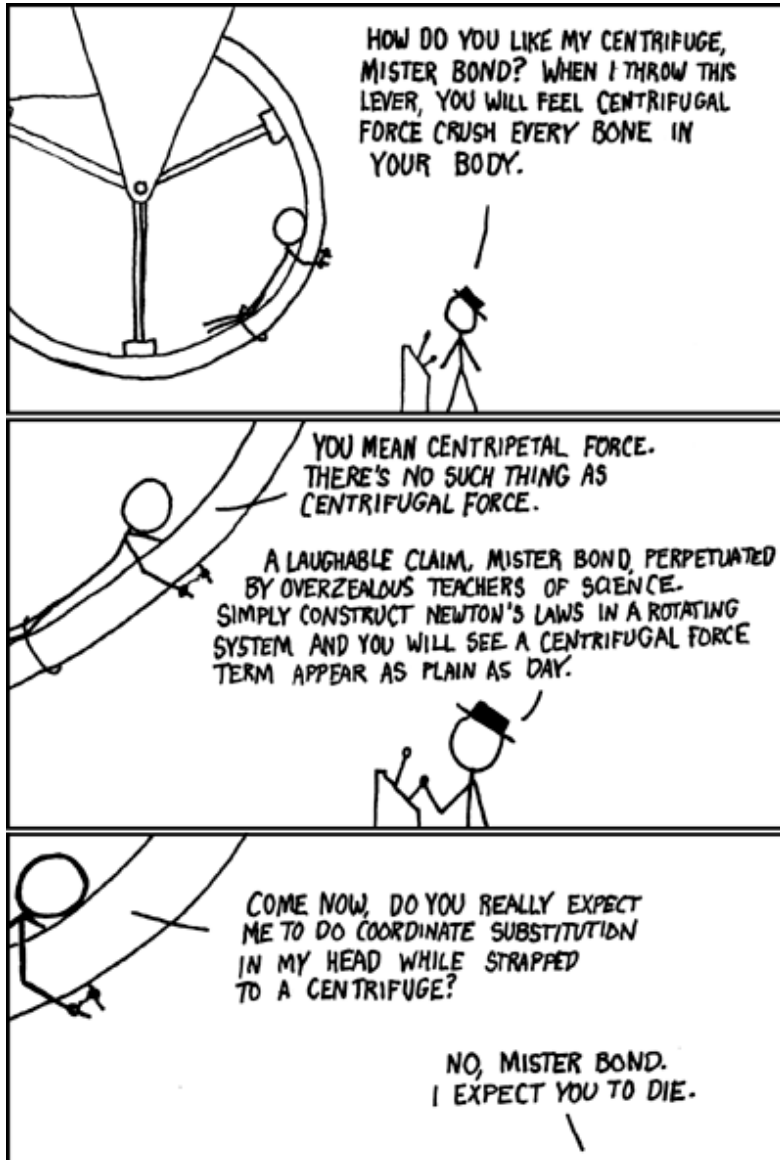
Prof. Dr. Jan Lipfert

Jan.Lipfert@lmu.de

„May the force be with you!“

Physik 1 für Chemiker und Biologen

4. Vorlesung



Heute:

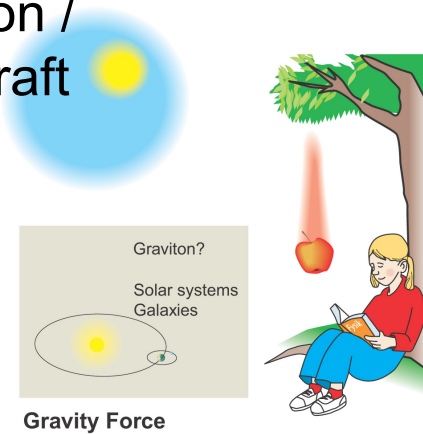
- Allgemeines zu Kräften
- Kreisbewegungen & Zentrifugalkraft
- Reibungskräfte: Festkörper & Fluide

Fundamentale Kräfte

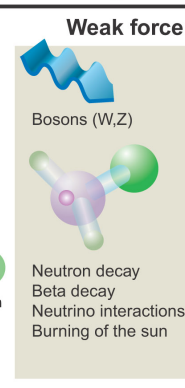
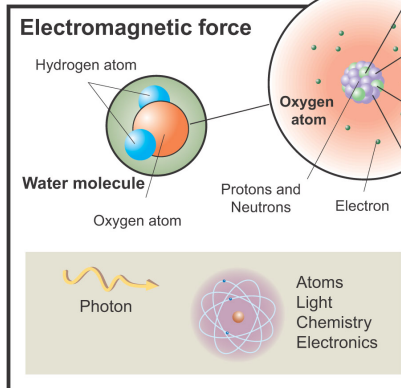
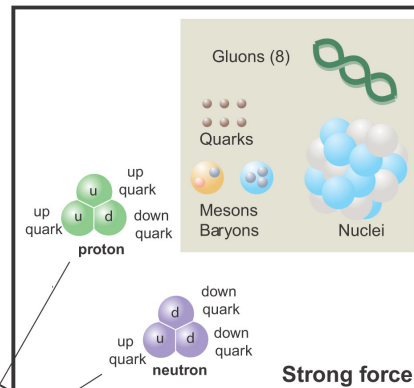
SI-Einheit der Kraft folgt aus Definition: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$, $[\vec{F}] = 1 \frac{kg \cdot m}{s^2} = 1N$

Die vier Grundkräfte der Physik

Gravitation /
Schwerkraft



Starke Kernkraft



Elektro-
magnetische Kräfte

Schwache Kernkraft

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html

Phänomenologische Kräfte & „Scheinkräfte“

Es ist oftmals schwierig oder unmöglich, Vorgänge direkt mit den vier Grundkräften zu beschreiben. Es ist daher nützlich, „effektive“ Kräfte einzuführen, die Interaktionen beschreiben.

Phänomenologische Kräfte

- Gewichtskraft
- Federkraft
- Reibungskraft
- Auftriebskraft
- Oberflächenspannung
- ...

Scheinkräfte / Trägheitskräfte

- Fliehkraft / Zentrifugalkraft
- Corioliskraft
- Trägheitskraft
- ...

Gleichförmige Kreisbewegung

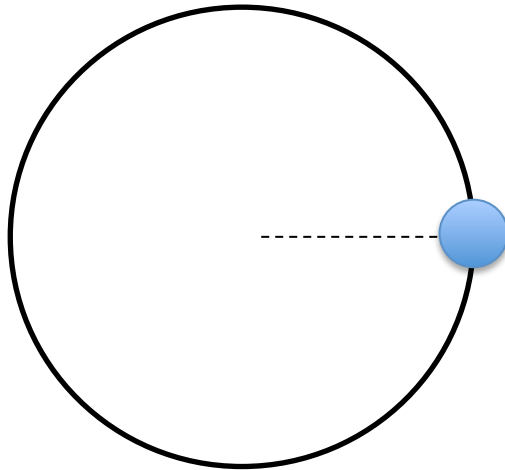
Definitionen:

Umlaufdauer T

Frequenz $f = \frac{1}{T}$

Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{d\phi}{dt}$

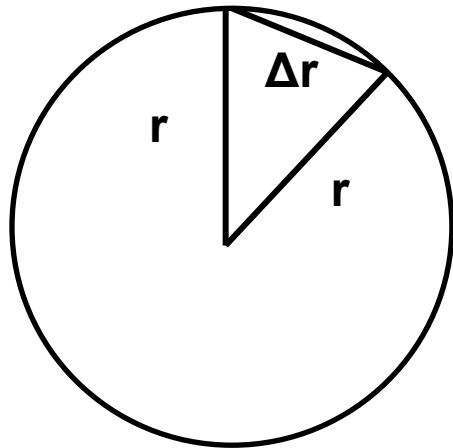
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$



$|\vec{v}|$ ist konstant, aber \vec{v} ändert sich!

Nach Newton ist für eine Geschwindigkeitsänderung eine Beschleunigung nötig, die durch eine Kraft verursacht wird!

Die Zentripetalkraft



<http://de.wulffplag.wikia.com/wiki/Datei:Kettenkarussell.jpg>

Experiment: Schleifscheibe und Funkenflug

Wie groß sind Zentripetalkräfte? Ein Beispiel aus dem Chemielabor



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

Tischzentrifuge

4. Spin buffer and RNA sample solutions for 10 min at 13,000 rpm immediately before the SAXS measurement.

Lipfert, Herschlag, Doniach
Methods in Molecular Biology (2009)

Zentripetalkraft vs. Schwerkraft „Looping the Loop“



Looping auf der Wies'n



https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_the_Loop_%28Coney_Island%29

“Loop the Loop” (Coney Island)

Scheinkräfte

Scheinkräfte oder Trägheitskräfte treten in beschleunigten Bezugssystemen auf, d.h. wenn sich der Beobachter nicht in einem Inertialsystem befindet.

BEISPIEL: Anfahrendes Auto
„Wenn ich auf das Gas trete,
drückt es mich in den **Sitz**“



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

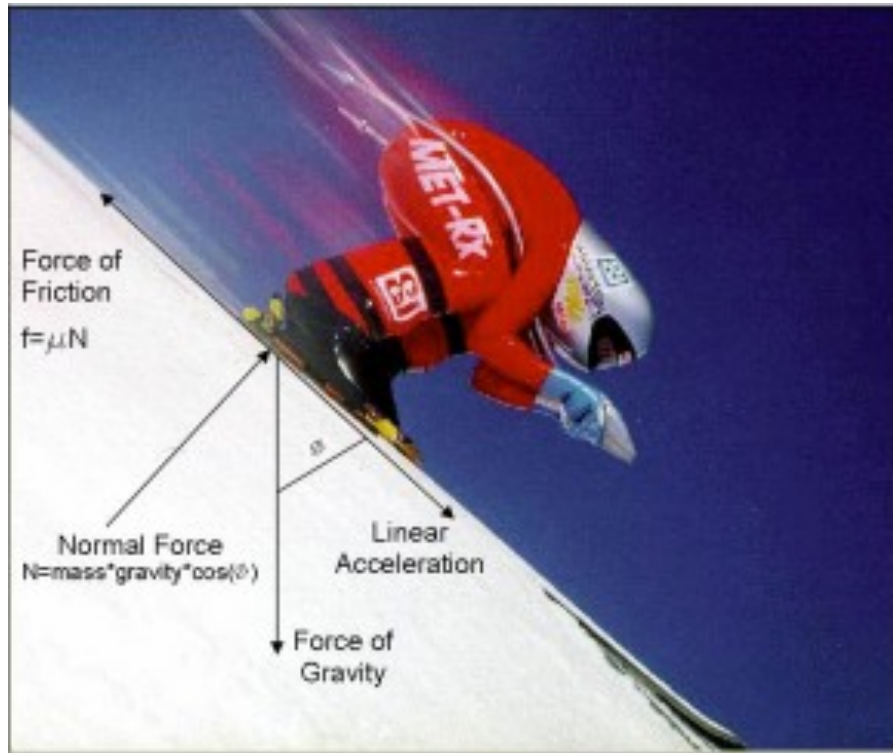
BEISPIEL: Aufzugfahrt
„Beim Hochfahren, werde ich
nach unten in den Fahrstuhl
gedrückt“



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/240_Sparks_Elevators.jpg

Hangabtriebskraft & Normalkraft

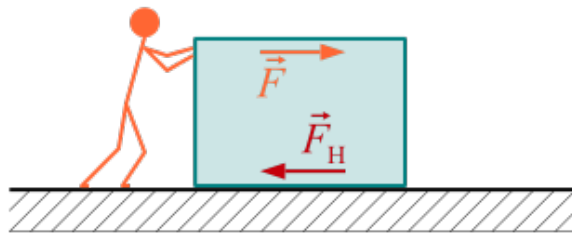
Beschleunigung eines Skifahrers



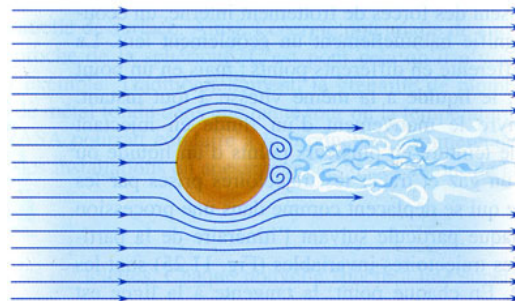
<http://sportsnsience.utah.edu/2012/09/04/skiing-friction-basic/>

Reibung ist eine „phänomenologische“ Kraft

- Gesetze sind (mehr oder weniger gute) Näherungen
- Grundsätzlich drei unterschiedliche Typen von Reibung:
 - Reibung zwischen Festkörpern
 - laminare Strömung (Reibung in Flüssigkeiten)
 - turbulente Strömung (Reibung in Gasen oder Flüssigkeiten)



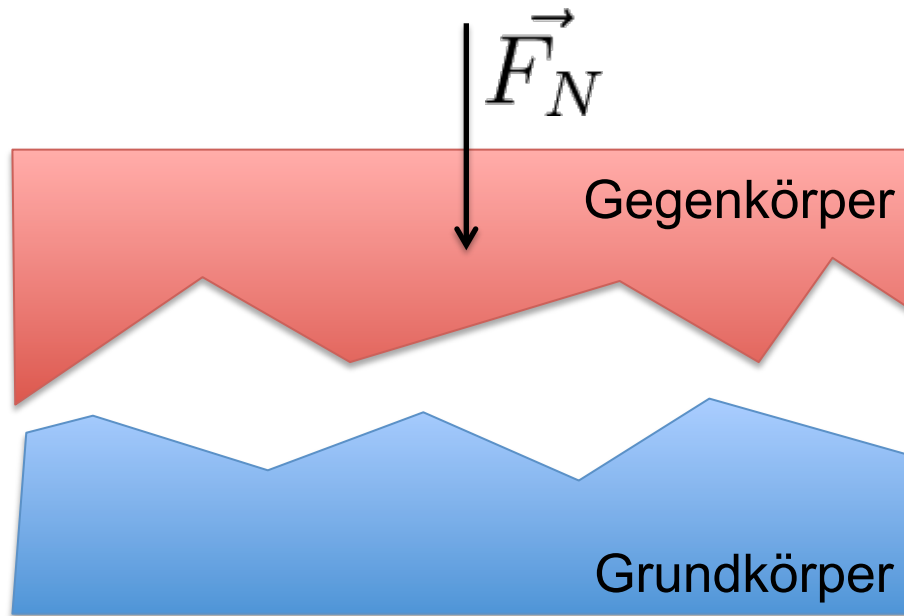
<https://de.wikipedia.org/wiki/Haftreibung>



<http://physique.vije.net/BTS/index.php?page=fluides4>

- Auf atomarer Ebene gibt es keine Reibung
- Reibung verhindert oft, dass wir die „wahren“ physikalischen Gesetze beobachten

Reibung zwischen Festkörpern



<http://esporte.hsw.uol.com.br/escalada.htm>



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

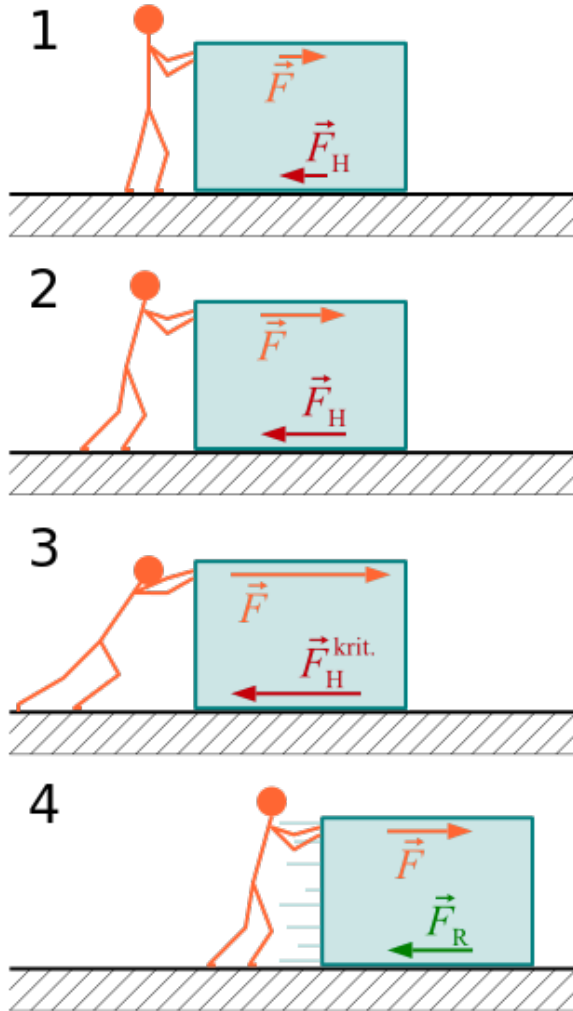


<http://esporte.hsw.uol.com.br/escalada.htm>

Reibung zwischen Festkörpern: Haftreibung und Gleitreibung

Haftreibungskraft $F_{R,Haft}$

Gleitreibungskraft $F_{R,Gleit}$

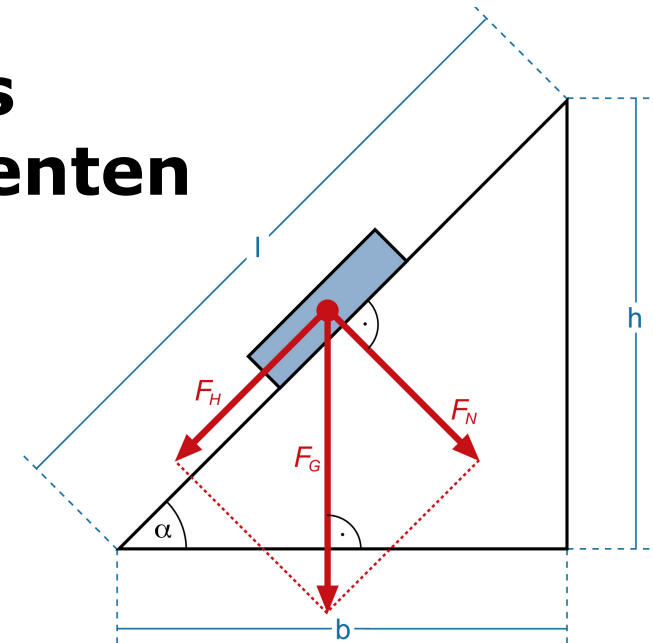


<https://de.wikipedia.org/wiki/Haftreibung>

Experiment: Haft- und Gleitreibung

Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten

Betrachte Neigung, bei der der Block gerade noch nicht rutscht:

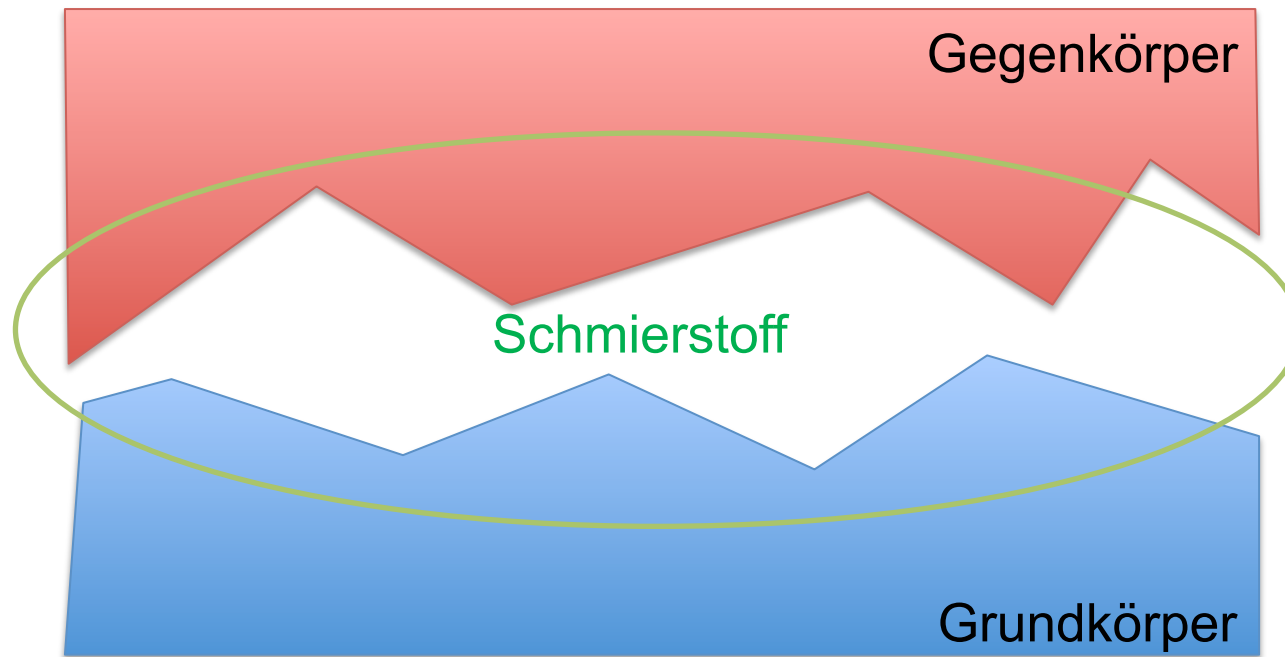


<https://de.wikipedia.org/wiki/Hangabtriebskraft>

Experiment: Reibung auf schiefer Ebene

Film: Portland drivers in the snow
(<https://www.youtube.com/watch?v=aAidrS144r0>)

Reduzierung von Reibung: Schmierer



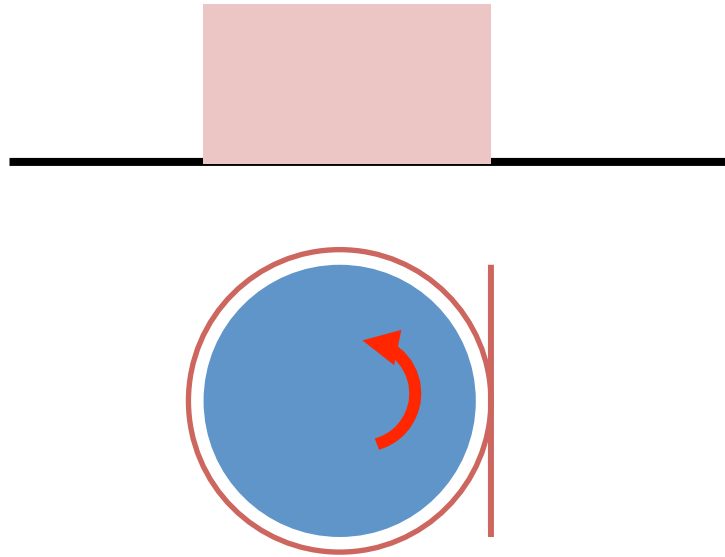
Reibung zwischen Festkörpern: Geschwindigkeit

Mit zunehmender Geschwindigkeit:

A) Nimmt die Reibung zu.

B) Nimmt die Reibung ab.

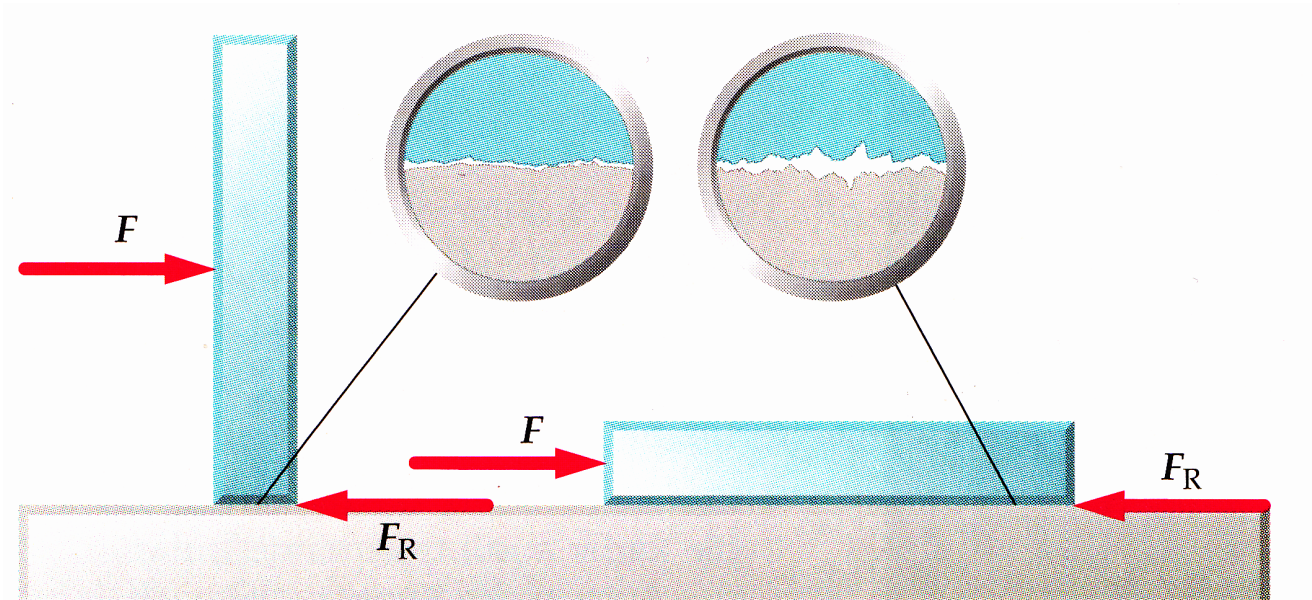
C) Bleibt die Reibung gleich.



F_{Reibung} unabhängig von Geschwindigkeit v !

Experiment:
Geschwindigkeits-unabhängige Reibung
und Schmierung (mit Isopropanol)

Reibung zwischen Festkörpern: Auflagefläche



F_R ist unabhängig von der Auflagefläche A !

Experiment: Reibung Holzklötze auf Papier

Haften, Gleiten, Rollen

- Reibung zwischen Festkörpern ist genähert unabhängig von v
- Die Reibung ist näherungsweise unabhängig von der Fläche A
- Entscheidend sind die Materialien!
- Reibungskoeffizienten werden experimentell bestimmt

Haftreibung



<http://esporte.hsw.uol.com.br/escalada.htm>

23.11.20

Gleitreibung



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

Rollreibung



<https://de.wikipedia.org/wiki/Intercity-Express>

Prof. Dr. Jan Lipfert

18

Warum fährt Sebastian Vettel so breite Reifen... und Jan Ulrich so dünne?



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



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

Stokes-Reibung („Flüssigkeitsreibung“)

Gesetz von Stokes gilt für sphärische Körper in Fluid:

- Kleine Körper
- Kleine Geschwindigkeiten
- Viskoses Fluid

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



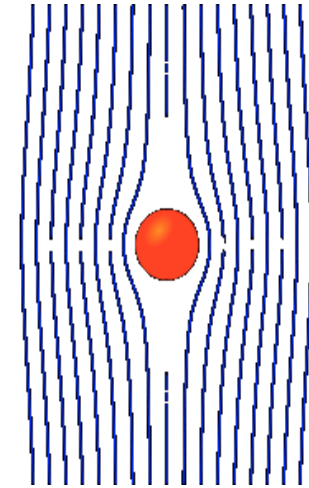
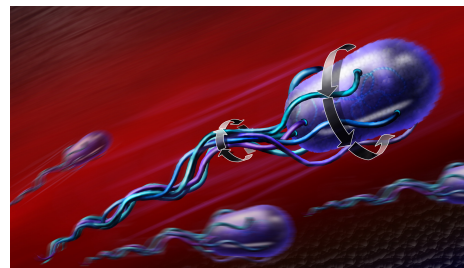
https://de.wikipedia.org/wiki/George_Gabriel_Stokes

Sir George Gabriel
Stokes
(1819-1903)

η dynamische Viskosität

$$[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

- Wasser bei 20°C:
 $\eta = 0,001 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
- Motorenöl:
 $\eta = 0,25 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$



http://www.thefullwiki.org/Sediment_transport

Stokes Reibung ist wichtig in vielen biologischen Prozessen auf $< \mu\text{m}$ Skala

Newton-Reibung für turbulente Strömung („Gasreibung“)

Turbulente Reibung = Newton Reibung

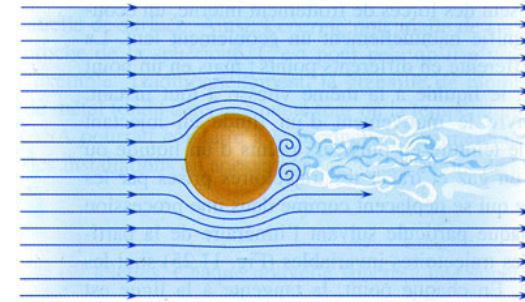
- Große Körper
- Große Geschwindigkeiten
- Fluid/Gas mit geringer Dichte

$$|F_W| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_W \cdot v^2$$

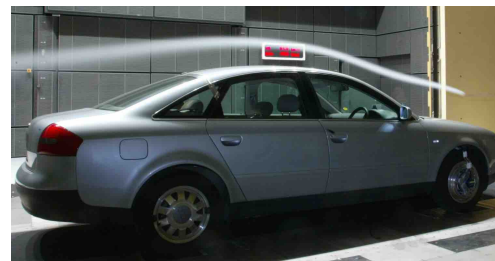
- Dichte des strömenden Fluids ρ
- Referenzfläche A
- Strömungsgeschwindigkeit v und
- Strömungswiderstandskoeffizienten C_W .

Typische C_W Werte:

- Ford Model T: 0,9
- VW Käfer: 0,48
- „Moderne“ Autos: 0,24-0,4
- „Öko“- Autos: ~0,1-0,2
- Pinguin: 0,03



<http://physique.vije.net/BTS/index.php?page=fluides4>



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Aeroakustik-Windkanal-Messhalle.JPG>

Wann verwenden ich welche Reibung? Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

- Dichte des strömenden Fluids ρ [kg/m³]
- Strömungsgeschwindigkeit v [m/s]
- Charakteristische Länge des Objektes d [m]
- Dynamische Viskosität η [Pa·s] = [N·s/m²]
- Kinematische Viskosität ν [m²/s]



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

Osborne Reynolds
(1842-1912)

Experiment: laminare & turbulente Strömung

Typische Reynoldszahlen in Wasser

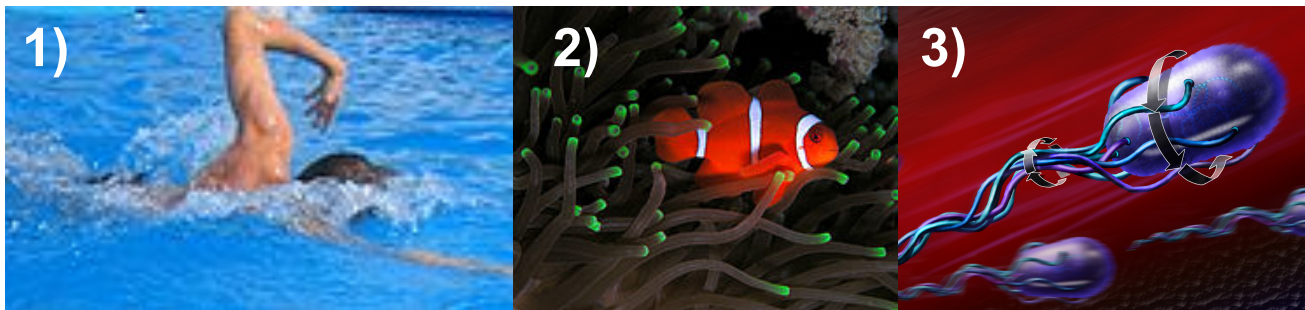
Wir betrachten drei Schwimmer in Wasser:

1) Mensch; 2) kleiner Fisch; 3) Bakterium

In welchem dieser Fälle gilt die Stokes Reibung in guter Näherung?

Abstimmen unter *pingo.upb.de*!

- A) Nur 1
- B) Nur 2
- C) Nur 3
- D) Nur 1 und 2
- E) 1, 2 und 3



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

23.11.20

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

Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

Prof. Dr. Jan Lipfert

23

Typische Reynoldszahlen in Wasser

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Wasser bei 20°C: $\rho \sim 1000 \text{ kg/m}^3$

$\eta \sim 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m s})$

$\nu = \frac{\eta}{\rho} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$d \sim 1 \text{ m}$

$d \sim 1 \text{ cm}$

$d \sim 1 \mu\text{m}$

$v \sim 1 \text{ m/s}$

$v \sim 1 \text{ cm/s}$

$v \sim 10 \mu\text{m/s}$

$Re \sim 10^6$

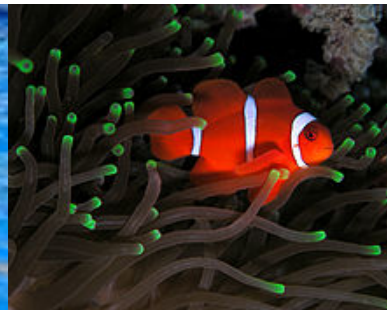
$Re \sim 10^2$

$Re \sim 10^{-5}$

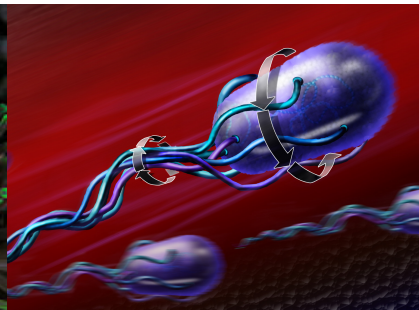


<https://de.wikipedia.org/wiki/Rettungsschwimmen>

23.11.20



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



Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

Prof. Dr. Jan Lipfert

24

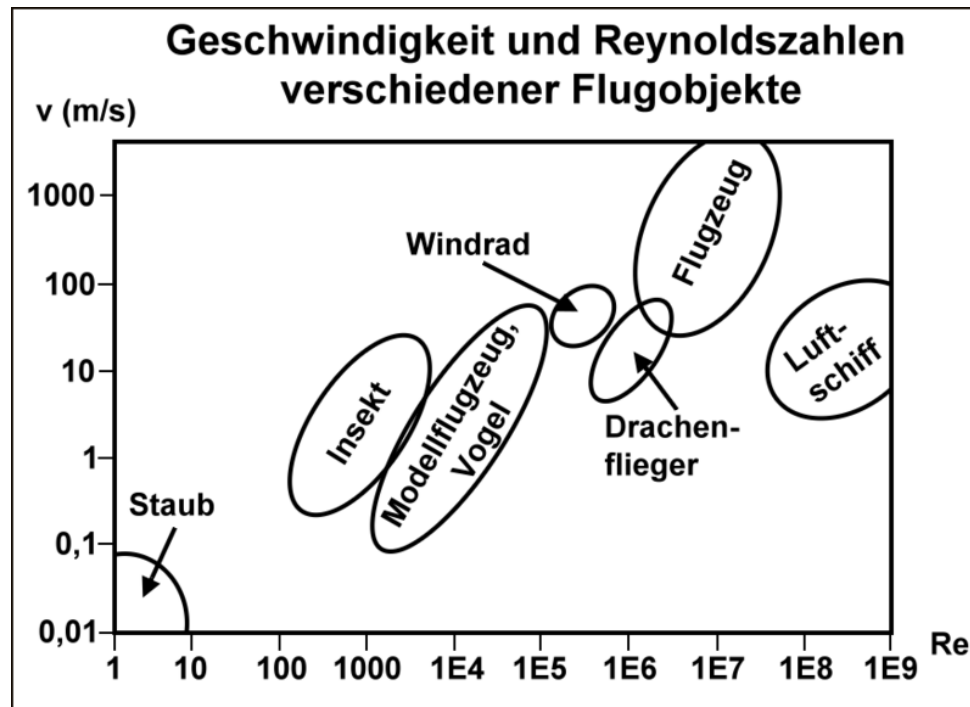
Typische Reynoldszahlen in Luft

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Luft bei 25°C, 1 Bar: $\rho \sim 1 \text{ kg/m}^3$

$\eta \sim 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$\nu = \frac{\eta}{\rho} \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$



<https://de.wikipedia.org/wiki/Reynolds-Zahl>

Das „langweiligste Experiment der Welt“!?

Ein Beispiel für eine Viskositätsmessung: das „pitch drop“ Experiment
(University of Queensland, Australien)



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

8 Tropfen seit 1930!

$$\eta \sim 2 \cdot 10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

($\sim 10^{11}$ mal größer als für Wasser)

John Mainstone (der damalige Kurator)
und sein Experiment, 1990

Tempolimit auf Autobahnen?

$$|F_W| = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_W \cdot v^2$$

- Dichte des strömenden Fluids ρ
- Referenzfläche A
- Strömungsgeschwindigkeit v und
- Strömungswiderstandskoeffizienten C_W .



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



<http://www.freefoto.com/preview/1216-07-33/Speed-Limit-70-Sign--Route-95--Nevada--USA>

Zusammenfassung: Festkörperreibung

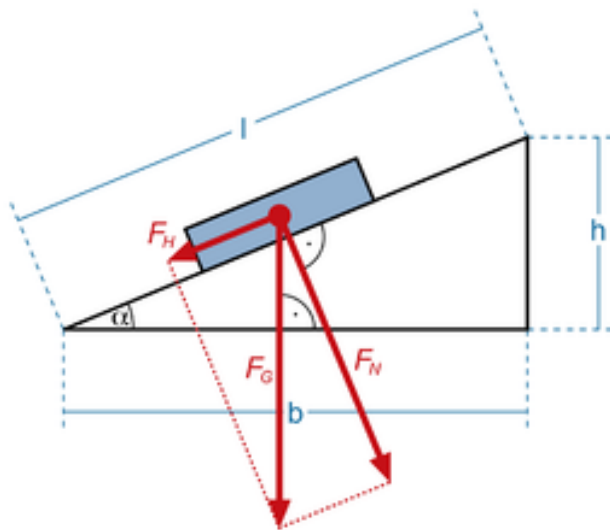
Schiefe Ebene:

- Hangabtriebskraft

$$F_H = mg \sin \alpha$$

- Normalkraft

$$F_N = mg \cos \alpha$$



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

Festkörperreibung:

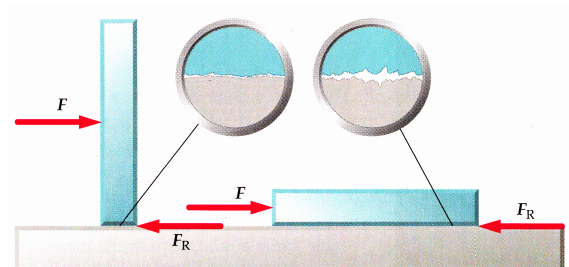
- Haftreibung

$$|F_{R,Haft}| = \mu_{R,Haft} |F_N|$$

- Gleitreibung

$$|F_{R,Gleit}| = \mu_{R,Gleit} |F_N|$$

Die Festkörperreibung ist unabhängig von v und A !



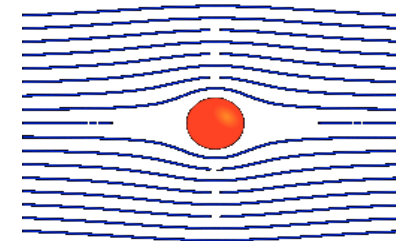
Zusammenfassung: Fluidreibung

Stokes-Reibung („Flüssigkeitsreibung“)

Gilt für:

- Kleine Körper
- Kleine Geschwindigkeiten
- Viskoses Fluid

$$\vec{F}_R = -6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot \vec{v}$$



http://www.thefullwiki.org/Sediment_transport

- η dynamische Viskosität
- R Kugelradius bzw. effektiver Radius
- v Geschwindigkeit

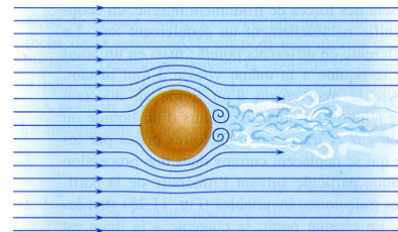
Newton-Reibung („Gasreibung“)

Gilt für:

- Große Körper
- Große Geschwindigkeiten
- Fluid/Gas mit geringer Dichte

$$\vec{F}_R = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_W \cdot v^2$$

- ρ Dichte des Fluids
- A Referenzfläche
- C_W Strömungswiderstandskoeffizient
- v Geschwindigkeit



<http://physique.vije.net/BTS/index.php?page=fluides4>