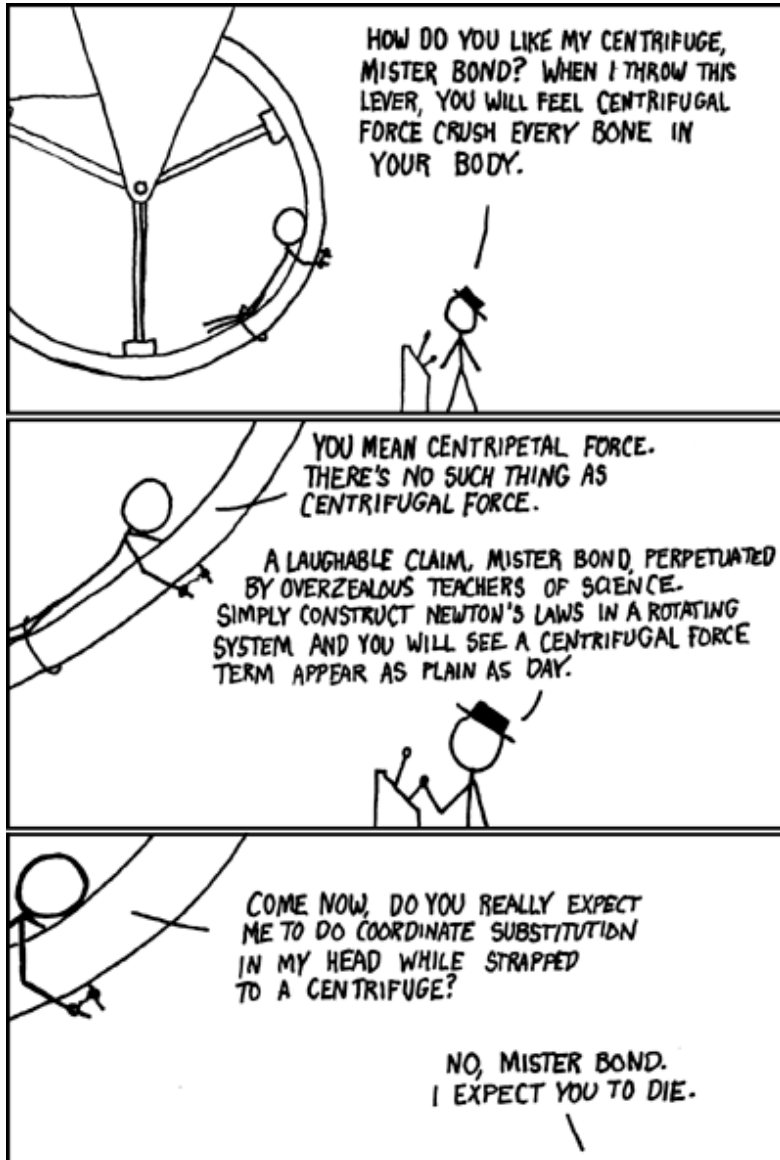


# „May the force be with you!“

## 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](mailto:Jungmann@physik.lmu.de)

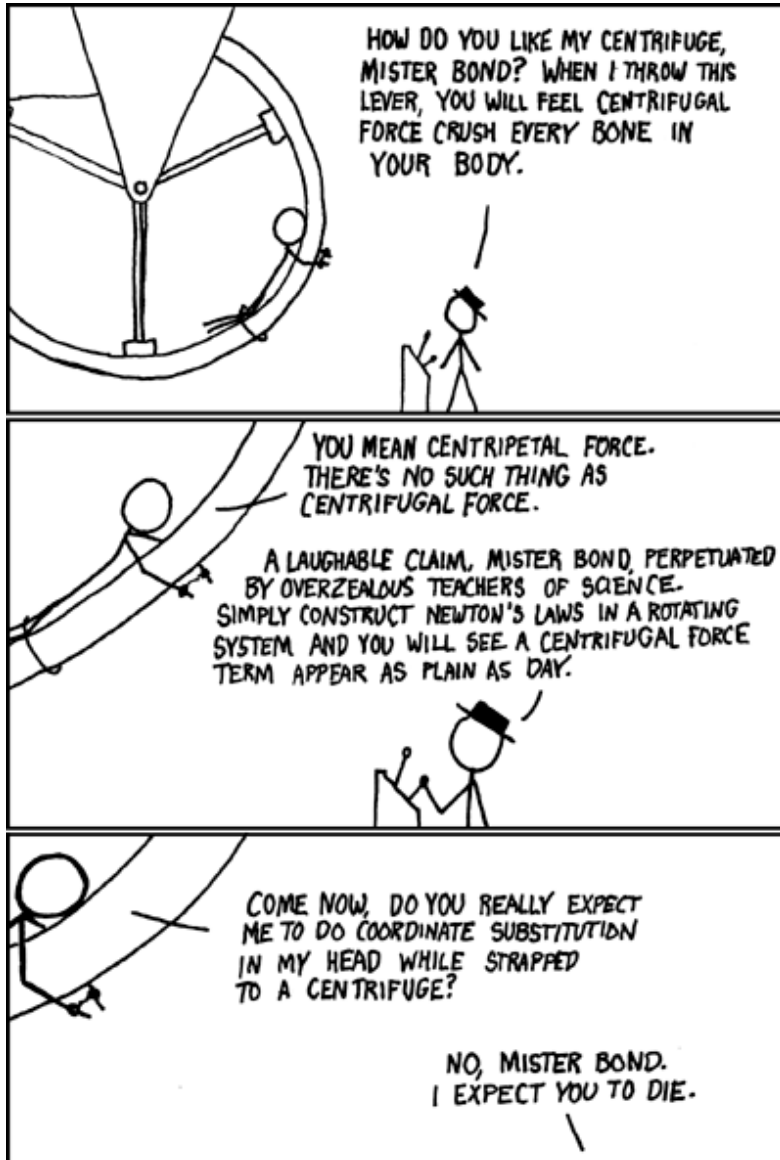
Prof. Dr. Jan Lipfert

[Jan.Lipfert@lmu.de](mailto:Jan.Lipfert@lmu.de)

# „May the force be with you!“

## Physik 1 für Chemiker und Biologen

### 4. Vorlesung



Heute:

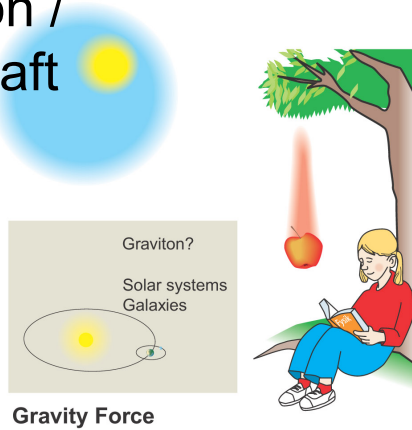
- Allgemeines zu Kräften
- Kreisbewegungen & Zentrifugalkraft
- Reibungskräfte: Festkörper & Fluide

# Fundamentale Kräfte

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

*(Physik 1)* Die vier Grundkräfte der Physik

Gravitation /  
Schwerkraft



*Masse*

*(Physik 2)*

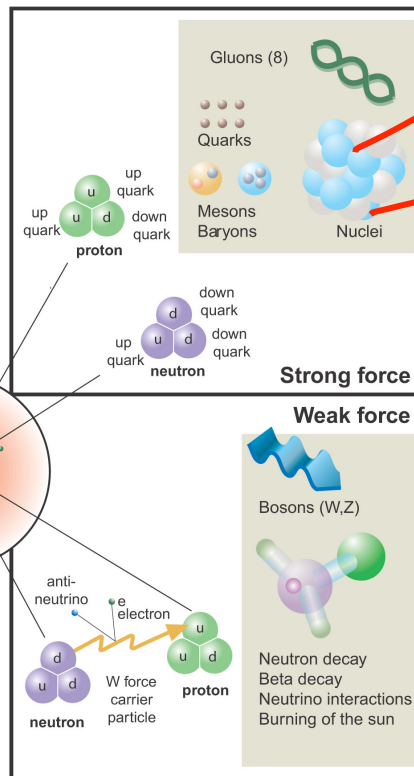
*Elektrische  
Ladung*

*⊕ ⊖*

Elektro-  
magnetische Kräfte

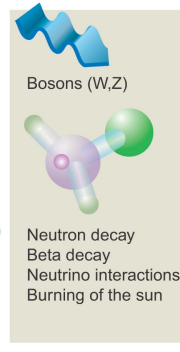
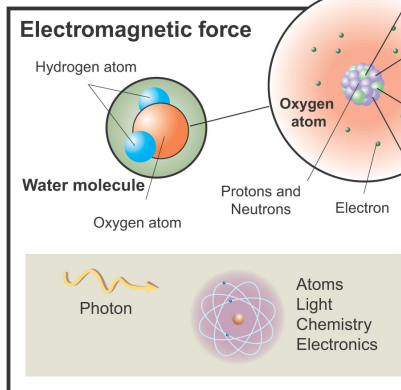
*z.B. β-Zerfall*

Starke Kernkraft



*⊕ ⊕  
⊕ ⊕*

Weak force



[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2004/popular.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html)

Schwache Kernkraft

# 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
- ...

$$m \cdot g = \vec{F}_g$$
$$-kx = \vec{F}_{\text{Feder}}$$

## Scheinkräfte / Trägheitskräfte

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

→ Beschleunigte Bezugssysteme!



# Gleichförmige Kreisbewegung

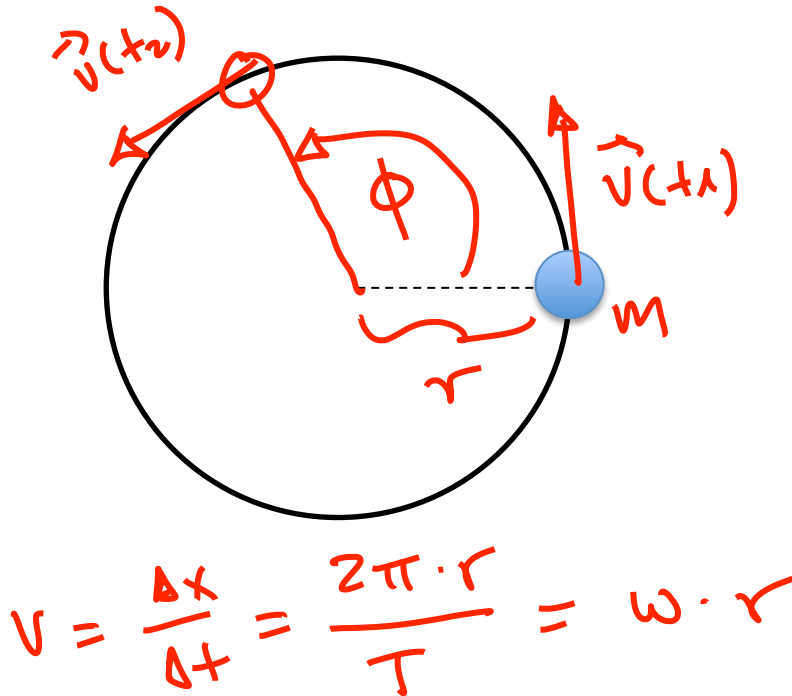
Definitionen:

Umlaufdauer  $T$

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

Winkelgeschwindigkeit

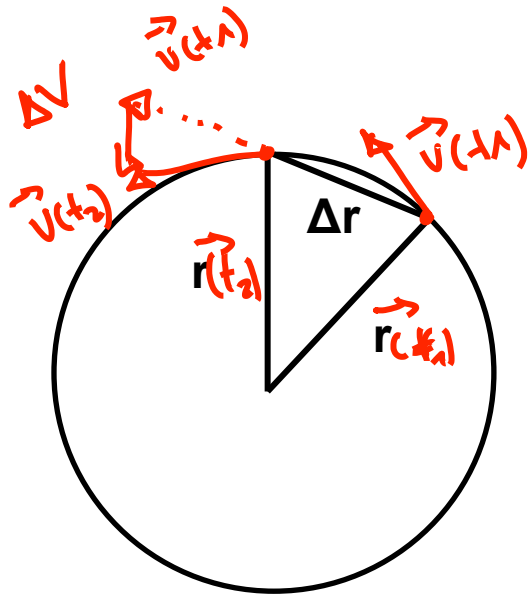
$$\omega = \frac{d\phi}{dt}$$
$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$



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

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

# Die Zentripetalkraft



$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{|\Delta \vec{v}|}{|\vec{v}|} = \frac{\Delta v}{v}$$

$$\Rightarrow \frac{\frac{\Delta r}{\Delta t}}{r} = \frac{\frac{\Delta v}{\Delta t}}{v}$$

$$\Rightarrow \frac{v}{r} = \frac{\frac{\Delta v}{\Delta t}}{\frac{\Delta r}{\Delta t}} = \frac{a}{v}$$



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

$$\Rightarrow a_{\text{Zentripetal}} = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$$

$$|F_{\text{Zentripetalkraft}}| = m \cdot a_{\text{Zentr.}} = m \cdot \frac{v^2}{r} = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

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)

$$13000 \text{ rpm} = \frac{13000 \frac{1}{\text{min}}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = 217 \text{ Hz}$$

$$a_{\text{Zentripetal}} = \omega^2 \cdot r = (2\pi \cdot 217 \text{ Hz})^2 \cdot 0,1 \text{ m}$$

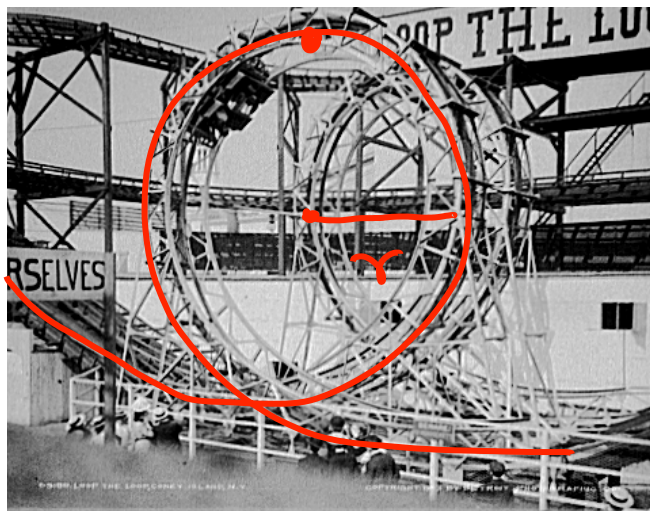
$$= 1,85 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$$

$$\Rightarrow a_{\text{Zentr.}} = \frac{1,85 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2}{9,8 \text{ m/s}^2} = 19000 \cdot g$$

# Zentripetalkraft vs. Schwerkraft „Looping the Loop“



Looping auf der Wies'n



[https://en.wikipedia.org/wiki/Loop\\_the\\_Loop\\_%28Coney\\_Island%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Loop_the_Loop_%28Coney_Island%29)

“Loop the Loop” (Coney Island)

Kräftegleichgewicht am höchsten Punkt.

$$F_{\text{Zentripetal}} = F_{\text{Schwerkraft}}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot g$$

$$\Rightarrow v_{\text{min}} = \sqrt{g \cdot r}$$

$$\approx \sqrt{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10 \text{m}} \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

# 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“

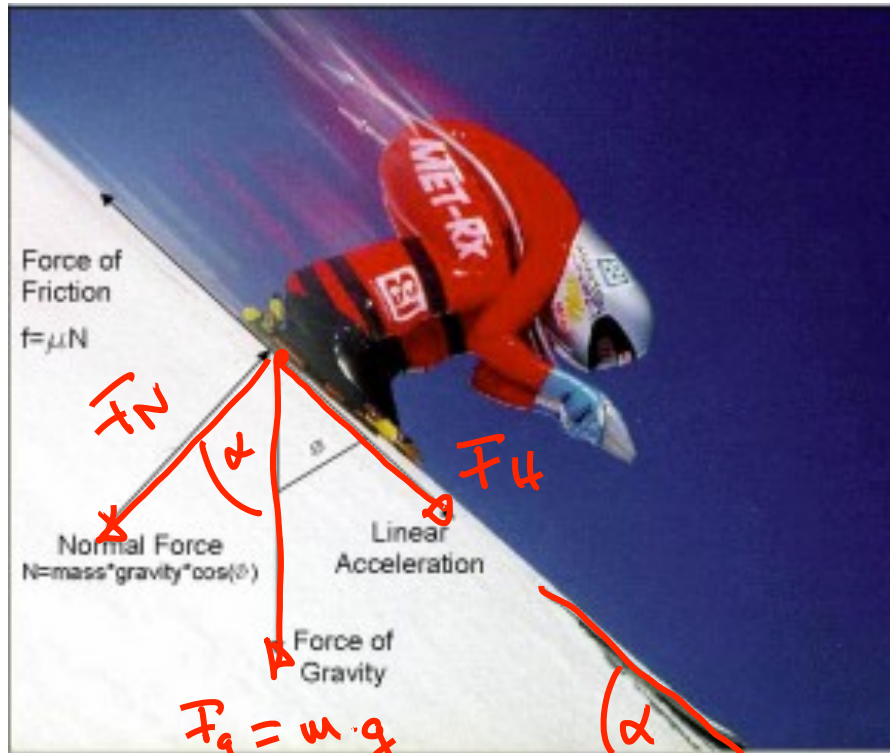


[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/240\\_Sparks\\_Elevators.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/54/240_Sparks_Elevators.jpg)



# Hangabtriebskraft & Normalkraft

Beschleunigung eines Skifahrers



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

Normalkraft:

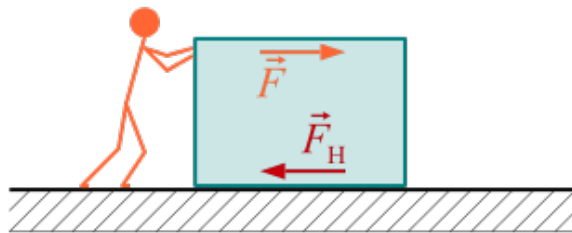
$$F_N = F_g \cdot \cos \alpha = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

Hangabtriebskraft:

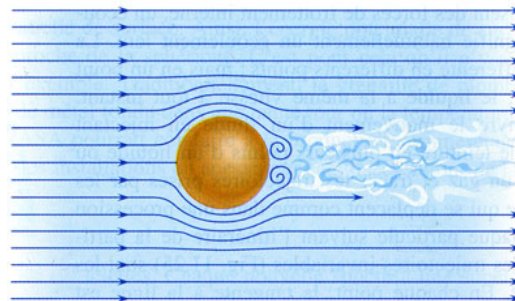
$$F_H = F_g \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

# 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)



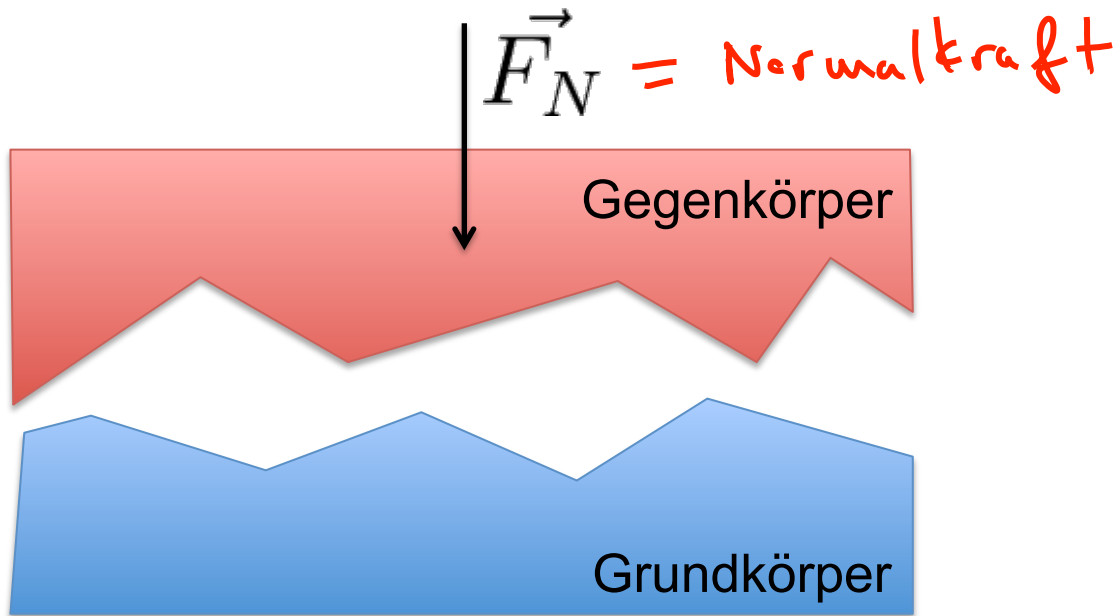
<https://de.wikipedia.org/wiki/Haftreibung>



<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>

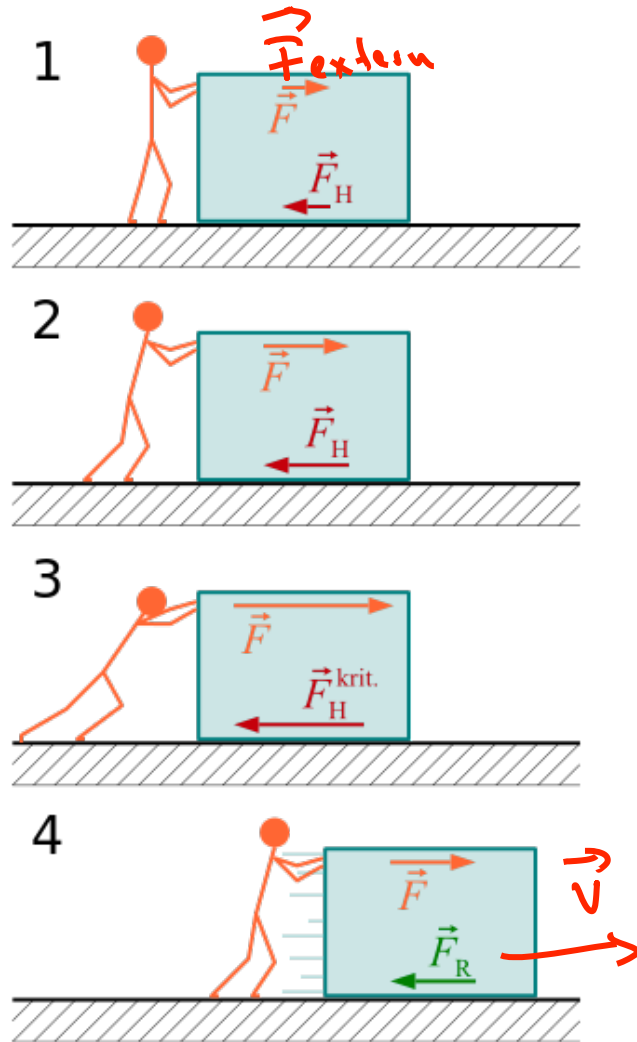
$\vec{F}_N = \vec{F}_g$



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

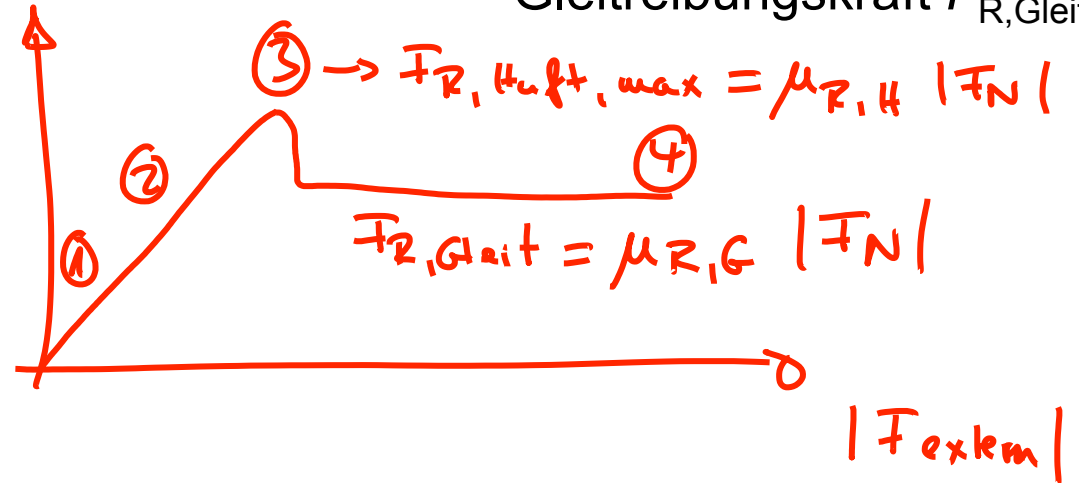


# Reibung zwischen Festkörpern: Haftreibung und Gleitreibung



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

$|F_{\text{Reibung}}|$



Haftreibungskraft  $F_{R, \text{Haft}}$

Gleitreibungskraft  $F_{R, \text{Gleit}}$

Experiment: Haft- und Gleitreibung

# Bestimmung des Haftreibungskoeffizienten

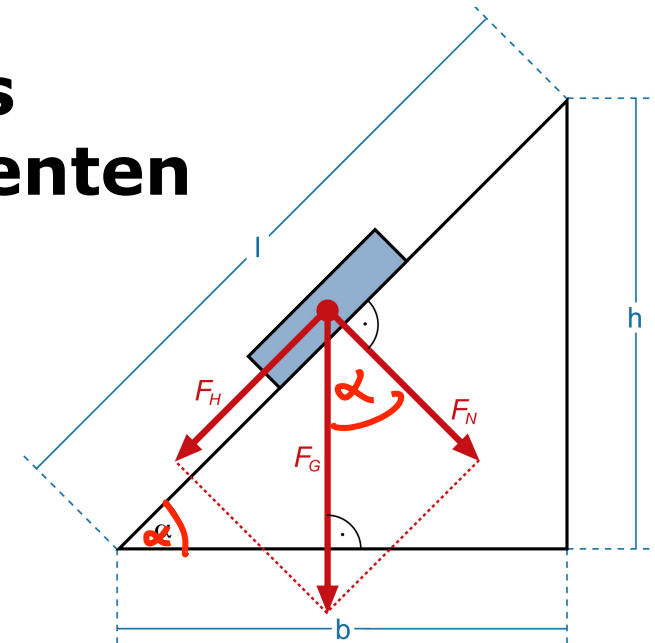
Betrachte Neigung, bei der der Block gerade noch nicht rutscht:

$$|F_{\text{Haftreibungskraft}}| = \mu_{R,H} |F_N| = F_{R,H}$$

$$|F_{\text{Hangabtrieb}}| = |F_{R,H}| = \mu_{R,H} \cdot |F_N|$$

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha = \mu_{R,H} \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

$$\Rightarrow \mu_{R,H} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$



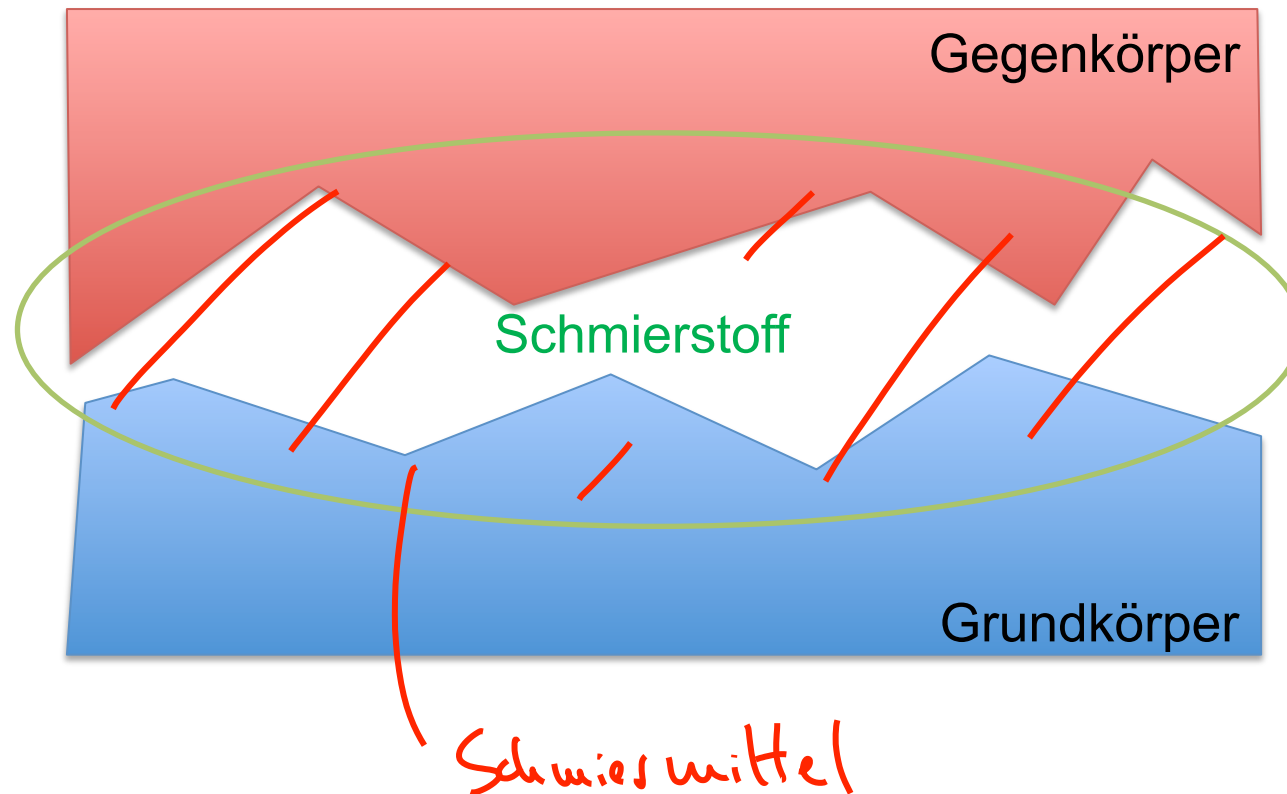
<https://de.wikipedia.org/wiki/Hangabtriebskraft>

Experiment: Reibung auf schiefer Ebene

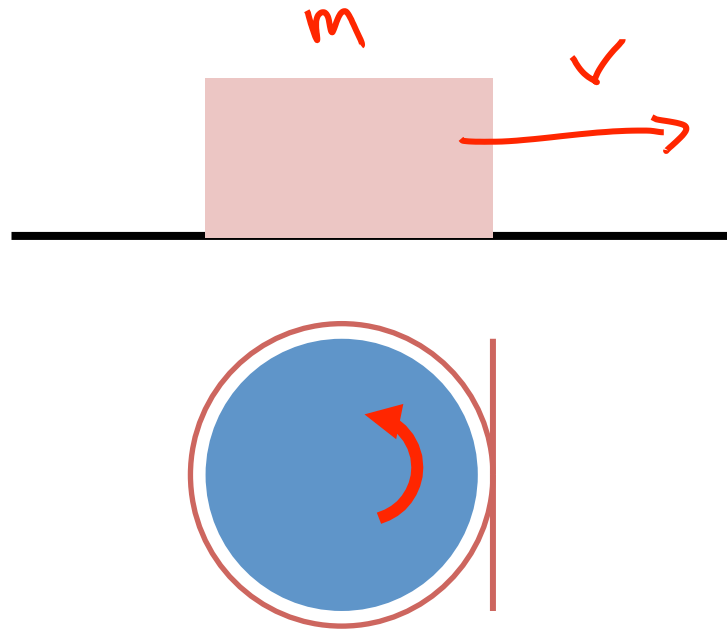
Film: Portland drivers in the snow

(<https://www.youtube.com/watch?v=aAidrS144r0>)

# Reduzierung von Reibung: Schmierer



# Reibung zwischen Festkörpern: Geschwindigkeit



Mit zunehmender Geschwindigkeit:

A) Nimmt die Reibung zu.

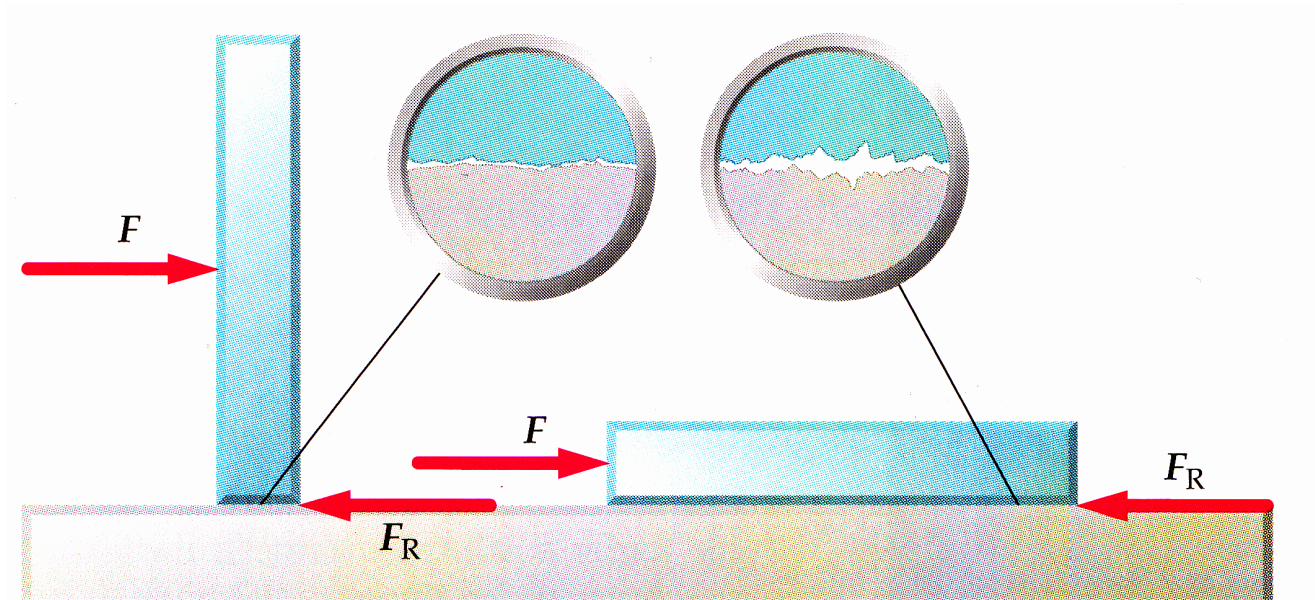
B) Nimmt die Reibung ab.

C) Bleibt die Reibung gleich. ✓

$F_{\text{Reibung}}$  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

$$|F_{R,H}| \leq \mu_{R,H} |F_N| \quad |F_{R,G}| = \mu_{R,G} \cdot |F_N| \quad |F_{R,R}| = \mu_{R,R} \cdot |F_N|$$

z.B. Stahl auf Stahl.

$$\mu_{R,H} = 0,7 \quad > \quad \mu_{R,G} = 0,6 \quad \gg \quad \mu_{R,R} = 0,001$$

Haftreibung

Gleitreibung

Rollreibung



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



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



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

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



[https://de.wikipedia.org/wiki/Sebastian\\_Vettel](https://de.wikipedia.org/wiki/Sebastian_Vettel)

- Gewicht, träge Masse
- Mechanische Stabilität
- Wärme, Abrieb



[https://de.wikipedia.org/wiki/Jan\\_Ulrich](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

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



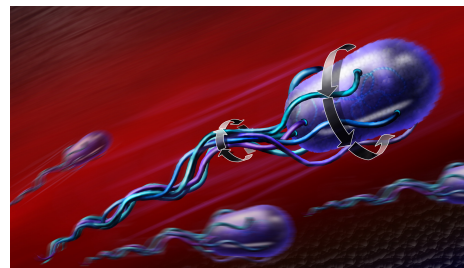
[https://de.wikipedia.org/wiki/George\\_Gabriel\\_Stokes](https://de.wikipedia.org/wiki/George_Gabriel_Stokes)

Sir George Gabriel  
Stokes  
(1819-1903)

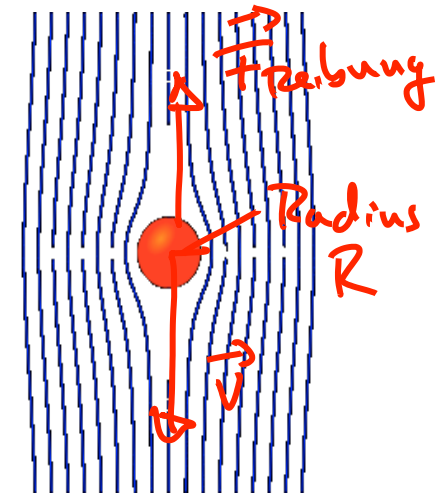
$\eta$  dynamische Viskosität

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

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



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



[http://www.thefullwiki.org/Sediment\\_transport](http://www.thefullwiki.org/Sediment_transport)



# Newton-Reibung für turbulente Strömung („Gasreibung“)

## Turbulente Reibung = Newton Reibung

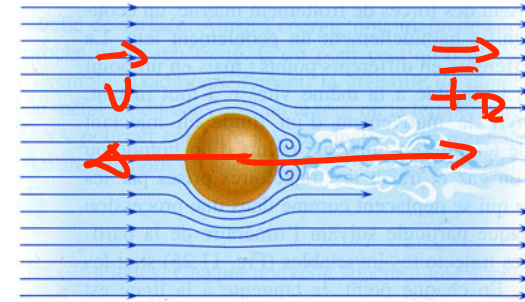
- Große Körper
- Große Geschwindigkeiten
- Fluid/Gas mit geringer Dichte

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

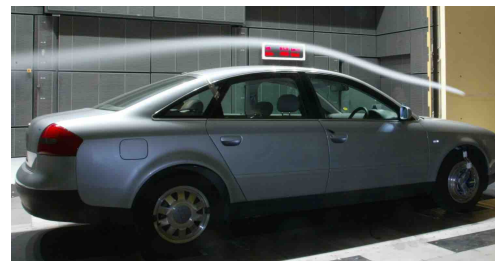
- Dichte des strömenden Fluids  $\rho$
- Referenzfläche  $A$
- Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und
- Strömungswiderstandskoeffizienten  $C_W$ .

## 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  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Strömungsgeschwindigkeit  $v$  [m/s]
- Charakteristische Länge des Objektes  $d$  [m]
- Dynamische Viskosität  $\eta$  [Pa·s] = [N·s/m<sup>2</sup>]
- Kinematische Viskosität  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]



[https://de.wikipedia.org/wiki/Osborne\\_Reynolds](https://de.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds)

Osborne Reynolds  
(1842-1912)

$$Re \leq 1$$

⇒ Stokes Reibung

$$\Rightarrow F_R \sim v$$

$$Re \gg 1$$

⇒ Newton-Reibung

$$\Rightarrow F_R \sim v^2$$

Experiment: laminare & turbulente Strömung

# Typische Reynoldszahlen in Wasser

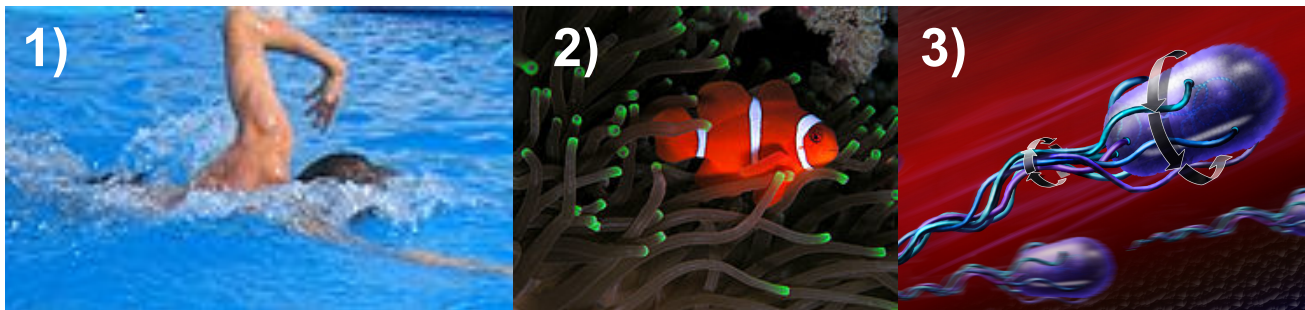
Wir betrachten drei Schwimmer in Wasser:

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:  $\rho \sim 1000 \text{ kg/m}^3$

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

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

$d \sim 1 \text{ m}$

$d \sim 1 \text{ cm}$

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

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

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

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

$Re \sim 10^6$

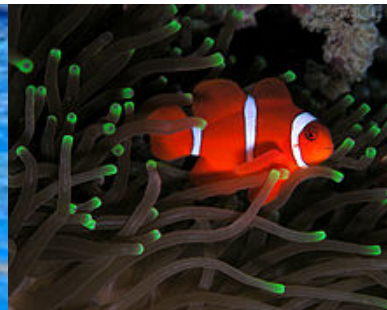
$Re \sim 10^2$

$Re \sim 10^{-5}$

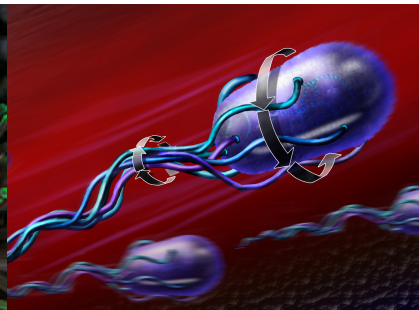


<https://de.wikipedia.org/wiki/Rettungsschwimmen>

23.11.20



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



Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

Prof. Dr. Jan Lipfert

24

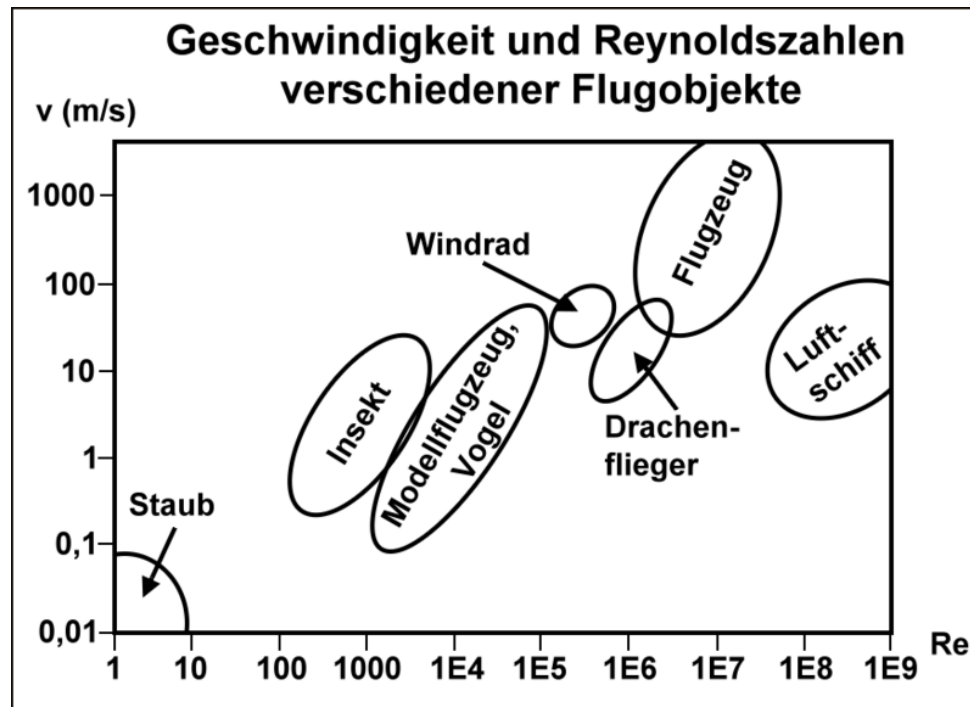
# Typische Reynoldszahlen in Luft

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

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  $\rho$
- Referenzfläche  $A$
- Strömungsgeschwindigkeit  $v$  und
- Strömungswiderstandskoeffizienten  $C_W$ .

$$v_{\text{Highway}} = 70 \frac{\text{miles}}{\text{h}} = 112 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$v_{\text{Autobahn}} = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\frac{F_{D, \text{Autobahn}}}{F_{D, \text{Highway}}} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_W \cdot v_{\text{Autobahn}}^2}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_W \cdot v_{\text{Highway}}^2} = \left( \frac{150}{112} \right)^2 \approx 1,8$$



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



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

# Zusammenfassung: Festkörperreibung

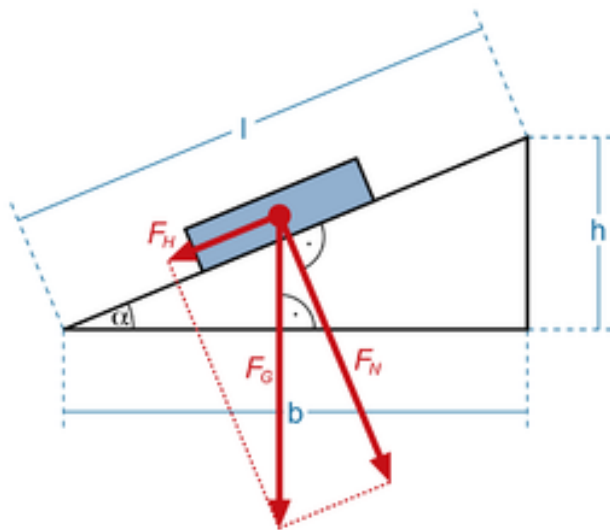
## Schiefe Ebene:

- Hangabtriebskraft

$$F_H = mg \sin \alpha$$

- Normalkraft

$$F_N = mg \cos \alpha$$



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

## Festkörperreibung:

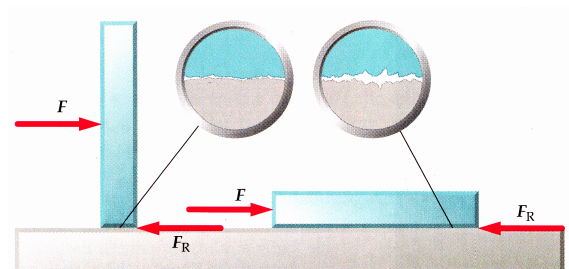
- Haftreibung

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

- Gleitreibung

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

**Die Festkörperreibung ist unabhängig von  $v$  und  $A$ !**





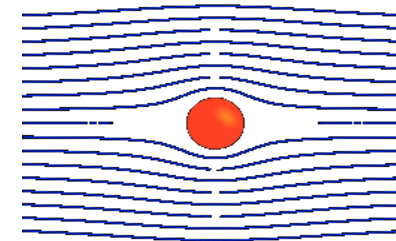
# Zusammenfassung: Fluidreibung

## 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](http://www.thefullwiki.org/Sediment_transport)

- $\eta$  dynamische Viskosität
- $R$  Kugelradius bzw. effektiver Radius
- $v$  Geschwindigkeit

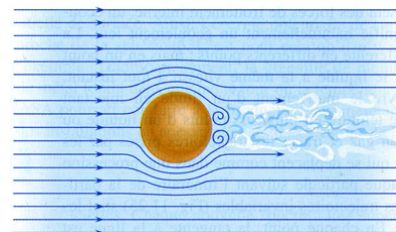
## Newton-Reibung („Gasreibung“)

Gilt für:

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

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

- $\rho$  Dichte des Fluids
- $A$  Referenzfläche
- $C_w$  Strömungswiderstandskoeffizient
- $v$  Geschwindigkeit



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