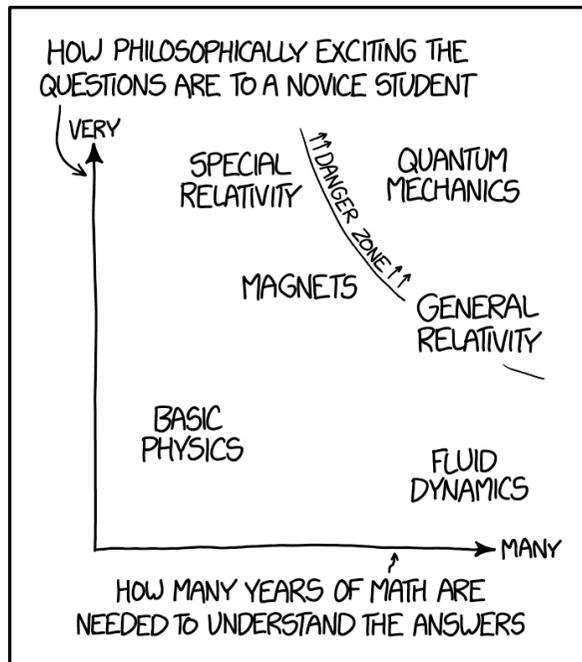


# „Alles fließt“

## Physik 1 für Chemiker und Biologen 8. Vorlesung



WHY SO MANY PEOPLE HAVE WEIRD  
IDEAS ABOUT QUANTUM MECHANICS

<https://xkcd.com/1861/>

Heute: Fluide

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

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)

# Massenpunkte, starre Körper, reale Körper

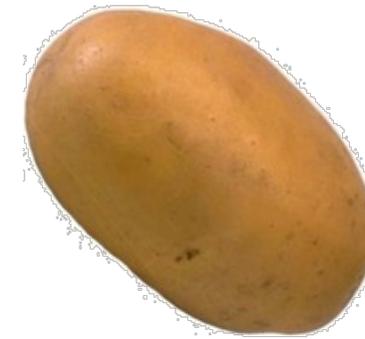
**Bisher:**



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



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



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

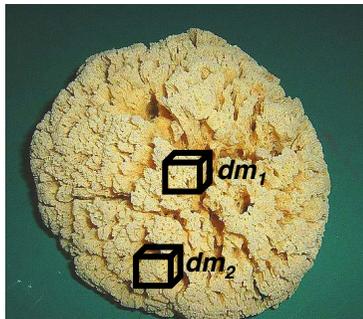
**1) Massenpunkte  
(nur Translation)**

**2) Starre Körper**

**(Translation und Rotation)**

Ändern Form unter äußeren Einflüssen  
(Kräfte, Drehmomente) nicht

**3) Deformierbare Körper  
(insbesondere Fluide)**



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

Mögliches Vorgehen:

- Einteilung im Massenelemente
- Kräfte zwischen den  $dm$
- Integration

**Besser: Neue Größen**

# Deformierbare Körper

Verformbarkeit

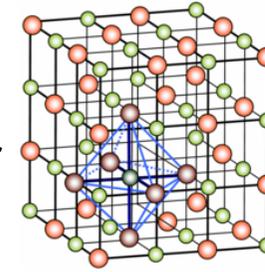
Ordnung



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

## Kristalliner Festkörper

Inkompressibel und nicht verformbar  
d.h. sie behalten ihre Form und ihr  
Volumen - in gewissen Grenzen

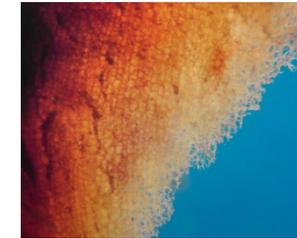


<https://de.wikipedia.org/wiki/Kristallstruktur>



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

## Amorpher Festkörper



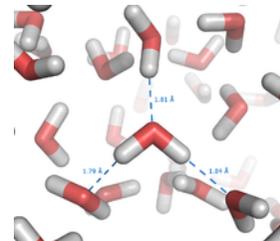
<https://de.wikipedia.org/wiki/Kork>



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

## Flüssigkeiten

Inkompressibel,  
aber verformbar



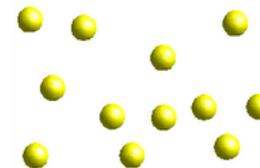
<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasser>



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

## Gase

Kompressibel  
und verformbar

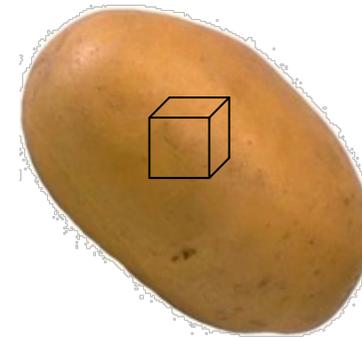
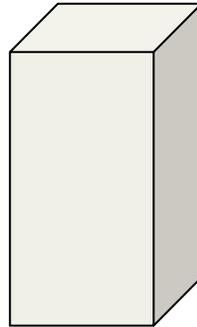


<https://de.wikipedia.org/wiki/Gas>

## Typische Werte

	Dichte
Weltall	
Luft	
Wasser	
Aluminium	
Quecksilber	
Neutronenstern	

## Dichte



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

**Einheiten:**

# Druck



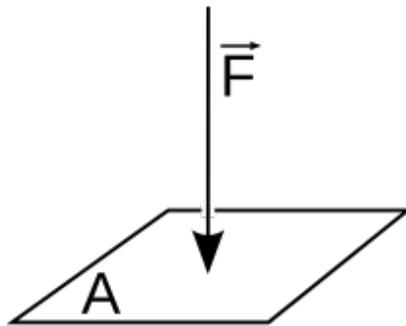
[https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure\\_measurement](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_measurement)



[https://als.wikipedia.org/wiki/Blaise\\_Pascal](https://als.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal)

**Blaise Pascal**  
(1623 - 1662)

**SI Einheit:**



**Gebräuchliche (nicht SI) Druck-Einheiten:**

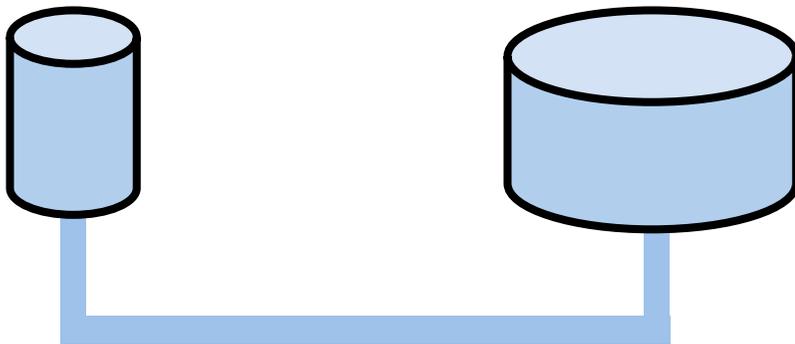
bar	atm	psi (pounds per square inch)	Torr (mm Hg)
$10^5 \text{ Pa}$	$1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ $\approx 1013 \text{ mbar}$	$6894,76 \text{ Pa}$	$133,322 \text{ Pa}$

# Hydrostatischer Druck

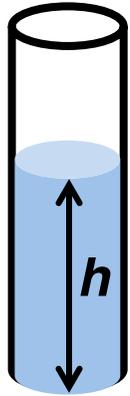
Experiment:  
Hydraulische Presse



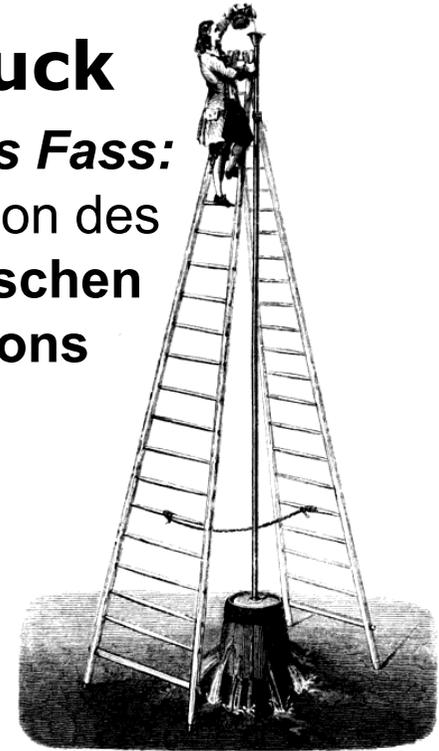
## Hydraulische Presse



# Hydrostatischer Druck & Schweredruck



*Pascalsches Fass:*  
Demonstration des  
hydrostatischen  
Paradoxons



[https://en.wikipedia.org/wiki/Pascal%27s\\_barrel#/media/File:Pascal%27s\\_Barrel.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Pascal%27s_barrel#/media/File:Pascal%27s_Barrel.png)

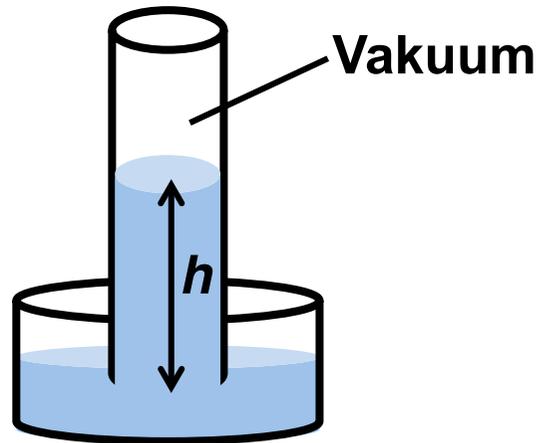
Experiment:  
Hydrostatischer Druck

„Hydrostatisches Paradoxon“

Experiment:  
Kommunizierende Röhren

# Schweredruck & Atmosphärendruck

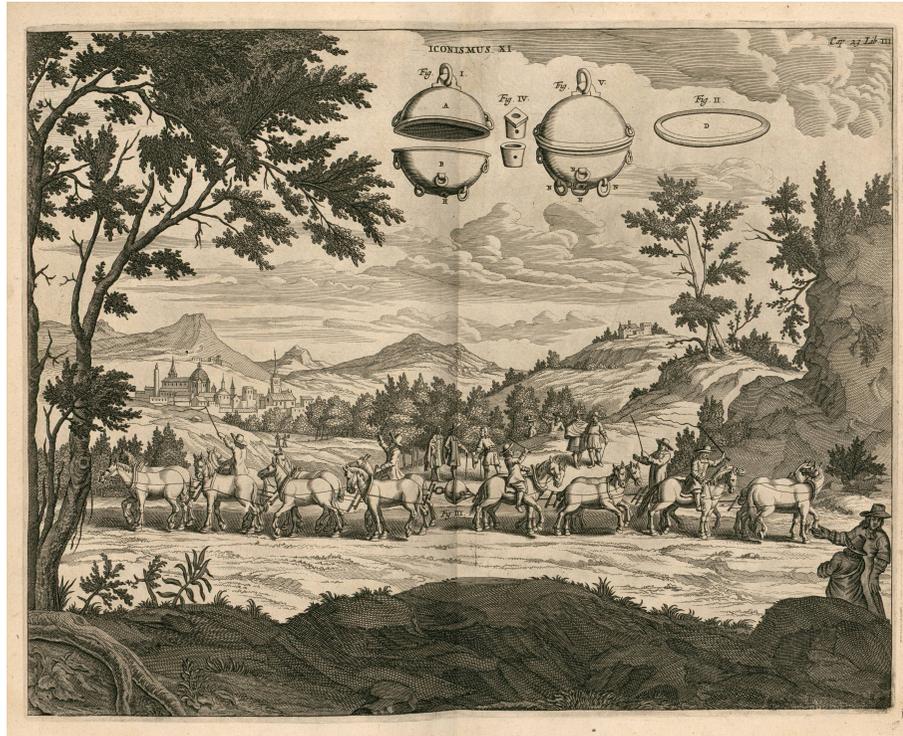
## Torricelli-Barometer



Evangelista  
Torricelli  
(1608-1647)

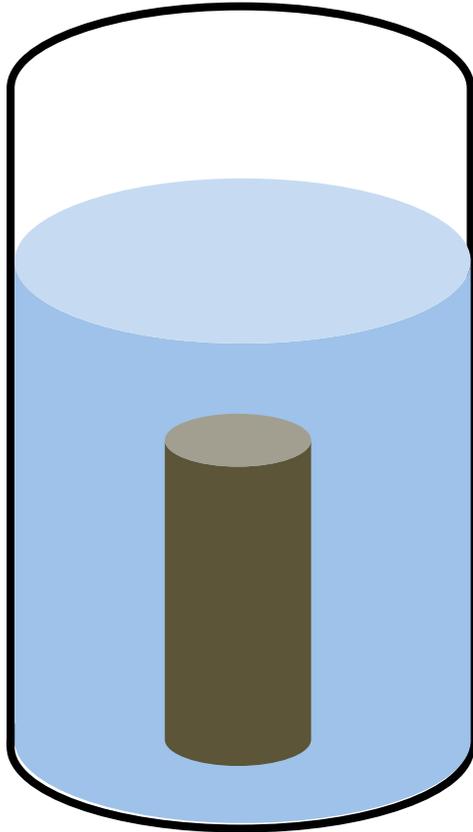
# „Magdeburger Halbkugeln“

Demonstration des Luftdrucks durch Otto von Guericke (1656)



<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Magdeburg.jpg>

# Auftrieb



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

Archimedes  
von Syrakus  
(287-212 v. Chr.)

Auftriebskraft = Gewichtskraft des verdrängten Fluids  
(„Archimedisches Prinzip“)

# Auftrieb in Luft

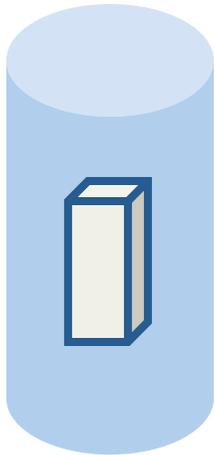


<http://www.ld-didactic.de/phk/a.asp?a=37910&L=2>

**Ein Styroporball und ein Metallgewicht hängen an einer Balkenwaage (in Luft) und sind im Gleichgewicht. Jetzt wird die Luft aus dem Gefäß um die Waage gepumpt. Was passiert?**

- A) Der Styroporball sinkt nach unten.
- B) Das Metallgewicht sinkt nach unten.
- C) Die Waage bleibt ausbalanciert.

# Schwimmbedingung



<http://wir-retten-unsere-erde.de/t/Folgen-des-Klimawandels.htm>

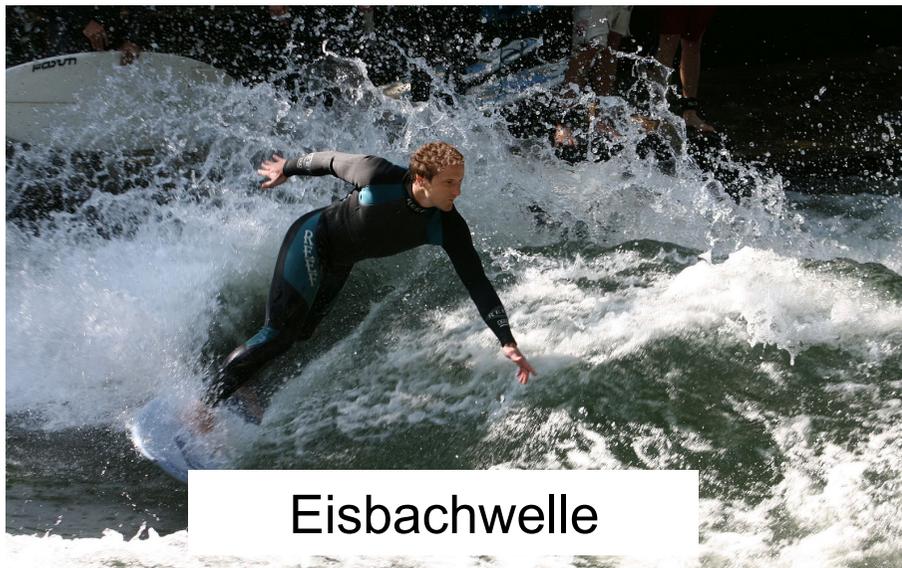
Bedingung	Verhalten

Experiment: SF6 Schiff

# Bewegte Flüssigkeiten: Strömungen



Isarhochwasser, August 2020



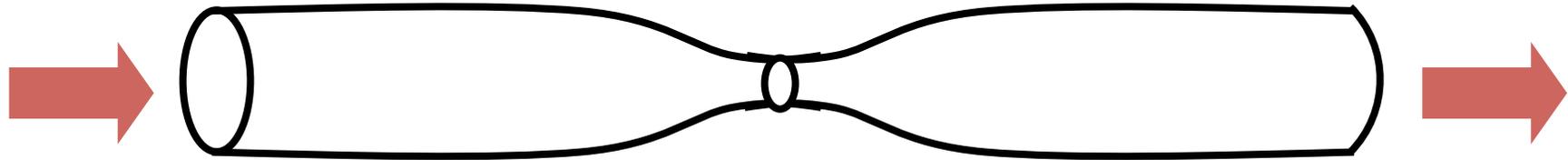
Eisbachwelle

[https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Eisbach\\_die\\_Welle\\_Surfer.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Eisbach_die_Welle_Surfer.JPG)

Zunächst: **Ideale Flüssigkeiten**

- keine Viskosität (reibungsfrei)
- nicht kompressibel (Volumen konstant)

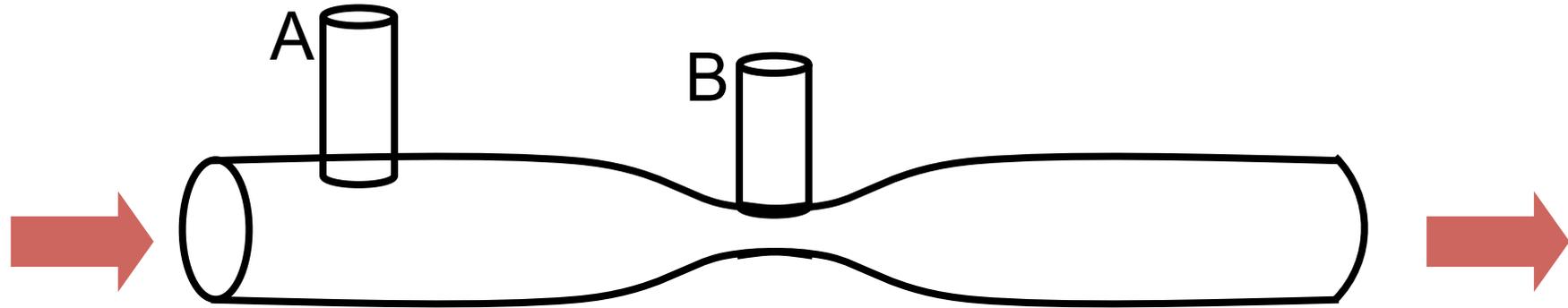
# Die Kontinuitätsgleichung



Volumenstrom

Die Kontinuitätsgleichung gilt für alle  
inkompressiblen Strömungen

# Die Experiment: Venturirohr

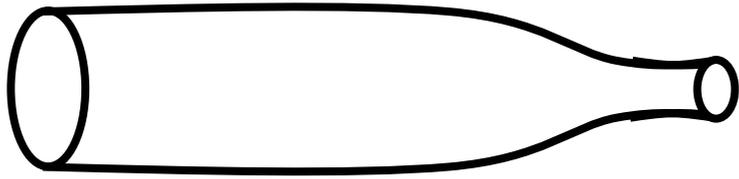


**Wenn das Fluid durch das untere Rohr strömt, in welchem Steigrohr steht die Flüssigkeit dann höher?**

- A) In Rohr A.
- B) In Rohr B.
- C) Das Fluid steht in A und B gleich hoch.

Experiment: Venturirohr

# Die Bernoulli-Gleichung



Der statische Druck  $p$  nimmt bei Zunahme der Fließgeschwindigkeit ab!

# Terme in der Bernoulli-Gleichung

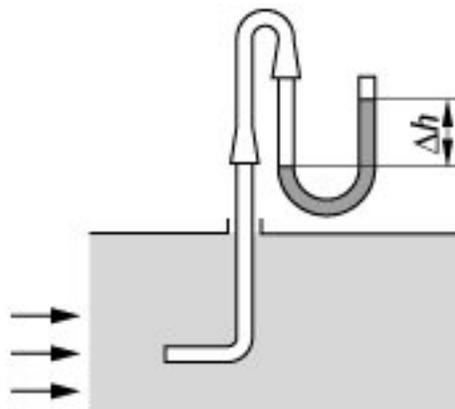
Für die Strömung eines inkompressiblen und reibungsfreien Fluides ("ideales Fluid") gilt:

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



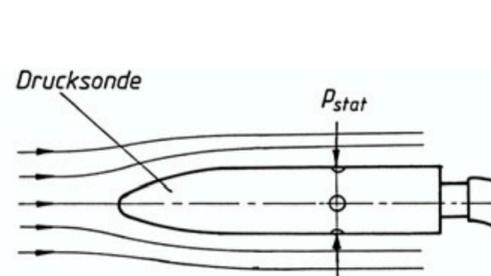
[https://de.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Bernoulli](https://de.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli)  
**Daniel Bernoulli**  
 (1700-1782)

Pitot-Rohr misst den **Gesamtdruck**

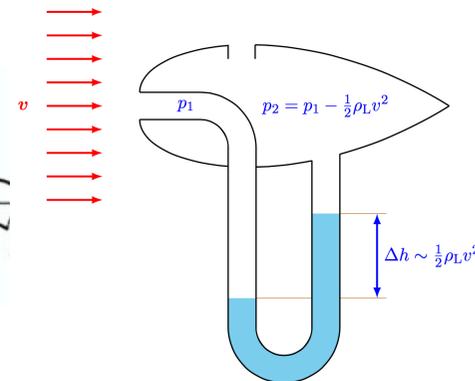


<http://www.spektrum.de/lexika/images/physik/fff10498.jpg>

Seitlich offene Sonde misst den **statischen Druck**

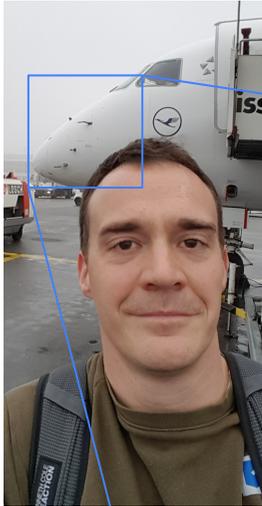


Prandtlrohr misst den **Staudruck**

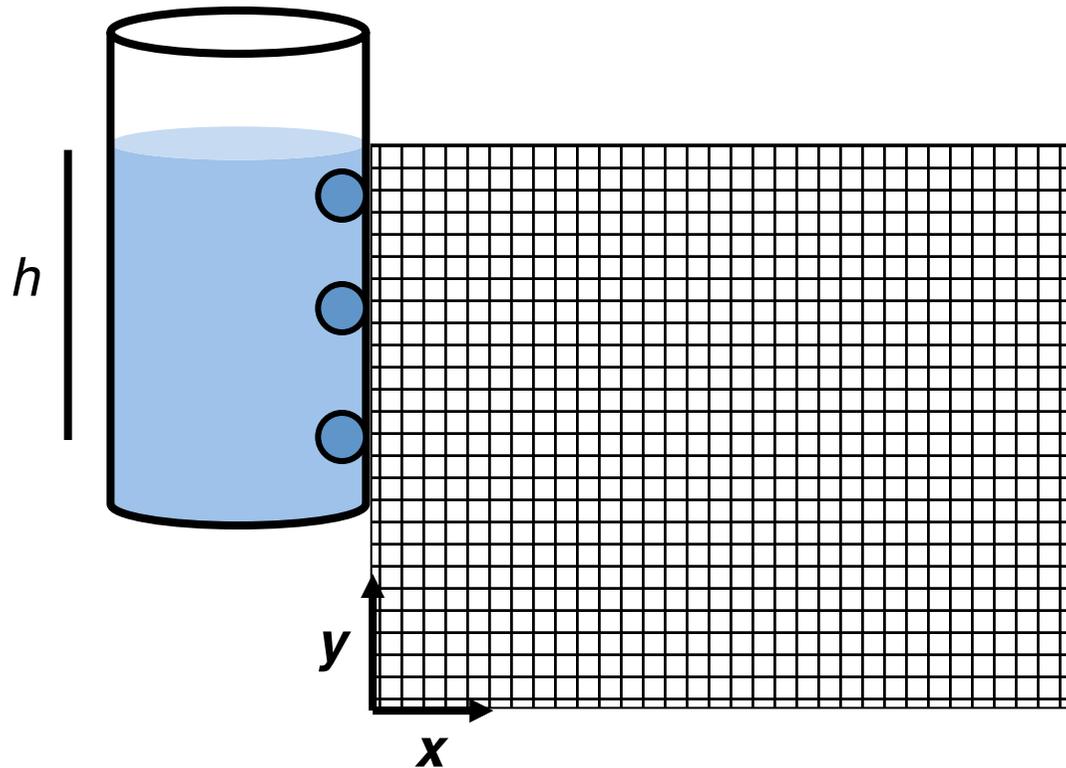


# Pitot-Rohr und die Geschwindigkeit von Flugzeugen

$$p_{\text{Pitot}} = p_{\text{statisch}} + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$



# Hydrostatischer Druck & Ausströmen



Experiment: Ausströmen

Bewegung in  $x$ -Richtung

Bewegung in  $y$ -Richtung

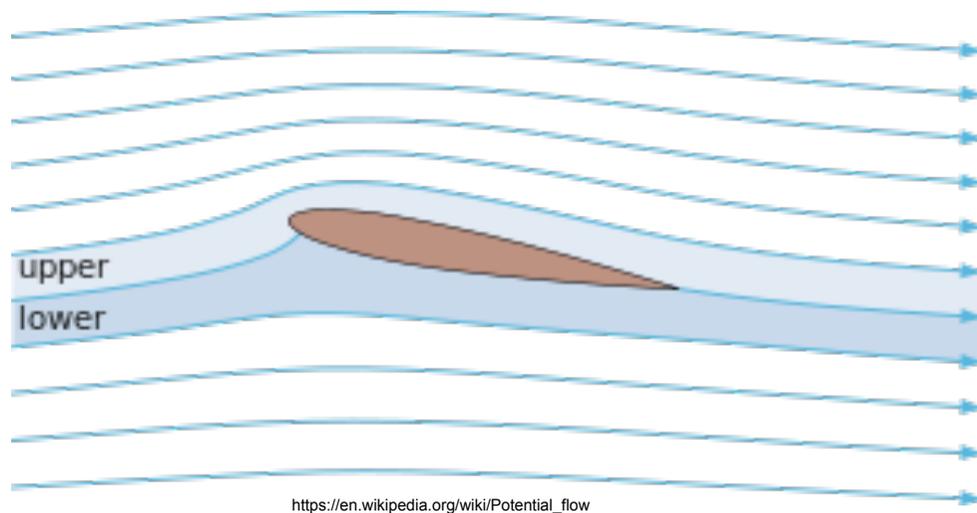
# Bernoulligleichung und Gase

Die Bernoulli-Gleichung gilt qualitativ auch für Gase!

Experiment: Luftstrom zwischen zwei Papieren

Experiment: Hydrodynamisches Paradox

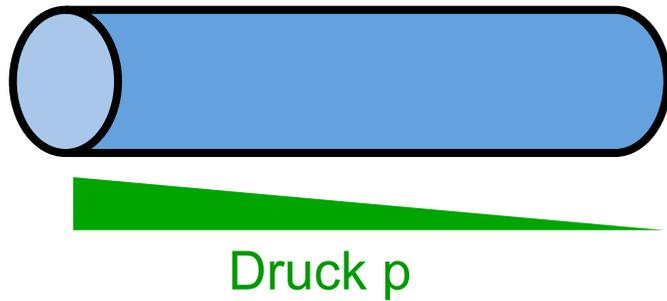
Anwendung: Dynamischer Auftrieb von Flugzeugen



Experimente: Ball mit Gebläse

Experimente: Hausdach im Sturm

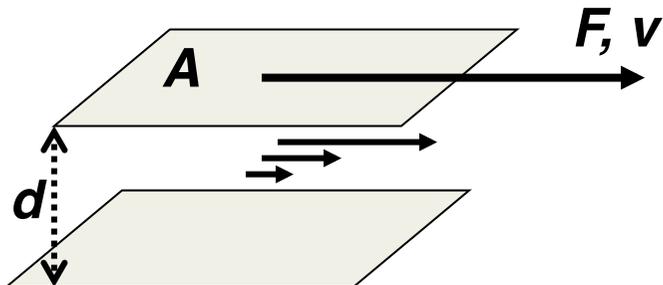
# Viskosität



Druckabfall entlang des Rohres für viskoses Fluid!

Experiment: Druckabfall entlang eines Rohres

Definition der Viskosität  $\eta$



# Stokes-Reibung („Flüssigkeitsreibung“)

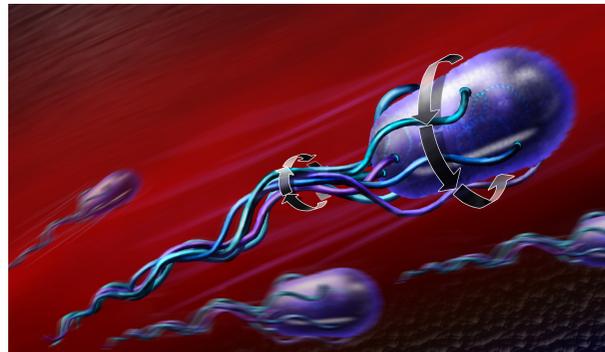


[https://de.wikipedia.org/wiki/George\\_Gabriel\\_Stokes](https://de.wikipedia.org/wiki/George_Gabriel_Stokes)

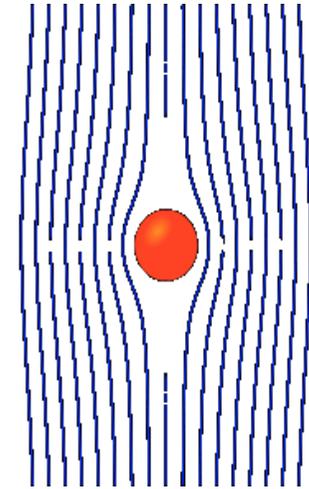
Sir George Gabriel  
Stokes  
(1819-1903)

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

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

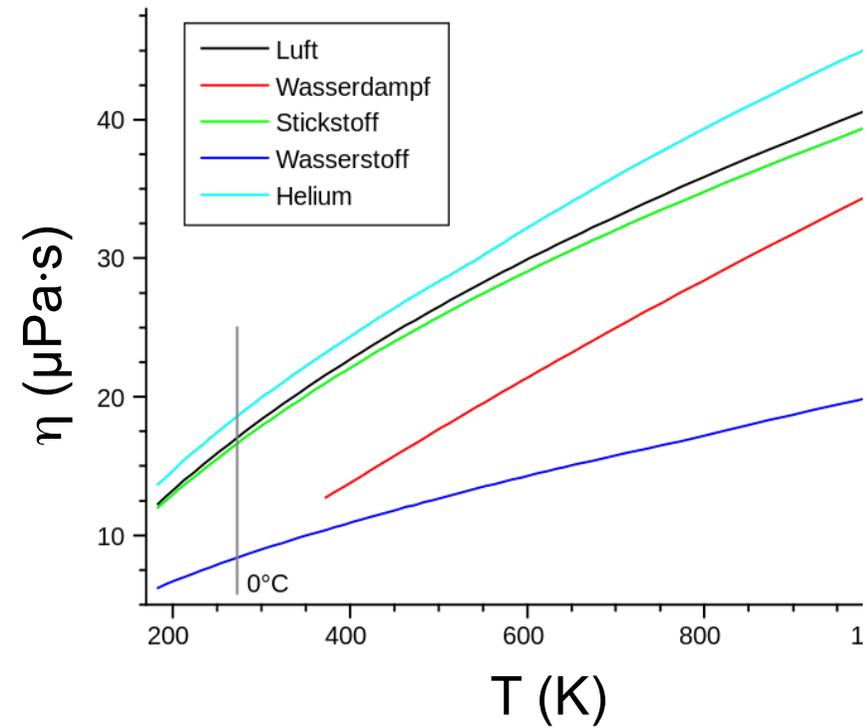
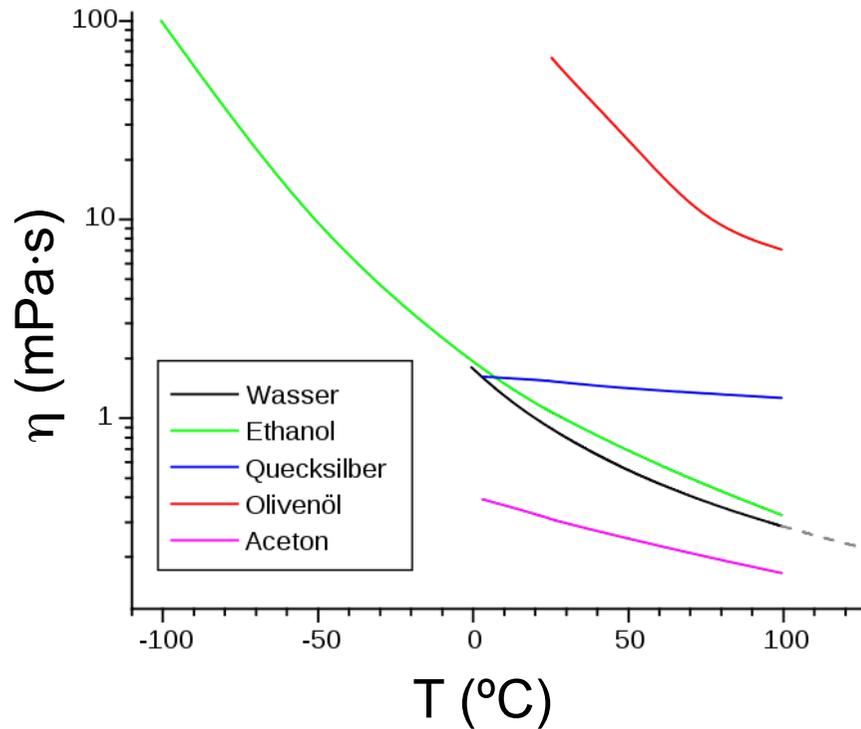


Stokes Reibung ist wichtig in vielen  
biologischen Prozessen auf  $< \mu\text{m}$  Skala



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

# Viskosität von Flüssigkeiten und Gasen



$\eta$  von Flüssigkeiten nimmt mit zunehmender Temperatur ab!

$\eta$  von Gasen nimmt mit zunehmender Temperatur zu!

# Anwendung der Stokes-Reibung: Sedimentationsgeschwindigkeit

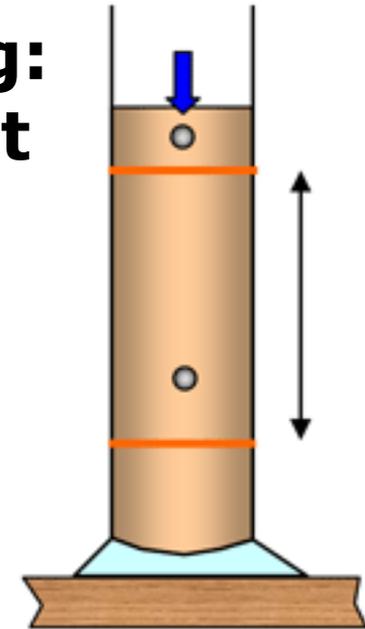
Wir lassen Kugeln aus dem gleichen Material, aber unterschiedlicher Größe (Radius) in einem viskosen Fluid fallen / sinken.

In guter Näherung legen die Kugeln in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurück, d.h.  $v = \text{const.}$  und  $a = 0$  (im Gegensatz zum freien Fall!)

Experiment: Kugel in viskosem Fluid

Größere Kugeln sinken schneller!

Durchmesser	Zeit
2 mm	22,43 s
3 mm	8,84 s
4 mm	5,24 s
5 mm	3,43 s



(resourcefulphysics.org)

[http://tap.iop.org/mechanics/drag\\_forces/page\\_39518.html](http://tap.iop.org/mechanics/drag_forces/page_39518.html)

# Anwendung der Stokes-Reibung: Sedimentationsgeschwindigkeit

Stokesreibung:

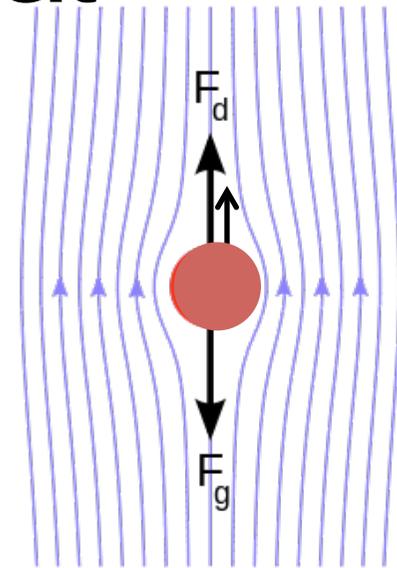
$$|F_R| = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot v$$

Schwerkraft:

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

Auftriebskraft:

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

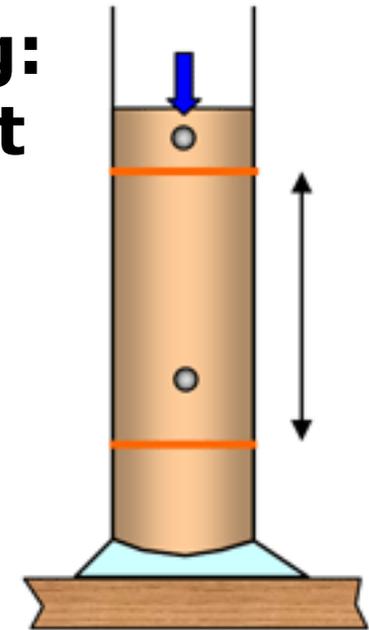
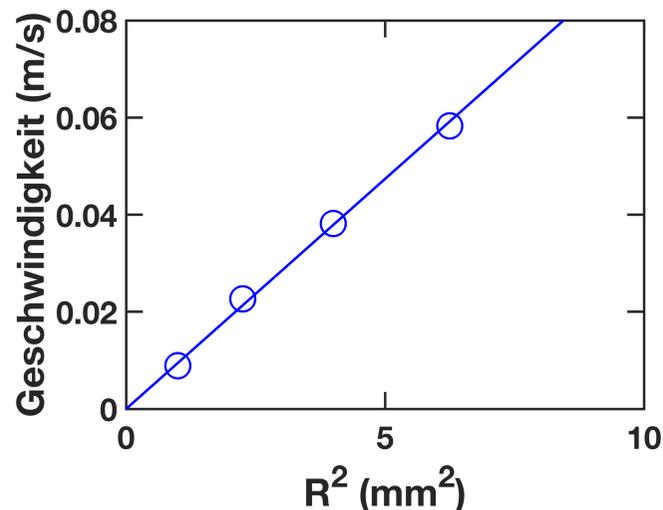
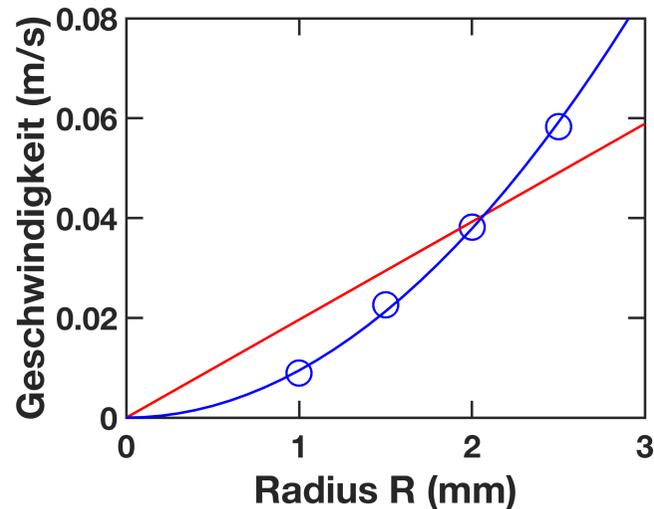


[https://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche\\_Gleichung](https://de.wikipedia.org/wiki/Stokessche_Gleichung)

# Anwendung der Stokes-Reibung: Sedimentationsgeschwindigkeit

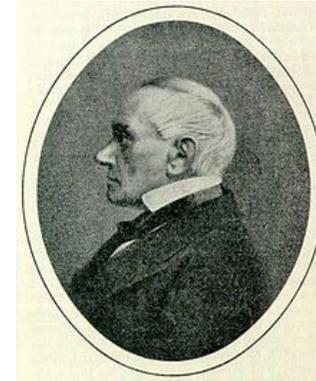
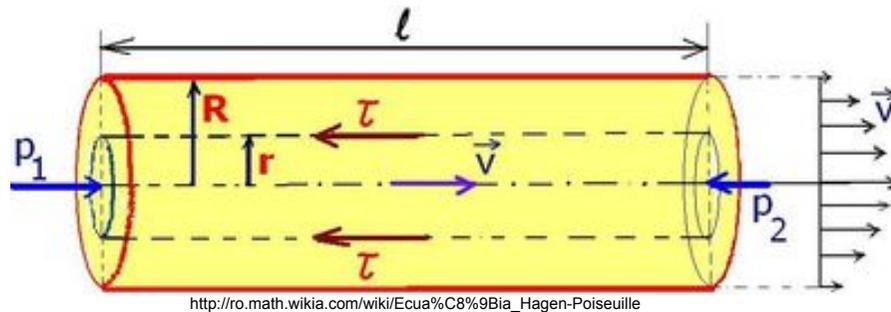
Wir lassen Kugeln aus dem gleichen Material, aber unterschiedlicher Größe (Radius) in einem viskosen Fluid fallen / sinken.

Durchmesser	Zeit
2 mm	22,43 s
3 mm	8,84 s
4 mm	5,24 s
5 mm	3,43 s



(resourcefulphysics.org)  
[http://tap.iop.org/mechanics/drag\\_forces/page\\_39518.html](http://tap.iop.org/mechanics/drag_forces/page_39518.html)

# Strömung durch ein Rohr (Hagen-Poiseuille)



[https://de.wikipedia.org/wiki/Gotthilf\\_Hagen](https://de.wikipedia.org/wiki/Gotthilf_Hagen)

Gotthilf Hagen  
(1797-1884)



[https://de.wikipedia.org/wiki/Jean\\_L%C3%A9onard\\_Marie\\_Poiseuille](https://de.wikipedia.org/wiki/Jean_L%C3%A9onard_Marie_Poiseuille)

Jean Poiseuille  
(1797-1869)

Experiment: Parabelförmiges Strömungsprofil

Hier nur das Ergebnis für die Flussrate:

# Erinnerung: laminare und turbulente Strömungen

Reibung: Stokes-Reibung für  $Re < 1$

Newton-Reibung für  $Re \gg 1$

$$F_R \propto v$$

$$F_R \propto v^2$$

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]

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

$$d \sim 1 \text{ cm}$$

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

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

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

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

$$Re \sim 10^6$$

$$Re \sim 10^2$$

$$Re \sim 10^{-5}$$

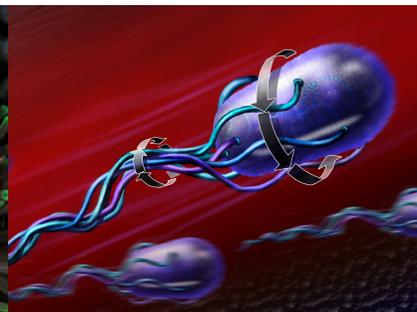


<https://de.wikipedia.org/wiki/Rettungsschwimmen>

11.01.21

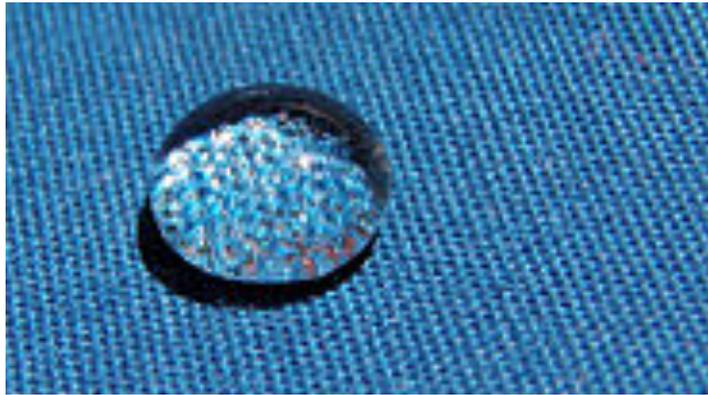


<https://de.wikipedia.org/wiki/Anemonenfische>



Nicolle Rager Fuller, National Science Foundation

# Oberflächenspannung



[https://de.wikipedia.org/wiki/Kohäsion\\_\(Chemie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Kohäsion_(Chemie))



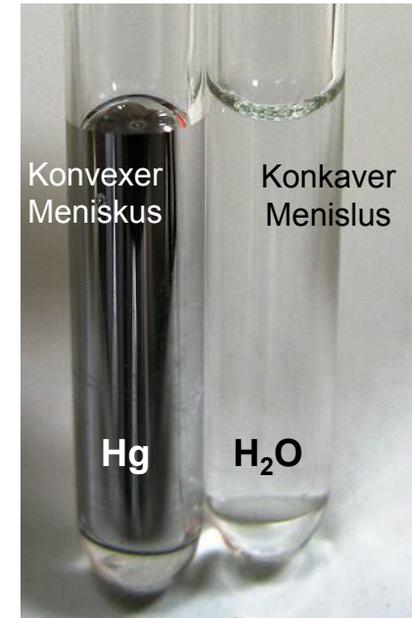
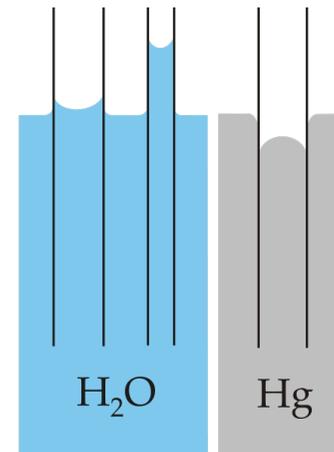
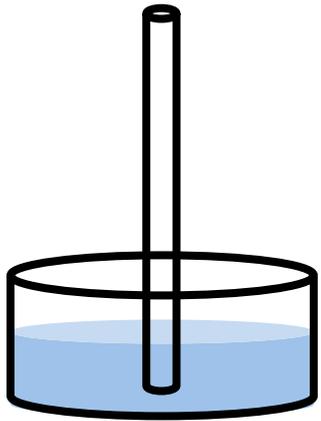
[https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Lotus_effect)



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

Auf kleinen Längenskalen herrschen (kurzreichweitige)  
Anziehungskräfte zwischen den Fluidmolekülen

# Kapillarkraft



[https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary\\_action](https://en.wikipedia.org/wiki/Capillary_action)

[http://www.diffen.com/difference/Adhesion\\_vs\\_Cohesion](http://www.diffen.com/difference/Adhesion_vs_Cohesion)

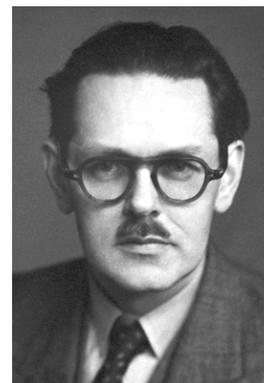
# Anwendungen der Kapillarkraft



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



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



[https://de.wikipedia.org/wiki/Archer\\_J.\\_P.\\_Martin](https://de.wikipedia.org/wiki/Archer_J._P._Martin)

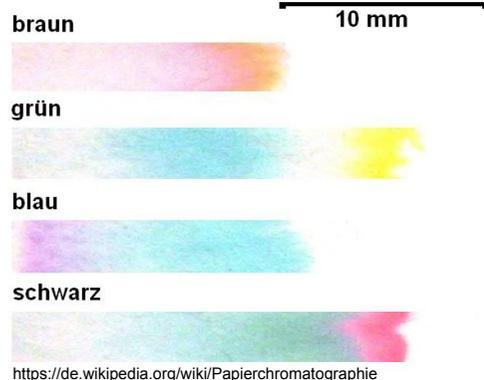
Archer Martin  
(1910-2002)



[https://de.wikipedia.org/wiki/Richard\\_L.\\_M.\\_Syngé](https://de.wikipedia.org/wiki/Richard_L._M._Syngé)

Richard Syngé  
(1914-1994)

Chemienobelpreis 1952  
für Chromatographie



**Experiment:  
Papierchromatographie**

# Zusammenfassung: Druck & Auftrieb

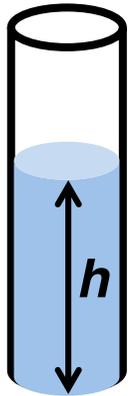
- Druck:

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

**Einheit:**

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

- Schweredruck:

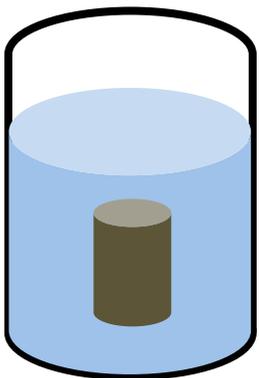


$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

**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

# Zusammenfassung: Bernoulli-Gleichung

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

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



[https://de.wikipedia.org/wiki/Daniel\\_Bernoulli](https://de.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli)

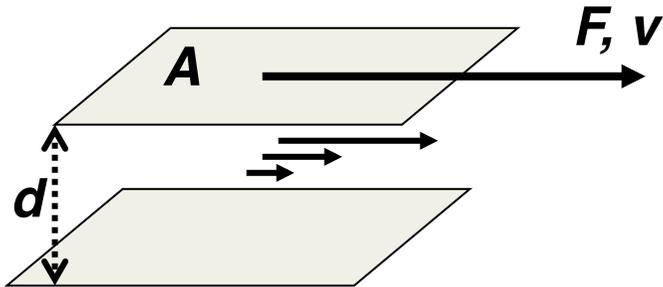
Daniel Bernoulli  
(1700-1782)

# Zusammenfassung: Viskose Reibung

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

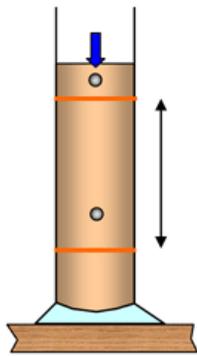
**Wichtige Fälle (gelten für hohe Viskosität, kleine Geschwindigkeiten):**

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