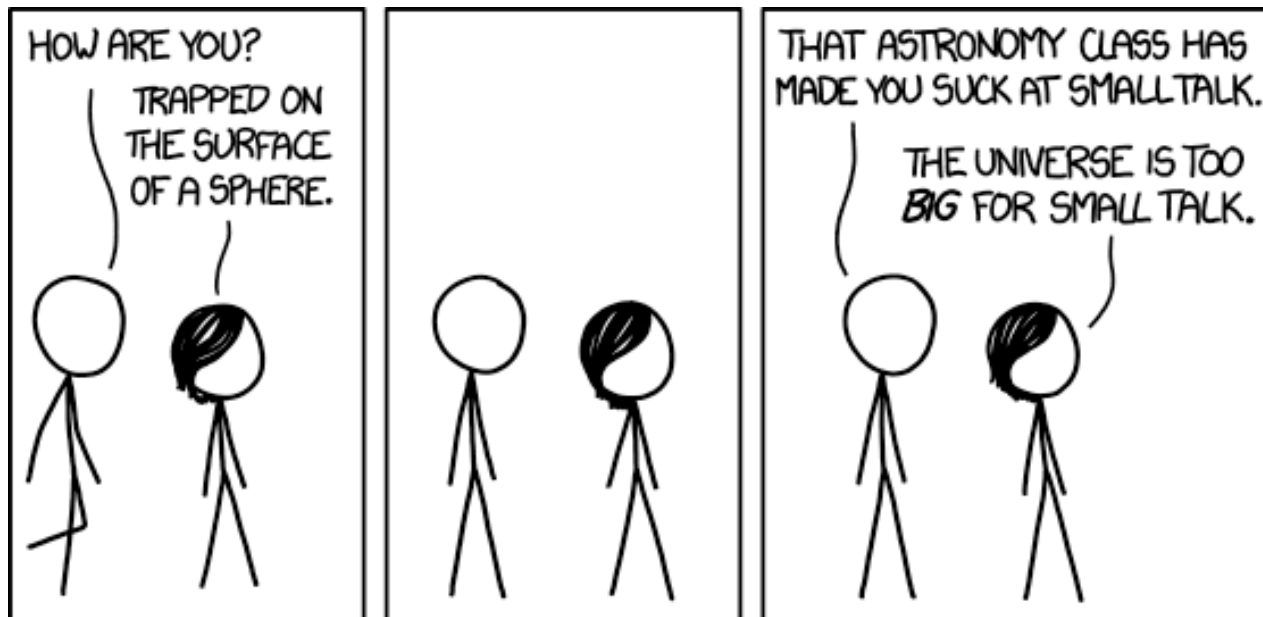


Energie

Physik 1 für Chemiker und Biologen 5. Vorlesung



<http://xkcd.com/1248/>

Heute:

- Gravitation
- Arbeit, Energie, Leistung

Prof. Dr. Ralf Jungmann

Jungmann@physik.lmu.de

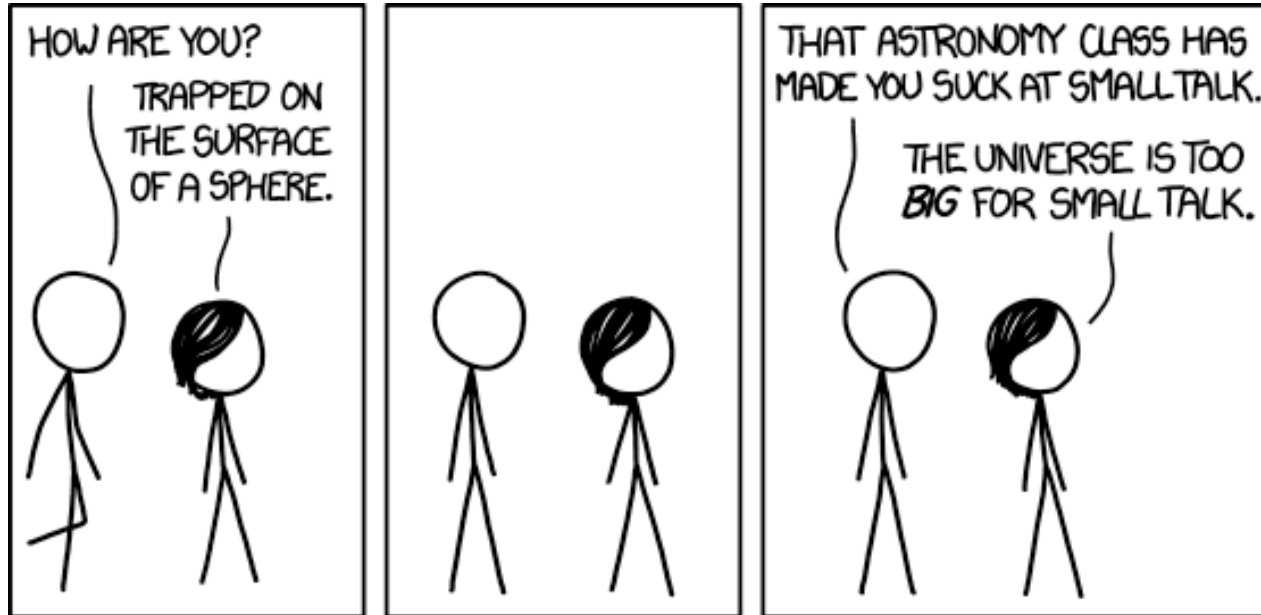
Prof. Dr. Jan Lipfert

Jan.Lipfert@lmu.de

Energie

Physik 1 für Chemiker und Biologen

5. Vorlesung



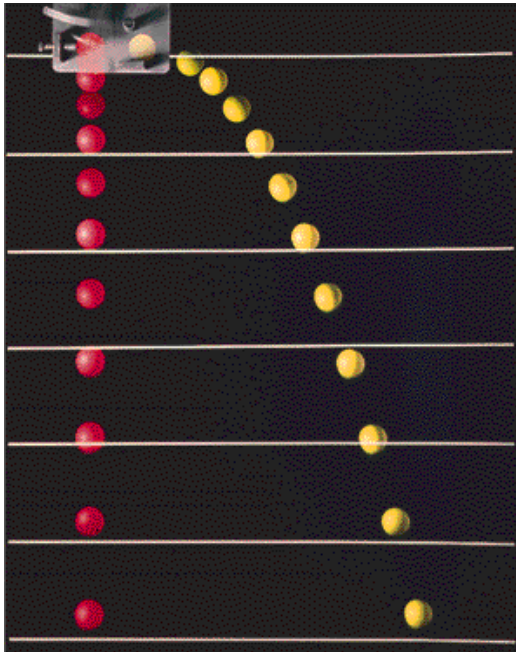
<http://xkcd.com/1248/>

Heute:

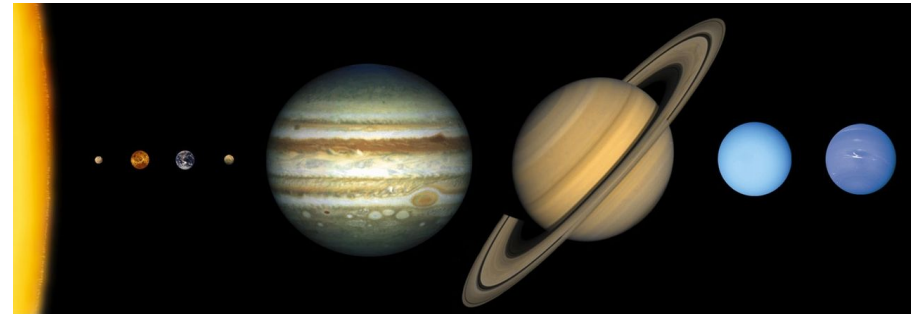
- Gravitation
- Arbeit, Energie, Leistung

Zwei Phänomene – Eine Ursache

Freier Fall
(Galileis Fallgesetze)



Planetenbewegung
(Keplers Gesetze)



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

Freier Fall und Planetenbewegungen können gleichermaßen durch Newtons Axiome + Newtons Gravitationsgesetz beschrieben werden

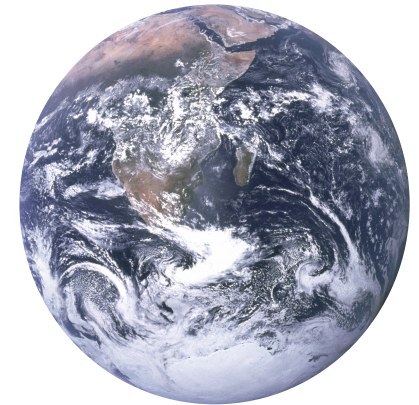
Gravitationsgesetz



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

Gravitationskonstante $G = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{kg})$

Wie hängt G mit g zusammen?



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

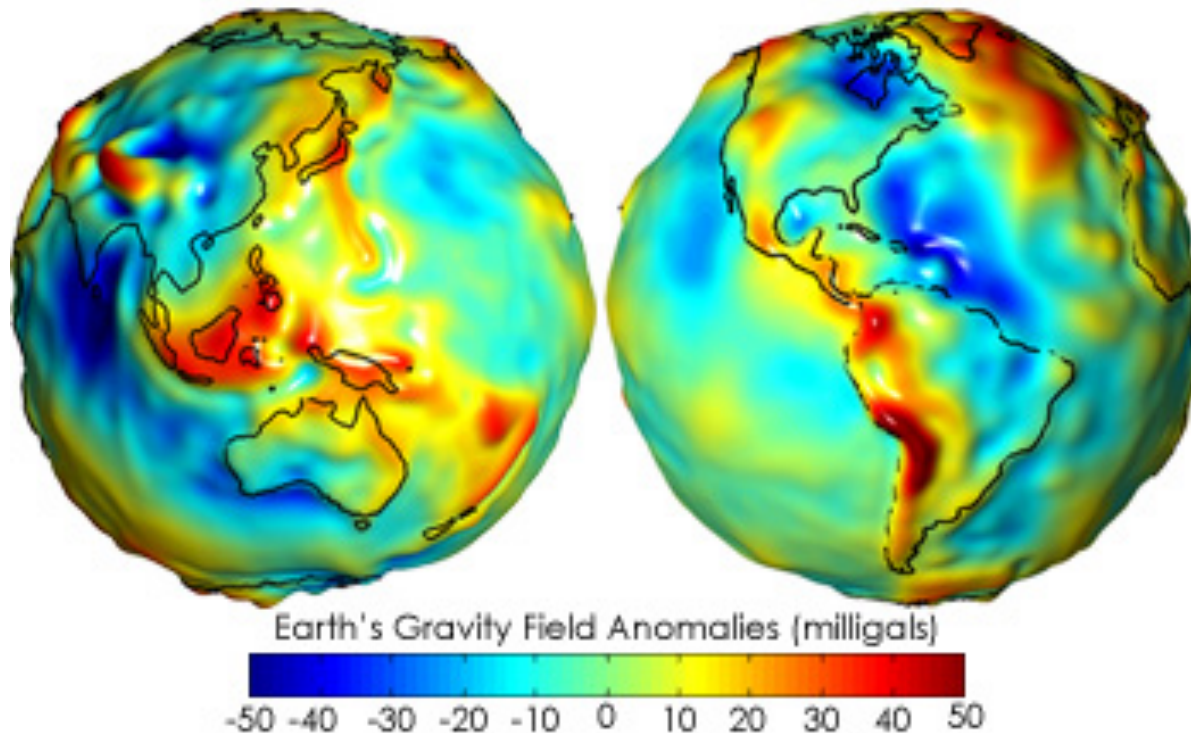
$$\vec{F}_{Mm} = -G \frac{Mm}{r^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad \vec{F}_g = m\vec{g}$$

g ist nicht überall gleich, denn die Erde

- ist keine (perfekte) Kugel
- rotiert
- ist nicht komplett homogen

Gravimetrie der Erdoberfläche

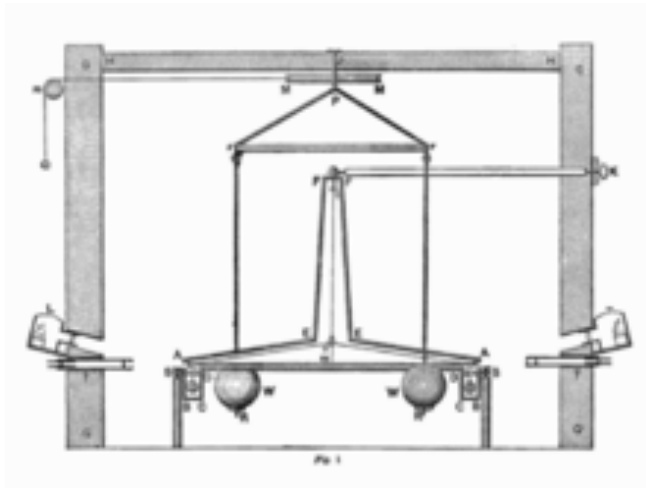
Lokale Variationen der
Schwerkraft der Erde:
GRACE Satelliten Mission
(NASA & DLR)



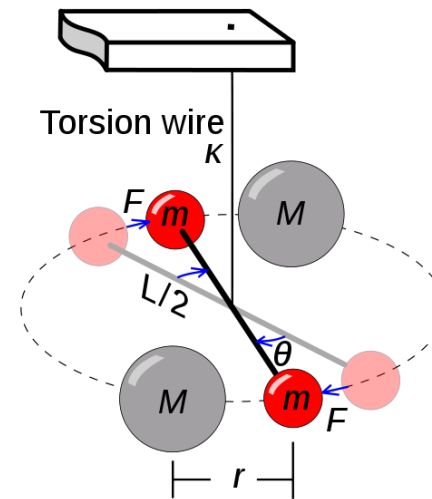
Einheit: $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 0,01 \text{ m/s}^2$ („Galileo“)
 \approx ein Promille der durchschnittlichen Erdbeschleunigung
von ca. $9,81 \text{ m/s}^2 \approx 10 \text{ m/s}^2 = 1000 \text{ Gal}$
Anwendungen: z.B. Messungen von Eismassen &
Ozeanströmungen (Klima!), Finden von Bodenschätzen
(Erze, Öl, etc.), Geologie und Geodynamik

„Die Erde wiegen“ – Wie groß ist G ?

Erste Bestimmung der Gravitationskonstante durch Henry Cavendish 1798 mittels einer **Torsionswaage**



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



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



H. Cavendish

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

Henry Cavendish
(1731-1810)

- Verdrillung von Faden erfordert Kraft F
- Kraft ist proportional zu Verdrillungswinkel θ (ähnlich Hooksches Gesetz)
- über Kalibrierung läßt sich aus θ Kraft F berechnen

Arbeit und Energie



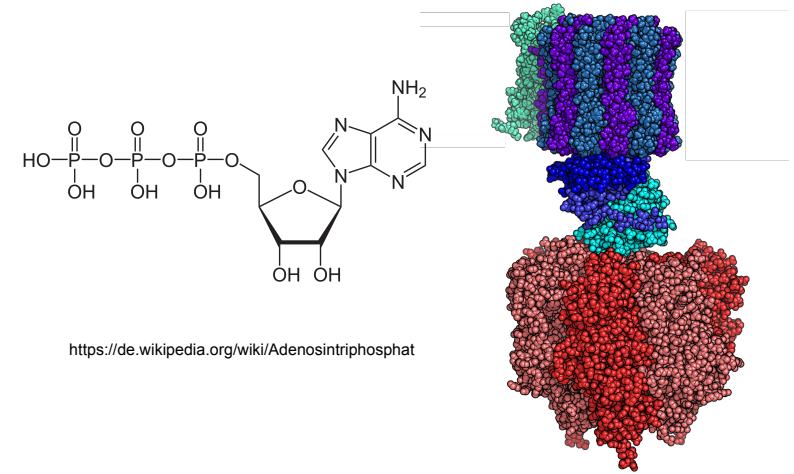
<https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage>



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



https://en.wikipedia.org/wiki/Olympic_weightlifting

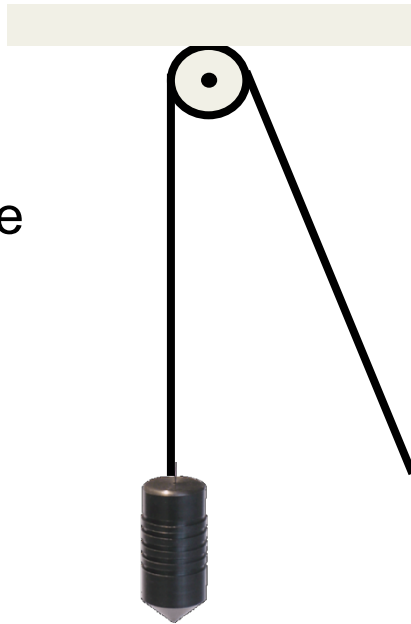


<https://de.wikipedia.org/wiki/Adenosintriophosphat>

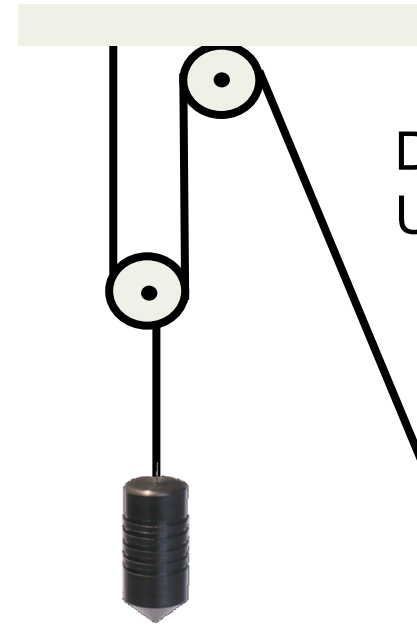
https://en.wikipedia.org/wiki/ATP_synthase

Heben einer Masse

Einfache
Umlenkrolle



Doppelte
Umlenkrolle



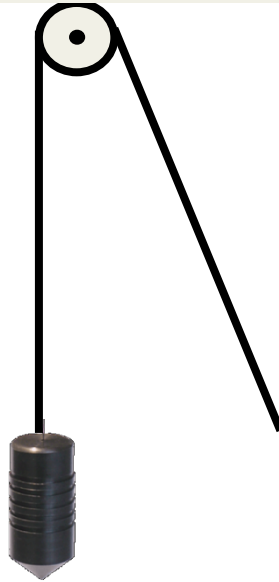
Experiment: Umlenkrolle & Flaschenzug

Zum Heben der gleichen Masse um eine gewisse Strecke, benötigt man mit zwei Umlenkrollen, im Vergleich zu nur einer Rolle:

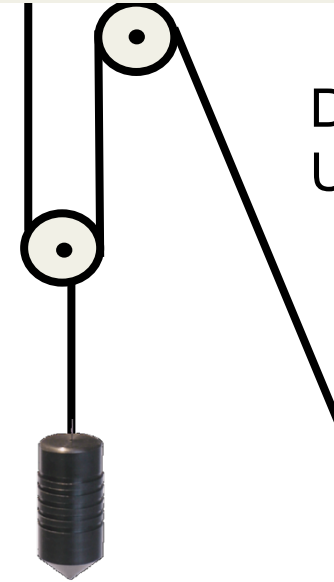
- A) Die gleiche Kraft, muss aber weniger weit ziehen.
- B) Eine größere Kraft, muss aber weniger weit ziehen.
- C) Man zieht gleich weit, aber mit weniger Kraft.
- D) Eine geringer Kraft, man muss aber weiter ziehen.

Die „Goldene Regel“ der Mechanik

Einfache
Umlenkrolle



Doppelte
Umlenkrolle



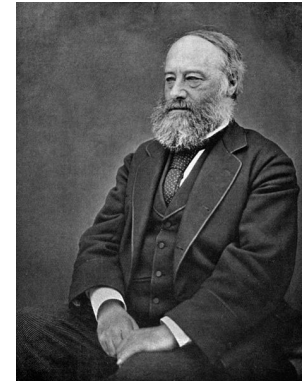
Kraft · Weg = konstant

„There is no free lunch!“

Arbeit

Physikalische Definition der Arbeit W („Work“):

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$$



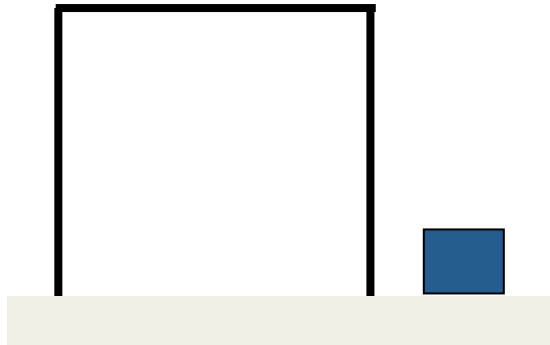
https://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule

James Prescott
Joule
(1818-1889)

Einheit: $[W] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$ („Joule“)

Verschiedene Formen der Arbeit

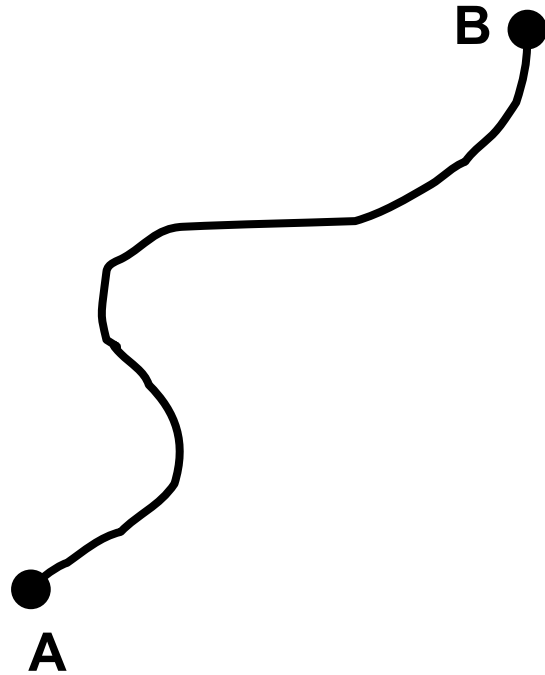
Hubarbeit: Masse m wird auf der Erde vom Boden auf den Tisch gehoben.



Reibungsarbeit: Objekt wird gegen Reibungskraft über eine Ebene bewegt.



Arbeit für variable Kraft und Richtung



Allgemeine Definition der Arbeit

$$W(a, b) = \int_a^b \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

„Spannarbeit“: Arbeit und Federkraft

$$W(a, b) = \int_a^b \vec{F}(\vec{r}) \cdot \vec{r}$$



30.11.20

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

Prof. Dr. Jan Lipfert

14

Kinetische Energie

Reibungsfreie Bewegung, Beschleunigung durch eine Kraft F über Δr

Erinnere: $a = \text{const}$ $v = at + v_0$ $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$

Kinetische Energie
(für $v \ll$ Lichtgeschwindigkeit):

$$E_{kin} = K = \frac{1}{2}mv^2$$

Konservative Kräfte und Potentielle Energie

*Hängt die insgesamt geleistete Arbeit
vom Weg ab?*

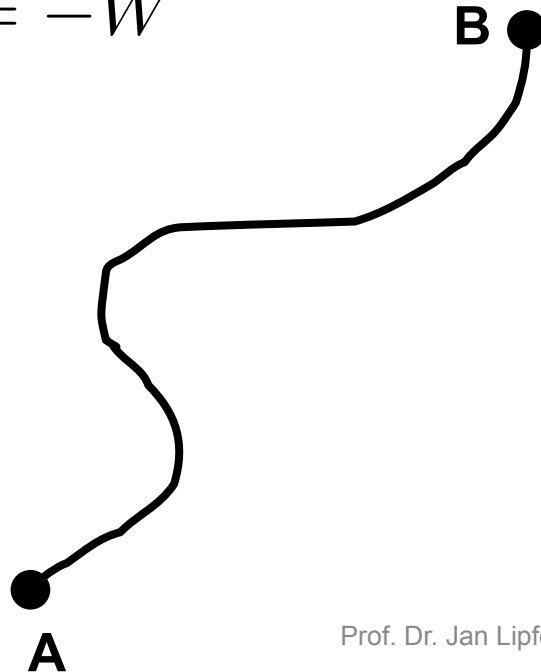
Konservative Kräfte:

z.B. Gravitation, Federkraft,
elektrostatische Kraft ...

$$\Delta E_{pot} = \Delta U = -W$$

Nicht-Konservative Kräfte:

z.B. Coriolis-Kraft, Lorentzkraft,
Reibungskraft ...



Konservative Kräfte & potentielle Energie

- Für konservative Kräfte gilt: **Die Gesamtarbeit, die die Kraft verrichtet, ist unabhängig vom Weg**

$$W = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \oint \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = 0$$

Entlang eines geschlossenen Weges ist die verrichtete Arbeit Null!

- Für konservative Kräfte ist es nützlich, die potentielle Energie zu definieren:

$$\Delta E_{pot} = -W = - \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

Zusammenhang von E_{pot} und F

$$\Delta E_{pot} = -W = -F \Delta x \Rightarrow -\frac{\Delta E_{pot}}{\Delta x} = F$$

$$\lim \Delta x \rightarrow 0$$



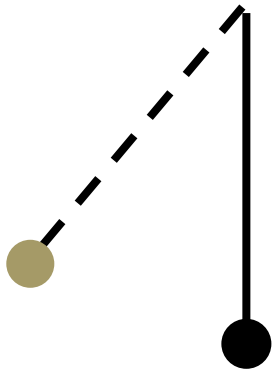
$$F = -\frac{dE_{pot}}{dx}$$

*d.h. eine beliebige (Integrations-)Konstante
ist irrelevant für die Kräfte!*

Energieerhaltungssatz der Mechanik

Für ein abgeschlossenes System in dem nur konservative Kräfte wirken:

$$\Delta E_{mech} = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} = 0$$



Pendel wandelt periodisch E_{kin} in E_{pot} um
(und umgekehrt)

Experiment: Verkürztes Pendel

„Loop the loop“ - revisited

Wie hoch muss die (als reibungslos angenommene) Achterbahn starten, um die Minimalgeschwindigkeit im Loop zu haben?



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

“Loop the Loop” (Coney Island)

$$\Delta E_{mech} = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} = 0$$

als Lösungsstrategie

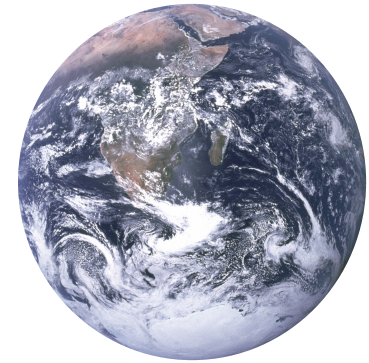
Potentielle Energie-„Landschaft“

Graphische Darstellung der potentiellen Energie

- Steigung = $-$ Kraft
- Minima = stabile Gleichgewichtslagen
- Maxima = labile Gleichgewichtslagen

Potentielle Energie der Gravitation

Was ist die potentielle Energie der Gravitation?
Integriere F_G !



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

Fluchtgeschwindigkeit

Wie schnell muss ein Objekt sein, um die Erde zu verlassen?

Erinnerung: Für ein abgeschlossenes System in dem nur konservative Kräfte wirken gilt der **Energieerhaltungssatz der Mechanik:**

$$\Delta E_{mech} = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} = 0$$



<https://de.wiktionary.org/wiki/Raketenstart>



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

Allgemeiner Energieerhaltungssatz

*In einem abgeschlossenen System ist
die Gesamtenergie konstant*

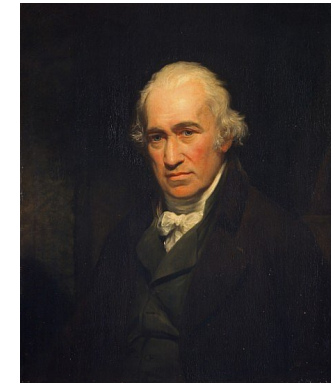
$$\Delta E_{pot} + \Delta E_{kin} + \Delta E_{therm} + \Delta E_{int} = 0$$

Experiment: Wärmeäquivalent

Leistung

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt}$$

Einheit: $[P] = W = J/s = kg \cdot m^2/s^3$



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

James Watt
(1736-1819)

Experiment: Sportliche Leistung

Leistung

SI Einheit: „Watt“
[P] = W = J/s = kg·m²/s³

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{dW}{dt}$$

- (Mechanische) Leistung eines Menschen:
 - 500 – 1000 W (kurzzeitig)
 - ~100-200 W (Dauerbelastung)
- Alternative (nicht SI!) Einheit „Pferdestärke“

1 PS ≈ 735 W

Ein PS ist ungefähr die Leistung, die ein Pferd auf Dauer erbringen kann

- Elektrische Leistung und Energie



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



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drehstromzaehler-Obernjesa.jpg>

Autobahn, revisited

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

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

Wie viel mehr Motorleistung ist nötig,
um mit 150 km/h statt 112 km/h zu fahren?



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



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

Zusammenfassung: Arbeit (= „Kraft mal Weg“)

- 1D, konstante Kraft, gerader Weg

$$W = F \Delta x$$

- 1D, allgemein

$$W = \int_{x_A}^{x_B} F(x) dx$$

- 3D, konstante Kraft, gerader Weg

$$W = \vec{F} \cdot \Delta \vec{r}$$

- 3D, allgemein

$$W = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

Einheit: „Joule“

$$[W] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$$

Alternative Einheiten:

Kalorie: 1 cal \approx 4,18 J

Die Energie, die nötig ist um ein Gramm Wasser um ein Grad Kelvin zu erwärmen.

In der (Bio)chemie häufig:

$$\text{kcal/mol} = 4,18 \text{ kJ/mol} = 6.95 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

Zusammenfassung: Konservative Kräfte & potentielle Energie

- Für konservative Kräfte gilt: **Die Gesamtarbeit, die die Kraft verrichtet, ist unabhängig vom Weg**

$$W = \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = \oint \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r} = 0$$

Entlang eines geschlossenen Weges ist die verrichtete Arbeit Null!

- Potentielle Energie und Kraft:

$$\Delta E_{pot} = -W = - \int_{\vec{r}_A}^{\vec{r}_B} \vec{F}(\vec{r}) \cdot d\vec{r}$$

$$F = - \frac{dE_{pot}}{dx}$$

- Energieerhaltungssatz der Mechanik
(wenn nur konservative Kräfte wirken):

$$\Delta E_{mech} = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot} = 0$$