Vorlesung 8

Physikalisches Kolloquium

Fachgruppe Physik/Astronomie der Universität Bonn

Fachgruppe Physik und Astronomie Universität Bonn

UNIVERSITÄT BONN

Freitag, 04. November 2022, 15 Uhr c.t. im Hörsaal I des Physikalischen Instituts

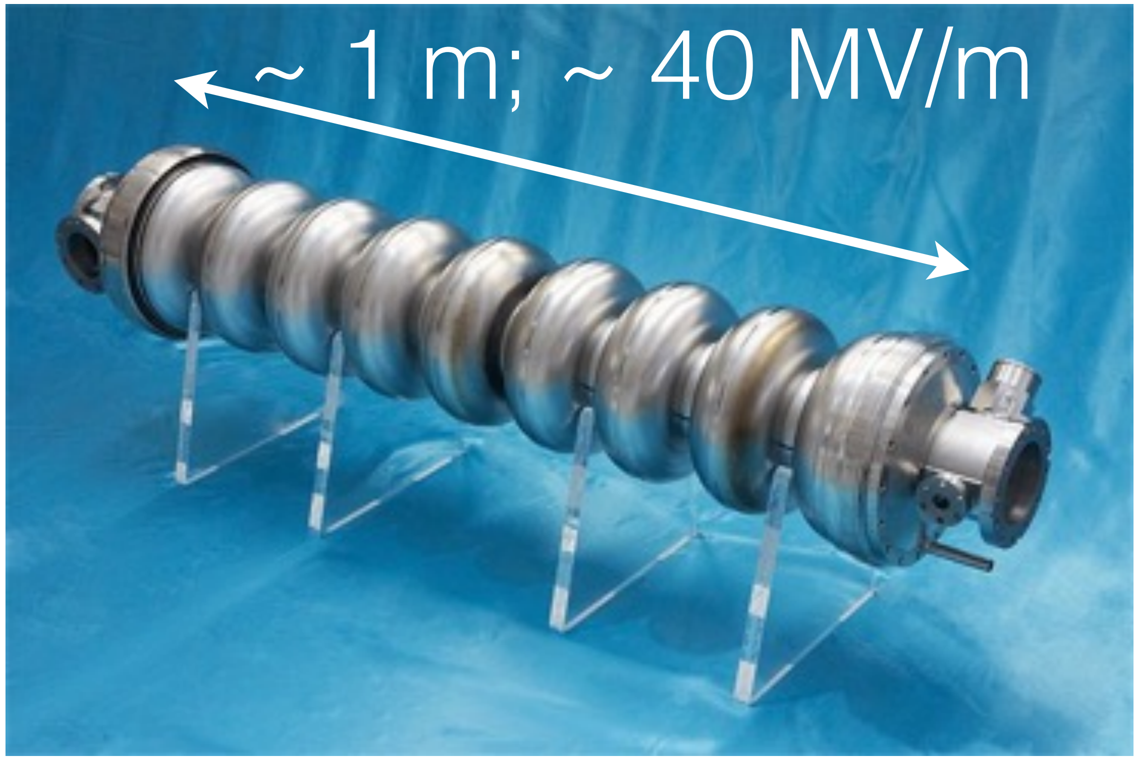
Andreas R. Maier

DESY Hamburg

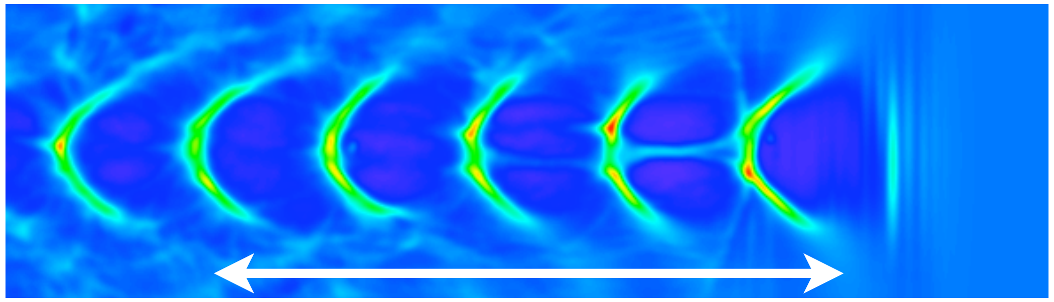
„Laser-Plasma Acceleration at DESY“

Laser-plasma accelerators (LPA) will be at the core of next-generation accelerators and user facilities. Advancing LPA core technologies, including the development of high average power drive lasers, is an integral part of DESYs accelerator R&D. We will discuss our roadmap for drive laser and laser-plasma R&D and present recent developments and results, including our plans to use LPAs as drivers for next-generation synchrotrons; the application of machine learning techniques to improve the electron beam quality; and give an update on the development of KALDERA, DESY's flagship LPA drive laser currently under development.

Es gelten die Corona-Regelungen des Landes Nordrhein-Westfalen

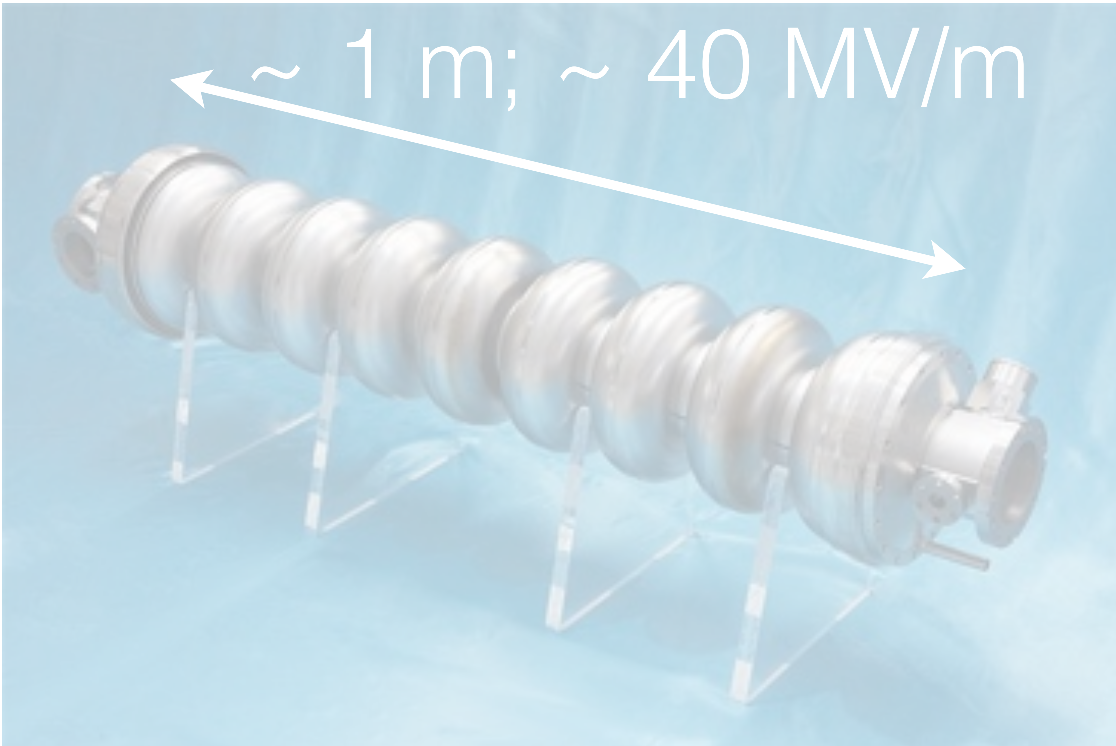


a section of RF cavity

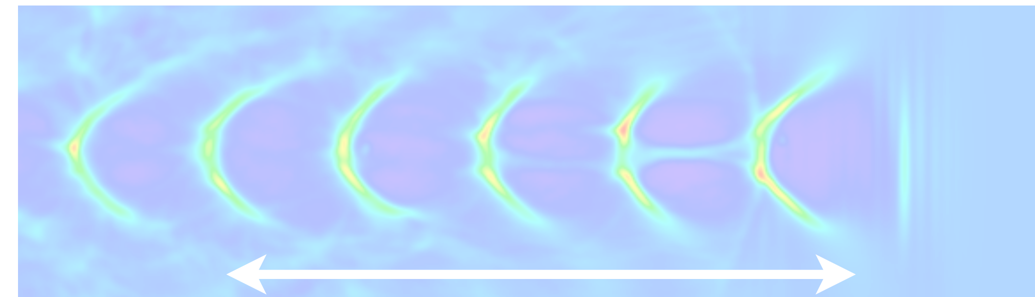


~ 50 μm; ~ 100 GV/m

a plasma wave

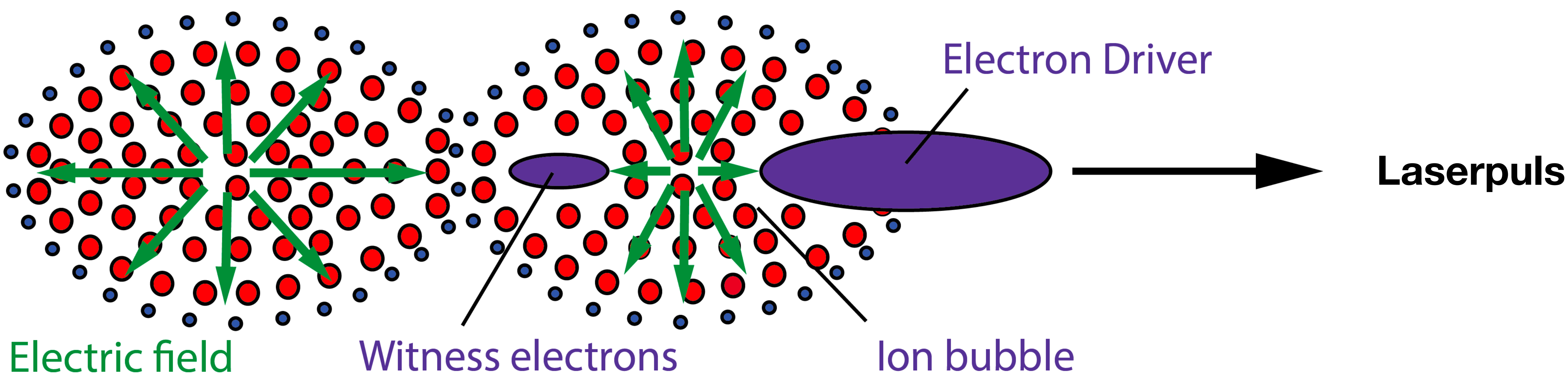


a section of RF cavity

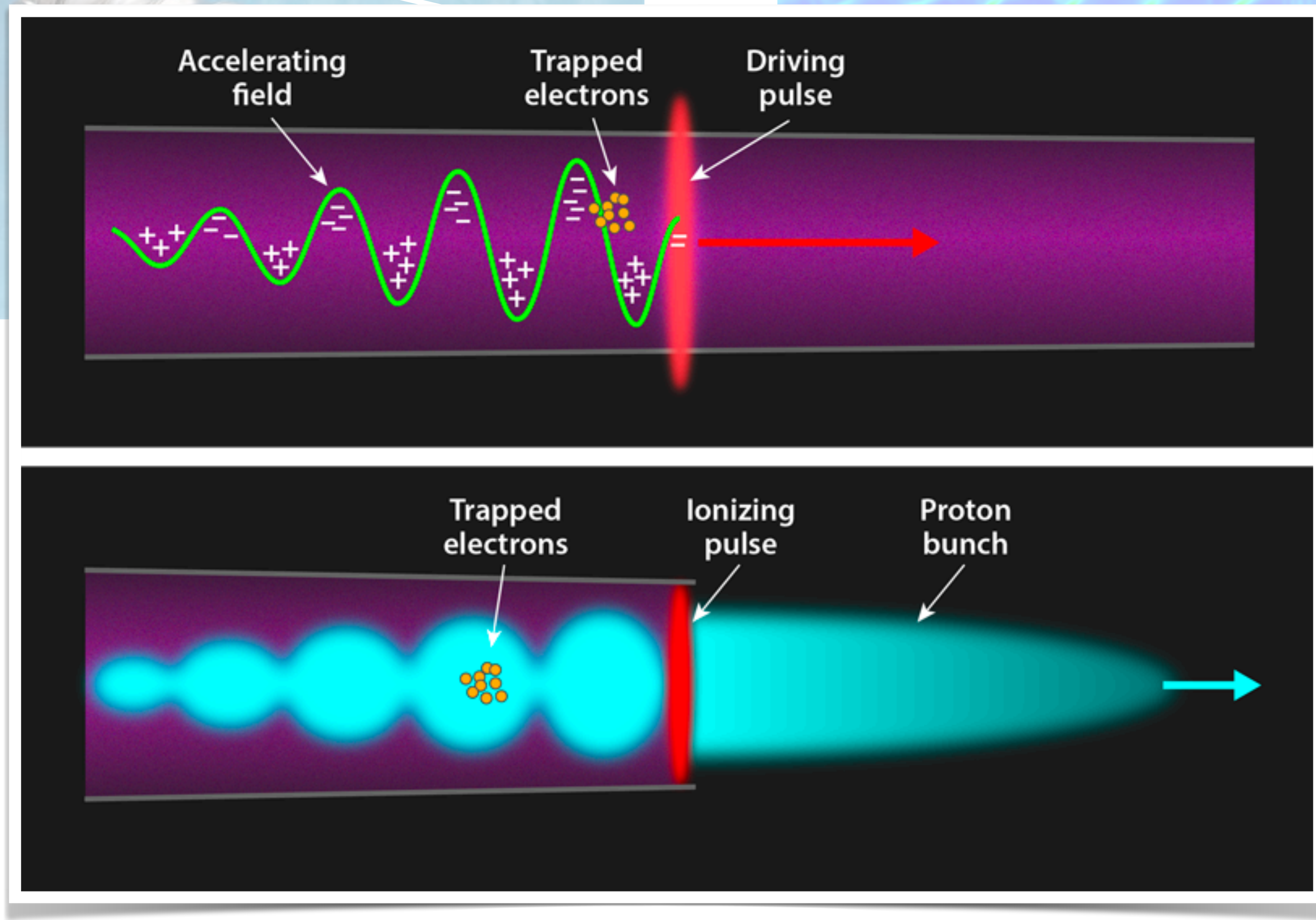


~ 50 µm; ~ 100 GV/m

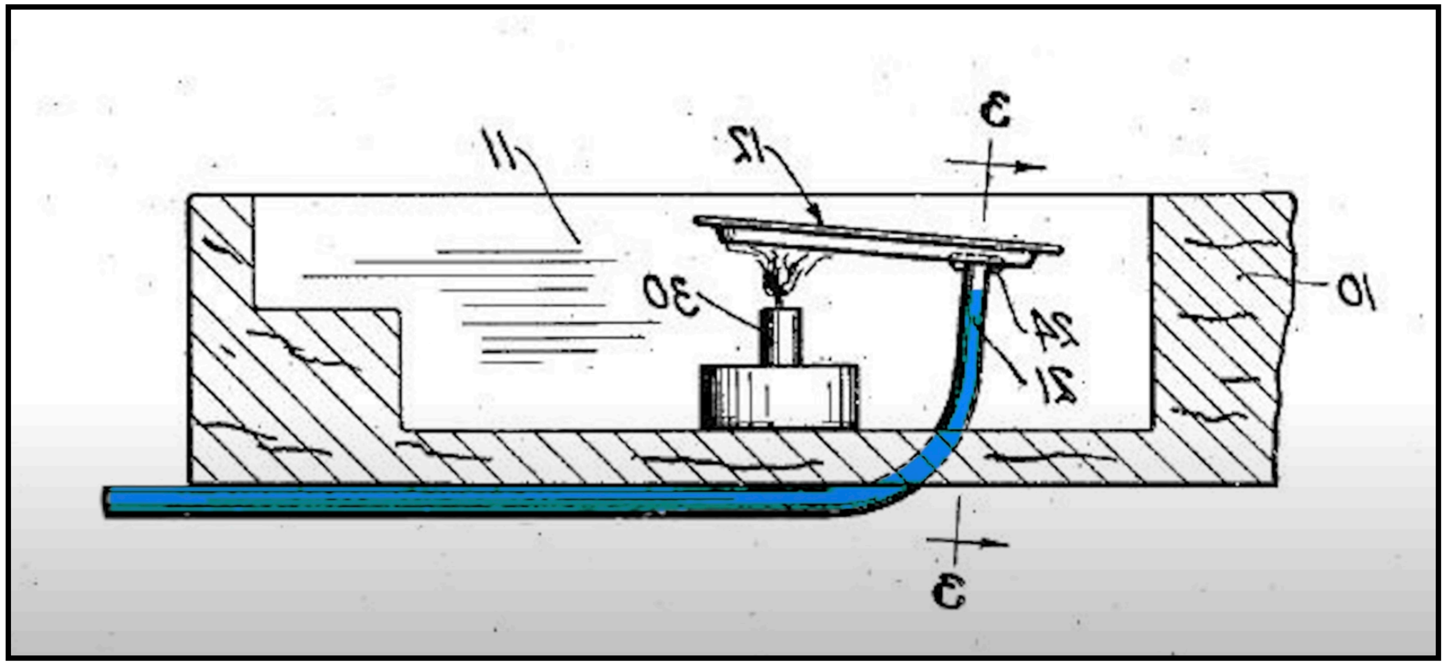
a plasma wave

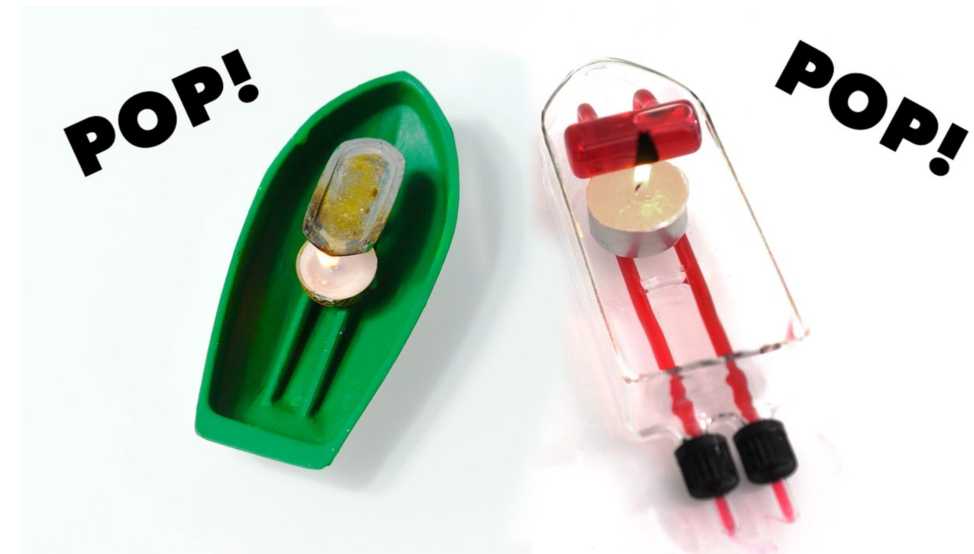


~ 1 m; ~ 40 MV/m


Accelerating field
Trapped electrons
Driving pulse
Trapped electrons
Ionizing pulse
Proton bunch

Versuch: Kerzenschiff





Komplexe Reaktion: Wasser-Luft-Gemisch führt zur einer **Oszillation**

Gas expandiert (getrieben durch die Kerze) → Gas breitet sich in die Leitung aus

Leitung ist kühler als das Metallgefäß unter der Kerze → Gas kontrahiert und Wasser kondensiert

Das Gas wird zurück in das Metallgefäß gezogen, das spiel wiederholt sich

→ Führt zu einer Netto-Vorwärtsbewegung

https://www.youtube.com/watch?v=3AXupc7oE-g

2.6 Ortsabhängige Kräfte, Kraftfelder

bisher:

- konstante Kraft (z.B. schiefer Wurf) $\Rightarrow$ $\vec{a} = \text{const}$

- zeitabhängige Kraft:

$$\vec{F} = \vec{F}(t) \quad \Rightarrow \quad \vec{p}(t) - \vec{p}(t_0) = \underbrace{\int_{t_0=0}^{t} \vec{F}(t')\,\mathrm{d}t'}_{\text{Kraftstoß}}$$

$$\Rightarrow \quad \vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \frac{1}{m}\int_0^t \vec{F}(t')\,\mathrm{d}t' \qquad \text{für } m = \text{const}$$

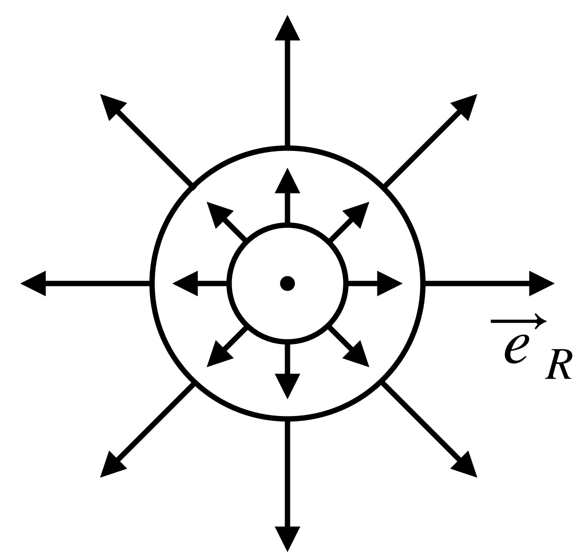
$$\Rightarrow \quad \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0\,t + \frac{1}{m}\int_0^t \int_0^{t'} \vec{F}(t'')\,\mathrm{d}t''$$

jetzt: Ortsabhängige Kraft:

- Beschreibung durch ein **Kraftfeld** $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}) = \vec{F}(x, y, z)$ oder $\vec{F}(r, \theta, \varphi)$

Abbildung von: $\vec{r} \longmapsto \vec{F}(\vec{r})$ $\quad \mathbb{R}^3 \longmapsto \mathbb{R}^3$ "Vektorfeld"

Spezialfall: $\vec{F}(\vec{r}) = f(r)\ \vec{e}_R$ **Zentralkraft**



Zentralkraftfelder sind kugelsymmetrisch

Beispiel: Gravitationskraft zw. Erde (M_E) und Masse m:

$$\vec{F}_{\text{Erde}}(\vec{r}) = -G\,\frac{m \cdot M_E}{r^2}\,\vec{e}_R = -G\,\frac{m \cdot M_E}{r^3}\,\vec{r}$$

Beispiel: Gravitationskraft von Erde (M_E) und Mond (M_M) auf Masse m:

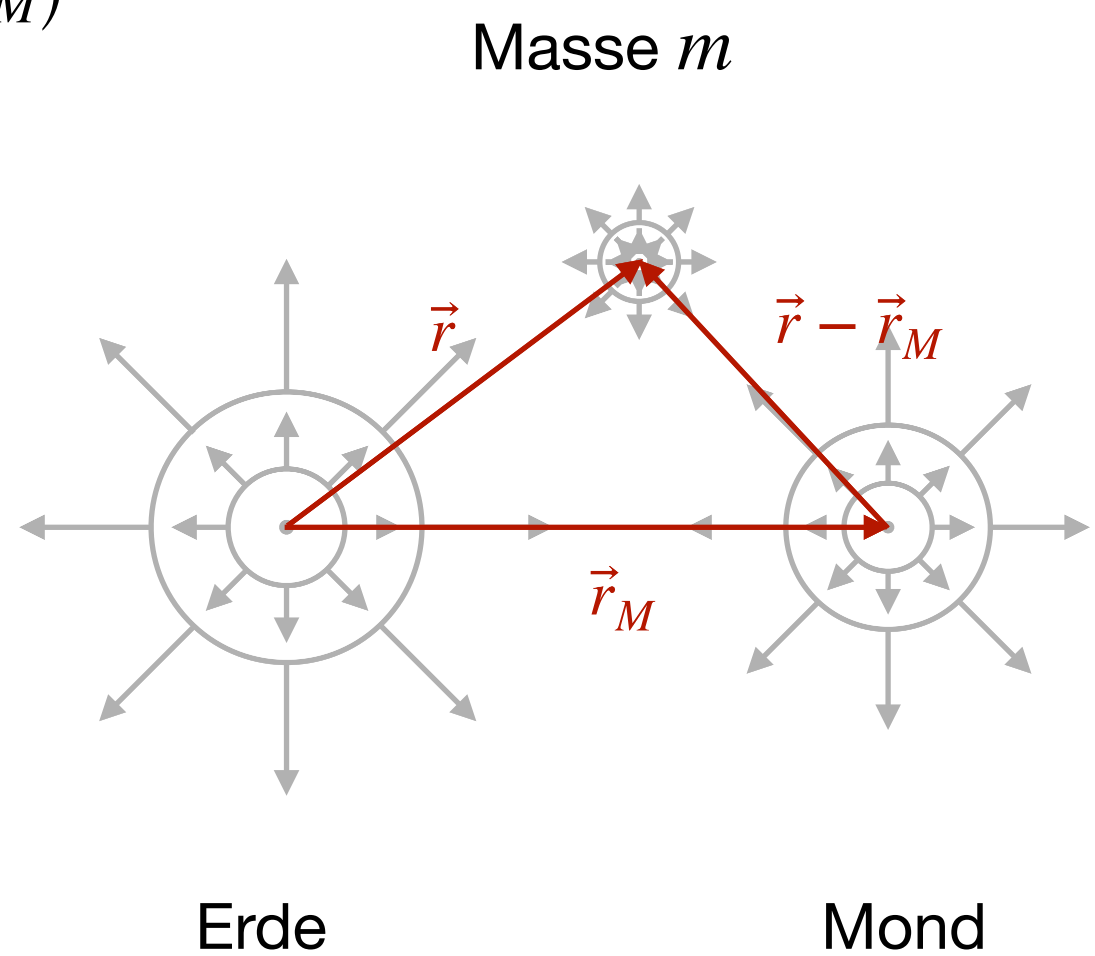
$$\vec{F}_{\text{Erde}}(\vec{r}) = -G\,\frac{m \cdot M_E}{r^3}\vec{r}$$

$$\vec{F}_{\text{Mond}}(\vec{r}) = -G\,\frac{m \cdot M_M}{|\vec{r} - \vec{r}_M|^3}\left(\vec{r} - \vec{r}_M\right)$$

$$\Rightarrow \vec{F}(\vec{r}) = \vec{F}_{\text{Erde}}(\vec{r}) + \vec{F}_{\text{Mond}}(\vec{r})$$

Kein Zentralkraftfeld

(keine Kugelsymmetrie!)



Feldbegriff zentral in der theoretischen Physik

- Suche nach Bahnkurve $\vec{r}(t)$ für Feld $\vec{F}(\vec{r})$ (unter Anfangsbed. $\vec{r}(t_0)$, $\vec{v}(t_0)$)

3. Erhaltungsgrößen der Mechanik

- Energie
- Impuls
- Drehimpuls

3.1 Energie

3.1.1 Arbeit

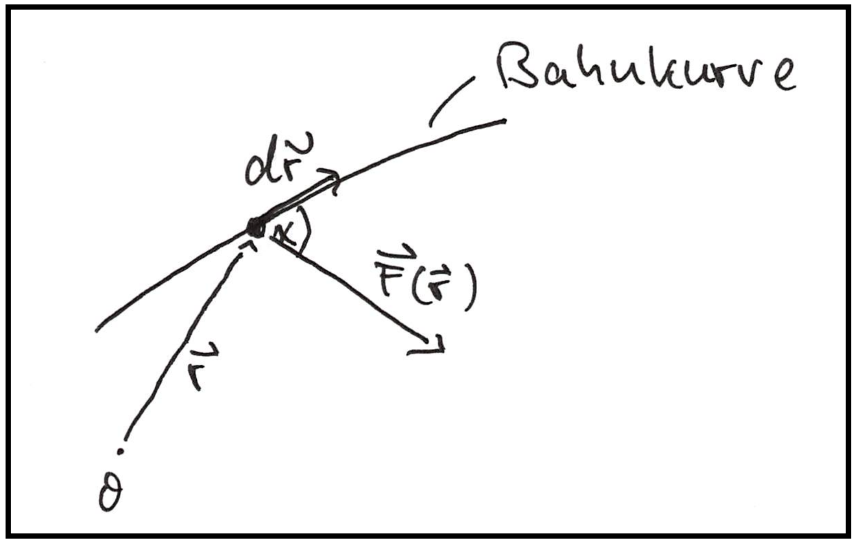
Massenpunkt legt in einem Kraftfeld ein Wegstück $\mathrm{d}\vec{r}$ zurück.

$$\Rightarrow \quad \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = |\vec{F}||\mathrm{d}\vec{r}|\cos\alpha =: \mathrm{d}W$$

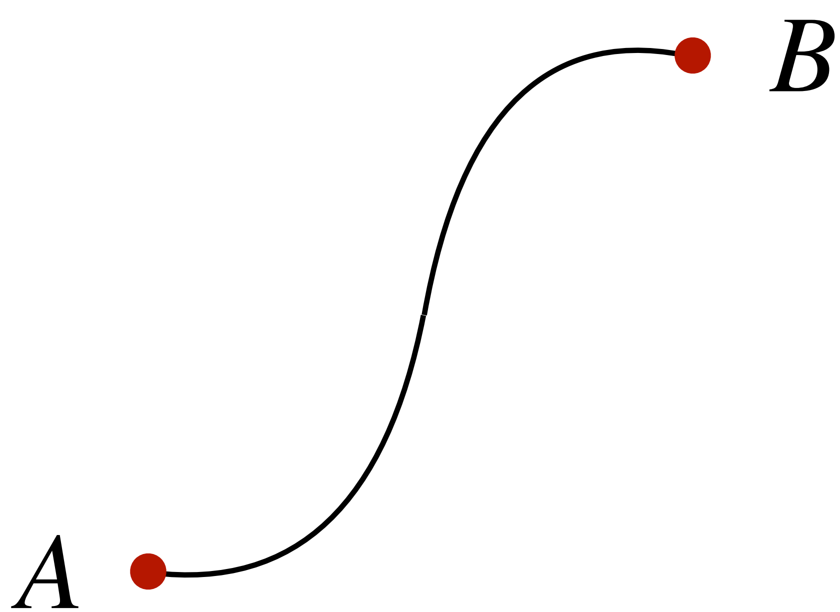
Arbeit
(Skalar)

die vom MP "verrichtet" wird

$$\vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = F_x\,\mathrm{d}x + F_y\,\mathrm{d}y + F_z\,\mathrm{d}z = F_{||}\,\mathrm{d}s$$

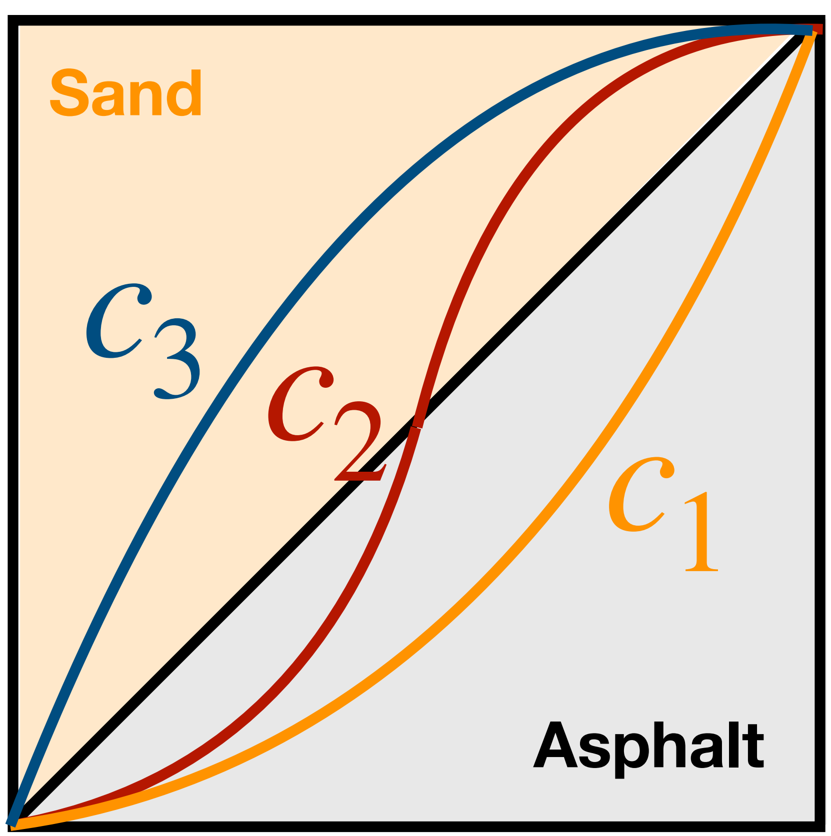


Gesamtarbeit auf dem Weg von A nach B



$$W = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int \mathrm{d}W$$

Bspl.



$$W(c_1) < W(c_2) < W(c_3)$$

Wenn Bahnkurve $\vec{r}(t) = \vec{r}(x(t), y(t), z(t))$ bekannt:

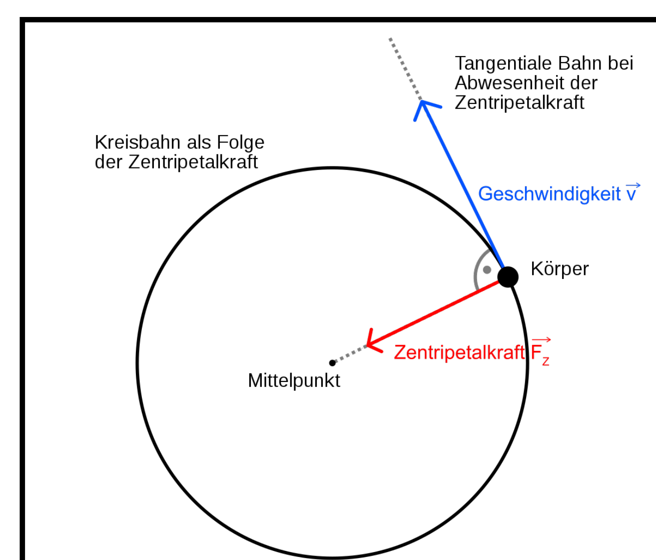
$$W = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}(t)) \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_{t_1}^{t_2} \left(F_x \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t + F_y \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t + F_z \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t \right)$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(\vec{r}(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{v}\, \mathrm{d}t$$

$$[W] = [\mathrm{Kraft} \times \mathrm{Weg}] = \mathrm{Nm} = \mathrm{J} = \mathrm{Joule} \quad (= \mathrm{Ws})$$

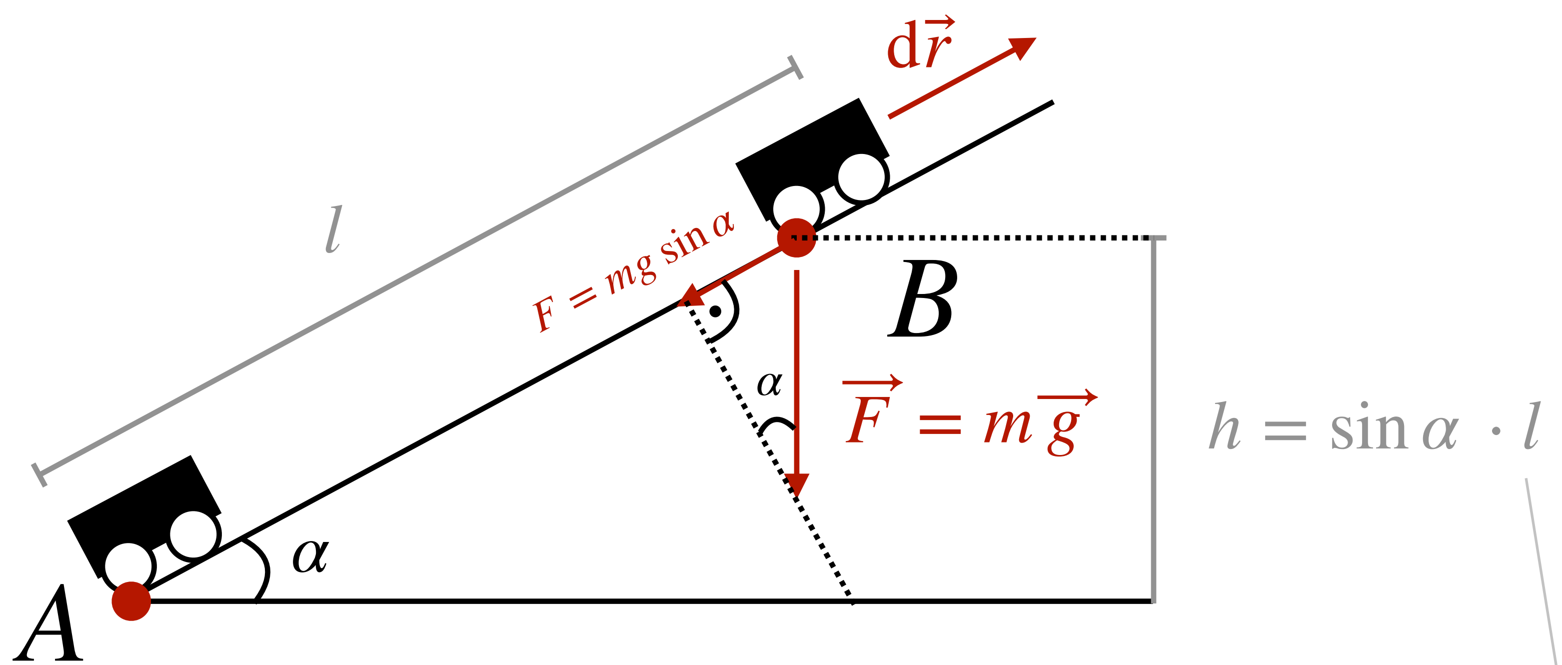
<u>Beispiele:</u>

1. Wenn $\vec{F} \perp \mathrm{d}\vec{r} \quad \Rightarrow \quad \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = 0 \quad \Rightarrow$ keine Arbeit



z.B. Zentripetalkraft $\perp \mathrm{d}\vec{r}$ verrichtet keine Arbeit

2. Wagen auf schiefer Ebene

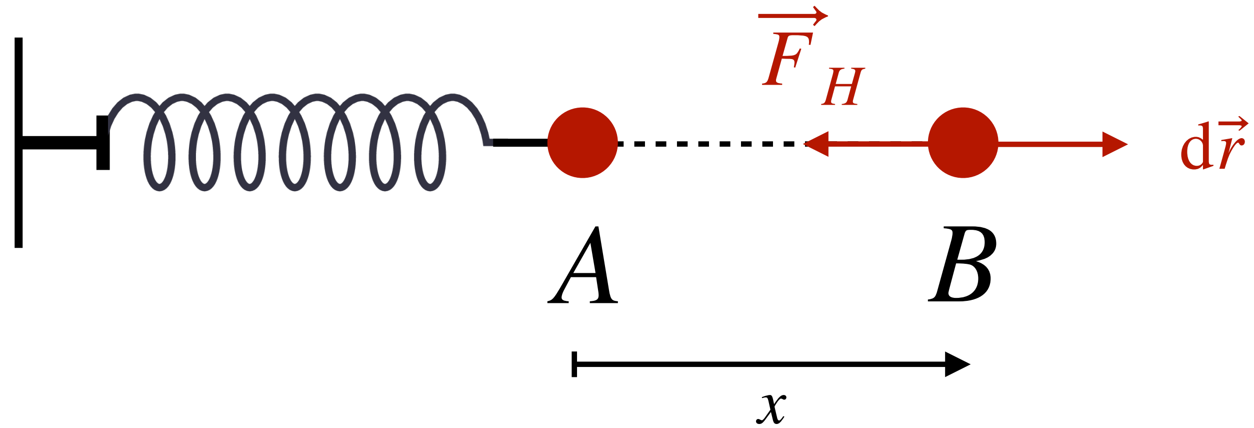


$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_A^B (m\,g\,\sin\alpha)\,\vec{e}_R \cdot \mathrm{d}\vec{r} = -\,l\sin\alpha\,mg = -\,mgh$$

Kraft und Weg entgegengesetzt

$$\int_A^B \vec{e}_R \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_0^l |e_R|\,|\mathrm{d}r|\cos\pi = -\int_0^l |\mathrm{d}r| = -\,l$$

3. Federkraft



Hooke'sches Gesetz $F_H(x) = -Dx$

Rückstellkraft F_H proportional zur Auslenkung x

Federkonstante D $\qquad [D] = \dfrac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$

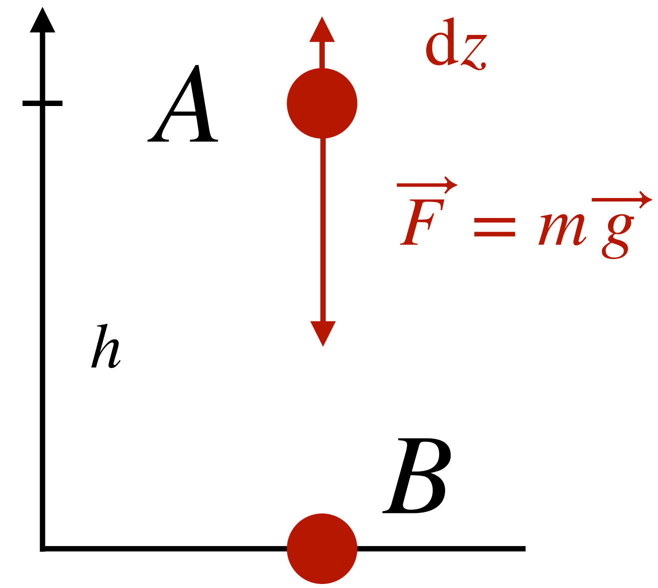
$$\vec{F}_H \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \begin{pmatrix} -Dx' \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{d}x' \\ \mathrm{d}y' \\ \mathrm{d}z' \end{pmatrix} = -Dx'\mathrm{d}x' = |\vec{F}_H||\mathrm{d}\vec{r}|\cos\pi$$

Geleistete Arbeit bei Auslenkung von $A \rightarrow B$:

$$W = \int_A^B \vec{F}_H \cdot \mathrm{d}\vec{r} = -\int_0^x Dx' \cdot \mathrm{d}x' = -\frac{1}{2}Dx^2$$

Kraft und Auslenkung entgegengesetzt

4. Freier Fall aus Höhe h



$$W = \int_h^0 \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = -\int_h^0 mg\mathrm{d}z = -\,mg\left[0 - h\right] = mgh > 0$$

Kraft und Weg parallel

Vorzeichen:

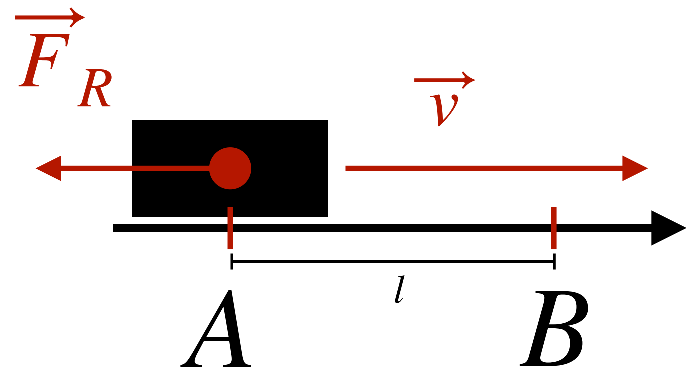
$+$: Bewegung in Richtung von $\vec{F}$

$-$: Bewegung entgegen $\vec{F}$

Freier Fall: $v_{\text{end}} = \sqrt{2gh}\,,\quad h = \dfrac{v^2}{2g}$ $\longleftarrow$ $h = \dfrac{1}{2}gt^2 \leftrightarrow v_{\text{end}} = g\,t$

$$W = mgh = \frac{1}{2}mv^2$$ (mehr später)

5. Reibungskraft



(Gleitreibung, ortsunabhängig)

$$W = \int_A^B \vec{F}_R \cdot \mathrm{d}\vec{r} = -F_R \int_0^l \mathrm{dx} = -F_R\, l$$

Reibungskräfte: erfordern Arbeit $W < 0$

Grav., Federkraft: können auch Arbeit leisten $W > 0, W < 0$

3.1.2 Leistung

Leistung = geleistete Arbeit pro Zeit

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} \qquad [P] = \mathrm{J/s} = \mathrm{W} = \mathrm{Watt}$$

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t$$

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(\vec{r}(t)) \cdot \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t = \int_{t_1}^{t_2} P\,\mathrm{d}t \qquad \Rightarrow P = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

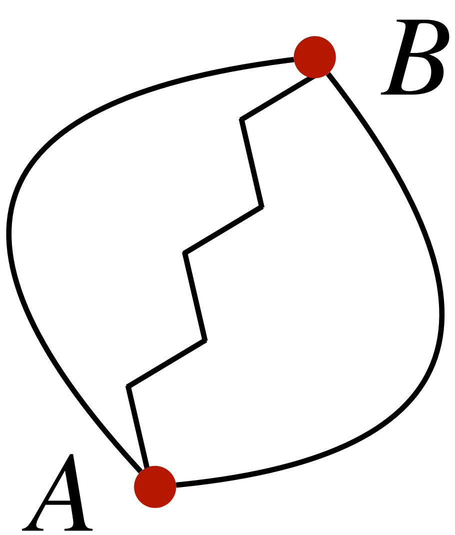
$$\vec{v} = \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}$$

3.1.3 Konservative Kraftfelder

Definition: Wenn die Arbeit

$$W = \int_A^B \vec{F}(\vec{r}) \cdot \mathrm{d}\vec{r}$$

nicht vom gewählten Weg $A \rightarrow B$ abhängt, heißt das Kraftfeld $\vec{F}(\vec{r})$ konservativ.



$$\Rightarrow W_{\text{geschlossener Weg}} = \oint \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = 0$$

(f. alle geschl. Wege)