

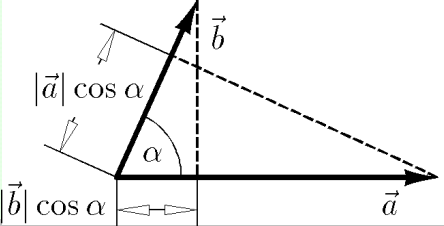


| | | | |
|--|---|-----------------------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4 Arbeit, Energie, Leistung |  |
| <p>4.0 Exkurs: Skalarprodukt</p> <p>4.1 Arbeit</p> <p>4.2 Energie</p> <p>4.3 Energieformen</p> <p>4.4 Leistung</p> <p>4.5 Wegunabhängige Arbeit, konservative Kräfte</p> <p>4.6 Energiesatz der Mechanik</p> <p>4.7 Einfache Maschinen</p> | | | |
| R. Girwidz | | | 1 |

| | | | |
|---|---|-----------------------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4 Arbeit, Energie, Leistung |  |
| <p>Exkurs: Skalarprodukt</p> <ul style="list-style-type: none"> <p>Skalarprodukt mit Zwischenwinkel:</p> $\vec{a} \cdot \vec{b} = \vec{a} \vec{b} \cos(\vec{a}, \vec{b}) = ab \cos \alpha$ <p>Im kartesischen Koordinatensystem:</p> $\vec{a} \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$ <p>Skalarprodukt grafisch:</p>  | | | |
| R. Girwidz | | | 2 |

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.1 Arbeit

Der physikalische Arbeitsbegriff unterscheidet sich vom alltagssprachlichen

↳ Kriterien:

- Eine Kraft wirkt über eine bestimmte Strecke hinweg
- Ortsänderung – evtl. Bewegungszustand geändert

R. Girwidz 3

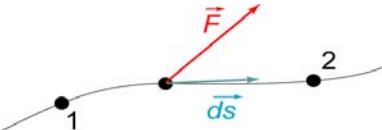
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.1 Arbeit

Der physikalische Arbeitsbegriff unterscheidet sich vom alltagssprachlichen

↳ Kriterien:

- Eine Kraft wirkt über eine bestimmte Strecke hinweg
- Ortsänderung – evtl. Bewegungszustand geändert

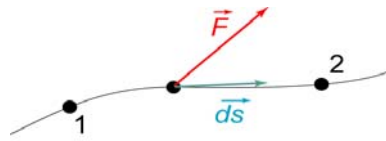
➤ Verschiebt eine Kraft \vec{F} einen Körper um eine Wegstrecke $d\vec{s}$, so verrichtet sie mechanische Arbeit dW .



The diagram illustrates a curved path starting at point 1 and ending at point 2. A red vector labeled \vec{F} points upwards and to the right from a point on the path. A blue vector labeled $d\vec{s}$ points to the right along the path from the same point.


$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s}$$


R. Girwidz 4

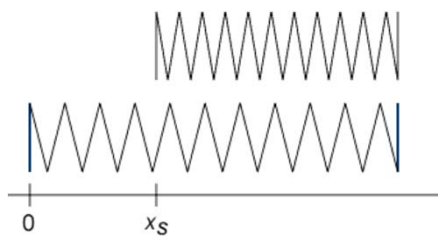


- Versuch: Wagen kann an schiefer Ebene 2 Wägen anheben
- Sprungscheibe "Klick"
- Wagen kann schiefe Ebene hochfahren
- Körper kann Körper heben (Flaschenzug)

—

| | | | |
|--|---|-------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.2 Energie |  |
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Versuch: Wagen kann an schiefer Ebene 2 Wägen anheben ➤ Sprungscheibe "Klick" ➤ Wagen kann schiefe Ebene hochfahren ➤ Körper kann Körper heben (Flaschenzug) | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grobverständnis: Unter der Energie eines Systems versteht man dessen Fähigkeit Arbeit zu verrichten (sein „Arbeitsvermögen“) ▪ aber Feynman: <i>"It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is . . . "</i> | | | |
| <p>Energie ist notwendig für Veränderungen — dabei kommt es zur Umwandlung von Energieformen</p> | | | |
| R. Girwidz | | | 7 |

| | | | |
|---|---|-------------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.3 Energieformen |  |
| <p>Grundformen: Kinetische Energieformen (Bewegungsenergie) Potentielle Energieformen („Lageenergie“)</p> | | | |
| R. Girwidz | | | 8 |

**b) Hubarbeit und Höhenenergie****c) Spannenergie einer Feder****→ Weitere Energieformen:**

- Rotationsenergie
- („Wärme“) / Innere Energie
- Elektrische Energie
- Magnetische Feldenergie
- Strahlungsenergie
- Chemische Energie / Bindungsenergie
- Kernenergie / Bindungsenergie der Nukleonen

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.3 Energieformen

↘ **Quellen für unseren Energiebedarf:**

| | |
|--------------------------------|---|
| Chemische Energie | Fossile Energieträger (Holz, Kohle, Öl, Gas), chemische Zellen (z. B. Blei-Akku, Zinkchlorid-Batterien) Wasserstoff-Verbrennung |
| Kernenergie | Kernspaltung und Kernfusion |
| Mechanische Energie | Wasser, Wind |
| Strahlungsenergie | Solarstrahlung |
| Wärmetauscher | Erdwärme, Temperaturunterschiede des Meeres |
| (Reduktion von Verlustenergie) | Nutzung von Abwärme |

R. Girwidz 11

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.3 Energieformen

↘ **Heizwerte - pro kg**

| | |
|-----------------------|----------|
| Benzin | 44 MJ |
| Heizöl | 42 MJ |
| Erdgas | 36 MJ |
| Steinkohle | 24-30 MJ |
| Braunkohle | 20 MJ |
| Holz | 14-18 MJ |
| Rinde / Holzschnitzel | 6 - 8 MJ |

R. Girwidz 12

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.3 Energieformen

→ Größenordnung einiger Energie-"Portionen"

| | |
|----------------------------------|-------------|
| Gravitationsenergie zw. Schülern | 10^{-6} J |
| Geflüstertes Einsagen | 10^{-3} J |
| Hufeisenmagnet | 10^1 J |
| KFZ (voller Tank) | 10^6 J |
| Blitz | 10^9 J |
| 90 Jahre Nahrung | 10^{10} J |
| Atombombe | 10^{13} J |
| Wasserstoffbombe | 10^{16} J |

R. Girwidz 13

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.3 Energieformen

▣ **Verbrennungswärme der Nährstoffe**

| | |
|-----------------------|---------------|
| Kohlenhydrate, Eiweiß | ca. 16 kJ / g |
| Fett | ca. 38 kJ / g |

▣ **Energieinhalt (Nährwert) von Speisen – pro 100 g**

| | |
|------------|---------|
| Schokolade | 2300 kJ |
| Brot | 1000 kJ |
| Schnitzel | 1000 kJ |
| Spagetti | 1600 kJ |
| Kartoffeln | 410 kJ |

Verbrennung meist unvollständig

▣ **Kostmaß pro Tag:**

| | |
|-----------|---------------|
| ca. 500 g | Kohlenhydrate |
| ca. 60 g | Fette |
| ca. 120 g | Eiweiß |

R. Girwidz 14

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.4 Leistung

Leistung: Arbeit, die pro Zeitintervall verrichtet wird

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(\vec{F} \cdot d\vec{s})}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v}$$

↑ falls \vec{F} zeitunabhängig

R. Girwidz 15


LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.4 Leistung

↪ **Menschliche Leistungen (Messung z. B. mit Ergometern)**

| | |
|--------|------------|
| 75 W | ganztägig |
| 150 W | ca. 5 h |
| 300 W | ca. 30 Min |
| 750 W | ca. 1 Min |
| 1500 W | ca. 5 s |

R. Girwidz 16

| | | | |
|--|---|--------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.4 Leistung |  |
| → Leistungswerte | | | |
| Kraftwerke | | ca. 1000 MW | |
| Motoren - Flugzeuge | | ca. 10 MW | |
| - PKW | | ca. 100 kW | |
| Energieaufkommen / Leistung je Bürger (Tagesmittel) | | ca. 6 kW | |
| Nahrungsverbrauch (über 1 Tag gemittelt) | | | |
| - Schwerarbeiter | | ca. 200 W | |
| - Durchschnittsbürger | | ca. 120 W | |
| Glühlampen | | ca. 60 W | |
| Mensch - (Höchstleistung wenig s) | | ca. 1000 W | |
| - (Dauerleistung: Gehen mit 5 km/h) | | ca. 70 W | |
| Akustik (Sprechen) | | ca. 10 μW | |
| Empfindlichkeitsgrenze für Wärmestrahlungsdetektoren | | ca. 1 pW | |
| Hörschwelle des Ohres bei 1000 Hz | | ca. 0,1 fW | |
| R. Girwidz | | 17 | |

| | | | |
|--|---|--------------|---|
| LMU | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.4 Leistung |  |
| → Wirkungsgrad: | | | |
| $\text{Wirkungsgrad} := \frac{\text{verrichtete (mech.) Arbeit}}{\text{zugeführte Energie}}$ | | | |
| R. Girwidz | | 18 | |

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.4 Leistung

→ **Energieumsatz des erwachsenen Menschen (60kg) pro Stunde**

| | |
|-----------------------|------------|
| niedrigster Verbrauch | ca. 250 kJ |
| Zimmerruhe, gew. Kost | ca. 360 kJ |
| bei mäßiger Arbeit | ca. 420 kJ |
| bei starker Arbeit | ca. 630 kJ |

→ „Wirkungsgrad“ des Menschen:

$$\text{Wirkungsgrad} := \frac{\text{verrichtete mech. Arbeit}}{\text{Stoffwechsel – Energieumsatz}} \approx 20\%$$

Vergleich der Energieumsätze beim Gehen in der Ebene und beim Heben des Körpers (Bergsteigen) über gleiche Zeiträume.



R. Girwidz 19



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.5 Weg unabhängige Arbeit, konservative Kräfte

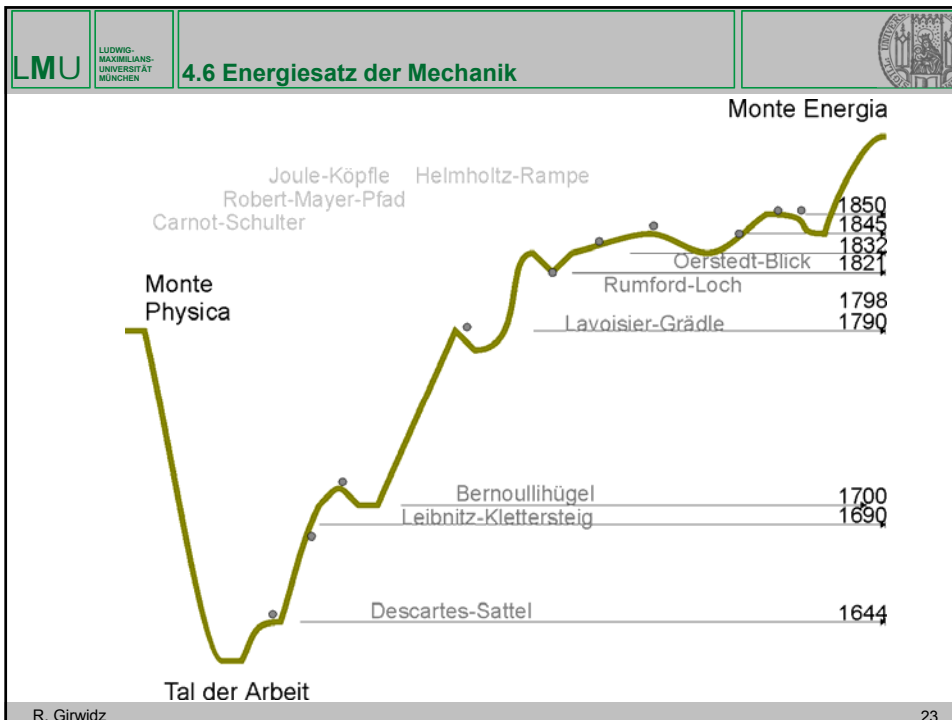
Eine Kraft heißt konservativ, wenn die gesamte Arbeit entlang eines beliebigen, geschlossenen Weges gleich null ist.

$\oint \vec{F} \cdot d\vec{s} = 0$

R. Girwidz 20

| | | | |
|--|---|--|---|
|  | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.5 Weg unabhängige Arbeit, konservative Kräfte |  |
| <p>Die Arbeit, die eine konservative Kraft an einem Massenpunkt verrichtet, ist unabhängig davon, auf welchem Weg sich der Massenpunkt von einem Ort zu einem anderen bewegt.</p> | | | |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> $\Delta E_{pot} = - \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$ </div> | | | |
| <p>\vec{F}: Kraft im System $-\vec{F}$: von außen aufzubringende Kraft</p> | | | |
| <p>Nur für konservative Kraftfelder ist eine pot. Energie definierbar</p> | | | |
| R. Girwidz | | 21 | |

| | | | |
|--|---|--|---|
|  | LUDWIG- MAXIMILIANS- UNIVERSITÄT MÜNCHEN | 4.5 Weg unabhängige Arbeit, konservative Kräfte |  |
| <p>↪ Potentielle Energie und Gleichgewicht (in einer Dimension)</p> | | | |
| $\Delta E_{pot} = -\vec{F} \cdot d\vec{s}$ $= -F_x \cdot dx$ | | | |
| <p>⇒</p> | | | |
| <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> $F_x = - \frac{dE_{pot}}{dx}$ </div> | | | |
| <p>Statisches Gleichgewicht:</p> | | | |
| R. Girwidz | | 22 | |



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

➔ **Energiesatz der Mechanik**

In einem abgeschlossenen System
 (unter der Voraussetzung, dass nur konservative Kräfte wirken) bleibt
 die Summe aus kin. und pot. Energie konstant,
 d. h. die mechanische Gesamtenergie bleibt unverändert.

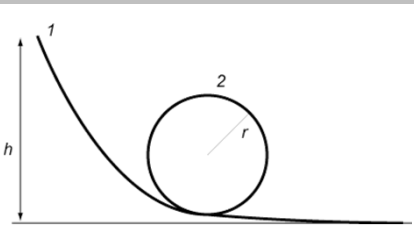
$$\Delta E_{Ges} = 0 = \Delta E_{kin} + \Delta E_{pot}$$

Die von einer nichtkonservativen Kraft verrichtete Arbeit entspricht der
 Änderung der mechanischen Gesamtenergie des Systems

R. Girwiz 24

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

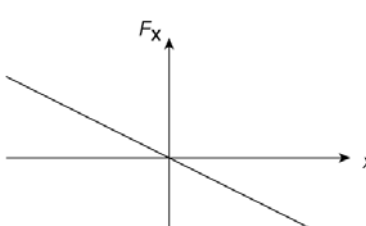
Beispiel Überschlagbahn:
Wie groß muss man h mindestens wählen



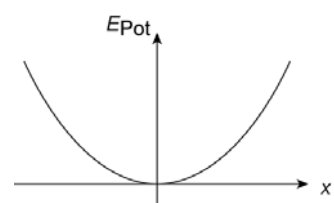
R. Girwidz 25

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Kraftverlauf



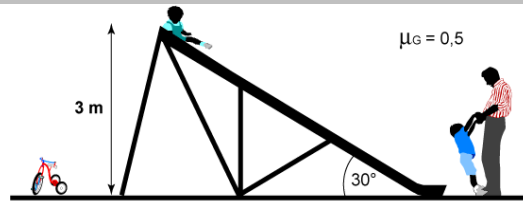
Potentialverlauf



R. Girwidz 26



Kinderrutsche

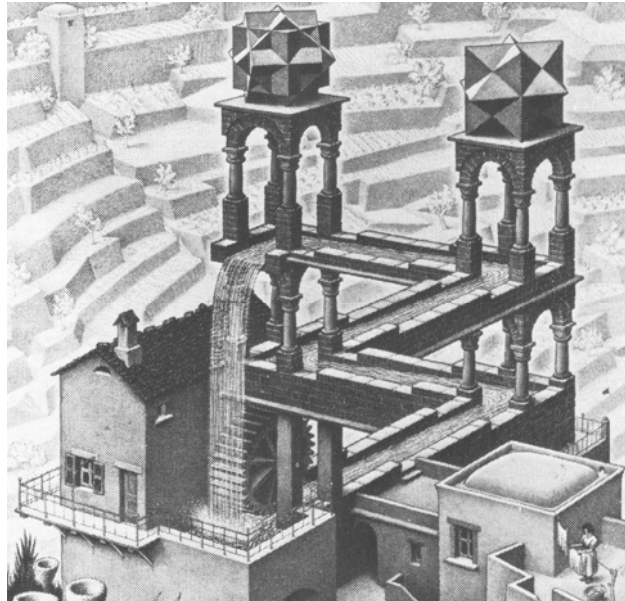


Mit welcher Geschwindigkeit kommt das Kind unten an?



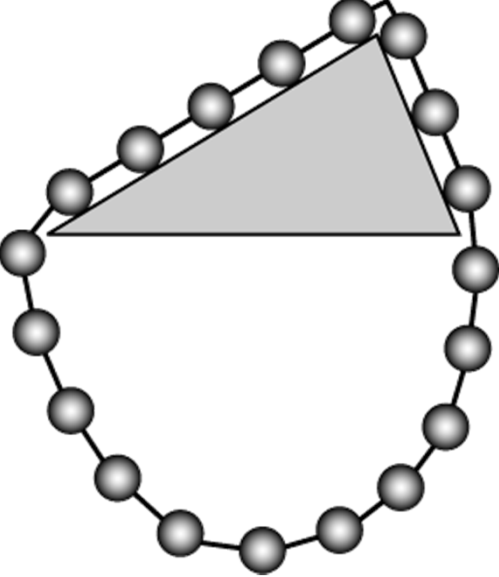
Perpetuum Mobile

M. C. Escher



LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

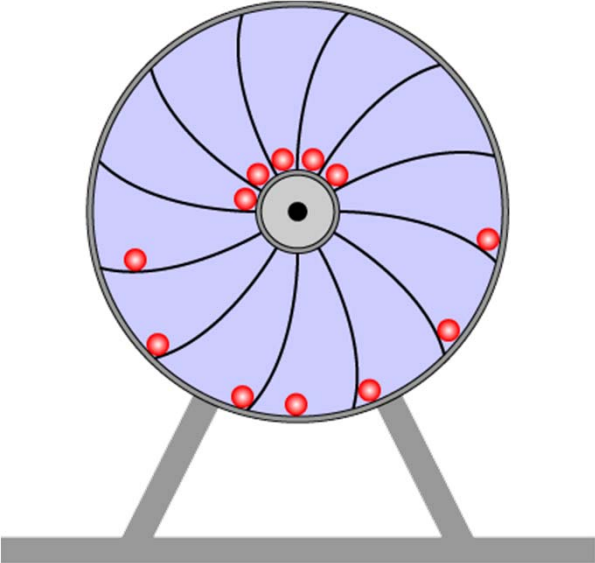


R. Girwidz 29

The diagram illustrates a proposed perpetual motion machine. It consists of a chain of 18 grey spheres arranged in a roughly circular path. A grey triangular weight is attached to the top of the chain, with its base horizontal and its apex pointing towards the right. The weight is positioned such that it appears to be pulling down on the right side of the chain, potentially creating an imbalance that would cause the chain to rotate continuously.

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile



R. Girwidz 30

The diagram shows a circular wheel mounted on a central axle, supported by a grey stand. The wheel is divided into 12 radial segments. Red spheres, representing weights, are placed at the outer edge of each segment. The segments are arranged such that the weights are positioned to create an imbalance, with more weight on one side of the wheel at any given time, intended to cause it to rotate perpetually.

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwitz 31

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwitz 32

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwidz 33

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwidz 34

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwiz 35

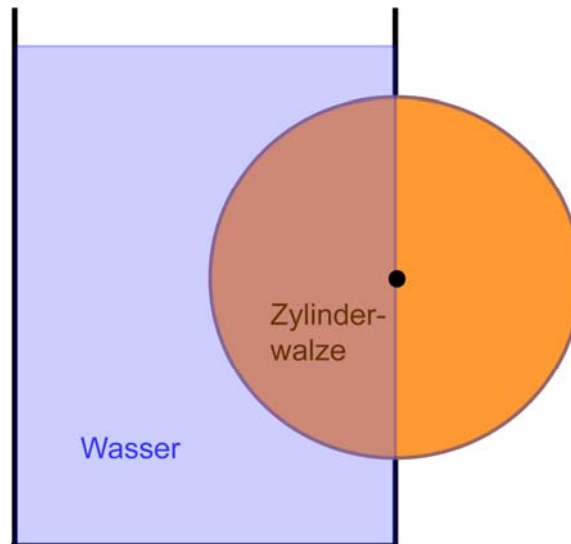
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN 4.6 Energiesatz der Mechanik

Perpetuum Mobile

R. Girwiz 36



Perpetuum Mobile

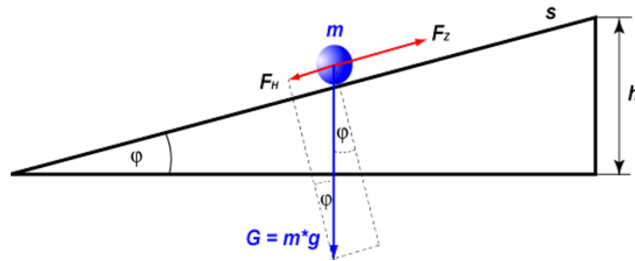


**Prinzip bei mechanischen Maschinen:
Durch Vergrößerung des Weges genügt
bei gleicher Arbeit eine geringere Kraft.**

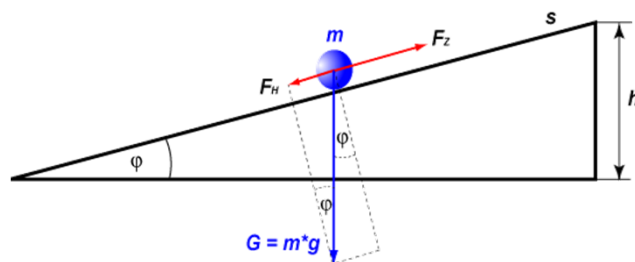
$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = konst$$



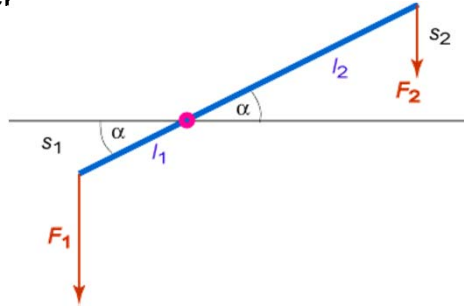
1. Beispiel: Schiefe Ebene



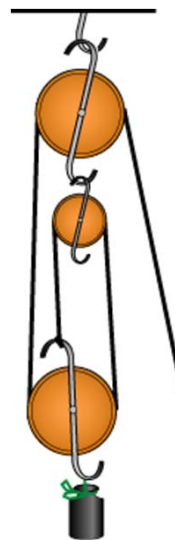
1. Beispiel: Schiefe Ebene



2. Beispiel: Hebel



3. Beispiel: Flaschenzug





Goldene Regel der Mechanik:

Für Maschinen gilt:

Was an Kraft „gewonnen“ wird, geht an Weg „verloren“