

*Vorweg sehr allgemein und für alle Bewegungen gültig:*

**Bewegung** ist Änderung des Ortes in Abhängigkeit von der Zeit  
 $\vec{s}(t)$  „wann wo in welche Richtung“.

In einfachen Fällen geradliniger Bewegung  $s(t)$  kann man die Abhängigkeit als Funktion und in einem s-t Diagramm darstellen.

Quantitativ beschreibt man diese Änderung mit der Größe **Geschwindigkeit**  
 $v = \Delta s / \Delta t$  ist die Durchschnittsgeschwindigkeit über den Zeitraum  $\Delta t$ .  
Für  $\Delta t \rightarrow 0$  erhalten wir die Momentangeschwindigkeit  $v(t)$ .

---

**Kräfte**  $\vec{F}(t)$  sind per Definition die Ursache der Änderung eines Bewegungszustandes.  
Diese Änderung nennen wir Beschleunigung  $\vec{a}(t)$ .

Experimente induzieren das **elementare Gesetz der Mechanik**  $\vec{F}(t) = m \cdot \vec{a}(t)$

Die große Erkenntnis von Galilei:

**Kräftefreie Körper bewegen sich konstant und geradlinig.**

Dies folgt zwingend aus dem Grundgesetz!

Die Einheit der Kraft:  $1\text{ N} = 1\text{ kgm/s}^2$

1N ist die Kraft, die eine Masse von 1kg in jeder Sekunde um 1m/s schneller macht.

Für den Alltag: 1 Liter Wasser hat ein Gewicht von ca. 10 N

---

Wir können die Natur mit **nur vier Grundkräften** beschreiben:

- Gravitation  $F = \gamma \cdot Mm/r^2$  mit der sog. Gravitationskonstante  $\gamma$
- Elektrische und magnetische Kräfte
- Starke Kraft (Zusammenhalt der Materie)
- Schwache Kraft (Instabilität der Materie)

---

Wie diese Kräfte wirken, ist auf unserem math. Niveau nicht beschreibbar und mit einfachen Denkmodellen nicht vermittelbar.

Betrachten wir ab jetzt *geradlinige Bewegungen*:

Mathematisch abstrakt ist

- die Momentangeschwindigkeit im  $s(t)$  – Diagramm Steigung der Tangente an die Kurve.
  - Die Beschleunigung Steigung der Tangente an die  $v(t)$ -Kurve
  - und der zurückgelegte Weg die Fläche zwischen  $v(t)$ -Kurve und Zeitachse.
- 

**Bei konstanten Kräften** folgt rein mathematisch aus diesem Gesetz  $F = ma$

Mit den Randbedingungen  
 $v = 0$  und  $s = 0$  bei  $t = 0$

$$s(t) = 0,5at^2 \quad \text{und} \quad v(t) = at$$

Speziell beim freien Fall:  $y(t) = 0,5gt^2$  und  $v(t) = gt$  mit Fallbeschleunigung  $g \sim 10 \text{ m/s}^2$   
Anm.: dies ist der Ortsfaktor  $g \sim 10 \text{ N/kg}$

---

Eine etliche tausend Jahre alte Erkenntnis:

**Man kann Kräfte mit sog. Kraftwandlern je vergrößern bzw. verkleinern.**

Typische Kraftwandler sind

- Schiefe Ebene
- Hebel
- Flaschenzug
- Hydraulik
- Getriebe

Allerdings: **es gibt keinen reibungsfreien Kraftwandler**

Konstruktionsgemäß verändert ein Kraftwandler den Kraftweg umgekehrt proportional zur Kraftübersetzung.

Mathematisch bleibt also das Produkt

**(effektive Kraft – Reibung) x Kraftweg konstant**

Dieses Produkt nennen wir **Arbeit**

Im Fall konstanter Kraft längs des Weges  $s$  ist daher Arbeit  $W = F \cdot s$

Die Einheit ergibt sich zu  $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Joule} = 1 \text{ J}$

Es gibt also für jeden Vorgang eine minimale Arbeit, die nicht unterschritten werden kann. Dies ist die sog. **Goldene Regel der Mechanik**.

In der Öffentlichkeit läuft dies unter der falschen Formulierung von der Unmöglichkeit eines „Perpetuum mobile“.

*Ein „perpetuum mobile“ ist der lat. Wortbedeutung nach etwas sich (ohne äußeren Einfluss) immerdar Bewegendes. Jedes Atom ist ein perpetuum mobile.*

*Hinweis: Ein Perpetuum mobile hat den Wirkungsgrad  $1 = 100\%$ .*

*Ein Kraftwandler hat stets einen Wirkungsgrad  $< 100\%$  !*

Mathematisch ist die Arbeit in einem  $F(s)$  – Diagramm die Fläche zwischen der  $f(s)$  – Kurve und der  $s$ - Achse !

In einfachen idealisierten Fällen kann man die Arbeit berechnen:

- Hubarbeit  $W = mgh$
- Beschleunigungsarbeit von Null auf  $v$  ]  $W = 0,5mv^2$
- Spannarbeit einer hook'schen Feder  $W = 0,5Dx^2$
- Erhöhen der inneren Energie  $Q = cm\Delta\theta$

Wir sind eine Leistungsgesellschaft: es interessiert, wie schnell ein Vorgang abläuft:

**Leistung = verrichtete Arbeit / Zeitbedarf** , als Formel  $P = \Delta W / \Delta t$

Die Einheit ist  $1 \text{ J/s} = 1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$

Formal ist eine **Wattsekunde** eine Arbeit !

Im Alltag benutzen wir häufig die **Kilowattstunde**  $1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$

---

Wir beschreiben die Qualität eines Kraftwandlers mit dem Begriff **Wirkungsgrad  $\eta$**

Damit bringen wir zum Ausdruck, wie viel Arbeit nutzlos wegen der Reibung u.a. Phänomene (Dehnarbeit für ein Seil, Erwärmen von Zahnrädern u.v.a.) verloren geht.

**Wirkungsgrad = effektive gewünschte Arbeit / gesamte Arbeit**

---

Ein zwar offenbare, aber erst vor 150 Jahren deutlich formulierte Tatsache:

Gegenstände, an denen Arbeit verrichtet wurde, können selber wieder arbeiten.

- Der Gegenstand, der gehoben wurde, kann durch sein Fallen Arbeit verrichten
- Die beschleunigte Masse kann einen Pfahl in den Boden rammen
- Das erhitzte Wasser kann etwas antreiben
- ...

**Diese Fähigkeit zu arbeiten, nennen wir Energie.**

Diese Fähigkeit kann unglaublich viele Formen annehmen:

- Relativbewegung
- Höhendifferenz
- Spannungszustand
- Elektrische Ladung
- Wärme
- Chemische Verbindungen
- Atomare Zustände

Und allen übergeordnet:  $E = mc^2$

Math. formal hat die Energie dieselbe Einheit wie die Arbeit, also 1 Joule.

---

Diese Formen sind insofern von unterschiedlicher Qualität, als die Umwandlung von alleine stets nur in einer Richtung erfolgt.

z.B. Lageenergie → kinetische Energie → elastische Energie → Wärme  
*Dieser Vorgang läuft von alleine nicht umgekehrt ab!*

---

Exakt 1842 formulierte der Mediziner Dr. Robert Julius Mayer als erster den  
**Energieerhaltungssatz:**

**In einem abgeschlossenen System (keine Wechselwirkung mit einem anderen System) ist die Summe aller Energien konstant.**

*Dieser Satz ist nach modernen Erkenntnissen in dieser Kürze nicht korrekt:*

*Die Energiesumme ist nur langfristig konstant!*

*Für unsere Betrachtungen und Berechnungen ist er aber anwendbar.*

*Es gibt ernsthafte Wissenschaftler, die diesen Satz grundsätzlich anzweifeln . . .*

Ebenso bedeutsam ist der sog. **2. Hauptsatz der Thermodynamik:**

Vorgänge laufen von alleine nur so ab, dass „hochwertige Energie in minderwertige“ verwandelt wird.

Jeder Vorgang in einem abgeschlossenen System vermehrt minderwertige Energie auf Kosten der hochwertigen.

---

Aus der (physikalisch besseren) Perspektive der Energie  
ist Arbeit die Umwandlung von einer Energieform in eine andere.

---

Mit Hilfe des Begriffs Energie kann man den Wirkungsgrad elegant beschreiben.

**Wirkungsgrad eines Vorgangs = beabsichtigte Arbeit / Energieänderung.**

Etwas schlampig formuliert: Wirkungsgrad = Nutzarbeit / Energieaufwand

Vorsicht: „Nutzarbeit“ und sogar mitunter „Energieaufwand“ sind interpretierbar.  
So kann es sein, dass Vorrichtungen wie Gasthermen oder Wärmepumpen mit Wirkungsgraden über 100 % angepriesen werden.

**Ein Wirkungsgrad > 100 % ist wider den Energieerhaltungssatz!**

- Thermodynamische Motoren haben physikalisch bedingt Wirkungsgrade unter 60%
- Solarzellen mit derzeitiger Technik theoretisch bis 30 %, real aber im Bereich 5 %
- Unsere Autos unter 25 %
- Fahrräder knapp unter 100 %
- Generatoren über 90 %
- Gas- und Ölthermen über 90 %
- Die Photosynthese ca. 6 %

*Was die Bastler des Mittelalters bauen wollten, war im strengen Sinn kein Perpetuum mobile, sondern eine Maschine mit Wirkungsgrad > 100 %.*