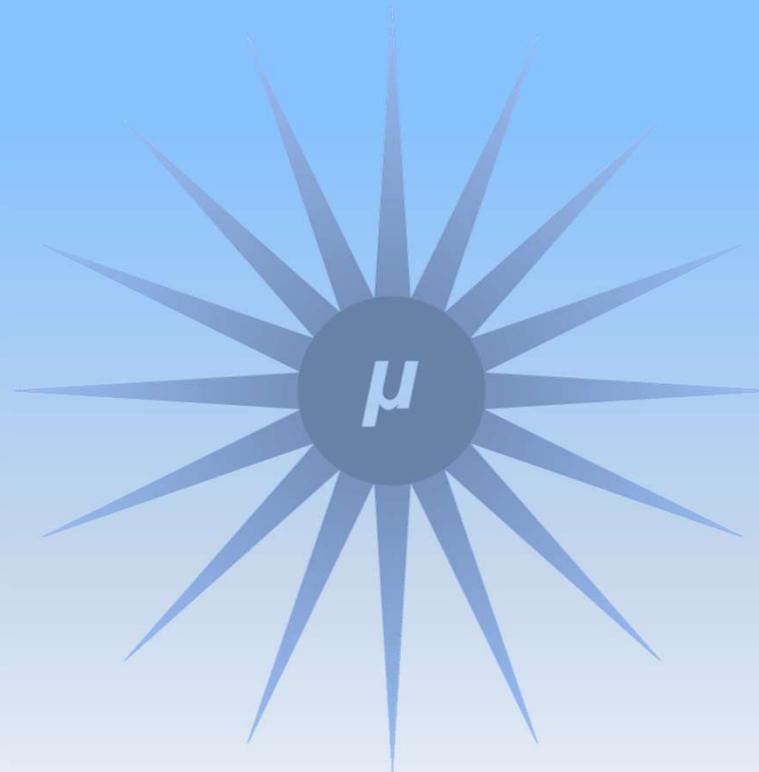


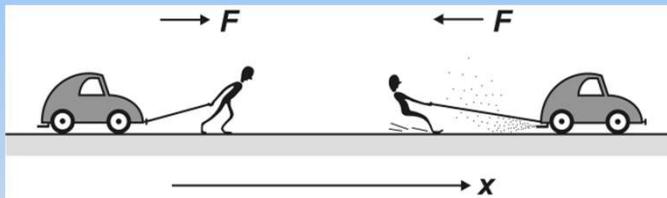
3. Energie



Zur Energie auf indirektem Wege

Einführung der Größe **Energie** fast immer *indirekt* über die mechanische Arbeit

Beziehung „Arbeit = Kraft · Weg“ gleichsam Eingangstor: sie besagt, dass man viel Arbeit *verrichten* muss, wenn man mit großer Kraft etwa gegen einen starken Widerstand einen langen Weg zurücklegen will (etwa beim Abschleppen eines Wagens z.B. auf sandiger Bahn)



aus Sicht des beteiligten Menschen:
Kraft in x -Richtung links positiv, $F_x = F$,
und rechts negativ, $F_x = -F$

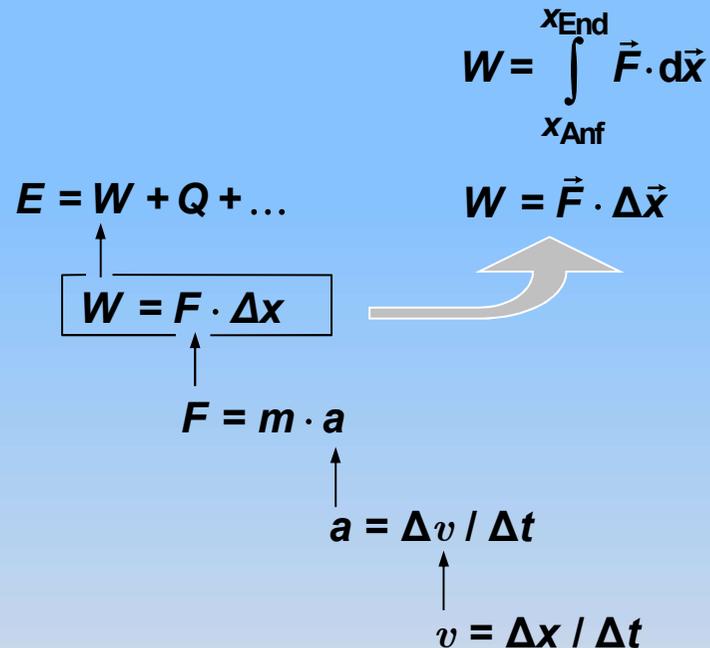
von ihm verrichtete Arbeit $W = F_x \cdot \Delta x$ links positiv, rechts negativ

aus Sicht des Fahrzeugs bekommen alle Kräfte und Arbeiten das entgegengesetzte Vorzeichen

Einheit für Arbeit, **Joule** (J), entspricht dem Produkt aus Kraft- und Längeneinheit, $\text{N m} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$

Zur Energie auf indirektem Wege

Weg zum Begriff der Arbeit führt über mehrere Stufen



Kraft F ebenfalls *indirekt* definiert
 (= Masse m · Beschleunigung a),
 dasselbe gilt für *Beschleunigung* a
 (= Geschwindigkeitszuwachs Δv /
 Zeitspanne Δt)
 und *Geschwindigkeit* v
 (= zurückgelegte Wegstrecke Δx /
 Zeitbedarf Δt dafür)

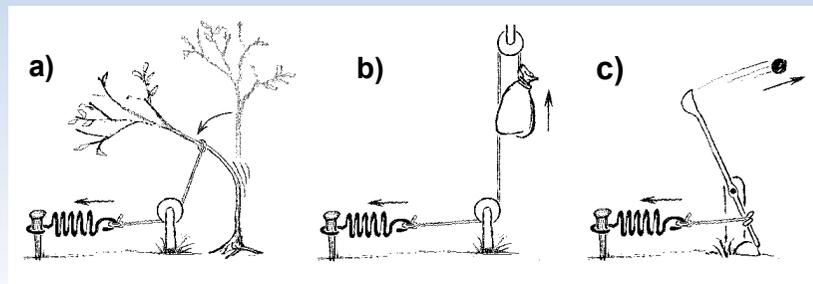
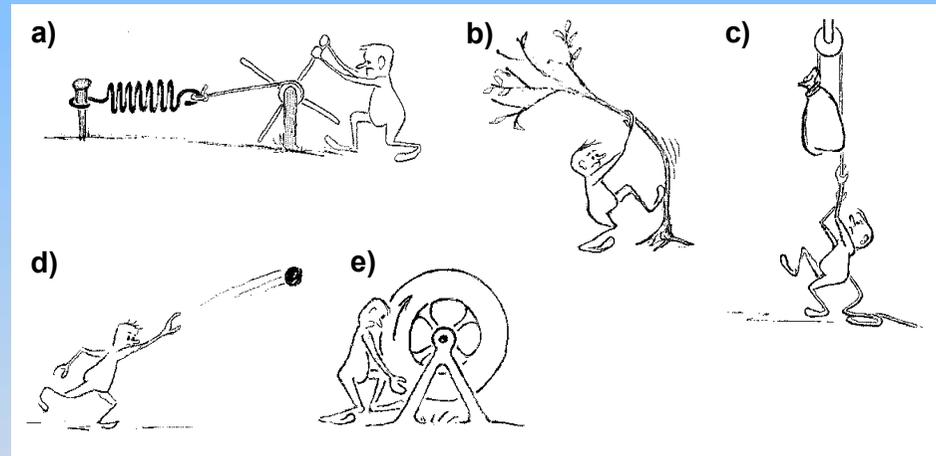
mechanische Arbeit nur eine Form der Energiezufuhr, neben der auch andere Formen vorkommen, als wichtigste gilt die *Wärme*
 Bezeichnung Energie Überbegriff für diese verschiedenen Formen, eigenes Formelzeichen, meist E , aber auch U , H , G usw., Einheit wiederum Joule

Direkte Metrisierung der Energie

Umgehung dieser verschachtelten Herleitung durch Einführung der Energie über *direkte* Metrisierung

zunächst Charakterisierung des Begriffes anhand typischer, leicht beobachtbarer Eigenschaften

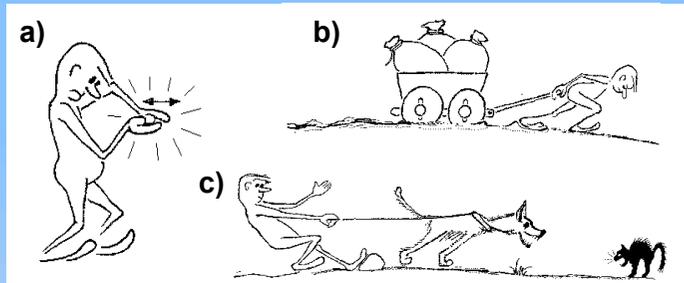
fast alles, was wir tun, ist mit *Mühe* und *Anstrengung* verbunden, besonders deutlich, wenn die Mühe so groß ist, dass wir ins Keuchen und Schwitzen geraten



aufgewandte Mühe nicht einfach verloren, sondern nutzbar, um andere anstrengende Tätigkeiten zu verrichten; sie ist in den veränderten Dingen gleichsam *gespeichert*

Verlorene Mühe

wir kennen nun aus dem Alltag schweißtreibende Tätigkeiten, bei denen alle Mühe scheinbar verloren geht



wir reiben z. B. angestrengt unsere Hände, sie werden warm, aber mit der Wärme unserer Hände allein können wir keinen Sack heben

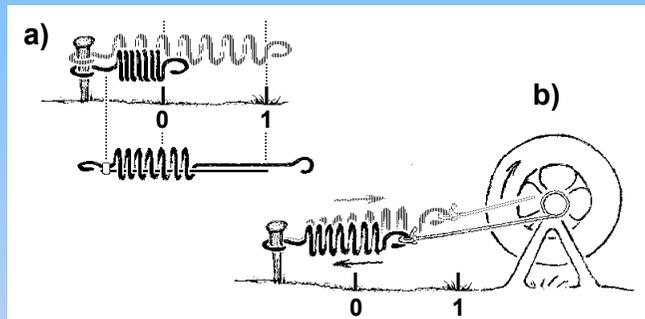
aufgebrachte Mühe entzieht sich zwar einer Wiederverwendung, sie verschwindet aber nicht spurlos

nicht nur *wir* sind erhitzt, sondern auch Dinge in unserer Umgebung wie die geriebenen Handflächen; Erwärmung umso ausgeprägter, je mehr Mühe verschwendet wird (charakteristische Spur, welche die verlorene Mühe hinterlässt)

d.h. ein Teil unserer Mühe dient nicht dem beabsichtigten Zweck, sondern geht für ungewollte Nebentätigkeiten verloren (wie Reibung)

Mühe messen

**objektives Maß für die aufgewandte Mühe wünschenswert
benötigte Einheit (wie z. B. im Fall der Längeneinheit) im Prinzip
willkürlich wählbar, z.B. irgendeine Schraubenfeder**

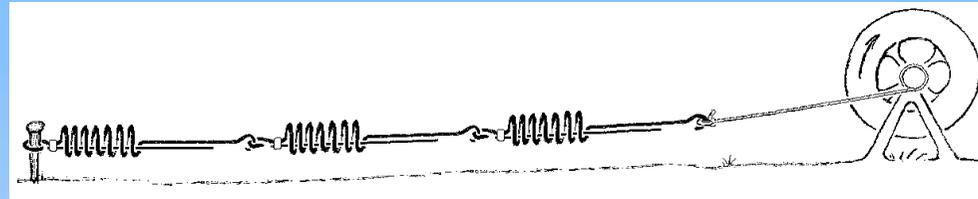


**Lage des Feder-Endes
im entspannten Zustand: Skalenwert 0,
im gespannten Zustand: Skalenwert 1**

**mit gedehnter Einheitsfeder Schwungrad anwerfbar; in der Feder
gespeicherte Mühe jetzt im wirbelnden Rad; von dort wieder in
ursprüngliche Feder oder in eine andere Feder zurückbeförderbar
Spiel ließe sich im Prinzip beliebig wiederholen und variieren, doch
zehren Luft- und Lagerreibung gespeicherte Mühe allmählich auf;
vorerst wollen wir jedoch von diesem Problem absehen**

Energie

Mühe messen nichts anderes als einfach zu zählen, in wie viele Einheitsportionen sie sich aufteilen lässt, z.B. Zählen der Einheitsfedern, die sich damit spannen lassen



durch dieses Verfahren eingeführte Größe nennen wir **Energie**
 bessere Möglichkeit, die Energieeinheit zu verkörpern: z.B. Energie eines Photons, das bei bestimmtem Übergang eines H-Atoms von einem Zustand in anderen ausgesandt wird (z.B. von 2p in 1s)

(vergleiche auch Definition der Längeneinheit Meter von 1960: Ein Meter ist das 1.650.763,73-fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids ^{86}Kr beim Übergang vom Zustand $5d^5$ zum Zustand $2p^{10}$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung)

Energie

je nach Anwendungszweck für die Größe Energie verschiedene Formelzeichen in Gebrauch: E , W , U , Q , H , G ,, wir verwenden hauptsächlich W

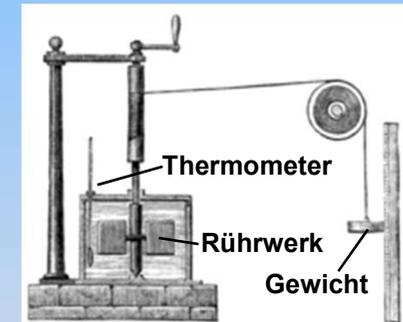
Fazit:

Größe W durch *direkte Metrisierung* des umgangssprachlichen Begriffes *Mühe* eingeführt; sie präzisiert und quantifiziert also, was wir im Alltag *Mühe* nennen, ein Begriff, der sich auf eine Tätigkeit bezieht, aber auch den Vorrat davon bezeichnet, der in einem verformten, bewegten, ... Gegenstand *gespeichert* ist

Energieerhaltung

eine der bedeutendsten Erkenntnisse der Physik des 18. und 19. Jahrhunderts: Energie kann weder aus dem Nichts erzeugt werden noch geht sie jemals wirklich verloren, verschwindet also im Nichts doch schien aufgewandte Mühe in Reihe von Beispielen verloren zu gehen, dies war jedoch stets von einer Wärmeentwicklung begleitet

Joule-Apparat: absinkendes Gewichtsstück versetzt Rührwerk in Rotation, in Kalorimeter befindliches Wasser von Schaufeln erwärmt und Temperaturerhöhung gemessen

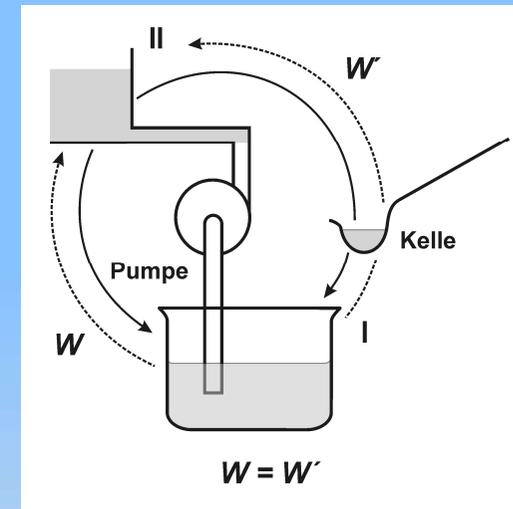


d.h. es kostet bestimmte Menge an Energie, um einen Körper, gewollt oder ungewollt, zu erwärmen; zählt man Verbrauch dafür mit, dann bleibt gesamter Vorrat an Energie unverändert, sie kann also nur von einem Speicher in einen anderen verlagert werden:

„**Satz von der Erhaltung der Energie**“ oder kurz **Energiesatz**

Energieerhaltung

aus Energiesatz folgt, dass aufgewandte Energie unabhängig vom Wege und benutzten Hilfsmitteln sein muss, sonst könnte, indem man Energie auf einem Wege hin- und auf einem anderen wieder „zurückbefördert“, Energie aus dem Nichts erzeugt werden oder im Nichts verschwinden im Widerspruch zum Energiesatz



viele mit Erwärmung verbundene Vorgänge lassen sich nicht ohne weiteres umkehren, Energie ist zwar nicht verschwunden, aber doch irgendwie unserem Zugriff entzogen

Druck

Wasser in einen Druckbehälter, z.B. eine Gummiblase, zu pressen, kostet Energie, Behälter widersetzt sich einer Zunahme ΔV des darin enthaltenen Wasservolumens V , was sich als Gegendruck äußert



⇒ Energieaufwand ΔW , bezogen auf gleichen Volumenzuwachs ΔV , Maß für diesen Druck

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = p \quad \text{oder genauer} \quad \frac{dW}{dV} = p$$

Beispiel aus Hydraulik, wobei Wasser als *nicht komprimierbar* betrachtet wird

Druck

einen elastischen, *komprimierbaren* Körper, z. B. einen Gummiball, zusammenzudrücken, kostet Energie; Volumen V nimmt um so stärker ab, je stärker man von allen Seiten presst



Aufwand dW , um eine kleine Volumenänderung $-dV$ zu erzwingen, nimmt dabei zu, je stärker der Körper bereits verdichtet ist, oder genauer gesagt, der Quotient $dW/(-dV)$ wächst mit abnehmendem V . Körper widersetzt sich zunehmend der Verdichtung, was sich in wachsendem Gegendruck p äußert.

Maß für diesen Druck – ähnlich wie in der Hydraulik – ist der Quotient

$$p = -\frac{dW}{dV}$$

Druck

aufgewandte Energie beim Entspannen rückgewinnbar, aus der Änderung der im Körper enthaltenen Energie W kann nicht ohne weiteres auf zur Volumenänderung nötigen Anteil geschlossen werden, dazu müssten alle übrigen Pfade, über die Energie ein- oder austreten kann, z. B. über Änderungen weiterer Größen q, r, \dots , $W(V, q, r)$, gesperrt sein, d. h. q, r, \dots sind konstant zu halten:

$$p = - \left(\frac{\partial W}{\partial V} \right)_{q, r, \dots}$$

p identisch mit üblicherweise als flächenbezogene Kraft eingeführten Größe, $p = F/A$

SI-Einheit des Druckes: $\text{J m}^{-3} = \text{N m}^{-2} = \text{Pa}$

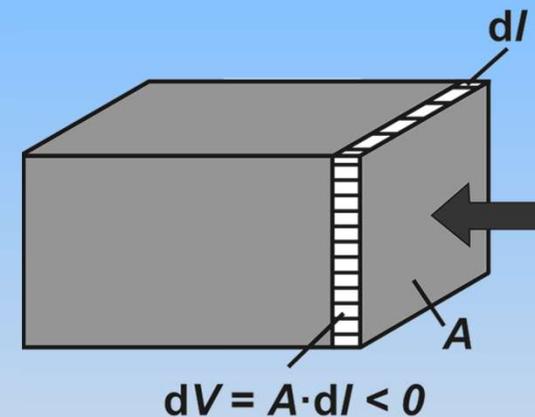
gebräuchliche Alltagseinheit: $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Energie zur Volumenveränderung

umgekehrt kann aber auch mittels der vorgestellten Formel auf für eine Volumenänderung erforderliche Energie geschlossen werden

$$dW = -pdV$$

auch ein Gas, z. B. in einem Zylinder mit beweglichem Kolben, kann als elastischer „Körper“ aufgefasst werden



es braucht noch nicht einmal tatsächlich ein Kolben vorhanden zu sein: expandiert ein Gas, das sich im Zuge einer Reaktion bildet, so können wir uns die Grenzfläche zwischen expandierendem Gas und umgebender Luft als stellvertretend für den Kolben vorstellen

Energie eines bewegten Körpers

in einem bewegten Körper steckende Energie auf analoge Weise herleitbar, wir erhalten schließlich

$$W(v) = \frac{1}{2}mv^2$$

auch als *kinetische Energie* W_{kin} bezeichnet

in einem gehobenen Körper (bzw. im Schwerfeld) gespeicherte, sog. *potenzielle Energie* W_{pot} ergibt sich zu

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot (h_0 - h)$$

Beispiel: fallender Gummiball

Summe beider Beiträge gemäß dem Energiesatz konstant, solange keine Energie anderweitig abgezweigt wird, etwa beim Aufprall oder beim Fall in der Luft:

$$W_{\text{kin}} + W_{\text{pot}} = \frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{const.}$$

