

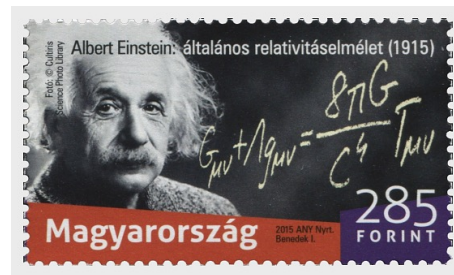
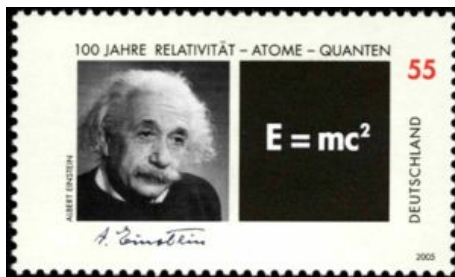
Grundlagen: Arbeit und Energie

Teil 1: Die Definition von Arbeit und Energie

1 Vorbemerkungen

Umgangssprachlich verstehen wir unter Arbeit alles, was mit einer gewissen Anstrengung verbunden ist. Je mehr Anstrengung, desto mehr Arbeit. Das kann z. B. körperliche Arbeit sein: "Ein Vater und seine Tochter ziehen einen mit Sand gefüllten Karren einen Meter weit: dann hat der Vater weniger Arbeit geleistet, als die Tochter, da er kräftiger ist".^(a) Es kann sich dabei auch um die Arbeit beim Nachdenken über eine Aufgabe sein, z. B. das Nachdenken darüber, wie man Arbeit physikalisch sinnvoll definiert.

Mit der Arbeit direkt verbunden ist der Begriff der Energie. Spätestens seit der Relativitätstheorie Albert Einsteins ist die Energie ein zentraler, wenn nicht sogar der zentrale Begriff der Mechanik und damit verknüpfter Phänomene.



Dabei erklärt die Gleichung im linken Bild, dass die Masse m eines Körpers direkt mit der in ihm "gespeicherten Energie" E zusammenhängt.

Die Gleichung im rechten Bild geht da noch weiter: sie beschreibt, wie die Energie und damit die Materie, die beide im Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ codiert sind, die Raumzeit "krümmt". Diese Geometrie der Raumzeit ist in der Raumzeitmetrik $g_{\mu\nu}$, der daraus resultierenden Krümmung $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$ und der kosmologischen Konstante Λ codiert.

Adresse: Eduard-Spranger-Berufskolleg, 59067 Hamm
E-Mail: mail@frank-klinker.de

^(a)Nicht nur, dass beide die selbe Arbeit geleistet haben, sie haben auch genauso viel Kraft aufgewendet!

2 Die Definition der Arbeit

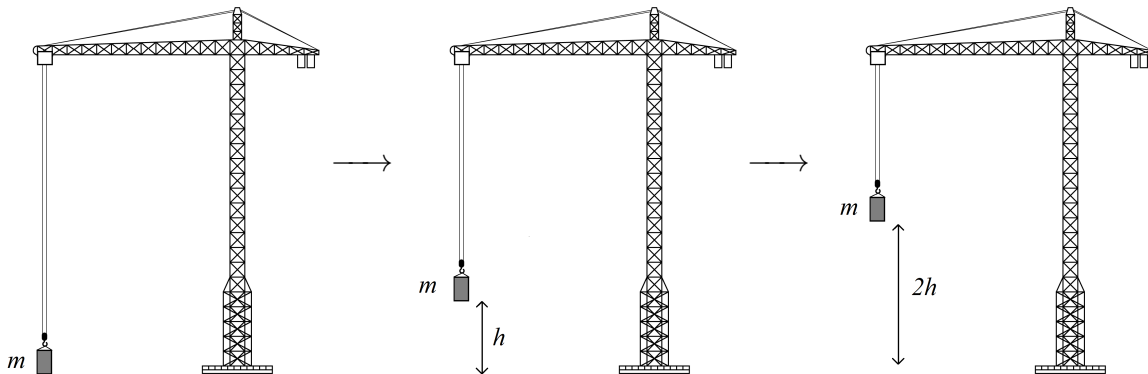
2.1 Ein Gedankenexperiment und die Definition der Arbeit

Wir verabreden zunächst, dass wir die physikalische Arbeit mit dem Symbol W bezeichnen wollen.

Wir überlegen uns nun, wie wir die geleistete Arbeit messen wollen. Dabei hilft uns der Alltag, wo wir wissen, dass z. B. die geleistete Arbeit eines Autos mit Hilfe des Benzinverbrauchs gemessen wird.

Dazu sehen wir uns das folgende Gedankenexperiment an:

- Ein Kran hebt eine Last m um eine gewisse Höhe h an. Dabei verbraucht er eine feste Menge Benzin.
- Nun hält er die Last indem er die Hubvorrichtung einrastet. Dazu wird kein Benzin benötigt.
- Hebt der Kran die Last nun um die gleiche Höhe h weiter an, so verbraucht er abermals die vorherige Menge Benzin.

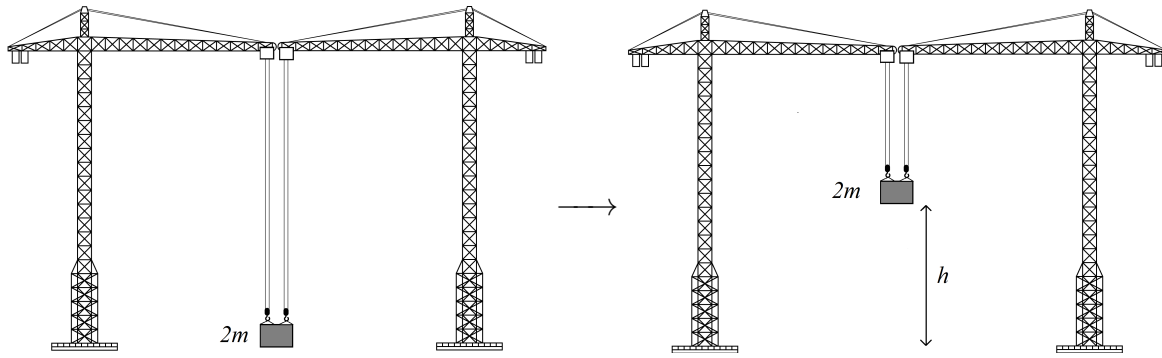


Das heißt: "doppelter Weg bedeutet doppelte Arbeit". Etwas physikalischer formuliert sagen wir: " W ist proportional zu h " oder

$$W \propto h.$$

Wir erweitern unser Gedankenexperiment nun dahingehend, dass wir die Last verändern:

- Wir verdoppeln die Masse und damit die Kraft, die auf den Kran wirkt.
- Um den Benzinverbrauch mit dem von oben vergleichen zu können, heben wir die doppelte Masse $2m$ mit Hilfe zweier identischer Kräne an. Wegen der Kraftaddition, muss nun jeder einzelne Kran die Kraft $F = mg$ aufwenden.
- Heben die Kräne nun die Last um die Höhe h an, so verbrauchen beide gleich viel, nämlich jeweils so viel, wie ein Kran für das Anheben der Last m benötigt hätte.



Das heißt: "doppelte Last bedeutet doppelte Arbeit". Etwas physikalischer formuliert sagen wir: " W ist proportional zu F " oder

$$W \propto F.$$

Insgesamt ist die Arbeit also proportional zum zurückgelegten Weg und proportional zur Kraft, die wirkt. Damit ist die Arbeit proportional zum Produkt aus Kraft und Weg:

$$W \propto F \cdot h.$$

Das erheben wir nun zu einer Definition der (mechanischen) Arbeit:

Wirkt auf einen Körper eine Kraft F und legt der Körper dadurch einen Weg s zurück, so definieren wir die verrichtete Arbeit als

$$W = F \cdot s.$$

Bei der Anwendung dieser Definition müssen wir immer die Voraussetzungen beachten, die wir in unserem Gedankenexperiment gemacht haben:

1. Die Kraft muss konstant sein, also $F = \text{const.}$
2. Der zurückgelegte Weg muss in Kraftrichtung gemessen werden, also $\vec{F} \parallel \vec{s}$

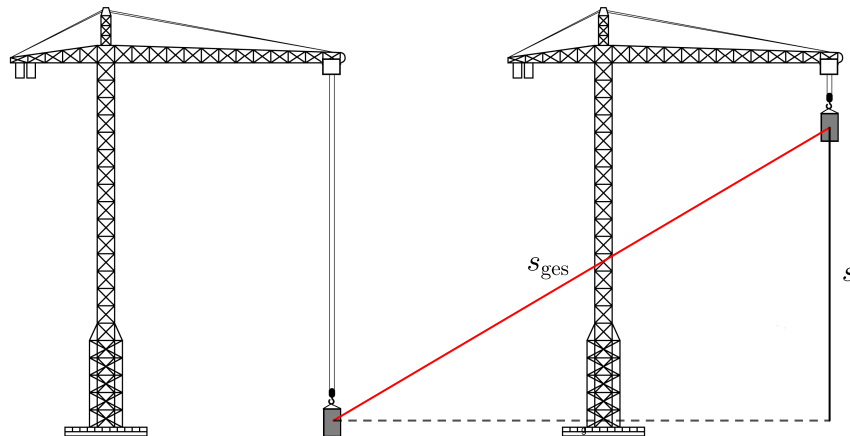
Beispiel 1. Wir sehen uns einen idealisierten Kran an, der reibungsfrei auf Schienen fährt. Somit ist keine Kraft nötig, um ihn von einem Ort zum anderen zu bewegen.

Dieser Kran bewegt nun eine Last von einem Ort zu einem anderen, wobei er die Last anhebt und gleichzeitig vorwärts fährt. Der zurückgelegte Weg der Last ist somit der rot eingezeichnete Weg s_{ges} .

Da die Fahrt jedoch keine Kraft benötigt, wird dabei keine Arbeit verrichtet.

Der Weg, der zur Berechnung der Arbeit verwendet werden muss, ist also der Hubweg s , der in Richtung der wirkenden Gesamtkraft zeigt. Diese besteht hier nämlich lediglich aus der Gewichtskraft F_G der Last.

Die Arbeit bei der Kombination aus Fahren und Heben ist in diesem Fall die gleiche wie bei der Trennung von Heben und Fahren.



2.2 Die Einheit der Arbeit

Gemäß der obigen Definition ist die Arbeit W eine zusammengesetzte Größe: sie ist das Produkt aus den Größen Kraft F und Strecke s ,

$$W = F s .$$

Da die Arbeit eine sehr wichtige physikalische Größe ist, erhält sie eine eigene Einheit, das **Joule** mit dem Einheitensymbol J , also

$$[W] = J .$$

Kraft und Strecke haben die Einheiten $[F] = N = \frac{kg\ m}{s^2}$ und $[s] = m$.

Damit setzt sich wegen $[W] = [Fs] = [F][s]$ die Einheit der Arbeit wie folgt zusammen:

$$[W] = J = Nm = \frac{kg\ m^2}{s^2} .$$

3 Energie als gespeicherte Arbeit – Arbeit als Energiedifferenz

Woher kommt nun die Arbeit, wenn wir z. B. eine Last anheben? Wir haben Sie ja "verbraucht"? Kann man sagen, dass die Last diese Arbeit "aufgenommen" hat?

Und was ist, wenn die Last wieder abgelassen wird? Gibt sie die Arbeit wieder ab, und der Kran nimmt sie auf?

Sehen wir uns den Kran, der die Last um die Strecke h anhebt, nochmal genauer an: Zum Anheben muss der Kran die Gravitationskraft $F_K = F_G$ nach oben auf die Last ausüben und hat danach die Arbeit $W = F_G h$ an der Last verrichtet. Wegen des

dritten Newtonschen Gesetzes wirkt auf die Last eine gleichgroße Gegenkraft nach unten, nämlich die Gravitationskraft selbst: $F_L = -F_G$. Damit leistet umgekehrt die Last am Kran die Arbeit $W = -F_G h$, welche negativ ist.

Somit ist die obige Sichtweise im Wesentlichen korrekt; nur nennt man diese "gespeicherte Arbeit" Energie:

Energie (I)

- Die **Energie** E eines Körpers oder eines physikalischen Systems ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten. Die Arbeit ist dann die Änderung der Energie. Ist die Energie vor Beginn und nach Ende der Verrichtung der Arbeit E_a und E_e , dann ist

$$W = E_a - E_e .$$

Wir wissen aus dem Alltag, dass neben der reinen Umsetzung von Energie in mechanische Arbeit noch "Energieverluste" eine Rolle spielen. Es handelt sich hier jedoch nicht um Energieverluste in dem Sinne, dass tatsächlich Energie verloren geht.

Die "fehlende" Energiedifferenz steht nur nicht als mechanische Arbeit zur Verfügung sondern wird in Wärme(energie) und elektromagnetische Strahlung(senergie) umgesetzt, siehe dazu auch die Ausführungen in Abschnitt 5 von Teil 2.

Energie (II)

- Ändert ein Körper seine Energie, so gibt er neben der Umsetzung in mechanische Arbeit W , Energie auch in Form von Wärme und elektromagnetischer Strahlung ab:

$$E_a - E_e = W + E_{\text{Wärme}} + E_{\text{EM-Strahlung}} .$$

- Als Maß für die Fähigkeit eines Systems^(b) seine Energiedifferenz in mechanische Arbeit umzusetzen nutzt man den **Wirkungsgrad** η . Dieser ist definiert als Quotient der Energiedifferenz des Systems und der damit verrichteten mechanischen Arbeit:

$$\eta = \frac{E_a - E_e}{W} .$$

Er nimmt stets Werte zwischen Null und Eins an. Je kleiner dieser Wert, desto mehr Energie geht durch Wärme oder Strahlung verloren; je größer der Wert ist, desto mehr Energie steht zur Verrichtung mechanischer Arbeit zur Verfügung.

^(b)Ein solches System kann etwa eine mechanische Maschine oder ein Verbrennungsmotor sein.