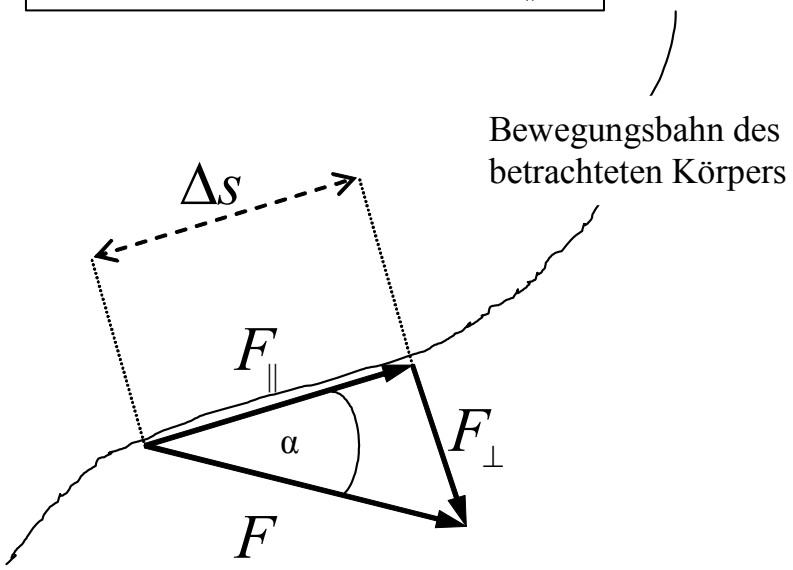
3. Energie

Der im Prinzip zentralste Begriff für alle Bereiche der Physik ist der Energiebegriff. Wie in den beiden vorigen Kapiteln schon angedeutet wurde, hat sich die moderne Physik aus der Mechanik heraus entwickelt, da sie der menschlichen Erfahrung am leichtesten zugänglich ist. Der Energiebegriff wurde daher ebenfalls aus der Mechanik heraus entwickelt, wobei man ursprünglich Ausdrücke wie „vis viva“ (lat.: Lebenskraft) verwendete. Der „Energieinhalt“ eines physikalischen „Systems“ kann zunächst als Maß dafür gelten, wie viel mechanische Arbeit das System leisten kann bzw. wie viel Arbeit ihm zugeführt wurde.

Eine bestimmte Menge Energie in Form von mechanischer Arbeit ΔW (*work*) muss immer dann aufgebracht werden, wenn ein Körper <u>entlang</u> einer von aussen auf ihn einwirkenden Kraft F um eine Wegstrecke Δs bewegt wird und ist folgendermaßen definiert:

$$\boxed{\Delta W = (F\cos\alpha)\Delta s = F_{\parallel}\Delta s}$$



Es spielt also nur diejenige Komponente der einwirkenden Kraft eine Rolle, die parallel zur Bewegungsrichtung des betrachteten Objektes liegt. (Welches Vorzeichen hat ΔW, wenn die Bewegungsbahn von rechts nach links bzw. umgekehrt durchlaufen wird?)
Unter diesen Voraussetzungen kann man einfach sagen:

Arbeit = Kraft * Weg

Das entspricht der Erfahrung, dass ich um so mehr arbeiten muss, je länger z.B. die Treppe ist, die ich einen Koffer rauftragen will.

Wenn die Kraft entlang der Bewegungskurve nicht konstant ist (z.B. weil sich die Bewegungsrichtung bezüglich der Einwirkungsrichtung der Kraft ändert, vergl. obige Zeichnung), dann muss man korrekterweise

$$dW = F_{\parallel} ds$$

schreiben, weil die Kraftkomponente $F_{\parallel}$ nur noch entlang der „unendlich kleinen“ Wegstrecke $\boldsymbol{ds}$ als konstant gelten kann. Die gesamte enlang eines bestimmten Weges verrichtete Arbeit wäre dann

$$W = \int_{Start}^{Ziel} F_{\parallel}(s)\, ds \quad ,$$

wobei der Sonderfall der ortsunabhängig konstanten Kraft wieder enthalten ist und zu

$$W = \int_{\text{Start}}^{\text{Ziel}} F_{\parallel}\, ds = F_{\parallel} \int_{\text{Start}}^{\text{Ziel}} ds = F_{\parallel}(s_{Ziel} - s_{Start})$$

führt. Hebt man z.B. einen Gegenstand der Masse $\boldsymbol{m}$ auf eine Höhe $\boldsymbol{h}$ an, so muss man dabei Arbeit gegen die (konstante) Gravitationskraft leisten. Ich muss also Energie in den Hub-Prozess hineinstecken, welche mir selbst hinterher „fehlt“. Daher ist das Vorzeichen negativ:

$$W_{Hub} = -F_G h = -mgh$$

Lässt man den Gegenstand danach **<u>die gleiche Strecke h</u>** wieder herunterfallen, muss sozusagen die Gravitation bei der Beschleunigung des Gegenstandes Arbeit entgegen dessen Trägheitskraft leisten:

$$W_{Fall} = F_{Trägheit} h = mah$$

Genau so gut hätte ich auch schreiben können

$$W_{Fall} = mgh \quad ,$$

denn die Trägheitskraft ist in diesem Fall ja gerade die Gegenkraft zur Gravitationskraft, unterscheidet sich von dieser also nur in der Richtung (Vorzeichen!). Das bedeutet:

$$W_{Fall} + W_{Hub} = 0$$

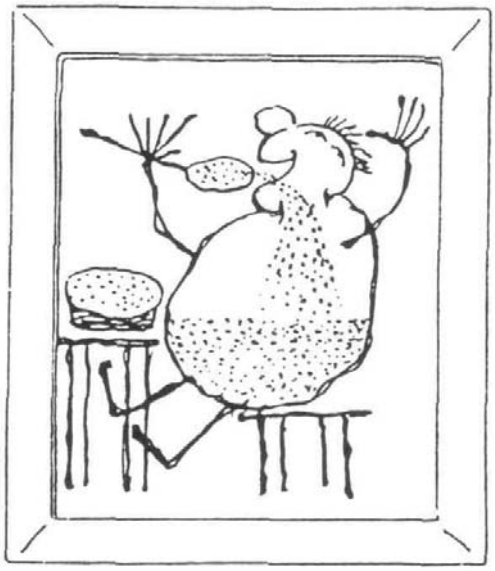
Dies lässt sich folgendermaßen interpretieren:
Die Energie, die man in Form von Hubarbeit ja eigentlich an das Gravitationsfeld der Erde abgegeben hat, gibt dieses in Form von Bewegungsenergie wieder an den herabfallenden Gegenstand zurück.

Dieses Beispiel zeigt im Prinzip bereits, warum der Energiebegriff eine zentrale Rolle spielt. Jedes physikalische **System** hat zu jedem Zeitpunkt einen ganz bestimmten Energieinhalt, welcher auch seine **Innere Energie** genannt wird. Es spielt dabei keine Rolle, ob ich als System einen einzelnen Gegenstand (im Extremfall ein Elementarteilchen) oder eine Ansammlung von Gegenständen (im Extremfall das Universum) oder sonst etwas (z.B. das Gravitationsfeld der Erde) betrachte. Den absoluten Wert der Inneren Energie eines Systems kenne ich in der Regel zwar nicht. Wenn ein System aber einen **Prozess** durchläuft (z.B. ein Gegenstand wird hochgehoben und wieder fallengelassen) und dabei Energie mit einem anderen System **austauscht**, kann ich für die ausgetauschte Energie eine **Energiebilanz** aufstellen, welche immer ausgeglichen sein muss (Menge der von System A abgegebenen Energie = Menge der System B zugeführten Energie). Energie wird also niemals „vernichtet“ oder „erzeugt“, sie wird immer nur zwischen Systemen ausgetauscht, und zwar in ganz bestimmten **Energieformen**, die den ablaufenden Prozess charakterisieren (z.B. Hubarbeit und Bewegungsenergie). Dabei ändert sich dann die Innere Energie der beteiligten Systeme jeweils entsprechend der **Energiemenge**, die ein System aufnimmt oder abgibt. - Die Innere Energie eines Systems liegt dagegen nicht in verschiedenen Energieformen vor, sie ist so etwas wie ein Reservoir undefinierter Form und Größe.

Insbesondere bleibt folgendes festzuhalten für den Umgang mit der physikalischen Größe „Energie“:

- Energie ist eine mengenartige Größe, sozusagen eine Art Stoff.
- Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sondern
- Energie wird nur zwischen Systemen ausgetauscht, und zwar in ganz bestimmten Energieformen, die den jeweiligen Austauschprozess charakterisieren.

Die Mengenartigkeit wird sehr schön von folgender Darstellung von Wilhelm Busch verdeutlicht, wenn man Energie durch Hafergrütze ersetzt.



Hier thront der Mann auf seinem Sitze
Und ißt z. B. Hafergrütze.
Der Löffel führt sie in den Mund,
Sie rinnt und rieselt durch den Schlund,
Sie wird, indem sie weiterläuft,
Sichtbar im Bäuchlein angehäuft. —

So blickt man klar, wie selten nur,
Ins innre Walten der Natur. —

(*Abbildung aus Falk/Ruppel, Energie und Entropie)*

Welches sind nun die verschiedenen Energieformen, in denen Systeme in den von der Physik behandelten Prozessen Energie austauschen?

1.) Verschiebungsenergie

Diese Energieform wurde bereits am Anfang des Kapitels vorgestellt. Wenn ich einen Gegenstand in einem äusseren Kraftfeld verschiebe, ist dafür die Arbeit

$$W = \int_{Start}^{Ziel} F_{\parallel}(s)\, ds$$

nötig. Ein Spezialfall hiervon ist die Hubarbeit im Gravitationsfeld der Erde. Statt von der Hubarbeit, die man in das Gravitationsfeld steckt, kann man auch von der ***potentiellen Energie*** **(*E_{pot}*)** sprechen, die ein Gegenstand gewinnt (positives Vorzeichen!) wenn man ihn um eine Höhe ***h*** anhebt:

$$\boxed{E_{pot} = mgh}$$

Der Ausdruck kommt daher, dass der Gegenstand beim Anheben potentiell in die Lage versetzt wird, hinterher wieder runterzufallen und dabei z.B. nutzbare mechanische Arbeit zu leisten.

2.) Kinetische Energie

Ein anderer Ausdruck für Bewegungsenergie. Sie wird einem Körper von dem Verursacher einer äusseren Kraft zugeführt/entzogen, wenn diese ihn beschleunigt/abbremst. Für den allgemeinen Fall einer zeitabhängigen Beschleunigung ***a(t)*** muss ich hier wieder schreiben:

$$dE_{kin} = F_{Beschl.}\,ds = ma\,ds = m\frac{dv}{dt}ds =$$

ist hier mathematisch erlaubt!

$$= \quad m\frac{ds}{dt}dv = mv\,dv$$

Dann gewinnt ein Körper folgende Menge an kinetischer Energie, wenn er von einer Geschwindigkeit v_1 auf eine Geschwindigkeit v_2 beschleunigt wird:

$$E_{kin} = \int_{v_1}^{v_2} mv\,dv = m\int_{v_1}^{v_2} v\,dv = \frac{m}{2}\left[v_2^2 - v_1^2\right]$$

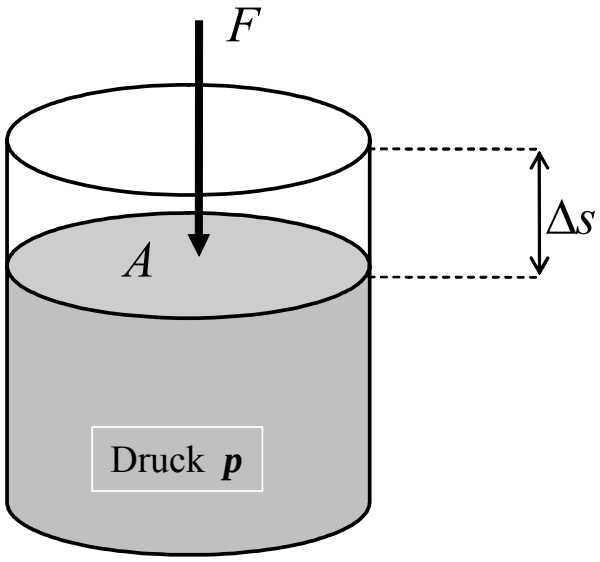
Oder wenn der Körper einfach von der Anfangsgeschwindigkeit Null auf die Endgeschwindigkeit v beschleunigt wird:

$$\boxed{E_{kin} = \frac{m}{2}v^2}$$

Wie lässt sich diese Formel herleiten für den einfacheren Fall einer zeitunabhängigen konstanten Beschleunigung?

3.) Volumenänderungs-Arbeit

Ich betrachte z.B. den Hydraulikzylinder meines Traktors und möchte wissen, wie viel Energie ich diesem Zylinder zuführen muss, damit er sich um ein Stück Δs verschiebt. In dem Hydrauliksystem herrscht ein bestimmter Öldruck p. Die Fläche des Kolbens ist A.



Druck ist eine Kraft pro Fläche [N/m^2]: $p = F/A$. Daraus folgt für die Kraft die auf die Fläche A einwirkt $F = pA$. Das Volumen an Hydrauliköl, welches beim verschieben des Kolbens um Δs verdrängt wird, ist $\Delta V = A\ \Delta s$. Die Volumenänderungs-Arbeit ist also

$$\boxed{\Delta W = F\ \Delta s = p\ A\ \Delta s = p\ \Delta V}$$

Wenn das Volumen des Zylinders kleiner wird (ΔV negativ!), ist vereinbarungsgemäß ΔW negativ, denn dann muss Energie von aussen zur Kompression zugeführt werden. Umgekehrt leistet der Zylinder Arbeit, wenn das Volumen sich vergrößert. Dann ist ΔW positiv. Aus der Sicht des „Systems Hydraulikzylinder“ ist das natürlich genau umgekehrt. ***Das Vorzeichen einer ausgetauschten Energiemenge hängt also immer davon ab, ob ich aus Sicht des „Energielieferanten“ oder des „Energieverbrauchers“ schaue.***

4.) Wärme

Systeme können Energie auch in Form von Wärme austauschen. Wärme ist physikalisch gesehen kein Zustand eines Systems, sondern eine bei bestimmten Prozessen ausgetauschte Energieform. Wenn ich z.B. einen warmen Gegenstand anfasse, erhalte ich von ihm Energie in Form von Wärme. - Beim Austausch von Wärme sind viele Bedingungen zu berücksichtigen, hier sollen zwei Spezialfälle betrachtet werden:

a) Wenn einem isolierten System Energie in Form von Wärme zugeführt wird, und sein Volumen ändert sich dabei nicht ($\Delta V = 0$), dann ist diese Wärmemenge

$$\boxed{\Delta E_W = m\ C_V\ \Delta T}$$

C_V ist eine stoffabhängige Konstante, die sog. *Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen*. m ist die Masse des Stoffes in kg. ΔT ist die mit dem Wärmeaustausch einhergehende Temperaturerhöhung des Systems. C_V stellt die Energiemenge dar, die zur Erwärmung von 1 kg des Stoffes um 1°C nötig ist. Da keine Volumenänderungs-Arbeit geleistet werden muss und keine Wärme wieder abfliesst (Isolierung), wird die Innere Energie des Systems um ΔE_W erhöht. Da sich das System nicht ausdehnen kann, steigt auch der innere Druck.

b) Wenn einem isolierten System dessen Volumen sich ändern kann (z.B. Gas in einer dehnbaren aber wärmundurchlässigen Hülle), Wärme zugeführt wird, erhöht es nicht nur seine Temperatur, sondern vergrößert

auch sein Volumen um ΔV. Um die gleiche Temperaturerhöhung wie in a) zu bewirken, muss also eine größere Wärmemenge als dort zugeführt werden, denn gleichzeitig muss das System ja noch Volumenänderungs-Arbeit leisten, gibt also wieder Energie ab! Der Druck im System ändert sich dagegen nicht, da es sich ja ausdehnen kann ($\Delta p = 0$). Die zugeführte Wärmemenge ist

$$\boxed{\Delta E_W = m\, C_p\, \Delta T = m\, C_V\, \Delta T + p\, \Delta V}$$

C_p ist analog die *Spezifische Wärmekapazität des Systems bei konstantem Druck*.

5.) Elektrische Energie

Wenn eine bestimmte Menge elektrischer Ladung ΔQ durch einen elektrischen Verbraucher (z.B. eine Glühbirne) fließt, an dem die elektrische Spannung U abfällt, ist dafür die Energiemenge

$$\boxed{\Delta E_{elektrisch} = U\, \Delta Q}$$

nötig, welche von dem elektrischen Feld (bzw. dessen Erzeuger) geliefert werden muss, dass zwischen den Polen des Verbrauchers herrscht (vergleichbar dem Gravitationsfeld). Die Spannung U ist praktisch ein Maß dafür, wie viel Energie das elektrische Feld einer bestimmten Ladung zuführen muss, damit sie das „Hindernis“ überwinden kann.

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer in der Physik gebräuchlicher Energieformen, in denen Systeme Energie austauschen können. Beispielsweise Magnetische Energie, Chemische Energie, Rotationsenergie, Lichtenergie.

Der große praktische Wert des Energiebegriffes für die Physik liegt darin, dass man gewöhnlich sehr eingegrenzte Systeme betrachtet, von denen man bestimmte Zustandsgrößen berechnen möchte. Wenn ich die Fragestellung so wähle, dass nur Energieaustausch **innerhalb** des Systems stattfindet (bzw. der Energieaustausch mit der Umgebung des Systems vernachlässigbar ist), dann muss der Gesamtenergieinhalt des

Systems konstant, also erhalten bleiben! Man sagt auch, die Energie ist eine „**Erhaltungsgröße**“. Ein Beispiel soll die Anwendung verdeutlichen:

Beispiel

Du willst eine Kartoffel-Abpackanlage entwerfen. Damit die Kartoffeln keinen Schaden nehmen wenn sie vom Sortierband in die Tüte fallen, dürfen die empfindlichen Knollen keine größere Fallgeschwindigkeit als 4 m/s erreichen. Wie groß darf die Fallhöhe maximal sein?

Lösung

Wenn ich die Luftreibung beim Fallen vernachlässige, brauche ich blos das System „Kartoffel“ zu betrachten. Ihre Masse sei m. Wenn sie eine bestimmte Höhe h heruntergefallen ist, hat sich dabei ihre potentielle Energie um den Wert mgh verringert, denn im Gegensatz zur Hubarbeit rechnen wir E_{pot} ja der Kartoffel selbst und nicht dem Gravitationsfeld zu! Wohin verschwindet dann die potentielle Energie beim Fallen? Woher kommt ausserdem die kinetische Energie, die die Kartoffel beim Fallen gewinnt? Für die Kartoffel sieht es so aus, als würde ihre potentielle Energie einfach in kinetische Energie „umgewandelt“, ihr Gesamtenergieinhalt bleibt aber konstant. Es gilt also für jede beliebige durchfallene Höhe:

$$\frac{m}{2}v^2 = mgh$$

Für die zu einer Geschwindigkeit v gehörende Fallbeschleunigungs-strecke gilt also:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

In obigem Beispiel dürfen die Kartoffeln also maximal ca. 80 cm tief fallen.

* * * * *

Die physikalische Einheit von Energie allgemein wird aus dem Spezialfall Arbeit = Kraft × Weg abgeleitet:

[Energie] = [Kraft] × [Weg] = [N] × [m] = [Nm] =: [J]

Das **J** steht für Joule, benannt nach dem englischen Physiker James Joule (1818-1889) und ist neben der zusammengesetzten Einheit Nm (Newtonmeter) die offizielle Einheit der Energie.