

## **Energie, Masse und Massendefekt**

Wir betrachten zwei physikalische Größen, die wir bereits kennen: die Energie und die Masse. Statt hier eine Definition dieser Größen zu bringen oder zu wiederholen, beschreiben wir, an welchen Eigenschaften wir Energie bzw. Masse erkennen können.

### **Die Energie**

Immer wenn wir etwas antreiben oder heizen wollen, brauchen wir Energie. Wollen wir eine Reise unternehmen, brauchen wir Energie. Nehmen wir das Auto, so brauchen wir Benzin oder Dieselöl. Fahren wir mit der Bahn, so wird Dieselöl, Elektrizität oder Kohle verwendet. Fliegen wir mit dem Flugzeug, so wird Kerosin getankt. Selbst wenn wir uns auf einem Pferd, mit einem Fahrrad oder zu Fuß auf die Reise begeben, brauchen wir einen Treibstoff. Das Pferd braucht Hafer und Heu. Beim Radfahren oder beim Gehen brauchen wir selbst Nahrung.

Wenn es uns nicht darauf ankommt, wie wir ans Ziel unserer Reise kommen, ist es gleichgültig, welchen Treibstoff wir nehmen. Allen Treibstoffen ist gemeinsam, dass wir mit ihrer Hilfe eine Reise machen können. Das liegt daran, dass sie etwas Gemeinsames haben. Sie enthalten Energie. In Benzin, Dieselöl, Elektrizität, Kohle, Hafer und Nahrung steckt Energie. Für die Reise brauchen wir also keinen bestimmten Treibstoff, sondern wir brauchen die Energie, die in jedem Treibstoff enthalten ist.

Auch zum Heizen braucht man Energie. Wie man zum Verreisen immer irgendeinen Treibstoff braucht, braucht man zum Heizen immer irgendeinen Brennstoff. Als Brennstoff kann man Heizöl, Kohle, Erdgas, Holz oder Elektrizität verwenden. Auch beim Heizen kommt es nicht darauf an, welchen Brennstoff man verwendet, sondern nur auf das, was alle Brennstoffe gemeinsam enthalten, nämlich die Energie.

## Die Masse

Wenn wir einen Gegenstand, der (bezüglich uns) in Ruhe ist, wegbewegen wollen, müssen wir uns anstrengen. Wir müssen uns umso mehr anstrengen, je massiver der Gegenstand ist. Ein Matchboxauto ist leicht weggeschoben. Einen Eisenbahnwaggon wegzuschieben, ist für eine Person fast unmöglich. Umgekehrt ist es unterschiedlich anstrengend, Gegenstände abzustoppen, die sich bewegen. Ein fahrendes Matchboxauto zu stoppen, stellt kein Problem dar, einen frei rollenden Eisenbahnwaggon stoppen zu wollen, ist nicht ratsam. Je massiver die Gegenstände sind, die sich bewegen, desto anstrengender ist es, sie zu stoppen.

Die physikalische Größe, die beschreibt, wie sehr man sich anstrengen muss, um einen Gegenstand wegzubewegen oder zu stoppen, ist die Masse, die in dem Gegenstand enthalten ist. Je mehr Masse in einem Gegenstand enthalten ist, desto schwieriger ist es, ihn wegzurollen oder zu bremsen. Diese Eigenschaft nennt man die Trägheit der Masse.

An jedem Gegenstand, in dem Masse enthalten ist, hängt ein unsichtbares Gebilde. Es ist das Schwerkraftfeld (Gravitationsfeld). Je mehr Masse in einem Gegenstand enthalten ist, desto stärker ist das Schwerkraftfeld, das die Masse, die in ihm enthalten ist, erzeugt. An allen Gegenständen des Alltags (Tische, Sessel, ...) hängt ein Schwerkraftfeld. Die Masse, die in diesen Alltagsgegenständen enthalten ist, ist allerdings so gering, dass das Schwerkraftfeld, das an ihnen hängt, unmerkbar schwach ist. Um Schwerkraftfelder zu bemerken, müssen wir Gegenstände nehmen, die weit mehr Masse enthalten. Solche Gegenstände sind Himmelskörper. In der Erde ist so viel Masse enthalten, dass wir das Schwerkraftfeld, das diese Masse erzeugt, spüren. Im Mond ist weniger Masse enthalten als in der Erde. Sein Schwerkraftfeld ist schwächer als das der Erde. In der Sonne ist mehr Masse enthalten als in der Erde. Ihr Schwerkraftfeld ist stärker als das der Erde.

### Wir können zusammenfassen:

- Energie erkennt man daran, dass man mit ihrer Hilfe etwas antreiben oder heizen kann.
- Masse erkennt man daran, dass sie Trägheit verursacht und Quelle eines Schwerkraftfeldes ist.

### **Eine fantastische Geschichte**

Absurdien war im Altertum für seinen süßen Honig bekannt. Von fern her strömten die Menschen in Scharen. Manche nahmen dafür weite Reisen über die stürmische See in Kauf. Andere überquerten schneebedeckte Berge und steile Pässe. Manche kämpften sich sogar durch den unwegsamen Urwald, in dem Trolle und Orcs lauerten. Keine Gefahr war zu groß, keine Mühe zu anstrengend, um nach Absurdien zu ziehen und den süßen Honig zu erlangen.

Die Absurdianer waren ein freundliches Volk. Sie hatten aber ein seltsames Verfahren entwickelt, die Menge des Honigs, den sie verkauften, zu messen und dessen Preis zu bestimmen. Alle Fremden schmunzelten über dieses Verfahren, aber da die Absurdianer ein so liebenswertes Völkchen waren, wollte sie keiner über die Unsinnigkeit ihres Vorgehens aufklären. Alle fürchteten, die Absurdianer damit bloß zu stellen, was keiner wollte.

Ging man in einen der vielen Honigläden, so sagte man einfach, wie viel Honig man kaufen wollte. Die Verkaufsmenge des Honigs wurde in Absurdien in absurdischen Gallonen gemessen. Um die Verkaufsmenge des Honigs zu messen, wurden Hohlmaße benützt. Wollte jemand eine absurdische Gallone Honig kaufen, wurde das Hohlmaß bis zu der Markierung mit Honig gefüllt, die eine absurdische Gallone anzeigte. Wollte jemand nur eine halbe absurdische Gallone Honig kaufen, wurde das Hohlmaß bis zu der Markierung gefüllt, die eine halbe absurdische Gallone anzeigte. Auf diese Art und Weise wurde die Verkaufsmenge des Honigs bestimmt, die in absurdischen Gallonen gemessen wurde.

Um den Preis dieses Honigs zu bestimmen, maßen die absurdischen Händler anschließend die Preismenge dieses Honigs. Die Preismenge wurde in absurdischen Pints gemessen. Dafür wurde der Honig von dem Hohlmaß, mit dem die Verkaufsmenge gemessen worden war, in ein anderes Hohlmaß umgeleert, das durch Markierungen am Rand die Preismenge anzeigte. Anhand dieser Preismenge wurde der Preis des Honigs ermittelt. Ein absurdisches Pint Honig kostete 13 absurdische Gulden.

Absurdien florierte und brachte große Wissenschaftler, darunter Physiker, hervor. Diese Physiker entdeckten in schwierigen theoretischen Arbeiten, dass Verkaufsmenge und Preismenge nicht zwei verschiedene physikalische Größen, sondern nur zwei verschiedene Namen für ein und dieselbe physikalische Größe sind. Diese physikalische Größe nannten sie von nun an Volumen. Die Gleichheit der bisher als verschieden betrachteten physikalischen Größen bedeutete, dass man die Verkaufsmenge auch in absurdischen Pints und die Preismenge auch in absurdischen Gallonen messen konnte. Absurdische Gallonen und absurdische Pints waren nur zwei verschiedene Einheiten, mit denen man das Volumen messen konnte. Den Physikern gelang es sogar, den Zusammenhang dieser Einheiten zu ermitteln: Eine absurdische Gallone war gleich 8,9875 absurdische Pints. Da man es als überflüssig betrachtete, für eine physikalische Größe zwei verschiedene Einheiten zu benutzen, führte man eine einzige, neue physikalische Einheit für das Volumen ein: das Liter.

Man setzte fest: 1 Liter = 3 absurdische Gallonen = 26,9625 absurdische Pints.

### **Die Gleichheit von Energie und Masse**

Eine der vielen erstaunlichen Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie ist, dass Masse und Energie nicht zwei verschiedene physikalische Größen sondern nur zwei verschiedene Namen für ein und dieselbe physikalische Größe sind. (So wie Verkaufsmenge und Preismenge der Absurdianer nicht zwei verschiedene physikalische Größen sondern nur zwei verschiedene Namen für ein und dieselbe physikalische Größe, nämlich das Volumen, sind.)

Das bedeutet, dass wir die Masse, die in einem Gegenstand enthalten ist, auch in Joule messen können, und dass wir die Energie, die in einem Gegenstand enthalten ist, auch in Kilogramm messen können. Es gilt folgender Zusammenhang: ein Kilogramm ist gleich  $8,9875 \cdot 10^{16}$  Joule. Gibt man das, was man bisher als Masse bezeichnet hat, in Kilogramm und das, was man bisher als Energie bezeichnet hat, in Joule an, kann man die Umrechnung schreiben als:  
 $E = m \cdot 8,9875 \cdot 10^{16}$ . Man kann zeigen, dass der bei dieser Umrechnung auftretende Zahlenfaktor gleich dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit ist. Damit schreibt sich die Umrechnung als:  $E = mc^2$ .

Ein einziger Name für die physikalische Größe, die man sowohl mit Masse als auch mit Energie bezeichnet, ist leider nicht gebräuchlich. Wir werden diese Größe hier „Menergie“ nennen. Kilogramm und Joule sind zwei verschiedene Einheiten für die Menergie, so wie Meter und Zoll zwei verschiedene Einheiten für die Länge sind.

### Die Eigenschaften der Menergie

Da Masse und Energie, die wir zusammenfassend als Menergie bezeichnen, dasselbe sind, müssen sie auch dieselben Eigenschaften haben. Die Masse-Eigenschaften der Menergie sind, dass Menergie Trägheit verursacht und Quelle eines Schwerkraftfeldes ist. Die Energie-Eigenschaften der Menergie sind, dass man mit Menergie etwas antreiben und heizen kann. Meist tritt nur *eine* Gruppe dieser Eigenschaften zu Tage, sodass man bis 1905 der Ansicht war, Energie und Masse seien zwei verschiedene physikalische Größen. Traten nur die Masse-Eigenschaften der Menergie zu Tage, nannte man sie Masse. Traten nur die Energie-Eigenschaften zu Tage, nannte man sie Energie.

Wir wissen bereits, dass Masse ein Schwerkraftfeld erzeugt. Da Masse dasselbe wie Energie ist, muss auch Energie ein Schwerkraftfeld erzeugen. Das gilt auch, wenn die Energie nicht in Materie enthalten ist. Zum Beispiel ist in einem elektrischen Feld Energie gespeichert. Diese Energie erzeugt ein Schwerkraftfeld. Dieses Schwerkraftfeld ist allerdings zu schwach, um gemessen werden zu können. Masse verursacht Trägheit. Also ist auch ein elektrisches Feld träge. Da die Energie, die es enthält, sehr klein ist, ist dieser Effekt kaum messbar.

Die Masse-Eigenschaften der Menergie (Trägheit, Quelle eines Schwerkraftfeldes) werden erst dann messbar, wenn Menergie in großer Menge vorhanden ist. In Materie ist Menergie in hoch konzentrierter Form enthalten. Daher enthält Materie genügend Menergie, sodass wir an ihr die Masse-Eigenschaften der Menergie bemerken.

Ein Kilogramm Sand (oder ein Kilogramm eines beliebigen anderen Stoffes) enthält  $9 \cdot 10^{16}$  Joule. Beim Verbrennen in einem gewöhnlichen Motor gewinnt man aus einem Kilogramm Benzin ca.  $4,3 \cdot 10^7$  Joule. Im Sand ist eine zwei Milliarden Mal größere Energiemenge enthalten, als beim Verbrennen von Benzin freigesetzt wird. Wie kann das sein? Warum füllt man nicht Sand in den Tank?

Die Energie im Sand ist für den Antrieb nicht nutzbar. Dass Energie nicht immer brauchbar ist, um etwas anzutreiben, ist eine bekannte Tatsache. Um ein Auto anzutreiben, reicht es nicht aus, dass man genügend Benzin hat. Man braucht außerdem noch Sauerstoff für die Verbrennung des Benzins. Gäbe es keinen Sauerstoff, so wäre das Benzin wertlos. Wir wären nicht imstande, die Energie zum Fahren zu nutzen. Auch zum Heizen brauchen wir den Sauerstoff als Reaktionspartner für das Heizöl. Um die Energie eines Brennstoffes freizusetzen, muss mit dem Brennstoff eine Reaktion ablaufen.

Ganz ähnlich verhält es sich mit den riesigen Energiemengen, die in Materie enthalten sind. Auch um diese Energie zu nutzen, muss eine Reaktion ablaufen, was technisch sehr schwierig zu realisieren ist. Solche Reaktionen laufen zum Beispiel in Kernkraftwerken, in [Atombomben](#) oder auf Sternen wie unserer [Sonne](#) ab. Im Alltag gibt es keine Reaktionen, die die riesigen Energiemengen der Materie freisetzen können. Darum merken wir nicht, dass Masse Energie-Eigenschaften besitzt.

Die Energie-Eigenschaften der Menergie (Antreiben, Heizen) werden erst dann sichtbar, wenn eine geeignete Reaktion abläuft.

**Wir können zusammenfassen:**

Die Menergie hat folgende Eigenschaften:

- Sie verursacht Trägheit.
- Sie ist Quelle eines Schwerkraftfeldes.
- Man kann mit ihr etwas antreiben.
- Man kann mit ihr heizen.

Das, was wir früher Energie genannt haben, hat auch die Masse-Eigenschaften.

Das, was wir früher Masse genannt haben, hat auch die Energie-Eigenschaften.

## Der Massendefekt

Um einen Liter Wasser um 10 °C zu erwärmen, müssen wir dem Wasser eine Menge von ca. 42 kJ zuführen, was ca.  $5 \cdot 10^{-13}$  kg sind. Diese Zunahme der Menge von  $5 \cdot 10^{-11}$  % ist durch Wiegen nicht messbar. Ebenso wird ein Akkumulator beim Laden schwerer, was aber ebenfalls nicht messbar ist.

Will man 100 g Benzin vollständig verbrennen, braucht man dazu ca. 360 g Sauerstoff. Bei der Verbrennung wird eine Menge von ca. 4,2 MJ abgegeben, was ca.  $5 \cdot 10^{-11}$  kg sind. Die Verbrennungsprodukte (Kohlenstoffdioxid und Wasser) haben also zusammen eine Menge von  $10^{-8}$  % weniger als die Ausgangsstoffe zusammen. Dieser Verlust ist ebenfalls nicht messbar. In der Chemie formuliert man daher das Gesetz von der Erhaltung der Masse: Bei chemischen Reaktionen tritt kein messbarer Massenverlust ein.

Anders stellt sich die Situation bei [Kernreaktionen](#) dar. Hier wird dermaßen viel Menge freigesetzt, dass der Verlust messbar wird. Ein Deuteriumkern besteht aus einem Proton und einem Neutron. Das Proton und das Neutron werden durch die Kernkraft zusammengehalten. Die Kernkraft ist eine sehr starke, kurzreichende Kraft. Trennt man das Proton und das Neutron, muss man gegen diese Kraft arbeiten und steckt somit Menge in das System Proton – Neutron. Somit haben ein getrenntes Proton-Neutron-Paar mehr Menge als ein Deuteriumkern, nämlich  $0,36 \cdot 10^{-12}$  J, was  $4 \cdot 10^{-30}$  kg sind. Das sind ca. 0,1 % des Deuteriumkerns – eine bereits messbare Größe. Setzt man umgekehrt einen Deuteriumkern aus einem Proton und einem Neutron zusammen, wird diese Menge frei. Der Deuteriumkern ist also um 0,1 % leichter als das Proton und das Neutron zusammen.

Diese Abweichung der Masse (Menge) der Atomkerne von der Summe der Masse (Menge) der Nukleonen nennt man den Massendefekt (oder Massenverlust). Dieser Massenverlust ist vom Prinzip her keine Spezialität der Kernphysik. Hier wird er lediglich aufgrund des großen Mengenumsatzes messbar. Auch bei chemischen Reaktionen tritt der Massenverlust auf. Mit den heutigen Messtechniken ist er allerdings aufgrund seiner Kleinheit experimentell nicht erfassbar.