E = mc²: Was Einsteins berühmteste Formel bedeutet

GRUNDFRAGEN DER PHYSIK

1905 erschien in den Annalen der Physik eine Arbeit von gerade einmal drei Seiten. Ihr Verfasser war 26 Jahre alt und arbeitete am Patentamt in Bern, ihr Titel war eine Frage: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Albert Einstein beantwortete sie mit Ja. Gibt ein Körper Energie ab, wird er leichter [1].

Heute kennt fast jeder das Ergebnis in seiner kurzen Form, E = mc², man findet es auf T-Shirts und Kaffeetassen. Was die Formel tatsächlich sagt, ist weniger bekannt, und es ist erstaunlicher als jeder Aufdruck.

Was die Formel aussagt

$$E = mc^2 \tag{1}$$

Links steht die Energie *E*, rechts die Masse *m* mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit *c*. Die Formel sagt: Masse und Energie sind zwei Seiten derselben Sache. Jeder Körper, der eine Masse hat, enthält allein dadurch eine riesige Menge Energie, die Ruheenergie. Und umgekehrt hat jede Energie, die in einem Körper steckt, eine Masse.

Das gilt ganz allgemein. Eine gespannte Feder wiegt ein winziges bisschen mehr als eine entspannte, eine heiße Tasse Kaffee mehr als eine kalte. Man merkt davon nichts, weil c^2 so gewaltig groß ist. Schon für eine sehr große Energie braucht es nur sehr wenig Masse.

Ein Rechenbeispiel

Wie groß, zeigt eine einfache Rechnung. Ein Gramm Masse, etwa so viel wie eine Büroklammer, entspricht der Energie:

$$E = 0{,}001\,\mathrm{kg} \cdot \left(\,299\,792\,458\,\mathrm{m/s}\,\right)^2 \approx 9 \cdot 10^{13}\,\mathrm{J} \tag{2}$$

Das sind rund 25 Gigawattstunden. Ein großes Kraftwerk mit einem Gigawatt Leistung müsste dafür gut einen Tag lang ununterbrochen laufen. Den Wert der Lichtgeschwindigkeit liefert die Definition des Meters [2].

Natürlich lässt sich diese Energie nicht einfach aus einer Büroklammer herausholen. Fast alle Vorgänge, die wir kennen, setzen nur einen winzigen Bruchteil davon frei. Wie viel genau, hängt davon ab, welche Kräfte im Spiel sind.

Woher die Sonne ihre Energie hat

Die Sonne strahlt mit einer Leistung von $3{,}828 \cdot 10^{26}$ Watt ins All [3]. Teilt man das durch c^2, erhält man, wie viel Masse sie dafür jede Sekunde verliert: gut vier Millionen Tonnen. Diese Masse stammt aus der Kernfusion in ihrem Inneren, wo Wasserstoffkerne zu Helium verschmelzen. Der Heliumkern ist ein klein wenig leichter als die Bausteine, aus denen er entsteht, und genau dieser Massenunterschied wird zu Licht und Wärme. Mehr dazu im Artikel über die Kernfusion.

Auf der Erde will man denselben Prozess in Fusionsreaktoren nutzen, mit den schweren Wasserstoffsorten Deuterium und Tritium. Rechnet man mit den gemessenen Kernmassen nach, werden bei jeder Verschmelzung 17,6 Megaelektronenvolt frei [4], das sind etwa 0,38 Prozent der Ausgangsmasse [5].

Kernenergie und Chemie im Vergleich

Bei der Kernspaltung zerbricht ein schwerer Urankern in zwei mittelschwere Kerne und einige Neutronen. Auch hier sind die Bruchstücke zusammen leichter als der Ausgangskern. Für eine typische Spaltung von Uran-235 in Barium-141, Krypton-92 und drei Neutronen ergibt die Rechnung mit den Kernmassen rund 173 Megaelektronenvolt [4], knapp ein Tausendstel der Masse.

Wenn dagegen Holz oder Kohle verbrennt, ändern sich nur die Bindungen zwischen den Elektronen der Atome. Dabei wird auch Masse frei, aber so wenig, dass sie sich mit keiner Waage nachweisen lässt. Das erklärt, warum ein Kilogramm Kernbrennstoff so viel mehr Energie liefert als ein Kilogramm Kohle: Die Kräfte im Atomkern sind ungleich stärker als die chemischen.

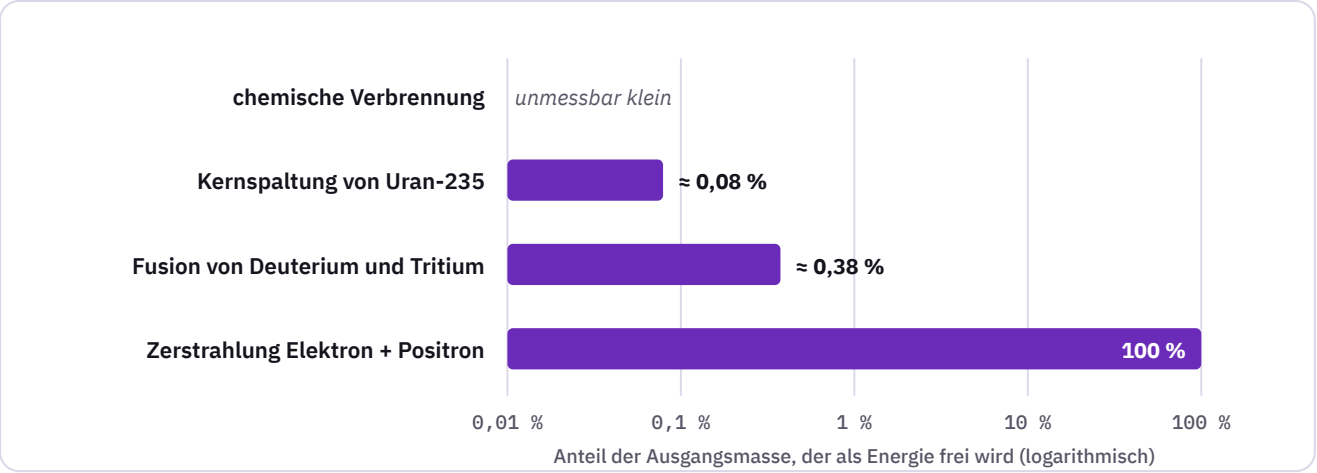

Abb. 1: Wie viel Masse bei verschiedenen Prozessen in andere Energieformen übergeht. Eigene Rechnung mit den Massen aus NUBASE2020 [4], für die Spaltung am Beispiel der Reaktion zu Barium-141, Krypton-92 und drei Neutronen.

Ganz verschwinden kann Masse nur, wenn Materie auf Antimaterie trifft. Ein Elektron und ein Positron zerstrahlen vollständig, ihre gesamte Ruheenergie von je 511 Kilo-Elektronenvolt geht in zwei Lichtteilchen über [6]. Genau das nutzt die Medizin bei der PET-CT, um Tumoren sichtbar zu machen.

Warum Masse mehr ist als die Summe der Teile

E = mc² steckt sogar in der Masse der Dinge um uns herum. Ein Proton besteht aus drei Quarks, aber die Quarks selbst sind sehr leicht. Der allergrößte Teil der Protonenmasse kommt aus der Bewegungs- und Bindungsenergie der Quarks und der Teilchen, die sie zusammenhalten. Auch Ihre eigene Masse stammt also zum größten Teil aus Energie.

Die ganze Formel und ein häufiges Missverständnis

E = mc² gilt für einen Körper in Ruhe. Bewegt er sich, kommt seine Bewegungsenergie hinzu, und die vollständige Beziehung lautet:

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2 \tag{3}$$

Dabei ist *p* der Impuls. Für ein Lichtteilchen, das keine Masse hat, bleibt nur *E* = *pc* übrig: Licht trägt Energie und Impuls, obwohl es nichts wiegt. Die Einzelheiten stehen im Artikel über die Relativitätstheorie.

Oft hört man, bei Kernreaktionen werde Masse in Energie umgewandelt. Genauer gesagt bleibt die Gesamtenergie immer erhalten, sie wechselt nur ihre Form. Ruheenergie, die vorher in den Kernen

steckte, wird zu Bewegungsenergie der Bruchstücke oder zu Strahlung. Weil Ruheenergie und Masse nach Einstein dasselbe sind, wiegen die Endprodukte weniger.

Wie genau stimmt die Formel?

Sehr genau. 2005 verglichen Physiker am MIT, am amerikanischen Messinstitut NIST und am Institut Laue-Langevin in Grenoble zwei völlig verschiedene Messungen: die Massen von Silizium- und Schwefelatomen vor und nach dem Einfang eines Neutrons und die Energie der dabei ausgesandten Gammastrahlung [7]. Beides passte zusammen. E und mc^2 unterschieden sich um höchstens vier Zehnmillionstel, und der Test war 55-mal genauer als der beste direkte Test zuvor [8].

Fragen zu $E = mc^2$

Was bedeutet $E = mc^2$ einfach erklärt?

Die Formel sagt, dass Masse und Energie gleichwertig sind. Jede Masse enthält eine Ruheenergie, die man berechnet, indem man die Masse mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit multipliziert. Weil diese Zahl riesig ist, steckt schon in wenig Masse sehr viel Energie.

Wofür stehen E, m und c?

E steht für Energie, m für Masse und c für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, 299 792 458 Meter pro Sekunde. Das c wird quadriert.

Wie viel Energie steckt in einem Gramm Masse?

Rund $9 \cdot 10^{13}$ Joule oder etwa 25 Gigawattstunden. So viel liefert ein Kraftwerk mit einem Gigawatt Leistung in gut einem Tag.

Ist $E = mc^2$ bewiesen?

Die Formel wurde vielfach überprüft. Ein direkter Test von 2005 mit Silizium- und Schwefelatomen fand Übereinstimmung auf vier Zehnmillionstel genau. Auch Kernkraftwerke, die Sonne und die PET in der Medizin funktionieren genau so, wie die Formel es vorhersagt.

Wann hat Einstein E = mc² entdeckt?

Im Jahr 1905, in einer kurzen Arbeit in den Annalen der Physik, die auf seiner speziellen Relativitätstheorie aus demselben Jahr aufbaut.

Quellen

1. A. Einstein: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?* In: Annalen der Physik 323 (1905), Heft 13, S. 639–641, doi:10.1002/andp.19053231314.
2. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM): *The International System of Units (SI).* 9. Auflage, Sèvres 2019, bipm.org.
3. E. E. Mamajek u. a.: *IAU 2015 Resolution B3 on Recommended Nominal Conversion Constants for Selected Solar and Planetary Properties.* Preprint 2015, arXiv:1510.07674.
4. F. G. Kondev, M. Wang, W. J. Huang, S. Naimi, G. Audi: *The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties.* In: Chinese Physics C 45 (2021), 030001, doi:10.1088/1674-1137/abddae.
5. National Institute of Standards and Technology: *CODATA Value: atomic mass constant energy equivalent in MeV.* physics.nist.gov.
6. National Institute of Standards and Technology: *CODATA Value: electron mass energy equivalent in MeV.* physics.nist.gov.
7. S. Rainville, J. K. Thompson, E. G. Myers u. a.: *A direct test of E=mc².* In: Nature 438 (2005), S. 1096–1097, doi:10.1038/4381096a.
8. National Institute of Standards and Technology: *Einstein Was Right (Again): Experiments Confirm that E= mc2.* Meldung vom Dezember 2005, nist.gov.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: E = mc²: Was Einsteins berühmteste Formel bedeutet. Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/e_mc2.html
```


Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Lichtgeschwindigkeit · Relativitätstheorie · Kernfusion · Antimaterie