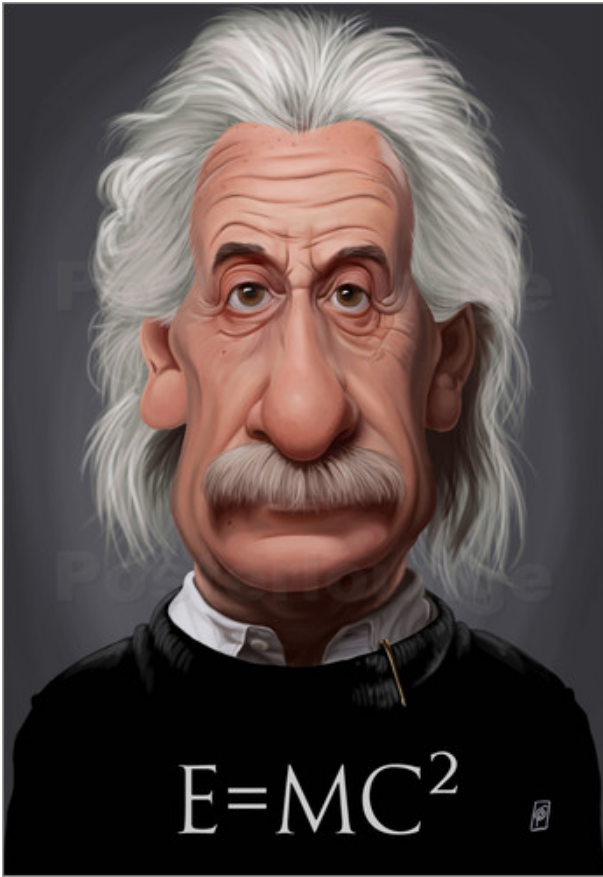


Exkurs

$$E = m \cdot c^2$$


1 Materie als geronnene Energie

Materie und Energie können ineinander umgewandelt werden, es handelt sich um zwei Erscheinungsformen eines übergeordneten Gebildes.

Man stelle sich ein kleines Wassermolekül vor, besser gesagt einen ganzen Haufen davon. Diesem Haufen machen wir jetzt mal richtig Dampf: Wir erhitzen ihn solange, bis er zu Wasserdampf wird. Dieser Dampf soll jetzt nach oben strömen und dort auf eine kalte Glasplatte treffen. Durch die Kälte kondensiert der Dampf, unterhalb der Glasplatte bilden sich Wassertröpfchen.

Wasserdampf und Wassertropfen sind zwei Erscheinungsformen ein und derselben Sa-

che, nämlich einem Haufen Wassermoleküle. Die Umgebungsbedingungen entscheiden dann, welche Erscheinung zutage tritt. Kein Mensch würde auf die Idee kommen zu sagen, dass Wasserdampf und flüssiges Wasser überhaupt nichts miteinander zu tun hätten. Jetzt zurück zu Masse und Energie: Hier verhält sich das mit den Erscheinungen ganz ähnlich: So wie ein Wassertropfen nichts anderes ist als kondensierter Wasserdampf, ist Materie nichts anderes als geronnene Energie. Für uns schwer vorzustellen, da wir mit dem Begriff der reinen Energie bildlich nichts anfangen können.

2 Keine Spur von Chemie

Bevor es zu den gigantischen Energiemengen geht, die Materie in sich speichert, muss noch kurz etwas gesagt werden: Die Energie, die die Materie laut $E = mc^2$ in sich birgt, hat natürlich nichts mit einer klassisch-chemischen Energie zu tun. Man könnte sich ja vielleicht sagen: Klar, die Formel ist simpel: *Jedes Mal wenn ich ein Stück Holz verbrenne, entsteht Hitze. Und letztlich ist vom Holz nichts mehr übrig. Ich hab die Holzmasse in Energie umgewandelt.* Das ist natürlich Unfug. Hätte man wirklich die ganze Holzmasse laut $E = mc^2$ in Energie umgewandelt, würde vom Grillplatz nichts mehr übrig sein. Das Verbrennen von Holz oder anderen Dingen beruht auf chemischen Vorgängen, es finden hauptsächlich Stoffumwandlungen statt, bei denen Wärmeenergie frei wird. Auch ist die Holzmasse nicht verschwunden, sie befindet sich im Rauch bzw. in den Gasen, die bei der Verbrennung entstehen. Die Umwandlung von Materie in Energie bei $E = mc^2$ ist prinzipieller Natur und hat nichts mit einem chemischen Umwandlungsprozess zu tun.

3 Materie als Energiespeicher

Um sich die gigantische Energiemenge der Materie, die mit $E = mc^2$ in ihr gespeichert ist,

mal klar zu machen, stellt man sich einen Kilogramm Materie vor. 1 Liter Wasser beispielsweise hat genau diese Masse. Schwieriger wird es nun, wenn wir uns an die in ihr gespeicherte Energie wagen. Und jetzt kommt ein Satz, den kann man auf sich wirken lassen: Ein Kilogramm Materie birgt mit $E = mc^2$ soviel Energie in sich, wie bei der Verbrennung von 3 Millionen Tonnen Braunkohle frei wird. 3 Millionen Tonnen Kohle, das entspricht einem Kohleberg von der Größe der Cheopspyramide oder einem Güterzug mit einer Länge von über 700 Kilometern.

4 Wie man auf die Formel kam

Einstein war nicht der erste, der eine Beziehung zwischen Masse und Energie vermutete. Aber er war es schließlich, der diesen Zusammenhang mit der Formel $E = mc^2$ auf den Punkt brachte. Schon vorher gab es Überlegungen dazu: 1904 hatte man bei einem Experiment festgestellt, dass Elektronen in bewegtem Zustand eine höhere Masse besitzen als in Ruhe. Warum, war anfangs noch unklar. Schließlich kam man darauf, dass es etwas wie eine Äquivalenz zwischen Energie und Masse geben könnte. Am 27. September 1905 reichte Albert Einstein seine Arbeit mit dem Titel *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig* bei der Fachwelt ein. Dort taucht sie zu ersten Mal auf: Die Formel $E = mc^2$.

5 Wann wird Materie zu Energie?

Dieser Prozess spielt sich praktisch in allen Sternen des Universums ab. Im Innern eines Sterns verbrennt Wasserstoff zu Helium, das ist die Kernfusion. Die ganze abgestrahlte Energie eines Sterns stammt größtenteils aus diesem Prozess. Jetzt passiert bei der Kernfusion etwas merkwürdiges: Das entstandene Teilchen (der Heliumkern) ist leichter als die Summe seiner einzelnen Bestandteile vor der

Fusion. Das ist etwa so, als würde man 4 Bananen mit je 100 g in eine Schüssel geben, um danach festzustellen, dass es nur noch 399 Gramm sind. Wo ist das eine Gramm hin? *Das ist Bindungsenergie*, würde ein Physiker jetzt sagen. Und er hat recht. Dort hat der Gewichtsverlust tatsächlich etwas mit Bindungsenergie zu tun. Jetzt alles der Reihe nach: Man stelle sich vor, einen Heliumkern auseinander zu reißen. Dazu benötigt man Energie, denn die 4 Elementarteilchen des Heliumkerns ziehen sich gegenseitig an. Hat man es geschafft, die 4 Teilchen zu trennen, hat jedes von ihnen mehr Energie als zuvor. Das ist genau die Energie, die für die Trennung benötigt wurde, diese ist nun in den 4 Einzelteilchen gespeichert. Und der Energiegehalt eines Körpers ist direkt mit seiner Masse verknüpft, das haben wir ja jetzt oft genug gelesen. Die 4 Teilchen werden bei ihrer Trennung also schwerer. Lässt man sie danach wieder zusammenkrachen, geht diese Energie wieder verloren, sie wird in Form von Wärme abgestrahlt, wodurch die Teilchen wieder leichter werden. Hier war der entscheidende Vorgang: Bei der Fusion verlieren die Teilchen an Masse und Energie wird frei, genau hier wird Materie in Energie umgewandelt.

6 Wann wird Energie zu Materie?

Energie verwandelt sich in Materie, zum Beispiel in Teilchenbeschleunigern. Dort werden Elementarteilchen auf knapp Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, um dann frontal mit einem anderen Teilchen zu kollidieren. Dabei sind solch hohe Energien im Spiel, dass daraus neue Elementarteilchen entstehen können. Und das tun sie, auf diese Weise hat man schon eine ganze Reihe neuer Teilchen entdeckt. Um es nochmal zu verdeutlichen: Diese neu entstandenen Teilchen sind nicht etwa die Splitter der Kollisionsteilchen, sondern sie entstehen tatsächlich aus der Energie, genauer gesagt aus der kinetischen Energie dieser Kollisionsteilchen.