

# $E = mc^2$ – aber bitte ohne Formeln!

»Alles spricht von Einstein und seiner vor 100 Jahren gefundenen Formel, wie heißt sie doch? ›*E gleich Emcequadrat*?‹«, fragte mich kürzlich mein Freund Hans-Ludwig. »Kannst du mir das erklären? Aber bitte ohne Formeln!«

▶ Während die Regentropfen für den ruhenden Beobachter senkrecht von oben fallen (links) scheinen sie für den sich bewegten Beobachter (rechts) von vorne zu kommen.

▼ Albert Einstein, kurz vor der großen Entdeckung.

Noch ehe ich ihn auf den logischen Unsinn seiner Bitte, eine Formel ohne Formeln zu erklären, aufmerksam machen konnte, kam mir eine Idee: Die Formel gibt quantitativ an, wie Energie zu Masse und Masse zu Energie werden kann. Mit ihr kann man errechnen, dass die Energie, die bei der Bombe von Hiroshima frei wurde, der Masse von nur einem Gramm entspricht. Hätte man nach der Explosion alle Atomkernbausteine und alle Elektronen aufsammeln und auf eine Waage legen können, alles zusammen wäre um ein Gramm leichter gewesen als das ursprüngliche Uran in der explodierten Bombe.

Was den Laien wundert, ist aber nicht die quantitative Aussage in Einsteins Formel, sondern die Tatsache, dass aus Energie so etwas festes, greifbares wie Masse entstehen kann, genauer: *träge Masse*, die erkennen lässt, ob man zum Beispiel von einer Kugel aus Styropor oder einer aus Blei getroffen wird. Dass ein Körper von größerer träger Masse auch schwerer ist, hat bei der Entstehung der Allgemeinen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle gespielt. Aber zurück zur Frage meines Freundes. Dass aus Energie träge Masse werden kann, kann ich ihm tatsächlich ohne Formeln zeigen. Dazu muss ich ihm nur von einem Experiment erzählen, bei dem nichts passiert, und ihn an einige einfache Naturgesetze erinnern, die er in der Schule gelernt hat.

## Impuls

Ein Körper, der sich bewegt, besitzt Impuls. Man berechnet ihn, indem man die träge Masse des Körpers mit der Geschwindigkeit multipliziert. Solange keine Kraft auf ihn wirkt, behält der Körper seinen Impuls bei. Übe ich eine Kraft auf ihn aus, etwa indem ich ihn abbremsen oder beschleunige, so ändere ich seinen Impuls: Dieser kann sich nur ändern, wenn ihm durch Kräfte Impuls ab- oder



zugeführt wird. Das ist der Satz von der Erhaltung des Impulses. Da sich dabei an seiner Masse nichts ändert, macht sich die Impulsänderung in der Änderung seiner Geschwindigkeit bemerkbar. Ohne äußere Kraft, also auch ohne die Wirkung einer Schwerkraft, fliegt er ewig mit der stets gleichen Geschwindigkeit geradlinig durch den Weltraum.

Auch Licht besitzt Impuls. Ein Lichtblitz, der auf eine Wand fällt, übt auf sie eine Kraft in Richtung seiner Bewegung aus. Er ändert also den Impuls des Körpers, auf den er trifft und an den er seine Energie abgibt.

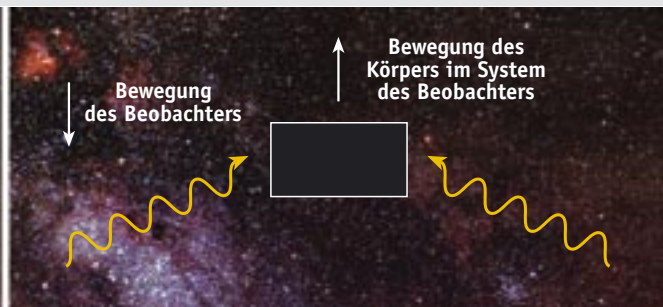
## Was haben Licht und Regen gemeinsam?

Licht und Regentropfen bewegen sich mit einer endlichen Geschwindigkeit. Das hat zur Folge, dass für einen bewegten Beobachter Lichtstrahlen wie Regentropfen aus einer anderen Richtung zu kommen scheinen als für einen unbewegten. Bei Regen leuchtet das sofort ein. Wer bei Windstille im Regen mit dem Schirm die Straße entlang geht, hat den Eindruck, die von oben kommenden Regentropfen kämen ihm entgegen. Schon im 17. Jahrhundert haben die Astronomen gemerkt, dass das Licht eines Sterns im Laufe eines



▼ Links: Ein schwarzer Stein wird gleichzeitig von zwei aus entgegengesetzten Richtungen kommenden gleich starken Lichtblitzen getroffen.

Rechts: Für den sich gleichförmig nach unten bewegendem Beobachter scheint sich der Stein nach oben zu bewegen. Die von links und rechts einfallenden Lichtblitze scheinen ihm wegen der Aberration etwas nach oben gerichtet.



Jahres aus etwas verschiedenen Richtungen zu uns kommt. Das liegt an der Bewegung der Erde um die Sonne. Da sich das Licht sehr viel schneller bewegt als die Regentropfen, ist die Ablenkung, die sogenannte Aberration des Lichtes, sehr viel kleiner. Sie beträgt maximal 21 Bogensekunden. Der Effekt lässt sich vereinfacht so beschreiben: Das Licht, das für einen unbewegten Beobachter aus einer bestimmten Richtung kommt, zum Beispiel von oben, scheint für einen vorwärts schreitenden Beobachter etwas »von vorne« zu kommen. Im Prinzip ist das genau so wie beim Regen.

### Das Relativitätsprinzip

Jetzt kommt Einstein ins Spiel. Das Grundprinzip seiner Speziellen Relativitätstheorie besagt, dass für einen sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegendem Beobachter alle Naturgesetze genau so gelten wie für einen unbewegten. Im Besonderen muss in beiden Fällen der Satz von der Erhaltung des Impulses gelten: Wenn einem Körper Impuls erteilt wird, muss dieser seinen Impuls vergrößern, und das muss unabhängig davon gelten, ob der Beobachter relativ zum Körper in Ruhe ist oder nicht. Wir werden sehen, wie stark diese auf den ersten Blick recht nichtssagend erscheinende Forderung ist.

### Das Experiment

Eigentlich geschieht gar nichts. Stellen wir uns vor, im leeren Raum, weitab von jeder Schwerkraft, schwebt ein Zie-

gelstein, der von zwei Lichtblitzen aus entgegengesetzten Richtungen getroffen wird. Seine Oberfläche sei schwarz, so dass sie alles eintreffende Licht verschluckt.

Die Blitze kommen im gleichen Augenblick und sind gleich stark, beide enthalten Energie, die vom Stein aufgenommen und in Wärme umgewandelt wird. Ob die aufgenommene Energie etwas an der Masse des Körpers ändert, lässt sich nicht erkennen, denn die Masse spielt hier keine Rolle. Die Blitze stoßen den Stein, sie übertragen auch ihren Impuls auf ihn. Doch da ihre Kraftwirkungen entgegengesetzte Richtungen haben und gleich stark sind, heben sie einander auf. Der Impuls des Körpers ändert sich nicht, er bleibt in Ruhe. Vor dem Eintreffen der Pulse war er null. Da kein Impuls dazu kam, blieb er null. Der Impulssatz ist also erhalten. Wie ich schon sagte, eigentlich geschieht nichts.

### Das überraschende Ergebnis

Ein sich gleichförmig gegen den Ziegelstein bewegendem Beobachter kann mehr erkennen. Er möge sich in die Richtung bewegen, die im Bild nach unten weist. Für den Beobachter scheint sich der Stein nach oben zu bewegen, und da sich beim Experiment an der Bewegung des Steines nichts änderte, bewegt er sich für den Beobachter vor und nach den Lichtblitzen mit derselben Geschwindigkeit nach oben.

Wegen der Aberration des Lichtes erscheinen dem Beobachter die beiden

Lichtblitze etwas nach oben abgelenkt. Für den Beobachter geben sie daher dem Stein einen zusätzlichen Impuls nach oben. Das heißt, dass der Stein bei der Aufnahme der Energie der Lichtblitze auch etwas Impuls nach oben aufgenommen hat. Sein Impuls hat also während des Experiments zugenommen. Erinnern wir uns: Impuls ist Masse mal Geschwindigkeit. Da sich für den Beobachter die Geschwindigkeit beim Experiment nicht geändert hat, muss die Masse zugenommen haben. Mit der Energiezunahme durch die Lichtblitze wurde also die Masse erhöht. Die Energie des Lichtes hat sich in träge Masse umgewandelt. Das kann der sich gegenüber dem Ziegelstein bewegende Beobachter aus dem Satz von der Erhaltung des Impulses erkennen.

So habe ich es meinem Freund erklärt. Mit nur wenigen einfachen Formeln hätte ich ihm auch zeigen können, dass die Massenzunahme des Steines seiner Energiezunahme gemäß der Einsteinschen Formel erfolgt. Aber von Formeln wollte Hans-Ludwig ja nichts wissen. □



**Rudolf Kippenhahn**,  
Astronom und Schriftsteller.