

$E = mc^2$  oder die angebliche Äquivalenz der angeblich gleichartigen Dinge  
Masse und Energie: Mythos *und* Legende, Pointe *und* Verfälschung der  
Geschichte und der Physik.

Ein Vortrag auf der X. Physikhistorischen Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft  
in Augsburg, 20. März 2003.

Von Ed Dellian, Bogenstr. 5, 14169 Berlin.

Die Gleichung  $E = mc^2$ , die man auch Einstein-Gleichung nennt, wird demnächst 100 Jahre  
alt.

Was genau sagt diese Gleichung aus?

Nach allgemeiner Schulbuch-Meinung zeigt Einsteins Formel die Äquivalenz von Masse -  
oder Materie -und Energie. Was immer auch „Masse (oder Materie), und was immer auch  
„Energie“ letztlich sein mag - dank Einsteins Gleichung soll gelten: Materie ist Energie,  
Energie ist Materie. Und das eine ist in das andere umwandelbar.

Diese so genannte Masse-Energie-Äquivalenz lebt heute zugleich als Legende und als  
Mythos: Legende, insofern dieses Prinzip, mit Einsteins Namen verbunden, zur kanonisierten  
Geschichte der Physik gehört; Mythos, insofern Person und Sache seit langem schon  
glorifiziert sind, und, wenn man den Lehrbüchern glaubt, scheinbar allen Zweifeln entrückt.

Weshalb sage ich scheinbar? Max Jammer, in seinem 2000 erschienenen Buch „Concepts of  
Mass“, widmet mehrere Seiten dem - Zitat - „philosophical problem what precisely is the  
conceptual meaning of the equation  $E = mc^2$ .“ Dort kann man lesen, dass die angebliche  
Äquivalenz von Materie und Energie unter den Experten noch immer umstritten ist. Jammer  
schreibt, dass es hierüber noch 1987 eine Kontroverse zwischen Sir Hermann Bondi und  
Rudolf Peierls gab. Jammer selbst teilt seinen Standpunkt zur Sache folgendermaßen mit  
Zitat: „In short, energy and mass, having different physical dimensions, cannot be  
interconvertible.“

Ich will zeigen, weshalb und wie sehr Max Jammer damit Recht hat.

Die Gleichung  $E = mc^2$  markiert nun aber auch eine besondere Pointe, und eine Verfälschung von Geschichte und Physik: Die Pointe liegt darin, dass diese Formel allgemein als wesentlicher Ertrag der Bemühungen Einsteins um eine strikt relativistische Grundlegung der Mechanik ausgegeben wird, obwohl sie tatsächlich das ganze Gegenteil davon, nämlich eine Bewegungsgleichung im absoluten raumzeitlichen Bezugssystem repräsentiert. Auch dies wird zu zeigen sein.

Ich beginne mit der Untersuchung des Mythos und seiner Quellen.

Albert Einstein veröffentlichte 1905 seine epochemachende Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“, in der er die später so genannte Einstein-Gleichung erstmals entwickelte. Wenige Monate später, im Mai 1906, erschien sein Aufsatz „Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie“. Hier findet man erstmalig die Behauptung Einsteins, dass nach seiner Gleichung eine Masse einem Energieinhalt „äquivalent“ sei. Begründet wird sie nicht. Im Jahr darauf, 1907, in der Publikation „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen“, formuliert Einstein ergänzend, wiederum ohne Begründung - ich zitiere : „Dieses Resultat ist von außerordentlicher theoretischer Wichtigkeit, weil in demselben die träge Masse und die Energie eines physikalischen Systems als gleichartige Dinge auftreten.“ Am Ende des Aufsatzes heißt es - Zitat - : „Der Satz, dass einer Energiemenge eine Masse zukomme, gilt also ... nicht nur für die träge, sondern auch für die gravitierende Masse.“

Welche mathematische Beziehung zwischen Energie und Masse beschreibt nun die Einstein-Gleichung tatsächlich? Lesen wir nochmals bei Einstein selbst nach, so finden wir hier gleich zwei Antworten auf unsere Frage. Zum einen schreibt er, dass in seiner Gleichung Masse und Energie „als gleichartige Dinge“ auftreten würden; und zum anderen sagt er, dass Masse und Energie hiernach „äquivalent“ seien. Aber begründet werden diese Behauptungen von Einstein nicht.

Die Frage ist also: Treffen Einsteins Behauptungen von 1907 mathematisch gesehen eigentlich zu ?

Es geht uns hier ausschließlich um den mathematischen Inhalt der Gleichung. Es geht also hier nicht darum, ob vielleicht in irgendwelchen Prozessen der Kernphysik eine Umwandlung von Materie in Energie tatsächlich stattfindet. Allerdings - sollte es etwas Derartiges tatsächlich geben, so beschreibt es Einsteins Gleichung jedenfalls n i c h t; denn sie beschreibt gerade k e i n e Umwandelbarkeit von Materie und Energie, wie wir gleich sehen werden.

Zunächst ein paar Bemerkungen über Äquivalenz und Gleichartigkeit physikalischer Terme.

Die Naturwissenschaft Physik definiert ihre Gegenstände nicht begrifflich, sondern quantitativ, also durch Messanweisungen. In der Bewegungslehre hat diese Beschränkung zur Folge, dass neben den quantitativen Definitionen auch nur quantitative Beziehungen der Gegenstände zueinander untersucht werden. So drückt sich hier die Gleichheit zweier Gegenstände durch ihre Maßgleichheit aus, und die Ungleichheit durch Maßverschiedenheit. Maßgleichheit ist auch Wesensgleichheit, und die Dimension oder das Maß einer physikalischen Größe ist insofern eine Aussage über das „Wesen“ dieser Größe, als es weitergehende „Wesens-Aussagen“ in der Bewegungslehre nicht gibt.

Was folgt daraus Es folgt, dass die mathematische Naturwissenschaft ihre Gegenstände nur nach „gleich“ oder „ungleich“ unterscheidet, wobei ausschließlich die Gleichheit oder Ungleichheit des Maßes verglichener Gegenstände gemeint ist.

Die Unterscheidung physikalischer Gegenstände allein nach „gleich“ oder „ungleich“ zeigt nun aber, dass es hier auch keine verschiedenen Grade der Gleichheit, und folglich zwischen den Begriffen „Äquivalenz“, „Gleichheit“, „Gleichartigkeit“ oder „Wesensgleichheit“ keinen Unterschied gibt: Es gibt deshalb auch nur eine einzige mathematische Relation, die dieses alles in derselben Weise als „Maßgleichheit“ zum Ausdruck bringt: das ist die so genannte „Äquivalenzrelation“, die durch das Gleichheitszeichen ( $=$ ) symbolisiert wird.

Fraglos stellt die Einstein-Gleichung eine Äquivalenzrelation dar: Sie behauptet ja doch eine Äquivalenz der durch  $E$  symbolisierten Energie einerseits, und des Produkts aus der Masse  $m$  und dem Quadrat der Konstante „Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$ “ andererseits.

Die Äquivalenz besteht nun aber eindeutig zwischen E und dem Produkt  $mc^2$ . Sie besteht nicht zwischen der Energie E und der Masse m. Eine Masse-Energie-Äquivalenz wäre mathematisch durch die Gleichung  $E = m$  auszudrücken. Genau das aber sagt Einsteins Gleichung nicht aus.

Man kann dieses recht triviale Ergebnis gewiss auch umständlicher erzielen. Untersucht man einmal, in welcher spezifischen mathematischen Beziehung Energie und Masse in Einsteins Gleichung tatsächlich stehen, so ist festzustellen, dass ihr Verhältnis konstant ist. Was für ein Maß die Energie im konkreten Fall auch immer haben mag; der zugehörige Ausdruck für die Masse  $m$  seinerseits wird im selben konkreten Fall immer ein Maß aufweisen, welches dem Maß der Energie in bestimmter Weise entspricht. Und zwar entsprechen Energie und Masse einander so, dass dem Doppelten von  $E$  das Doppelte von  $m$ , dem Dreifachen von  $E$  das Dreifache von  $m$  entspricht usw., d.h. dass der Quotient  $E : m$  immer gleich bleibt: Es gilt

$$E : m = c^2 = \text{konstant.}$$

Dieses zwangsläufig korrelierte Verhalten zweier physikalischer Terme ist nun allerdings etwas ganz Besonderes. Man nennt es „Proportionalität“. Der Begriff kommt von der lateinischen Übersetzung „pro portio“ her, die Cicero für das von Euklid zur Kennzeichnung bestimmter quantitativer Verhältnisse gebrauchte Wort „analogos“ einführte. In der Sache handelt es sich darum, dass Euklid die Verhältnisse inkommensurabler d.h. maßverschiedener und also verschiedenartiger Terme in die geometrische Proportionenlehre einbezieht.

Proportionalität bezeichnet also, euklidisch, eine spezifische quantitative Beziehung zwischen durchaus unähnlichen bzw. ungleichen, d.h. maßverschiedenen Termen. Und das Spezifische dieser Beziehung besteht darin, dass die „proportionalen“ Terme quantitativ ausnahmslos in gesetzmäßiger Weise korreliert oder aufeinander bezogen auftreten; Sie sind eben nicht gleich, sondern verhältnisgleich, wie es ein deutsches Wort für „proportional“ richtig zum Ausdruck bringt: Sie halten bei Vervielfachung stets gleiche Verhältnisse ein, in der Weise, dass z.B. dem Vielfachen von  $E$  ein Gleichvielfaches von  $m$  immer entspricht und umgekehrt. Eben dies drückt die Einstein-Gleichung aus. Der Faktor  $c^2$  stellt die so genannte „Proportionalitätskonstante“ oder den „Proportionalitätsfaktor“ dar. Das ist derjenige Term,

der in jeder solchen Beziehung aus dem Quotienten der zueinander proportionalen Terme notwendigerweise als Konstante hervorgeht.

Proportionalität ist demnach auch nicht etwa ein besonderer Fall von Äquivalenz, sondern ein aliud, ein von der Äquivalenz wohl zu unterscheidendes mathematisches Verhältnis. Physikalisch kommt dies dadurch zum Ausdruck, dass proportionale Terme maßverschieden sind, d.h. dass sie verschiedene physikalische Dimensionen haben, wie der eingangs zitierte Max Jammer im Hinblick auf Masse und Energie mit Recht betont hat.

Es ist nun eine bekannte Tatsache, dass nicht alles, was man mathematisch darstellen kann, auch physikalisch in derselben Weise sinnvoll und zulässig ist. Auf die Einstein-Gleichung angewandt meine ich damit, dass die mathematisch gewiss äquivalenten Schreibweisen  $E/m = c^2$  und  $E/mc = c$  durchaus unterschiedliche physikalische Bedeutungen haben können. Da das Produkt  $(mc)$  in der Einstein'schen Lichttheorie den Photonenimpuls p bezeichnet, bringt die Schreibweise  $E/mc = c = \text{konstant}$  die Proportionalität von Energie und Impuls zum Ausdruck:  $E : p = c$ .

Ich verstehe diese Energie-Impuls-Proportion als den eigentlichen korrekten, physikalisch relevanten Inhalt der Einstein-Gleichung. Dies deshalb, weil das Prinzip der proportionalen Gruppierung eines Terms E und eines zweiten Terms „Impuls p“ um eine Proportionalitätskonstante, welche die Dimension „Raum“ durch „Zeit“ trägt, ein allgemeines sein dürfte. Ich finde dieses Prinzip lange vor Einstein schon 1884 bei John Henry Poynting, hergeleitet aus der Maxwell'schen Theorie des Elektromagnetismus. Ich finde es gleichfalls schon vor Einstein in der Theorie des Lichtdrucks. Und ich finde es unter dem physikalischen Prinzipien der Quantentheorie, wie sie Werner Heisenberg 1930 vorstellte.

Inwiefern stellt nun die angeblich relativistische Einstein-Gleichung in Wahrheit ein absolutes Bewegungsgesetz vor, wie ich eingangs behauptet habe? Was überhaupt ist ein Bewegungsgesetz, und was macht es gegebenenfalls zu einem absoluten?

Als mathematisches Bewegungsgesetz sehe ich eine Beziehung zwischen dem Bewegungsmaß (oder dem Impuls) p und einem zweiten Term an, hier E, der zufolge p zu E in einer festen Relation steht. Und zwar so, dass E als Ursache einer bewirkten Bewegung

verstanden werden kann, welche Bewegung durch das Maß des Impulses quantitativ beschrieben wird. Einsteins Formel genügt diesen Kriterien zweifellos.

Ein solches Gesetz wird ein absolutes Bewegungsgesetz dann vorstellen, wenn es eine absolute Bewegung beschreibt. Nun ist aber Bewegung ein Relationsbegriff. Das heißt, dass man von Bewegung eines Körpers nur insofern sprechen kann, als man den Zustand des Körpers relativ zu einem bestimmten Bezugssystem der Bewegung beschreibt: Die Eisenbahn bewegt sich relativ zum Bahnkörper, die Sonne bewegt sich relativ zur Erde. Eine absolute Bewegung kann man nur beschreiben, wenn man ein absolut ruhendes Bezugssystem zur Verfügung hat.

Ein solches Bezugssystem kann, wie man bei Newton lernt, kein materieller Körper sein. Es ist vielmehr der Raum selbst, und es ist die Zeit selbst: es ist das Gefüge aus absolutem Raum und absoluter Zeit, in dem, relativ zu dem sich die wahren oder wirklichen oder absoluten Bewegungen der Körper vollziehen. Dieses Gefüge ist ein metrisches, da Raum und Zeit ihrerseits metrisch sind, wie man von Galilei und Newton erfahren kann. Es weist deshalb einen charakteristischen konstanten metrischen Parameter auf. Die Metrik dieses Gefüges garantiert die mathematische Gesetzmäßigkeit der Bewegungen, die relativ zu ihm stattfinden. Und das eben gewährleistet der Parameter c als konstanter Proportionalitätsfaktor.

Deshalb ist Einsteins Formel, insofern sie die Bewegungsursache E und die erzeugte Bewegung als proportionale Größen darstellt, deren gegenseitige Abhängigkeit die Naturkonstante c mit dem geometrischen Maß „Raum durch Zeit“ bestimmt, ein absolutes Bewegungsgesetz. Es ist ein Naturgesetz, welches die Bewegung relativ zu dem raumzeitlichen Bezugssystem beschreibt, das durch den Parameter c als Naturkonstante unverrückbar metrisch festgelegt ist. Dieser Parameter, so schreibt ein Lehrbuch der Relativitätstheorie richtig, stellt eben - Zitat - „die universelle Maßstabskonstante für die Struktur von Raum und Zeit dar“.

In Einsteins Theorie nennt man dieses Bezugssystem seit Minkowski die „Raumzeit.“ Dass eine Theorie, die die Bewegung von Körpern relativ zu einem solchen, als ruhend ausgezeichneten räumlich-zeitlichen Bezugssystem beschreibt, die Bewegung absolut beschreibt und deshalb richtigerweise „Absolutheitstheorie“ heißen sollte, dürfte Einstein

wohl gewusst haben. Er selbst soll eine Zeit lang dazu geneigt haben, seiner Lehre eben diesen Namen zu geben.

Wenn wir nun sehen, wie eine sorgfältige Analyse der Einstein-Gleichung weder die Äquivalenz von Masse und Energie, diese Gleichung als Repräsentation einer spezifisch relativistischen Bewegungslehre bestätigt, sondern vielmehr als Bewegungsgesetz in einem bevorrechtigten, durch die konstante Metrik von Raum und Zeit charakterisierten Bezugssystem erweist, so stellt sich die Frage: Wie kommt es, dass die Schulbücher der ganzen Welt seit Generationen Gegenteiliges behaupten?

Ich denke, die Antwort hierauf führt zum Ausgangspunkt meiner Überlegungen zurück. Sie hat mit dem Mythos Einstein zu tun. Hätte Albert Einstein selbst seine Gleichung von Anfang an als absolute Bewegungsgleichung vorgestellt, hätte er ihren mathematischen Gehalt richtig als Proportionalität zwischen dimensionsverschiedenen physikalischen Ausdrücken beschrieben - nicht nur Max Jammer und nicht nur ich, sondern die ganze Welt wäre ihm darin mit Sicherheit gefolgt. Die Schulbücher würden dann über die Entdeckung der Proportionalität von Energie und Impuls berichten und über die Wiederentdeckung der Bedeutung, die die Proportionenlehre Platons und Euklids und Galileis und Newtons für die Naturerkenntnis hat.

Da aber Einstein, wie man nun sieht, zwischen Proportionalität und Äquivalenz nicht zu unterscheiden wusste, so bewirkt der Mythos, dass die Welt geneigt ist, Einstein auch hierin zu folgen. Die Macht der Mythen über die Menschen ist eine ungeheure.

Ich denke nicht, dass man es damit bewenden lassen muss. Wenn wir den Gang der Geschichte der Wissenschaften kritisch betrachten, nur wenn wir dem Leitspruch der Aufklärung folgen, selber zu denken, und keiner Autorität um ihrer selbst willen zu trauen, können wir die Macht der Mythen brechen. Damit nicht Wahrheit durch Irrtum ersetzt wird, auf eine Weise, die vielleicht mit einem Satz von Ludwig Wittgenstein folgendermaßen zu ironisieren wäre:

Ich kaufe mir ein Physiklehrbuch, darin steht etwas offenbar Falsches. Nun kaufe ich mir einhundert Physiklehrbücher. In denen allen dasselbe steht: Dann glaube ich es.-----

-----