

Energiewende verstehen? $E = mc^2$!

$$(m_1 - m_2)v^2 \text{ or } E$$

Bild rechts: Prof. Albert Einstein bei seiner 11. Josiah Willard Gibbs-Lektion auf dem Treffen der *American Association for the Advancement of Science* im Auditorium des *Carnegie Institute of Technology Little Theater* in Pittsburgh am 28. Dezember 1934. Photo: AP

$$E = mc^2$$

Während meiner Collegezeit besuchte ich einen Kursus, in dem es um die großen politischen Philosophen ging – Hobbes, Locke, Rousseau, Kant, John Stuart Mill und Karl Marx.

Nach meiner Erinnerung habe ich sie den historischen Zeiten zugeordnet, die sie beeinflusst hatten – Hobbes und die Monarchen des 18. Jahrhunderts, Locke und die amerikanische Revolution, Rousseau und die Romantik des 19. Jahrhunderts, Kant und die Nationalstaaten des 19. Jahrhunderts, Marx und der Kommunismus des 20. Jahrhunderts.

Dann sah ich eines Tages eine Zeitskala, auf der gezeigt wurde, wann sie alle gelebt haben und gestorben sind. Zu meinem Erstaunen hatte jeder einhundert Jahre vor der Zeit gelebt, die ich ihnen zeitlich zugeordnet hatte. Es schien klar, was das bedeutet. „Es dauert etwa hundert Jahre, bevor ein neuer Gedanke die Bühne der Geschichte betritt“.

Vor fast genau einhundert Jahren hat Albert Einstein die Gleichung $E = mc^2$ in seiner „Speziellen Relativitätstheorie“ eingeführt. Die Gleichung bot einen neuen Weg, die Ursprünge chemischer Energie zu beschreiben sowie eine neue Energiequelle, die bis dahin historisch völlig unbekannt war – Kernkraft. Die Kernkraft gab ihr furchtbares Debut in der Geschichte 40 Jahre später in Gestalt einer Atombombe. Aber 100 Jahre später haben die Amerikaner [und vor allem auch die Deutschen, A. d. Übers.] noch nicht richtig die weit größeren Implikationen von Einsteins Gleichung erfasst – eine neue Form von Energie, die fast unbegrenzte Energie mit einem verschwindend geringen Einfluss auf die Umwelt zur Verfügung stellen kann.

$E = mc^2$. Wer hat noch nichts davon gehört? Selbst Mariah Carey hat ihr letztes Album danach benannt. „E“ steht für Energie, „M“ für Masse und „C“ für die Lichtgeschwindigkeit – das ist einfach genug. Aber was bedeutet das wirklich? (Die Antwort lautet nicht „Relativität“).

Was $E = mc^2$ besagt ist nichts weiter als dass *Materie und Energie austauschbar* sind. Es gibt eine Verbindung zwischen den beiden. Energie kann sich in Materie verwandeln und Materie in Energie. Es sind zwei verschiedene Aspekte der gleichen Sache.

Dieses Prinzip der Gleichartigkeit von Energie und Materie war eine total unerwartete Abwendung von allem, was es bis dahin gegeben hatte. Im 18. Jahrhundert hat Antoine Lavoisier, der große französische Chemiker, die

Erhaltung der Materie begründet. Durch sehr sorgfältige Experimente wie das Verbrennen eines Holzscheites fand er heraus, dass das Gewicht der entweichenden Gase und Aschen immer genau gleich dem Gewicht des Ausgangsmaterials war. Materie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden, sondern nur seine Form ändern.

Im 19. Jahrhundert dann begründete eine ganze Reihe brillanter Wissenschaftler – Count Rumford, Sadi Carnot, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzman – das gleiche Prinzip für Energie. Energie kann viele Formen annehmen – Wärme, Licht, Bewegung potentielle Energie – aber die *Menge* bleibt immer die gleiche. Energie kann auch nicht erzeugt oder vernichtet werden.

Als dann das 20. Jahrhundert herauf dämmerte, kam Albert Einstein mit einem dritten Prinzip, dass die anderen beiden in völlig unerwarteter Weise vereinigte. Einstein bewies das Erhaltungsgesetz *zwischen* Materie und Energie. Nichts dergleichen konnte man sich früher vorstellen. Das Bedeutendste an der Sache ist der Koeffizient – *das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit*. Das ist eine sehr, sehr große Zahl mit einer Größenordnung von *1 Quadrillion*.

Wir haben nicht wirklich einen Referenzpunkt, um uns einen Faktor von einer Quadrillion vorzustellen. Wir wissen, was eine Trillion ist – das öffentliche Haushaltsdefizit [der USA]. Aber eine Quadrillion ist immer noch jenseits unseres Horizontes. Jedoch bedeutet genau das, dass eine sehr, sehr große Energiemenge sich in eine sehr, sehr kleine Menge von Materie verwandeln kann, und dass *eine sehr, sehr kleine Menge von Materie zu einer sehr, sehr großen Energiemenge werden kann*.

Vielleicht gibt es einen Weg, die Wichtigkeit von Einsteins Gleichung mit einer anderen Gleichung zu vergleichen, und zwar der Formel für kinetische Energie:

$$E = \frac{1}{2} (m_1 - m_2)v^2 \quad \text{or} \quad E = mv^2$$

Kinetische Energie ist die Energie sich bewogender Objekte. „E“ steht wieder für Energie, „m“ für Masse und „v“ für die *Geschwindigkeit des sich bewogenden Objektes*. Wenn man beispielsweise einen Tennisball durch einen Raum wirft, wird die Energie berechnet, indem man die Masse des Balles mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit multipliziert – vielleicht etwa 50 Meilen pro Stunde.

Die beiden Formeln sind im Wesentlichen gleich. Stellt man sie nebeneinander, ergeben sich zwei Dinge:

1. Bei einer vorgegebenen Energiemenge sind Masse und Geschwindigkeit *umgekehrt* proportional. Je höher die Geschwindigkeit, umso weniger Masse ist erforderlich, und umgekehrt.
2. Vergleicht man das mit den Geschwindigkeiten sich bewogender Objekte in der Natur – Wind und Wasser zum Beispiel – **ist der Koeffizient in Einsteins Gleichung fünfzehn Größenordnungen größer** – der gleiche Faktor wie von einer Quadrillion.

Wie merken wir das im täglichen Leben? Das meiste von dem, was wir „erneuerbare Energie“ nennen, sind tatsächlich die kinetischen Flüsse von Materie in der Natur. Wind und Wasser sind sich bewegende Dinge, die wir zur Energieerzeugung abernten. Daher werden sie mit der Formel für kinetische Energie gemessen.

Beginnen wir mit Strom aus Wasserkraft. Von einem hohen Damm herunterfallendes Wasser erreicht eine Geschwindigkeit von etwa 60 Meilen pro Stunde [ca. 95 km/h] oder 80 Fuß pro Sekunde [ca. 24 m/s]. Erhöht man den Damm um 80 oder mehr Fuß, kann die Geschwindigkeit dadurch nicht um mehr als 20 Meilen pro Stunde [ca. 32 km/h] erhöht werden. Der einzige Weg, den Energieoutput zu erhöhen besteht darin, die Masse zu erhöhen, d. h. wir müssen *mehr Wasser verbrauchen*.

Die größten Dämme – Hoover und Glen Canyon am Colorado – sind 800 Fuß hoch [ca. 240 m] und halten ein Reservoir mit einer Fläche von 250 Quadratmeilen [ca. 400 km²] zurück. Dies erzeugt 1000 Megawatt, Standard für eine stromerzeugende Station. (Lake Powell hinter dem Glen Canyon Damm versandete irgendwie und erzeugt nur 800 MW).

Umweltaktivisten begannen in den sechziger Jahren, gegen Wasserkraftwerke mobil zu machen, weil sie so riesige Landschaftsräume verbrauchen, weil sie landschaftlich schöne Täler und historische Canyons ertränken. Sie haben diese Mobilmachung bisher nicht beendet. Der Sierra-Klub, der gegen die Errichtung des Hetch-Hetchy-Damms in Yosemite 1921 kämpfte, versucht immer noch, diesen niederzureißen, obwohl er Trinkwasser und 400 Megawatt Strom für San Francisco zur Verfügung stellt. Als Ergebnis dieser Kampagne werden jedes Jahr mehr Dämme eingerissen als neu gebaut.

Wind weist eine viel geringere Energiedichte als Wasser auf, so dass der Landverbrauch sogar noch größer ist. Zeitweilige 50 Stockwerke hohe Windmühlen erzeugen $1\frac{1}{2}$ MW pro Stück, so dass man 660 Windmühlen braucht, um 1000 MW zu erzeugen. Sie müssen eine halbe Meile [ca. 800 m] entfernt voneinander errichtet werden, so dass ein 1000 MW-Windpark 125 Quadratmeilen [ca. 200 km²] Land überdeckt. Unglücklicherweise erzeugen die besten Windmühlen Strom gerade mal in 30% der Zeit, so dass 1000 MW in Wirklichkeit einen Landverbrauch von 375 Quadratmeilen [ca. 600 km²] weit voneinander entfernter Standorte erfordert.

Gezeitenkraft, oft als eine weitere erneuerbare Energiequelle genannt, leidet unter den gleichen Problemen. Wasser hat eine größere Dichte als Wind, aber die Gezeitenströme bewegen sich nur mit einer Geschwindigkeit von etwa 5 mph [ca. 8 km/h]. An den bestgeeigneten Standorten der Welt würde man etwa 20 Meilen [ca. 32 km] Küstenlinie benötigen, um 1000 MW zu erzeugen.

Was ist mit der Solarenergie? Die Sonnenstrahlung ist ein Ergebnis einer Transformation von $E = mc^2$, da die Sonne Wasserstoff zu Helium verbrennt. Unglücklicherweise findet diese Reaktion 90 Millionen Meilen entfernt statt. Die Strahlung streut mit dem Quadrat der Entfernung, so dass die Sonnenenergie, wenn sie die Erde erreicht, um fast den gleichen Faktor abgeschächt ist, 10 bis 15. Folglich beträgt die auf einen Quadratmeter einfallende Sonnenstrahlung 400 Watt, ausreichend, um vier 100-Watt-

Glühbirnen zum Leuchten zu bringen. „Thermische Solar“ – große Anordnungen von Spiegeln, die eine Flüssigkeit erhitzen – können 30 Prozent davon in Strom umwandeln. Photovoltaikzellen sind mit einer Umwandlung von 25 Prozent etwas weniger effizient. Ergebnis: Die Strommenge, die wir von der Sonne bekommen, reicht aus, um eine 100-Watt-Glühbirne pro Kartentisch zu erleuchten.

Das ist keine insignifikante Strommenge. Falls wir jedes Hausdach im Lande mit Solarkollektoren zupflastern, könnten wir möglicherweise unsere Hausbeleuchtung plus einige grundlegende Haushaltsgeräte damit betreiben – tagsüber. Der große Vorteil der Sonne liegt darin, dass sie gerade dann ihr Maximum erreicht, wenn es gebraucht wird, während heißer Sommernachmittage wenn die Klimaanlage den Stromverbrauch in die Höhe schnellen lassen. Das Zusammentreffen mit diesen Spitzen ist ein ständiges Problem für Energieversorger, und der Sonnenstrom kann eine signifikante Rolle bei der Erfüllung des Bedarfs spielen. Das Problem taucht auf, wenn Solarenthusiasten zu behaupten versuchen, dass die Solarkraft grundlastfähigen Strom für eine Industriegesellschaft liefern kann. Es gibt keine Technologie, Energie in für kommerzielle Verwendung ausreichender Menge zu speichern. Bis etwas entwickelt wird – was unwahrscheinlich erscheint – können Wind- und Solarkraft nur als zeitweilige unvorhersagbare Energiequellen dienen.

Es gibt nur so viel Energie, wie wir aus erneuerbaren Quellen anzapfen können. Sie ist begrenzt, entweder durch die erreichte Schnelligkeit oder durch die Distanz, die die Sonnenenergie bis zum Erreichen der Erdoberfläche überwinden muss. Gibt es also irgendwo in der Natur eine Stelle, an der wir einen Vorteil aus jenem „ c^2 “-Koeffizienten ziehen und Masse in Energie verwandeln können? Es gibt eine, die wir durch die Geschichte benutzt haben. Sie nennt sich „Chemie“.

Chemische Energie wird gemeinhin durch „Ladungszahlen“ beschrieben. Ein Natriumatom hat eine Wertigkeit von +1, was bedeutet, dass ihm ein Elektron in der äußeren Hülle fehlt. Gleichzeitig besitzt das Chloratom eine Wertigkeit von -1, was bedeutet, dass es ein Elektron zu viel hat. Zusammen bilden sie Natriumchlorid (Tafelsalz). Alle chemischen Reaktionen laufen entweder „endothermisch“ oder „exothermisch“ ab, was bedeutet, dass Energie bei diesem Prozess entweder abgegeben oder verbraucht wird. Der Bunsenbrenner in der Chemiekunde ist ein Weg, einer Reaktion Energie zuzuführen. Das andere, was passieren kann, geschieht gelegentlich in Chemielaboratorien, nämlich ein plötzliches Freisetzen von Energie, genannt „Explosion“.

Der große Fortschritt der Quantenphysik des 20. Jahrhunderts war es, die chemischen Reaktionen zu beschreiben mit $E = mc^2$.

Verbrennt man eine Gallone (ca. vier Liter) Benzin, wird nur *ein Milliardstel* der Masse des Benzins vollständig in Energie umgewandelt. Diese Umwandlung erfolgt in der Elektronenhülle. Die Menge ist so gering, dass es bisher noch niemandem gelungen ist, sie zu messen. Und doch reicht die Energieerzeugung aus, um ein 1000-Kilo-Fahrzeug 50 Kilometer fahren zu lassen – eine bemerkenswerte Leistung, wenn man darüber nachdenkt.

Elektronen machen nur etwa 0,01 Prozent der Masse eines Atoms aus. Die

anderen 99,99 Prozent befinden sich im Atomkern. Und so erhob sich die Frage, ob es möglich wäre, die viel größere, im Atomkern gespeicherte Energiemenge auf die gleiche Weise abzugreifen, wie wir das mit den Elektronen durch Chemie getan haben?

Lange Zeit bezweifelten viele Wissenschaftler, dass das gelingen könnte. Einstein selbst war skeptisch, indem er sagte, dass die Spaltung eines Atoms so wäre wie „der Versuch, nachts Vögel zu jagen in einem Land, in dem es kaum Vögel gibt“. Aber andere Wissenschaftspioniere – Enrico Fermi, George Gamov, Lise Meitner und Leo Szilard – entdeckten, dass es gemacht werden kann. In den späten dreißiger Jahren ist klar geworden, dass Energie in bisher nicht gekannter Menge durch Spaltung des Uranatoms gewonnen werden könnte.

Unglücklicherweise ging der Einführung der Kernkraft der II. Weltkrieg voraus. Dies ist eine historische Tragödie. Die Atombombe steht zur Kernkraft im gleichen Verhältnis wie Schießpulver zu Feuer. Während das Schießpulver in der Geschichte eine bedeutende Rolle gespielt hat, war die Rolle des Feuers von viel größerer Bedeutung. Würden wir das Feuer aufgeben, nur weil es zur Entwicklung von Gewehren geführt hat? Und doch wirft die Atombombe weiterhin einen Schatten auf die gleichermaßen bedeutende Entdeckung der Kernkraft.

Es stellte sich heraus, dass der Energieausstoß aus einem sich teilenden Uranatom 2 Millionen mal größer ist als die Kohlenstoff-Wasserstoffbindung in Kohle, Öl oder Holz aufzubrechen. Verglichen mit allen von den Menschen benutzten Formen der Energiegewinnung ist die Kernkraft jenseits aller Grenzen. Wind besitzt nur ein Zehntel der Energiedichte von Holz, Holz die Hälfte der Energiedichte von Kohle und Kohle die Hälfte der Energiedichte von Oktan. Alle zusammen unterscheiden sie sich um einen Faktor von etwa 50. Die Kernkraft besitzt etwa 2 Millionen mal die Energiedichte von Benzin. Es ist schwierig, dies im Licht unserer bisherigen Erfahrungen auszuloten. Und doch hängt unsere Energiezukunft großenteils davon ab, die Bedeutung dieses Differentials zu erfassen.

Eine elementare Vergleichsquelle ist die Überlegung, was man braucht, um ein Kohlekraftwerk im Gegensatz zu einem Kernreaktor wieder aufzutanken. Ein 1000-MW-Kohlekraftwerk – unser Standard – wird durch einen 110 Waggons langen „Kohlezug“ gefüttert, der alle 30 Stunden an dem Kraftwerk ankommt – 300 mal im Jahr. Jeder individuelle Kohlewaggon wiegt 100 Tonnen und erzeugt 20 Minuten lang Energie. Wir bringen die Kapazität unseres Schienensystems durch dieses Herumfahren der Kohle in unserem Land an seine Grenzen. (In China ist es bereits komplett zusammengebrochen).

Ein Kernreaktor andererseits wird aufgetankt, wenn eine Flotte von sechs Sattelschleppern an dem Kraftwerk mit einer Ladung Brennstäbe *einmal alle 18 Monate* ankommt. Die Brennstäbe sind nur schwach radioaktiv und können mit Handschuhen angefasst werden. Sie werden fünf Jahre im Reaktor verbleiben. Nach diesen fünf Jahren werden sich etwa 6 Unzen (ca. 170 g) Materie vollständig in Energie verwandelt haben. Wegen der Stärke nach $E = mc^2$ reicht die Metamorphose von 6 Unzen Materie aus, die Stadt San Francisco fünf Jahre lang mit Strom zu versorgen.

Das ist es, was den Leuten so schwerfällt zu verstehen. Es liegt fast

jenseits unserer Vorstellungskraft. Wie kann man eine ganze Großstadt fünf Jahre lang mit 6 Unzen Materie fast ohne jeden Umwelteinfluss mit Strom versorgen? Es scheint so unvorstellbar zu sein, dass wir Probleme erfinden, um alles wieder normal aussehen zu lassen. Ein Reaktor ist eine Bombe, die darauf wartet zu explodieren. Der Abfall lagert ewig, was werden wir je damit tun können? Es liegt etwas Unheimliches darin, Energie aus dem Atomkern zu erzeugen. Die Technologie liegt jenseits der menschlichen Beherrschbarkeit.*

Aber die Technologie liegt nicht jenseits der menschlichen Beherrschbarkeit. Es ist auch nichts Unheimliches an der Kernkraft. Es liegt nur jenseits von allem, was wir uns vor Beginn des 20. Jahrhunderts auch nur vorstellen konnten. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts ist es Zeit, damit anzufangen, sich das vorzustellen.

William Tucker is the author, most recently, of [Terrestrial Energy: How Nuclear Power Will Lead the Green Revolution and End America's Energy Odyssey](#).

Link: <http://www.energytribune.com/articles.cfm/2469/Understanding-E=-mc2>

Übersetzt von Chris Frey

*Bemerkung des Übersetzers: Der Artikel von Tucker stammt vom 21. Oktober 2009, ist also schon älter. Alles hierin Gesagte gilt natürlich auch für die Energiequelle Thorium, von der damals offenbar noch nichts bekannt war und die nun auch das Risiko einer Verstrahlung gegen Null tendieren lässt.