

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

---

$$\mathbf{E = mc^2}$$

#### Zur Person Einstein:

Albert Einstein wurde am 14. März 1879 in Ulm geboren - in einer Familie, die sich nie akademisch oder intellektuell hervorgetan hatte. Ein Jahr nach seiner Geburt zog die Familie nach München. Dort gründeten Vater Hermann und dessen Bruder Jakob Einstein eine elektrochemische Fabrik. Ein Jahr später wird seine Schwester Maja geboren. Die beiden blieben die einzigen Kinder von Hermann und Pauline Einstein.

Als Kind zeigte Albert keine besonderen Anzeichen eines Genies - er lernte später sprechen als die meisten anderen Kinder und antwortete noch mit neun Jahren nur zögernd, wenn er gefragt wurde. Seine Mutter stammte aus einer gutsituierten Familie, und sie weckte in ihrem Sohn die Liebe zur klassischen Musik. Im Alter von sechs Jahren begann sein Geigenunterricht, und als Erwachsener wurde er zu einem recht passablen Amateurmusiker.

Als er sechzehn war, musste die väterliche Fabrik schließen, worauf die Familie nach Italien zog. Albert jedoch wurde allein in München zurückgelassen, damit er dort sein Abitur machen konnte. Seine schulischen Leistungen dort ließen sehr zu wünschen übrig. Seine tiefe Abneigung gegen die formalen und starren Methoden des damaligen deutschen Schulsystems zeigte sich in seinem Verhalten nur zu deutlich. Seine Lehrer hatten sich immer über seine Aufsässigkeit geärgert, am meisten wohl sein Griechisch-Lehrer am Luitpold-Gymnasium, Josef Degenhart. Dieser erlangte unsterblichen Ruhm durch seine Bemerkung, »es werde nie in seinem Leben etwas Rechtes aus ihm werden«. Man legte Einstein nahe, die Schule zu verlassen, denn »Ihre bloße Anwesenheit in der Klasse verdirbt den Respekt der anderen Schüler« (Degenhart). Albert verließ das Gymnasium ohne Abschluß, ging zu seiner Familie nach Mailand, und während des folgenden Jahres tat er im Grunde nichts – bis auf ein wenig Bergsteigen und ein bißchen Selbstunterricht in Mathematik. Am Ende dieses Jahres musste der väterliche Betrieb abermals schließen, und der Vater ermutigte Albert sich beim Polytechnischen Institut in Zürich zu bewerben, um dort Elektroingenieurwesen zu studieren.

Albert unterzog sich der Aufnahmeprüfung und fiel durch. Der mathematische Teil allerdings gelang ihm so gut, dass man ihm sagte, er könne ohne weitere Prüfung das Studium aufnehmen, wenn er sich verpflichte, einen Gymnasialabschluß zu machen. Also schrieb er sich in einem Gymnasium in Aarau ein, einem wenige Kilometer von Zürich gelegenen Städtchen, und machte am Jahresende seinen Schulabschluß. 1896 trat er ins Züricher Polytechnikum ein, wo er vier unauffällige Jahre verbrachte. Mit Hilfe seiner Kommilitonen, vor allem seines Freundes Marcel Großmann, beendete er im August 1900 erfolgreich sein Studium mit der Punktzahl 4,9 (von max. 6), was eher durchschnittlich war.

Einem typischen Absolventen des Polytechnikums wie Einstein gelang es in der Regel, bei irgendeiner Universität eine Stelle als Assistent eines Professors zu

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

erhalten. Viele seiner Kommilitonen bekamen tatsächlich solche Stellen, doch Einstein hatte nicht so viel Glück. Der Grund dafür hatte mehr mit Einsteins Persönlichkeit in jenen Jahren als mit seinen intellektuellen Fähigkeiten zu tun. Einsteins späteres Bild in der Öffentlichkeit, das eines gutmütigen, freundlichen Professors, steht im krassen Gegensatz zu dem jungen Mann im Universitätsalter.

Nach seiner Diplomierung sagte ihm ein Professor: »Sie sind ein schlauer Bursche! Aber sie haben einen Fehler – Sie lassen sich nie etwas sagen...«. Jahre später beschrieb Einstein sich selbst während dieser Zeit als »unordentlichen Tagträumer... reserviert und mürrisch, nicht sehr beliebt«. Nachdem ihn jeder Professor des Polytechnikums zurückgewiesen hatte, begann er, anderswo zu suchen.

Während der nächsten zwei Jahre hatte er verschiedene Stellungen, darunter auch die eines Lehrers und Nachhilfelehrers. Ein Stipendium von Verwandten, das ihn während des Studiums unterstützt hatte, stand nun nicht mehr zur Verfügung, die Bemühungen, eine feste Stelle zu finden, hatten keinen oder nur geringen Erfolg, die Zeiten der Arbeitslosigkeit waren nicht selten für ihn. Da kam ihm abermals sein Freund Marcel Großmann zu Hilfe. Dessen Vater war befreundet mit Friedrich Haller, dem Direktor des Schweizerischen Patentamts, und Großmann Senior gelang es, Einstein dort eine Stelle zu vermitteln. Am 23. Juni 1902 trat er als Patentprüfer mit dem Titel »Technischer Experte Dritter Klasse« seinen Dienst an.

Seine Stelle als Patentprüfer behielt Einstein sieben Jahre lang – Jahre, die er später als einige der glücklichsten seines Lebens bezeichnen sollte. Im Januar 1903 heiratete er seine ehemalige Kommilitonin vom Züricher Polytechnikum, Mileva Maric. Im selben Jahr wurde Hans Albert, ihr erster Sohn geboren (nachdem vorher bereits eine uneheliche Tochter, dem Zeitgeist folgend, zur Adoption freigegeben worden war). Während dieser Zeit führte Albert Einstein das Leben eines unbemittelten Beamten. Nach einem achtstündigen Arbeitstag pflegte er sich zu Hause in die Physik zu stürzen und es gelang ihm, einige physikalische Abhandlungen zu veröffentlichen, die jedoch in der Fachwelt keinen besonderen Eindruck hinterließen. Stets suchte er nach den ganz großen Zusammenhängen; in seiner allersten Publikation von 1901 hatte er zu zeigen versucht, dass die Kraft, die eine Flüssigkeit im Strohhalm nach oben zieht, prinzipiell den Newtonschen Gravitationsgesetzen entspricht. Aber die grundlegenden Zusammenhänge vermochte er nicht zu klären, und sein Artikel fand wenig Resonanz. In Briefen an seine Schwester (die ihn übrigens von Kindheit an für ein Genie hielt) fragte er sich, ob er es jemals schaffen würde.

Dann kam das Jahr 1905, dieses *Wunderbare Jahr* der Physik. In diesem einen Jahr veröffentlichte Einstein insgesamt fünf Arbeiten in den *Annalen der Physik*, die in ihrer Gesamtheit die Physik wie die Philosophie gleichermaßen revolutionierten.

Mit seinem ersten Aufsatz von 1905, *Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen*, erhielt er die Doktorwürde der Universität Zürich. Dies war der am wenigsten herausragende der fünf Aufsätze, die er in jenem Jahr veröffentlichte.

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

---

In seiner zweiten Arbeit *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*, bestätigte er die Existenz der Moleküle (sogar noch 1905 gab es Physiker, die daran zweifelten). In seiner dritten Arbeit, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, vertrat er die These, dass Licht aus Energiebündeln, den sogenannten Quanten, bestehe – später sollten sie Photonen genannt werden. Diese Arbeit legte das theoretische Fundament für das, was schließlich die photoelektrische Zelle werden sollte. Seine vierte Arbeit aus jenem Jahr, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, enthielt die Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie. Und in seiner fünften Arbeit, *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?*, schrieb er seine berühmte Formel **E=mc<sup>2</sup>** nieder.

Obwohl es einige Physiker gab, die die Bedeutung dieser Aufsätze sofort erkannten, brauchten die meisten sehr lange, um die revolutionären Ideen darin zu verarbeiten. Es bedarf keiner Erwähnung, dass die Schriften im Patentamt völlig unbeachtet blieben. Am 1. April 1906 wurde Albert Einstein vom Technischen Experten Dritter Klasse zum Technischen Experten Zweiter Klasse befördert.

#### Weitere Stationen des Albert Einstein:

- 1908 Privatdozent an der Uni Bern
- 1909 Außerordentlicher Professor an der Uni Zürich
- 1911 Ordentlicher Professor an der deutschen Uni Prag
- 1912 Professor am Polytechnikum Zürich (zusammen mit Großmann Arbeit an einer neuen Theorie der Schwerkraft, die er die Allgemeine Relativitätstheorie nannte)
- 1913 Die Veröffentlichung der *Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie* macht ihn zum berühmtesten Wissenschaftler der Welt
- 1914 Direktor des neugegründeten Kaiser-Wilhelm-Instituts in Berlin (als Schweizer Bürger).
- 1914 Trennung und Scheidung von seiner Frau Mileva, die in der Schweiz bleibt. Das mit dem Nobelpreis für Physik 1921 verbundene Preisgeld überweist er ihr und den Kindern in die Schweiz.
- 1919 Heirat mit Elsa Löwenthal, die verwitwete Tochter eines Cousins väterlicherseits und Mutter zweier Kinder. In diesem Jahr wird Einstein weltweit zu einer öffentlichen Figur.
- 1933 Emigration nach Amerika und Tätigkeit in Princeton, New Jersey, am damals neuen *Institute for Advanced Studies*.
- 1955 Am 18. April stirbt Einstein 76-jährig im Princeton Hospital, wo er seit einigen Tagen liegt. Todesursache ist ein Riss der Aorta, der Hauptschlagader des Körpers.

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

Einsteins ältester Sohn Hans Albert ging ebenfalls in die USA und wurde Professor für Wasserbau in Berkeley, Kalifornien.

Mileva Einstein lebt nach ihrer Scheidung noch ein viertel Jahrhundert und pflegte in der Zeit ihren jüngeren Sohn, bei dem man Schizophrenie diagnostiziert hatte.

#### **E steht für »Energie«**

Der Begriff Energie ist in seiner heutigen Bedeutung erst seit der Mitte des 19. Jahrhunderts gebräuchlich und damit noch erstaunlich neu. Natürlich hatten die Menschen auch vorher schon erkannt, dass in der Natur gewisse Kräfte am Werk sind – zum Beispiel das Knistern von Reibungselektrizität oder die Segel aufblähende Macht des Windes. Nur konnte sich keiner vorstellen, dass diese Phänomene miteinander in Zusammenhang stehen, denn es gab noch keinen umfassenden Begriff »Energie«, unter den sie sich hätten subsumieren lassen.

Einer der Männer, die wesentlich zu einer Änderung dieser Sichtweise beitrugen war *Michael Faraday*.

Der ohne besondere Schulbildung aufgewachsene Sohn eines Schmiedes erhielt eine Ausbildung zum Buchbinder, die ihn vor der anfangs des 19. Jahrhunderts in London weit verbreiteten Armut bewahrte, und die es ihm auch ermöglichte, auf viele Seiten einen, wenn auch nur flüchtigen Blick zu werfen, bevor sie gebunden wurden. Seine Neugier auf Themen der damaligen Wissenschaft war damit geweckt. Als er zwanzig war, wurde ihm von einem Kunden Eintrittskarten für eine Vortragsreihe an der *Royal Society* angeboten. Humphry Davy sprach dort über Elektrizität und über die verborgenen, unter der Oberfläche des uns sichtbaren Universums herrschenden Kräfte. Faraday besuchte die Vorträge und machte sich gewohnheitsmäßig genaue Notizen, schrieb sie in der Buchbinderei sauber ab und fügte noch einige Zeichnungen von Davys Apparaturen hinzu. Dann überarbeitete er das Manuskript noch einmal – alle seine Entwürfe werden heute wie Reliquien im Archiv der *Royal Society* aufbewahrt – und band es zu einem großartigen Buch, das er Sir Humphry Davy überbringen ließ. Dieser war davon so beeindruckt, dass er den nicht standesgemäßen und ungebildeten jungen Mann als Laborassistenten einstellte.

Nach einigen Jahren als Assistent wurde er gebeten, eine außerordentliche Entdeckung aus Dänemark zu erklären. Ein Dozent in Kopenhagen hatte etwas ganz Erstaunliches festgestellt: Eine Kompassnadel, die sich oberhalb eines Drahtes befindet, dreht sich ein wenig zur Seite, wenn man elektrischen Strom durch den Draht fließen lässt. Bis dahin war man sich einig, dass es zwischen Elektrizität und Magnetismus keinerlei Zusammenhang gibt. Elektrizität war das zischende, knisternde Etwas, das aus Batterien kam. Ganz anders der Magnetismus – er galt als eine unsichtbare Kraft, die die Kompassnadel in eine bestimmte Richtung drehte oder Eisenstückchen zu einem Magneten hinzog. Der Magnetismus, das war die einhellige Meinung, hatte nichts mit Batterien und elektrischen Schaltungen zu tun. Wie war es also möglich, dass ein elektrisch geladener Metalldraht eine Kompassnadel bewegte.

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

Faraday begann seine Untersuchungen über die Verknüpfungen zwischen Elektrizität und Magnetismus im Spätsommer 1821 – das war 25 Jahre, bevor Alexander Graham Bell, der als Erfinder des Telefons gilt, und knapp 60 Jahre, bevor Albert Einstein geboren wurde. Kurz zuvor hatte er eine junge Dame geheiratet, die der Religionsgemeinschaft der Sandemanier angehörte (nach Robert Sandeman, der die Sekte in England verbreitet hatte). Diese Sandemanier, denen er fortan auch angehörte, hatten als Symbol ihres Glaubens ein bestimmtes geometrisches Muster, den Kreis. Die Menschen sind heilig, so sagten sie, und wir sind alle aufgrund unserer heiligen Natur einander verpflichtet.

Ich helfe dir, du hilfst einem anderen und dieser wird wiederum einem anderem helfen usw. – bis der Kreis sich schließt. Dieser Kreis war in diesem Sinne also nicht nur eine abstrakte Idee.

Bei seinem Versuchsaufbau befestigte Faraday einen Stabmagneten so, dass er hochkant stand. Inspiriert von seinen religiösen Überzeugungen, stellte er sich einen Wirbel von unsichtbaren, *kreisförmigen* Linien um den Magneten vor. Wenn er damit recht hätte, dann könnte ein von einer beweglichen Aufhängung lose herabhängender stromdurchflossener Draht davon angezogen und in jene mystischen Kreisbewegungen gezwungen werden, fast wie ein kleines Boot, das in einen Strudel gerät. Faraday schloß nun eine Batterie an einen Draht an, dessen unteres Ende in einem Quecksilberbad endete. Er machte die Entdeckung des Jahrhunderts - das Prinzip des Elektromotors und des Dynamos.

Noch hatte man zu diesem Zeitpunkt keine umfassende Vorstellung von »Energie«, aber Faradays Entdeckung, dass jene unterschiedlichen Kräfte Elektrizität und Magnetismus zusammenhingen, kam ihr einen entscheidenden Schritt näher. Unter den Wissenschaftlern wuchs die Zuversicht, ähnliches auch für alle anderen Formen von Energie beweisen zu können. Die chemische Energie, die beim Explodieren einer Schießpulverladung freigesetzt wurde, oder die Energie der Reibungswärme, die beim Schuheputzen entstand standen jeweils miteinander in Zusammenhang. Man wußte nun, dass bei einer Schießpulverexplosion die dabei freigesetzte Energiemenge der Druckwelle und der umherfliegenden Trümmer der Energie entsprach, die vorher in der ruhenden chemischen Ladung gesteckt hatte.

Faradays Arbeiten trugen zu den größten Erfolgen der Forschung im 19. Jahrhundert bei und bestimmten auch deren weitere Richtung. Jede bei diesen Energieumwandlungen auftretende Größe, die Faraday und andere enthüllt hatten, konnte nun berechnet und gemessen werden. Dabei stellte sich jedes Mal heraus, dass die Gesamtmenge der Energie sich tatsächlich nie verändert hatte – also »erhalten blieb«. Dieses Prinzip nannte man bald das *Gesetz von der Energieerhaltung*.

Auch Einstein hatte von seinen Physiklehrern am Gymnasium in Aarau dieses Gesetz gelernt, aber in stilleren Momenten während seines Studiums in Zürich, in denen er über Physik, Energie und andere Themen nachdachte, dämmerte ihm

allmählich, was an den Sichtweisen falsch war, die er zu lernen hatte. Alle Energiearten, die die »Viktorianer« erkannt und deren Zusammenhänge sie geklärt hatten – die von den Chemikalien wie auch des Feuers, der elektrischen Funken und der Sprengstoffe –, waren nur ein winziger Teil eines möglicherweise viel größeren Ganzen.

Einsteins Vermutung erwies sich als richtig, denn innerhalb weniger Jahre sollte er eine Energiequelle ausfindig machen, neben der alles verblasste, was selbst die besten und gründlichsten Forscher des 19. Jahrhunderts entdeckt hatten. Er fand diese neue, fast unermessliche Energiequelle dort verborgen, wo niemand sie jemals vermutet hätte.

Die alten Gleichungen sollten ihre Gültigkeit verlieren.

#### **m steht für »Masse«**

Lange Zeit erging es dem Begriff »Masse« wie dem Begriff »Energie« vor den Arbeiten Faradays und anderer Forscher im 19. Jahrhundert: Es gab eine Vielzahl verschiedener Substanzen – Eis und Fels und verrostetes Metall –, aber wie sie miteinander zusammenhingen und ob überhaupt, war völlig unklar. Dass es aber irgendeine Verknüpfung geben mußte, hatte bereits Newton vermutet.

Um herauszufinden, ob Newtons Theorie, dass zwischen den verschiedenartigen Substanzen und Gegenständen um uns herum wirklich ein Zusammenhang besteht, mußte jemand äußerst pedantisch und penibel zu Werke gehen – jemand, der sich die Zeit nähme, selbst winzige Veränderungen von Gewicht und Größe der Substanzen oder Körper zu messen. Dieser Jemand hatte zudem auch noch romantisch genug zu sein, um sich von Newtons Vision inspirieren zu lassen, denn warum sollte er sich sonst die Mühe machen, nach Zusammenhängen zu suchen, die bisher nur vage vermutet wurden? Diese merkwürdige Mischung – ein Buchhalter mit einer Seele, die in höheren Regionen schwebt – verkörperte perfekt *Antoine Laurent de Lavoisier*. Er war der erste, der beweisen sollte, dass all die scheinbar so verschiedenartigen Holz-, Stein- und Eisenstücke in Wirklichkeit Teile eines Ganzen sind.

Lavoisiers Tätigkeit bestand darin, die Buchhaltung zu führen für eine Institution, die als Monopol die Steuern für die Regierung Ludwigs XVI einzuziehen hatte. Einen Tag in der Woche konnte er sich die Zeit nehmen, sich seiner Wissenschaft zu widmen. Er hatte für seine Experimente in seinem Haus ein eigenes Zimmer hergerichtet und die für die damalige Zeit genauesten Waagen, Messinstrumente und Apparaturen angeschafft. Er wollte beobachten, wie ein Metallstück langsam verglüht oder vielleicht auch nur verrostet, um dann herauszufinden, ob es danach mehr oder weniger wiegt als zuvor.

Seine junge Frau ging ihm dabei zur Hand, als er eine luftdicht verschließbare Apparatur aufstellte, in die die beiden Lavoisiers nacheinander verschiedene Substanzen einbrachten und anschließend luftdicht versiegelten. Dann erhitzen sie

den Behälter oder setzten sogar eine richtige Verbrennung in Gang, um das Rosten zu beschleunigen. Sobald alles wieder abgekühlt war, entnahmen sie das rostige, verbrannte oder anderweitig zersetzte Metallstück und wogen es erneut. Ebenso ermittelten sie, wie viel Luft in die Apparatur hineingeströmt oder aus ihr entwichen war. Jedesmal erzielten sie das gleiche Ergebnis: Ein Metallstück wiegt nach dem Rosten nicht weniger als zuvor. Es wiegt auch nicht ebenso viel wie zuvor, sondern *mehr*.

Das hatten sie nicht erwartet. Was war geschehen? Über dem Metallstück hatte sich Luft befunden, und der Sauerstoff in ihr war nun nicht mehr vorhanden. Aber er nicht einfach verschwunden, sondern hatte sich mit dem Metall verbunden. Das Gesamtgewicht der Luft hatte sich verringert und im selben Maße hatte sich das Gewicht des Metalls erhöht.

Mit Hilfe seiner Präzisionswaage hatte Lavoisier also demonstriert, dass Materie sich zwar von einer Form in eine andere umwandeln läßt, dass sie aber weder aus dem Nichts entstehen noch ins Nichts verschwinden kann.

Das war eine der grundlegendsten Entdeckungen des 18. Jahrhunderts, in ihrer Bedeutung vergleichbar mit Faradays Erkenntnissen über die Energie, zu denen er ein halbes Jahrhundert später im Keller der Royal Society gelangen sollte.

Die Feststellung, dass allen Gegenständen der sichtbaren Welt eine Eigenschaft gemeinsam ist, die man »Masse« nennt und die darüber bestimmt, wie sie sich bewegen, klingt eindrucksvoll, vor allem, weil Newton sie bereits im ausgehenden 17. Jahrh. gemacht hatte. Aber wie würde sich im Einzelnen zeigen lassen, auf welche Weise sich die Bestandteile der Gegenstände oder Substanzen vereinigen oder voneinander trennen können? Das war der Schritt über Newton hinaus, den Lavoisier nun getan hatte,

Mit Lavoisiers Arbeiten war das Prinzip von der Erhaltung der Masse auf bestem Wege, anerkannt zu werden. Die verschiedenartigen Stoffe um uns herum können sich voneinander trennen oder sich vereinigen, doch die Gesamtmasse bleibt stets dieselbe.

Um die Mitte des 19. Jahrh. hatten Wissenschaftler die Vorstellung akzeptiert, dass sich Energie und Masse zueinander wie zwei einzelne, völlig verschiedene Phänomene verhalten. Hier Feuer, knisternde Drähte an Batterien und Blitze – das war der Bereich der Energie. Und dort Bäume, Steine, Menschen und Planeten – das war der Bereich der Masse.

Jeder der beiden Bereiche bildete eine wundersam in sich ausgeglichene Welt, und in jeder war auf unergründliche Weise sichergestellt, dass ihre Gesamtmenge stets unverändert blieb, obwohl die Formen, in denen sie auftrat, sehr unterschiedlich sein konnten. Wenn man versuchte, innerhalb eines Bereichs etwas zu entfernen, dann würde an seiner Stelle unweigerlich etwas anderes auftauchen.

Es gab jedoch nichts, was die beiden Bereiche miteinander verband. Das war der Stand der Theorie, wie sie auch Einstein im ausgehenden 19. Jahrh. noch gelernt hatte: Energie und Masse sind völlig verschiedene Phänomene, die nichts miteinander zu tun haben.

Später widerlegte Einstein seine Lehrer und Dozenten, aber auf eine Art und Weise, wie man es wohl nicht erwartet hätte. Gemeinhin wird angenommen, dass in den Naturwissenschaften eines auf dem anderen aufbaut: Man bastelte am Telegrafen herum, und schon wurde daraus das Telefon; man entwickelte ein Propellerflugzeug, testete es eingehend und war sodann in der Lage, technisch verbesserte Flugzeuge zu bauen. Aber dieses Prinzip der stetigen Steigerung versagt bei prinzipiellen Problemen. Einstein fand heraus, dass es zwischen den Bereichen Energie und Masse eine Verbindung gibt, jedoch nicht auf die Weise, dass er Experimente durchführte, bei denen er vielleicht hätte feststellen können, dass eine winzige Massenportion nicht ausgeglichen wurde und sich in Energie verwandelt haben könnte. Vielmehr wählte er einen – vermeintlichen – Umweg. Wie es schien, gab er die Überlegungen zu Masse und Energie auf und konzentrierte sich auf etwas, das offenbar überhaupt nichts damit zu tun hatte – er nahm die Lichtgeschwindigkeit ins Visier.

#### **c steht für »celeritas«**

Lange Zeit hielt man allein schon die Messung der Lichtgeschwindigkeit für unmöglich. Fast alle Naturforscher waren der Überzeugung, dass sich Licht unendlich schnell ausbreitet. Aber wenn es so wäre, könnte der Wert seiner Geschwindigkeit ja niemals in eine Gleichung eingesetzt werden. Bevor man weiterkommen konnte – bevor also Einstein auch nur daran denken konnte, die Größe  $c$  zu verwenden -, mußte jemand bestätigen, dass die Lichtgeschwindigkeit einen endlichen Wert hat. Und das war keineswegs leicht.

Im Jahre 1671 schickte der Leiter der Pariser Sternwarte, Jean Dominique Cassini, einen Abgesandten zur legendären Sternwarte Uranienborg auf der damals dänischen (heute schwedischen) Insel Ven im Öresund. Cassini wollte dort Mitarbeiter abwerben. Der Begründer der Sternwarte Uranienborg, Tycho Brahe, hatte die entscheidenden astronomischen Beobachtungen durchgeführt, auf die sich Kepler und auch Newton in ihren Arbeiten stützten. Jene hochentwickelten Vorrichtungen und bedeutenden Ergebnisse, die Kepler so beeindruckt hatten, lagen schon fast ein Jahrhundert zurück. Der Gründer der Sternwarte war eine einflußreiche Persönlichkeit gewesen, doch als er starb, fand sich kein Nachfolger. Alles war bereits überwuchert oder verfallen als der Abgesandte Picard dort eintraf. Das einzige was Picard erreichte, war, dass ein intelligenter zwanzigjähriger Däne mit dem Namen *Ole Römer* mit ihm nach Paris reiste.

Cassini galt als weltweit anerkannte Autorität, wenn es um Planeten wie Jupiter und die Umlaufbahnen ihrer Monde ging. Er hatte zahlreiche Daten aus seinen ausführlichen Beobachtungen gesammelt und festgestellt, dass es ein Problem mit



dem innersten Jupitermond Io gab. Eigentlich sollte dieser Mond seinen Planeten in  $42\frac{1}{2}$  Stunden einmal umrunden. Aber der »Fahrplan« wurde nie genau eingehalten. Manchmal war er etwas schneller, dann wieder etwas langsamer. Es war keinerlei Regelmäßigkeit darin zu erkennen.

Jedermann – selbst Cassini – suchte das Problem in der Bewegungsweise des Jupitermondes Io. Möglicherweise schwankte er auf seiner Umlaufbahn. Vielleicht gab es auch Wolken oder andere störende Einflüsse im Umkreis des Jupiter, die Io behinderten. Römer kehrte das Problem um. Warum sollte eigentlich der Fehler irgendwo dort oben beim Planeten Jupiter zu suchen sein? Es ging gar nicht darum, wie Io sich bewegte, fand Römer, sondern vielmehr darum, wie die Erde sich bewegte.

Angenommen – einfach nur angenommen -, das Licht benötigte doch eine gewisse Zeit, um die große Entfernung vom Jupiter zur Erde zurückzulegen. Was bedeutete das? Römer stellte sich vor, er blicke von oben auf das Sonnensystem herab und sähe den ersten Lichtschein von Io hinter dem Planeten Jupiter hervorblitzen und durch das Sonnensystem zur Erde rasen. Im Sommer beispielsweise, wenn die Entfernung zwischen Erde und Jupiter geringer ist, hätte das Licht einen kürzeren Weg zurückzulegen und Io würde früher sichtbar. Im Winter jedoch, wenn sich die Erde auf der anderen Seite des Sonnensystems befindet, würde das Licht viel länger brauchen, um die Erde zu erreichen.

Cassini erschien dieser Gedanke völlig abwegig. Wie fast alle Astronomen war er davon überzeugt, dass sich das Licht blitzartig fortbewegt. Jeder Narr konnte das einsehen. Hatten nicht schon die Experimente von Galilei und seinen Mitarbeitern gezeigt, dass es für das Gegenteil keinerlei Beweise gab? Römer kümmerte das nicht. Er durchforschte nun die in vielen Jahren angesammelten Aufzeichnungen Cassinis, und im Spätsommer 1676 fand er die Lösung. Es handelte sich dabei nicht etwa nur um eine vage Vermutung, sondern er gab genau an, wie viele weitere Minuten das Licht benötigte, um die zusätzliche Entfernung zu durchmessen, wenn die Erde, vom Jupiter aus gesehen, hinter der Sonne stand.

Im 17. Jahrh. waren die Apparaturen in der Astronomie schon genau genug, um eine Vorhersage zu überprüfen, wann Io das nächste Mal aus dem Schatten des Jupiter treten würde; dies sollte am 9. November am späten Nachmittag der Fall sein. Es ging jetzt aber um die genaue Uhrzeit. Nach Cassinis Berechnungen mußte Io um 17.25 Uhr auftauchen – das hatte er durch Extrapolation aus den Daten des vorherigen Auftauchens im August gefolgert.

Römer widersprach. Im August, so erläuterte er, sei die Erde dem Jupiter relativ nahe, in November dagegen weiter von ihm entfernt. Also würde Io nicht um 17.25 Uhr sichtbar werden, denn das Licht – obwohl unvorstellbar schnell – sei zu diesem Zeitpunkt noch unterwegs, weil es ja die zusätzliche Entfernung zurücklegen müsse. Auch um 17.30 Uhr werde es noch nicht auf der Erde angekommen sein, sondern exakt um 17.35 Uhr und 45 Sekunden.

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

---

Die Voraussage war im September bekannt gegeben worden, und am 9. November richteten die Sternwarten von Greenwich bis Mailand ihre Teleskope auf Jupiter. Es wurde 17.25 Uhr – kein Io. 17.35Uhr – immer noch kein Io. Und dann, ganz genau um 17.35 Uhr und 45 Sekunden, erschien Io.

Der düpierte, berühmte Cassini setzte alles daran, die Vorrausagen Römers in Zweifel zu ziehen und wurde dabei von seinen Anhängern unterstützt. Obwohl Römer ein einwandfreies Experiment durchgeführt und über dessen Ergebnis eine eindeutige Aussage gemacht hatte, wollten Europas Astronomen noch immer nicht wahrhaben, dass sich das Licht mit einer endlichen Geschwindigkeit ausbreitet. Nach offizieller Lehrmeinung war die Lichtgeschwindigkeit weiterhin eine geheimnisvolle, unmeßbar große Zahl, die keinerlei Einfluß auf astronomische Messungen hatte.

Römer gab auf, ging nach Dänemark zurück und wirkte lange Jahre als Hafekommandant von Kopenhagen. Erst 50 Jahre später gelangten die Astronomen durch weitere Experimente zu der Überzeugung, dass Römer recht gehabt habe. Der Wert, den er für die Lichtgeschwindigkeit errechnet hatte, lag etwa ein Fünftel unter dem heute gültigen Wert von  $2,99792458 \times 10^8$  m/s (ca. 300.000 km/s).

Warum nur hatte Einstein ausgerechnet diesen Wert in seine Gleichung eingesetzt? Um das zu verstehen, müssen wir Eigenschaften und Verhalten des Lichts näher betrachten. Dabei lassen wir die Epoche Cassinis und Römers weit hinter uns und begeben uns in die späten 50er Jahre des 19. Jahrh. Damals begann der schon über sechzigjährige Michael Faraday seine Korrespondenz mit James Clerk Maxwell, einem schlanken Schotten, der noch keine dreißig war.

Maxwell hatte schon früh erkannt, welches Potential in den Forschungsarbeiten Faradays steckte, die ja zeigten, wie sich Elektrizität in Magnetismus und umgekehrt umwandeln ließen. Während Faraday sich mit jeglicher Mathematik schwer tat, die über die Grundrechenarten hinausgingen, war Maxwell unter den theoretischen Physikern des 19. Jahrh. wahrscheinlich der beste Mathematiker. In den späten 1850er Jahren gelang es ihm daher auch, die bislang nur experimentell bekannten Wechselwirkungen zwischen Elektrizität und Magnetismus mathematisch zu beschreiben. Die »Maxwellschen Gleichungen« gehören seitdem zum Grundwissen eines jeden Physikers oder Ingenieurs der Elektrotechnik.

Was sich in einem Lichtstrahl abspielt, so erkannte Maxwell allmählich, war eine Art von Vor- und Zurückbewegung. Wenn ein Lichtstrahl sich nach vorn zu bewegen beginnt, entsteht ein klein wenig Elektrizität; und wenn diese Elektrizität sich bewegt, ruft sie im gleichen Augenblick einen gewissen Magnetismus hervor, und wenn dieser sich bewegt, löst er wieder (fast) gleichzeitig einen kleinen Schwall Elektrizität aus und so weiter und so fort, wie eine geflochtene Peitsche, die nach vorn schnellt. Elektrizität und Magnetismus springen sozusagen abwechselnd übereinander hinweg, und bei diesen winzigen, schnellen Bocksprüngen »umarmen sie einander«, wie Maxwell es ausdrückte.

Diese Interpretation der Lichtwellen markiert einen der Höhepunkte in der Wissenschafts-geschichte des 19. Jahrh. Maxwells Gleichungen, mit denen er die Erkenntnisse über das Licht zusammenfasste und deutete, gehören zu den größten theoretischen Leistungen der Menschheitsgeschichte überhaupt. Diese Feldtheorien Maxwells waren es übrigens, mit denen sich Einstein bis zu seinem Lebensende in Princeton beschäftigen sollte.

Nachdem Einstein erkannt und nachgewiesen hatte, dass die Lichtgeschwindigkeit einen konstanten Wert hat, der unter keinen Umständen und nirgends im Universum überschritten werden kann, wurde ihm klar, dass bei einem Objekt, dem man bei einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit weitere Energie zuführt, die Geschwindigkeit trotzdem nicht weiter ansteigt. Da diese zusätzliche Energie nicht einfach verschwindet, kann sie nur die Masse dieses Objekts erhöhen. Das klingt absurd, aber man kann es beweisen. Die Protonen eines Atomkerns haben eine Masse von einer »Einheit«. Wird ihnen nach und nach immer mehr Energie zugeführt, so bewegen sie sich immer schneller, genau wie erwartet. Aber wenn sie fast Lichtgeschwindigkeit erreichen, wird der Beobachter eine gewisse Veränderung wahrnehmen. Derartiges verfolgen die Physiker an den großen Teilchenbeschleunigern bei Chicago oder am europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf tagtäglich. Die Protonen haben irgendwann die Masse von zwei »Einheiten«, sind also doppelt so schwer wie am Anfang, dann dreimal so schwer usw., je mehr Energie man ihnen zur Beschleunigung zuführt. Wenn sie 99,9997 Prozent der Lichtgeschwindigkeit  $c$  erreicht haben, sind sie sogar 430 mal so schwer wie zu Beginn. (Hierzu benötigen die Teilchenbeschleuniger so viel elektrische Energie, dass sie oft nur nachts betrieben werden, um die Stromversorgung der Stadt nicht zu gefährden).

Die Energie, die den Protonen oder einem beliebigen anderen Objekt zugeführt wird, wandelt sich also in zusätzliche Masse um. Das besagt auch unsere Gleichung:  $E$  kann zu  $m$  werden, und  $m$  kann zu  $E$  werden. Damit ist nun klar, warum in der Gleichung die Größe  $c$  auftritt. Je näher wir der Lichtgeschwindigkeit kommen, desto augenfälliger wird der Zusammenhang zwischen Energie und Masse. Die Zahl  $c$  ist dabei nur der Umrechnungsfaktor, der angibt, wie die Verknüpfung beschaffen ist.

Einsteins Ergebnisse widerlegten die voneinander unabhängigen Überzeugungen, die die Physiker bis zum Anfang des 20. Jahrh. aus den Arbeiten zur Erhaltung der Energie und der Masse abgeleitet hatten. Nun wurde offenbar, dass weder Energie noch Masse erhalten bleiben. Stattdessen gibt es einen tiefergehenden Zusammenhang. Die Menge an Masse, die hinzukommt, wird ausgeglichen durch eine gleichwertige Menge an Energie, die verloren geht.

Lavoisier und Faraday hatten nur einen Teil der Wahrheit erkannt. Die Energie steht nicht für sich allein, ebenso wenig wie die Masse. Aber die Summe von beiden – Masse plus Energie – bleibt stets dieselbe.

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

Dies war nun die letzte Ausweitung der zuvor separaten Erhaltungssätze, die die Wissenschaftler des 18. und 19. Jahrh. einst für vollständig gehalten hatten. Dass der Zusammenhang zwischen Energie und Masse so lange verborgen blieb – ja nicht einmal vermutet wurde – , liegt daran, dass die Lichtgeschwindigkeit unvorstellbar hoch ist, also viel höher als die meßbaren Geschwindigkeiten von Objekten auf der Erde. Der oben beschriebene Effekt der Massenzunahme ist bei normalen Geschwindigkeiten unmeßbar klein, auch bei den schnellsten Flugzeugen – aber er ist prinzipiell immer vorhanden.

Die Verknüpfung von Energie und Masse über die Lichtgeschwindigkeit war eine umwälzende Einsicht. Doch warum geht die Lichtgeschwindigkeit  $c$  in der Formel in der zweiten Potenz ein und nicht in der ersten oder dritten?

### hoch 2

Im Frankreich des Jahres 1733 lernte der begabte Schriftsteller Francois Marie Arouet in der Pariser Oper eine junge Dame kennen, die, wie sich herausstellt, seine Begeisterung für die Schriften Newtons und Descartes teilt. *Emilie du Chalet* war wegen ihrer intellektuellen Fähigkeiten und Interessen ein wenig isoliert in Versailles aufgewachsen und hatte mit neunzehn einen wohlhabenden Offizier geheiratet, der praktischerweise die meiste Zeit mit seiner Truppe unterwegs war. Arouet wird ihr Liebhaber (einer von vielen), und sie beschließt, ein altes Schloß der Familie bei Cirey in der Champagne wiederherzurichten, um darin in aller Ruhe ihren wissenschaftlichen Interessen nachgehen zu können. Nach zwei Jahren ist der Umbau des Schlosses beendet, und nun gibt es dort eine große Bibliothek, hochmoderne Laboreinrichtung aus London, Gästezimmer mit Gemälden von Watteau und einen separaten Gebäudeflügel für ihren Liebhaber Arouet, der sich inzwischen Voltaire nennt.

Voltaire und du Chalet korrespondierten mit anderen Forschern in ganz Europa über aktuelle Themen, und irgendwann wollte die Forschernatur du Chalet einer Sache auf den Grund gehen: Was ist Energie?

Sie wußte, dass die meisten Wissenschaftler glaubten, das Wesen der Energie sei bereits hinreichend geklärt. Voltaire hatte diese vermeintlich unabänderlichen Wahrheiten in seinen allgemeinverständlichen Darstellungen der Newtonschen Gesetze behandelt. Demnach sollte der bestimmende Faktor beim Zusammenstoß zweier Körper einfach das Produkt aus ihrer Masse und ihrer Geschwindigkeit sein, also  $mv^1$ . Aber du Chalet wußte auch, dass Newtons Auffassungen von dem bedeutenden, seinerzeit schon verstorbenen Diplomaten und Naturphilosophen Gottfried Wilhelm Leibniz bestritten worden waren. Für Leibniz lautete der entscheidende Ausdruck  $mv^2$ . Welche Ansicht war die richtige?

Du Chalet und ihre Mitstreiter fanden den entscheidenden Beweis mit Hilfe damals neuer Experimente des niederländischen Forschers Willem 'sGravesande. Dieser hatte unter anderem schwere Gewichte aus unterschiedlichen Höhen (und damit unterschiedlichen Geschwindigkeiten) auf weichen Lehmboden fallen lassen. Das

## Idsteiner Mittwochsgesellschaft

### E=mc<sup>2</sup> – Die berühmteste Formel der Weltgeschichte

Ergebnis war, dass eine doppelt so schnelle Messingkugel nicht doppelt so tief in den Lehm eindrang sondern viermal so tief und eine dreimal so schnelle neunmal so tief.

Die Experimente des Niederländers wurden sorgfältig wiederholt, und die Messungen waren eindeutig. Das Ergebnis konnte also nur lauten:  $E = mv^2$ . Die Publikation von du Chalets Abhandlung über dieses Ergebnis zeigte große Wirkung. Die meisten englischen Wissenschaftler ergriffen automatisch Partei für Newton, während die deutschen in der Regel ebenso dogmatisch die Sichtweise von Leibniz vertraten. Aber Schloß Cirey galt inzwischen als eine der wenigen wirklich unabhängigen Forschungsstätten, und du Chalet konnte klar und anschaulich schreiben – das gab den Ausschlag.

Die Proportionalität der Energie zu  $mv^2$  wurde für die Physiker allmählich zur puren Selbstverständlichkeit. Die große Frage lautet jedoch: Warum erlaubt das Quadrieren der Geschwindigkeit eines Objekts ein so exakte Beschreibung dessen, was in der Natur vorgeht?

Ein Grund liegt darin, dass die Geometrie unserer Welt nicht selten Quadratzahlen hervorbringt. Die Leuchtstärke einer Lichtquelle beispielsweise nimmt mit der Entfernung quadratisch ab, ebenso nimmt der Bremsweg eines Autos bei dreifacher Geschwindigkeit um das Neunfache zu.

Im Laufe der Zeit gewöhnten sich die Physiker daran, das Produkt der Masse des sich bewegenden Objekts und des Quadrats seiner Geschwindigkeit zu berechnen (also  $mv^2$ ), um so seine Energie zu erhalten. Wenn nun die Geschwindigkeit so weit wie nur denkbar ansteigt, also bis auf 300.000 km/s, dann ist fast die Energie erreicht, die das Objekt maximal erreichen könnte - eben  $mc^2$ .

## Anhang

- Bei der Kernspaltung, die zum ersten Mal Otto Hahn gelang, ging  $\frac{1}{5}$  Protonenmasse „verloren“, die in reine Energie umgewandelt wurde (200 MeV). Zum Vergleich: Im kalifornischen Berkeley wurde ein riesiger, haushoher Magnet konstruiert. Wenn dieser mit einer höheren elektrischen Leistung versorgt wird, als die ganze Stadt normalerweise benötigt, kann einem Teilchen eine Energie von 100 MeV zugeführt werden. Schon in einem i-Punktchen befinden sich mehr Protonen, als es in unserer Galaxie Sterne gibt.
- Die Bomben von Hiroshima und Nagasaki enthielten jeweils ca. 15 kg Spaltmaterial, von dem nur ein winziger Teil in pure Energie umgewandelt wurde (Strahlung, Wärme, Druck). Der große Rest blieb als Spaltprodukte der Nachwelt als Strahlenquelle erhalten.
- Hans Bethe hat errechnet, dass bei dem in unserer Sonne ablaufenden Prozess der Kernfusion (Wasserstoff wird in Helium umgewandelt) 0,7 Prozent des ursprünglichen Wasserstoffs in reine Energie überführt wird – pro Sekunde 4 Mio Tonnen. Seit Milliarden von Jahren.

Aus David Bodanis „Bis Einstein kam“

Präsentiert am 1. Juni 2011 von R.G.