

Das Wunderjahr Albert Einsteins

Josef Honerkamp

Die Generalversammlung der Vereinten Nationen (United Nations Organization) hat in der ihrer Agenda 58/293 am 10. Juni 2004 das Jahr 2005 zum Internationalen Jahr der Physik ausgerufen. Solche Erklärungen dienen dazu, die Aufmerksamkeit der Menschen auf wichtige allgemeine oder historische Tatsache zu lenken. So beginnt die Agenda der UNO zunächst mit Aussagen über die Bedeutung der Physik: *„Recognizing that physics provides a significant basis for the development of the understanding of nature -- Noting that physics and its applications are the basis of many of today's technological advances -- Convinced that education in physics provides men and women with the tools to build the scientific infrastructure essential for development“*, wonach dann der eigentliche Anlass erwähnt wird: *“Being aware that the year 2005 is the centenary of seminal scientific discoveries by Albert Einstein which are the basis of modern physics“*. Das Werk und die Person Albert Einstein stehen also im Mittelpunkt dieses Jahres, das deshalb auch bald einfach Einstein-Jahr genannt wurde. Die Idee für die Einrichtung eines solchen Jahres der Physik wurde auf der Konferenz der International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) am 9. – 12. Oktober 2002 in Berlin geboren und erhielt schnell Unterstützung, insbesondere auch auf dem Hintergrund der positiven Erfahrungen mit dem Jahr der Physik 2000 in Deutschland.

In fast allen Staaten der Welt fanden so im Jahre 2005 Vorträge, Ausstellungen und experimentelle Vorführungen in Schulen, Universitäten oder Tagungsstätten statt, in Entwicklungsländern wurden diese auch als Kampagnen zur Talentsuche genutzt. Herausragende Ereignisse waren die Eröffnungskonferenz „Physics for Tomorrow“ in Paris am 13.-15. Januar 2005 unter der Schirmherrschaft der UNO, UNESCO und IUPAP, die Tagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin vom 7. – 11. März mit einem Treffen aller Sektionen zum Thema „Physik seit Albert Einstein“ sowie das 13. Treffen der Europäischen Physical Society am 11.-15. Juli in Bern, in der Stadt, in der Einstein 1905 seine Bahn brechenden Ideen entwickelte, während er dort am Schweizerischen Patentamt arbeitete. Im Kronprinzenpalais „Unter den Linden“, Berlin, wurde am 16.05.2005 die Ausstellung zum Thema „Albert Einstein - Ingenieur des Universums“ eröffnet. In dieser wird der verschlungene Lebensweg Albert Einsteins vor dem Hintergrund der politischen und gesellschaftlichen Umwälzung seiner Zeit beleuchtet und der Besucher erfährt, wie Einsteins Theorien die heutige Wissenschaft, Technik und Kultur beeinflusst haben. Am Abend des 18. April, genau 50 Jahre nach Einsteins Tod, gingen in Princeton (USA), in der Stadt, in der Einstein in seinen letzten Jahren gelebt hat, zunächst alle Lichter aus, danach breitete sich eine Lichterkette von Princeton aus in die ganze Welt.

1. Einsteins Arbeiten aus dem Jahre 1905 und ihre Vorgeschichte

Was für Arbeiten waren das nun, die so entscheidend den weiteren Weg der Physik im 20. Jahrhundert bestimmt haben? Diese sollen in diesem Artikel ein wenig erläutert werden, doch zunächst ein Überblick: In der ersten der fünf Arbeiten mit dem Titel: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ greift Einstein die Frage nach dem Wesen des Lichtes auf. Er zeigt, dass Experimente, in denen Licht mit Materie wechselwirkt, nur dann qualitativ wie quantitativ befriedigend erklärt werden können, wenn man Licht als einen Strom von so genannten Energiequanten auffasst. Diese Vorstellung ist heute Grundlage aller quantenphysikalischen Überlegungen und darauf beruhender technologischer Entwicklungen. In den beiden Arbeiten „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ und „Eine neue Bestimmung der Moleküldimension“

liefert Einstein Argumente dafür, dass Atome wirklich existieren. Er zeigt, wie man sie zählen und wie man ihre Größe bestimmen kann. Die zweite dieser Arbeiten reicht er übrigens im Juli des Jahres als Doktorarbeit ein, und er wird damit in kürzester Zeit promoviert. In der vierten Arbeit mit dem Titel „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ dehnt Einstein das Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik, demzufolge die Naturgesetze in allen gleichmäßig zu einander bewegten Bezugssystemen gleich sein müssen, auf die ganze Physik aus, hinterfragt den Begriff der Gleichzeitigkeit und entdeckt Phänomene wie z.B. die Zeitdilatation: Bewegte Uhren gehen langsamer. In der fünften Arbeit, „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“, einem Nachtrag zur vorhergehenden Arbeit, formuliert er schließlich die Formel $E=mc^2$, die in der Teilchenphysik, bei der Kernspaltung und Kernfusion eine bedeutende Rolle spielt.

Diese fünf Arbeiten reichte er in kurzer Folge von Mai bis September des Jahres bei den Annalen der Physik ein, einer Zeitschrift, die damals die am höchsten angesehene Zeitschrift für Physik in der ganzen Welt war. Sie veränderten die Physik nachhaltig und trugen ihm den Ruhm eines zweiten Newton ein. Das Jahr 1905 wurde so für Albert Einstein zu einem einzigen Wunderjahr, einem „annus mirabilis“, und in einer ähnlichen Explosion von Kreativität wie sie Newton in den Jahren 1665 und 1666 erlebte, entwickelte auch Einstein gleich auf drei Gebieten der Physik neue Konzepte und Ansätze, die die Entwicklung unseres Verständnisses der Natur entscheidend voran brachten. Was sind das für drei Gebiete?

Wenn man, „was auf der Erden und in dem Himmel ist“, erfassen und nach ihrer räumlichen Ausdehnung ordnen möchte, erhält man etwa folgendes Bild:

Stellt man auf der Ordinate den Logarithmus der Ausdehnung in Meter dar, und nehmen wir den Menschen als das Maß aller Dinge, so findet man den Menschen mit der Größe von der Größenordnung $1 = 10^0$ Meter auf der Nulllinie dieser Größenskala. Es gibt kleinere Objekte wie biologische Zellen mit Ausdehnungen von einigen Mikrometern, Atome in der Größe von einigen Nanometern, Atomkerne und Elektronen von einigen Femtometern. Zu Objekten, die größer oder viel größer sind als Menschen, zählen die Erde, die Sonne, eine Galaxie wie unsere Milchstraße, der ganze Kosmos.

Nun wollen wir neben der räumlichen Ausdehnung noch eine weitere Eigenschaft der betrachteten Objekte einführen: ihre Komplexität, gemessen einfach in ihrer Anzahl elementarer Teilchen. Dabei kann man je nach Ziel einer physikalischen Beschreibung ganz verschiedene Teilchen als elementar bezeichnen. Ein Wasserstoff-Atom betrachten wir als ein Zwei-Teilchen-System, bestehend aus einem Proton und einem Elektron, Proton und Elektron jeweils als Ein-Teilchen-System. Die Erde können wir uns, wenn wir uns nur für die Bewegung um die Sonne interessieren, auch als ein einziges Teilchen betrachten, das Planetensystem als ein Mehr-Teilchen-System. Galaxien können wir uns auch als ein einzelnes Teilchen vorstellen, wenn wir nur deren Rotation oder Geschwindigkeit gegenüber anderen Galaxien studieren wollen. Ein Gas von Teilchen müssen wir aber als ein Viel-Teilchen-System, bestehend aus etwa 10^{23} Atomen, betrachten. Erst dann können wir die Eigenschaften eines Gases, z.B. die Beziehung zwischen seinem Druck und seiner Temperatur verstehen. Die Größenordnungen in der Teilchenanzahl sind wieder so verschieden, dass man eine logarithmische Skala einführen muss.

Diese Bild vor Augen, können wir jetzt die Welt einteilen in die Welt kleiner und kleinster Systeme, die Welt großer und größter Systeme und die Welt komplexer Systeme. Entsprechend haben sich auch bestimmte Gebiete in der Physik ausgebildet. Im Anfang der Physik beschäftigte man sich mit makroskopischen Ein- oder Zwei-Teilchen-Systemen, mit der Bewegung eines Planeten um die Sonne, oder des Mondes um die Erde, etwas später mit der Bewegung von Ladungsträgern in einem elektrischen Feld.

Das Gebiet der Mikrophysik und Quantenphysik war im 19. Jahrhundert noch relativ unbekannt, im Reich der Astrophysik und Kosmologie gab es im 19. Jahrhundert auch keine wirklich wissenschaftlichen Erkenntnisse und Theorien, auf dem Gebiet der komplexen

Systeme erst einige Ansätze und ad-hoc Regeln. Am Beginn des 20. Jahrhunderts bestand die Physik also im Wesentlichen aus den Gebieten Mechanik, Elektrodynamik und Thermodynamik, aus Gebieten übrigens, die der Physikstudent auch heute noch im Grundstudium lernt. Aber an den Grenzen dieser Gebiete, ja besonders dort, wo sie sich überlappten, gab es Schwierigkeiten mit dem Verständnis, Ungereimtheiten, Widersprüche.

Albert Einstein stößt nun in dem einzigen Jahre 1905 in alle drei Richtungen in Neuland vor, und bestimmt damit den Fortgang der Forschung in diesen drei Richtungen -- zu kleinen und mikroskopischen Systemen, zu großen und größten Systemen und zu komplexen Systemen. Er hat das Tor zur Quantenphysik weiter aufgestoßen, für die komplexen Systeme eine neue Methode der Analyse begründet und demonstriert und drittens ein Prinzip, das Relativitätsprinzip, formuliert, das unser Wissen über Raum und Zeit völlig veränderte und die moderne Kosmologie vorbereitete.

Bevor ich Ihnen hier einen Einblick in diese Arbeiten zu geben versuche, möchte ich noch kurz beschreiben, in welcher Situation sich Albert Einstein am Ende des Jahres 1905 befand. Er war damals 26 Jahre - und hatte schon etwas für die Ewigkeit getan. Er hatte aber auch eine unkonventionelle Karriere hinter sich. Schon früh im Elternhaus zu selbstständigem Denken angeregt, hatte er sich mit dem „militärischen Ton“ im Münchner Luitpold-Gymnasium dieser Zeit und mit der „systematischen Erziehung zur Verehrung der Autoritäten“ nicht abfinden können. Die Konflikte mit seinen Lehrern eskalierten schließlich so stark, dass er mit 15 Jahren die Schule verließ. Sein Plan, über eine Aufnahmeprüfung beim Polytechnikum Zürich dort als Student aufgenommen zu werden, ging danach trotz intensiver autodidaktischer Vorbereitung nicht auf, er fiel in den sprachlich-historischen Fächern durch. Man stellte ihm aber die Aufnahme in Aussicht, wenn er die letzte Klasse einer schweizerischen Mittelschule mit Erfolg besuchen würde. Eine solche Schule fand sich in Aarau, diese schloss er nach einem Jahr mit der Maturitätsprüfung als Bester ab und so konnte er sich dann im Oktober 1896 am Polytechnikum in Zürich immatrikulieren.

Nach dem Diplom im Juli 1900 bewarb er sich auf verschiedenste Assistentenstellen, aber ohne Erfolg, schlug sich dann einige Zeit als Hilfslehrer durch, bis er es schließlich über Kontakte seines Studienfreundes Marcel Großmann zu einer Stelle als technischer Experte III. Klasse am eidgenössischen Amt für geistiges Eigentum in Bern brachte.

So trist sein Leben auch, von außen gesehen, zu sein schien - in seinem Kopf wälzte er die schwierigsten Probleme der damaligen Physik. Schon immer hatte er sich mit fundamentalen Fragen der damaligen Physik beschäftigt, mit dem Äther, der Existenz von Atomen oder dem strukturellen Unterschied zwischen Newtonscher Mechanik und Maxwellscher Elektrodynamik. Sein Interesse fand große Resonanz bei den Diskussionsabenden mit seinen Freunden Conrad Habicht und Maurice Solovine. Er hatte während seines Studiums die einschlägigen Arbeiten und Lehrbücher intensiv studiert, seine Unabhängigkeit und Selbstständigkeit im Denken und seine Unbefangenheit gegenüber Autoritäten war stets gewachsen. Während seiner Zeit als Hilfslehrer und vor allem als technischer Angestellter des Patentamtes hatten ihn diese Probleme nie losgelassen und er hatte in seiner Freizeit intensiv daran gearbeitet, hatte auch schon einige Arbeiten in den Annalen der Physik publiziert. Im Jahre 1905 kommt er in allen seinen Fragen zu einer Lösung.

2. Einsteins Arbeit zur Quantennatur des Lichtes

Die erste der fünf Arbeiten mit dem Titel „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“, greift die Frage nach dem Wesen des Lichtes wieder auf. Einstein analysiert verschiedene Experimente, in denen die Auffassung, dass die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, wie es die Maxwellsche Theorie bestimmt, in große Schwierigkeiten kommt. Er schreibt in den ersten Abschnitten der Arbeit: *“Es scheint mir nun in der Tat, dass die Beobachtungen über ... die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere ...*

Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.“

Welches sind denn nun die Beobachtungen bei der Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht? Schauen wir uns das Experiment genauer an:

Wir betrachten eine Lichtquelle, die ihr Licht auf die Oberfläche eines Metalls schickt. Dabei werden aus dem Metall Elektronen losgeschlagen, die zur Anode fliegen und dort als Strom registriert werden. Die Größen, die man bei der Lichtquelle variieren kann, sind: die Intensität des Lichtes und die Frequenz.

Wenn wir nun die Frequenz bei gegebener Intensität langsam herunter regeln, erreichen wir eine bestimmte Grenzfrequenz, unterhalb derer kein Strom mehr zu beobachten ist, offensichtlich keine Elektronen mehr

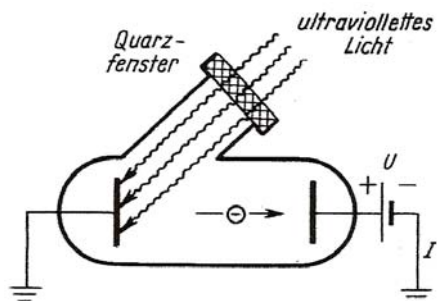


Fig.1: Erzeugung von so genannten Kathodenstrahlen durch Beleuchtung einer Metalloberfläche mit ultraviolettem Licht (aus K. Simonyi: Kulturgeschichte der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt)

herausgeschlagen werden. Das ist das erste Phänomene, das zu erklären ist: Die Existenz einer Grenzfrequenz.

Um das zweite Phänomen zu zeigen, legen wir bei einer Frequenz, die höher als die Grenzfrequenz ist und bei der somit ein Strom fließt, eine Gegenspannung an. Durch diese verringert sich der Strom der herausgeschlagen Teilchen und bei genügend hoher Gegenspannung verschwindet er ganz, da die Elektronen, die nun austreten, durch die Gegenspannung umgelenkt und daran gehindert werden, zur Anode zu fliegen. Erhöht man nun die Intensität des Lichtes, würde man erwarten, dass die zusätzliche Energie den Elektronen zugute kommt, diese müssten dann bei genügender Intensität wieder die Anode erreichen können und man müsste wieder einen Strom messen. Das ist aber nicht der Fall.

Im Lichte der Maxwell-Theorie kann man diese beiden Phänomene nicht verstehen, wie insbesondere der Physiker Lenard schon 1902 ausgeführt hatte. Das veranlasste Einstein zu der schon oben erwähnten Annahme, dass Licht aus lokalisierten Energiequanten besteht, welche nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können. Denn damit sind die beobachteten Phänomene zwanglos erklärbar: Ist die Energie des Quants genügend groß, größer als eine bestimmte Energie, so kann beim Stoß dieses Quants mit einem Elektron auch genügend Energie übertragen werden, so dass dieses Elektron die Bindung an das Metall überwinden und daraus austreten kann. Es gibt also eine Grenzenergie, und geht man nun davon aus, dass die Energie eines Quants proportional zur Frequenz des Lichtes ist, so ist auch die Existenz einer Grenzfrequenz erklärt. Eine höhere Intensität des Lichtes führt weiterhin einfach dazu, dass nur mehr Energiequanten, nicht aber energiereichere, eingestrahlt werden

und damit dann auch nur mehr Elektronen der gleichen Energie ausgelöst werden, die weiterhin die Gegenspannung nicht überwinden können.

Die Abhängigkeit der Energie der Elektronen von der Frequenz des eingestrahnten Lichtes kann man untersuchen, und daraus auf die Energie der Lichtquanten schließen. Einstein erhielt in der Tat eine Proportionalität zwischen der Energie eines Quants und der Frequenz des Lichtes. Für dieses Gesetz des photoelektrischen Effektes erhielt er später den Nobelpreis. Diese Erklärung war in der Tat revolutionär, selbst Einstein hatte sie in einem Brief an seinen Freund Habicht so genannt. Hatte man nicht die Theorie Newtons, dass das Licht aus Teilchen besteht, schon vor etwa hundert Jahren überwunden und sprachen nicht alle Experimente, die man mit Licht im 19. Jahrhundert gemacht hatte, für die Welleninterpretation: Die Interferenz, die Beugung am Spalt, am Doppelspalt, usw? Insbesondere war in der hoch bewunderten Maxwell'schen Theorie die Optik zu einem Teilgebiet der Elektrodynamik geworden. Elektromagnetische Wellen und Lichtwellen konnte man einheitlich beschreiben und mit ihnen alle bisherigen Experimente auch quantitativ befriedigend erklären.

Die Rezeption dieser Arbeit war deshalb zunächst auch verschwindend gering. Noch 1913 hatte Max Planck in einem Gutachten, in dem er Einstein überschwänglich lobte, hinzugefügt, „dass er in seinen Spekulationen auch einmal über das Ziel hinaus geschossen sein mag, wie z.B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, wird man ihm nicht allzu schwer anrechnen dürfen. Denn ohne ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.“

Die Arbeit fand erst 1916 einige Anerkennung, als der amerikanische Physiker Millikan genaue Messungen zu der Energie der emittierten Elektronen machte, wodurch Einsteins in der Arbeit entwickelte Gleichung für diese Größe bestätigt wurde. Und den Nobelpreis bekam Einstein 1922 nur erst für „die Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effektes“. Die vollständige Anerkennung der Ansicht, dass Licht aus teilchenartigen Energiepaketen besteht, erfolgte erst 1923 durch das Experiment von Compton, der die Streuung von Röntgenstrahlen an Elektronen studierte. Ab 1926 nennt man die Lichtquanten Photonen.

Was aber ist ein Photon, was ist ein Quant? Soll man es sich als Teilchen vorstellen, es ist ja lokalisiert im Raum? Aber wie ist dann die bewundernswerte Übereinstimmung der der Wellentheorie mit den Experimenten der Beugung, Brechung usw. zu verstehen. Auch Einstein schreibt in seiner Arbeit:

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes, (die Wellentheorie) hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, dass sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das Experiment wohl denkbar, dass die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichtes zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet.

Was kann damit gemeint sein, dass sich optische Beobachtungen nur auf zeitliche Mittelwerte beziehen? Ersetzt man z.B. beim Doppelspaltversuch die Lichtquelle durch eine andere, die so schwach ist, dass nur wenige Lichtquanten pro Sekunde abgestrahlt werden, so registriert man auf dem Beobachtungsschirm, dass die Quanten zufällig mal hier, mal dort auftreffen, auch dort, wohin ein klassisches Teilchen durch einen der beiden Spalte gar nicht gelangen kann. Wenn man nun lange wartet, dabei mit der Zeit immer mehr Photonen auf dem Bildschirm auftreffen, sieht man allmählich, dass sich die Treffer in bestimmten Streifen häufen und dass dies genau die Streifen sind, die sich bei der Bestrahlung mit der ursprünglichen, starken Quelle sofort ergeben.

Die optischen Beobachtungen ergeben sich also tatsächlich erst im statistischen Mittel, wenn man zeitlich hintereinander viele Photonen einstrahlt, so, wie sie sich auch ergeben, wenn

man diese vielen Photonen auf einmal einstrahlt. Das Beugungsspektrum, das man so im Rahmen einer Wellentheorie des Lichtes ableiten kann, muss sich also im statistischen Mittel auch aus einer Theorie für Lichtquanten ergeben. Wellentheorie und Quantentheorie sind also in diesem Sinne kein Widerspruch mehr.

Diese Quanten werden zwar als Ganzes absorbiert, haben aber Eigenschaften, die wir bei allen Objekten, die wir gemeinhin als Teilchen bezeichnen würden, nicht kennen, ja, die wir überhaupt mit unserer Erfahrung von dem Verhalten der Dinge in dieser Welt nicht vereinbaren können. Wir sehen das z.B. auch daran, dass ein Lichtquant auf dem Beobachtungsschirm dort auftreffen kann, wohin ein normales Teilchen gar nicht gelangen kann. Wir können hier nicht näher auf diese Andersartigkeit eingehen, halten nur fest, dass Quanten zwar irgendwie lokalisiert in Raum und Zeit sind, aber keine Teilchen im üblichen Sinne, denen man z.B. zu jeder Zeit einen bestimmten Ort und eine bestimmte Geschwindigkeit zuordnen kann.

Quanten sind Objekte sui generis und uns aus der makroskopischen Welt bisher nicht bekannt. Da unsere Erfahrung als Menschen sich während der Evolution nur im Umgang mit makroskopischen Objekten entwickelt hat, müssen wir eben damit rechnen, dass es Verhaltensweisen von Quanten gibt, die unserer Erfahrung unbekannt sind.

Ohne das Wissen, dass Licht ein Strom von Quanten ist, und dass Lichterzeugung und Lichtverwandlung auf atomarer Ebene als ein Prozess beschrieben werden muss, an dem Lichtquanten teilnehmen, wäre die folgende Entwicklung, bei der man nach und nach den Bau des Atoms verstand und lernte, wie ein Atom mit Licht wechselwirkt, gar nicht möglich gewesen. Der dänische Physiker Nils Bohr war 1913 der erste, der ein Modell für den Aufbau eines Atoms vorlegte und erklären konnte, wie es zu den typischen Strahlungsmustern kommt, wenn man ein Atom mit Licht bestrahlt bzw. die Abstrahlung von Licht bei einem Atom beobachtet. Sein Atommodell lautet: Das Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern, um den Elektronen kreisen wie Planeten um die Sonne. Die Bahnen, auf denen die Elektronen kreisen, sind Kreise oder Ellipsen und sind durch eine bestimmte Energie gekennzeichnet. Die Elektronen strahlen auf den Bahnen im Gegensatz zu den Gesetzen der Elektrodynamik keine Energie ab. Sie können aber von einer Bahn auf eine andere springen, dabei strahlen sie Licht ab mit der Energie, die der Energiedifferenz der beiden Bahnen entspricht.

Man lernte dann bald drei grundsätzliche Prozesse zu unterscheiden:

- 1) die spontane Emission: Ein Elektron springt von einer Bahn mit höherer Energie spontan in eine Bahn niedrigerer Energie. Ein Lichtquant mit der entsprechenden Energie wird dabei abgestrahlt.
- 2) Die Absorption: Ein Lichtquant der Energie, die der Energiedifferenz zweier Bahnen entspricht wird eingestrahlt, dadurch wird ein Elektron eines Atoms von der Bahn niedrigerer Energie auf die Bahn höherer Energie gehoben.
- 3) Die induzierte Emission: Ein Lichtquant der Energie, die der Energiedifferenz zweier Bahnen entspricht, wird eingestrahlt. Dieses Quant wird nicht absorbiert, induziert aber den Sprung eines Elektrons von der Bahn höherer auf die Bahn niedrigerer Energie, wobei ein weiteres Lichtquant abgestrahlt wird.

Aus diesen drei fundamentalen Prozessen kann man sich jede Wechselwirkung von Licht mit einem Atom zusammengesetzt denken. Könnte man nun eine Vielzahl von Atomen in einen bestimmten angeregten Zustand versetzen und sie durch induzierte Emission zwingen, gleichzeitig jeweils ihr Photon abzugeben, so entstände Licht aus Quanten gleicher Energie und gleicher Erzeugungszeit, das auch noch durch ein System von Spiegeln zu einem engen gebündelten Strahl geformt werden könnte. Schon Einstein hat 1917 diese Möglichkeit für eine starke, sehr kohärente Lichtquelle gesehen, aber erst 1960 konnte der amerikanische Physiker Ted Maiman eine solche Lichtquelle vorführen - ein knallroter Strich ging von ihr

aus - ein gebündelter Lichtstrahl. Er nannte diese besondere Lampe LASER als Abkürzung für "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation".

Man unterscheidet je nach Aggregatzustand und Art des verwendeten Mediums, Festkörper-, Halbleiter-, Flüssigkeits- und Gaslaser. Man kann inzwischen Laserlicht mit Wellenlängen von 10^{-4} bis 10^{-10} m erzeugen. Es gibt den Dauerstrich-Laser, der kontinuierlich Licht aussendet, und den Impuls-Laser. Die Dauer der Lichtblitze bei Impuls-Lasern konnte immer kleiner gemacht werden, heute gibt es Laser, die Lichtblitze von Attosekunden Dauer erzeugen können. Eine Attosekunde entspricht 10^{-18} Sekunden. Das Licht, das ja bekanntlich 300000 km/s zurücklegt, und 30 cm pro ns, legt also $30 \cdot 10^{-9}$ cm oder etwa einen Nanometer, also eine Strecke von atomarer Dimension, in einer Attosekunde zurück.

Der Laser kann zum Schneiden von Stahlblechen, zum Schweißen, Schmelzen, Fügen, Koagulieren und Verdampfen in allen Sparten der Materialbearbeitung und Medizin benutzt werden. Mit ihm kann man Distanzen über große Entfernungen genau vermessen und viele weitere nützliche Dinge tun. Im Alltag kennen wir den Laserpointer, den Scanner im Supermarkt und den CD-Spieler, in dem ein Laserstrahl die mikroskopischen Vertiefungen auf der CD abliest.

Inzwischen lernte man, Experimente mit einem einzigen oder mit zwei Photonen zu machen, die Interferenz einzelner Photonen und die Korrelation zweier und mehrerer Photonen zu studieren. Man versteht heute, so genanntes nichtklassisches Licht zu erzeugen, das eine Statistik in Photonenzahl und Entstehungszeiten aufweist, wie es bei natürlichem Licht nie auftreten kann. Man weiß auch, dass das Vakuum nicht wirklich ganz leer ist, sondern von so genannten Quantenfluktuationen erfüllt ist, von virtuellen Photonen, und dass man das Vakuum manipulieren kann, so dass Atomzustände in diesem Vakuum andere Zerfallseigenschaften haben. Die Quantennatur der Photonen zeigt immer wieder Phänomene, die für uns, deren Anschauung in der Makrophysik groß geworden ist, verblüffend sind.

Das Gebiet, in dem man die Quantennatur des Lichtes analysiert, nennt man Quantenoptik. Es ist heute ein schnell wachsendes Gebiet und das immer bessere Verständnis der Quanteneigenschaften und die immer raffiniertere Form der Manipulation der Quanten wird auch entsprechende Anwendungen in der Technik nach sich ziehen.

3. Einsteins Arbeiten über Anzahl und Größe von Atomen.

In seiner Arbeit „Über die von der molekulartheoretischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen“ kann Einstein ein wichtiges Argument für die reale Existenz von Atomen oder Molekülen liefern. Die Existenz von Atomen war damals in der Physik noch nicht allgemein anerkannt. „Haben's denn eins gesehen“, hatte Ernst Mach immer wieder gefragt. Einstein konnte auch keines direkt sehen, aber zeigen, wie man aus Beobachtungen makroskopischer, messbarer Größen auf Eigenschaften der Atome wie Größe und Anzahl schließen kann. Er setzte sich dazu mit der regellosen Zitterbewegung von kleinsten in einem Gas oder einer Flüssigkeit schwebenden Teilchen auseinander. Schon im Jahre 1827 hatte der schottische Botaniker R. Brown entdeckt, dass sich die kleinen, nur unter einem Mikroskop sichtbaren Teilchen, in die Pollen von Pflanzen in wässriger Lösung zerfallen, in einer permanent unregelmäßigen Bewegung befinden. Im Jahre 1900 hat dann F.M. Exner die richtige Erklärung gegeben: Die suspendierten Teilchen werden ununterbrochen durch die Moleküle des Lösungsmittels gestoßen, aus der Vielzahl von solchen Stößen summiert sich eine stochastische Kraft, die ein größeres Teilchen in Lösung mal hier hin, mal dahin bewegt. Man nennt diese unregelmäßige Bewegung der größeren Teilchen Diffusion. Schadstoffwolken in der Luft breiten sich z.B. durch Diffusion aus. Einstein kann nun durch Ausnutzung bekannter Gesetze für Flüssigkeiten und Lösungen eine messbare Größe, nämlich den Mittelwert des Quadrates der Verschiebung der Teilchen, mit der Anzahl und der Größe der Teilchen in der Lösung in Beziehung setzen und damit, bei bekannter Anzahl, eine Aussage über die Größe der Teilchen

machen. In seiner folgenden Arbeit „Eine neue Bestimmung der Moleküldimension“ kann er auf ähnliche Weise berechnen, wie sich in Abhängigkeit von der Größe der suspendierten Teilchen die Viskosität einer Flüssigkeit ändert, wenn man dieser eine bestimmte Anzahl von größeren Teilchen zugibt. Damit hat er dann zwei Gleichungen, in denen messbare Größen mit den Größen „Teilchenanzahl“ und Teilchengröße“ in Beziehung stehen und somit „Tatsachen finden, welche die Existenz von Atomen von bestimmter endlicher Größe“ sicherstellen.

Viskosität und mittlere quadratische Verschiebung sind makroskopische, messbare Größen, Anzahl und Größe der Teilchen beziehen sich auf mikroskopische Eigenschaften, die man nicht direkt sehen oder messen kann. Einstein kann diese beiden Welten durch physikalische Gesetze verbinden und somit in der Tat ein geistiges Mikroskop für die Welt des Kleinsten, die man mit einem optischen Mikroskop nicht mehr ergründen kann, finden. Damit wird er zum Mitbegründer der Statistischen Mechanik.

Das Ziel dieser ist es eben, Eigenschaften und Verhalten makroskopischer Objekte wie Gase und Flüssigkeiten -- von Systemen also, die aus sehr vielen einzelnen Konstituenten, nämlich Atomen oder Molekülen bestehen – allein mit Hilfe der Eigenschaften der einzelnen Konstituenten, insbesondere der Wechselwirkung zwischen diesen zu erklären. Wasserdampf z.B. ist eine Ansammlung von vielen H_2O -Molekülen, es ist ein Gas, es besitzt eine Temperatur und einen Druck, und diese stehen in einer bestimmten Beziehung: Erhöht man den Druck, so erhöht sich die Temperatur, wenn das Volumen gleich bleibt. Sorgt man hingegen dafür, dass die Temperatur gleich bleibt, so erhöht sich der Druck, wenn man das Volumen verkleinert. Außerdem kann der Wasserdampf zu Wasser kondensieren oder Wasser kann zu Eis gefrieren: Wir haben dann jeweils eine andere Phase oder einen anderen Aggregatzustand des gleichen makroskopischen Systems vor uns. Wir kennen solche verschiedenen Phasen wie z.B. die gasartige, flüssige oder feste Phase bei allen makroskopischen Systemen. Ein System aus vielen einzelnen Konstituenten kann also ein ganz komplexes Verhalten zeigen. Letztlich verantwortlich für dieses komplexe Verhalten können aber nur die einzelnen Konstituenten sein, und da diese nur wenige Eigenschaften wie Masse oder Ladung haben, ist vor allem die Wechselwirkung zwischen den Konstituenten die Ursache für das komplexe Verhalten des gesamten Systems.

Das nun wirklich mathematisch einwandfrei abzuleiten und quantitativ zu analysieren, das ist die Aufgabe der Statistischen Mechanik. Sie stellt also eine ungeheure Reduktion der Komplexität dar, eine Erklärung eines sehr komplexen Verhaltens eines Viel-Teilchen-Systems durch eine einzige Formel für die Wechselwirkung zwischen den Konstituenten und sie zeigt beispielhaft, wie man die Emergenz von komplexen, ganz neuen Eigenschaften auf einfache Gesetze für die zu Grunde liegenden Einheiten zurückführen kann.

So ist die Statistische Mechanik ein sehr großes Gebiet der Physik und Chemie, in der Eigenschaften und Verhalten aller Materialien und Substanzen „aus einem Punkte“, nämlich aus der Wechselwirkung zwischen den Konstituenten, verstanden werden wollen. Die Analogie zu den Fragen, wie Leben oder Bewusstsein entstehen kann, ist evident.

Etwas lebensnäher noch wird dieses ganze Konzept, wenn man unter Konstituenten nicht Atome oder Moleküle versteht, sondern „Agenten“, also Objekte, die Entscheidungen fällen gemäß irgendeiner Strategie, die für jede Situation eine bestimmte Handlung bereit hält. Ein Gas von solchen Agenten ist dann eine Gesellschaft von Agenten, und für Gesellschaften kann man wie für Gase von Molekülen sehr komplexes Verhalten beobachten, hier erscheint die Komplexität natürlich noch viel größer. Eine „Statistische Mechanik“ würde in diesem Kontext heißen, dass man versucht, komplexe Verhaltensmuster der Gesellschaft, des Multi-Agenten-Systems also, durch Strategien der einzelnen Agenten zu erklären. Und analog zur Statistischen Mechanik der Physik würde man erwarten, dass selbst einfachste Strategien für die Agenten zu sehr komplexem Verhalten der Gesellschaft führen können.

4. Einsteins Arbeiten zum Relativitätsprinzip

Um ein gewisses Verständnis für die Relativitätstheorie, die Einstein in seiner Arbeit „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ einführt, zu gewinnen, muss man zuerst den Begriff des Bezugssystems diskutieren. Will man den Ort eines Objektes im Raum messen, so muss man ein Koordinatensystem einführen. Jedem Punkt im Raum kann man dann Koordinaten zuordnen, die besagen, wo sich dieser Punkt relativ zu einem vorher gewählten Bezugspunkt befindet. Auf der Erdoberfläche kennen wir z.B. das Koordinatensystem der Längen- und Breitengrade. Als Bezugspunkt wird man bei einem Experiment im Labor irgendeinen Punkt des Labors nehmen. Setze ich das ganze Experiment in einen Eisenbahnzug, so werde ich als Bezugspunkt irgendeinen Punkt im Zug wählen. Relativ zum ersten Bezugssystem, dem Laborsystem, bewegt sich nun das zweite Bezugssystem, da sich dessen Bezugspunkt mit dem Zug bewegt. Nun hatte schon Galilei erkannt, dass ein Experiment, ob man es nun im Labor oder im bewegten Zug macht – er dachte damals an ein Schiff – die gleichen Ergebnisse liefern muss, dass also der Experimentator aus seinen Ergebnissen nicht herauslesen kann, ob er im Labor oder im Zug sitzt, ja, dass beide Bezugssysteme gleich berechtigt sind.

Voraussetzung hierbei ist allerdings immer, dass die Bewegung der Bezugssysteme relativ zu einander geradlinig gleichförmig ist, d.h. dass keine Beschleunigungen auftreten.

Die physikalischen Gesetze müssen dann in allen Bezugssystemen gleich aussehen. Diese Forderung an die Form physikalischer Gesetze nennt man das Galileische Relativitätsprinzip und dessen Gültigkeit war in den vergangenen 200 Jahren der Newtonschen Mechanik nie bestritten worden.

Probleme bekommt man allerdings mit diesem Galileischen Relativitätsprinzip, wenn man eine andere große Theorie der Physik studiert, nämlich die Elektrodynamik. Der schottische Physiker James Clerk Maxwell hatte eine solche Theorie im 19. Jahrhundert in Form von mathematischen Gleichungen für elektrische und magnetische Felder aufgestellt, und mit Hilfe dieser konnte man alle damals bekannten elektrischen und magnetischen Phänomene erklären. Diese Maxwellschen Gleichungen waren nicht invariant beim Übergang in ein bewegtes Bezugssystem, wie man es in der Newtonschen Mechanik kannte. Es musste wohl ein bevorzugtes universales Bezugssystem für die elektromagnetischen Wellen und damit für das Licht geben. Das lag damals auch sehr nahe, da man sich vorstellte, dass der Träger der elektromagnetischen Wellen ein so genannter Äther, ein Gas aus sehr feinem Stoff, sein musste, der den ganzen Raum ausfüllt und der ein System absoluter Ruhe, ein ausgezeichnetes Bezugssystem also, repräsentiert. Dann musste man aber auch folgerichtig Bewegungen relativ zum Äther, zu diesem absoluten Bezugssystem feststellen können, z.B. die Bewegung der Erde relativ zum Äther. Das wäre nun eine lange Geschichte, wollte man all die Versuche und ihre Interpretationen schildern, mit denen man der Bedeutung und den Eigenschaften des Äthers auf die Spur kommen wollte. Tatsache ist, man musste zu immer komplizierteren Annahmen über den Äther greifen, um solche Versuche zu erklären; die Lage war alles andere als klar und durchsichtig.

Albert Einstein brachte mit einer einzigen genialen Idee Klarheit in dieses Durcheinander. Er postulierte: Die Geschwindigkeit des Lichtes ist in allen Bezugssystemen gleich. Dieses Postulat lässt sich einfach formulieren, widerspricht aber vollständig unserer Erfahrung mit bewegten Systemen. Wenn wir im Zug mit 100 km/h fahren und dort nach vorne mit 5 km/h in Richtung Speisewagen gehen, so bewegen wir uns relativ zur Landschaft mit 105 km/h. So müsste auch Licht, mit Lichtgeschwindigkeit c von unserem Platz aus nach vorne gestrahlt, gegenüber der Landschaft die Geschwindigkeit $100 + c$ haben, wenn wir das Galileische Relativitätsprinzip zu Grunde legen. Das aber ist eben nach Einstein nicht der Fall. Wie immer auch sich die Quelle des Lichtes relativ zum Beobachter bewegt, stets ist für den Beobachter die Geschwindigkeit des Lichtes gleich.

Diese Annahme hat weitreichende Konsequenzen: Rein mathematisch folgt zunächst daraus, dass die Transformation der Koordinaten von einem Bezugssystem in ein anderes dazu bewegtes eine Form annehmen, die von der Form der Galilei-Transformationen der Newtonschen Mechanik abweicht, in diese aber übergehen müssen, wenn die Geschwindigkeit, mit der sich ein Bezugssystem gegen das andere bewegt, klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit c ist. Gegenüber diesen allgemeineren Transformationen, die schon der niederländische Physiker Hendrik A. Lorentz eingeführt hatte und deshalb Lorentz-Transformationen heißen, sind nun die Gleichungen der Maxwell'schen Elektrodynamik invariant. Man hatte also ein allgemeines Relativitätsprinzip gefunden, eines, das für die Elektrodynamik gilt wie für die Newtonsche Mechanik, wenn man dort die Transformationsformeln zunächst in der für kleine Geschwindigkeiten gültigen Form berücksichtigt. Das legt natürlich nahe, dass man die Newtonsche Mechanik auch so verallgemeinern kann, dass sie ohne Abstriche invariant gegenüber den Lorentz-Transformationen wird, und in der Tat hat Einstein bald eine solche „relativistische Mechanik“ formuliert, die für alle Geschwindigkeiten gültig sein soll, für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, aber wieder in die Newtonsche Mechanik übergeht.

Von diesem Ansatzpunkt aus hatte man also nicht nur ein durchgängiges Relativitätsprinzip für Mechanik und Elektrodynamik geschaffen, man benötigte auch keinerlei Eigenschaften des so genannten Äthers mehr. Einstein konnte darauf verzichten und gefahrlos behaupten: Es gibt keinen Äther, die elektromagnetischen Wellen breiten sich im Vakuum aus.

Damit war eine ganz neue Sicht entstanden. Es gab jetzt nicht mehr eine absolute Ruhe, ein spezielles Bezugssystem, in dem der Äther ruht. Dafür gibt es nun eine absolute Geschwindigkeit, die Geschwindigkeit des Lichtes, jeder Beobachter, wie immer er sich auch gegenüber der Lichtquelle bewegt, misst die gleiche Lichtgeschwindigkeit. Das Etikett „absolut“ kann also nicht mehr einem Bezugspunkt im Raume angeheftet werden, er gehört einer Geschwindigkeit, die allerdings unserer menschlichen Erfahrung in keiner Weise zugänglich ist.

Waren so die Folgerungen aus dem Einsteinschen Ansatz für eine einheitliche Struktur der beiden großen Theorien der damaligen Physik schon äußerst befriedigend und erhellend, erwiesen sie sich noch spektakulärer für ganz alltägliche physikalische Phänomene, wenn man sich eine Welt vorstellt, in der wir auch Geschwindigkeiten vergleichbar mit der der Lichtgeschwindigkeit erleben können. Da ist zunächst der Begriff der Gleichzeitigkeit, der in diesem Lichte diskutiert werden muss.

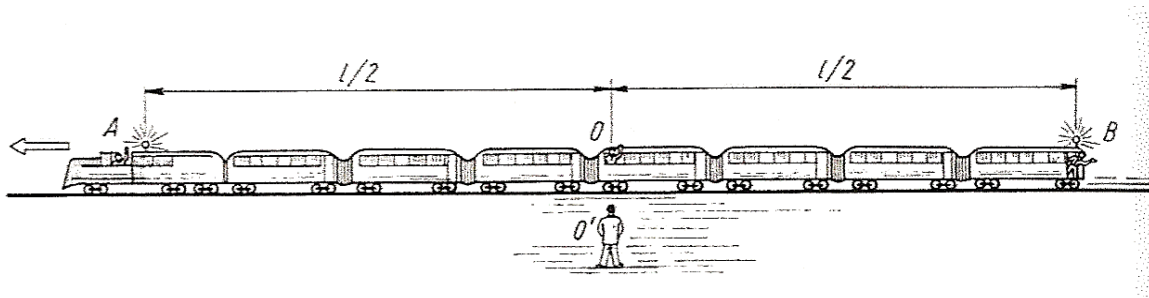


Fig. 2: Zum Begriff der Gleichzeitigkeit: Zwei Beobachter, die über die Reihenfolge von zwei räumlich getrennten Ereignissen zu unterschiedlichen Urteilen gelangen.
(aus K. Simonyi: Kulturgeschichte der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt)

Wir betrachten dazu einen Zug, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit von rechts nach links fährt. In den Kopf des Zuges und in das Ende mögen Blitze einschlagen. Es gebe zwei Beobachter, die diese Blitze registrieren: einer, der am Bahnsteig steht und einer, der in der Mitte des Zuges sitzt, sich also mit diesem Zug bewegt und gerade an dem auf dem Bahnsteig

stehenden Beobachter vorbeifährt, wenn die Blitzsignale bei beiden eintreffen. Beide Beobachter gehen nun mit Einstein davon aus, dass das Licht in allen Bezugssystemen die gleiche Geschwindigkeit hat, und sie interpretieren ihre Beobachtungen jeweils wie folgt: Der im Zug sitzende sagt: Die Blitzsignale sind bei mir zur gleichen Zeit eingetroffen, die mussten beide die gleiche Strecke zurücklegen, nämlich die Hälfte der Zuglänge, also trafen die Blitze auch zur gleichen Zeit an ihren Orten, am Anfang bzw. am Ende des Zuges ein. Der am Bahnsteig stehende sagt: Als die Blitze einschlugen, war der Zug noch nicht so weit, dass der im Zug sitzende Beobachter auf gleicher Höhe mit mir war; das Ende des Zuges war weiter von mir entfernt als der Anfang. Das Blitzlicht vom Ende des Zuges brauchte also mehr Zeit, um zu mir zu gelangen als das Blitzlicht vom Anfang. Das aber beide Signale gleichzeitig bei mir eintrafen, muss wohl das Ende des Zuges früher von einem Blitz getroffen worden sein als der Anfang. Die Blitze sind also nicht gleichzeitig eingeschlagen.

Bei räumlich getrennten Ereignissen, wie hier bei einem Blitzschlag jeweils in das Ende und in den Anfang des Zuges, kommen also die beiden Beobachter zu verschiedenen Schlüssen bezüglich der zeitlichen Reihenfolge. Für den einen geschehen die Ereignisse gleichzeitig, für den anderen nacheinander, je nach Bewegungszustand. Da aber der Bewegungszustand von Beobachtern sehr verschieden sein kann und es einen ausgezeichneten Bewegungszustand für einen Beobachter nicht gibt, ist also der Begriff der Gleichzeitigkeit nicht universell zu gebrauchen -- plastischer ausgedrückt: Es gibt kein universelles Jetzt, keine Weltuhr, die im ganzen Universum die Zeit angibt und damit eine Einigung über die Gleichzeitigkeit von räumlich getrennten Ereignissen für alle Beobachter, wie immer sie sich auch bewegen, ermöglicht.

Diese Folgerung aus dem Einsteinschen Postulat, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen den gleichen endlichen Wert hat, ist schon erstaunlich, aber weitere Schlussfolgerungen über den Charakter der Zeit und des Raumes sind ebenso zwingend wie verblüffend. Lassen sich mich auf den Effekt der Zeitdehnung eingehen.

Wir betrachten dazu die so genannte Lichtuhr: Zwei in einem bestimmten Abstand parallel angeordnete Spiegel, einen oberen und einen unteren, zwischen denen ein Lichtstrahl hin- und her reflektiert wird. Da die Geschwindigkeit des Lichtes gleich c ist, gilt also für die Zeit, die der Lichtstrahl benötigt, um jeweils den Weg zwischen den beiden Spiegeln zu durchlaufen, $\text{Zeit} = \text{Weg}/c$, da „Weg = Geschwindigkeit mal Zeit“ ist.

Nun betrachte man die gleiche Lichtuhr, wenn sie sich mit einer konstanten Geschwindigkeit v z.B. nach rechts bewegt. Wenn der untere Spiegel bei einer Reflexion des Lichtstrahls an einem bestimmten Orte ist, ist der obere Spiegel bei der folgenden Reflexion schon ein wenig weiter, nämlich die Strecke vt , nach rechts gewandert, und wenn der Lichtstrahl wiederum am unteren Spiegel ankommt, ist dieser um das Doppelte dieser Strecke nach rechts verschoben. Natürlich gilt wieder Weg = Geschwindigkeit mal Zeit. Nun ist aber für den ruhenden Beobachter der Weg, den das Licht

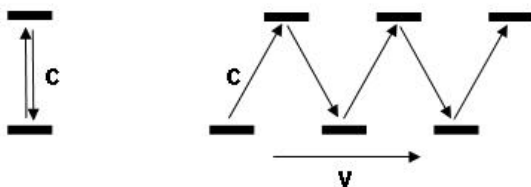


Fig.3: Ruhende bzw. bewegte Lichtuhr

zurücklegen muss, um von einem Spiegel zum anderen zu gelangen, länger. Jetzt kommt die Annahme ins Spiel, dass das Licht in jedem Bezugssystem die gleiche Geschwindigkeit c besitzt. Dann muss nach der Beziehung „Weg = Geschwindigkeit mal Zeit“ mit dem Weg nun auch die Zeit, die das Licht braucht, um von einem Spiegel zum anderen zu gelangen, größer

sein. Das bedeutet: Der ruhende Beobachter, der die sich bewegende Lichtuhr sieht, misst einen größeren Wert für die Zeit zwischen zwei Reflexionen als ein Beobachter, der relativ zur Lichtuhr ruht. Die Zeit, die man zwischen zwei Ereignissen misst, hängt also von der Bewegung der Lichtuhr relativ zum Beobachter ab. Mit dem Satz „Bewegte Uhren gehen langsamer“ fasst man dieses Phänomen zusammen.

Dieser Effekt der Zeitdehnung, auch Zeitdilatation genannt, zeigt sich in vielen Experimenten. Bei instabilen Teilchen wie etwa bei Myonen misst man für die Lebensdauer, die mittlere Zeitspanne zwischen Erzeugung und Zerfall, einen Wert, der davon abhängt, welche Geschwindigkeit diese Teilchen relativ zum Beobachter haben. Im Ruhesystem der Teilchen misst man etwa 2 Mikrosekunden für die Lebensdauer. Wenn die Teilchen sich im Beschleuniger mit einer Geschwindigkeit von 0,9985mal der Lichtgeschwindigkeit relativ zum Messapparat bewegen, misst man 49,6 Mikrosekunden, in Übereinstimmung mit der Theorie.

Spektakulärer ist das so genannte Zwillingsparadoxon. Man stellt sich zwei Zwillinge vor, nennen wir sie Peter und Paul. Paul fliegt mit einer sehr schnellen Rakete in den Weltraum, kehrt nach einiger Zeit um und wieder zurück zu Peter, der zu Hause geblieben ist. Während der Phasen, in der sich Paul mit konstanter Geschwindigkeit von Peter weg oder während der Rückkehr auf ihn zu bewegt, stellt jeder fest, dass beim anderen die Zeit langsamer vergeht, so wie es die Merkregel "Bewegte Uhren gehen langsamer" sagt. Beide müssen ja die gleichen physikalischen Phänomene sehen, es gibt kein ausgezeichnetes Bezugssystem. Da beide in diesen Phasen gleichberechtigt sind, wird man zunächst folgern wollen, dass die Zwillinge auch, wenn Paul nach der Rückkehr wieder neben seinem Bruder steht, gleich alt sein müssen. Das stimmt aber nicht, es gibt eine wesentliche Phase in der Reise von Paul, in der nicht beide gleichberechtigt sind: Die Phase, in der Paul die Umkehr organisiert, da muss dieser von einem Bezugssystem in ein anderes wechseln, er muss dazu bremsen, umdrehen und wieder beschleunigen. Man kann nachrechnen, dass sich dieser Vorgang für Peter sehr viel länger darstellt als für Paul, der direkt daran beteiligt ist. Der Effekt ist, dass Paul nach seiner Heimkehr einen Zwillingsbruder begrüßt, der nun sehr viel älter ist als er selbst. "Reisen erhält jung" möchte man dazu sagen. Das trifft aber den Punkt nicht, denn Peter und Paul altern jeweils ganz normal nach den üblichen biologischen Gesetzen, es gibt nur eben keinen universellen Zeitverlauf. Jeder hat seine Zeit. Man braucht lange, um sich von der Denkgewohnheit, dass es einen universellen Zeitverlauf gibt, trennen kann.

Einige Zeit war dieses Zwillingsparadoxon nur ein verblüffendes Gedankenexperiment. Im Jahre 1970 haben aber die Physiker Hafele und Keating diesen Effekt experimentell nachgewiesen. Sie besorgten sich zwei sehr genau gehende Uhren, ließen eine davon in Washington stehen und flogen mit der anderen, mit Hilfe von normalen Linienflugzeugen, um die Erde. In der Tat stellten sie fest, dass die in Washington gebliebene Uhr gegenüber der anderen in der Zeit weiter voran geschritten war, und zwar um einen Betrag, der im Rahmen der Messfehler mit der Theorie übereinstimmte.

Mit dem "Global Positioning System" (GPS), das Flieger, Segler und Autofahrer für die Navigation nicht mehr missen möchten, hat die Relativitätstheorie inzwischen den Alltag eines normalen Bürgers erreicht. Würde man bei der Bestimmung der Position aus den Laufzeiten der Signale von verschiedenen Satelliten nicht die Zeitdehnung der Relativitätstheorien (und zwar der speziellen, die wir hier kurz besprochen haben, wie der allgemeinen, auf die wir hier nicht eingehen können) in Rechnung stellen, so würde sich in jeder Sekunde Messzeit ein Fehler von 13 cm in der Position ergeben. In kurzer Zeit würde damit der Fehler so groß, dass das System wertlos wäre.

Die Resultate dieser Arbeit zur Elektrodynamik bewegter Körper führen Einstein zu "interessanten Folgerungen", die er in der fünften Arbeit dieses "annus mirabilis" darlegt. In dieser formuliert er die Formel: $E=mc^2$, wohl die berühmteste Formel, die auch immer mit der Atombombe in Beziehung gebracht wird. Ich will hier nicht seine Argumente darlegen,

sondern auf einen anderen Aspekt hinweisen. Wenn man die Newtonsche Mechanik mit Hilfe des Einsteinschen Relativitätsprinzips erweitert zu einer so genannten, schon vorher erwähnten relativistischen Mechanik, so erhält man zwangsläufig einen Ausdruck für die kinetische Energie eines Teilchen der Masse m , der neben dem Impuls und der Masse des Teilchens auch noch die Lichtgeschwindigkeit enthält. Entwickelt man nun diesen Ausdruck in einer bestimmten Weise in eine Reihe von Termen, so stellt man fest: Der erste Term lautet gerade " mc^2 ", der zweite entspricht dem Ausdruck für die kinetische Energie in der Newtonschen Mechanik, die weiteren Terme sind alle zu vernachlässigen, wenn die Geschwindigkeit des Teilchens klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit ist. Man sieht also hier nicht nur, wie die Formel $E=mc^2$ für die Energie eines ruhenden Teilchens zwanglos heraus kommt, sondern auch in welcher Form die Newtonschen Mechanik eine Näherung der relativistischen Mechanik ist: Die Formel reduziert sich für Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, wieder auf die Formel der Newtonschen Mechanik. Ein konstanter Beitrag wie der Grundbeitrag mc^2 ist in der Newtonschen Mechanik irrelevant.

Die Tragweite dieser Einsicht, dass die "Masse eines Körpers ein Maß für dessen Energieinhalt" ist, wie Einstein es in seiner dreiseitigen Arbeit formuliert, wurde bald klar. Die Energie, die bei Kernspaltung und Kernfusion frei wird, lässt sich einfach berechnen, indem man die Massen der Teilchen vor der Reaktion mit den Massen der Teilchen nach der Reaktion vergleicht und diese Massendifferenz mit c^2 multipliziert. Fusionieren so zwei Wasserstoffkerne und zwei Neutronen zu einem Helium-Kern so ergeben sich 4.03188 Atomeinheiten vor der Reaktion, jedoch 4.00153 Atomeinheiten für den fertigen Helium-Kern, wobei eine Atomeinheit $1.66054 \cdot 10^{-27}$ kg entspricht. Damit ist die Massendifferenz etwa $5 \cdot 10^{-29}$ kg, also sehr klein. Auch mit c^2 multipliziert ergibt das noch einen kleinen Energiebeitrag. Aber wenn nun sehr viele Wasserstoffkerne und Neutronen fusionieren, und dabei auch nur ein Gramm Masse in Energie umgewandelt würde, erhielte man 25 Millionen Kilowattstunden an Energie.

Eine solche Fusion von Atomkernen findet ständig in unserer Sonne statt, ja, aus solchen Prozessen beziehen alle Sterne ihre Energie. Die Sonne verliert so pro Sekunde 4 Millionen Tonnen an Materie. Dabei werden mit zunehmendem Alter der Sterne Atomkerne immer höheren Atomgewichts „gebacken“, bis hin zum Eisen mit dem Atomgewicht 56. Dann ist der Punkt erreicht, an dem eine Fusion nicht mehr zu einem Energiegewinn wird. Energie gewinnt man dann beim umgekehrten Prozess, bei der Spaltung, und zwar umso besser, je höher die Atomgewichte sind. So ist z.B. Uran mit dem Atomgewicht 235 ein wichtiges Spaltmaterial. Eine vollständige Umwandlung von Energie in Masse kann man bei der Materialisierung von Photonen in einem starken Feld eines Atomkerns beobachten. Ein Photon kann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in ein Paar von Teilchen übergehen, in ein Elektron und ein Anti-Elektron (Positron), wenn die Energie des Photons die Summe der Massen der beiden Teilchen übersteigt. Die Äquivalenz von Energie und Masse ist heute in den Labors der Teilchenphysik alltägliche Erfahrung.

5. Die Wirkung der Arbeiten Einsteins

Diese fünf Arbeiten, vom Mai bis September 1905 bei den Annalen der Physik eingereicht, aber wohl die Frucht langer Jahre intensivster Überlegungen, waren der Ausgangspunkt für viele weiteren Entwicklungen der Physik und erweiterten unser Bild von Licht und Materie, von Raum und Zeit auf wahrhaft revolutionäre Weise. So wird Albert Einstein wohl so nachhaltig wie kaum ein anderer im Gedächtnis der Menschheit bleiben. Zu Beginn des Jahres 2000 stellte die amerikanische Zeitschrift „The Time“ eine Liste der bedeutendsten Personen des gerade vergangenen 20. Jahrhunderts vor. Neben Mahatma Gandhi, Albert Schweitzer, Winston Churchill wurde vor allen Albert Einstein genannt. Über ihn wurde gesagt: "In a hundred years, as we turn to another new century— nay, ten times a hundred

years, when we turn to another new millennium, the name that will prove most enduring from our own amazing era will be that of Albert Einstein: genius, political refugee, humanitarian, locksmith of the mysteries of the atom and the universe.“ So wird es sein. Die Menschen werden immer weiter in die Welten der kleinsten, der größten und der komplexen Dimensionen vorstoßen und immer Ungeahntes entdecken. Ihr Weltbild wird immer reichhaltiger und staunenswerter werden. Albert Einstein hat uns diese Welten erschlossen.