

# Physikalische Plaudereien

Harry Paul

©2022 Harry Paul



*Physik ist mehr als “unverständlicher Formelkram“.*



# Inhalt

|  |     |
|--|-----|
| Bewegungsgleichungen .....               | 7   |
| Naturgesetze .....                       | 16  |
| Licht .....                              | 23  |
| Sehen .....                              | 34  |
| Energie .....                            | 41  |
| Temperatur .....                         | 54  |
| Der schwarze Strahler .....              | 58  |
| Atome und ihre Ausstrahlung .....        | 65  |
| Photonen .....                           | 76  |
| Die Schrödingersche Katze .....          | 86  |
| Spukhafte Fernwirkung? .....             | 90  |
| Die Kosmische Hintergrundstrahlung ..... | 94  |
| Theorie des Urknalls .....               | 99  |
| Dunkle Materie .....                     | 105 |
| Physiker .....                           | 109 |



## Bewegungsgleichungen

Alle Lebewesen sammeln Erfahrungen, erkunden so die Welt und machen sich ein Bild von ihr. In der Tat könnten sie sich sonst in der Welt nicht zurechtfinden und schon gar nicht selbst unter widrigen Bedingungen überleben. Der Mensch hat nun zwei entscheidende Schritte weiter getan: Er hat sich durch die Entwicklung ausgeklügelter Beobachtungsinstrumente von den durch die Sinnesorgane bedingten Einschränkungen freigemacht. Und er hat in der Mathematik ein ideales "Hilfsmittel" zur Naturbeschreibung entdeckt. Insbesondere gelang es ihm, mit ihrer Hilfe Gesetze zu finden, die die Naturvorgänge regieren. Schon ohne sie im einzelnen zu kennen, können wir von vornherein sagen, dass es welche geben muss. Denn die Alternative wäre ja Chaos! Es gäbe weder Atome noch biologische Zellen, keine Photosynthese, kurzum kein Leben, und sei es noch so primitiv. Und im besonderen gäbe es uns Menschen nicht. Man kann daher den Spieß umdrehen und sagen, aus unserer bloßen Existenz folgt, dass überall Naturgesetze wirken müssen. Wir brauchen sie "nur noch" zu entdecken!

Der Gedanke, dass es in der Natur strenge Gesetzmäßigkeiten gibt, tauchte schon im Altertum bei Beobachtern des Sternenhimmels auf. Man stellte ja fest, dass gewisse Sterne sich allem Anschein nach auf vorbestimmten Bahnen bewegten. Dadurch kam es im Laufe der Zeit zu unterschiedlichen "Konstellationen" von Planeten wie Mars, Jupiter und Venus, und die Astrologen waren kühn genug zu behaupten, die am Tage der Geburt eines Menschen (so er einflussreich und mächtig war)

vorliegende Konstellation bestimme sein künftiges Schicksal. Sie stellten also Horoskope, was ihnen ein großes Ansehen (und entsprechende Einnahmen) verschaffte. Noch Johannes Kepler, einer der Wegbereiter der modernen Naturwissenschaft, fertigte Horoskope an. Allerdings hielt er diese für unsinnig, er sah sich jedoch durch seine wirtschaftlich Lage (das ihm als Kaiserlichem Mathematiker zugesagte Gehalt wurde nur zu einem geringen Teil ausgezahlt) zu diesem Nebenerwerb gezwungen. Jedenfalls muss es eine Nachfrage nach Horoskopen gegeben haben!

Nun ist der Einfluss der Sterne auf das menschliche Schicksal natürlich barer Unsinn. Schon der Gedanke, der Planet Mars etwa habe etwas mit dem Kriegsgott Mars zu tun, ist absurd. Man hatte ihm ja nur auf Grund seiner roten Farbe diesen Namen gegeben! Der Glaube an die Einwirkung der Sterne auf das irdische Geschehen – wir verwenden übrigens heute noch die Redensart “die Unternehmung stand unter einem (manchmal auch keinem) guten Stern“ – bezeugt nur eine angeborene menschliche Neigung zum Aberglauben. Aber das Ganze hatte auch etwas Gutes. Wenn man die Astrologie ernst nahm, bedeutete das ja, dass man an die Existenz von (himmlischen) Gesetzen glaubte, die sich jeder menschlichen Beeinflussung entziehen. Damit wurden, und das hätte eine heilsame Lehre sein können, den Herrschenden, und seien sie noch so mächtig, “objektive“ Grenzen ihrer Macht aufgezeigt.

Da sich auf der Welt alles in Fluss befindet, machten sich die Physiker auf die Suche nach Bewegungsgleichungen, die zeitliche Abläufe beschreiben. Betrachten wir ein einfaches Beispiel, den freien Fall. Schon in frühester Kindheit machen wir die Erfahrung, dass einem Gegenstände aus der Hand fallen, wenn



man sie nicht ordentlich festhält. Sie fallen auf den Erdboden, und jedenfalls als Baby braucht man jemanden, der sie wieder aufhebt (und den man notfalls durch Schreien dazu bewegen muss). Diese Erfahrung hat tatsächlich gesetzmäßigen Charakter: Man kann sich darauf verlassen, dass beliebige Gegenstände immer herunterfallen (wobei sie des öfteren auch noch kaputtgehen). Es gibt keine Ausnahme, und man muss sich darauf einstellen.

Bis jetzt handelt es sich um eine Erfahrung, wie sie auch Tiere, beispielsweise Vögel, machen. Aber bei uns Menschen entsteht bald der Wunsch, es genauer zu wissen. Das folgende Experiment erweckt schon das kindliche Interesse. Wir werfen einen kleinen Stein in einen Brunnenschacht (vornehmlich auf alten Burgen zu bestaunen) und warten, bis wir ihn unten aufklatschen hören. Wir halten es für selbstverständlich, dass folgendes gilt: Je mehr Zeit der Stein braucht, um unten anzukommen, um so länger ist der Weg, den er zurückgelegt hat, und damit um so tiefer der Brunnen. Da wäre es natürlich schön, man hätte eine Formel zur Hand, mit deren Hilfe man aus der Fallzeit den zurückgelegten Weg zuverlässig berechnen könnte.

Doch wie kommt man zu einer solchen Formel? Der Weg dazu ist gar nicht so einfach. Man benötigt zunächst eine mathematische Beziehung, die die Wirkung der Schwerkraft (am besten gleich einer beliebigen Kraft) auf die Bewegung eines materiellen Körpers beschreibt. An dieser Stelle ist man tatsächlich auf die Intuition eines genialen Kopfes angewiesen. Und als solcher erwies sich in diesem Falle Isaac Newton. Er setzte sich über die von Aristoteles in die Welt gesetzte, nichtsdestoweniger ir-

rige, Lehrmeinung hinweg, dass eine Kraft einem Körper eine bestimmte Geschwindigkeit verleiht. Seiner Überzeugung nach ist es vielmehr so, dass eine Kraft zu einer zeitlichen Änderung der Geschwindigkeit, d.h., zu einer Beschleunigung führt. Er gelangte so zu einem fundamentalen Bewegungsgesetz, das uns in der Form “Kraft gleich Masse mal Beschleunigung“ vertraut ist. Und er konnte sein Gesetz tatsächlich bestätigen! Sein Testobjekt war ein Planet, der ein Zentralgestirn umkreist. Hier hatte Johannes Kepler eine entscheidende Vorarbeit geleistet. Er hatte nämlich in mühevoller Kleinarbeit aus den sehr genauen Beobachtungsdaten von Tycho de Brahe herausgelesen, dass ein Planet seine Sonne auf einer elliptischen Bahn – und nicht auf einer Kreisbahn, wie alle Welt es für selbstverständlich hielt – umkreist. Newton konnte nun dieses Ergebnis aus seiner Bewegungsgleichung herleiten, nachdem er zuvor das Gravitationsgesetz, das die gegenseitige Anziehung zweier Körper unter der Einwirkung der Schwerkraft beschreibt, glücklich erraten hatte. Wahrlich eine Glanzleistung der Theorie!

Aber schon die Newtonsche Einsicht, dass es eine *universelle* Anziehungskraft gibt – was ja beispielsweise bedeutet, dass das gleiche Gesetz für einen vom Baum fallenden Apfel genauso gilt wie für den Mond – war genial. Hinzu kommt, dass wir an die Existenz von Kräften glauben sollen, die über riesige Entfernungen, noch dazu durch den luftleeren Raum, wirken. Das widerspricht doch jeglicher Erfahrung! Wenn wir einen Stein in die Luft werfen wollen, müssen wir ihn doch in die Hand nehmen! Und eine Kanonenkugel fliegt nur deshalb, weil sie direkt, durch die bei der Zündung freigesetzten heißen Gase, angetrieben wird. Und überhaupt, wie kann denn eine imma-

terielle Kraft auf einen materiellen Körper wirken? Das war im besonderen für den großen Naturforscher Ernst Haeckel so unbegreiflich, dass er das Problem zu einem seiner “Welträthsel“ erklärte. Wir finden inzwischen nichts mehr dabei, schließlich haben wir es ja in der Schule so gelernt.

Man kann nun auch noch tiefer gehende Fragen stellen von der Art: Was ist denn eigentlich eine Kraft? Hier ist der Physiker eindeutig überfragt. Er weiß es nicht, und er sieht auch grundsätzlich keine Möglichkeit, Fragen dieser Art zu beantworten. Er muss die Welt nehmen, wie sie ist, und er kann eine physikalische Größe nur durch eine *Messvorschrift* definieren, beispielsweise die Schwerkraft mit Hilfe einer Federwaage, also durch die Streckung einer metallischen Feder. Daher spielt die Messung in der Physik eine fundamentale Rolle. Wenn man nicht sagen kann, wie man eine bestimmte Größe messen kann, hat sie keine physikalische Bedeutung.

Die Newtonsche Bewegungsgleichung macht deutlich, dass es eine innige Verflechtung zwischen Physik und (anspruchsvoller!) Mathematik gibt. (Sie ist vermutlich die Ursache für die Abneigung, auf die die Physik normalerweise stößt und der einfühlsame Pädagogen mit einer schulischen Abwalmöglichkeit begegneten.) In der Newtonschen Gleichung steht ja die Beschleunigung, und das ist die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit. Wir haben es also mit einer Differentialgleichung zweiter Ordnung zu tun, und deren Lösung ist meistens kein Kinderspiel. Im Falle der Bewegung im erdnahen Schwerfeld ist sie allerdings sehr einfach, weil die Kraft dann eine Konstante ist. Letztere ist übrigens proportional zur Masse des fallenden Körpers (das lässt sich mit einer Federwaage nachprüfen), so dass wir aus der

Newtonschen Bewegungsgleichung sogleich einen erstaunlichen Schluss ziehen können: Die Masse des Körpers tritt auf beiden Seiten der Gleichung als Faktor auf und kürzt sich daher weg. Das bedeutet, die Fallbewegung ist unabhängig von der Masse, alle Körper, aus welchem Stoff auch immer sie bestehen mögen, fallen gleich schnell! Da könnte man natürlich einwenden, dass eine Flaumfeder sicher deutlich langsamer fällt als eine Eisenkugel. Aber das liegt am Luftwiderstand, den man nicht berücksichtigt hat. (Die aus der in Rede stehenden Bewegungsgleichung folgenden Vorhersagen gelten streng genommen nur für das Vakuum.)

Andere, ganz aktuelle Folgerungen ergeben sich aus dem Fallgesetz, wenn wir den Körper nicht, wie bisher, einfach fallen lassen, sondern nach oben werfen, ihm also eine nach oben gerichtete Anfangsgeschwindigkeit erteilen. Er fliegt dann zuerst nach oben, kehrt um und fällt auf die Erde zurück. (Vorsicht beim Schießen! Wenn man vor Freude in die Luft schießt, sollte man den Lauf des Gewehres nicht senkrecht halten.) Man kann aber auch ausrechnen, welche Anfangsgeschwindigkeit eine Rakete haben muss, wenn man sie in eine Erdumlaufbahn schießen will. Ja, man kann auch ausrechnen, mit welcher Mindestgeschwindigkeit sie starten muss, wenn sie sich auf den Weg ins All machen soll. Hie zeigt sich die große Stärke der Physik: Sie erlaubt präzise Vorhersagen. Das gilt nicht nur für mechanische Bewegungen, sondern ganz allgemein. Beispielsweise erlaubt sie, den maximalen Wirkungsgrad einer Dampfmaschine vorherzusagen. Sie dämpft damit einerseits unrealistische Erwartungen des Praktikers, andererseits gibt sie ihm wertvolle Hinweise, unter welchen Betriebsbedingungen er möglichst viel

Energie aus seiner Maschine herausholen kann.

Aus der Newtonschen Bewegungsgleichung folgt ganz allgemein eine fundamentale Erkenntnis. Die Mathematiker haben ja den strengen Beweis erbracht, dass eine Differentialgleichung vom betrachteten Typ eine Lösung besitzt, die eindeutig ist, sobald man Anfangsbedingungen (beim freien Fall sind dies der anfängliche Ort des Körpers und seine Anfangsgeschwindigkeit) vorschreibt. Das bedeutet aber nichts anderes als einen strikten Determinismus! Die mechanischen Prozesse laufen wie ein Uhrwerk ab!

Wie wir am Beispiel der Fallbewegung gesehen haben, führt kein Weg an einer "Mathematisierung" der Physik vorbei. Tatsächlich erscheint die Beschreibung der Wirklichkeit durch Zahlenwerte, die physikalische Größen annehmen und die durch Messungen festgestellt werden, unvermeidlich, wenn man eine objektive, d.h., von subjektiven Einflüssen freie Naturbeschreibung anstrebt. Nur so kann man eine grundlegende physikalische Forderung erfüllen, nämlich die Reproduzierbarkeit experimenteller Aussagen. Damit ist gemeint, dass ich morgen den gleichen Wert messen werde wie heute, aber auch, dass ein anderer Beobachter, befände er sich auch "am anderen Ende der Welt" (vielleicht sogar im Weltraum, was ja neuerdings möglich ist), unter gleichen Versuchsbedingungen den gleichen Messwert findet wie ich (vorausgesetzt, wir haben beide richtig gemessen). Auf jeden Fall erlaubt erst die "Quantifizierung" einen genauen Vergleich von Beobachtungen, und man kann, wenn Abweichungen auftreten, nach den Ursachen dafür suchen. Der Preis, den wir dafür zahlen, ist allerdings hoch. Unsere sinnlichen Wahrnehmungen, etwa die Farbenpracht einer Herbstlandschaft

oder das Vergnügen, das wir beim Hören von Musik empfinden, haben in der Welt der Physiker keinen Platz mehr. Ich kann aber meine Sinneseindrücke grundsätzlich nicht mit denen eines anderen vergleichen. Ich kann nur erwarten, dass er beispielsweise beim Anblick eines roten Kleides die gleiche optische Empfindung hat wie ich. – Tatsächlich geben wir uns schon im Alltag mit qualitativen Feststellungen der Art “heute morgen ist es verdammt kalt“ oft nicht zufrieden und fragen: “Wie viel Grad haben wir denn?“ Und ein Fieberthermometer findet sich in jedem Haushalt.

Man kann sich fragen, ob sich physikalische Gesetze beweisen lassen. Offensichtlich ist die Situation hier grundsätzlich anders als in der Mathematik. Dort gibt es strenge Beweise, die allein mit Hilfe der Logik oder der geometrischen Anschauung gefunden werden und so zu “ewigen Wahrheiten“ führen. Ein schönes Beispiel ist der Satz von Pythagoras, demzufolge in einem rechtwinkligen Dreieck das Hypothenusenquadrat gleich der Summe der beiden Kathetenquadrate ist, von dem ich sicher sein kann, dass er exakt gilt. Tatsächlich kann er wegen der Fehler, wie sie sowohl bei der materiellen Realisierung eines Dreiecks als auch der Messung nicht zu vermeiden sind, nie durch Messungen, weder auf dem Papier noch im “freien Feld“, *exakt* bewiesen werden. Der strenge Beweis bezieht sich dagegen auf ideale Verhältnisse: Die Linien, die das Dreieck definieren, sind “unendlich“ dünn und ideal gerade, und der auftretende rechte Winkel hat *exakt* den Wert neunzig Grad.

Im Gegensatz zum Mathematiker kann der Physiker eine behauptete Gesetzmäßigkeit niemals exakt beweisen. Er kann bestenfalls versichern, dass er – im Rahmen der Messgenauigkeit

seiner Apparatur – keine Abweichungen von der theoretischen Vorhersage gefunden hat. In diesem Sinne hat er letztere bestätigt. Das ist aber kein Beweis, morgen schon kann ein Kollege bei einer anderen Untersuchung einen Widerspruch finden. Die Sache wird dadurch noch komplizierter, dass es auch systematische Messfehler gibt, die man erst einmal finden muss. Andererseits genügt jedoch bereits ein einziges (zuverlässiges) Messergebnis, das in deutlichem Widerspruch zu einer theoretischen Vorhersage steht, um die zugrunde liegende Theorie zu “erledigen“. Überspitzt könnte man also sagen: Ein wahres physikalisches Gesetz ist ein solches, das experimentell noch nicht widerlegt wurde. Glücklicherweise ist es in der Regel nicht so schlimm; die Erfahrung lehrt, dass sich grundlegende Gesetze stets bewährt haben, so dass man ihnen vertrauen kann. In manchen Fällen muss man allerdings ihren Gültigkeitsbereich nachträglich einschränken.

Schließlich sei noch einmal betont, dass die Grundgleichungen der Physik – neben dem Newtonschen Bewegungsgesetz sind vor allem die Maxwellschen Gleichungen des Elektromagnetismus und die Schrödinger-Gleichung der Quantentheorie zu nennen – nicht einfach aus Beobachtungen erschlossen werden können. Zwar liefert das vorhandene Datenmaterial wertvolle Hinweise, aber ihre tatsächliche Entdeckung verdanken sie der genialen Intuition eines einzelnen.

## Naturgesetze

Will man mit der Newtonschen Bewegungsgleichung tatsächlich etwas anfangen, muss man die dort auftretende Kraft spezifizieren. Ein wichtiger Fall ist die Gravitationskraft zwischen zwei Körpern, die mit dem reziproken Quadrat des gegenseitigen Abstands abnimmt. Ein ganz ähnliches Gesetz, das als Coulombsches Gesetz bekannt ist, gilt für die gegenseitige Anziehung zweier ungleichnamiger Ladungen und die Abstoßung zweier gleichnamiger Ladungen.

Der Physiker erwartet (wie sich zeigt, zu Recht) bei allen Naturgesetzen einen räumlich wie zeitlich unbeschränkten Gültigkeitsbereich. Das Gravitationsgesetz beispielsweise gilt nicht nur gleichermaßen für winzige Elementarteilchen wie für riesige Himmelskörper, sondern es herrscht auch an jedem Ort im Universum und zu jeder Zeit (sei es kurz nach dem Urknall, heute oder in ferner Zukunft) in immer der gleichen Weise. Das bedeutet genauer, nicht nur seine mathematische Form, sondern auch die darin auftretende Gravitationskonstante, die die Stärke der Anziehung beschreibt, ist stets dieselbe. (Es gab zwar einmal Versuche, ihr eine zeitliche Veränderlichkeit zu unterstellen, aber sie führten zu nichts.) Die Gravitationskonstante ist überdies unabhängig von der speziellen Beschaffenheit der Körper (insbesondere ihrer chemischen Zusammensetzung). Sie verdient daher die Bezeichnung *universelle* Naturkonstante.

Genau genommen ist es nicht nur die universelle Gültigkeit der Naturgesetze, sondern schon die jeweils exakt gleiche Beschaffenheit der verschiedenen Elementarteilchen, die der Physiker



als “gegeben“ ansieht. Beispielsweise ist natürlich nicht daran zu denken, eine Aussage der Form: *alle* Elektronen im Weltall haben genau die gleichen physikalischen Eigenschaften (wie elektrische Ladung, Masse und Drehimpuls) experimentell zu bestätigen. Man kann nur sagen, bisher wurde kein Widerspruch zu der stillschweigend gemachten Voraussetzung einer Universalität gefunden. Andernfalls wäre die Welt so wahnsinnig kompliziert, dass eine naturwissenschaftliche Beschreibung unmöglich wäre.

Die Naturgesetze sind offenbar nur dann von praktischem Nutzen, wenn man die darin stehenden Naturkonstanten tatsächlich kennt. Da man sie nicht theoretisch berechnen kann, heißt das, man muss sie so genau, wie es nur geht, messen. Dazu braucht man aber Maßeinheiten, die möglichst von allen verwendet werden. Die historische Entwicklung zeigt, dass eine Einigung auf ein international akzeptiertes Maßsystem gar nicht so einfach ist. Hier kommt ja der Hang des Menschen zur Eigenbrötelei und zum Festhalten an Traditionen ins Spiel. Wie lange hat es doch gedauert, bis man sich von den “von den Vätern ererbten“ Maßen wie Elle, Zoll und Fuß (die sich unglücklicherweise noch von Region zu Region unterschieden) verabschiedet und auf das Meter geeinigt hat! Übrigens werden Rohrdurchmesser und Gewinde heute noch in Zoll angegeben, und das Goldgewicht in Unzen!

Tatsächlich ist der Prozess der verbindlichen Definition von Maßeinheiten bis heute noch nicht abgeschlossen, weil die Fortschritte der Experimentierkunst immer wieder neue Möglichkeiten eröffnen. Dabei kommt es manchmal zu überraschenden Wendungen, wie die Geschichte der Meterdefinition zeigt. Ursprünglich definiert als der zehnmillionste Teil eines Erdmeri-

dianquadranten, wurde das Meter bald durch etwas Handlicheres, nämlich einen Strichmaßstab aus einer Platin-Iridium-Legierung, realisiert. Dieses sogenannte Urmeter hat jedoch als ein Artefakt den großen Nachteil, dass eine aufwendige Konservierung erforderlich ist. So lag es nahe, auf eine naturgegebene Größe, nämlich die Lichtwellenlänge, zurückzugreifen. Das Meter wurde in Beziehung gesetzt zu der Vakuumwellenlänge der Strahlung, die bei einem ausgewählten Übergang in Krypton-86 ausgesandt wird. Dann kam es zu einem geradezu revolutionären Schritt. Es hatte sich nämlich herausgestellt, dass man die Lichtfrequenz – dank der Verwendung von Atomuhren zur Zeitmessung – deutlich genauer messen kann als die Wellenlänge. Nun besann man sich, dass Frequenz und Wellenlänge, miteinander multipliziert, die Lichtgeschwindigkeit ergeben. (Das ist eine streng gültige Beziehung.) Des weiteren besteht kein Zweifel daran, dass die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) eine universelle Naturkonstante ist. Man kam nun auf die Idee, den Zahlenwert der Lichtgeschwindigkeit *per definitionem* zu einer (im mathematischen Sinne) *exakten* Konstanten zu machen. Man ging dabei so vor, dass man von dem bis dato bekannten genauesten Messwert für die Lichtgeschwindigkeit ausging und diese, notwendigerweise auf endlich viele Dezimalstellen beschränkte, Zahl dadurch “vervollständigte“, dass man die restlichen Dezimalstellen (streng genommen sind es unendlich viele!) zu Nullen erklärte. Dadurch wurde die Lichtgeschwindigkeit (als einzige Naturkonstante) zu einer *absolut* bekannten Größe. Das eigentliche Ziel dieses Vorgehens bestand darin, auf eine direkte Messung der Wellenlänge (etwa mit Hilfe eines interferometrischen Verfahrens) zu verzichten. Statt dessen misst man die Frequenz und berechnet aus der

oben genannten Beziehung zwischen Frequenz und Wellenlänge die zugehörige Wellenlänge, wobei sich die Genauigkeit der Frequenzmessung – hier zählt sich die exakte Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit aus – auf die Genauigkeit der Wellenlängenbestimmung unmittelbar überträgt. Ein Geniestreich! – Doch eine Maßeinheit ist bis heute ein Sorgenkind geblieben: Die Einheit der Masse wird immer noch durch ein Urkilogramm in Form eines Zylinders aus Platin-Iridium realisiert.

Die von den Physikern vertretene Auffassung, dass die Naturgesetze überall im Universum in gleicher Weise gelten, bedeutet nichts weniger, als die Einheit der Welt zu postulieren. Zu dieser Einheit gehört auch, dass die Himmelskörper aus solchen Stoffen (chemischen Elementen) bestehen, wie sie auch auf der Erde vorkommen. Das zeigt die chemische Analyse der Überreste von Meteoriten, die aus dem Weltall zu uns gekommen sind. Es ist allerdings noch gar nicht so lange her, dass ein ganz anderes Weltbild vorherrschte, das auf den berühmten griechischen Philosophen Aristoteles zurückging. Es versetzte ihn in Erstaunen, dass die himmlischen Körper wie Sonne, Mond und Planeten nicht auf die Erde stürzen, während doch ein jeder irdische Körper bestrebt ist, sich auf den Erdmittelpunkt zu bewegen. Überdies bewegen sie sich merkwürdigerweise auf Kreisbahnen statt auf Geraden, wie es auf der Erde der Fall ist. Er zog daraus den Schluss, dass die irdische und die himmlische Welt säuberlich getrennt sein müssten, wobei der Schnitt unterhalb der Bahn des Mondes verläuft. Wir leben in einer "sublunaren" Zone – immerhin ist seiner Meinung nach die Erde der Mittelpunkt des Alls –, die himmlischen Körper sind dagegen jeweils an einer höher liegenden Sphäre befestigt, die sich

dreht und so die jeweilige kreisförmige Bewegung der Körper bewirkt. Außerdem bestehen diese Körper aus einer nicht irdischen (sehr leichten) Substanz, dem “fünften Element“. Wie lange die Aristotelische Lehre noch nachwirkte, kann man daraus ersehen, dass Gelehrte, denen Bruchstücke von Meteoriten buchstäblich vor die Füße fielen (sie fassten sich noch warm an), erklärten, sie könnten unmöglich vom Himmel gefallen sein, weil es dort keine Steine gäbe. Dieser Meinung war eine französische Kommission noch im Jahre 1789! Wie Palmström in Christian Morgensterns Gedicht ‘Die unmögliche Tatsache‘ “schlossen sie messerscharf, dass nicht sein kann, was nicht sein darf“.

Was ich noch besonders betonen möchte, ist der *objektive* Charakter der Naturgesetze. Sie gelten vollkommen unabhängig davon, ob ein Mensch (oder ein anderes Lebewesen) von ihnen Notiz nimmt oder nicht. Sie lassen sich daher auch nicht manipulieren. Sie sind, wie man gerne sagt, “ehern“. Beispielsweise ist ein “Abschalten“ der Gravitation (Erzeugung von “Antigravitation“) nur etwas für Spinner.

Doch kehren wir noch einmal zu den Naturkonstanten zurück! Wie bereits gesagt, ist es unmöglich, ihre Werte theoretisch zu berechnen. Die Natur ist halt so. Aber warum haben sie gerade die Werte, die wir vorfinden? Diese Frage scheint müßig zu sein. Sie regte aber einige Forscher zu weiterem Nachdenken an. Wie sähe denn die Welt aus, fragten sie, wenn die Naturkonstanten – oder jedenfalls einige von ihnen – andere Werte hätten? Da kam man zu einem überraschenden Ergebnis. Schon geringe Abweichungen hätten katastrophale Folgen gehabt! Ich führe nur ein Beispiel an, die Kopplungskonstante für die starke Wechselwirkung, die zwischen Elementarteilchen besteht. Sie muss

eine bestimmte Mindestgröße besitzen, damit sich Protonen und Neutronen zu stabilen Alpha-Teilchen (Kernen von Heliumatomen) verbinden können. Diese Kernreaktion ist ein ganz entscheidender Schritt in der Entwicklung des Kosmos nach dem Urknall. Ohne ihn gäbe es keine schweren Elemente, der gesamte Kosmos bestände aus Wasserstoff. Wäre andererseits die in Rede stehende Konstante nur um wenige Prozent größer als ihr tatsächlicher Wert, so wäre der gesamte Bestand an Wasserstoff zu Helium “verbacken“ worden mit dem Ergebnis, dass es im gesamten Kosmos kein Wasser gäbe.

Da wir es – als Naturwissenschaftler – ausschließen, dass irgendeine ausserirdische “Instanz“ die Werte der Naturkonstanten gerade so fein “justiert“ hat, dass eine Evolution vom Urknall bis zu uns Menschen möglich wurde, stehen wir vor einem Rätsel. Sind die Werte der Naturkonstanten vielleicht zufällig so günstig für uns? Gibt es vielleicht tatsächlich unendlich viele “Paralleluniversen“, in denen alle denkbaren Werte verwirklicht sind und in denen daher “nichts los ist“, und wir haben mit unserem Universum einfach unglaubliches Glück gehabt? Allerdings sind wir mit derartigen Gedanken im Reich der Phantasie gelandet. Da wir mit solchen Paralleluniversen nie Kontakt aufnehmen könnten, wären sie für uns praktisch nicht existent. Auf jeden Fall kann man aber sagen, wenn unsere Welt nicht so eingerichtet wäre, wie sie ist – Gottfried Wilhelm Leibniz vertrat ja sogar die These, sie sei die beste aller möglichen –, dann gäbe es uns gar nicht und niemand wäre da, der dumme Fragen stellen könnte.

Ein paar Forscher haben nun den Spieß umgedreht. Sie schließen aus der Tatsache der menschlichen Existenz auf die

“erlaubten“ Werte der Naturkonstanten, die die Evolution vom Urknall bis zum Menschen überhaupt möglich gemacht haben. Folgt man diesem sogenannten “anthropologischen Prinzip“, so reduziert sich alles auf die Frage: Warum gibt es uns Menschen? Aber sie gehört sicher nicht in die Physik.

Schließlich kann man auch fragen: Warum gibt es überhaupt Naturgesetze? Warum geht nicht alles “wie Kraut und Rüben“, sprich chaotisch, durcheinander? Auch hier kann man nur antworten, weil es sonst kein Leben geben könnte, da dieses notwendig in geordneten Bahnen verläuft. Man kann noch hinzufügen, weil wir sonst nicht denken könnten. Wie allerdings unsere Gedanken (die nach Goethe “unbeschwert aus unserer Seele fließen wollen“) mit den im Gehirn herrschenden Gesetzen der Elektrochemie in Einklang zu bringen sind, ist mir persönlich vollkommen unbegreiflich. Doch stecken vielleicht diese Gesetze hinter unserem logischen Denken?

Bleibe noch die ultimative, von dem Philosophen Schelling gestellte Frage: “Warum ist nicht nichts?“ Doch die ist nun wirklich nur etwas für Philosophen.

## Licht

Licht ist etwas Phantastisches, geradezu Gespenstisches. Es ist nichts Greifbares wie die Gegenstände (einschließlich Tiere), mit denen wir es täglich zu tun haben. Vielmehr ist es eine Art geisterhafter Bote – wir können es selbst nicht sehen –, der uns, ausgesandt von leuchtenden oder beleuchteten Körpern, in “Windeseile“ mit einer wahren Flut an Informationen über die Umwelt geradezu überschüttet. Er erzeugt so in unserem Bewusstsein ein Abbild der Welt, wie es detaillierter und farbenprächtiger nicht sein könnte. (Am Rande sei bemerkt, dass uns Pflanzen und Bäume nur deswegen grün erscheinen, weil sie mit dem Grünanteil der Sonnenstrahlung nichts anzufangen wissen und ihn daher reflektieren.) In glücklichen Augenblicken erfahren wir so die Schönheit der Welt.

Was man zuerst über das Licht in Erfahrung brachte, war die Beeinflussbarkeit seiner Ausbreitung durch “optische Elemente“ wie Spiegel oder Glaslinsen. (Ohne einen Spiegel könnte ich mir nicht selbst ins Gesicht sehen!) Das erlaubte die Herstellung von Lupen, Brillen, Mikroskopen und Fernrohren. Ich erinnere mich noch gut daran, wie mich in meiner Jugend ein einfaches optisches Experiment in Erstaunen setzte: Ich hielt eine Lupe in geeigneter Entfernung über ein Blatt Papier, fokussierte dadurch die Sonnenstrahlen auf einen kleinen Fleck und brannte so ein Loch in das Papier. Womit zugleich gezeigt wurde, dass Licht Energie transportiert! (Auf diese Weise beliefert uns ja die Sonne so großzügig mit Energie und ermöglicht so überhaupt erst irdisches Leben.) Und noch ein Wort zu den Brillen! Sie

sind ja heutzutage zu einer ganz selbstverständlichen und zugleich unersetzlichen “Sehhilfe“ im täglichen Leben geworden. Dabei sollte man nicht vergessen, dass sie auch eine wichtige kulturelle Funktion besitzen. Nur mit ihrer Hilfe können Menschen, die nicht mehr so gut sehen, am kulturellen Leben durch Lesen teilhaben.

Doch eine Sammellinse leistet noch etwas viel Erstaunlicheres: Sie bildet einen Ausschnitt der Umwelt getreulich auf eine ebene weiße Fläche ab. Auf diesem Prinzip beruht der gute alte Photoapparat. Ein Objektiv sorgt für die Abbildung auf einen photographischen Film. Dabei lässt sich noch die Beleuchtungsstärke (die Belichtung) mit Hilfe einer einstellbaren Blende regulieren. Dieser Apparat wurde von der Natur allerdings schon vor langer Zeit “erfunden“, wir kennen ihn als unser Auge. Dabei zeigt sich die Natur unserer Technik überlegen, das Objektiv (die Augenlinse) lässt sich in seiner Form so verändern, dass Gegenstände in einer willkürlich ausgesuchten Entfernung besonders scharf auf die Netzhaut abgebildet werden, und das geschieht, genauso wie die Einstellung der Blende (Regenbogenhaut mit der Pupille als Öffnung), “vollautomatisch“, soll heißen unbewusst.

Verblüffend ist auch ein weiteres Experiment, bei dem man Sonnenlicht auf ein Glasprisma fallen lässt. Das Licht wird dann in Teilstrahlen unterschiedlicher Farbe aufgefächert. Eine Augenweide! Newton fand die richtige Erklärung: Die farbigen Strahlen werden nicht im Prisma erzeugt, vielmehr sind sie schon vorher da, das Prisma trennt sie lediglich dadurch, dass es Lichtstrahlen unterschiedlicher Farbe verschieden stark bricht. An dieser Stelle muss aber gesagt werden, dass die Farben nur in unserem Bewusstsein existieren. Unser Gehirn vollbringt



das Kunststück, die von den auf der Netzhaut sitzenden Farbrezeptoren (Zäpfchen) erzeugten elektrischen Signale in wunderschöne Farbeindrücke zu verwandeln. In der "objektiven" Außenwelt dagegen gibt es keine Farben, sondern nur Licht unterschiedlicher Frequenz. Über diesen phantastischen "Service" der Natur kann man wirklich nur staunen.

Eine Frage drängte sich auf: Wie schnell breitet sich das Licht eigentlich aus? Ist die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß oder hat sie nur einen, allerdings unvorstellbar großen, endlichen Wert? Wenn ja, wie kann man diesen messen? Bräuchte man dazu nicht wahnsinnig genau gehende Stoppuhren? Die Antwort lautet Nein, man muss sich nur etwas einfallen lassen. Das tat als erster der französische Physiker Fizeau: Er zerhackte einen Lichtstrahl mit Hilfe eines rotierenden Zahnrades in einzelne Lichtimpulse und ließ diese von einem etwa 9 km entfernten Spiegel in sich reflektieren. Ein zurückkehrender Impuls fand also – vorausgesetzt, er brauchte eine endliche Zeit für seine Reise – das Zahnrad in einer etwas verdrehten Lage vor. Wenn er "Pech hatte", traf er auf einen Zahn statt auf eine Lücke und kam nicht weiter. Durch Änderung der Rotationsgeschwindigkeit konnte Fizeau tatsächlich einen Wechsel zwischen Helligkeit und Dunkelheit erzeugen, aus dem er den Wert der Lichtgeschwindigkeit bestimmen konnte. Ein wahres Meisterstück der Experimentierkunst! Tatsächlich erweist sich die Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) als eine universelle Naturkonstante. Sie hat nicht nur exakt den gleichen Wert für Licht beliebiger Frequenz, sondern für jede Art von elektromagnetischer Strahlung, also im besonderen für Radiowellen und Röntgenstrahlen.

Der von Fizeau gefundene Wert der Lichtgeschwindigkeit

beträgt rund 300 000 km/Sekunde und übersteigt in der Tat unser Vorstellungsvermögen. Für Vorgänge auf der Erde spielt daher die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes praktisch keine Rolle. Anders ist die Situation jedoch im Weltraum. Schon von der Sonne zur Erde braucht das Licht bereits mehr als acht Minuten, und bei kosmischen Objekten kommt man schnell auf Jahre und weitaus mehr. (Die Astronomen messen Entfernungen in Lichtjahren, d.h., sie benutzen als Einheit eine Strecke, die das Licht in einem Jahre zurücklegt.) Das hat nun eine wenig erfreuliche Konsequenz: Auch mit unseren besten Teleskopen erhalten wir kein aktuelles Bild vom Kosmos. Wenn wir ein spektakuläres Ereignis beobachten, etwa eine Supernova-Explosion, ist alles schon längst gelaufen. Dank der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit sehen wir, ob uns das gefällt oder nicht, stets nur in die Vergangenheit, und je größer die Entfernung ist, um so weiter liegen die Ereignisse zeitlich zurück. Wir stoßen hier auf eine grundsätzliche Schranke der Erkenntnis, mit der wir uns abfinden müssen.

Nun ist ja Licht ein elektromagnetischer Wellenvorgang – ich gehe auf diesen Punkt noch genauer ein –, und so wundert es nicht, dass sich jede Art elektromagnetischer Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Das gilt dann also im besonderen für den Funkverkehr, was schon den Kontakt mit weit ins All hinaus gelangten Raumsonden erschwert. Eine noch weitaus gravierendere Konsequenz ist, dass ein “Gedankenaustausch“ mit Aliens (so es sie denn geben sollte und sie zudem technisch auf der Höhe wären) kaum möglich ist, wenn diese in größerer Entfernung beheimatet sind. Die jeweilige Information müsste ja gesendet werden, man müsste also bestenfalls Jahre, vielleicht

Jahrzehnte oder noch länger, auf eine Antwort warten.

Was dem Licht recht ist, ist der Materie billig. Es dürfte es wohl kaum jemand – von Science-Fiction-Autoren einmal abgesehen – für möglich halten, materielle Objekte so stark zu beschleunigen, dass sie schneller als das Licht fliegen. In der Tat zeigt sowohl die Theorie als auch das Experiment, dass die Lichtgeschwindigkeit eine obere Schranke der Bewegung darstellt. Mit noch so leistungsstarken Teilchenbeschleunigern gelingt es nicht, die Lichtgeschwindigkeit zu überschreiten. Das hat eine ganz wichtige Konsequenz: Selbst bei noch so gewaltigen (künftig zu erwartenden) technischen Fortschritten kommen wir bei einer Reise ins All nicht weit. Der reizvolle Gedanke, wir Menschen könnten den Weltraum “erobern“ und uns einen anderen Planeten als neuen Wohnsitz aussuchen (nachdem wir unsere Erde zugrunde gerichtet haben), gehört ins Reich der Phantasie.

Was die Eigenschaften des Lichtes angeht, scheint alles klar zu sein. Licht setzt sich aus Strahlen unterschiedlicher Frequenz zusammen, die sich normalerweise geradlinig mit einer extrem hohen Geschwindigkeit, der gemessenen Lichtgeschwindigkeit, ausbreiten. Mit geeigneten optischen Elementen können wir die Strahlen jedoch willkürlich ablenken, was den Bau äußerst präziser optischer Instrumente, von der Gleitsichtbrille bis zum Weltraumteleskop, ermöglicht. Ja, wenn es da nicht Beobachtungen gäbe, die überhaupt nicht in dieses Bild passen! Ich will das an dem klassischen Experiment erläutern, mit dem als erster Thomas Young für Aufsehen sorgte. Er ließ Licht einer einfarbigen Lichtquelle durch zwei nahe beieinander liegende Öffnungen in einem undurchsichtigen Schirm hindurch fallen und stellte fest, dass auf dem in einiger Entfernung dahinter

aufgestellten Beobachtungsschirm ein System abwechselnd heller und dunkler Streifen zu sehen war. Wie konnte das sein? Die Öffnungen wirkten als sekundäre Lichtquellen, und die von ihnen ausgehenden Lichtkegel überlagerten sich teilweise auf dem Beobachtungsschirm. Die dort auftretenden dunklen Streifen zeigten offenbar an, dass sich Lichtstrahlen gegenseitig auslöschten können. In diesem Falle gilt dann also die Regel: Licht + Licht = Dunkelheit! Wie kann man das verstehen? Tatsächlich kann man eine ähnliche Erscheinung an Wellen auf einer Wasseroberfläche beobachten. Wirft man einen kleinen Stein in einen Teich, so kann man sehen, wie eine Welle entsteht, die sich von der Stelle der Erregung (durch den Stein) aus in Gestalt von Kreisen ausbreitet. Die Welle ist dabei nichts anderes als eine gesetzmäßige periodische Auf- und Abbewegung (eine Schwingung also) der Wasserteilchen an den einzelnen Orten. Es bilden sich Wellenberge und -täler aus, wobei die Teilchen selbst ortsgelassen sind, d.h., es kommt zu keiner Strömung. Interessant wird es nun, wenn man an einer anderen Stelle einen zweiten Stein ins Wasser wirft. Es entsteht dann eine zweite Welle, die sich mit der ersten überlagert. und da passiert es dann an gewissen Stellen, dass ein Wellenberg auf ein Wellental trifft und das Teilchen in Ruhe bleibt. Hält man sich das vor Augen, so scheint der Schluss nahe liegend, dass das Youngsche Experiment die Wellennatur des Lichtes demonstriert. Wir sprechen in diesem Zusammenhang von Interferenz. Aber wie verträglich ist das mit der Vorstellung von Lichtstrahlen? Die Antwort lautet: Die Wellenlänge des Lichtes (der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder -tälern) ist so winzig, dass sie in den meisten Fällen keine Rolle spielt. Das trifft jedoch nicht zu, wenn

man solche Versuchsbedingungen realisiert, die dem Licht Gelegenheit geben, sich als Welle zu “offenbaren“. (Neben der Interferenz ist auch die Beugung eine Wellenerscheinung.) Licht ist somit korrekt durch eine Wellenoptik zu beschreiben, die Strahlenoptik ist nur eine (oft sehr gute) Näherung. – Übrigens macht die Natur schon lange vom Interferenzprinzip Gebrauch. Die prachtvollen Farben von Schmetterlingsflügeln sind ein reiner Interferenzeffekt!

Nicht unerwähnt soll bleiben, dass eine Reihe von Instrumenten entwickelt wurde, die das Interferenzphänomen zu sehr genauen optischen Messungen nutzen. Es handelt sich um die sogenannten Interferometer. Eines der bekanntesten, und zugleich historisch gesehen das erste, ist das außerordentlich empfindliche Interferometer, das Michelson ersonnen und gebaut hatte (daher der Name Michelson-Interferometer), um ein “experimentum crucis“ durchzuführen, das in die Annalen der Physik eingegangen ist. Davon soll sogleich die Rede sein. Zuvor soll jedoch das Grundprinzip dieses Instrumentes kurz erläutert werden. Das Licht einer einfarbigen Lichtquelle fällt auf einen halbdurchlässigen Spiegel, der um 45 Grad gegen die Ausbreitungsrichtung geneigt ist. Er zerlegt den einfallenden Strahl in einen durchgehenden und einen senkrecht nach hinten reflektierten. Diese beiden Strahlen werden nun dadurch überlagert (und damit zur Interferenz gebracht), dass sie jeweils durch einen Spiegel in sich reflektiert werden und so erneut auf den halbdurchlässigen Spiegel treffen. Der früher durchgegangene Strahl wird nun zur Hälfte nach vorn abgelenkt und der früher reflektierte Strahl geht zur Hälfte durch und läuft ebenfalls nach vorn, sodass es zu einer Überlagerung kommt. Es lassen sich

so im Ausgang des Interferometers helle und dunkle Streifen beobachten, die daher rühren, dass die reflektierenden Spiegel nicht genau senkrecht zu dem jeweiligen Lichtstrahl stehen.

Wenden wir uns nun einer grundlegenden Frage zu: Was ist es denn eigentlich, was im Falle einer Lichtwelle schwingt? Die Erfahrung mit Wasser- und Schallwellen lehrt doch, dass eine Welle immer eines Mediums bedarf, um sich ausbilden und ausbreiten zu können. Das kann doch beim Licht nicht anders sein! Also muss es ein Medium geben, in dem sich die Lichtwellen fortpflanzen. Da wir Licht von den entferntesten Sternen empfangen können, muss dieses Medium den gesamten Weltraum erfüllen, ohne dass wir weiter etwas davon merken. Im besonderen muss es gewichtslos sein. Eine phantastische Vorstellung! Auf jeden Fall bekam dieses mysteriöse Medium einen, wie es scheint, passenden Namen, nämlich Lichtäther oder einfach Äther. Hier trat nun Michelson auf den Plan. Er dachte sich ein Experiment aus, mit dem man die Existenz des Äthers direkt nachweisen kann. Ausgangspunkt der Überlegung war die Tatsache, dass ja unsere Erde im Weltall nicht ruht, sondern mit einer Geschwindigkeit von 30km/Sekunde um die Sonne kreist. Nun wird man annehmen dürfen, dass der Äther im Kosmos ruht – die Vorstellung, unsere Erde “nimmt“ den Äther “mit“, wäre wohl doch zu abenteuerlich –, also bewegt sich die Erde mit der genannten Geschwindigkeit gegen den Äther. Dann kommt aber das bewährte Additionstheorem der Geschwindigkeiten ins Spiel: Ein in Flugrichtung der Erde von einer auf der Erde ruhenden Lichtquelle ausgesandter Lichtstrahl bewegt sich dann (vom Äther aus gesehen) mit erhöhter Geschwindigkeit, nämlich der Summe aus der Geschwindigkeit

der Erde und der Lichtgeschwindigkeit im ruhenden Äther. (Dieses Additionstheorem ist uns bestens vertraut. Wirft jemand in einem fahrenden Zug einen Ball in Fahrtrichtung, so fliegt er, vom Bahnsteig aus gesehen, deutlich schneller: Zu seiner Geschwindigkeit im Zug kommt noch die Geschwindigkeit des Zuges hinzu.)

Michelson hatte nun die geniale Idee, eine Apparatur zu entwickeln, mit der sich dieser Effekt tatsächlich nachweisen ließe. Das Beobachtungsinstrument war das Michelson-Interferometer, und das war um eine vertikale Achse drehbar aufzustellen. Sein Experiment, der berühmt gewordene Michelson-Versuch, sah nun so aus: Man beobachte die Interferenzstreifen im Ausgang des Interferometers, das so orientiert ist, dass einer der beiden Arme in Richtung der Erdbewegung zeigt, dann drehe man die Apparatur um 90 Grad und wiederhole die Messung. Wie er berechnete, muss beim Vergleich der beiden Streifenmuster eine geringe – aber noch messbare! – gegenseitige Verschiebung zu beobachten sein. Zu seiner großen Enttäuschung fand er keinen solchen Effekt. (Sich selber tröstend schrieb er im Rückblick, “ich fühlte mich für das negative Resultat des Versuches dadurch mehr als entschädigt, dass es zur Erfindung des Interferometers führte“.) Auch spätere Wiederholungen des Experiments durch andere Forscher unter verbesserten Bedingungen brachten kein anderes Ergebnis. Wie sollte man das bloß verstehen? Es war schließlich Albert Einstein, der zu dem radikalen Schluss gelangte: Es gibt überhaupt keinen Äther!

Das soll offenbar heißen, Lichtwellen breiten sich im Vakuum aus, sie benötigen keinen Träger. Da erhebt sich die Frage, was schwingt denn eigentlich in einer Lichtwelle? Beantwortet wurde

sie von James Clerk Maxwell. Er gelangte zu dem Schluss, das Licht sei von elektromagnetischer Natur. Sein Weg dahin hat etwas von einer guten Story. Wie zu erwarten, ging er von seinen berühmten Grundgleichungen des Elektromagnetismus, den Maxwellschen Gleichungen, aus. Dazu muss gesagt werden, dass er sie, ausgehend von Faradays Feldlinienkonzept, regelrecht "zusammengeschustert" hat. Niemand konnte je ehrlicherweise behaupten, er habe Maxwells Herleitung verstanden. Aber es kommt ja letztlich nur auf das Ergebnis an, und das ist einfach phantastisch. Seine Gleichungen bezauberten nicht nur durch ihre Schönheit (Ludwig Boltzmann zitierte bei ihrem Anblick Goethes Faust: "War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb?"), sondern sie beschreiben auch buchstäblich alle elektrischen und magnetischen Phänomene mit einer unglaublichen Genauigkeit. Ein wichtiger Punkt ist nun, dass in diesen Gleichungen eine Größe von der Bedeutung einer Geschwindigkeit auftaucht, die sich durch zwei Naturkonstanten ausdrückt. Und nun kam Maxwell ein wahrer Glücksfall zu Hilfe. Diese beiden Konstanten waren kurz zuvor tatsächlich in Göttingen im Labor gemessen worden, so dass er sie in seine Formel für die Geschwindigkeit einsetzen konnte. Zu seiner Überraschung ergab sich so ein Wert, der mit dem von Fizeau gemessenen Wert der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmte. Das konnte doch kein Zufall sein! Und so schrieb Maxwell, dass wir auf Grund dieser Übereinstimmung "schwerlich den Schluss vermeiden können, dass Licht in den transversalen Schwingungen desselben Mediums besteht, das die Ursache von elektrischen und magnetischen Phänomenen ist".

Licht ist also nichts anderes als Schwingungen elektrischer



und magnetischer Feldstärken, und die können im Vakuum eigenständig existieren. Dabei sind, wie die Maxwellschen Gleichungen im einzelnen zeigen, im Falle einer Lichtwelle die elektrische und die magnetische Feldstärke untrennbar miteinander verknüpft, so dass wir von elektromagnetischen Wellen sprechen. Einen unmittelbaren Beweis für die Existenz elektrischer Feldstärken in ausgesandter Strahlung kennen wir übrigens alle aus einem Sachverhalt, von dem wir täglich profitieren (allerdings, ohne uns Gedanken darüber zu machen). Es handelt sich um den Empfang von Radiowellen. Der geht ja so vor sich, dass in einer Antenne, also einem elektrischen Leiter, frei bewegliche Elektronen beschleunigt werden, wodurch ein hochfrequenter Wechselstrom entsteht. Und nach dem, was wir heute wissen, ist dazu nur die elektrische Feldstärke fähig.

## Sehen

Der Mensch – und nicht nur er! – ist ein “Augentier“. Was wären wir ohne das “Augenlicht“ ! Es liefert uns nicht nur ein unglaublich detailliertes Bild der Welt, sondern eröffnet uns auch eine einzigartige Möglichkeit der Teilnahme am kulturellen Leben. Ich denke an das alltägliche Schreiben und Lesen, das uns eine geistige Welt erschließt und unser Leben so bereichert. Vergessen wir dabei nicht die Liebesbriefe, die uns so viel bedeuten können! Man sollte dabei auch die Entwicklung und die Herstellung von Brillen nicht vergessen. Sie erst ermöglicht es ja Menschen mit “schlechten“ Augen, einerseits zu lesen und andererseits die Umwelt “scharf“ zu sehen. Der Sehvorgang hat es daher in hohem Maße verdient, etwas genauer “unter die Lupe genommen“ zu werden.

Grundlegende Prinzipien des Sehvorganges werden bereits in der guten alten Schwarz-Weiß-Photographie deutlich. Wir fragen uns, was spielt sich denn in einer photographischen Schicht ab, wenn Licht darauf fällt. Hier kommt die Photochemie zum Zuge. Der elementare Akt der Wechselwirkung mit dem Licht findet an einem Silberbromidkorn der Schicht statt. Er führt im Endeffekt zur Freisetzung eines Silberions. Damit ist aber noch nicht viel gewonnen, handelt es sich doch um ein mikroskopisches Ereignis. Wir können es daher erst wahrnehmen, wenn es uns gelingt, es zu einer makroskopischen Spur zu “verstärken“. Das leistet nun in der Tat ein chemischer Entwickler. Er bewirkt, dass sich das betroffene Korn zur Gänze in metallisches Silber verwandelt, das als ein kleiner schwarzer Fleck sichtbar

wird. Wir erhalten so insgesamt ein Negativ, das nur noch in ein Positiv umkopiert werden muss. Wie wir gesehen haben, sind also zwei Schritte zur Bilderzeugung erforderlich: anfangs ein mikroskopischer Elementarprozess, ausgelöst durch das Licht, und dann die Verwandlung des so erzielten Resultats in eine makroskopische Spur.

Genau das gleiche Schema finden wir nun auch beim Sehvorgang verwirklicht. Die Natur hat "herausgefunden", dass sich der organische Stoff Rhodopsin besonders gut zum Lichtnachweis eignet. Er ist ein Zersetzungsprodukt des Vitamins B2 und ist in die Außensegmente der Netzhautstäbchen eingelagert. Was macht nun das Licht mit dem Rhodopsin? Der Elementarprozess sieht so aus, dass – nach verschiedenen Zwischenschritten – ein Rhodopsin-Molekül aktiviert wird. Dieses setzt nun eine biochemische Kaskade in Gang, die zur Hydrolyse von ungefähr 1000 zyklischen Guanosin-Monophosphat (cGMP)-Molekülen führt. Damit nicht genug, wird der Prozess an die hundert Mal wiederholt, so dass insgesamt etwa 100 000 cGMP-Moleküle eine Hydrolyse erfahren. Damit sind wir wieder im Makroskopischen angelangt! Durch die genannte Hydrolyse sinkt die cGMP-Konzentration, was zur Folge hat, dass sich der Fluss von Natrium-Ionen in das Stäbchen verringert. Das wiederum führt zu einer elektrischen Anregung, die sich entlang des Sehnervs bis ins Gehirn fortpflanzt. Ganz schön kompliziert ist das alles! Doch es funktioniert ausgezeichnet, wie die tägliche Erfahrung lehrt.

Aber was ich versucht habe zu skizzieren, ist nur die halbe Story. Der entscheidende Schritt, nämlich die Umwandlung der elektrischen Signale in Bewusstseinsprozesse, kommt ja erst

noch! Wie das geschieht, ist völlig unbegreiflich. Für mich ist es eines der größten Wunder der Natur.

Das Erstaunen wird noch größer, wenn wir uns die aktive Rolle klarmachen, die das Gehirn bei der Erzeugung der optischen Eindrücke spielt. Es ist ja keineswegs so, dass das auf die Netzhaut projizierte Bild 1:1 in eine Empfindung "übersetzt" wird. Die Probleme beginnen bereits damit, dass die Projektion nicht wie bei der Photographie auf eine Ebene erfolgt, sondern auf eine gekrümmte Fläche, wie sie durch die Form des Augapfels gegeben ist. Infolgedessen sind im besonderen die Abbilder von Geraden Kreisbogenstücke, die "begradigt" werden müssen. Die schönen geraden Linien und die Ebenen, die wir direkt zu sehen glauben, sind nicht anderes als ein Produkt unseres Gehirns! Des weiteren haben wir es dank unserer Augenpaare mit zwei Netzhautbildern zu tun. Die werden nun nicht einfach vereinigt. Vielmehr werden die feinen Unterschiede, die zwischen ihnen bestehen, dazu benutzt, um auf die jeweilige Entfernung der beobachteten Objekte vom Auge zu schließen. Dadurch haben wir die Gabe, die Gegenstände räumlich zu sehen.

Für was für Überraschungen das Gehirn darüber hinaus noch gut ist, zeigt das Auftreten von Komplementärfarben in unserer Wahrnehmung. Fragen wir zunächst, was ist eine Komplementärfarbe? Man versteht unter der Komplementärfarbe zu einer gegebenen Farbe diejenige Farbe, die bei Mischung der beiden Weiß ergibt. Goethe hatte sich nun ein wunderschönes Experiment dazu einfallen lassen, das folgendermaßen ablief. Er malte auf ein weißes Blatt einen Mädchenkopf (was bei ihm sicherlich nicht verwundert), aber – das war der Clou – nicht

in den richtigen Farben, sondern in den Komplementärfarben. Das Bild sah daher scheußlich aus: grünes Gesicht, violette Haare! Und nun kam das eigentliche Experiment. Er legte sein "Kunstwerk" auf ein weißes Blatt, blickte eine Zeitlang konzentriert darauf, nahm es plötzlich weg und schaute aber weiterhin konzentriert auf das nun vorliegende weiße Blatt. Und nun geschah ein Wunder! Er sah wieder den Mädchenkopf, aber nun in den Komplementärfarben der Komplementärfarben, also in den richtigen Farben. Eine wahre Augenweide, zumal das Bild noch dadurch gewonnen hatte, dass es weiche Konturen aufwies! (Der Jenaer Physikprofessor Eberhard Buchwald, ein bekennender Goethe-Fan, ließ es sich nicht nehmen, uns Studenten dieses Experiment per Diaprojektion vorzuführen. Ich habe daher die bezaubernde Verwandlung mit eigenen Augen gesehen!) Offensichtlich ist aber die Erscheinung des Bildes in den Komplementärfarben eine glatte Illusion, sie ist nicht das Abbild eines "real existierenden" Gegenstandes, vielmehr ist sie ein reines Produkt unseres Gehirns, sprich unseres optischen Verarbeitungssystems. So werden wir von unserem Gehirn "hinters Licht geführt" !

Dabei ist es, schauen wir uns im Tierreich um, keineswegs ausgemacht, dass uns das Auge überhaupt eine beschauliche Betrachtung der Umwelt erlaubt, wie wir sie in Mußestunden so gern entspannt genießen. Ein Frosch beispielsweise sieht, wenn sich nichts regt (und er dabei still sitzt), überhaupt nichts! Sein Auge spricht nur auf Bewegungen an; es meldet zum Beispiel eine dunkle Kontur, die von rechts nach links über das Gesichtsfeld wandert. Mehr Informationen braucht er offenbar nicht, um zu überleben! Die Natur gönnt halt dem Frosch keinen

überflüssigen “Luxus“.

Unser Gehirn treibt einen phantastischen Aufwand, um der Datenflut “Herr zu werden“, die von den Netzhautzellen (neben den hell-dunkel-empfindlichen Stäbchen sind es die die Farbeindrücke erzeugenden Zäpfchen) geliefert wird. Tatsächlich findet der erste Schritt bereits in der Netzhaut statt. Durch Zusammenschaltung einzelner Netzhautzellen – es werden die Signale von bis zu 100 000 solcher Zellen zusammengefasst – erfolgt eine drastische Reduktion der Fülle des primären Datenmaterials. Dem Gehirn gelingt dann Erstaunliches. Es zeigt uns die Welt als ein strukturiertes Gebilde. Dass dies alles andere als selbstverständlich ist, lehren die Erfahrungen von Menschen, die von Geburt an blind waren und erst in späteren Jahren dank ärztlicher Kunst das Augenlicht erlangten. Man würde meinen, dass diese Menschen überglücklich sind, endlich die Dinge sehen zu können, die sie bisher nur ertasten konnten. Das genaue Gegenteil ist der Fall! Sie empfinden die optischen Eindrücke als eine chaotische Flut von Reizen, der sie sich hilflos ausgeliefert fühlen. Nur dank raffinierter Mechanismen der Datenverarbeitung, die sich offenbar schon in frühester Kindheit entwickeln, erscheint uns die Welt aus Gegenständen zusammengesetzt, die sich in ihrer Form, Größe, Farbe und Entfernung unterscheiden.

Wie Experimente an Katzen gezeigt haben, gibt es in der Entwicklung eine Art “Fenster“, während dessen Öffnung der Mechanismus zur Bilderzeugung ausgebildet werden kann. Wird diese Gelegenheit verpasst (etwa, indem man den jungen Katzen die Augen verbindet), dann bleibt dieses Fenster für immer geschlossen. Die Katzen lernen nie mehr sehen.

Eine ungemein nützliche Leistung des Verarbeitungsmecha-

nismus kommt in der sogenannten Bewegungskonstanz zum Ausdruck. Damit ist folgendes gemeint: Wir können ruhig den Kopf drehen (wobei naturgemäß das Netzhautbild wandert), wir sehen den betrachteten Gegenstand trotzdem weiter an der gleichen Stelle. Der moderne Mensch denkt dabei an einen leistungsstarken Computer, nur dass der sich auch noch selber programmiert!

Schließlich muss noch eine Besonderheit des Sehens gewürdigt werden, die uns so selbstverständlich erscheint, dass wir gar nicht darüber nachdenken. Es handelt sich um die Rolle, die das Interesse spielt. Wir konzentrieren uns ja normalerweise auf ganz bestimmte Ausschnitte der Umwelt, weil sie uns interessant oder wichtig erscheinen (zu diesem Zweck drehen wir die Augen so, dass das betreffende Objekt auf die Netzhautstelle größter Empfindlichkeit, die Netzhautgrube, abgebildet wird), den Rest, der ja auch zu sehen ist, nehmen wir gar nicht wahr. Ganz deutlich macht sich das auch beim Lesen bemerkbar. Der ABC-Schütze sieht ja nacheinander nur einen einzelnen Buchstaben, dank häufiger Übung lernt er, ganze Wörter oder gar Sätze "in den Blick zu nehmen". Die deutsche Sprache hat übrigens einen schönen Ausdruck für das betrachtete Phänomen gefunden. So kann man Sätze lesen wie "Er hatte nur Augen für sie".

Gerade der letzte Punkt macht deutlich, dass das Sehen kein Selbstzweck ist. Vielmehr dient es in erster Linie dazu, unsere Überlebenschancen zu erhöhen. Denken wir nur an den Straßenverkehr, wo eine Unachtsamkeit tödlich sein kann! Generell ist es natürlich von vitalem Interesse, eine mögliche Gefahr schon aus größerer Entfernung auszumachen. Von großer Wichtigkeit

ist auch die Schnelligkeit, mit der das Auge Bewegungen zu folgen vermag. Das Tischtennispiel zeigt das in besonders beeindruckender Weise. Allerdings können wir, was Reaktionsschnelligkeit angeht, den Fliegen nicht das Wasser reichen, wie wir immer wieder zu unserem Leidwesen erfahren müssen.



## Energie

Ohne Zufuhr von Energie spielt sich auf der Erde nichts ab. Das ist schon bei Pflanzen und Tieren so, und natürlich machen wir Menschen keine Ausnahme. Eine jede Muskelbewegung kostet Energie, und die meiste Energie verbraucht unser Gehirn. Wie jeder weiß, decken wir unseren Energiebedarf in erster Linie durch Essen (was überdies noch Vergnügen bereitet). Der größte Energiefresser ist jedoch die Technik. Spätestens wenn der Strom oder die Heizung ausfällt oder das Auto nicht mehr weiter fährt, wird uns bewusst, wie stark wir von Energiezulieferungen abhängig sind. Die Erschließung von neuen Energiequellen stand daher auch am Anfang des technischen Fortschritts, ja machte ihn überhaupt erst möglich.

Energie kommt in den unterschiedlichsten Formen vor. Sie ist nichts "Handgreifliches" wie Materie, wir können ihre Wirkung jedoch manchmal unmittelbar fühlen. Das geschieht, wenn wir von einem bewegten Gegenstand, etwa von einem fallenden Ast oder einem geworfenen Stein, getroffen werden. Das kann sogar zu ernsthaften Verletzungen führen, im schlimmsten Falle zum Tod. (Bei der althergebrachten Sitte der Steinigung ist die Tötung ja sogar das erklärte Ziel.) Die in Rede stehende Form der Energie ist offenbar die Bewegungsenergie (kinetische Energie) von Körpern. Sie ist erfahrungsgemäß um so größer, je schwerer und schneller der Körper ist. Eine genauere Untersuchung zeigt, dass sie mit dem Quadrat der Geschwindigkeit anwächst.

Lehrreich ist die Betrachtung der Schwingung eines Pen-

dels (eines an einem Faden aufgehängten Gewichts). Wir sehen unmittelbar, dass die Geschwindigkeit des Gewichts - und damit auch seine kinetische Energie - am größten ist, wenn es seinen tiefsten Punkt erreicht hat. Sie wird dann immer kleiner und verschwindet schließlich ganz, wenn das Gewicht an dem höchsten Punkt seiner Bahn (dem Umkehrpunkt der Bewegung) angekommen ist. Aber kann sich denn kinetische Energie so mir nichts dir nichts in Nichts auflösen? Doch sie ist ja gar nicht unwiederbringlich verloren, vielmehr taucht sie beim Rückschwung des Pendels wieder auf. Das hängt offenbar mit der ständig sich ändernden Höhe des Gewichts zusammen. Tatsächlich wissen wir ja schon vom freien Fall, dass die Geschwindigkeit eines Körpers mit der Fallhöhe anwächst. Genau das gleiche beobachten wir beim Pendel: Die Geschwindigkeit des Gewichts nimmt in dem Maße zu, wie es an Höhe verliert. Das legt es nahe, eine allein durch die Lage des Gewichts festgelegte - genauer gesagt, seiner Höhe proportionale - Energie, die sogenannte potentielle Energie, einzuführen. (Beim Bergsteigen erzeugen Sie mühsam eine große Menge davon, die Sie aber nur dann als kinetische Energie zurückgewinnen, wenn Sie sich vom Gipfel stürzen.) Im zeitlichen Verlauf der Pendelschwingung findet dann eine ständige Umwandlung von potentieller Energie in kinetische und umgekehrt statt. Tatsächlich gilt ein Erhaltungssatz: Die Summe der potentiellen und der kinetischen Energie bleibt konstant. Das erfreut im besonderen das Herz des Theoretikers, hat er doch eine Schwäche für allgemeine Gesetzmäßigkeiten.

An dieser Stelle sei mir eine kleine Abschweifung gegönnt. Die Pendelschwingung eignet sich nämlich hervorragend zu einer

Analogie politischer Entwicklungen, wie Professor Eberhard Buchwald in Jena bemerkte. Er brauchte (zu DDR-Zeiten!) nur zu sagen: “Das Pendel schlägt nach der einen Seite aus, dann schwingt es wieder zurück und schlägt nach der anderen Seite aus“, und jeder wusste, was gemeint war.

Doch kehren wir zum Thema Energie zurück! Am vertrautesten ist uns die elektrische Energie. Zwar kommt sie, wie man so schön sagt, aus der Steckdose, doch jemand muss sie ja vorher in das Leitungsnetz hineingesteckt haben. Tatsächlich wird sie mit Hilfe von Generatoren erzeugt, die jedoch von außen angetrieben werden müssen. Das geschieht in Kraftwerken, wobei die Primärenergie auf unterschiedliche Weise erzeugt werden kann: durch Verbrennung von Kohle, Gas oder Öl (inzwischen immer mehr verpönt wegen des Kohlendioxidausstoßes), durch Nutzung von Kernenergie (heutzutage verteufelt, jedenfalls in Deutschland), durch Nutzung von Wasserkraft, neuerdings auch der Energie von Sonne und Wind. Elektrische Energie hat den großen Vorteil, dass sie über große Strecken transportiert werden kann. Des weiteren kann sie leicht in mechanische Bewegung umgesetzt werden, wie es in Elektromotoren der Fall ist, die sich beispielsweise in Triebwagen von Bahn oder Straßenbahn, neuerdings auch in Autos, befinden. Man kann aber elektrische Energie auch wieder in Wärme zurückverwandeln, wie wir es von der elektrischen Heizung her kennen. Nicht zu vergessen die Lichterzeugung in elektrischen Glühlampen, die ja mittels Erhitzung eines Glühfadens erfolgt.

Für jede Energieumwandlung gilt ein Erhaltungssatz. Das legt die Vermutung nahe, dass es einen allgemeinen Erhaltungssatz gibt, der alle möglichen Energieformen umfasst. Tatsächlich

wurde ein derartiges fundamentales Naturgesetz schon im Jahre 1842 von dem Naturforscher Robert Mayer postuliert. Eine solche Beschaffenheit der Welt hat einerseits etwas Beruhigendes: Energie kann, global gesehen, nicht verloren gehen. Wenn sie an einer Stelle verschwindet, taucht sie woanders in anderer Form wieder auf. Andererseits wird uns halt auch nichts geschenkt. Wir müssen uns anstrengen und uns dabei immer wieder etwas Neues einfallen lassen, um den ständig wachsenden Energiehunger zu stillen. Es soll den Menschen halt nicht zu gut gehen! Das steht doch schon in der Bibel: “Im Schweiß deines Angesichts sollst du dein Brot essen (1. Mose 2.3).“ Bemerkenswert ist dabei, dass sich Adam und Eva diesen göttlichen Fluch dadurch zugezogen hatten, dass sie verbotenerweise ausgerechnet vom Baum der Erkenntnis naschten.

Man kann also Energie keinesfalls aus dem Nichts gewinnen. Humorvolle Physiker – glücklicherweise sind sie nicht selten – haben das so ausgedrückt: Aus Nichts wird nichts. Und es gibt im besonderen kein “perpetuum mobile“, d.h., kein System, das von alleine (ohne jegliche Energiezufuhr) immerzu weiterläuft.

Nun kennen wir aber ein unerschöpflich scheinendes Energie-reservoir, und das ist die Wärme, die in allen Körpern, nicht zuletzt im unsrigen, steckt. Wenn wir die Wärmemenge unbegrenzt nutzen könnten - etwa zum Betrieb von Wärmekraftmaschinen - , wären wir doch aus dem Schneider! Leider hat die Natur auch hier einen Riegel vorgeschoben. Wir können nämlich Wärmeenergie nur dann in eine praktikablere Energieform, am liebsten in mechanische Bewegungsenergie, umsetzen, wenn eine Temperatur*differenz* vorliegt. Es gilt ein fundamentales Naturgesetz: Es ist nicht möglich, mit einem System Arbeit zu leis-

ten, das nichts weiter tut, als einem Wärmereservoir Energie zu entziehen (und es so abzukühlen); salopp gesagt: Aus Etwas wird nicht immer was. Ein derartiges System wurde übrigens “perpetuum mobile zweiter Art“ getauft, nur um sagen zu können, dass es keines gibt.

Und wie funktioniert nun die gute alte Dampfmaschine? Entscheidend ist, dass wir eine höhere Temperatur erst erzeugen müssen, und das geschieht, indem wir Wasser – normalerweise durch Verfeuern von Kohle – in einem Druckkessel so stark erhitzen, dass Dampf entsteht. Der verschiebt dann einen Kolben und leistet so Arbeit. Im Endeffekt tun wir also nichts anderes, als fossile Energie in mechanische Bewegung umzusetzen.

Doch kehren wir noch einmal zur Energieerzeugung durch Verbrennung zurück! Hier kommt ja ganz entscheidend die Chemie ins Spiel. Sie lehrt uns, dass es zwei Arten von chemischen Reaktionen (also Stoffumwandlungen) gibt, nämlich endotherme, die nur dann ablaufen, wenn man Wärmeenergie zuführt, und exotherme, in deren Verlauf im Gegenteil Wärme freigesetzt wird. Das Musterbeispiel für letztere sind Verbrennungen, sprich Verbindungen eines Stoffes mit Sauerstoff. Im einfachsten Fall verbrennt man trockene Äste, die Kunst besteht nur darin, sie anzuzünden. Tatsächlich dürfte die “Zähmung“ des Feuers ein entscheidender Schritt auf dem Wege der Menschwerdung gewesen sein. Der Mensch besitzt kein Monopol auf die Herstellung und Verwendung von primitiven Werkzeugen, aber kein Tier ist jemals “auf die Idee gekommen“, das Feuer (wie es beispielsweise durch Blitzeinschlag entsteht) für seine Zwecke zu nutzen. Abgesehen davon, dass man sich am Lagerfeuer wärmen und mit einem brennenden Ast Licht erzeugen konnte,

sorgten das Kochen und Braten für eine bessere Verdaulichkeit der Nahrung und beförderten so die körperliche Entwicklung, insbesondere das Wachstum des Gehirns. Und heute? Bei allen Anstrengungen zur Gewinnung “erneuerbarer“ Energien (erzeugt durch windradgetriebene Generatoren oder Solarzellen) hängen wir doch immer noch am Tropf der althergebrachten Energien, die in Bodenschätzen wie Kohle, Öl und Erdgas konserviert sind.

Nun können Verbrennungsprozesse bekanntlich auch explosionsartig ablaufen. Das genau spielt sich ja im Automotor ab. Aber schon vor der Ära des Autos, des Flugzeugs und der Raketen erkannte man, seit der Erfindung des Schwarzpulvers, das großartige Potential von Explosivstoffen für die Kriegführung und nutzte es nach Kräften in Kanonen, Gewehren und später Bomben. Die Kriegführung wurde so revolutioniert, mit katastrophalen Folgen für die Menschen. Am Rande sei erwähnt, dass dabei auch spektakuläre chemische Fortschritte eine wichtige Rolle spielten. Ich denke an die Ammoniaksynthese von Haber und Bosch. Sie erlaubte es, Ammoniak als Ersatz für den bis dato zur Munitionsherstellung verwendeten Guano (entstanden aus dem Kot von Seevögeln) in großem Umfang industriell herzustellen, was der deutschen Heeresleitung im Jahre 1915 überhaupt erst die Weiterführung des Krieges ermöglichte.

Da die Sonne der Energielieferant Nummer Eins für das irdische Leben ist (auch unsere fossilen Energiequellen verdanken ja ihre Entstehung der Sonneneinstrahlung vor undenklichen Zeiten), kommen wir zu der Frage: Wie schafft es denn eigentlich die Sonne, über unermessliche Zeiträume hinweg nahezu unverändert zu strahlen? Wäre sie ein einmalig aufgeheizter glühen-

der Gasball, müsste sie doch längst erkaltet sein. Also, woher nimmt sie ihre Energie?

Um darauf eine Antwort zu finden, müssen wir einen Ausflug in die Kernphysik, also die Physik der Atomkerne, unternehmen. Dort hatte man Erstaunliches herausgefunden. Es gibt Kernreaktionen, d.h., Prozesse, bei denen Atomkerne eines chemischen Elements in die eines anderen Elements umgewandelt werden – ein Traum der Alchimisten wurde wahr –, wobei große Mengen an Energie freigesetzt werden. Das Tollste ist dabei, dass die Energie aus einem Massendefekt stammt. Das soll heißen, die neu entstandenen Atomkerne haben eine etwas kleinere Masse als die ursprünglichen. Ein Teil der Masse hat sich also “verflüchtigt“, und dabei ist Energie entstanden. Masse hat sich in Energie verwandelt! So unglaublich das klingt, ist es doch in Übereinstimmung mit einer theoretischen Vorhersage Einsteins, derzufolge eine generelle Äquivalenz zwischen Energie und Masse besteht. “Energie = Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit” lautet seine Zauberformel. (Meistens ist dies das einzige, was die Zeitgenossen mit dem Namen Einstein verbinden – ohne die Formel zu verstehen –, abgesehen von seiner herausgestreckten Zunge, wie sie auf nahezu jedem Photo zu sehen ist.) Aber Vorsicht! Die Formel bedeutet *nicht*, dass sich Masse vollständig in Energie umwandeln lässt. Nur bei den ganz seltenen Prozessen der Paarvernichtung, bei denen ein Teilchen auf sein Antiteilchen (etwa ein Elektron auf ein Positron) trifft, ist dies so. Vielmehr ist nur ein winziger Bruchteil der Masse dazu in der Lage, aber dank der Multiplikation mit dem Quadrat der riesengroßen Lichtgeschwindigkeit bringt das eine enorme Menge an Energie. Eben dies führt uns

die Sonne Tag für Tag im Wortsinn vor Augen.

Was spielt sich nun in der Sonne im einzelnen ab? Die Antwort lautet: Der Elementarakt ist ein Fusionsprozess. Wasserstoffionen vereinigen sich zu Heliumionen. Dazu sind hohe Temperaturen erforderlich, die Sonnentemperatur beträgt rund 6 Tausend Grad. Als die Theoretiker herausgefunden hatten, wie das "Sonnenfeuer" zustande kommt, fragten sie natürlich: Können wir das nicht auf der Erde nachmachen? Das Ergebnis ihrer Bemühungen war leider die Wasserstoffbombe mit ihrer nahezu unvorstellbaren Zerstörungskraft. Doch sie zu zünden gelang nur mit Hilfe einer bereits vorhandenen Superbombe, nämlich der Atombombe. Wünschenswert war und ist natürlich auch eine technische Beherrschung der Fusion. Sie soll nicht explosionsartig, sondern – nach dem Vorbild der Sonne – langsam und stetig ablaufen. Das erfordert aber einen enormen technischen Aufwand: Erstens muss ein hoch erhitztes Plasma erzeugt werden (die erforderliche Temperatur liegt bei etwas 100 Millionen Grad), und zweitens muss dafür gesorgt werden, dass dieses keinesfalls die Wand berührt. Trotz vollmundiger Ankündigungen, wie sie schon vor 30 Jahren gemacht wurden, und großer, sogar internationaler, Anstrengungen ist es bis heute nicht gelungen, das gesteckte Ziel zu erreichen.

Zum Schluss noch ein paar Worte über die Atombombe, die ja tatsächlich funktioniert, und unermessliches Leid über die Einwohner von Hiroshima und Nagasaki gebracht hat. Der zugrunde liegende physikalische Prozess ist das Gegenteil einer Fusion, nämlich die Kernspaltung: Wird ein Atomkern des Uranisotops mit der Kernladungszahl 235 von einem Neutron getroffen, so führt das zu seiner Spaltung in zwei etwa gleiche Teile, und



dabei wird wieder ein Bruchteil der Masse in Energie umgesetzt. Tatsächlich ist diese Spaltung ein unglaublicher Vorgang, den man vor dem unbezweifelbaren experimentellen Nachweis durch Hahn und Strassmann im Jahre 1938 schlicht für unmöglich hielt. Wie sollte es denn einem mickrigen Neutron gelingen, einen riesigen Kern "auseinanderzusprengen" ? Aber es handelte sich eben, wie man später erkannte, um gar keine Sprengung, der Prozess ähnelte vielmehr der Umwandlung eines Wassertropfens in zwei kleinere. Entscheidend für die Möglichkeit, eine Bombe zu bauen, ist nun, dass der Zerfall eines ersten Uranatoms (das dazu nötige Neutron findet sich schon in der umgebenden Luft, da brauchen wir uns gar nicht weiter darum zu kümmern) zu einer Kettenreaktion führt. Es entstehen nämlich bei der Spaltung zwei neue Neutronen, die dann selbst wieder eine Spaltung zweier anderer Urankerne auslösen können. Und so geht es immer weiter. (Ich erinnere mich an einen Vortrag von Professor Buchwald, der dieses Geschehen folgendermaßen verdeutlichte: Stellen Sie sich eine Kiste voller gespannter Mausefallen vor! Sobald eine zuschnappt, macht es klack, klack, klack, ... , bis alle Mausefallen zugeschnappt sind.)

Als größte technische Herausforderung beim Bau der Atom-bombe erwies sich die Gewinnung des Uranisotops 235 in "Reinkultur". Dieses Isotop kommt nämlich in natürlichem Uran nur zu einem geringen Prozentsatz vor und muss somit von Uranerz mühselig abgetrennt werden. Wie bekannt, gelang dies amerikanischen Forschern während des zweiten Weltkriegs als ersten. Wichtig ist, dass man eine Mindestmenge an Uran-235, die sogenannte kritische Masse, benötigt, um eine Explosion auszulösen. Der Grund ist leicht einzusehen: Die jeweils neu

erzeugten Neutronen dürfen nicht “sang und klanglos“ das Material verlassen, was bedeutet, dass sich ihnen genügend viele Urankerne “in den Weg stellen“ müssen. Hat man also eine Uranmenge von geringerer als der kritischen Masse, kommt es zu keiner Kettenreaktion, es passiert nichts. Um eine Explosion auszulösen, braucht man nichts weiter zu tun, als zwei Stücke Uran-235, die jeweils nur die halbe kritische Masse besitzen, zusammenzufügen.

Der Prozess der Uranspaltung lässt sich tatsächlich in geordnete Bahnen lenken und so (in einem Kernkraftwerk) zu einer kontinuierlichen Erzeugung von “sauberer“ Energie benutzen. Dazu kann man Natururan verwenden. In dieser Substanz werden aber langsame Neutronen für die Kettenreaktion benötigt. Es müssen daher die beim Spaltungsvorgang generell erzeugten schnellen Neutronen abgebremst werden. Das leisten spezielle Substanzen, die sogenannten Moderatoren. Von großer praktischer Bedeutung ist, dass man den Spaltungsvorgang im aktiven Material von außen steuern kann. Das geschieht mit Hilfe von Regelstäben, die, mehr oder weniger tief in den Reaktorkern eingeführt, Neutronen “wegschnappen“ und so die Kettenreaktion kontrolliert abbremsen. Im besonderen lässt sich der Reaktor auf diese Weise ganz abschalten.

Man wird zugeben müssen, dass die Erschließung der Kernenergie zu den Großtaten der physikalischen Forschung gehört. Leider war auch hier ein Missbrauch durch die Politiker nicht zu verhindern (der Geldgeber hat immer das Sagen), so dass man sich fragen muss, ob es sich dabei nicht eher um einen Fluch als um einen Segen handelt.

Doch kehren wir noch einmal zum Erhaltungssatz der Ener-

gie zurück! Tatsächlich gibt es noch zwei weitere fundamentale Erhaltungssätze, die von großer praktischer Bedeutung sind. Der erste ist der Erhaltungssatz für den Impuls, worunter man das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers oder Teilchens versteht. Er besagt, dass der Impuls eines Systems sich zeitlich nicht ändert (wenn man nicht von außen eingreift). Ein schönes Beispiel ist der Raketenantrieb. Der Impuls der mit Treibstoff gefüllten Rakete ist vor dem Start Null, und er bleibt nach dem Start so für das System Rakete + ausgestoßene Verbrennungsgase; deren Impuls ist nämlich mit umgekehrtem Vorzeichen gleich dem Impuls der fliegenden Rakete.

Der zweite Erhaltungssatz gilt für den Drehimpuls. Der ist bei einem starren Körper definiert als das Produkt aus dem Trägheitsmoment und der Winkelgeschwindigkeit. Wir wollen uns hier nicht in Einzelheiten verlieren, wichtig ist im Augenblick nur, dass das Trägheitsmoment von der Massenverteilung abhängt, und zwar ist es umso größer, je mehr Masse sich in größerem Abstand von der Drehachse befindet. (Betrachten wir als einfaches Beispiel zwei Räder mit gleicher Masse aber unterschiedlichem Radius, so hat das mit dem größeren Radius das größere Trägheitsmoment.) Die Drehimpulserhaltung kann man sehr schön beim Eiskunstlauf beobachten: Dreht der Sportler (es kann natürlich auch eine Sportlerin sein) zunächst mit ausgestreckten Armen eine Pirouette, so nimmt die Drehgeschwindigkeit deutlich zu, wenn er die Arme an den Körper anlegt. Er verkleinert dadurch sein Trägheitsmoment, demzufolge muss sich die Rotationsgeschwindigkeit vergrößern, um dem Drehimpulserhaltungssatz Genüge zu tun. Diese Demonstration kann man übrigens in etwas abgeänderter Form auch im Hörsaal vor-

führen. Man benutzt dazu einen Drehschemel und kann außerdem sein Trägheitsmoment noch dadurch vergrößern, das man Hanteln in die Hände nimmt.

Schließlich möchte ich noch betonen, dass alle physikalischen Erhaltungssätze nicht nur im Makroskopischen gelten, sondern in aller Strenge auch für mikroskopische Systeme wie Atome und generell für alle Elementarteilchen einschließlich des "Quasiteilchens" Photon. Beim Drehimpulserhaltungssatz spielt nun der Eigendrehimpuls der Teilchen, ihr Spin, eine wichtige Rolle. Die Gültigkeit der Erhaltungssätze auch im Einzelfalle erschien manchem zunächst nicht geheuer. Sogar Bohr zweifelte eine Zeitlang an der Gültigkeit des Energiesatzes im Falle eines (mikroskopischen) Einzelsystems. Er wollte sich statt dessen mit Energieerhaltung im statistischen Mittel zufrieden geben. Aber diese Auffassung ließ sich dann doch nicht aufrecht erhalten.

Der geniale Theoretiker Wolfgang Pauli dagegen wurde für seinen unerschütterlichen Glauben an die Gültigkeit der Erhaltungssätze auch im mikroskopischen Einzelfall reich belohnt. Im Jahre 1930 analysierte er Messdaten zum Beta-Zerfall. Dabei handelt es sich um einen radioaktiven Zerfall, bei dem ein Elektron ausgesandt wird. Letzteres entsteht im Atomkern erst durch Umwandlung eines Neutrons in ein Proton und ein Elektron. Aus der Gültigkeit des Energiesatzes zog er den Schluss, dass ein weiteres, bislang unbekanntes Teilchen einen Teil der freigewordenen Energie abtransportiert haben musste. Er wurde so zum Entdecker eines neuen Elementarteilchens, das von Fermi Neutrino (kleines Neutron) getauft wurde. Dieses Teilchen hat allerdings etwas Gespenstisches an sich. Seine Wechselwirkung mit Materie ist so wahnsinnig schwach, dass man nicht hoffen

konnte, es jemals nachzuweisen. Später stellte sich jedoch heraus, dass man den Experimentatoren zu wenig zugetraut hatte. Es dauerte allerdings 25 Jahre, bis der Nachweis tatsächlich gelang, und das war nur möglich, weil inzwischen Kernreaktoren zur Verfügung standen, die intensive Neutrinostrahlen lieferten.

## Temperatur

Die Frage “Was ist Temperatur? “ beantwortet ein Physiker so: Temperatur ist eine physikalische Größe aus der Thermodynamik, für die es die folgende Messvorschrift gibt: Bringe ein Thermometer in innigen Kontakt mit dem fraglichen Gegenstand und lies es nach einer Weile ab. (Wir lernen dieses Verfahren alle schon im Kindesalter kennen, wenn bei uns Fieber gemessen wird.) Die Thermometeranzeige kommt dabei dadurch zustande, dass sich eine geeignete Substanz (wir kennen sie meist als eine Quecksilbersäule in einer Kapillare, es kann aber beispielsweise auch ein Gas sein) bei Erwärmung ausdehnt und entsprechend bei Abkühlung zusammenzieht. Man braucht nur noch eine Skala, und die erhält man nach Celsius, indem man (willkürlich!) dem Gefrierpunkt des Wassers die Temperatur 0 Grad und seinem Siedepunkt die Temperatur 100 Grad zuordnet. Der Zwischenraum wird entsprechend in 100 gleiche Teile geteilt.

Diese Skala muss man aber, das zeigt schon die tägliche Erfahrung, sowohl nach oben wie nach unten extrapolieren, um der Vielzahl von auftretenden Temperaturen gerecht zu werden. Wir haben ja schon an kalten Wintertagen Temperaturen unter Null, also “Minusgrade“, und wir können bestimmte Substanzen erst bei weit über 100 Grad zum Schmelzen oder Verdampfen bringen.

Da wir die Erwärmung eines Stoffes grundsätzlich beliebig weit treiben können – denken wir an ein Gas, so werden die Gasmoleküle halt immer schneller (sie werden zwar schließlich

ionisiert und das Gas wird so in ein aus Ionen und Elektronen bestehendes Plasma umgewandelt, aber das macht ja nichts), können wir sagen, die Temperaturskala ist nach oben offen. Wenn wir, um das "Sonnenfeuer" nachzuahmen, einen Kernfusionsreaktor bauen wollen, muss das Plasma auf einige Millionen Grad aufgeheizt werden! Tatsächlich wurde dies auch kurzzeitig schon geschafft.

Doch wie sieht es bei tiefen Temperaturen aus? Wir erleben ja schon als Kind, was an kalten Wintertagen in der Natur passiert: Gewässer und Seen frieren zu, was offenbar bedeutet, dass die Wassermoleküle in ihrer Beweglichkeit stark eingeschränkt sind. Was kann dann also anderes passieren, als dass sich bei immer stärkerer Abkühlung schließlich nichts mehr rührt? Und damit ist dann doch wohl ein Endpunkt erreicht. Diese Erwartung wird durch die Theorie vollauf bestätigt. Sie erklärt nämlich, es gibt eine genau definierte tiefste Temperatur, einen absoluten Nullpunkt der Temperatur, und sie gibt auch gleich ihren genauen Wert an. Es sind  $-273,15$  Grad. Dabei dürfte es unmöglich sein, diesen Wert technisch tatsächlich zu erreichen, schon die Annäherung an ihn erfordert, das zeigt die Erfahrung, einen enormen technischen Aufwand.

Es stellte sich heraus, dass die Verflüssigung von Helium eine praktikable Methode für den Vorstoß in den Bereich tiefster Temperaturen ist. Der erste, dem dies gelang, war 1911 der Forscher H. Kammerlingh Onnes in Leiden. Doch die physikalische "Community" zeigte wenig Interesse. Forscher fragten sich: Lohnt sich denn ein solcher Aufwand? Was soll denn dabei herauskommen? Es ist doch klar, dass da alles einfriert. Doch sie sollten eine Sensation erleben!

Kammerlingh Onnes hatte nämlich die glückliche Idee, mit seinem flüssigen Helium ausgewählte Substanzen herunterzukühlen und deren elektrische Leitfähigkeit unter diesen extremen Bedingungen zu untersuchen. Was dabei im Falle von Quecksilber (das bei diesen Temperaturen fest ist) herauskam, war eine Riesenüberraschung. Während der elektrische Widerstand bei 0 Grad Celsius (im flüssigen Zustand) 172,7 Ohm betrug, fiel er bei 3 Grad über dem absoluten Nullpunkt unter den unglaublich kleinen Wert von 3 Millionstel Ohm. Kammerlingh Onnes hatte die Supraleitung entdeckt! Kein Wunder, dass er 1913 dafür den Nobelpreis erhielt.

Er fand im einzelnen heraus, dass bei bestimmten Stoffen eine kritische Temperatur existiert, bei der ein sprunghafter Übergang von normaler elektrischer Leitung zu Supraleitung erfolgt. Die Theorie dagegen benötigte Jahrzehnte, um diesen nichtklassischen Effekt zu erklären! (Übrigens ein schönes Beispiel für einen *makroskopischen* Quanteneffekt!) Das Phänomen der Supraleitung ist aber auch phantastisch. Da der elektrische Widerstand praktisch verschwindet, fließt ein in einer supraleitenden Spule einmal induzierter Strom jahrelang! Und man kann, um ein wichtiges Anwendungsgebiet zu nennen, Elektromagnete von ungeahnter Stärke bauen, die in Teilchenbeschleunigern vom Typ des CERN die elektrisch geladenen Teilchen auf Kreisbahnen zwingen.

Die Supraleitung ist übrigens ein schönes Beispiel dafür, was die Physikgeschichte so spannend macht: man findet öfters Dinge, nach denen man gar nicht gesucht hat. Das Paradebeispiel ist ja die Entdeckung der Röntgenstrahlung. Aber denken Sie auch an die zufällige Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung,



die den Urknall bezeugt!

## Der schwarze Strahler

Die Geschichte der Erforschung der Strahlung eines schwarzen Körpers verdient es, erzählt zu werden. Sie steckt voller guter Ideen und löste unerwartet eine physikalische Revolution aus: Mit der Entdeckung eines elementaren Wirkungsquantums bahnte Max Planck der Quantentheorie den Weg. Nicht zuletzt waren die Herstellung eines schwarzen Strahlers und die daran ausgeführten Messungen ein Meisterstück der Experimentierkunst.

Es begann damit, dass Physiker – vor allem solche, die sich mit der Entwicklung von Glühlampen beschäftigten – das Bedürfnis hatten, die Helligkeit (Lichtstärke) einer gegebenen Lichtquelle zu vermessen. Dazu bietet sich ein Vergleich mit einer “Standardlampe“ an. Eine solche wurde durch die “Hefner-Lampe“ realisiert, eine mit Isoamylacetat gespeiste Dochtlampe, die auf eine Flammenhöhe von genau 40 mm einzustellen war. Ein solches Artefakt ist natürlich nicht so recht befriedigend, und so machte man sich auf die Suche nach einer natürlichen Lichtquelle, die möglichst unabhängig von zufälligen Materialeigenschaften wie Reflexions- und Absorptionsvermögen sein sollte.

Da dachte man an einen (aufgeheizten) schwarzen Körper als eine von der Natur ausgezeichnete Strahlungsquelle. Hier stutzt man zunächst einmal: Wie soll das gehen? Ein schwarzer Körper ist doch so beschaffen, dass er alle auftreffende Strahlung vollständig absorbiert, und der soll auch noch ausstrahlen? Das tut er tatsächlich (das wusste früher jedes Kind, es brauchte nur in den Kochherd zu gucken und sah die glühenden Kohlen),

und es ist auch leicht einzusehen, weshalb. Würde er nämlich immer nur Energie absorbieren, müsste er sich ja wahnsinnig aufheizen, und das tut er natürlich nicht. Vielmehr wird sich ein Gleichgewicht zwischen Absorption und Emission einstellen, und da er maximal absorbiert, muss er auch maximal emittieren!

Das hört sich alles recht gut an. Aber wie realisiert man denn einen schwarzen Körper? Sucht man nach einem möglichst schwarzen Kohlenstück? Nein, sagte der spätere Nobelpreisträger Wilhelm Wien. Wir machen das ganz anders. Wir nehmen einfach einen geschlossenen Kasten, dessen Wände aus einem beliebigen Material bestehen können, und bohren ein kleines Loch hinein. Das ergibt in der Tat einen schwarzen Körper, denn ein von außen kommender Lichtstrahl, der auf das Loch trifft, gerät in eine "tödliche Falle". Bei seinem Auftreffen auf die Innenwand wird er teilweise absorbiert und teilweise reflektiert. Der reflektierte Teilstrahl trifft erneut die Wand (an einer anderen Stelle), wird dort wieder zum Teil absorbiert, und das geht immer so weiter, bis sich der Lichtstrahl schließlich "totgelaufen" hat. Das ist genau das, was ein schwarzer Körper tun soll! War der Wiensche Vorschlag nicht genial?

Andererseits hat sich im Innern des Kastens, dessen Wand sich auf einer bestimmten Temperatur befinden möge, ein Strahlungsfeld ausgebildet. Die Wandatome absorbieren ja nicht nur, sondern sie strahlen auch, und ein Teil der Strahlung wird die Chance nutzen und durch das Loch nach außen treten. Der Kasten sendet somit eine elektromagnetische Strahlung aus, die den Namen Hohlraumstrahlung bekam. Tatsächlich konnte ein derartiger Strahler mit großer Präzision hergestellt werden (vorteilhaft war eine zylindrische Form), und er erlaubte sehr genaue

Messungen an der emittierten Strahlung. Und die Theoretiker stellten zufrieden fest, dass die so erzeugte Strahlung universeller Natur ist (die zufälligen Werte des Absorptions- und Reflexionsvermögens der Wand spielen ja keine Rolle), woraus sie schlossen, dass ihre Eigenschaften nur von universellen Naturkonstanten abhängen konnten.

Die Theoretiker erkannten überdies sehr schnell, dass sich hier eine wundervolle Spielweise auftat, und sie sahen sich vor die Herausforderung gestellt, die Eigenschaften der Hohlraumstrahlung, insbesondere ihre Frequenzabhängigkeit, präzise vorherzusagen. Dabei konnte man sich auf die Strahlung im Inneren beschränken, also den Hohlraum "dicht machen". War erst einmal klar, "wie's da drinnen aussieht", konnte man daraus leicht auf die bei geöffnetem Loch austretende Strahlung schließen.

Zunächst konnte man einfache Gedankenspiele durchführen. Das nächstliegende Gedankenexperiment bestand darin, dass man zwei auf gleicher Temperatur befindliche Hohlräume durch ein kleines Röhrchen miteinander verband. So konnte Strahlungsenergie vom ersten Hohlraum in den zweiten und umgekehrt vom zweiten in den ersten strömen. Da kann man gleich sagen, dass der *Netto*energiefluss verschwinden muss. Andernfalls würde ja ständig Energie von einem Körper zu einem anderen Körper gleicher Temperatur (!) transportiert, was dazu führen müsste, dass sich zwischen den beiden Körpern – gewissermaßen von alleine – eine Temperaturdifferenz ausbildet. Das kann aber nicht sein. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die räumliche Energiedichte in beiden Hohlräumen exakt gleich sein muss, und da wir uns in das Röhrchen ein einstellbares Frequenzfilter eingesetzt denken können, gilt das für jede Frequenz

einzelnen. Außerdem können wir uns vorstellen, dass der zweite Hohlraum irgendeine verrückte Form hat, und wir können das Röhrchen verlängern, sodass es an einem beliebig ausgewählten Punkt im Innern des zweiten Hohlraums "sondiert". Des Weiteren kann das Röhrchen nach Belieben ausgerichtet werden. Das Ergebnis ist dann also: Die Energiedichte ist an allen Stellen des Hohlraums die gleiche, egal, wie er geformt ist, und das gilt für jede Frequenz. Außerdem ist die Strahlung im Hohlraum in allen Richtungen gleich. Das bedeutet aber, die Energiedichte kann nur eine *universelle* Funktion sein, die außer von der Frequenz nur noch von der Temperatur abhängen kann. Diese Funktion, die sogenannte Strahlungsformel, im Detail zu berechnen, erwies sich jedoch später als unmöglich, wenn man im Rahmen der klassischen Physik blieb.

Doch zunächst gab es weitere beeindruckende theoretische Fortschritte. Die Pionierarbeit leistete Ludwig Boltzmann. Er hatte die gute Idee, sich den Hohlraum als zylinderförmig vorzustellen, der – das war der Clou – auf der einen Seite durch einen *verschiebbaren* Kolben mit vollständig reflektierender Innenseite verschlossen ist. Dann kann man diesen Kolben ja in Gedanken verschieben und man kann sich überlegen, was passiert, wenn man die Wand des Hohlraums noch in Kontakt mit einem Wärmereservoir bringt, das dafür sorgt, dass ihre Temperatur konstant bleibt. Entscheidend ist dabei, dass man beim Hineindrücken des Kolbens Arbeit leisten muss, weil man gegen den Strahlungsdruck "ankämpfen" muss. Der Strahlungsdruck selbst ist eine bekannte Größe. (Schon Kepler hatte aus der Beobachtung, dass der Schweif von Kometen stets von der Sonne weg weist, auf seine Existenz geschlossen.) Was dabei

herauskam, war das Stefan-Boltzmannsche Gesetz, demzufolge die ausgestrahlte Gesamtenergie (also das Integral über alle Frequenzen) mit der vierten Potenz der Temperatur anwächst. Auf dieses Gesetz war Stefan schon vorher durch Messungen gestoßen, aber nun fand es seine theoretische Bestätigung.

Diese schöne Leistung wurde noch übertroffen durch eine theoretische Untersuchung von Wilhelm Wien. Er betrachtete ebenfalls einen zylindrischen Hohlraum mit einem verschiebbaren Kolben, doch diesmal sollten alle Wände (einschließlich der Innenseite des Kolbens) vollständig reflektierend sein. Dadurch wurde ein Energieaustausch zwischen der Strahlung und der Wand unterbunden. Anfangs sollte sich im Hohlraum ein Strahlungsfeld befinden, wie es sich bei Wechselwirkung mit einer normalen Wand bestimmter Temperatur ausbildet. Drückt man nun den Kolben mit einer bestimmten Geschwindigkeit in den Hohlraum hinein, so wird, wie schon beim Boltzmannschen Gedankenexperiment, Arbeit geleistet. Die entsprechende Energie kann aber nun nicht mehr von der Wand aufgenommen werden, sie muss dem Strahlungsfeld zugute kommen. Wien beachtete noch eine Feinheit, nämlich den Doppler-Effekt, der besagt, dass sich die Frequenz eines Lichtstrahls verschiebt, wenn er an einem *bewegten* Spiegel reflektiert wird, und zwar vergrößert sie sich, wenn sich der Spiegel auf den Lichtstrahl zu bewegt. Das Ergebnis der Kolbenbewegung wird sein, dass sich wieder ein Strahlungsfeld vom Typ der Hohlraumstrahlung ausbildet, nur wird die Temperatur etwas erhöht sein. Das bedeutet, die Strahlungsenergie wird nun etwas anders auf die einzelnen Frequenzen verteilt sein, und genau das leistet der Doppler-Effekt. Das Ergebnis der Wienschen Überlegungen war wirklich beein-

druckend, er konnte zeigen, dass die Strahlungsformel von der Form: dritte Potenz der Frequenz mal einer Funktion, die nur vom Verhältnis von Frequenz und Temperatur abhängt, sein muss. Leider ließ sich diese Funktion nicht genauer bestimmen. (Immerhin sprang dabei das Wiensche Verschiebungsgesetz heraus, demzufolge die Frequenz, bei der die maximale Ausstrahlung erfolgt, linear mit der Temperatur anwächst. ) Wien rettete sich nun dadurch, dass er für die gesuchte Funktion eine plausible Annahme machte, die durch die damals vorliegenden Messdaten vollauf gerechtfertigt schien. Das Ergebnis war die sogenannte Wiensche Strahlungsformel, und Max Planck glaubte damals, dafür sogar einen theoretischen Beweis gefunden zu haben. Somit schien alles in bester Ordnung zu sein.

Doch verschiedene Experimentatoren sorgten in den Jahren 1899 und 1900 für eine böse Überraschung. Sie hatten erstmals auch im infraroten Spektralbereich Messungen vorgenommen und dabei festgestellt, dass ihre Ergebnisse von der Wienschen Strahlungsformel deutlich abwichen, und das konnte man nicht als Messfehler abtun. Sie setzten dadurch Max Planck unter Zugzwang. Er musste eine verbesserte Strahlungsformel finden, die den neuen Ergebnissen Rechnung trug. Tatsächlich gelang es ihm mit großer Mühe, eine passende Formel "hinzuzaubern" (die später als Plancksches Strahlungsgesetz Furore machen sollte), aber um welchen Preis! Er machte nämlich "in einem Akt der Verzweiflung" die verrückte Annahme, dass die Atome der Hohlraumwand (die er als "Oszillatoren" idealisierte, die Strahlungsenergie aussenden und absorbieren können) Energie nur in wohldefinierten kleinsten Portionen aufnehmen und abgeben können, nicht aber in beliebig kleinen Mengen. (Es ist wie in

der Geldwirtschaft, man führt eine kleinste Münze ein.) Das war im Rahmen der klassischen Physik vollkommen unverständlich, und Planck bekannte später selbst: “Das war eine rein formale Annahme, und ich dachte mir nicht viel dabei, sondern nur eben das, dass ich unter allen Umständen, koste es was es wolle, ein positives Resultat herbeiführen musste.“ (Heutige Studenten sollten sich dieses Verhalten nicht unbedingt zum Vorbild nehmen.) So gesehen, wurden die Anfänge der Quantentheorie von exzellenten Experimentatoren geradezu erzwungen! Und was das Erstaunlichste ist, das Untersuchungsobjekt war ein *makroskopisches* System, das sich doch wohl an die Regeln der klassischen Physik zu halten hätte! Die genannten kleinen Energieportionen waren gegeben durch das Produkt der Frequenz  $\nu$  mit einer neuen Naturkonstante, die mit  $h$  bezeichnet wurde und später als Plancksches Wirkungsquantum eine ungeahnte Bedeutung erlangen sollte. Tatsächlich erwies sich der 14. Dezember 1900, an dem Planck seine Arbeit veröffentlichte, als die Geburtsstunde der Quantentheorie. Aber das war damals keinem bewusst, am wenigstens Planck selbst, der seine neue Konstante  $h$  als einen “Störenfried“ ansah und sich in der Folgezeit damit abmühte, sie wieder “aus der Welt zu schaffen“, was ihm aus gutem Grunde nicht gelang. Nie war wohl einer, dem eine großartige, ja wahrhaft epochale Entdeckung geglückt war, so unglücklich darüber wie Max Planck.



## Atome und ihre Ausstrahlung

Beginnen wir mit einem einfachen Gedankenexperiment! Wir stellen uns vor, wir hätten ein ganz feines Messer, mit dem wir einen festen Körper sauber durchtrennen können. Wir teilen nun damit beispielsweise ein Stück Eisen in zwei Teile, nehmen einen der Teile, teilen ihn erneut, und machen immer so weiter. Dann ist die Frage, können wir ein noch so kleines Stück Eisen immer noch einmal teilen, oder stoßen wir schließlich an eine natürliche Grenze, ein "unteilbares" Etwas? Tatsächlich behauptete der griechische Philosoph Demokrit schon vor etwa zweieinhalb Tausend Jahren, alle Stoffe setzten sich aus solchen kleinsten Bausteinen, Atome genannt, zusammen, und heutzutage zweifelt niemand mehr an deren Existenz. (Es ist allerdings noch gar nicht so lange her, dass der bedeutende österreichische Physiker und Philosoph Ernst Mach jedem, der von Atomen sprach, den Wind aus den Segeln zu nehmen pflegte, indem er ihn fragte "Ham'S schon eins gsehn? ")

Mit dem Konzept der Atome und ihrer Verbindungen, den Molekülen, stößt übrigens auch der in der Homöopathie so hoch geschätzte Prozess der ständigen Verdünnung einer gelösten Substanz an seine naturgegebenen Grenzen. Wenn man immer weiter verdünnt, kommt man schließlich zu einer Lösung, die nur noch ein einziges Molekül der Substanz enthält, und beim nächsten Schritt geht auch dieses noch verloren. Bei Verdünnungsgraden von D23 (das bedeutet ein Verhältnis von Eins zu einer Eins mit 23 Nullen) und höher können daher eventuelle Heilerfolge nur dem Placebo-Effekt geschuldet sein.

Die Aufgabe, die Existenz von Atomen zu verstehen, erwies sich jedoch als eine harte Nuss für die Theoretiker. Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts machte man sich zunächst an Hand von experimentellen Befunden ein Bild von ihrer räumlichen Struktur. Demnach enthalten sie einen schweren, positiv geladenen Kern, der von negativ geladenen leichten Teilchen, den Elektronen, umkreist wird. Im Vergleich zur räumlichen Ausdehnung des Atoms sind diese Bestandteile winzig, so dass das Atom hauptsächlich aus Vakuum, also aus Nichts, besteht. Zusammengehalten wird es durch die elektrostatische (Coulomb-) Wechselwirkung zwischen dem Kern und den Elektronen. Entgegengesetzte Ladungen ziehen sich ja an, ganz ähnlich, wie es Massen tun, so dass man glaubte, im Atom ein Planetensystem im Kleinen vor sich zu haben. (Aufgrund der extrem geringen Massen der beteiligten Teilchen spielt die Gravitationswechselwirkung hier keine Rolle.)

Die Elektronen hielten übrigens noch eine Überraschung bereit. Es gab später deutliche Hinweise darauf, dass das Elektron einen ganz bestimmten Drehimpuls (Spin) von der Größe  $1/2$  (in Einheiten von  $h/2\pi$  mit  $h$  als Planckschem Wirkungsquantum) besitzt. Dann hätte es sich aber, gedacht als eine kleine negativ geladene Kugel, viel zu schnell drehen müssen. Ein Punkt auf der Kugeloberfläche in Äquatornähe hätte sich nämlich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen müssen! Und das konnte doch wohl nicht sein, meinten jedenfalls die tonangebenden Theoretiker, insbesondere Wolfgang Pauli. (Der war allgemein als ein scharfsinniger Kritiker gefürchtet; sein vernichtendes Urteil lautete: "Das ist ja noch nicht einmal falsch! ") Infolgedessen bekamen zwei junge Physiker namens Goudsmit und Uhlenbeck, die

schon eine Arbeit geschrieben hatten, in der sie den Elektronenspin postulierten, Skrupel. Sie wollten ihre Arbeit zurückziehen, aber davon wurden sie von ihrem Chef Paul Ehrenfest mit folgenden weisen Worten abgehalten: "Sie sind jung genug, um auch einmal etwas Dummes sagen zu dürfen". Wer wünschte sich nicht einen solchen Chef! Jedenfalls erschien die Arbeit, und die beiden (damals) "jungen Leute" genießen seitdem den Ruhm, die Entdecker des Elektronenspins zu sein.

Chemische Elemente unterscheiden sich dann durch die Anzahl der positiven Elementarladungen in ihren Atomkernen, die sogenannte Ordnungszahl. (Eine positive Elementarladung sitzt auf einem Teilchen, das sehr viel schwerer ist als das Elektron und auf den Namen Proton getauft wurde. Sie ist das genaue Gegenstück zur negativen Ladung eines Elektrons.) Da das Atom nach außen elektrisch neutral ist, muss die Kernladungszahl mit der Gesamtzahl der Elektronen übereinstimmen. Ordnete man die chemischen Elemente nach der Ordnungszahl, so passte das Ergebnis in wunderbarer Weise zu dem von Mendelejew schon Jahrzehnte vorher anhand chemischer Ähnlichkeiten aufgestellten Periodischen System der Elemente.

Ungeachtet dieses großartigen Erfolgs krankte die Atomtheorie jedoch an einem gravierenden, aus Sicht der klassischen Physik unlösbaren Problem. Es ist nämlich generell so, dass ein auf einer Kreisbahn (allgemein auf einer gekrümmten Bahn) laufendes geladenes Teilchen, im besonderen also ein Elektron, elektromagnetische Strahlung aussendet. Das folgt zwingend aus der Theorie und wird uns zudem im Makroskopischen durch die Strahlung eines Synchrotrons, in dem stark beschleunigte Elektronen durch Magnete auf Kreisbahnen gezwungen werden,

direkt vor Augen geführt. Und dieses Verhalten der Elektronen führt nun im Atom zu einer Katastrophe. Betrachten wir als einfachsten Fall das Wasserstoffatom, das aus einem einzigen Proton und einem einzigen Elektron besteht, so strahlt das Elektron ständig Energie ab. Die notwendige Folge ist, dass es langsamer wird, immer engere Kreise zieht und schließlich in den Kern stürzt. Da eine solche atomare Selbstzerstörung in der Natur glücklicherweise nicht stattfindet, müssen wir ein eklatantes Versagen der klassischen Theorie konstatieren.

Nun war allerdings schon lange bekannt, dass Atome tatsächlich strahlen. Allerdings muss man ihnen vorher Energie zuführen (man muss sie “anregen“), was meist durch Erhitzen geschieht. Auffallend ist dabei, dass die Ausstrahlung strengen Regeln folgt: Ein Atom sendet Licht nur bei ganz bestimmten diskreten Frequenzen aus. Man sagt, es emittiert Spektrallinien. Das kann man sehr schön sehen, wenn man eine Prise Kochsalz in eine Gasflamme streut. Die wird dadurch strahlend gelb. (Verantwortlich dafür ist das Natrium.) Die ausgesandten Spektrallinien sind für das betreffende Element charakteristisch, so dass man aus deren Beobachtung auf die Anwesenheit des zugehörigen Elements schließen kann. (Oft genügt es schon, dass es in Spuren vorliegt.) Dieses Verfahren wird in der sogenannten Spektralanalyse mit großem Erfolg praktiziert.

Doch wie soll man sich das Auftreten solcher Spektrallinien erklären? Denkt man an den Energieerhaltungssatz, so liegt die Vermutung nahe, dass sich ein Atom in verschiedenen Energiezuständen befinden kann und dass die Ausstrahlung bei einer bestimmten Frequenz mit einem entsprechenden “Übergang“ von einem höheren “Energieniveau“ in ein tieferes Hand

in Hand geht. Es wird wohl auch einen Zustand tiefster Energie, den sogenannten Grundzustand, geben müssen, in dem das Atom zur Ruhe kommt und nicht mehr strahlt. Dieser Zustand ist dann also “stationär“, das bedeutet, das Atom verbleibt für immer in ihm (solange man es nicht stört). erinnert man sich dann an Plancks (allerdings fiktive!) Annahme, dass Strahlungsenergie nur in ganz bestimmten Portionen ausgesandt (wie auch absorbiert) werden kann, die durch das Produkt aus der Frequenz  $\nu$  und dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  gegeben sind, so gelangt man zu folgender Auffassung: Der atomare Niveauunterschied findet sich genau in der Energie des emittierten Energiepakets wieder. Das Rätsel der atomaren Ausstrahlung scheint damit in der Existenz diskreter atomarer Energiezustände zu liegen, die wiederum ausgezeichneten Elektronenbahnen entsprechen müssen, was nach der klassischen Theorie vollkommen unverständlich ist.

Also standen die Theoretiker vor der Herausforderung, eine Theorie zu entwickeln, die das Auftreten charakteristischer Energieniveaus vorhersagt und möglichst auch ihre Werte zu berechnen gestattet, ohne zusätzliche Annahmen hineinstecken zu müssen. (Die angelsächsischen Physiker sprechen von einer Rechnung, die von “first principles“ ausgeht.) Ich erinnere mich, in meiner Jugend ein populärwissenschaftliches Physikbuch gelesen zu haben, in dem das Problem sehr schön illustriert wurde: In einem Park mit Rasenflächen und Wegen dazwischen waren am Wegrand Schilder aufgestellt mit der Aufschrift “Elektronen ist das Betreten des Rasens verboten.“ Ja, wie kommen denn solche Verbote zustande?

Eine den Theoretiker vollkommen zufriedenstellende Lösung

des Problems gelang Erwin Schrödinger. Er hatte eine neue Wellengleichung aufgestellt, die später als Schrödinger-Gleichung Furore machte. Es handelte sich um eine (partielle) Differentialgleichung, in die das Plancksche Wirkungsquantum als entscheidender Parameter einging, und diese lieferte für das Wasserstoffatom tatsächlich die richtigen Energieniveaus. Ein wahrer Triumph der Theorie! Schrödinger ließ sich dabei von einer Erfahrung aus der Akustik inspirieren: Eine eingespannte Saite oder eine gehaltene Platte lässt sich ja auch nur bei ausgezeichneten Frequenzen zum Schwingen bringen. (Heisenberg bemerkte einmal, welches Glück es doch für die Theoretiker gewesen sei, dass in der Natur Wasserstoffatome tatsächlich vorkommen. Hätten sie sich gleich mit komplizierteren Atomen beschäftigen müssen, so wären sie wohl nie auf die Quantentheorie gekommen.)

Und wie steht es nun mit den schwereren chemischen Elementen? Man erwartet zu Recht, dass das beim Wasserstoff erkannte Grundprinzip auch für sie gilt, nämlich die Existenz diskreter stationärer Zustände für die einzelnen Elektronen (ausgezeichnete "Elektronenbahnen"), zwischen denen die Elektronen hin- und herspringen können und dabei Spektrallinien entweder emittieren oder absorbieren. Nun unterscheiden sich die schwereren Atome vom Wasserstoffatom dadurch, dass die Zahl der Protonen im Kern, durch Neutronen wie durch einen Kitt zusammengehalten, größer als Eins ist. Entsprechend gibt es, um die elektrische Neutralität des Atoms sicherzustellen, ebenso viele Elektronen, die im Raum "herumschwirren". Da taucht nun eine neue Frage auf: Wie verteilen sich denn die Elektronen auf die einzelnen zur Verfügung stehenden Energieniveaus? Da

kam Wolfgang Pauli zu der verblüffenden Einsicht, dass sich die Elektronen nicht vertragen, soll heißen, ein jedes Niveau kann höchstens mit zwei Elektronen (die sich aber durch die Orientierung ihres Eigendrehimpulses, des Spins, unterscheiden) besetzt sein. Dieses nach Pauli benannte Ausschließungsprinzip (dessen Entdeckung ihm den Nobelpreis einbrachte) ist nun tatsächlich von fundamentaler Bedeutung für das Verständnis der chemischen Eigenschaften der Elemente. Es lässt sich, wie eben getan, ganz einfach formulieren; es ist von der Art eines biblischen Gebots, gerichtet an das Elektron: "Du sollst deine Wohnung nicht mit mehr als einem Partner teilen! " Aber es ist klassisch wie quantenmechanisch unverständlich, gilt jedoch in aller Strenge. Es bleibt uns daher nichts weiter übrig, als es als ein Naturgesetz zu akzeptieren.

Betont sei noch einmal, dass erst die Gesetze der Quantentheorie die Existenz stabiler Atome, und damit der Welt, wie wir sie kennen, ermöglichen. Ohne Atome keine Moleküle, keine Photosynthese, keine Pflanzen, keine Tiere und selbstverständlich keine "Krone der Schöpfung" !

Die Schrödinger-Gleichung erwies sich weiterhin als ein Schlüssel, der ganz allgemein einen Zugang zur mikroskopischen Welt eröffnete. Doch man musste für die großartigen Erkenntnisse auf diesem Gebiet einen hohen Preis zahlen. Auf der Strecke geblieben war nämlich die Anschaulichkeit, die man von der klassischen Physik her gewohnt war. (Interessanterweise gibt es in der englischen Sprache gar kein Äquivalent dafür!) Der Physiker Paul Ehrenfest brachte seine Skepsis auf eine originelle Weise zum Ausdruck, er brachte nämlich seinem Ceylon-Papagei den Satz "Aber meine Herr, das ist keine Physik! " bei, und

diesen Papagei schlug er dann als Vorsitzenden bei den Göttinger Diskussionen zur neuen Quantentheorie vor. Und Niels Bohr, einer der Väter der Quantentheorie, sagte: “Wem bei den Aussagen der Quantentheorie nicht schwindlig wird, der hat sie nicht verstanden.“ Fragen der Art, wie macht es denn das Elektron, dass es plötzlich von einem Niveau in ein anderes springt, ließen sich nicht beantworten und wurden daher als “unphysikalisch“ abgetan. Es triumphierte von nun an der Formalismus, der immer mehr perfektioniert wurde. Es ist kein Zufall, dass eines der grundlegenden Werke zur Quantentheorie von einem herausragenden Mathematiker, nämlich von Johann von Neumann (später nannte er sich John) geschrieben wurde. Und die Theoretiker hatten zu tun, um einen für sie völlig neuen Zweig der Mathematik zu lernen. Neuerdings spielte sich die Physik in einem abstrakten Raum, dem sogenannten Hilbert-Raum, ab! Doch was auch immer man an Neuem vorhersagte, es zeigte sich, die Quantentheorie hat immer Recht.

Doch kehren wir noch einmal zu den Spektrallinien der Atome zurück. Sie sind ja nicht nur bei der Emission zu beobachten, sondern auch bei der Absorption. Und gerade diese Art der Spektralanalyse bekam auch eine ungeahnte Bedeutung für die Astronomie. Es war Joseph von Fraunhofer, der sich so große Verdienste um die Entwicklung optischer Präzisionsinstrumente erworben hat, der diskrete dunkle Linien im Spektrum der Sonnenstrahlung entdeckte und sie richtig als Folge der Absorption interpretierte, die das Sonnenlicht beim Durchtritt durch eine kühlere Gashülle um die Sonne herum erfährt. Tatsächlich können mit irdischen Teleskopen auch Spektrallinien beobachtet werden, die von weit entfernten Sternen stammen. (Was für ein



Glück, dass sie eine kalte Hülle besitzen!) Alle diese Linien lassen sich bekannten irdischen chemischen Elementen zuordnen, womit die Aristotelische Behauptung, dass alle Himmelskörper aus einem ganz besonderen, einem "ätherischen" Stoff bestehen, endgültig widerlegt ist.

Die astronomische Spektralanalyse sorgte aber noch für eine ganz andere Überraschung. Es zeigte sich nämlich, dass die Spektrallinien, die von Sternen in weit entfernten Galaxien stammen, im Vergleich zu den irdischen systematisch verschoben waren, und zwar zu tieferen Frequenzen hin. Die Pionierarbeit auf diesem Gebiet leistete der Astronom Edwin Hubble, beginnend mit dem Jahre 1929. Man spricht von einer Rotverschiebung der Spektrallinien. Steckte da möglicherweise der Doppler-Effekt dahinter, der ja gerade besagt, dass einem ruhenden Beobachter die Frequenz zu kleineren Werten hin verschoben erscheint, wenn sich die Quelle von ihm weg bewegt? (Bewegt sich die Quelle dagegen auf ihn zu, wird die Frequenz vergrößert.) Am Rande sei bemerkt, dass Christian Doppler seinen Effekt auf eine originelle Weise demonstriert hatte. Er ließ nämlich eine auf einem offenen Eisenbahnwagen sitzende Musikkapelle an Zuschauern vorbei fahren, und die bekamen den Eindruck, dass die Instrumente verstimmt waren. (Heutzutage haben wir es einfacher. Wenn ein Polizeifahrzeug mit eingeschalteter Sirene an uns vorbei fährt, springt die Tonhöhe abrupt von einem höheren auf einen tieferen Wert.)

Der Doppler-Effekt gilt aber nicht nur für Schallwellen, sondern für jede Art von Wellen, insbesondere also auch für Lichtwellen. Wenn man ihn nun für die Rotverschiebung der Spektrallinien verantwortlich machte, so hatte das eine fantastische

Konsequenz: Die entfernten Galaxien müssen sich sämtlich von uns weg bewegen, und zwar umso schneller, je weiter entfernt sie sind. Das Weltall dehnt sich aus! Das Konzept eines statischen Universums, das man bislang für selbstverständlich gehalten hatte, war Makulatur! Im besonderen war Newton dieser Auffassung gewesen, allerdings musste er den Kosmos als unendlich ausgedehnt voraussetzen (was theoretisch keine Schwierigkeiten macht), da sonst die Objekte am Rand durch die Schwerkraft nach innen gezogen worden wären, und dieser Prozess wäre immer weiter gegangen, bis sich schließlich alle Materie zu einem riesigen Klumpen zusammengeballt hätte. Auch Einstein glaubte anfangs an ein ewiges und statisches Universum. Allerdings publizierte 1922 ein damals vollkommen unbekannter russischer Mathematiker namens Alexander Friedmann eine exakte Lösung der Einsteinschen Gleichung, die ein expandierendes Universum beschreibt. Wie in solchen Fällen üblich, erklärte Einstein erst einmal, Friedmann habe sich verrechnet. Diesen Vorwurf musste er allerdings zurücknehmen, aber er blieb bei seiner alten Überzeugung. Tatsächlich gab es ja zu dieser Zeit noch keinerlei experimentellen Hinweise auf ein nichtstationäres Universum.

Aber, um mit Newton zu sprechen, es gibt kein Argument gegen Fakten, und so wurde das neue Bild eines expandierenden Universums schließlich Allgemeingut. Nun stand man jedoch vor völlig neuen Fragen: Was treibt die Galaxien immer weiter auseinander, wo sie sich doch dank der Schwerkraft anziehen? Und noch verrückter, wenn sie wie die Splitter eines Schrapnells auseinander fliegen, dann muss es doch in der Vergangenheit einen Zeitpunkt gegeben haben, in dem sie einander ganz nahe waren. Kurzum, die Frage nach dem Ursprung des Kosmos, die

man bisher durch die Annahme eines ewigen Universums elegant umgangen hatte, wurde nun akut. Letztlich wurde sie durch die Urknalltheorie beantwortet, aber dazu bedurfte es einer weiteren Entdeckung, nämlich des Auffindens der Kosmischen Hintergrundstrahlung. Mit ihr werden wir uns später noch eingehender beschäftigen.

## Photonen

Doch kehren wir von den himmlischen Gefilden zu den Atomen zurück, mit denen wir es auf Erden zu tun haben! Nach dem oben Gesagten strahlt ein Atom Licht, also elektromagnetische Energie, in Form von "Paketen" der Größe  $h\nu$  aus, die von Einstein zunächst als Lichtquanten bezeichnet und später Photonen genannt wurden. Bei der Emission soll es sich um einen momentanen Akt, einen sogenannten Quantensprung handeln. Ein solcher Prozess ist tatsächlich ein alltägliches Ereignis, in einer gewöhnlichen Glühlampe beispielsweise findet er abermillionenmal in der Sekunde statt.

Wie lassen sich nun atomare Quantensprünge tatsächlich beobachten? Das gelingt in einem recht einfachen Experiment, das unter dem Namen Beam-foil-Spektroskopie bekannt ist. Man beginnt damit, dass man einen Atomstrahl durch eine geeignete Folie schießt. Dadurch werden die Atome angeregt, fliegen aber ansonsten weiter. Längs ihres Weges sind Detektoren aufgestellt, mit denen sich einzelne Photonen nachweisen lassen. Was man dann beobachtet, ist, dass mal der eine und mal der andere Detektor anspricht, und da ein weiter entfernter Detektor erst später von den Atomen überstrichen wird, besagt das, die Atome strahlen zu unterschiedlichen Zeiten ein Photon aus. Hier stoßen wir gleich auf eine grundsätzliche Frage: Wie kommt es, dass das eine Atom früher emittiert und das andere später, obwohl sie doch in gleicher Weise vorbehandelt ("präpariert") wurden? Hat das Elektron, das den Sprung ausführt, vielleicht eine Art von primitivem "freien Willen" ? Das ist natürlich Unsinn.

Oder steckt im Inneren des Atoms so etwas wie ein Mini-Wecker, der von Fall zu Fall unterschiedlich eingestellt wurde? Diese Frage läuft darauf hinaus, ob es “verborgene Parameter“ gibt, die das Geschehen im einzelnen genau vorherbestimmen. Eine solche Theorie ließ sich aber nicht aufrecht erhalten, sie war mit der Quantentheorie nicht vereinbar, und man konnte sie in konkreten Fällen sogar experimentell widerlegen.

Wenn nun aber ein Atom “macht, was es will“, so bedeutet das doch, dass das Kausalitätsprinzip verletzt ist! Dabei galt der Satz “Nichts geschieht ohne Ursache“ doch seit jeher als eine “eherne“ Wahrheit nicht nur in den Naturwissenschaften, sondern auch in der Philosophie. Es gab sogar Philosophen, die einen Gottesbeweis darauf gründeten, indem sie argumentierten: Wenn man die Kausalketten, die wir ja ständig wahrnehmen, zurück verfolgt, so muss es doch einen Anfang gegeben haben, eine erste Ursache, und die kann nur Gott sein. Und dieses fundamentale Gesetz soll nun in der mikroskopischen Welt nicht mehr gelten? Aber wir können halt der Natur nicht vorschreiben, wie sie sich zu verhalten hat. Mit Hegels Ausspruch anlässlich der tatsächlichen Beobachtung des bis dahin nur vorhergesagten neuen Planeten Neptun: “Umso schlimmer für die Tatsachen!“ können wir uns nicht aus der Affäre ziehen. Es bleibt dabei, im Mikrokosmos hat das Kausalitätsgesetz seine strenge Gültigkeit verloren. Vielmehr herrscht – jedenfalls in bestimmten Bereichen – der absolute Zufall!

Ein weiteres einfaches Experiment zeigt nun, dass ein Photon eine energetische Einheit darstellt, es lässt sich nämlich nicht zerteilen. (Das erinnert stark an das Verhalten der Atome!) Wir bringen einen aus der Optik wohlbekannten Strahlteiler (einen

halbdurchlässigen Spiegel) ins Spiel. Durch ihn schicken wir einen Lichtstrahl, der von einer gewöhnlichen Lichtquelle stammt. Wir haben ihn aber vorher (mit Hilfe eines Absorbers) so stark abgeschwächt, dass er sich aus einzelnen, räumlich von einander getrennten Photonen zusammensetzt. Der Strahlteiler lässt sich nun von der extrem geringen Intensität nicht beeindrucken. Er tut das, was er immer tut, er zerlegt den ankommenden Strahl in zwei Teilstrahlen, einen reflektierten und einen durchgehenden. Wir lassen nun die beiden Teilstrahlen auf je einen separaten Detektor fallen. Jetzt ist die spannende Frage, ob der Strahlteiler auch die einzelnen Photonen halbiert hat. Doch das ist ihm nicht gelungen. Es spricht nämlich mal der eine Detektor an und mal der andere, womit er anzeigt, dass er ein ganzes Photon absorbiert hat. Und hierbei hat anscheinend der Zufall wieder seine Hand im Spiele. Wir können keinen Grund finden, warum sich ein Photon im konkreten Fall gerade für den einen Detektor "entscheidet".

Erstaunlicherweise erschien das Walten eines absoluten Zufalls in der mikroskopischen Welt Einstein, der selbst so viel zur Entwicklung der Quantentheorie beigetragen hatte, inakzeptabel. Er, der in seiner Jugend so vehement wie erfolgreich gegen Vorurteile angekämpft hatte ("es gibt keinen Äther"), konnte sich von dem Vorurteil nicht befreien, dass in der Natur alles gesetzmäßig abläuft. "Der Alte würfelt nicht" war sein Credo, von dem er sich nicht abbringen ließ. Und er zog, ähnlich wie Schrödinger, daraus die Konsequenz. Er hängte, wie man so schön sagt, die Quantentheorie an den Nagel und brach außerdem alle Kontakte zu ihren Verfechtern ab.

Es hat sich herausgestellt, dass wir die geschilderte Wirkung

eines Strahlteilers sogar für einen praktischen Zweck nutzen können. Ordnen wir nämlich dem Ansprechen des einen Detektors eine Eins und dem des anderen eine Null zu, so erhalten wir durch Registrierung der Beobachtungsergebnisse zum ersten Mal echte Zufallszahlen (in digitaler Darstellung). Das ist wirklich bemerkenswert, weil die üblichen mathematischen Verfahren zur Erzeugung von Zufallszahlen notgedrungen auf irgendwelchen Algorithmen beruhen, sodass man nie sicher sein kann, dass sich in den Resultaten nicht doch eine Systematik verbirgt.

Es ist vielleicht nicht überflüssig darauf hinzuweisen, dass es in der klassischen Mechanik keinen absoluten Zufall gibt, alle Vorgänge unterliegen ja einem strengen Determinismus. Zufall ist mit Unkenntnis gleichzusetzen. Betrachten wir als ein einfaches Beispiel das Würfeln. Das Ergebnis empfinden wir als ausgesprochen zufällig (vorausgesetzt, der Würfel ist nicht "gezinkt"). Doch der Physiker ist überzeugt, er könne das Ergebnis voraussagen, wenn ihm nur alle benötigten Informationen (etwa über den Impuls, der dem Würfel anfangs erteilt wurde, über dessen anfängliche räumliche Orientierung, über die Lage der Tischplatte u.s.w.) zur Verfügung ständen. Nur die fehlende Kenntnis dieser Daten zwingt ihn dazu, sich mit der Aussage, alle Zahlen von Eins bis Sechs werden mit der gleichen Wahrscheinlichkeit 1:6 gewürfelt, zufrieden zu geben.

Das Photon bleibt also als energetische Einheit unversehrt. Wir können sagen, es besitzt Teilchencharakter. Bei genauerer Überlegung erscheint uns das als ein Glücksfall. Würde man nämlich halbe Photonen – oder allgemeiner irgendwelche Bruchstücke von Photonen – erzeugen können, so würde das zu einer

totalen Katastrophe führen! Solche Bruchstücke könnten nämlich nicht mehr mit normaler Materie in Wechselwirkung treten. Das bedeutet, sie wären praktisch verloren, sie hätten sich in eine Art Unterwelt begeben, die sie nicht mehr verlassen könnten. Damit verschwände aber auch ihre Energie auf Nimmerwiedersehen, was uns angesichts unseres ständig steigenden Energiehunger hart treffen würde.

Es ist nicht uninteressant darauf hinzuweisen, dass die klassische Elektrodynamik keine Mindestgröße der Energiedichte kennt. Vielmehr lässt sich ihr zufolge ein Lichtbündel – denken wir beispielsweise an einen Scheinwerferstrahl, den wir ins Weltall schicken und der sich auf Grund der unvermeidlichen Beugung immer weiter verbreitert – *beliebig* “verdünnen“. Bei fortschreitender Ausbreitung wird die Energiedichte des Strahls immer kleiner und kleiner, sie erreicht aber nie den Wert Null. Es zeugt von Einsteins Scharfsinn, dass er sich darüber wunderte. Denn ein Teilchenstrahl (beispielsweise ein Elektronenstrahl) verhält sich unter ähnlichen Bedingungen ganz anders: Bei immer weiterem Fortschreiten des Strahls wird es so weit kommen, dass sich in einem herausgegriffenen Volumenelement ab und zu gerade noch ein einziges Elektron vorfindet, in den meisten Fällen aber gar keines mehr! Dieser fundamentale Unterschied zwischen (klassischen) Teilchen und Wellen wird dann durch die Photonenkonzeption aufgehoben, und das war Einsteins großes Verdienst.

Es scheint also folgendes experimentell erhärtet: Das Photon benimmt sich, jedenfalls in energetischer Hinsicht, wie ein Teilchen, das sich nicht weiter teilen lässt. Sein Verhalten verletzt das Kausalitätsprinzip und wird stattdessen vom absoluten



Zufall regiert. Hinzu kommen noch folgende Eigenschaften: Es kennt keine andere Geschwindigkeit als die Lichtgeschwindigkeit (weshalb es keine Ruhmasse haben kann), und es besitzt einen mechanischen Impuls. Letzterer bewirkt einen Druck, der nichts anderes ist als der in der Optik bekannte Strahlungsdruck. Nur kann er jetzt ähnlich wie in der Gastheorie gedeutet werden: Ein auf eine Wand treffendes und dort reflektiertes Photon überträgt, da sich sein eigener Impuls dabei umkehrt, das Doppelte seines Impulses auf die Wand.

In diesem Photonenbild hat man sich dann einen Lichtstrahl als eine Art Hagelschauer vorzustellen, der gegebenenfalls auf eine Wand "prasselt". Unter geeigneten Umständen geschieht dabei etwas, was als photoelektrischer Effekt bekannt ist. Es schlagen nämlich einzelne Photonen Elektronen aus dem Material heraus (sie führen den Elektronen so viel Energie zu, dass sie ihren Atomverband verlassen können). Das Erstaunliche ist dabei, dass die ersten Elektronen unmittelbar nach Einsetzen der Bestrahlung zu beobachten sind. Das kann man nur so verstehen, dass die Atome jeweils schlagartig die gesamte Energie eines Photons aufnehmen. Sie sammeln die Energie nicht über einen gewissen Zeitraum auf, wie es die klassische Theorie erfordert, sondern nehmen sie in einem momentanen Akt auf. Tatsächlich wurde diese Erklärung des photoelektrischen Effektes von Einstein gegeben, der damit zum Entdecker des Photons wurde. Wie früher schon Max Planck, fand er zunächst keinen Anklang. Planck selbst hielt diese frühe Einsteinsche Arbeit für eine "verzeihliche Jugendsünde". Das hinderte allerdings später das Nobelpreiskomitee nicht daran, Einstein dafür den Nobelpreis zu verleihen.

Bemerkenswerterweise basiert auch die Wirkungsweise eines Photodetektors auf dem photoelektrischen Effekt. Der Primärprozess ist nämlich die Freisetzung eines (einzigen) Elektrons durch ein Photon. Dieses mikroskopische Ereignis muss nun verstärkt werden, damit wir ein messbares Signal erhalten. (Es handelt sich um immer das gleiche Messprinzip, wie wir es schon von der Photographie und vom Sehen her kennen.) Die Verstärkung geschieht in der Weise, dass man das Elektron zum "Ahnherrn" einer ganzen Lawine von Elektronen macht. Es wird nämlich durch eine angelegte Spannung beschleunigt, wodurch es an Energie gewinnt, und danach lässt man es auf eine metallische Oberfläche treffen, aus der es mehrere Elektronen, die sogenannten Sekundärelektronen, herausschlägt. Dieser Prozess wird nun mehrmals wiederholt, es werden so Millionen von Elektronen freigesetzt, die schließlich in einem Stromkreis einen elektrischen Impuls ergeben, und der ist das Messsignal.

So weit, so gut. Nun wird aber dem Photon auch eine ganz andere Eigenschaft, nämlich eine bestimmte Frequenz zugeschrieben. Die ist allerdings ein Charakteristikum einer Welle. Wir können sie in der Tat auch direkt messen. Dazu brauchen wir nur auf das bekannte Arsenal der optischen Instrumente zurückzugreifen. Für eine Frequenzmessung stehen Spektrometer zur Verfügung, in denen das Licht entweder mit einem Prisma oder einem Beugungsgitter in seine spektralen Bestandteile zerlegt wird. Dieses Verfahren funktioniert auch bei dem früher schon betrachteten stark geschwächten Licht. Fällt schließlich nur ein einziges Photon auf das Spektrometer, so gelangt es in den Ausgang, der einer bestimmten Frequenz entspricht. Die kommt so dem Photon als eine definierte physikalische Eigen-

schaft zu, wie von der Theorie behauptet.

Wir haben also eine Welleneigenschaft des Photons aufgedeckt. Wir können aber mit dem Photon auch alle Interferenz- und Beugungsversuche durchführen, die wir aus der Optik kennen. Im besonderen können wir Interferenz beobachten, indem wir einen stark geschwächten Lichtstahl (der Abstand zwischen den einzelnen Photonen soll so groß sein, dass sich im Zeitverlauf stets nur höchstens ein Photon in der Apparatur befindet) durch ein Interferometer schicken. Wir beobachten dann genau das gleiche Interferenzbild wie bei intensivem Licht. Wir müssen nur lange genug belichten, da ein einzelnes Photon auf der Photoplatte nur einen einzigen Schwärzungspunkt erzeugt, der uns für sich genommen, nichts sagt. Erst sehr viele solcher Punkte setzen sich zu einem Interferenzmuster zusammen. (Die Interferenz ist ein Kollektiveffekt, der nur an einem Ensemble beobachtet werden kann.) Es muss aber daran erinnert werden, dass sich unter den betrachteten Versuchsbedingungen jederzeit höchstens ein Photon im Interferometer aufhalten kann. Wenn es daher in der geschilderten Weise zur Ausbildung eines Interferenzmusters kommt, muss letztlich das einzelne Photon "mit sich selbst interferiert" haben. Es muss im besonderen "wissen", dass es Orte gibt, nämlich die Stellen zwischen den Interferenzstreifen, die "tabu" für es sind. Das ist nun allerdings im Photonenbild überhaupt nicht zu verstehen. Die Lage der Interferenzstreifen wird ja durch den Gangunterschied bestimmt, der auftritt, weil die (schließlich wieder vereinigten) Teilstrahlen unterschiedlich lange Lichtwege zurücklegen. Ein Photon müsste also die verschiedenen Lichtwege kennen, damit es sich danach richten kann. Aber es lässt sich doch, wie wir gesehen haben,

überhaupt nicht teilen, kann also nur über einen Weg informiert sein.

Wir gelangen somit zu der Einsicht, dass wir dem Photon je nach Versuchsbedingung einmal Teilchen- und einmal Welleneigenschaften zuschreiben müssen. Das ist doch paradox! Was ist denn das Photon eigentlich, ein Teilchen oder eine Welle? Diese Frage lässt sich anscheinend nicht beantworten. Wir können nur sagen, es *verhält sich* einmal wie ein Teilchen und ein andermal wie eine Welle. Was es wirklich *ist*, wissen wir nicht. Eberhard Buchwald sprach von einem „janusköpfigen Etwas“. Man sagt, es liegt ein Dualismus vor, wie ihn die Physik bis dato überhaupt nicht kannte.

Was dem Photon recht ist, ist aber anscheinend auch „echten“ (mit Masse behafteten) Teilchen wie Elektronen und Atomen billig. Sie zeigen Beugungserscheinungen und eignen sich für interferometrische Messungen. Der Dualismus trifft also auch auf sie zu. Da spielen die Photonen wenigstens keine Sonderrolle. Es ist vielleicht hilfreich, an eine treffende Bemerkung von Pascal Jordan, einem der Quanten-Pioniere, zu erinnern: „Wir sehen nicht die mikroskopischen Objekte selbst, sondern nur die Spuren, die sie im Makroskopischen hinterlassen.“ Und dass Spuren ein und desselben Objekts unterschiedlich sein können, kennen wir ja aus dem täglichen Leben. Wir hinterlassen beispielsweise auf einer gepflegten grünen Wiese ganz andere Spuren als auf einem trockenen Sandweg.

Wollten wir ein Fazit ziehen, so müssten wir sagen, es gibt fundamentale Unterschiede zwischen der klassischen und der Quantentheorie: Letztere hat die Kausalität (und damit den Determinismus) außer Kraft gesetzt und uns dafür den abso-

luten Zufall beschert (was Einstein bis zu seinem Lebensende nicht wahrhaben wollte). Und wir müssen uns mit einem Dualismus abfinden, das Photon ist weder "Fisch noch Fleisch", und das gleiche gilt für materielle Teilchen. Was das Photon "in Wirklichkeit" ist, können wir nicht sagen. Selbst Einstein, der ja mit seinen Lichtquanten den Stein ins Rollen gebracht hatte, war ratlos. Noch im Jahre 1951 schrieb er an seinen Freund Michele Besso: "Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage 'Was sind Lichtquanten' nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich." Aber Niels Bohr, der tiefe Denker, hält doch einen Trost für uns bereit, indem er sagt: "Eine Theorie verstehen heißt, sich an sie zu gewöhnen". Entscheidend ist, dass sie in sich schlüssig und frei von inneren Widersprüchen ist. Bei der Quantentheorie kommt noch hinzu, dass sie mit ihrer formalen Schönheit den Mathematiker besticht. Und sie beschreibt alle Erfahrungen vollkommen korrekt!

Doch die Quantentheorie kann auch keine Wunder produzieren. Das gilt im besonderen für das in Science-Fiction-Filmen so beliebte "Beamen" von Personen, das heißt, deren momentane Versetzung an einen beliebig weit entfernten Ort (was besonders bei Weltraummissionen zweifellos sehr hilfreich wäre). Hier handelt es sich schlechterdings um Humbug. Eine Teleportation, noch dazu mit Überlichtgeschwindigkeit, stände in krassem Widerspruch zu fundamentalen Naturgesetzen, an denen auch die Quantentheorie, trotz mancher "Verrücktheit", nicht zu rütteln vermag.

## Die Schrödingersche Katze

Im Gegensatz zu dem, was wir von der klassischen Physik gewohnt sind, ist die Quantentheorie eine rein statistische Theorie. Sie ist außerstande, ein Einzelsystem zu beschreiben, vielmehr beziehen sich ihre Aussagen generell auf ein Ensemble von (in gleicher Weise vorbehandelten) Systemen. Inzwischen sind wir allerdings auch im täglichen Leben an statistische Aussagen gewöhnt. Denken wir nur an die Medizin, dort wird beispielsweise einem Raucher prognostiziert, dass er mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in den nächsten zehn Jahren an Lungenkrebs sterben wird (was den aber nicht sonderlich beunruhigt, ist es doch "nur" Statistik).

Betrachten wir als ein charakteristisches Beispiel aus der Quantentheorie die spontane Emission eines Photons aus einem angeregten Atom. Die quantenmechanische Beschreibung sieht dann folgendermaßen aus: Es gibt unterschiedliche Zustände für das System "Atom + Strahlungsfeld", nämlich einerseits den Ausgangszustand "Atom angeregt und keine Strahlung vorhanden" und andererseits Endzustände der Form "Atom im Grundzustand und ein Photon bestimmter Frequenz und Ausbreitungsrichtung vorhanden". Die Theorie liefert nun eine Wellenfunktion, die Lösung der Schrödinger-Gleichung, die eine *Überlagerung* all der genannten Zustände darstellt. Die dabei auftretenden Koeffizienten sind zeitabhängig und geben so die Dynamik des Prozesses wieder. Verblüffenderweise beschreibt die Wellenfunktion den Vorgang als stetig, doch davon kann im Experiment keine Rede sein! Stellt man nämlich einen Detektor auf, so re-

gistriert er zu einem bestimmten, jedoch nicht vorhersagbaren Zeitpunkt ein ausgesandtes Photon. Das zeigt, dass die Beschreibung der Welt allein durch quantenmechanische Wellenfunktionen unvollständig ist; sie hat es nur mit *Möglichkeiten* zu tun, nicht aber mit *Fakten*. Man muss sie durch ein Zusatzpostulat ergänzen, die sogenannte “Ausreduktion der Wellenfunktion“. Die besagt: Wenn ein Detektor anspricht – allgemein gesprochen, wenn ein beliebiger Messprozess stattfindet –, geht die Wellenfunktion schlagartig in den gemessenen Zustand über. Damit ist zugleich die vor der Messung vorhandene quantenmechanische Unbestimmtheit verschwunden. Der physikalische Nachweisprozess selbst ist unmessbar kurz, weshalb man von einem “Quantensprung“ spricht. – Inzwischen hat dieses Wort sogar Eingang in das Vokabular der Politiker gefunden, die es jedoch als Bezeichnung für einen spektakulären Prozess missverstehen. Tatsächlich findet beispielsweise in jeder noch so trüben Funzel ständig eine Unzahl von Quantensprüngen der das Licht emittierenden Atome statt. Schrödinger selbst konnte sich allerdings zeitlebens mit der “Quantenspringerei“ nicht abfinden, er stand jedoch mit seiner Auffassung letztlich allein da.

Wohin man kommt, wenn man bei der Beschreibung durch die Wellenfunktion stehen bleibt, demonstrierte Schrödinger an Hand eines geistreichen Gedankenexperiments, das heute noch gern zitiert wird. Er dachte sich eine quantenmechanisch gesteuerte Höllenmaschine aus, mit der er eine Katze in bis dahin unbekannter Weise leiden ließ. Damit sprach er zugleich das Mitgefühl der Leser an. (Hätte er ein übliches “Versuchskaninchen“, etwa eine Ratte, gewählt, wäre das Interesse sicher

geringer gewesen.) Im einzelnen sah die Apparatur folgendermaßen aus: Eine geringe Menge einer radioaktiven Substanz dient als Auslöser. Sie ist gerade so groß gewählt, dass im Verlauf einer Stunde einer der Atomkerne mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit zerfällt, während in den übrigen 50 Prozent der Fälle nichts passiert. Der genannte Zerfall, so er denn stattfindet, bringt einen Geiger-Zähler zum Ansprechen. Dessen (makroskopisches!) Ausgangssignal setzt nun eine kausale Kette von Ereignissen in Gang. Es wird ein Hammer von seiner Arretierung gelöst, so dass er nach unten fällt und dabei eine mit Blausäure gefüllte Phiolen zerschmettert. Das Ganze spielt sich in einer stählernen Kammer ab, in die eine ahnungslose Katze eingesperrt ist. Sie wird schließlich durch die freigesetzte Blausäure getötet. Spricht jedoch der Geiger-Zähler nicht an, geschieht der Katze nichts. Das klingt alles ganz vernünftig.

Schrödinger bringt jedoch die quantenmechanische Unbestimmtheit ins Spiel, die wie im Falle der spontanen Emission aus der Schrödinger-Gleichung folgt. Das bedeutet, es ist grundsätzlich unbestimmt, ob sich der Atomkern während des betrachteten Zeitintervalls von einer Stunde noch im Ausgangszustand befindet oder bereits zerfallen ist. (Die Wellenfunktion ist wieder eine Überlagerung von Ausgangs- und Endzustand.) Schrödinger zieht nun den Schluss, dass sich die genannte Unbestimmtheit auf den Geiger-Zähler und von da an auf alle weiteren Glieder der Kausalkette überträgt. Und damit letztlich auf die Katze, die folglich weder tot noch lebendig ist, sich vielmehr in einem mysteriösen unwirklichen Zustand befindet. Das bringt den Leser natürlich zu ungläubigem Staunen.

Der Schwachpunkt der Schrödingerschen Argumentation ist



tatsächlich die Leugnung des Quantensprungs beim Zerfall der radioaktiven Substanz. Angesichts der Verseuchung der Welt mit radioaktivem Material weiß allerdings heute jeder, dass ein Geiger-Zähler sofort zu klicken beginnt, wenn er in die Nähe einer radioaktiven Substanz kommt. Der Zähler “entscheidet“ daher bei Schrödingers Experiment, sollte man es tatsächlich durchführen wollen, darüber, was tatsächlich geschieht: sendet er ein Signal aus, so geht es von nun an *deterministisch* weiter, wie wir es gewohnt sind: die Katze wird durch die Höllenmaschine unweigerlich umgebracht. Spricht der Zähler dagegen nicht an, geschieht ihr kein Leid. Es geht also alles mit rechten Dingen zu wie bei dem bekannten Spiel auf Leben und Tod mit einem Trommelrevolver, aus dem ein paar Patronen herausgenommen wurden, d.h., wie beim originalen russischen Roulette. Wir brauchen uns um das Schicksal der Katze nicht den Kopf zu zerbrechen. Schrödingers Verdienst besteht vor allem darin, mit seiner Katzensgeschichte tiefgründige Diskussionen – allerdings auch eine große Zahl von Missverständnissen! – ausgelöst zu haben.

## Spukhafte Fernwirkung?

Die Quantentheorie hat noch etwas ganz Besonderes zu bieten, nämlich sogenannte verschränkte Zustände, die sich einem klassischen Verständnis grundsätzlich entziehen. Es handelt sich dabei um zwei Teilsysteme, die in besonderer Weise miteinander “verbandelt“ sind. Der Fachbegriff lautet Verschränkung. Sie entstehen beispielsweise bei einem geeigneten Kaskadenübergang eines Atoms, d.h., bei einem Prozess, in dem nacheinander zwei Photonen emittiert werden. Das Atom geht dabei von einem angeregten Zustand über ein Zwischenniveau in den Endzustand über.

Das Experiment soll nun so aussehen: Wir beobachten nur solche Photonenpaare, bei denen das eine Photon in einer vorgegebenen Richtung ausgestrahlt wird und das andere Photon in der entgegengesetzten. Zu diesem Zwecke stellen wir in geeigneter Entfernung vom Atom einen separaten Detektor in jeden der beiden Strahlengänge. (Damit treffen wir offenbar eine Auswahl aus der Mannigfaltigkeit aller emittierten Photonenpaare, bei denen die einzelnen Photonen natürlich in alle möglichen Richtungen fliegen.) Die Detektoren sollen nun nicht bloß das Eintreffen eines Photons, sondern zugleich auch seine Polarisation anzeigen. Solche Detektoren sind bekannt, sie basieren auf bekannten Effekten der klassischen Optik, und wir können sie im besonderen so konstruieren, dass sie zirkulare Polarisation messen. Sie besitzen entsprechend zwei Ausgänge, einen für rechts zirkular polarisiertes Licht und einen für links zirkular polarisiertes. Der Clou besteht nun darin, dass wir einen ganz

speziellen Kaskadenübergang beobachten, es sollen nämlich sowohl der Ausgangszustand als auch der Endzustand des Atoms den Drehimpuls Null besitzen. Dann können wir den Drehimpulserhaltungssatz ins Feld führen. Da der Drehimpuls für das Gesamtsystem Atom + Strahlungsfeld anfangs Null ist (es ist ja gar kein Strahlungsfeld vorhanden), muss er so bleiben. Nun verschwindet aber schon der Drehimpuls des atomaren Endzustandes, ergo muss das emittierte Photonenpaar zusammengenommen auch den Drehimpuls Null besitzen. Es liegt dann auf der Hand, dass die beiden Photonen entgegengesetzt polarisiert sein müssen. Beziehen wir den Drehsinn auf die gleiche Achsenrichtung, so muss also eines der beiden Photonen rechts und das andere links zirkular polarisiert sein. Wir kommen so zu dem interessanten Schluss: Obwohl die beiden Photonen unabhängig voneinander emittiert werden, sind sie doch über ihre Polarisation miteinander verkoppelt. Nun könnte man sagen, dann ist halt im Experiment einmal das erste Photon rechts und das zweite links zirkular polarisiert und ein andermal ist es genau umgekehrt. Was ist daran so merkwürdig?

Tatsächlich gibt es ein tiefgreifendes Problem. Die Quantentheorie behauptet nämlich, das System der beiden Photonen kann sich nur in einem *einzigem* Quantenzustand befinden, und der ist so zu beschreiben, dass die Polarisation eines jeden Photons *grundsätzlich* unbestimmt ist. Die erwähnte strenge Korrelation zwischen den Polarisationszuständen der beiden Photonen wird erst durch die Messung sichtbar. Wenn ich an dem einen Photon die Polarisation gemessen habe, weiß ich ganz genau, wie das andere Photon polarisiert ist. Da scheint sich also folgendes abzuspielen: ich mache eine Messung an dem

einen Photon und allein dadurch wird die bislang vollkommen unbestimmte Polarisation des zweiten Photons gesetzmäßig festgelegt. Dieser Prozess wird dadurch noch mysteriöser, dass sich erstens die beiden Photonen beliebig weit voneinander entfernt haben können (der Drehimpulserhaltungssatz gilt unverändert) und zweitens die geschilderte Wirkung der Messung nach der Quantentheorie *momentan* erfolgt. Es kann also kein irgendeine geartetes Signal von der Messung ausgegangen und das zweite Photon beeinflusst haben, da sich grundsätzlich kein Signal mit Überlichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Einstein, der in Zusammenarbeit mit Podolsky und Rosen als erster diesen paradoxen Zug der Quantentheorie aufdeckte, war versucht, von einer "spukhaften Fernwirkung" zu sprechen.

Aber kann man denn auf die geschilderte Weise tatsächlich etwas bewirken? Die Antwort lautet "Nein". Der zweite Beobachter merkt ja gar nichts davon, dass die Polarisation seines Photons ohne sein Zutun plötzlich aus einem unbestimmten Zustand in einen "objektiv realen" Zustand übergegangen ist. Er kann die Polarisation nur messen und hat keine Ahnung, dass sein Kollege, der an seinem Photon zur gleichen Zeit eine Messung durchgeführt hat, sein Messergebnis genau kennt. Was die beiden Beobachter nur machen können, ist folgendes. Sie notieren sich ihre Messergebnisse (fertigen ein Messprotokoll an), setzen sich nach Beendigung der Messungen zusammen und vergleichen die beiden Protokolle. Da stellen sie dann zu ihrem Erstaunen fest, dass die Messergebnisse konträr sind, wenn der eine rechts zirkuläre Polarisation gemessen hat, hat der andere links zirkuläre Polarisation gefunden.

Man könnte man sich fragen, ob man das Experiment nicht

doch zu einer Informationsübertragung nutzen könnte, die dann, und das wäre der besondere Reiz, mit Überlichtgeschwindigkeit erfolgen würde. Man könnte an folgendes denken: Der eine Beobachter trifft mit dem anderen beispielsweise eine Verabredung der Art: Wenn du rechts zirkuläre Polarisierung misst, bedeutet das "Max wurde verhaftet". Der sendende Beobachter müsste aber dann in der Lage sein, seine Messung *willkürlich* zu manipulieren – er müsste beispielsweise sagen können, jetzt werde ich links zirkuläre Polarisierung messen – und das geht grundsätzlich nicht. Es gibt Gott sei Dank keine Signalübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit. Andernfalls würde ja das Kausalgesetz außer Kraft gesetzt, demzufolge die Ursache stets der Wirkung voraus gehen muss. Man könnte in die Vergangenheit hinein wirken, und das würde die Weltordnung vollkommen durcheinander bringen.

Das geschilderte Experiment wurde von verschiedenen Forschern durchgeführt. Dabei wurden die quantenmechanischen Vorhersagen vollumfänglich bestätigt und damit die Existenz verschränkter Zustände zweifelsfrei nachgewiesen. Dieses Ergebnis hat aber eine noch weitergehende Konsequenz. Versucht man nämlich, wie Bell es tat, das betrachtete Experiment mit einer Theorie verborgener Parameter zu beschreiben, in der ein Einfluss der Messung an dem einen Photon auf die Messung an dem anderen Photon kategorisch ausgeschlossen ist, so erleidet man Schiffbruch. Die aus einer solchen Theorie ableitbaren Ungleichungen zwischen den Messdaten, die berühmten Bellschen Ungleichungen, werden eindeutig verletzt. Die verborgenen Parameter gehören somit endgültig in die Mottenkiste.

## Die Kosmische Hintergrundstrahlung

Die Geschichte der Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung hat einen besonderen Reiz. Sie ist ein schönes Beispiel dafür, dass man manchmal unvermutet auf etwas ganz Tolles stößt.

Es begann damit, dass im Jahre 1964 den Radioastronomen Arno A. Penzias und Robert W. Wilson, die am Forschungslabor der Bell Telephone Company beschäftigt waren, eine ungewöhnliche Antenne, ein 20-Fuß-Hornreflektor, zur Verfügung stand. Sie befand sich in der Nähe von Holmdel, New Jersey, und eignete sich hervorragend zum Empfang von Radiowellen. Die beiden Forscher hatten vor, damit Radioquellen in unserer Milchstraße zu untersuchen.

Nun sind deren auf der Erde eintreffende Signale sehr schwach. Sie müssen daher in der Empfängeranlage elektronisch verstärkt werden. Ein Verstärkungsprozess ist aber unvermeidlich mit einer Störung, dem sogenannten Verstärkerrauschen, verbunden. Der Grund dafür liegt in wärmebedingten und somit zufälligen Bewegungen der Elektronen, wodurch der elektrischen Stromstärke und der Spannung kleine Fluktuationen aufgeprägt werden. Wir kennen diesen Effekt sehr gut vom Rundfunkempfang. Suchen wir uns einen schwachen Sender aus, so müssen wir die Verstärkung hochdrehen, haben aber trotzdem keine Freude an dem, was wir hören. Die Darbietung des Senders versinkt mehr oder weniger in einem Rauschen. Hier hören wir das Rauschen mit eigenen Ohren!

Das wahre, von einer äußeren Quelle herrührende, Signal

erhält man also aus dem gemessenen Signal erst dadurch, dass man den Rauschanteil abzieht. Man geht daher so vor, dass man zwei Messungen macht. Man richtet die Antenne einmal auf das zu untersuchende Objekt aus, und einmal auf eine "leere" Stelle, von der keine Strahlung kommt. Bei der zweiten Messung registriert man allein das Rauschen der Empfangsanlage, und dieser Wert ist von dem in der ersten Messung gefundenen Wert abzuziehen.

Die beiden Forscher gingen nun sehr gründlich vor. Bevor sie sich an die Messung kosmischer Radioquellen machten, wollten sie sich erst einmal Klarheit über das Rauschverhalten ihrer Apparatur verschaffen. Zu diesem Zweck machten sie Messungen bei einer Wellenlänge von 7,35 Zentimetern, weil in diesem Wellenlängenbereich keine Signale aus dem Kosmos zu erwarten sind. (Die späteren Messungen galaktischer Objekte sollten dann bei einer Wellenlänge von 21 Zentimetern erfolgen.) Die Wahl von 7,35 Zentimetern sollte sich später als ein unglaublicher Glücksfall erweisen!

Die genannte Messung des Eigenrauschens ihrer Empfangsanlage erbrachte nun zum Erstaunen der beiden Forscher einen Wert, der deutlich über dem lag, was man erwarten konnte. Er war aber andererseits nicht so groß, als dass er die beabsichtigten eigentlichen Messungen ernstlich beeinträchtigen würde. Andere hätten an dieser Stelle wahrscheinlich gesagt "na, wenn schon" und hätten das eigentliche Messprogramm durchgezogen. Nicht so Penzias und Wilson! Sie wollten der Sache auf den Grund gehen.

Zum einen gab es den Verdacht, dass irdische Quellen für das erhöhte Rauschen verantwortlich waren. Diese würden sich

dann dadurch verraten, dass sich das gemessene Signal mit der Beobachtungsrichtung ändert. Die beiden Forscher suchten die Landschaft ab, einmal richteten sie ihre Antenne sogar in Richtung New York aus, doch das Rauschen änderte sich nicht. Außerdem gab es keine Veränderung mit der Beobachtungszeit. Man konnte daher mögliche irdische Rauschquellen ausschließen.

Also musste die Ursache für das überhöhte Rauschen in der Empfangsapparatur selbst liegen. Die beiden Forscher überprüften daher akribisch jedes einzelne Element der Anlage auf alle möglichen technischen Defekte, im besonderen überzeugten sie sich von der einwandfreien Beschaffenheit der Lötverbindungen. Aber es war kein Fehler zu entdecken!

Blieb noch die Antenne zu untersuchen. Dort hatte sich allerdings ein Taubenpaar eingenistet und mit seinem Kot den Reflektor "beschichtet". Konnte das die Ursache für das überhöhte Rauschen sein? Um sicher zu gehen, ergriff man entsprechende Maßnahmen. Man versuchte es zunächst auf die gütliche Tour, indem man die beiden Tauben an einen 50 km entfernten Ort verfrachtete und dort wieder freiließ. Die verspürten jedoch Heimweh und waren nach ein paar Tagen wieder zurück. Nun war es vorbei mit der Tierliebe, Penzias erschoss sie kurzerhand. Und dann musste die Antenne natürlich noch ausgemistet werden. Aber all diese Aktivitäten waren erfolglos. Das Rauschsignal blieb abnormal hoch.

Es hatte den Anschein, als käme ein mysteriöses Radiosignal aus dem Universum, das überdies vollkommen unabhängig von der Beobachtungsrichtung war. Penzias und Wilson machten noch etwas, was unter Radioastronomen gang und gäbe ist. Sie verglichen nämlich ihr Signal mit der Hohlraumstrahlung und



fanden Übereinstimmung bei einer Temperatur von ungefähr 3,5 K (Kelvin, d.i. Grad über dem absoluten Nullpunkt). Man kann daher so sagen: Das gemessene Signal würde man finden, wenn man eine Antenne mit normalem Rauschverhalten in einen großen Kasten stellen würde, dessen Wände sich auf der Temperatur 3,5 K befinden. Das ist natürlich eine Fiktion, aber es sieht ganz danach aus, als würde das gesamte *Universum* einen solchen Kasten repräsentieren!

Penzias und Wilson standen vor einem Rätsel. Ohne es zu ahnen, hatten sie die bedeutendste Entdeckung des 20. Jahrhunderts gemacht (was ihnen den Nobelpreis sicherte)! Es entbehrt nicht einer gewissen Tragik, dass eine andere amerikanische Forschergruppe (in Princeton) zur gleichen Zeit gezielt nach einer Strahlung gesucht hatte, wie sie Penzias und Wilson anscheinend gefunden hatten. Sie waren gerade dabei, eine eigene Antenne aufzubauen, als sie erfahren mussten, dass ihnen Penzias und Wilson den Erfolg vor der Nase weggeschnappt hatten! Tatsächlich waren die Princeton-Forscher von der sogenannten Urknall-Theorie inspiriert, die es damals schon gab, von der Penzias und Wilson allerdings nie etwas gehört hatten. Und deren Beobachtungsergebnis entspricht genau dem, was man theoretisch erwartet hatte. Die gefundene Strahlung ist demnach als ein Relikt einer unheimlich heißen Strahlung aufzufassen, die das Universum in einem ganz frühen Stadium vollkommen erfüllte. Die Abkühlung auf 3,5 K ist dabei eine Folge der ungeheuren Expansion des Universums. Die von Penzias und Wilson entdeckte Strahlung wird daher Kosmische Hintergrundstrahlung genannt. Sie kommt tatsächlich aus allen Richtungen mit gleicher Stärke. Spätere noch genauere Messungen ergaben feine Temperaturab-

weichungen in Abhängigkeit von der Beobachtungsrichtung, aber gerade diese erwiesen sich als eine Quelle wertvoller Information.

Rückblickend können wir sagen: Die Hartnäckigkeit, mit der sich Penzias und Wilson an die Fehlersuche machten, zahlte sich in ungeahnter Weise aus. (Hatte das vielleicht sogar etwas mit der berühmten deutschen Gründlichkeit zu tun? Penzias hatte die ersten sechs Jahre seines Lebens in Deutschland verbracht, und glücklicherweise war es seinen jüdischen Eltern gelungen, 1939 im letzten Augenblick mit ihm nach den USA zu entkommen.) Und ihre Wahl von 7,35 cm als Beobachtungswellenlänge kann man nur als einen unglaublichen Glückstreffer empfinden.

## Theorie des Urknalls

Die Physiker sind sich heute darin einig, dass die Welt einen plötzlichen Anfang hatte. Der bestand in einer Art Explosion unvorstellbaren Ausmaßes, dem sogenannten Urknall. (Sprachlich gibt es den allerdings nur im Deutschen. Die Vorsilbe “ur“ lässt sich schlicht nicht übersetzen. So müssen sich die Engländer mit einem “big bang“ zufrieden geben.) Aus dem absoluten Nichts heraus entstand – warum, wissen wir nicht – in einem nahezu punktförmigen Raumbereich eine unvorstellbar hohe Konzentration an Energie. Nach Verlauf von ungefähr einer hundertstel Sekunde, so erzählen uns die Experten, entsprach sie einer Temperatur von hundert Tausend Millionen Grad. Das Universum, so wird man annehmen können, bestand damals zu einem großen Teil aus elektromagnetischer Strahlung, die das Plancksche Strahlungsgesetz (für die eben genannte Temperatur) befolgte. Diese Strahlung war daher extrem kurzweilig, entsprechend besaßen die Photonen eine enorme Energie.

Und gab es schon materielle Teilchen? Um diese Frage zu beantworten, greifen wir auf unsere Erfahrungen mit Elementarteilchen zurück. Wir haben gelernt, dass es zu jedem Elementarteilchen ein Antiteilchen gibt (nur das Photon macht eine Ausnahme), und die beiden unterscheiden sich, falls sie eine elektrische Ladung besitzen, in ihrem Vorzeichen. Beispielsweise ist das Positron das Antiteilchen des Elektrons. Das Faszinierende ist nun, dass Teilchen-Antiteilchen-Paare in elektromagnetischen Feldern erzeugt werden können, es wird also erstaunlicherweise Strahlungsenergie vollständig in Materie umge-

wandelt – die berühmte Einsteinsche Formel “Energie ist gleich Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit“ macht’s möglich! Zu dieser Paar-Erzeugung gibt es aber auch zwangsläufig das Gegenstück, die Paar-Vernichtung, bei der Teilchen und Antiteilchen gemeinsam zerstrahlen, d.h., sich in elektromagnetische Energie verwandeln. Da hierbei Energie erzeugt wird, braucht anfangs auch gar kein Feld vorhanden zu sein. In dem in Rede stehenden Stadium des Universums wird daher folgendes geschehen sein: Es wurden ständig Teilchen und Antiteilchen, in erster Linie Elektronen und Positronen, gebildet, aber gleich wieder vernichtet.

Das Positron ist tatsächlich das erste Antiteilchen, dessen Existenz experimentell nachgewiesen werden konnte. Seine Entdeckungsgeschichte verdient erzählt zu werden. Zunächst musste man sich fragen, wo man überhaupt eine Chance hat, ein solch exotisches Teilchen “aufzuspüren“. Sicherlich nicht unter irdischen Bedingungen, da es ja auf Erden von Elektronen (meist in einem gebundenen Zustand) nur so “wimmelt“, die nur darauf warten, mit einem Positron zusammen unverzüglich “Selbstmord“(Paarvernichtung) zu begehen. Da bleibt eigentlich nur die Strahlung aus dem Weltall, die als kosmische oder Höhenstrahlung bekannt ist. Glücklicherweise kann man ein Positron von einem Elektron leicht unterscheiden (im Prinzip!), es wird nämlich in einem starken Magnetfeld nach der ”falschen“ Seite abgelenkt. Allerdings ist der erforderliche Energieaufwand enorm. Der Physiker Paul Kunze in Rostock fand nun tatsächlich als erster ein solches Ereignis. Aber zu seinem Leidwesen blieb es bei einem einzigen! Und da zeigte er sich als ein Physiker der alten Schule, indem er erklärte: Mit einem einzigen Ereignis

nis macht man keine Physik! Und er publizierte seinen "Fund" nicht. Der amerikanische Physiker C. D. Anderson hatte wenig später mehr Glück, er konnte ein paar Positronen nachweisen, publizierte seine Ergebnisse – und heimste dafür den Nobelpreis ein!

An dieser Stelle muss auf ein ungelöstes Rätsel hingewiesen werden. Wir leben ja offensichtlich in einer Welt, die nur aus normaler Materie besteht. (Das gilt auf jeden Fall für unser Sonnensystem. Den Mond und einige Planeten haben ja unsere Raketen schon besucht, und der Sonnenwind, ein ständig von der Sonne nach allen Seiten ausgehender Strom geladener Teilchen, bringt uns Kunde von der Sonne.) Wenn nun aber Teilchen nur als Teilchen–Antiteilchen–Paare erzeugt werden können, wo sind denn dann die Antiteilchen geblieben? Keiner weiß es.

Doch kehren wir zur weiteren Entwicklung des Universums zurück! Nach der Periode der Paarerzeugung und -vernichtung – es spielte sich alles im Verlauf von Minuten ab – dehnte sich das Universum rasant aus und kühlte sich dabei ständig ab. Als eine Temperatur von 10 Tausend Millionen Grad erreicht wurde, begann die Vernichtung der Elektron-Positron-Paare die Oberhand über deren Erzeugung zu gewinnen. Bei einer Temperatur von Tausend Millionen Grad haben sich die Elektronen und die Positronen zum größten Teil gegenseitig ausgelöscht. Sie haben sich in Strahlung verwandelt, sodass das Universum hauptsächlich aus Licht bestand.

Und wie stand es mit schwereren Elementarteilchen wie Protonen und Neutronen? Sie waren in geringer Zahl vorhanden und begannen schon bei einer Temperatur von 3 Tausend Millio-

nen Grad sich zu vereinigen. Das geschah durch Stöße zwischen ihnen. Die waren aber so selten, dass jeweils höchstens zwei Teilchen aufeinander trafen. Eine Elementsynthese konnte daher nur Schritt für Schritt vor sich gehen. Als erstes mussten sich je ein Proton und ein Neutron zu einem Kern von Deuterium (schweres Wasser) vereinigen. Weil die Temperatur aber noch zu hoch war, wurden die Deuterium-Kerne gleich nach ihrer Entstehung wieder gesprengt, sodass es nicht weiter ging (es gab einen "Deuterium-Engpass"), es konnten sich keine weiteren Teilchen anlagern. Erst als die Temperatur so weit gesunken war, dass die Deuterium-Kerne zusammenhielten, konnte die Synthese fortschreiten. Sie kam jedoch über die Bildung von Helium-4-Kernen (bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen), die besonders stabil sind, nicht hinaus, weil es keine stabilen Kerne mit 5 oder 8 Teilchen gibt.

Das klingt alles recht plausibel. Tatsächlich stehen wir jedoch vor einem der größten Rätsel der Natur, nämlich der Frage, weshalb bei den vorangehenden "Vernichtungsaktionen" überhaupt Elektronen, Protonen und Neutronen übrig blieben. Wurden Teilchen und Antiteilchen denn nicht immer in Paaren erzeugt, so dass sie sich später *vollständig* vernichten mussten? Wäre dem tatsächlich so gewesen, so bestände das Universum nur aus Strahlung. Es gäbe keine Elementarteilchen, Atome, Moleküle, Himmelskörper mit Planeten, Galaxien und, last not least, es gäbe uns nicht! Anscheinend haben wir wirklich ein unbegreifliches Glück gehabt!

Und wie ging es mit dem Universum weiter? In den nächsten 700 000 Jahren passierte nichts Aufregendes. Schließlich war die Temperatur so weit gesunken, das sich aus den vorhande-

nen Atomkernen und den freien Elektronen Atome bilden konnten. Insbesondere entstand so eine große Menge Wasserstoff. Die freien Elektronen wurden auf diese Weise weggeschnappt, und das hatte eine Konsequenz von enormer Tragweite. Die Strahlung wurde nämlich von der Materie entkoppelt, und nun kam die Schwerkraft zum Zuge. Unter ihrem Einfluss konnten sich materielle Teilchen zunächst zu kleinen Gebilden zusammenfinden, die sich wiederum zu Himmelskörpern vereinigten. Es entstanden Unmengen von Sternen, die sich zu Galaxien gruppieren. Überdies bildeten sich wahre Monster, die die Phantasie ungemein anregenden "schwarzen Löcher". Hier zeigt die Schwerkraft, wozu sie fähig ist. Es hat sich eine Masse riesiger Größe angesammelt, die unter der Einwirkung der eigenen Schwerkraft kollabiert ist. Wie ein Staubsauger saugt sie alles, was ihr zu nahe kommt, in sich hinein und gibt es nicht wieder her. Selbst Licht kann nicht mehr entfliehen.

Die Sterne wiederum sind Geburtshelfer bei der Entstehung chemischer Elemente. Wegen der großen Materiedichte, die in ihnen herrscht, finden nämlich nun viel häufiger Stöße zwischen den Teilchen statt. Eine wichtige Konsequenz ist die Synthese stabiler Kohlenstoff-12-Kerne durch Zusammenstöße zwischen Helium-Kernen. Die schweren Elemente erfordern jedoch zu ihrer Bildung einen noch viel größeren Aufwand. Sie entstehen auf dramatische Weise in Sternexplosionen von der Art der Supernova-Ausbrüche. Damit waren dann endlich die chemischen Voraussetzungen gegeben, die eine Entstehung von Leben, jedenfalls unter den auf unserer Erde herrschenden günstigen Bedingungen, erst möglich machten.

Doch kehren wir zu der Strahlung zurück! Sie blieb nun

sich selbst überlassen, und was wurde aus ihr im Laufe von Milliarden von Jahren? Die Antwort lautet: Ihre Temperatur (die ihr als Hohlraumstrahlung zukommt) sank infolge der gigantischen Expansion tiefer und tiefer, und das kann man sich nach Einstein so erklären, dass die Expansion des Universums nicht *in* einem schon vorhandenen Raum erfolgte, sondern dass der Raum selbst sich entsprechend ausdehnte. Dann ist verständlich, dass bei diesem Prozess die Wellenlänge des Lichts mit gedehnt wurde. Und das Ergebnis “sehen“ wir. Es ist die Kosmische Hintergrundstrahlung, wie sie von Penzias und Wilson nachgewiesen wurde! Sie ist damit ein Kronzeuge für die Theorie des Urknalls.

Ist es nicht toll, was die Physiker alles herausgefunden haben?



## Dunkle Materie

Im Jahre 1933 machte der Schweizer Astronom Fritz Zwicky eine unerwartete Entdeckung. Er untersuchte die Bewegung der Galaxien im Koma-Galaxiehaufen und gelangte dabei zu dem Schluss, so etwas dürfte es gar nicht geben. Der Haufen hätte längst auseinanderfliegen müssen, weil die sichtbare Materie nicht ausreichte, um ihn zusammenzuhalten. Zwicky postulierte nun kühn, es müsse noch viel mehr Materie in dem Haufen stecken, nur kann man sie leider nicht sehen. Er taufte sie daher "dunkle Materie". Diese aufregende Behauptung teilte zunächst das Schicksal anderer großer Entdeckungen: Die Fachwelt ignorierte sie.

Doch in den 1960–70-iger Jahren wurden ganz ähnliche Beobachtungen an anderen Galaxiehaufen gemacht, und die Astronomen mussten sich wohl oder übel mit der Frage der Existenz "dunkler Materie" auseinandersetzen. Die sollte zudem das Fünffache der normalen Materie im Universum ausmachen! Einen Ausweg schien es noch zu geben. Wer sagt uns denn, dass die Gravitationskraft bei riesigen Entfernungen noch genau das Newtonsche Gesetz befolgt? Kann man letzteres nicht so modifizieren, dass alles wieder in Ordnung kommt? Die Antwort lautete enttäuschenderweise "Nein".

Also blieb nichts weiter übrig, als die "dunkle Materie" ernst zu nehmen. Ihre Existenz ist allerdings ein Zumutung. Da man von ihr außer der Gravitationswirkung nichts merken soll, fällt sie vollkommen aus dem Rahmen der bekannten Physik. Die ist ja gerade dadurch charakterisiert, dass Wechselwirkungen unter-

schiedlichster Art zwischen den verschiedenen Objekten bestehen. Dabei ist die elektromagnetische Strahlung von besonderer Bedeutung, da wir nur durch sie erfahren, was im Weltall “los ist“, genauer gesagt, war. Und jetzt wird behauptet, es gibt etwas im Universum, und noch dazu in riesiger Anzahl, das sich nur durch gravitative Anziehung bemerkbar macht. Diese Vorstellung hat allerdings auch etwas Beruhigendes an sich. Falls Teilchen der “dunklen Materie“ durch unseren Körper hindurch treten sollten, würden sie uns nichts tun. Ähnlich wie Neutrinos würden sie uns einfach ignorieren. Wenn unsere Erde einmal durch eine Wolke solch exotischer Teilchen fliegen würde, würden wir das gar nicht bemerken. Das erklärt aber auch, dass es bis jetzt nicht gelungen ist, Teilchen der “dunklen Materie“ in einem Experiment aufzuspüren. Selbst CERN konnte da nicht helfen. – Übrigens muss die “dunkle Materie“ im Lauf der Entwicklung des Universums ja auch einmal entstanden sein. Die Frage ist, wie.

Nun gibt es aber noch andere gravitative Effekte, die wir von der normalen Materie her kennen. Da sind zunächst die “schwarzen Löcher“ zu nennen. In ihnen ist soviel Materie zusammengeballt, dass sie andere Materie, die ihnen zu nahe kommt, wie ein Staubsauger unwiederbringlich aufsaugen. (Selbst Lichtstrahlen entkommen ihnen nicht!) Da ergeben sich zwei Fragen. Erstens, verschlucken sie auch “dunkle Materie“? Auch davon würden wir nichts bemerken, da man sie noch so sehr beschleunigen kann, sie strahlt trotzdem nicht. Zweitens, existieren vielleicht sogar schwarze Löcher, die aus nichts anderem als “dunkler Materie“ bestehen? Die wiederum könnte man daran erkennen, dass sie normale Materie “verschlucken“, die

unmittelbar vor ihrem Verschwinden auf Nimmerwiedersehen noch ganz stark aufleuchtet.

Eine andere bekannte Wirkung der Gravitation ist die Ablenkung der Lichtstrahlen, die nahe an einem Körper großer Masse vorbei laufen. Das führt unter günstigen Umständen zu dem Gravitationslinsen-Effekt: Man sieht ein, oder sogar mehrere, Bilder eines dahinter befindlichen Sterns oder einer Galaxie. Zu einer ähnlichen Wirkung auf das Licht ist nun anscheinend auch die "dunkle Materie" imstande. Man spricht von einem Mikrolinsen-Effekt: Bei der Beobachtung von weit entfernten kosmischen Lichtquellen (Hintergrundsternen) stellt man fest, dass einige von ihnen während ihres Transits (der Wochen oder Monate dauern kann) etwas heller erscheinen. Und das erklärt man so, dass das Sternenlicht auf dem Wege zum Teleskop Raumbereiche voller "dunkler Materie" durchquert, wobei die Lichtstrahlen etwas abgelenkt werden. Auf diese Weise hat man tatsächlich eine große Zahl von Konzentrationen "dunkler Materie" im Weltall aufgespürt.

Die "dunkle Materie" bringt also unser Weltbild gründlich durcheinander. Es gibt aber noch ein weiteres Rätsel. Die entfernten Galaxien sollten eigentlich unter der Einwirkung der Gravitationskraft, der sie von den näher befindlichen ausgesetzt sind, immer langsamer werden. Neuere Beobachtungen zeigen aber das genaue Gegenteil: Sie werden immer schneller. Es muss offenbar eine bislang unbekannte Kraft am Werke sein. Da wir wissen, dass Kraft immer mit Energie verbunden ist, muss es eine völlig neue Energieform geben. Da wir keine Ahnung haben, was das sein soll, nennen wir sie "dunkle Energie". Allerdings scheint es recht einfach zu sein, sie wenigstens formal

in den Griff zu bekommen. Wie schon Einsein erkannte, genügt es, in seine Bewegungsgleichungen eine Konstante geeigneter Größe, die sogenannte kosmologische Konstante, einzufügen. Das nennt man üblicherweise eine ad hoc–Annahme, und sie sagt natürlich überhaupt nichts über die physikalische Natur dieser Größe aus. Interessanterweise hielt Einstein später selbst die Einführung der kosmologischen Konstante für “eine seiner größten Eseleien“.

Kurz und gut, die beobachtbaren Fortschritte der Astronomie machen uns ratlos. Es stellt sich heraus, dass wir uns nicht den Kopf zu zerbrechen brauchen über Paralleluniversen und ähnliches, wir verstehen schon das eigene Universum nicht. Aber war denn die Welt nicht immer schon voller Wunder?

## Physiker

Aber was sind denn das eigentlich für Menschen, diese Physiker? Um einer Antwort auf diese Frage näher zu kommen, werfen wir zunächst einen Blick in die Vergangenheit.

Früher, als es noch Begegnungen zwischen Theoretikern und Reinemachfrauen (jetzt Raumpflegerinnen genannt) gab, gewannen letztere folgenden Eindruck von der Forschertätigkeit: Die meist jungen Leute kommen früh zu spät zur Arbeit, setzen sich an den Schreibtisch und beginnen, Zettel zu beschreiben. Dabei trinken sie ständig Tee. Wenn es Feierabend ist, werfen sie die Zettel in den Papierkorb und gehen gut gelaunt nach Hause. Was die Reinigungskräfte natürlich nicht wissen konnten, war, dass die Forscher allen Grund zur Zufriedenheit hatten. Sie hatten ja einen Irrweg als solchen erkannt und waren so der Lösung ihres Problems einen Schritt näher gekommen. Tatsächlich hatten sie jedoch kein leichtes Leben, wie ein sowjetischer Theoretiker bekannte: "Das Leben des Theoretikers ist ein einziger Kampf, vor dem Mittagessen mit dem Hunger und nach dem Mittagessen mit dem Schlaf." Erschwerend kam hinzu, dass sie ständig die neuesten Arbeiten der Konkurrenz lesen mussten, was anstrengend und zugleich frustrierend war. Sie bewahrten sich jedoch ihre optimistische Lebenssicht, wie der folgende Ausspruch eines ihrer geistreichsten Köpfe bezeugt: "Dummheit schützt vor'm Doktor nicht."

Tatsächlich ist heutzutage das Leben der Physiker viel schwerer geworden, ist doch die Zahl der Forscher wie auch der Fachjournale gewaltig angestiegen. Doch nicht genug damit, ist der

Druck enorm angewachsen, auf Teufel komm raus selbst zu publizieren “Publish or perish“ (publiziere oder geh‘ unter) lautet die Parole, der sich keiner entziehen kann, der etwas werden will. Nun ist das Veröffentlichen harte Arbeit, kaum hat man den Text geschrieben, muss man sich mit den Gutachtern der gewählten Zeitschrift herumschlagen. Bei der Abfassung einer Publikation ist Nüchternheit und Sachlichkeit vonnöten (kein Blabla!), und mogeln geht schon gar nicht, denn man muss ja damit rechnen, ja, man wünscht es sich geradezu, dass andere die Arbeit lesen und möglicherweise etwas nachrechnen oder sogar nachmessen. Aber keinesfalls die Danksagung an den Chef und, wenn möglich, an irgendwelche Koryphäen vergessen!

Noch ein Wort über die Experimentalphysiker! Auch hier sind die goldenen Zeiten vorbei! So war damals der Versuchsaufbau in der Regel nur ein Provisorium, das nur solange zu halten brauchte, bis die letzte Messung gemacht war. Und ein Chef (Stefan) konnte sich über die Vorhaltung seines Assistenten (Boltzmann), dass die von ihm vorgefundenen Geräte verreckt seien, mit den Worten “Vom Schmutz pflege ich zu abstrahieren“ hinwegsetzen. Heute müssen die modernsten – und damit teuersten – Geräte her, wenn man mit der internationalen Konkurrenz mithalten will. Das führt unausweichlich dazu, dass die Hauptaufgabe des Chefs darin besteht, zusätzliche Gelder einzuwerben. Außerdem muss er ständig “auf Achse“ sein, um keine der zahlreichen wichtigen Tagungen zu verpassen und sich dort zu präsentieren. Da er so selbst nicht mehr zu wissenschaftlicher Arbeit kommt, ist er auf möglichst viele (leider nur befristet einzustellende) intelligente post docs angewiesen. Doch auch die wollen finanziert sein!

Der Experimentator hat es zwar grundsätzlich schwerer als der "auf dem hohen Ross der Theorie" sitzende Kollege, da er sich ja mit "Sachen" herumschlagen muss, die sich nach Schiller "hart im Raume stoßen"; dafür winken ihm aber, jedenfalls wenn er tüchtig ist, gleich zwei Erfolgserlebnisse: a) Er bringt die kompliziertere Apparatur zum Laufen, und b) die Messdaten sind (innerhalb der Fehlergrenzen) mit einer theoretischen Vorhersage tatsächlich verträglich.

Doch eine besondere Eigenschaft ist allen (guten) Physikern gemein, nämlich die Fähigkeit, selbständig zu denken. Das bedeutet, auch (scheinbar) gesicherte Erkenntnisse, wenn erforderlich, kritisch zu "hinterfragen", wie man heute sagt, und nicht alles kritiklos zu glauben, was die Koryphäen behaupten. (Auch Genies können irren!) Hier besteht allerdings eine Gefahr, der man aus dem Wege gehen sollte, nämlich die, zu einem "Spinner" zu werden, den keiner mehr ernst nimmt. Es sind dies Leute, die eine physikalische Aussage nur deswegen für falsch halten, weil sie sie nicht verstehen. Tatsächlich findet man heute immer noch einsame Kämpfer, die glauben, die Relativitätstheorie widerlegt zu haben.

Ein schönes Beispiel für die Unvoreingenommenheit des Denkens lieferte der ideenreiche amerikanische Physiker Richard Feynman. Er erzählte folgende Geschichte: Er las eines Tages, dass die Hundenase der menschlichen weit überlegen ist. Sofort fragte er sich, woran das liegen könnte. Seine erste Vermutung war die, dass ein Hund, wenn es darauf ankommt, die Nase dicht über dem Boden hält, während ein Mensch sie ständig hochreckt. Und er führte sogleich ein Experiment aus. Er kroch nämlich – zum Erstaunen seines Hundes – auf allen Vieren durch seine

Wohnung und versuchte, seine Fährte von vorher wiederzufinden. Das gelang ihm jedoch nicht, und er musste zugeben, dass er seinem Hund in puncto Riechleistung “nicht das Wasser reichen konnte“.

Eine segensreiche Eigenschaft eines Physikers sollten wir allerdings keinesfalls vergessen, nämlich seinen ausgeprägten Sinn für einen charakteristischen Humor! Hierzu ein paar Kostproben!

Eine Zeitlang vertraten von der “künstlichen Intelligenz“ schwärmende Forscher die Überzeugung, ein Computer, geeignet programmiert und mit Wörterbuchkenntnissen gefüttert, könne spielend Fachtexte übersetzen (wodurch sich die Kosten menschlicher Übersetzer einsparen ließen). Spaßvögel unter den Physikern meinten dazu, man könne die Qualität der Übersetzung am einfachsten dadurch kontrollieren, dass man den Computer nach erfolgter Übersetzung sogleich eine Rückübersetzung vornehmen lässt. Und sie dachten sich dazu auch gleich schlagende Beispiele aus. So würde nach einer Übersetzung aus dem Deutschen ins Englische und wieder zurück aus dem deutschen Sprichwort “Aus den Augen, aus dem Sinn“ über den Zwischenschritt “out of eyes, out of mind“ der Text “unsichtbarer Idiot“. Tatsächlich hat das Übersetzungsprojekt nie funktioniert und musste aufgegeben werden. Der Computer, der ja keine Ahnung hatte, wovon er sprach, produzierte einfach Unsinn.

Einen ganz besonderen Spaß erlaubten sich die Physiker Ludwig und Thoma. Offenbar unter dem Zwang ihrer Namenskombination stehend, schrieben sie eine durchaus seriöse Ar-



beit auf Bayrisch, die von der Zeitschrift für Physik tatsächlich gedruckt wurde. Ein “Schmankerl“ ist dabei die Einleitung, die ungewöhnlicherweise etwas vom Seelenleben der Autoren verrät. Dort heißt es: Um es nur *einleitend* zu sogn mir ham uns dengt das mir wider lidderahrisch tetig wern mühsen. Das wird jetzt ferlangt und fahst alle füsiger riechten sich dahnach. ... Auch mechdn mir bemergen das es plos ein gans gleiner Beidrag isd was mir machn woln. (Mergst as! Mir sind bescheiden und nichd ährgaitsig. Mir schpeckulirn nichd auf ein Nobellpreis wo es keinen bairischen gar noch nichd gibt.) Aber sind fiele gleine Sachn schon gans niezlich bal man sie zusammenzelt was jäder weis schpeziel in berufsgreisen. (Vastehst! Denn fiele sind erwehlt aber nuhr wenige wern beruhfen.)

Zu der Zeit, als Flugzeugentführungen durch die Drohung, eine eingeschmuggelte Bombe zu zünden, an der Tagesordnung waren, zog ein Theoretiker für sich die Konsequenz, nicht mehr mit dem Flugzeug zu reisen. Er fuhr daher nur noch mit der Bahn zu Konferenzen. Doch eines Tages kam er wieder mit dem Flugzeug. Seine erstaunten Kollegen fragten ihn nach der Ursache seines Sinneswandels. “Die Sache ist ganz einfach“, erklärte er ihnen, “ich habe mir folgendes überlegt: Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich eine Bombe in einem Flugzeug befindet, ist Eins zu Tausend. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Bomben in einem Flugzeug befinden, beträgt dagegen Eins zu einer Million. Seitdem fliege ich wieder und nehme zur Sicherheit selbst eine Bombe mit.“

Eine große Gaudi war es auch, dem Herausgeber einer renommierten Fachzeitschrift eine Jux-Arbeit als seriös unterzujubeln. (Das hatte natürlich nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn sich die Autoren bereits einen Namen in der Wissenschaft gemacht hatten.) Ein solches Kunststück gelang Jordan und de Kroning mit ihrem Artikel *Die Bewegung des Unterkiefers beim Rindvieh während des Prozesses des Wiederkäuens der Nahrung*, der in der Zeitschrift *Nature* (Jahrgang 1927) veröffentlicht wurde. Bereits die Einleitung ist ein Muster an wissenschaftlicher Präzision: Unter den biologischen Erscheinungen, bei denen eine Bevorzugung einer von zwei möglichen Drehrichtungen auftritt (dazu gehört beispielsweise das spiralförmige Wachstum von Kriechpflanzen und der Bau der Schneckengehäuse) gibt es noch eine, die dem Anschein nach bis heute nicht untersucht wurde und auf die wir jetzt die Aufmerksamkeit lenken wollen. Es handelt sich um die Kaubewegungen des Rindviehs. Eine detaillierte Untersuchung zeigt, dass die Bewegung des Unterkiefers relativ zum Oberkiefer weder völlig horizontal noch vollständig vertikal verläuft, sondern vielmehr eine Superposition dieser periodischen Bewegungen darstellt mit einer solchen Phasenverschiebung, dass eine reine Drehbewegung resultiert. Theoretisch ist natürlich eine Drehung in zwei Richtungen zugelassen, und die Beobachtung zeigt, dass in der Natur beide Möglichkeiten verwirklicht sind. Zählen wir die Bewegungsrichtung der Nahrung als positiv, so werden wir als *rechts-* oder *linksdrehende* Kühe solche bezeichnen, bei denen die Kaubewegung (blickt man von vorn) in bzw. entgegen dem Uhrzeigersinn verläuft.