

1

Die Erforschung des Lichts – eine Reise durch die Zeit

»Ich bin ein Teil des Teils, der anfangs alles war,
ein Teil der Finsternis, die sich das Licht gebar,
das stolze Licht, das nun der Mutter Nacht
den alten Rang, den Raum ihr streitig macht.«

Mephistopheles zu Faust, Johann Wolfgang von Goethe.

Das Lebenselixier des blauen Planeten

Im Jahr 1953 gelang Harold Urey und Stanley Miller an der Universität Chicago ein bahnbrechendes Experiment. Die beiden Chemiker simulierten die Bedingungen, wie sie auf der Erde vor rund 4,5 Milliarden Jahren geherrscht haben müssen. Der Blaue Planet war gerade im Entstehen. Für heutige Verhältnisse herrschten damals unwirtliche Bedingungen. Es gab keinen Sauerstoff in der Atmosphäre, orkanartige Stürme trieben meterhohe Wellen über gewaltige Urozeane. In vielen Regionen tobten permanent heftige Gewitter.

Jene Urozeane und die dazugehörige Atmosphäre stellten Harold Urey und Stanley Miller in einem Glaskolbensystem in ihrem Labor nach. In einem Kolben erhitzen die Chemiker Wasser und Ammoniak. In einem zweiten mixten die Chemiker Methan, Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid zu einer künstlichen Atmosphäre zusammen. Diese setzten die Forscher über Elektroden heftigen »Gewittern« aus. Das Experiment war ein geschlossener Kreislauf. Durch die elektrischen Entladungen entstanden aus den Gasen wasserlösliche Verbindungen. Durch Kühlen kondensierten sie und wurden dann wieder in den »Urozean«-Glaskolben geleitet. Dazu setzten die beiden Chemiker die Glaskolben-Anordnung permanent ultravioletter Strahlung aus.

Nach einigen Tagen war es soweit und die Sensation perfekt. In dem Reagenzglas bildeten sich erste organische Verbindungen. Die beiden Forscher entdeckten einfache Moleküle, darunter Aminosäuren und Zucker, die als Bausteine des Lebens gelten.

Neben vielen bahnbrechenden Erkenntnissen bewiesen die Experimente einmal mehr: Leben auf der Erde ist ohne Licht kaum vorstellbar. Die Strahlung der Sonne ist das Lebenselixier des blauen Planeten. Alle Energie, die wir Menschen verbrauchen, stammt letztendlich aus dem Sonnenlicht. Ob wir uns ernähren, Erdöl verbrennen oder Wasser- und Windkraft in Strom umwandeln – immer ist irgendwo die Sonne mit im Spiel. Licht ist pure Energie. Sie steht der Erde seit ihrer Entstehung zur Verfügung. Dabei unterlag die Einstrahlung auf der Erde unregelmäßigen Schwankungen. Insgesamt jedoch hat die Menge der eingestrahlten Energie über die Jahrmilliarden zugenommen. Doch die Natur störte das nicht; sie reagierte auf die Veränderungen und wusste die Strahlungsmenge aus dem Universum immer für sich zu nutzen.

Zwar wurde die Frage nach den Mechanismen der Entstehung des Lebens durch das Experiment von Urey und Miller nicht vollständig geklärt. Aber bis heute gilt der Versuch als ein wichtiger Meilenstein für die Erforschung des Ursprungs des Lebens. Auch heute noch geht man davon aus, dass sich damals unter extremen Umweltbedingungen aus Atomen, wie Kohlenstoff und Wasserstoff gepaart mit Stickstoffverbindungen, komplexere Moleküle bildeten. Daraus entwickelten sich Kleinstlebewesen, zu denen die heute ältesten bekannten Lebensformen, die Archaeobakterien, gehören. Über die Jahrmilliarden sind daraus immer variantenreichere Formen des Lebens entstanden.

Und der Ideenreichtum der Natur ist ungebrochen. Er reicht so weit, dass wir bis heute bei Weitem nicht alle Varianten der Evolution kennen. Immer wieder entdeckt man neue Lebensformen in den Tiefen der Ozeane, in den verborgensten Winkeln der Regenwälder oder den Eiswüsten des Planeten. Aber auch die gemäßigten Breiten des Globus haben sicher noch lange nicht all ihre Geheimnisse preisgegeben.

Als der Mensch das Feuer zähmte – Interview mit Wil Roebroeks



Abb. 2 Wil Roebroeks. Foto: privat.

Wann lernten die Menschen das Feuer und damit auch das Licht zu kontrollieren? Diese Frage ist nicht restlos geklärt. Die Meinungen der Archäologen gehen weit auseinander. Wil Roebroeks, Professor für Archäologie des Paläolithikums an der Universität Leiden, gibt Auskunft über die Erforschung der Beziehung zwischen Mensch und Feuer.

Wann haben die Menschen Ihrer Meinung nach zum ersten Mal den Umgang mit dem Feuer beherrscht?

Roebroeks: Diese Frage wird nach wie vor heftig diskutiert. Die Meinungen gehen auseinander. Sie variieren in dem Zeitraum zwischen 1,8 Millionen Jahren und etwa 300 000 bis 400 000 Jahren vor heute. Meine Kollegin Paola Villa und ich selber tendieren zu dem jüngsten Zeitraum. Wir nehmen an, dass die ersten Menschen von Afrika nach Europa wanderten, ohne dass sie das Feuer bereits kontrollierten.

Wie lernten die Menschen den Umgang mit dem Feuer?

Roebroeks: Das ist natürlich reine Spekulation, darüber etwas zu sagen, aber wir müssen durchaus in Erwägung ziehen, dass die Menschen gerade in vulkanisch geprägten Regionen oft mit dem Feuer konfrontiert waren und dort den Umgang mit ihm lernten. Das dürf-

te zum Beispiel im afrikanischen Rift Valley und im Afar-Dreieck der Fall gewesen sein. Studien auf Java haben auch gezeigt, dass tropische Waldbrände Lehrmeister für den Gebrauch von Feuer von *Homo erectus* gewesen sein könnten. Das Leben in feuerreichen Gebieten könnte den gelegentlichen Gebrauch von Feuer begünstigt haben, aber archäologisch nachweisbar ist das kaum.

Wie kann man den Gebrauch von Feuer nachweisen, wenn er mehrere 100 000 Jahre zurückliegt?

Roebroeks: Wir können den Gebrauch von Feuer vor mehr als 250 000 Jahren bei den Neandertalern an mehreren Hundert Feuerstellen nachweisen. Dort wird ersichtlich, dass sie zum Beispiel ihre Jagdbeute mit Hilfe von Feuer zubereiteten. Man findet immer wieder verbrannte Knochenstücke oder Holzkohle. Allerdings muss man bei solchen Funden aufpassen, dass man sie in den richtigen Kontext stellt, denn solche Überreste können auch durch natürliche Brände entstanden sein.

An einigen Stellen können wir aber auch zeigen, dass die Neandertaler mit Feuer Werkzeuge hergestellt haben. In einigen Fällen produzierten sie sogar Klebstoff, was ein komplizierter Prozess war, bei dem die Neandertaler sicher Kontrolle über das Feuer und die damit verbundene richtige Temperatureinstellung benötigten.

Wo liegen die ältesten von Menschen benutzten Feuerstellen in Europa?

Roebroeks: Mit zu den ältesten Feuerstellen in Europa gehört zum Beispiel »Beeches Pit« in Großbritannien. Dort gibt es Nachweise, dass vor 400 000 Jahren, im Mittleren Pleistozän, mit Feuer gearbeitet wurde.

Licht aus Korpuskeln

Es mag heute etwas seltsam anmuten, einen der größten Naturforscher des 17. Jahrhunderts als Philosophen zu bezeichnen. Doch zu einer Zeit, in der Theologie, Naturwissenschaft und Philosophie noch nicht durch klare Richtlinien getrennt waren, war es durchaus üblich, einen Gelehrten wie Isaac Newton als Philosophen zu bezeichnen. Und in der Tat: Neben harten Zahlen und Fakten finden sich in Newtons Werken nicht selten tief philosophische Gedankengänge.

Vor 1,5 Millionen Jahren	Der Mensch lernt das Feuer kennen und allmählich für sich zu nutzen.
Rund 10 000 v. Chr.	Kienespäne dienen als Lichtquellen. Kienespäne sind harzreiche Holzstücke. Sie gelten als die ältesten bekannten Grubenbeleuchtungen in Mitteleuropa und wurden bis ins 19. Jahrhundert verwendet.
Ab 3000 v. Chr.	In Mesopotamien und Ägypten benutzen die Menschen Bronzespiegel. Die Spiegel dienten oft als Grabbeigaben.
5. Jhd. v. Chr.	Griechische Philosophen und Gelehrte schreiben ihre Naturbeobachtungen auf. Dabei spielen Licht und Optik eine wichtige Rolle. So schreibt zum Beispiel Euklid (360–280 v. Chr.) in seiner »Optika«, dass Licht in geraden Linien reist. Er beschreibt die Gesetze der Reflexion. Er glaubt, dass Licht aus den Augen austritt und Objekte beleuchtet.
5. Jhd. v. Chr.	Römer und Griechen nutzen einfache Linsen als Brenngläser.
Um 1000 n. Chr.	Der Mathematiker und Astronom Alhazen (965–1040) veröffentlicht sein Werk »Opticae Thesaurus«. Darin beschreibt er zahlreiche optische Experimente. Alhazen erkannte die Bedeutung der Linse im Auge und widerlegte die Sehstrahlen-Theorie von Euklid. Er erkannte über die Beobachtung des Mondes auch, dass Lichtbrechung in der Luft stattfinden muss.
11. und 12. Jhd n. Chr.	In Europa entstehen gotische Kathedralen. Das Licht spielt dabei eine zentrale Rolle. Die Gotteshäuser sind in Rubinrot, Saphirblau, Smaragdgrün oder Gold getaucht. Farbe bedeutet Sieg des Lichts über die Finsternis: Gott ist Licht. Zentrales Element der Kirchen ist die Fensterrose, die vorwiegend nach Westen ausgerichtet wird. Die untergehende Sonne bringt das Licht zu seiner größten Strahlkraft.

Heute gilt Newton vor allem als Begründer der klassischen Mechanik. Der englische Adelige konnte sich aber auch große Meriten bei der Erforschung des Lichts auf die Fahnen schreiben. Im Jahr 1669 übernahm Newton den prestigereichen Lukasischen Lehrstuhl für Mathematik am Trinity College in Cambridge (England). Neben der Mathematik lehrte Newton dort aber auch Optik. Denn Newtons Interesse galt schon länger den Phänomenen rund um das Licht. Er hatte bereits seine Antrittsvorlesung über die Theorie der Farben gehalten. Das lag insofern nahe, als dass man damals davon ausging,

dass der Kosmos nach strikten mathematischen Grundsätzen angelegt sei.

Im Jahr 1704 veröffentlichte Newton dann sein Hauptwerk über die Optik: »*Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*«. Bereits 1666 hatte er weißes Licht mit Hilfe von Prismen in seine farbigen Bestandteile aufgespalten. Daraufhin stellt Newton seine »Korpuskeltheorie« auf. Er kommt zu dem Schluss, dass Licht aus unveränderlichen, atomähnlichen Lichtteilchen besteht. Der Eindruck von Farbe entsteht durch die unterschiedliche Größe der Korpuskel. Ebenso war Newton der Überzeugung, dass die Erwärmung von Gegenständen durch Licht, nicht nur durch bloße Druckwirkung zustande kommt, sondern es müsse zudem irgendeine Art von Bewegung vorhanden sein. Bei vielen seiner Zeitgenossen, stieß der große Naturforscher mit seinen Thesen auf erbitterten Widerstand. Man ging in der Regel davon aus, dass Licht nur aus Wellen besteht.

Ist die Lichtgeschwindigkeit endlich?

Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts endlich oder unendlich? Diese Frage beschäftigte die Wissenschaft schon seit Jahrhunderten. Vor allem die Anhänger von Aristoteles plädierten dafür, dass die Lichtgeschwindigkeit unendlich groß sei.

Einen ersten schlagkräftigen Beweis für die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit, lieferte der dänische Astronom Ole Christensen Rømer (1644–1710). Als Beweis dienten ihm die Monde des Planeten Jupiter. Der italienische Mathematiker Giovanni Domenico Cassini hatte 1668 in Bologna aufgrund der Umlaufzeiten eine exakte Tabelle aufgestellt, wann sich die Jupitermonde verfinsterten. Je nachdem in welcher Entfernung die Erde zum Jupiter steht, verändert sich jedoch der Zeitpunkt, zu dem man die Verfinsterung von der Erde aus aufzeichnen kann. Je weiter die Erde vom Jupiter entfernt ist, desto später beobachtete man das Eintreten der Monde in den Jupiterschatten.

Aus dieser Tatsache schloss Ole Rømer, dass die Geschwindigkeit des Lichts endlich sein muss. In seinem Artikel »*Démonstration touchant le mouvement de la lumière trouvé par M. Roemer de l'Académie des sciences*« gab Rømer allerdings keine Geschwindigkeit an. Er schrieb lediglich, dass das Licht 22 Minuten benötigt, um einmal

den Durchmesser der Erdbahn um die Sonne zurückzulegen (rund 300 Millionen Kilometer). Aus Rømers Beobachtungen wiederum errechnete der niederländische Astronom Christiaan Huygens im Jahr 1678 die Geschwindigkeit des Lichts mit 212 000 Kilometern pro Sekunde.

Elegante Lichtwellen

»Schließlich bleibt noch viel mehr über die Natur des Lichts zu erforschen übrig, als ich davon entdeckt zu haben glaube, und ich würde demjenigen zu grossem Danke verpflichtet sein, der meine hierhin mangelnden Erkenntnisse ergänzen könnte.«

Christiaan Huygens im Vorwort zu »Abhandlung über das Licht«.

Das Licht zu beherrschen ist seit vielen Jahrhunderten der Traum der Naturforscher. Wie man Licht mit Spiegeln umleitete, war schon mehrere Jahrtausende bekannt. Auch einfache Linsen waren schon lange in Gebrauch.

Doch erst richtig in Mode kamen Linsen und andere Optiken, wie etwa Fernrohre oder Mikroskope, zu Beginn des 17. Jahrhunderts. Man experimentierte viel, doch die Erfolge, das Licht zu kontrollieren, ließen erst einmal zu wünschen übrig.

Linsen und vor allem Teleskope waren auch die große Leidenschaft von Christiaan Huygens (1629–1695). Doch was der Niederländer durch seine gekauften Optiken beobachten konnte, stellte ihn nicht zufrieden. Die Abbildungsqualität war einfach zu schlecht. Huygens Ehrgeiz war geweckt, er ging das Problem neu an und beschäftigte sich erst einmal ausgiebig mit der Natur des Lichts. Danach machte er sich daran, neue Geräte zu entwickeln.

Um das Jahr 1650 bemerkte Huygens, dass man die Eigenschaften des Lichts erklären konnte, wenn man es analog zu Wellen im Wasser betrachtet. Daraufhin formulierte der Astronom das berühmte Huygenssche Prinzip, nach dem jeder Punkt auf einer sich vorwärts bewegenden Wellenfront selbst eine Quelle neuer Wellen ist. Aus diesem Prinzip entwickelte er die Wellentheorie des Lichts. Er schreibt in seiner *»Abhandlung über das Licht«*: »Hinsichtlich der Fortpflanzung dieser Wellen ist ferner noch zu bedenken, dass jedes Theilchen des Stoffes, in welchem eine Welle sich ausbreitet, nicht nur dem nächs-

ten Theilchen, welches in der von dem leuchtenden Punkte aus gezogenen geraden Linie liegt, seine Bewegung mittheilen muss, sondern nothwendig allen übrigen davon abgiebt, welche es berühren und seiner Bewegung widersetzen. Daher muss sich um jedes Theilchen eine Welle bilden, deren Mittelpunkt dieses Theilchen ist.«

Außerdem war der Naturforscher überzeugt, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich sein muss. Zunächst wurde Huygens nicht ernst genommen, da man die »Korpuskeltheorie« von Isaac Newton favorisierte. Diese Theorie lehnte Huygens strikt ab. Er argumentierte, dass sich die Lichtteilchen gegenseitig stören müssten, wenn sie sich gegenläufig bewegten.

Seine bahnbrechenden Erkenntnisse ermöglichten es Huygens, die optischen Qualitäten von Teleskopen und Linsen deutlich zu verbessern. Mit einem selbst gebauten und stark verbesserten Teleskop entdeckte er im Jahr 1655 schließlich den Saturnmond Titan. Ebenso wies er nach, dass der Mars rotiert.

Anfang des 18. Jahrhunderts war man sich also noch sehr uneinig was Licht eigentlich sei: Man hatte die Wahl, was man glauben wollte: Der französische Philosoph und Mathematiker René Descartes (1596–1650) vertrat die Meinung, dass der Lichteindruck im Auge durch Bewegung von Kügelchen hervorgerufen wurde. Christiaan Huygens war der Ansicht, dass der Stoff, aus dem das Licht ist, Wellennatur haben muss. Und auch Isaac Newton war noch im Rennen mit seiner »Korpuskeltheorie«, wonach Licht aus unveränderlichen, atomähnlichen Lichtteilchen bestehen muss.

Die Psychologie des Lichts

»Da wir die Farben in ihrer Entstehung sowie deren harmonische Verhältnisse kennen, so läßt sich erwarten, daß auch die Charaktere der willkürlichen Zusammenstellungen von der verschiedensten Bedeutung sein werden.«

Johann Wolfgang von Goethe in »Zur Farbenlehre« (1810).

Der Brocken im Harz ist für seine spektakulären Winterimpressionen bekannt. Verschneite Bäume stehen wie Statuen in einer tiefweißen Landschaft. Märchenhaft wirkt das Szenario vor allem dann, wenn zuvor ein kräftiger Wind durch die Bäume geblasen hat und sie sich in eisige Schneeskulpturen verwandelt haben. Im Winter 1777

besuchte Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832) den Brocken. Er war überwältigt von der Natur und beschreibt einen besonders eindrucksvollen Sonnenuntergang: »Waren den Tag über, bei dem gelblichen Ton des Schnees, schon leise violette Schatten bemerklich gewesen, so mußte man sie nun für hochblau ansprechen, als ein gesteigertes Gelb von den beleuchteten Teilen widerschien. Als aber die Sonne sich endlich ihrem Niedergang näherte und ihr durch die stärkeren Dünste höchst gemäßigter Strahl die ganze, mich umgebende Welt mit der schönsten Purpurfarbe überzog, da verwandelte sich die Schattenfarbe in ein Grün, das nach seiner Klarheit einem Meergrün, nach seiner Schönheit einem Smaragdgrün verglichen werden konnte.«

Spätestens zu diesem Zeitpunkt befasste sich einer der größten deutschen Dichter intensiv mit dem Phänomen Licht und seinen farblichen Erscheinungen. Zwar irrte Goethe vor allem in seinen naturwissenschaftlichen Betrachtungen des Lichts. So behauptete er, dass Licht eine unteilbare Einheit sei und Farben durch das Zusammenwirken von Hell und Dunkel zustande kommen.

Doch Anerkennung erfuhr Goethe vor allem in seinen psychologischen Deutungen des Farbspektrums in seinem 1810 erschienen Werk »Zur Farbenlehre«. Darin entwickelt er den berühmten Farbkreis und ordnet jeder Farbe besondere Attribute zu. So verbindet er etwa Gelb mit heiteren, sanften und warmen Gefühlen. Blau habe die Aura der Kälte und wirke schattenhaft.

Wie man Farben gezielt einsetzt und besondere Stimmungen erzeugt, haben Goethes Zeitgenossen, die Maler der Romantik, eindrucksvoll gezeigt. So leben die Bilder von Caspar David Friedrich (1774–1840) oder William Turner (1775–1851) vor allem durch den gezielten und charakteristischen Einsatz des Lichts. Beide Maler schafften über das Licht geheimnisvolle Stimmungen. Während bei Friedrichs Bildern das Licht für das melancholisch Göttliche steht und meist klare Formen beleuchtet, spielt es bei Turners Werken eine ganz andere Rolle. Hier löst es nicht selten alle Konturen auf – Licht und Farbe verschlingen alles.

Die geheimen Botschaften im Licht

Im Licht verstecken sich eine Menge Informationen. Diese bahnbrechende Erkenntnis gelang dem Münchner Optiker und Physiker Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Fraunhofer spaltet Licht in sein Spektrum auf. Dabei bemerkte er, dass sich an einigen Stellen der Farbpalette dunkle Streifen befinden. Das war jedoch keine Sensation mehr. Schon einige Jahre zuvor hatte der englische Chemiker William Wollaston (1766–1828) diese merkwürdigen Striche bemerkt. Er konnte sie aber nicht deuten.

Fraunhofer löste das Rätsel. Er erkannte, dass diese Linien in der Natur des Sonnenlichts selbst liegen. Die nach ihm benannten Fraunhoferschen Linien sind so genannte Absorptionslinien. Sie entstehen durch die Eliminierung bestimmter Wellenlängen des Lichts durch Gase, die sich in der Sonnen-Chromosphäre befinden. Die Chromosphäre ist eine Schicht um die Sonne, die überwiegend aus Helium und Wasserstoff besteht, jedoch auch Spuren anderer Elemente enthält. Fraunhofer erkannte, dass prinzipiell jedes chemische Element in Gasform, das von einer dahinterliegenden Lichtquelle durchleuchtet wird, bestimmte charakteristische dunkle Absorptionslinien im Spektrum der Lichtquelle hinterlässt. Die gasförmigen Elemente blockieren genau die Wellenlängen der Lichtquelle, die sie selbst abstrahlen würden, wenn sie heißer wären. Im Fall unseres Sonnenlichts blockieren mehrere gasförmige Elemente die Strahlung an bestimmten Stellen des Spektrums. Damit geben sie mit Hilfe der Absorptionslinien Einblicke in die Zusammensetzung der beobachteten Molekül- bzw. Atomansammlung rund um die Sonne. Insgesamt fand Fraunhofer rund 570 solcher Linien und wurde damit zum Begründer der modernen Spektralanalyse.

Mit Fraunhofers Entdeckung wurde es nun erstmals möglich, genauere Einblicke in das ferne Universum zu erhalten, denn das von Sternen ausgesendete Licht verfügt über Absorptionslinien. Sie befinden sich, je nach Stern, an unterschiedlichen Stellen und geben damit Aufschluss über die chemischen Zusammensetzung seiner Atmosphäre.

Und so verwundert es nicht, wenn man als Spaziergänger auf Joseph von Fraunhofers Grabstein im altherwürdigen, Efeu umrankten Südfriedhof in München die Inschrift »Aproximavit sidera« liest: Er brachte uns die Gestirne näher.

Vier Formeln für das Licht

Eigentlich war James Clerk Maxwell (1831–1879) ein Allrounder der Physik. Er befasste sich mit Geometrie und Algebra, aber auch mit der Theorie des Farbsehens oder Astronomie. Doch die meiste Zeit seines Lebens beschäftigte sich der schottische Forscher mit der Elektrizität.

Aus einer Vielzahl von Formeln extrahierte Maxwell schließlich vier Gleichungen, in denen er seine Erkenntnisse über die Natur der Elektrizität und des Magnetismus sowie ihre Wirkung auf die Materie zusammenfasste. Heute sind diese vier Gleichungen bekannt als die Maxwell-Gleichungen.

Maxwell sagte voraus, dass es im leeren Raum schwingende elektrische und magnetische Felder geben müsse, die sich bewegen. Die Geschwindigkeit konnte er aus einfachen elektrischen Experimenten vorhersagen. Indem er die Daten benutzte, die damals zur Verfügung standen, berechnete er die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu 310 740 000 Metern pro Sekunde. Über die mathematisch bestimmte Fortpflanzungsgeschwindigkeit schrieb Maxwell 1864 sinngemäß: »Die Geschwindigkeit ist nahezu die des Lichts, so dass es so aussieht, als ob wir daraus schließen können, dass das Licht selber eine elektromagnetische ›Störung‹ ist, die sich wellenförmig als elektromagnetisches Feld ausbreitet.« Damit gelang Maxwell erstmals die Verbindung der Optik mit dem Elektromagnetismus. Licht musste also eine Form von elektromagnetischer Strahlung sein. Elektrische und magnetische Felder bedingen sich gegenseitig. Damit hatte Maxwell voll ins Schwarze getroffen. Zwei Jahre später bewies der deutsche Physiker Heinrich Hertz Maxwells Theorie experimentell.

Mit seiner Berechnung der Lichtgeschwindigkeit war Maxwell ebenfalls schon nahe am heute gültigen Wert. Einen fast exakten Wert erhielt der amerikanische Physiker Albert A. Michelson in den 1920er Jahren. Damals kam der Wissenschaftler bei seinen zahlreichen Messungen der Lichtgeschwindigkeit schließlich auf den Wert von rund 299 774 000 Metern pro Sekunde. Im Jahr 1983 legte man die Lichtgeschwindigkeit mit 299 792 458 Metern pro Sekunde fest. Dieser Wert gilt für die Ausbreitung im Vakuum. In Materie weicht die Lichtgeschwindigkeit deutlich ab.

Licht als Verkehrsmittel

»Das Licht und die, von diesem unzertrennliche, strahlende Wärme sind für die nicht selbstleuchtenden Weltkörper, für die Oberfläche unseres Planeten eine Hauptursach aller Bewegung und alles organischen Lebens.«

Alexander von Humboldt, Kosmos in »Entwurf einer physischen Weltbeschreibung«.

Im Jahr 1845 war es soweit: Alexander von Humboldt (1769–1859) erreichte sein großes Ziel, für das er jahrelang gearbeitet hat. Der berühmte Geograf hatte zahllose Länder und Kontinente bereist und nun sein Wissen und die Erkenntnisse seiner Zeit über die Natur zusammengefasst in einem einzigen monumentalen Werk. Der große deutsche Naturforscher veröffentlichte den ersten Band seiner fünfteiligen *Enzyklopädie »Kosmos-Entwurf einer physischen Weltbeschreibung«*. Rund 50 Naturwissenschaftler, Maler und Kartenzeichner arbeiteten Humboldt für seine Publikation zu. Damit hatte der Weltenbummler zur Dokumentation seiner Reisen und allgemeinen Naturbetrachtungen ein Unternehmen mit den Dimensionen eines Verlages um sich herum geschaffen.

Das Werk mit mehr als 900 Seiten löste einen Massenansturm auf die Buchläden aus und avancierte schnell zum Bestseller. Auch über die Natur des Lichts machte sich Humboldt seine Gedanken: »Durch den Einfluß der Gravitation oder allgemeinen Schwere, durch Licht und strahlende Wärme stehen wir, wie man mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen kann, in Verkehr nicht bloß mit unserer Sonne, sondern auch mit allen anderen leuchtenden Sonnen des Firmaments«. Zu Humboldts Schaffenszeit war auch die Lichtgeschwindigkeit schon fast exakt bekannt. Er erwähnt diese in seinen astronomischen Ausführungen mit 308 000 Kilometern in der Sekunde. Ebenso schreibt er, dass damit das Licht von der Sonne zur Erde rund 8 Minuten und 17 Sekunden benötigt.

Knapp 50 Jahre später las Albert Einstein fasziniert Humboldts Naturbetrachtungen. Gebannt verschlang der spätere Physik-Nobelpreisträger auch die gesammelten wissenschaftlichen Aufzeichnungen über das Licht. Im Jahr 1895 schrieb Einstein dann selbst seine ersten Ausführungen über die *»Ausbreitung des Lichts«*.

Am Vorabend der modernen Physik

Anfangs war alles höchst spekulativ. Viele Tage und Nächte grübelte Max Planck (1858–1947) schon an einem Problem, das ihn nicht mehr losließ. Es drehte sich um warme, strahlende Körper. Man kennt das Phänomen bei Herdplatten. Werden diese erhitzt, schimmern sie im Dunklen oft rötlich und senden selber Strahlung aus.

Die Gedanken des deutschen Physikers drehten sich eher um einen idealisierten, so genannten Schwarzen Körper. Ein solcher Körper würde die Strahlung des Lichts vollständig aufnehmen. Zugleich ist er eine Strahlungsquelle, deren Wellenlängen von der Temperatur abhängen. Zur letzten Jahrhundertwende war das Prinzip bekannt. Doch Realität und Theorie klafften noch weit auseinander. Die Verteilung der Strahlung auf die einzelnen Wellenlängen ergab bei theoretischen Berechnungen stets Ergebnisse, die mit experimentellen Messungen nicht im Einklang standen.

Max Planck wollte das Problem am Schreibtisch lösen und eine Formel mathematisch so konstruieren, dass sie mit den Ergebnissen der Messungen im Einklang gebracht werden konnte.

Schließlich fand er eine Formel, die in sich genial war. Mathematisch gesehen aber wäre sie kaum in die Annalen der Physik eingegangen. Erst ihre Deutung verhalf ihr zu späterem Weltruhm: Wenn die Experimente mit der theoretischen Formel übereinstimmen, dann muss die Abstrahlung vom Schwarzen Körper eine Eigenschaft besitzen, die noch unbekannt ist, die aber in der Formel als Geheimnis enthalten ist.

Schließlich erkannte Planck, dass die ausgestrahlte Energie eines strahlenden Körpers nicht gleichmäßig und kontinuierlich abgegeben wird, sondern sich aufteilt in sehr, sehr kleine Energieportionen. Max Planck bezeichnete sie als Quanten. Zudem konnte der Physiker die Größe dieser Quanten berechnen und mit der Strahlung in Einklang bringen.

So kam Planck schließlich zu dem Ergebnis, dass jede Temperaturstrahlung nicht aus zusammenhängenden Wellen, sondern aus einer ungeheuren Vielzahl einzelner, voneinander unabhängiger, kurzer Wellenzüge mit genau bestimmbarer Energie besteht. Die Energie dieser Wellenzüge ist proportional zu ihrer Frequenz. Wenn also Atome eines glühenden Körpers Energie in Form von Licht abgeben, so

können sie dies nur in kleinen Portionen, also eben den »Quanten« tun.

In seiner Formel führte Max Planck, die Größe h ein. Zunächst war die Konstante nur mathematisches Hilfsmittel oder ein Akt der Verzweiflung, wie Planck es einmal ausdrückte. Heute ist sie eine der fundamentalen Naturkonstanten und trägt den Namen »Plancksches Wirkungsquantum«. Sie besagt, dass manche physikalische Eigenschaften nicht jeden beliebigen Wert annehmen, sondern immer nur bestimmte Größen, die ein Vielfaches des Wirkungsquantums sind. Die revolutionäre Annahme, dass Energie nicht in beliebigen Größen, sondern nur aufgeteilt in einzelnen Quanten ausgestrahlt werden kann, führte zu weitreichenden Konsequenzen und vielen neuen Erkenntnissen, vor allem in den folgenden 30 Jahren.

Nur fünf Jahre später gelang Albert Einstein mit diesem Wissen die richtige Deutung der Wechselwirkung von Licht auf Metalle. Etwas später folgerte Niels Bohr (1885–1962), dass in Atomen die Elektronen nicht auf willkürlichen Bahnen um den Atomkern kreisen, sondern dass sie sich auf bestimmten Orbitalen, den Quantenbahnen, bewegen.

So setzte Max Planck eine tiefgreifende Umwälzung des physikalischen Weltbildes in Gang. Er wurde zum Begründer der modernen Physik und das Jahr 1900 zum »Geburtsjahr« der von ihm begründeten Quantentheorie. Der erste Sturm der neuen Ära endete in den 1920er Jahren. Man kam zu der Einsicht, dass im Innersten der Welt nichts so ist, wie wir es aus unserem Alltag kennen, sondern dass dort der Zufall regiert. Die Atome sind es, die die verschiedenartigsten Möglichkeiten im Mikrokosmos eröffnen.

Im Bann der Lichtphänomene

»Jeder Lichtstrahl bewegt sich im ruhenden Koordinatensystem mit der bestimmten Geschwindigkeit V , unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist.«

Albert Einstein in »Zur Elektrodynamik bewegter Körper« in den »Annalen der Physik«, 1905.

Bücher und die Begabung, völlig in wissenschaftliche Materie versinken zu können, eröffneten dem jungen Albert Einstein (1879–

1955) die faszinierende Welt der Naturforscher. Einstein las, wie Galileo Galilei durch Fernrohre die Sterne beobachtete. Er erfuhr, wie Newton seine naturwissenschaftlich-philosophische Weltanschauung entwickelte. Doch mindestens ebenso gefesselt war er von Alexander von Humboldts »Kosmos«.

Das Thema Licht spielte bei allen Aufzeichnungen immer eine herausragende Rolle. Das Phänomen sollte auch Einstein sein Leben lang beschäftigen. Schon in jungen Jahren grübelte er stundenlang über alles, was er gelesen hatte und selber beobachten konnte. Im Jahr 1900 hatte Einstein an der Eidgenössisch-Technischen Hochschule Zürich sein Diplom als Lehrer für Mathematik und Physik in der Tasche. In dieser Zeit dürften bei dem jungen Mann schon die ersten Gedanken gereift sein, dass Licht nicht, wie bisher angenommen, lediglich eine kontinuierliche elektromagnetische Welle ist, sondern auch Teilchencharakter haben muss. Seine Ansichten veröffentlichte er im Jahr 1905 in dem Wissenschaftsjournal »Annalen der Physik« unter dem Titel »Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt«.

Dort schrieb Albert Einstein, indem er auch Gedanken weiterführte, die Max Planck bereits formuliert hatte: »Die übliche Auffassung, daß die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, findet bei dem Versuch, die lichtelektrischen Erscheinungen zu erklären, besonders große Schwierigkeiten ... « Einstein führte weiter aus: »Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als ganze absorbiert und erzeugt werden können.«

In seiner Veröffentlichung benutzte Einstein damit erstmals den Begriff der Lichtquanten, die er auch als Energiequanten bezeichnete. Die Bezeichnung »Photonen« wird erst später eingeführt. Einsteins legendärer Aufsatz über die so genannte Lichtquantentheorie in den Annalen der Physik gilt als die Geburtsstunde des »Welle-Teilchen-Dualismus« des Lichts.

Unmittelbar aus der Tatsache, dass Licht sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften haben muss, leitete Einstein, ebenfalls im Jahr 1905, den so genannten »Fotoelektrischen Effekt« ab. Der Effekt be-

schreibt das Freisetzen von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Einwirkung von elektromagnetischer Strahlung, wie eben etwa Licht. Das Phänomen war bereits aus Experimenten bekannt, konnte jedoch nicht erklärt werden, da man der festen Überzeugung war, dass Licht nur Welleneigenschaften besitzt.

Einstein schrieb in seinem Aufsatz: »In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie der Elektronen. Ein im Innern des Körpers mit kinetischer Energie versehenes Elektron wird, wenn es die Oberfläche erreicht hat, einen Teil seiner kinetischen Energie eingebüßt haben. Außerdem wird anzunehmen sein, dass jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine Arbeit zu leisten hat.«

Die Geheimnisse rund um das Licht ließen Albert Einstein nicht mehr los. »Für den Rest meines Lebens will ich nachdenken, was Licht ist«, soll er schon im Jahr 1916 gesagt haben.

Seine Ausführungen über den »Fotoelektrischen Effekt« brachten Einstein im Jahr 1922 rückwirkend für das Jahr 1921 den Nobelpreis ein. Die bahnbrechenden Erkenntnisse des legendären Physikers sind heute noch Grundlage für viele Aspekte der Quantenoptik.

Das Atom wird quantisiert

Physiologie, Philosophie und Physik gehörten zu den Lieblingsthemen, die Christian Bohr mit seinen Söhnen diskutierte. Diese Gespräche prägten Niels Bohr (1885–1962) als jungen Mann stark. Sie dürften ihn dazu bewegt haben, an der Universität Kopenhagen Physik und Philosophie zu studieren. Das Studium hat sich gelohnt. Gerade einmal 19 Jahre später bekam er 1922 den Nobelpreis für Physik.

In unserem Alltag hat sich Niels Bohr vor allem in Form von Logos verewigt. Dort ist oft eine sehr stilisierte Version seines Atommodells zu sehen: Kleine Elektronen umkreisen einen größeren Atomkern, wie etwa Planeten unsere Sonne. Auch wenn das Bohrsche Atommodell heute nicht mehr gültig ist, so prägt es unsere Assoziationen mit dem Allerkleinsten bis heute.

Erste Gedanken zu seinem Modell schrieb Niels Bohr in der Zeitschrift *Philosophical Magazine* mit seinem Artikel »On the Constitution of Atoms and Molecules« im Jahr 1913 nieder. Bohr ging davon aus, dass

das Atom aus einem positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen besteht, die um den Kern kreisen. Der Radius der Elektronen um den Kern ändert sich nicht kontinuierlich, sondern nur sprunghaft. Atome können Licht ausstrahlen oder aufnehmen. Die Aussendung oder Aufnahme des Lichts geschieht, indem sich Elektronen von einem Energieniveau auf ein anderes bewegen. Licht wird dabei von den Elektronen in Quanten ausgestrahlt oder aufgenommen.

Doch schon bei seiner Entwicklung wies das Modell Schwächen auf. Es wurde aber zu einem wichtigen Meilenstein auf dem Weg zur Quantenphysik, denn es erklärte zum ersten Mal die Quantisierung in Atomen. Bohrs Atommodell wurde u. a. von Werner Heisenberg (1901–1976) entscheidend verfeinert. Heisenberg war Schüler von Bohr und formulierte 1927 die nach ihm benannte Heisenbergsche Unschärferelation. Sie ist zu einer der fundamentalen Aussagen der Quantenmechanik geworden und besagt, dass bestimmte Messgrößen eines Teilchens (wie sein Ort und Impuls) nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können.

Die Massenverteilung im Atom

Betrachtet man lediglich die Massenverteilung im Atom, dann nimmt sein Kern eine enorme Vormachtstellung ein: Dort bündeln sich nämlich mehr als 99 Prozent seiner Gesamtmasse. Im Kern tummeln sich die positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Elektronen. Die Kernmaterie geizt nicht mit Superlativen, so ist ihre Dichte gigantisch. Vergleicht man die Kerndichte mit

einem Stück Würfelzucker, müsste dieses 200 Milliarden Kilogramm wiegen. Nach Albert Einsteins Formel $E = mc^2$ sind Energie und Masse äquivalent. Ein schlagkräftiger Beweis dafür ist der Atomkern. Seine Bestandteile einzeln zusammen betrachtet sind schwerer als der Atomkern in seiner Gesamtheit. Dieser Massendefekt entspricht der Bindungsenergie des Kerns.

Licht und Materie im Wechselspiel

Etwa zeitgleich mit den naturwissenschaftlich-philosophischen Betrachtungen des Lichts begannen die Griechen um 500 v. Chr. sich auch mit der Materie zu beschäftigen. Was ist Materie? Wie ist sie aufgebaut? Gibt es kleinste, unteilbare Partikel? Wie beim Problem »Licht« dauerte es fast ebenso lange, bis Mitte des 20. Jahrhunderts zumindest die grundlegendsten Fragen rund um die Materie beant-

Zeittafel 2 Im Zeitraffer: Von Korpuskeln hin zur Quantenphysik.

- 1666** Der englische Naturforscher Isaac Newton stellt seine »Korpuskeltheorie« auf. Er kommt zu dem Schluss, dass Licht aus unveränderlichen, atomähnlichen Lichtteilchen aufgebaut ist. Der Eindruck von Farbe entsteht durch die unterschiedliche Größe der Korpuskel.
- um 1675** Der niederländische Astronom Christiaan Huygens vergleicht die Eigenschaften des Lichts mit Wasserwellen. Daraufhin formulierte er das Huygenssche Prinzip, nach dem jeder Punkt auf einer sich vorwärtsbewegenden Wellenfront selbst eine Quelle neuer Wellen ist.
- 1676** Der dänische Astronom Ole Christensen Rømer kommt zu dem Schluss, dass die Lichtgeschwindigkeit endlich ist.
- 1800** Der deutsch-britische Astronom Sir William Herschel entdeckt die Infrarotstrahlung, indem er Sonnenlicht durch ein Prisma lenkt und hinter dem roten Ende des sichtbaren Spektrums ein Thermometer anbringt. Dort steigt die Temperatur. Herschel schließt daraus, dass dort eine unsichtbare Form von Energie wirksam ist.
- 1810** Der deutsche Dichter Johann Wolfgang von Goethe veröffentlicht seine Farbenlehre und macht sich Gedanken zur psychologischen Wirkung von Farben und Licht.
- 1814** Der Münchner Optiker und Physiker Joseph von Fraunhofer entdeckt die nach ihm benannten Fraunhoferschen Linien. Sie entstehen durch die Eliminierung bestimmter Wellenlängen des Lichts durch Gase.
- 1864** Der schottische Physiker James Clerk Maxwell postuliert, dass Licht eine elektromagnetische Schwingung ist. Zwei Jahre später beweist der deutsche Physiker Heinrich Hertz Maxwells Überlegungen.
- 1900** Der deutsche Physiker Max Planck kommt zu dem Schluss, dass elektromagnetische Strahlung nicht kontinuierlich, sondern in Paketen ausgesendet wird. Er nennt sie Quanten.
- 1905** Albert Einstein führt den Begriff der Lichtquanten ein. Sein legendärer Aufsatz über die »Lichtquantentheorie« in den Annalen der Physik gilt als die Geburtsstunde des »Welle-Teilchen-Dualismus« des Lichts.
- 1913** Der dänische Physiker Niels Bohr erkennt, dass Atome Licht ausstrahlen oder aufnehmen können. Das geschieht, indem sich Elektronen in den Atomen von einem Energieniveau auf ein anderes bewegen. Licht wird dabei von den Elektronen in Quanten ausgestrahlt oder aufgenommen.
- um 1926** Der amerikanische Physiker Albert A. Michelson misst die Lichtgeschwindigkeit mit rund 299 774 000 Metern pro Sekunde. Der heute gültige Wert ist: 299 792 458 Meter pro Sekunde.
- 1927** Der deutsche Physiker Werner Heisenberg veröffentlicht seine Unschärferelation, nach der der Ort und der Impuls eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt bestimmbar sind. Das Zeitalter der Quantenmechanik hat endgültig die klassischen Vorstellungen vom Aufbau des Mikrokosmos abgelöst.
-

wortet schienen. Und gerade zu dieser Zeit schloss sich der Kreis: Vehement kam das Licht wieder ins Spiel bei der Erforschung der Materie. Heute sind in der Quantenphysik und den Laserwissenschaften Licht und Materie mehr denn je miteinander verwoben. Mit Hilfe von Licht tauchen die Wissenschaftler immer tiefer ein in den Aufbau und die Verhaltensweisen der kleinsten Teilchen. Mit Licht kontrolliert man Teilchen oder beobachtet sie.

Unter extremen Bedingungen kann man sogar Materie erzeugen, wie ein besonders Aufsehen erregendes Experiment im Jahr 1997 zeigte. Einem Team von Wissenschaftlern der Stanford Universität in Kalifornien (USA) gelang es am Linearbeschleuniger (SLAC) erstmals, aus Licht Elementarteilchen zu gewinnen.

Den umgekehrten Prozess, nämlich aus Materie Energie zu erhalten, hatte man schon mehr als 50 Jahre vorher bewerkstelligt – und das mit verheerenden Folgen. Damals schuf man die Atombombe und wandelte gemäß der berühmten Formel von Albert Einstein $E = mc^2$ (Energie ist Masse mal Lichtgeschwindigkeit im Quadrat) Masse in tödliche Strahlung um.

Das Stanford-Experiment dagegen dürfte für die Zukunft weniger gefährliche Auswirkungen haben. Es mutet geradezu biblisch an, quasi aus dem Nichts Materie zu erschaffen. In Kalifornien jedoch geschah das Ganze vor äußerst irdischen Zeugen und mit durchaus bodenständigen Mitteln. Die Forscher verwendeten Laserlichtblitze, die sie auf Elektronen prallen ließen. In den Laserlichtblitzen befanden sich jeweils rund zwei Trillionen Lichtteilchen (eine Milliarde Milliarden). Diese Lichtteilchen ließen die Physiker auf einer Fläche von einem milliardstel Quadratzentimeter auf schnelle Elektronen prallen. Von den Elektronen wurden die Photonen mit einer um Vieles höheren Energie zurückgeworfen. Dabei trafen die Teilchen wieder auf andere Photonen des nächsten Lichtblitzes. Während der Kollision entstand dann ein Elementarteilchen-Paar aus jeweils einem Elektron und einem Positron.

Bei dem Versuch hat man mit einem gigantischen Energieaufwand etwas mehr als 100 Teilchen und Antiteilchen erzeugt. Eine grausam-schmerzliche Bilanz, wenn man das Experiment von der energetischen Seite betrachtet. Zerstörung von Materie scheint im Mikrokosmos genau wie auch im Makrokosmos einfacher zu sein als deren Erschaffung.

Doch auch außerhalb der hehren Mauern der Wissenschaft spielt für uns im Alltag die Wechselwirkung von Licht und Materie eine bedeutende Rolle. Erst durch das Zusammenspiel nehmen wir unsere Umwelt wahr. Wir erzeugen künstliches Licht mit Leuchtstoffröhren, wir sehen Farben oder fangen es beim Fotografieren und Filmen sogar mit Hilfe von Chips ein.

Wenn eine Lichtwelle auf einen Gegenstand trifft, dann kommt es zur Absorption, Reflexion, Brechung oder Beugung. Alle diese Vorgänge und noch viele weitere physikalische Phänomene spielen wiederum in der Quantenphysik eine wichtige Rolle. Sie finden also im Aller kleinsten genauso statt wie in unserem Alltag.

Rosinen im Kuchenteig

Der englische Physiker Joseph J. Thomson (1856–1940) zeigte im Jahr 1897, dass sich aus einer Glühkathode elektrische Teilchen heraus schlagen lassen, die von einzelnen Atomen stammen mussten. Damit war die Idee vom unteilbaren Atom nicht mehr haltbar. Thomson hatte eine ganz eigene Vorstellung von Atomen und Elektronen. Er war der Meinung, dass die neu entdeckten Teilchen die gesuchte Urmaterie sein müssten. Zudem nahm er an, dass Atome winzige elastische Kügelchen sind. In ihnen wären Masse und positive elektrische Ladung gleichmäßig verteilt. Darin eingebettet sind – ähnlich wie Rosinen in einem Kuchenteig – die punktförmigen, elektrisch negativen Elektronen. Im Jahr 1911 wurde diese Ansicht von Ernest Rutherford (1871–1937) korrigiert. Er entdeckte, dass die Masse in Atomen nicht gleichmäßig verteilt ist.

Anfang der 30er Jahre des letzten Jahrhunderts waren schließlich viele Naturwissenschaftler der Meinung, dass mit den Elektronen, Protonen und Neutronen, aus denen die Atome aufgebaut sind, alle unteilbaren Grundbausteine der Materie entdeckt seien. Heute geht man in der Tat davon aus, dass Elektronen unteilbar sind. Protonen und Neutronen dagegen sind zusammengesetzte Teilchen. Sie bestehen aus Quarks, von denen es sechs Unterarten gibt.

Für die späteren Kapitel in diesem Buch spielen die Elektronen eine entscheidende Rolle und dabei vor allem ihre Interaktion mit dem Licht. Der Begriff »Elektron« stammt aus dem Griechischen und bedeutete »Bernstein«.

In der Natur spielen Elektronen eine Schlüsselrolle. Ihre Biografie beginnt bereits in den ersten zwei Minuten nach dem Urknall, als das Universum noch knapp eine Milliarde Grad Celsius heiß war. Kurz darauf hatten sie schon ihre wichtigsten Aufgaben übernommen: Sie binden Atome zu Molekülen, emittieren Licht. Viele Milliarden Jahre später übernahmen sie auch wichtige Aufgaben bei der Informations- und Reizübertragung in Organismen. Die negativ geladenen Teilchen wiegen im Ruhezustand etwa $9,1 \times 10^{-31}$ Kilogramm, eine Zahl mit 30 Nullen hinter dem Komma. Ihre Masse ist rund 2000-mal geringer als die von Neutronen oder Protonen.

Als sich mit Albert Einstein und Max Planck am Anfang des 20. Jahrhunderts die Quantenphysik etablierte, reihte man auch die Elektronen als Elementarteilchen darin ein. Im Reich der Quanten herrschen eigene Gesetze. Ihnen ordnen sich auch die Elektronen unter. So verhalten sie sich in Atomen mal wie Teilchen und mal wie Wellen. Dabei sind gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation ihr Aufenthaltsort und ihre Bewegung nicht gleichzeitig exakt bestimmbar.

Elementarteilchen in Bewegung

Meist sind Elektronen stark an Atome gebunden. Unter normalen Bedingungen sind sie ständig in Bewegung. Elektronenbewegung gehören zu den fundamentalsten Vorgängen in der Natur.

Ihre oszillierenden Bewegungen, also die Sprünge in Atomen oder Molekülen, machen die Elektronen zu winzigen »Antennen«. Diese Antennen dienen als Sender, aber auch als Empfänger. Als Sender emittieren die Teilchen elektromagnetische Strahlung wie Licht. Die Schwingungen erzeugen Strahlung, indem Photonen ausgesandt werden. Die Oszillationen der Teilchen in Atomen dauern nicht länger als wenige Femtosekunden (10^{-15} Sekunden), teilweise sogar noch kürzere Zeitspannen im Attosekundenbereich (10^{-18} Sekunden). Eine Femtosekunde ist damit ein Millionstel einer milliardstel Sekunden, eine Attosekunde noch tausendmal kürzer. Bei den Elektronen-Schwingungen wird sowohl Licht im sichtbaren Bereich als auch im unsichtbaren Ultraviolett- und Röntgenspektrum ausgesandt.

Als Empfänger arbeiten die Elektronen etwa bei der Fotosynthese der Pflanzen. Dabei nehmen sie Energie auf und setzen sie wieder frei. Innerhalb weniger Femtosekunden werden die negativ geladenen Teilchen durch Licht angeregt. Damit rufen sie in Atomen und Molekülen chemische Reaktionen hervor.

Ebenfalls als Empfänger arbeiten die Elektronen in unseren Augen. Dort detektieren sie das einfallende Licht und helfen bei der Informationsübertragung in das Gehirn.

Elektronen als Lichtfänger

Ein fünf Pfund schwerer Weidensprössling brachte Mitte des 17. Jahrhunderts den Stein ins Rollen. Der flämische Universalgelehrte Johan Baptista van Helmont (1580–1644) pflanzte den zuvor exakt abgewogenen Baum in seinem Labor in einen Topf. Helmont wollte erkunden, woher die Pflanze beim Wachstum ihren Massenzuwachs bezieht. Nach fünf Jahren hatte der Baum enorm an Gewicht zugelegt. Die Erde, in der er wuchs, war aber nur um wenige Gramm leichter geworden. Helmont schloss draus, dass die Pflanze den Massenzuwachs wohl aus der Luft bewerkstelligen müsse und führte die nachfolgenden Wissenschaftlergenerationen so auf die Spur der Fotosynthese.

Heute weiß man, dass Pflanzen wirklich, wie von Helmont vorausgesagt, einen enormen Anteil ihrer Biomasse beim Wachstum aus der Luft beziehen. Das geschieht mit Hilfe der Fotosynthese und der damit verbundenen grundlegenden Wechselwirkung von Licht und Elementarteilchen. Die Natur führt uns also jeden Tag perfekt vor, wie man Energie mit Hilfe von Sonnenlicht erzeugt.

Das Licht wird dabei von Atomen der Farbstoffmoleküle – meist ist es Chlorophyll – in den Blättern eingefangen. Trifft ein Lichtteilchen auf ein solches Atom, werden dessen Elektronen angeregt und nehmen die Energie des Photons auf. Dabei werden die Elektronen auf ein höheres Energieniveau innerhalb des Atoms verfrachtet. Das alles geschieht innerhalb von wenigen Pikosekunden (eine Pikosekunde ist ein Tausendstel einer milliardstel Sekunde, 10^{-12} Sekunden).

Sobald das Elektron die zusätzliche Energie wieder abgibt, kann die Pflanze sie nutzen, um Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff zu zerlegen. Anschließend wird der Wasserstoff mit

Kohlenstoff aus der Luft zusammengesetzt und zu Glucose (Traubenzucker) umgebaut. Glucose ist der Energieträger, über den sich die Pflanzen ernähren. Damit wandeln Pflanzen mit Hilfe von Elektronen Lichtenergie in chemische Energie um.

Der Mensch bemüht sich nach Kräften, dieses System nachzuahmen. Vor allem will man mit Solarzellen das Licht einfangen. Heute werden die meisten Solarzellen mit Silizium hergestellt. Die Zellen können aber bereits auch nach dem Fotosynthese-Prinzip wie die Pflanzen arbeiten. Vor allem die Grätzel-Zellen haben dabei im Jahr 2010 Schlagzeilen gemacht. Diese »Lichtfänger« haben so manche Gemeinsamkeit mit dem Fotosyntheseapparat grüner Pflanzen. Benannt wurden die Zellen nach ihrem Erfinder, dem Schweizer Chemiker Michael Grätzel von der ETH Lausanne, der für seine Entwicklung den Millennium-Technologiepreis 2010 erhielt. Seine Farbstoff-Solarzellen verwenden zur Absorption von Licht keinen Halbleiter, wie eben das gängige Silizium, sondern organische Farbstoffe, zum Beispiel den Blattfarbstoff Chlorophyll. Grätzel erzielte damit bereits unter Laborbedingungen eine Ausbeute von bis zu elf Prozent bei der Umwandlung von Licht in elektrische Energie.

Rätselhafte Teilchen

Bis heute ist die Welt der Elektronen nur im Ansatz verstanden. Es ist nur eingeschränkt möglich, die Bewegungen von Elektronen über Raum und Zeit exakt zu verfolgen. Ebenso entziehen sich die negativ geladenen Teilchen in Atomen, Molekülen und anderen Nanostrukturen heute noch fast vollständig der Kontrolle von außen. So präsentieren sich die Elementarteilchen den Physikern mit unzähligen offenen

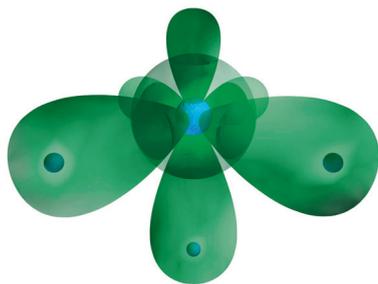


Abb. 3 Bewegungen von Elektronen zu verfolgen ist nur eingeschränkt möglich. Rund um einen Atomkern (blau) befinden sich die Elektronen. Sie haben keine klassischen Flugbahnen. Die Teilchen werden mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (grün dargestellt) angetroffen. Grafik: Christian Hackenberger.

Fragen. Der Tauchgang in diese Welt ist Pionierarbeit. Technik, die zu ihrer Erforschung beiträgt, hat als Maßstab die Geschwindigkeit der Elektronenbewegungen. Sie muss also mindestens genauso schnell sein wie die Elementarteilchen selbst.

Zeittafel 3 Im Zeitraffer: Von unteilbaren Grundbausteinen zu verschwommenen Wahrscheinlichkeiten.

Um 500 v. Chr.	Um 500 v. Chr. entwickelte der griechische Philosoph Parmenides seine Vorstellung des Seins in einem Lehrgedicht. Er wollte die Alltagswahrnehmung der Welt als eine Scheinwahrheit aufdecken, während die wirkliche Welt »ein Sein« sei: ein unveränderliches, ungeschaffenes, unzerstörbares Ganzes.
Ende 5. Jhd. v. Chr.	Materie ist aus unteilbaren Grundbausteinen aufgebaut. Diese Vermutung hegten erstmals die griechischen Philosophen Leukipp und sein Schüler Demokrit im fünften Jahrhundert vor Christus. Sie vermuteten, dass es kleinste Teilchen geben müsse, die sich nicht weiter spalten lassen. Diesen gaben sie die Bezeichnung »Atome« (gr. Atomoi = unteilbar, das Kleinste).
1808	Im Jahr 1808 veröffentlichte der englische Naturforscher John Dalton (1766–1844) sein Buch »A New System Of Chemical Philosophy«. Darin legte er seine Atomhypothese dar, welche das Atom als kleinste Einheit der Materie definiert. Dalton stellte im Unterschied zu Leukipp und Demokrit fest, dass die Atome sich durch ihre Masse unterscheiden.
Um 1830	Der schottische Physiker John James Waterston (1811–1883) nahm als einer der ersten Naturwissenschaftler an, dass Wärme aus der kleinen, aber sehr schnellen Bewegung von stofflichen Teilchen besteht. Er stellte sich vor, dass die Atome des Gases vollkommen elastisch sind und sich in ständiger Bewegung befinden.
1897	Der neuseeländische Atomphysiker Ernst Rutherford (1871–1937) widerlegte im Jahr 1911 das Atommodell von Joseph Thomson, der noch von einer gleichmäßigen Masseverteilung ausgegangen war. Rutherford zeigte in seinen Streuversuchen, dass der größte Teil der Masse eines Atoms im Kern konzentriert ist und die Elektronen um diesen kreisen. Er erhielt den Nobelpreis für Chemie im Jahr 1908.
1911	Der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962) ergänzte das Rutherfordsche Atommodell. Bohr postulierte, dass die Elektronen nur einige bestimmte Bahnen um den Atomkern einnehmen könnten und dass Übergänge dazwischen nur in Sprüngen möglich sind. Er erhielt den Nobelpreis für Physik 1922.

- 1913** Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) formuliert die nach ihm benannte Schrödingergleichung. Demnach sind in Atomen Elektronen nicht länger lokalisierte Teilchen, sondern nur noch verschmierte Wahrscheinlichkeitswolken. Ihre Verteilung ergibt sich aus der quantenmechanischen Gleichung. Schrödinger gilt als einer der Pioniere der Quantenmechanik und erhielt den Physiknobelpreis 1933.
- 1926** Werner Heisenberg (1901–1976) vervollständigte das Atommodell. Er formulierte die Unschärferelation. Demnach sind bestimmte Eigenschaften von Teilchen, wie Impuls oder Aufenthaltsort, nicht gleichzeitig exakt bestimmbar. Für seine Arbeiten zur Quantenmechanik, wurde er 1932 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet.
- 1997** Wissenschaftlern in Kalifornien gelingt es, aus Licht Materie zu erschaffen.
-

Licht – die elementarste Größe in den Naturwissenschaften

Über die Jahrhunderte hat sich unser Wissen über das Licht verfestigt. Heute gibt es viele physikalische Grundlagen, die die Wissenschaft als gesichert ansieht. Dazu gehört u. a. auch Einsteins wichtige Erkenntnis des Welle-Teilchen-Dualismus: Licht ist eine elektromagnetische Strahlung, die Teilchen- und Welleneigenschaften zugleich besitzt. Die Photonen haben keine Masse, transportieren aber Energie und existieren nicht im Ruhezustand. Seine höchste Geschwindigkeit, nämlich 299 792 458 Meter pro Sekunde, erreicht das Licht im Vakuum. Auch in Festkörpern kann sich Licht ausbreiten, ist aber erheblich langsamer.

Wenn viele Photonen im Gleichtakt schwingen, dann entsteht eine Welle mit einem schwingenden (oszillierenden) elektrischen und magnetischen Feld. Elektrisches und magnetisches Feld üben wiederum Kräfte auf geladene Teilchen aus, wie zum Beispiel Elektronen.

Im sichtbaren Teil des Lichtspektrums, zwischen 380 und 700 Nanometer, oszillieren die elektrischen und magnetischen Felder mehrere Hundert Billionen Mal in einer Sekunde (eine Billion sind 1000 Milliarden). Schneller ist keine Schwingung in der Natur. Die unterschiedliche Frequenz der Oszillation bestimmt die Farbe des Lichts. Im Bereich des infraroten Lichts ist die Oszillationsgeschwindigkeit geringer, im ultravioletten Bereich des Spektrums dagegen höher.

Die Energie, die ein Photon transportiert, ist proportional zu der Zahl der Feldoszillationen pro Sekunde. Demnach ist die Energie von vergleichsweise langsam oszillierenden Photonen im Infrarotlicht geringer als die Energie der Teilchen im ultravioletten oder Röntgenlicht. Je mehr Photonen in einer festgelegten Zeit einen bestimmten Ort durchqueren, desto stärker sind die Oszillationen des elektrischen und magnetischen Feldes an diesem Ort. Ebenso steigt mit der Zahl der Photonen pro Zeiteinheit die Intensität des Lichts.

Unsichtbares Licht

Als Licht bezeichnen wir im Alltag gerne nur den Bereich der Strahlung, den wir sehen. Im Spektrum der Wellenlängen liegt dieser zwischen rund 380 und 780 Nanometer. Doch das Licht der Sonne setzt sich aus vielen verschiedenen Strahlungen zusammen, die eine unterschiedliche Wellenlänge besitzen. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts stehen dabei für verschiedene Farben vom violetten Bereich bei 380 Nanometer Wellenlänge bis hin zum tiefroten Bereich bei 780 Nanometer (ein Nanometer entspricht dabei einem milliardstel Meter). Die Übergänge vom sichtbaren in den unsichtbaren Bereich des Lichts sind für den Menschen nicht abrupt, sondern fließend.

In der Physik unterscheidet man nicht zwischen sichtbarem und unsichtbarem Licht. Alle Wellenlängen, die kleiner sind als 380 Nanometer werden als ultraviolette Strahlung bezeichnet, die für den Menschen nicht mehr sichtbar ist. Ebenfalls unsichtbar ist das Infrarotlicht, das bei Wellenlängen über 780 Nanometer beginnt. Insgesamt gilt: Je kürzer die Wellenlänge ist, desto energiereicher und gefährlicher ist die Strahlung für den Menschen.

Ultraviolettes Licht

Ultraviolettes Licht (UV-Licht) ist für Menschen nicht sichtbar. Einige Tiere jedoch können es wahrnehmen. Im gesamten Spektrum des Sonnenlichts, das die Erde erreicht, hat UV-Licht nur einen Anteil von sechs Prozent. Genau wie sichtbares Licht kann ultraviolette Strahlung gebrochen, reflektiert und absorbiert werden. Bei der UV-Strahlung unterscheidet man drei Arten: Die UV-A, die UV-B

und die UV-C-Strahlung. Die UV-A-Strahlung liegt zwischen 315 und 380 Nanometer. Sie sorgt beim Menschen für die Bräunung der Haut. Die UV-B-Strahlung, zwischen 280 und 315 Nanometern, ist verantwortlich für Verbrennungen der Haut, wie etwa den Sonnenbrand. Die UV-C-Strahlung liegt zwischen 100 und 280 Nanometern. Sie ist äußerst aggressiv und für fast alle Organismen auf der Erde schädlich. Bevor dieser Teil der Strahlung auf die Erde trifft, wird er jedoch von der schützenden Ozonschicht herausgefiltert.

In der Technik gibt es Laser, die UV-Licht direkt erzeugen. Auch in der modernen Physik kommt oft UV-Licht zum Einsatz.

Infrarotlicht

Ein Thermometer bewies im Jahr 1800, dass die unsichtbare Sonnenstrahlung jenseits des roten Lichts über Energie verfügt. Der deutsch-britische Astronom Sir Wilhelm Herschel (1738–1822) spaltete das Licht durch ein Prisma und legte hinter das rote Ende des sichtbaren Spektrums ein Thermometer. Aus dem Temperaturanstieg schloss er, dass sich das Sonnenlicht jenseits des Roten fortsetzt.

Im Spektrum des Lichts umfasst die Infrarotstrahlung die Wellenlängen von 780 Nanometern bis hin zu einem Millimeter. Man unterscheidet zwischen nahem, mittlerem und fernem Infrarotlicht. Einige Tiere, wie etwa Schlangen, können Infrarotlicht »sehen«. Mit ihrem Grubenorgan, den Labialgruben, registrieren die Reptilien Temperaturdifferenzen von Bruchteilen eines einzigen Grades.

Durchdringt Infrarotstrahlung die menschliche Haut, wandelt sie sich in Wärmeenergie um. Der Wärmeeffekt bewirkt zum Beispiel, dass Blutgefäße sich weiten und das Blut besser zirkuliert. Auch Laser erzeugen Infrarotlicht, sie werden zum Beispiel eingesetzt, um Hautkrebs zu erkennen.

Röntgenlicht

»X-Strahlen« – das war die Bezeichnung, die Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) seiner neuen Entdeckung im Jahr 1895 gab. Mit ihr konnte man menschliche Körper durchleuchten. Heute sind

die X-Strahlen besser bekannt als Röntgenstrahlen und im medizinischen Alltag nicht mehr wegzudenken.

Im Englischen hat sich der Begriff »X-Ray« erhalten. Röntgenlicht ist eine elektromagnetische Strahlung, die verwandt ist mit dem »normalen« Licht. Sie entsteht zum einen als so genannte Bremsstrahlung beim Abbremsen schneller Elektronen. Dabei geben die Elementarteilchen Energie in Form von Röntgenphotonen ab.

Dagegen entsteht die so genannte charakteristische Strahlung, wenn Elektronen auf Atome treffen und aus diesen wiederum Elektronen aus den inneren Schalen herausschlagen. Die so entstandenen Löcher werden von Elektronen der äußeren Schalen gefüllt und verlieren dabei Energie, die in Form von charakteristischer Röntgenstrahlung abgegeben wird.

Durch Röntgenstrahlung werden Atome und Moleküle angeregt. Dadurch geben sie selber wieder Energie ab. Ein großer Vorteil der Röntgenstrahlung gegenüber normalem Licht ist, dass sie hochenergetisch und damit durchdringender ist. Sie beginnt bei Wellenlängen unterhalb der extremen UV-Strahlung: bei rund zehn Nanometern.

Röntgenlicht aus neuen Maschinen

Seit der Entdeckung im ausgehenden 19. Jahrhundert ermöglicht Röntgenstrahlung Einblicke in Welten, die für das menschliche Auge bis dahin verborgen blieben. Mittlerweile kann man mit ihr Strukturen sichtbar machen, die nicht größer als Atome sind. Dazu benötigt man so genannte »Brillante Röntgenstrahlung«. Brillante Strahlung bündelt in extrem kurzer Zeit sehr viele Photonen und verfügt über sehr kurze Wellenlängen von unter zehn Nanometern.

Möglich macht das der Freie-Elektronen-Laser (FEL). Ein FEL sendet gepulstes Röntgenlicht mit Lasereigenschaften aus (siehe Abschnitt »Kohärentes Licht«). Doch bevor man brillantes Röntgenlicht erhält, ist eine Menge Technik notwendig. Denn zur Produktion benötigt man Elektronen, die fast Lichtgeschwindigkeit erreichen. Dazu werden die Teilchen in riesigen Teilchenbeschleunigern mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern erst einmal beschleunigt. Anschließend werden die Elektronen durch so genannte Undulatoren geschickt. Undulatoren sind längliche Apparate, die in ihrem Inneren über wechselnde magnetische Felder verfügen. Bei ihrem Weg

durch diese Felder werden die Elektronen auf einen Slalomkurs gezwungen, somit abgebremst und wieder beschleunigt. Dabei entsteht letztendlich Brillante Röntgenstrahlung.

In Zukunft will man die Erzeugung Brillanter Röntgenstrahlung viel kompakter erreichen – und zwar mit Lasertechnologie, die man anstatt der Beschleunigeranlagen den Undulatoren vorschaltet.

Ein kompakter Laser, der einen Teilchenbeschleuniger ersetzt, sendet hochintensive Femtosekunden-Laserpulse aus. Diese werden auf Wasserstoffatome fokussiert, sie lösen dabei Elektronen heraus und erzeugen so ein Plasma. Anschließend werden die Elektronen mit demselben Laserpuls fast auf Lichtgeschwindigkeit (99,99 %) beschleunigt. Das alles geschieht auf einer Strecke von einigen Millimetern. Erst dann gelangen die Elektronen in die Undulatoren.

Heute kann man mit den Freie-Elektronen-Lasern, denen ein Femtosekundenlaser vorgeschaltet ist, Strahlung von etwas über zehn Nanometern erzeugen, so genannte weiche Röntgenstrahlung. Ziel ist es aber, die Wellenlänge bis auf wenige zehntel Nanometer zu verkürzen. Dazu muss man u. a. die Energie der lasererzeugten Elektronen, die durch den Undulator fliegen, weiter erhöhen. Das erreicht man, indem man die Leistung der Lichtpulse steigert – bis auf mehrere 100 Terawatt pro Femtosekundenpuls. Zum Vergleich: Ein Atomkraftwerk erzeugt Leistungen von rund 1000 Megawatt, das ist rund 100 000-mal weniger.

Der Hintergrund, warum man über möglichst kurze Lichtwellenlängen in der produzierten Strahlung verfügen möchte, sind die Gesetze der Optik. Sie sagen, dass man mit Licht nur Strukturen abbilden kann, die der Größe seiner Wellenlänge entsprechen. Das heißt: Untersucht man zum Beispiel mit Röntgenlicht von 18 Nanometer Wellenlänge ein Objekt, muss dieses mindestens so groß sein, um es sehen zu können. Atome und zahlreiche Moleküle sind aber sehr viel kleiner.

Mit lasererzeugter brillanter Röntgenstrahlung würde man so völlig neue, detaillierte Einblicke in den Mikrokosmos der Natur gewinnen und parallel dazu die Erzeugung der Strahlung auf Labormaßstab reduzieren. Vor allem für die Medizin würde eine allgemein zugängliche Brillante Röntgenstrahlung eine Revolution bedeuten: Mit ihr könnte man kleinste Tumore ausfindig machen, bevor sie sich im Körper ausbreiten. Die Heilungschancen von Krebs würden enorm steigen.

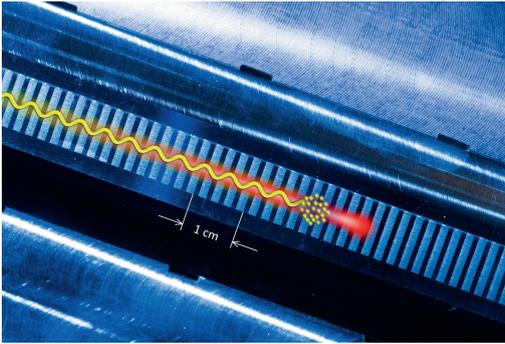


Abb. 4 Blick in das Innere eines Undulators. Angetrieben durch Laserlicht (rot) fliegen Elektronen (gelb) durch das Innere des Undulators. Dabei passieren sie die wechselnden Magnetfelder. Auf ihrem

sinusförmigen Schlingerkurs werden die Teilchen abgebremst und beschleunigt. Dabei senden sie Röntgenstrahlung aus. Foto: Thorsten Naeser, Bildbearbeitung: Christian Hackenberger.

Kohärentes Licht

In der Natur treten Licht-, Schall- oder Wasserwellen meist chaotisch auf. Wenn mehr Ordnung in den Wellenformen ist, dann ist Kohärenz im Spiel. In der Physik ist Kohärenz eine der wichtigsten Eigenschaften von Wellen. Denn will man etwa mit Licht kleinste Teilchen beobachten oder deren quantenmechanische Energieübergänge ermitteln, also Femtochemie oder Attosekundenphysik betreiben, dann muss es kohärent sein, egal über welche Wellenlänge es verfügt. Betrachtet man eine Lichtquelle, wie zum Beispiel unsere Sonne oder eine Glühlampe, so strahlen diese Lichtwellen in alle Richtungen aus. Die Lichtwellen sind im Raum ungerichtet und damit inkohärent. Kohärentes Licht dagegen verfügt über eine immer gleichbleibende Länge und Phasendifferenz seiner Wellenzüge. Die Phasendifferenz gibt den Versatz der einzelnen Lichtwellen zueinander an. Man kann kohärentes Licht vergleichen mit Soldaten, die sich im Gleichschritt bewegen. Bei räumlicher Kohärenz sieht ein Betrachter von der Seite die Beine von marschierenden Soldaten immer in derselben Stellung. Die Soldaten treten alle zur gleichen Zeit auf und haben alle dieselbe Schrittlänge (zeitliche Kohärenz): Bei kohärentem Licht bewegen sich die Lichtwellen im Gleichschritt. Ein Laser produziert eine solche Strahlung besonders gut.

Der Quantenkosmos – eine fremdartige Welt

»Die Quanten sind doch eine hoffnungslose Schweinerei!«

Der deutsche Physiker Max Born in einem Brief an Albert Einstein.

Als »spukhafte Fernwirkung« bezeichnete Albert Einstein einst ein Phänomen, das ihm selbst suspekt war und Rätsel aufgab: Erwin Schrödinger hatte behauptet, dass es Paare von Teilchen geben muss, deren Beziehung auch über große Distanzen stärker ist als es klassische physikalische Gesetze erlauben. Zum Beispiel reagieren zwei parallel erzeugte Lichtteilchen exakt zeitgleich und auf dieselbe Weise, obwohl sie sich an zwei völlig unterschiedlichen Orten aufhalten. Verschränkung nennen die Physiker dieses Phänomen. Demnach muss es also irgendeine Art der Kommunikation geben, die schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit. Denn die Reaktion eines der beiden verschränkten Teilchen findet genau im selben Augenblick statt, in dem das andere Teilchen beeinflusst wird. Das würde allerdings Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie widersprechen, nach der sich nichts schneller als Licht ausbreitet. Im Jahr 2008 jedoch verschränkte ein Team um den Physiker Nicolas Gisin von der Universität Genf Photonen über eine Distanz von 18 Kilometern zwischen den beiden Schweizer Dörfern Satigny und Jussy. Die Forscher fanden dabei heraus, dass bei zwei verschränkten Teilchen der Informationsaustausch zwischen zwei verschränkten Partikeln mindestens mit der 10 000-fachen Geschwindigkeit des Lichts erfolgen muss.

Was für das Phänomen der Verschränkung gilt, gilt auch für viele andere Phänomene im Quantenkosmos. Isaac Newtons Mechanik stößt hier an ihre Grenzen, und es eröffnet sich ein völlig unbekanntes Terrain, das noch vielen weiße Flecken auf der Landkarte aufweist.

Bis vor etwas mehr als 100 Jahren galt die gängige Lehrmeinung: Die Natur läuft präzise wie bei einem Uhrwerk ab – alles ist vorhersehbar. Doch um die vorletzte Jahrhundertwende hielt der Zufall Einzug als feste Größe in der Physik, als Max Planck am 14. Dezember 1900 über seine Versuche, die Strahlung von erwärmten Körpern zu berechnen, berichtete.

In der Quantenwelt herrscht ein merkwürdig schemenhaftes Dasein, ganz anders als in unserer Wahrnehmung der Makrowelt. Vor allem der so genannte Welle-Teilchen-Dualismus, wonach Objekte mal als Teilchen und mal als Welle behandelt werden, mutet sonderbar an.

Manchmal scheint es, als würden Dinge erst ein konkretes Dasein erlangen, wenn man sie beobachtet und misst. Ein Wissenschaftler, der ein Teilchen untersucht, verleiht ihm damit erst einen eindeutigen Zustand und beeinflusst es alleine durch seine berührungslose Untersuchung. Erwin Schrödinger hat dieses Phänomen mit seiner Katze auf den Punkt gebracht: In einer Kiste sitzt eine Katze, eingesperrt zusammen mit einem instabilen Atomkern. Wenn dieser zerfällt, stirbt die Katze. Der Atomkern ist zunächst in einem so genannten schwebenden Zustand. Das heißt: Solange das Atom unbeobachtet ist, wäre es laut Quantenmechanik gleichzeitig sowohl noch intakt wie auch schon zerfallen – also in einer Überlagerung beider Zustände. Das gleiche gilt für die Katze, die damit sowohl tot als auch lebendig sein müsste, solange die Kiste unberührt ist. Erst in dem Moment, in dem man eine Messung an der Kiste durchführt, nimmt das Atom einen der beiden Zustände an. Dann entscheidet es sich, ob die Katze lebendig oder tot ist. Schrödingers Katze veranschaulicht damit ein Problem, das bis heute auf eine Antwort wartet: Was machen eigentlich Teilchen, die ein unbeobachtetes Dasein fristen?

Etwas »spukhaft«, um bei der berühmten Wortwahl Albert Einsteins zu bleiben, mutet auch das Tunneln von Teilchen an. Ist eine Barriere zu hoch, dann wählt man eben den vermeintlich einfacheren Weg: Man gräbt einen Tunnel. Einen ähnlichen Pfad können in der Quantenwelt auch Elektronen einschlagen, die stark an Atome gebunden sind. Wollen die Teilchen die Atome verlassen, kann es passieren, dass sie nicht die gesamte Energie aufwenden müssen, um die Anziehungskraft der Atomkerne zu überwinden. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gelingt es den Elektronen, auch mit weniger Energie das Atom zu verlassen und es damit sozusagen zu tunneln.

Trotz aller Unwägbarkeiten und Absonderlichkeiten für unser rational-mechanisch geprägtes Vorstellungsvermögen ist klar: Die Quantenphysik hält was sie verspricht. Sie liefert Erklärungen für das sonderbare Verhalten von Elementarteilchen im Mikrokosmos. In der Physik hat sie über die letzten Jahrzehnte einen unvergleichlichen Einzug gehalten und bestimmt ihr modernes Erscheinungsbild. Was für den Geowissenschaftler der tiefe Ozean sein mag, ist für den Physiker die Quantenwelt. Hier ist noch eine Menge Neuland zu entdecken.

Doch trotz der vielen Unbekannten gäbe es ohne die Quantenphysik die moderne Elektronik nicht. Genauso wenig würden etwa La-

ser funktionieren. Die vielbeschworene Entwicklung von Quantencomputern, die millionenfach schnellere Rechenoperationen erlauben als die heutige Technologie, wäre undenkbar. Und nicht zuletzt verspricht man sich von der Möglichkeit der abhörsicheren Datenübertragung mit Hilfe der Verschränkung von Photonen Anwendungen, die die Kommunikation revolutionieren könnten.

Quantenfunk – Moleküle und Atome als Antennen

Zu den kleinsten Funkanlagen der Welt gehören zwei einzelne Moleküle. Zwischen diesen beiden Mini-Antennen hat ein Team um Vahid Sandoghdar vom Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts im Jahr 2012 Photonen ausgetauscht. So ein Quantenfunk könnte künftig Quantenbits, also Informationen, durch Quanten übertragen. Sollte es gelingen, Quantenbits zwischen Computern auszutauschen, könnte das die Rechengeschwindigkeit enorm erhöhen und den Datenaustausch revolutionieren. Bei ihren Experimenten regten die Physiker ein Molekül mit Licht an, sodass es einen Strom von Photonen aussendete. Dann leiteten sie die Teilchen durch eine Glasfaser. Damit das Empfängermolekül Photonen aufnehmen konnte, ließen die Nanooptiker die Teilchen im gleichen Takt schwingen wie die Moleküle. Das heißt:

Das Sender-Molekül gab Photonen von exakt der Wellenlänge ab, die das Empfängermolekül aufnahm.

Quanteninformationen können ebenso zwischen einzelnen Atomen übertragen werden. Das gelang einem Team um Gerhard Rempe ebenfalls im Jahr 2012 am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Die Physiker verwendeten zwei Rubidiumatome als Netzwerkknoten. Die Atome befanden sich in zwei Laborräumen und waren über ein 21 Meter langes Glasfaserkabel miteinander verbunden. In den Atomen waren Informationen in Form von Quantenzuständen gespeichert. Diese übertrugen die Forscher mit einzelnen Photonen zwischen den Atomen. Die Physiker verschränkten erst das Senderatom mit dem von ihm ausgesandten Photon. Dessen Speicherung im Empfängeratom verschränkte wiederum die beiden Atome.

Nachtschicht, Schnitzel und Atome

In den letzten 100 Jahren hat die Wissenschaft ihr Erscheinungsbild im Vergleich zu der Zeit vor 100 Jahren stark verändert. Einzelne Genies, die in ihrem stillen Kämmerlein vor sich hin forschen, ihren Gedanken nachgehen und einige Jahre später mit bahnbrechenden Erkenntnissen wieder auftauchen, gibt es nicht mehr. Moderne Wissenschaft ist Teamsache. Damit ist nicht selten mühevoller und jahrelanger Detailarbeit in neonbeleuchteten Labors verbunden. Die Kosten für neues Wissen sind meist hoch und mit vielen Irrwegen verbunden. Oft werden nur Detailfragen geklärt. Wenn es gut läuft, werden

diese dann in internationalen Fachmagazinen veröffentlicht und helfen vielleicht Kollegen irgendwo auf der Welt, mit ihrer eigenen Arbeit weiterzukommen.

Vernetzung und Literaturstudium sind heute neben der eigenen Laborarbeit das A und O in der Wissenschaft. Eindrücklich zeigt dies eine Karte, die das Wissenschaftsmagazin *Nature* im Jahr 2006 in seiner jährlichen Galerie veröffentlichte. Darauf ist ein wucherndes System aus Linien und Kreisen zu sehen, das die Verbindung unterschiedlicher Disziplinen, wie der Medizin, der Physik und der Chemie zeigen. Erstellt wurde die Karte von Kevin Boyak, Dick Klavans und Bradford Paley auf der Basis von 800 000 wissenschaftlichen Publikationen und den daraus entnommenen Zitierungen anderer Autoren. Im Internet zog diese Karte damals weite Kreise. Sie mutet eher als Kunstwerk an, und sie dürfte als Download in manchen Räumen die Wände geschmückt haben (<http://informationesthetics.org/node/20>).

Auch die Quantenoptik ist stark von der Internationalisierung und der Vernetzung der Wissenschaftler geprägt. So forschen alleine am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München mittlerweile fünf große, international geprägte Gruppen. Man trifft sich auf den Gängen, tauscht Ideen aus, diskutiert – meist auf Englisch – seine Versuche und geht zusammen Mittagessen. Zwischen Schnitzel und Salat oder Kaffee und Kuchen drehen sich die Gesprächsthemen meist um Atome, Moleküle und Photonen.

Die Quantenoptik, ebenso wie viele andere naturwissenschaftlichen Disziplinen, ist keine Tätigkeit, die man zwischen neun und fünf Uhr abends, streng nach Dienstplan, ausführt. Unregelmäßige Arbeitszeiten gehören zum Alltag. Läuft eine Messung gut, dann werden Nachtschichten eingelegt. Wenn es gegen Abend auf den Gängen des Instituts ruhig geworden ist, ist das Gebäude noch lange nicht vollständig verwaist. Dann rüstet man sich in den Labors für die Nacht. Verpflegung für die langen Stunden wird vom Pizzaservice oder von der Cafeteria im Haus geordert. Dort gibt es extra belegte Brote für die Nacht.

Will man den Kopf zwischen der Arbeit frei bekommen, dann packen viele Forscher ihre Sportkleidung aus und gehen in den nahe gelegenen Wäldern an der Isar joggen. Zu jeder Jahreszeit bieten die Auen am Fluss, nördlich von München, ein abwechslungsreiches Na-

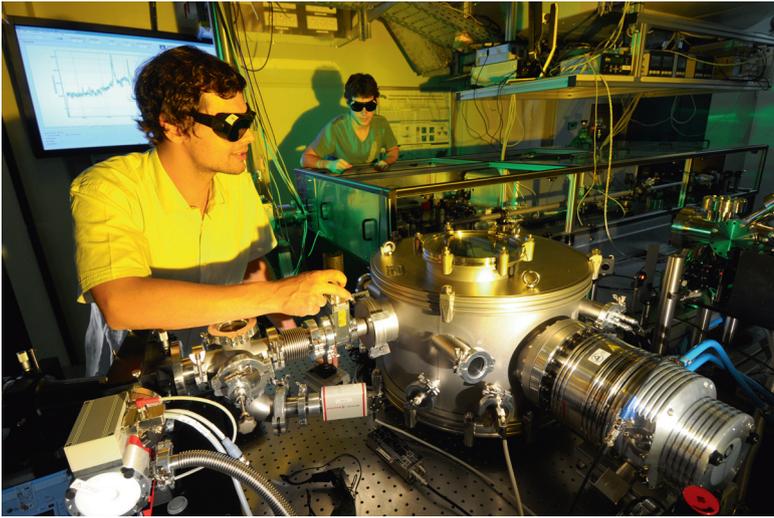


Abb. 5 Attosekundenforschung am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Foto: Thorsten Naeser.

turerlebnis mit garantierter Frischluftzufuhr. Und manchmal stellt sich dabei auch der ein oder andere »Quantensprung« bei der Ide-
enfindung ein.

