

2

Das Geheimnis des Regenbogens

Eine kurze Geschichte des Lichts

Nachdem wir uns nun ausführlich mit dem Atom und seiner Geschichte beschäftigt haben, ist es an der Zeit, dass wir uns dem zweiten Hauptdarsteller dieses Buches widmen: dem Licht. Wie wir noch sehen werden, spielte das Licht bei der weiteren Entschlüsselung des Atoms und der Entdeckung der Quantentheorie eine große Rolle. [Ausführliche Darstellungen finden sich in Zajonc (1995) und Walther (1999). Perkwitz (1999) und Zajonc (1995) enthalten zudem viele interessante Details über die kulturgeschichtliche und psychologische Bedeutung des Lichts.] Außerdem drehen sich die folgenden Kapitel hauptsächlich um die innige Verbindung, die die Physik des 20. Jahrhunderts zwischen Licht und Materie geknüpft hat. Grund genug also, dass wir uns zunächst ansehen, woher unsere heutigen Vorstellungen vom Wesen des Lichts eigentlich kommen.

Ein romantischer Anfang

Zu der Zeit, als sich die antiken griechischen Philosophen mit dem Wesen der Materie und des Universums beschäftigten, dachte man auch intensiv über die Beschaffenheit des Lichts nach. Besser gesagt war es das Sehen, das die frühen Denker mit Staunen erfüllte. Empedokles, der uns aus dem ersten Kapitel durch seine Vier-Elementen-Lehre bekannt ist, hatte höchst romantische Vorstellungen davon, wie der Mensch die Fähigkeit des Sehens erlangt hatte. Seiner Erklärung nach war es Aphrodite, die Göttin der Liebe und der Schönheit, gewesen, die aus den Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer (keine Überraschung!) die Augen des Menschen schuf, wobei sie die Liebe als Bindemittel verwendete. Das »Feuer« des Auges zündete sie schließlich am Herdfeuer des Universums an [Zajonc (1995), S. 20].

Dieses innere Feuer des Auges war ein wichtiges Element der frühen Seh-Theorien. Auch Plato ging später davon aus, dass das Auge ein eigenes Licht habe, eine Art Radarstrahl, der aus dem Auge austritt und sich mit dem Tageslicht vermischt. Durch dieses Gemisch aus innerem und äußerem Licht, so nahm Plato an, nehmen wir die äußere Welt wahr. Euklid, der Begründer der Geometrie, verfasste um das Jahr 300 v. Chr. sogar eine Schrift unter dem Titel *Optik*, in der er mit geometrischen Argumenten darlegte, welchen Weg der »Sehstrahl« des Auges zurücklegte.

Die griechischen Atomisten hatten eine, für ihre Begriffe, einleuchtendere Erklärung für das Sehen. Sie meinten, dass sich dünne Häutchen, *eidola* oder *simulacra* genannt, von materiellen Objekten ablösen und von dort in das Auge gelangen konnten. Ein großes Problem hatte diese Theorie allerdings: Wie konnte das *eidolon* eines großen Gegenstands, zum Beispiel eines Bergs, so klein gemacht werden, dass es durch die Öffnung des Auges passte? Eine wirklich befriedigende Antwort darauf hatten die Atomisten nicht.

Auch atmosphärische Erscheinungen wie der Regenbogen konnten von den antiken Philosophen noch nicht gedeutet werden, wurden aber vielfach und zum Teil sehr genau beschrieben. Aristoteles zum Beispiel spricht von einer Sichel, die aus den Farben Rot, Grün und Purpur besteht, während der römische Poet Virgil tausend Farbtonungen sieht. Nach Aristoteles und Virgil wird der Regenbogen die Menschen noch über viele Jahrhunderte beschäftigen, bevor er sein Geheimnis preisgibt.

Wie in der Entwicklung der Atomhypothese, so trat auch in der Deutung des Lichts in den Jahrhunderten zwischen Christi Geburt und dem Ende des Mittelalters eine lange Pause ein, zumindest im Abendland. Im Orient beschäftigte sich unterdessen der 965 in Basra (Irak) geborene arabische Gelehrte Ibn al-Haytham, auch Alhazen genannt, mit dem Prozess des Sehens. Seine Theorie stützte sich auf die Beobachtung, dass einem das Auge wehtut, wenn man zu lange in die Sonne sieht. Diese Tatsache (die sicherlich auch Empedokles und Plato bekannt war) war nur schwer mit einem aus dem Auge kommenden Sehstrahl zu vereinen. Was immer dem Auge Schmerzen bereitete, musste also von außen kommen und zudem aller Wahrscheinlichkeit nach das gleiche »Etwas« sein, das auch für das Sehen verantwortlich war. Alhazen zufolge enthielt das Auge

kein Feuer, sondern es war vielmehr dunkel und musste von außerhalb beleuchtet werden. Es war also eine *camera obscura*.

Das Licht wird entzaubert

Mehr als 600 Jahre später bestätigte René Descartes die Vermutung Alhazens, indem er direkt nachsah und dazu ein Auge sezierete. Nicht das Auge eines Menschen zwar, sondern eines Ochsen, doch Descartes fand das, was er gesucht hatte: Auf der Netzhaut des Ochsenauges sah er ein maßstabgetreues Abbild der Außenwelt. Auch für Johannes Kepler und Galileo Galilei war das Auge nichts weiter als ein physikalisches Instrument, in dem von außen einfallendes Licht für einen Sinneseindruck sorgte. Nun blieb nur noch die Frage: Was war dieses Licht? Woraus bestand es? Und wie kam es in das Auge?

Auf die letzte Frage zumindest glaubte Descartes die Antwort zu wissen. Da Licht ein »göttlicher Schein« war, erreichte es das Auge ohne Verzögerung, das heißt mit unendlicher Geschwindigkeit.

Dies war auch eine Konsequenz seiner Theorie des »Plenum«, derzufolge das gesamte Weltall mit einer Art Flüssigkeit durchdrungen ist. Durch diese Flüssigkeit sind alle Punkte des Alls mechanisch miteinander verbunden, so dass zum Beispiel ein leuchtendes Objekt augenblicklich im Auge einen Reiz hervorrufen kann. Genauso, wie ein Blinder mit einem Stock seine Umwelt abtastet und bei Kontakt mit einem Hindernis sofort einen Widerstand spürt, so war auch das Sehen nach Descartes' Auffassung eine Art Abtasten der Umgebung nach leuchtenden Gegenständen [Zajonc (1995), S. 92].

Doch nicht alle Denker jener Zeit teilten Descartes' Ansichten, und um die Lichtgeschwindigkeit war schon damals eine heftige Debatte entbrannt. Galileo Galilei wollte die Frage schließlich experimentell entscheiden. Seine Idee war, zwei Personen auf einige Kilometer voneinander entfernte Hügel zu schicken, zwischen denen freie Sicht herrschte. Zuvor sollten sie ihre Uhren synchronisieren, und einer der beiden sollte eine abblendbare Laterne mitnehmen. Auf den Hügeln angekommen, sollte die Laterne dann zu einem vorher verabredeten Zeitpunkt aufgeblendet werden. Der zweite Experimentator konnte dann die Zeitdifferenz zwischen dem Öffnen

der Laterne (dessen Zeitpunkt ja abgesprochen war) und der Ankunft des Lichtsignals messen.

Unnötig zu sagen, dass ein solches Experiment zum Scheitern verurteilt war. Zum einen waren die damals zur Verfügung stehenden Uhren bei weitem nicht genau genug, zum anderen hätte die zu messende Zeitdifferenz selbst bei einer Entfernung der Hügel von mehreren Kilometern nur wenige tausendstel Sekunden betragen. Wichtig aber ist, dass Galileo auf die Frage, wie schnell das Licht sei, nicht durch bloßes Nachdenken eine Antwort finden wollte. Physikalische Fragestellungen durch Experimente zu behandeln, kam damals erst in Mode, und Galilei war in dieser Hinsicht ohne Zweifel der Trendsetter. Um jedoch sein Experiment zur Lichtgeschwindigkeit sinnvoll durchzuführen, hätte Galilei wesentlich größere Entfernungen benötigt.

Solche Entfernungen bieten sich natürlich in kosmischen Dimensionen. Anstatt einen Kollegen auf einen fernen Hügel zu schicken, brauchte man nur ein in den Weiten des Weltalls stattfindendes Ereignis zu suchen, von dem man den genauen Zeitpunkt kannte. Ein solches Ereignis war das Verschwinden der von Galilei erstmals beobachteten Jupitermonde hinter ihrem Mutterplaneten. Der dänische Astronom Ole Rømer stellte 1675 bei seinen Studien des Jupiter fest, dass der genaue Zeitpunkt der Mondfinsternis davon abhing, in welcher Entfernung von der Erde der Planet sich gerade befand. Daraus schloss er, dass das von den Jupitermonden ausgehende Licht eine endliche Zeit benötigt, um zur Erde zu gelangen. Kurz nachdem Galilei erstmals überlegt hatte, wie man die Lichtgeschwindigkeit im Versuch messen konnte, hatte Rømer mit Hilfe der Gestirne genau eine solche Messung vorgenommen.

Die mathematische Analyse von Rømers Daten folgte auf dem Fuße. Bereits zwei Jahre später berechnete der holländische Physiker Christian Huygens aus den Beobachtungen des Dänen eine Lichtgeschwindigkeit von 230.000 Kilometern pro Sekunde [Huygens (1996), S.14]. Eine fantastisch hohe Geschwindigkeit, aber eben nicht unendlich. Und was noch fantastischer ist: Mit diesem Wert lag Huygens nur 20 Prozent unter dem tatsächlichen, exakten Wert. Die Tatsache, dass diese Geschwindigkeit 600.000-mal so groß war wie die von ihm selbst gemessene Schallgeschwindigkeit, störte Huygens nicht. So schreibt er in seiner *Abhandlung über das Licht*: »Jene Annahme dürfte aber nach meiner Ansicht nichts Un-

mögliches an sich haben; denn es handelt sich nicht um die Fortführung eines Körpers mit einer so grossen Geschwindigkeit, sondern um eine folgeweise, von den einen zu den andern Körpern übergehende Bewegung. Daher habe ich beim Nachdenken über diese Frage kein Bedenken getragen anzunehmen, dass die Fortpflanzung des Lichts Zeit erfordert, weil sich auf diese Weise, wie ich erkannte, alle seine Erscheinungen erklären lassen, während nach der entgegengesetzten Ansicht alles unverständlich wäre« [Huygens (1996), S. 13].

Huygens wollte sich also, wie Galilei, in seinen Meinungen nur von Beobachtungen leiten lassen. Abgesehen von seiner – nunmehr durch Daten untermauerten – Ansicht, dass Licht sich mit einer endlichen Geschwindigkeit fortpflanze, klingt allerdings in dieser Textstelle noch eine weitere Idee Huygens' an: nämlich die, dass das Licht kein Körper, sondern vielmehr eine Welle sei.

Galilei war noch davon überzeugt gewesen, dass Licht eine materielle Substanz sei. Huygens dagegen, der durch die gesellschaftliche Stellung seiner Eltern schon als Jugendlicher mit Geistesgrößen wie Descartes und Spinoza zusammengetroffen war, hatte sich schon früh von den gängigen Ansichten seiner Zeit frei gemacht. Ihn störte, dass viele der so genannten »Erkenntnisse« der damaligen Wissenschaft nicht genügend durch Beobachtungen abgesichert waren. In seinen »Abhandlungen« schreibt er dazu: »[...] Ich bin andererseits auch erstaunt, dass [diese Wissenschaftler] sehr häufig wenig einleuchtende Schlussfolgerungen als höchst sicher und beweisend gelten lassen; hat ja doch meines Wissens noch niemand auch nur die ersten und wichtigsten Erscheinungen des Lichts annehmbar erklärt [...]« [Huygens (1996), S. 9]. Vor allem interessierte Huygens, warum Licht sich nur geradlinig fortpflanzt und warum sich Lichtstrahlen, die sich überschneiden, nicht gegenseitig stören.

Newton gegen die Wellen

All diese Eigenschaften, so fand Huygens, ließen sich problemlos erklären, wenn man Licht als Welle betrachtete. Diese Welle breitete sich Huygens zufolge wie Schall in einem Medium aus, und jeder Punkt einer Wellenfläche wurde dabei zum Mittelpunkt einer neuen

Welle. Die Ausbreitung des Lichts erfolgte dann über die äußere Hülle all dieser kleinen Wellen. Allein auf Grund dieser einfachen Annahmen konnte Huygens sowohl die Reflexion als auch die Brechung des Lichts mit Hilfe rein geometrischer Argumente erklären. Zwingend beweisen, dass Licht eine Welle war, konnte er allerdings nicht.

Doch Huygens' größtes Problem dabei, die Fachwelt von seiner Wellentheorie zu überzeugen, war eher ein anderes. Es hieß Isaac Newton. Der englische Physiker hatte zwischen 1665 und 1667, während in Cambridge die Pest wütete, in aller Stille und im Alleingang die Grundlagen seiner Wissenschaft gelegt, die in weiten Teilen über 200 Jahre unangefochten Bestand haben sollten. Seine Schriften zur Gravitation und zur Planetenbewegung sowie die Abhandlung über die »Theorie des Lichts und der Farbe« machten aus dem 25-Jährigen (der im Todesjahr Galileis zur Welt gekommen war) zum angesehensten Wissenschaftler nicht nur seiner Zeit. Doch so genial Newton war, so ehrgeizig und jähzornig war er auch. Seine feste Überzeugung, Licht bestehe aus kleinen Teilchen oder Korpuskeln, stand in direktem Gegensatz zu Huygens' Wellentheorie. Das alleine genügte wohl schon, um Newton dem Holländer gegenüber ungnädig zu stimmen. Als Huygens sich dann auch noch erlaubte, eine von Newtons Arbeiten zur Optik vorsichtig zu kritisieren, ging dieser endgültig in die Luft.

Neben dem übermächtigen Newton konnten Huygens' Überzeugungen nicht bestehen, und so wurde die Wellentheorie des Lichts für die nächsten hundert Jahre kaum mehr beachtet. Newton, der mittlerweile Lucasischer Professor für Mathematik an der Universität Cambridge war, schickte sich außerdem an, das Geheimnis des Regenbogens zu entschlüsseln. Er hatte entdeckt, dass Sonnenlicht, das auf ein Prisma fiel, auf der anderen Seite des Prismas vielfarbig erschien. Weißes Licht konnte also durch Brechung in die Farben des Regenbogens aufgespalten werden. Damit war eine Brücke geschlagen zwischen einer Himmelserscheinung und dem Phänomen der Brechung, das Newton sehr genau studiert hatte. Schon Descartes hatte mit Hilfe der Brechung den Winkel berechnet, unter dem ein Regenbogen am Himmel erscheint. Seine (korrekte) Erklärung, dass das Sonnenlicht an Wassertröpfchen in der Luft zunächst gebrochen, dann im Innern des Tropfens reflektiert wird und schließlich beim Austreten erneut eine Brechung erfährt, enthielt aller-

dings noch keinen Mechanismus für die Entstehung der Farben des Regenbogens.

Newton dagegen, inspiriert von seinem Versuch mit dem Prisma, hatte eine Erklärung parat: Im weißen Sonnenlicht, so vermutete er, waren Lichtkorpuskeln verschiedener Farben enthalten. Diese Korpuskeln besaßen unterschiedliche Brechbarkeiten und wurden deshalb beim Eintreffen in das Prisma verschieden stark abgelenkt. Zudem konnte der Vorgang des Aufspaltens der Farben wieder rückgängig gemacht werden, indem man das farbige Licht erneut durch ein Prisma schickte. Wählte man den Winkel zwischen den Prismen richtig, so kam am anderen Ende wieder weißes Licht heraus. Im Jahre 1704 veröffentlichte Newton sein Werk *Optik*, in dem er seine Korpuskulartheorie des Lichts und die Erklärung der Farben des Regenbogens ausführlich darlegte.

Ein Wunderkind bringt Licht ins Dunkel

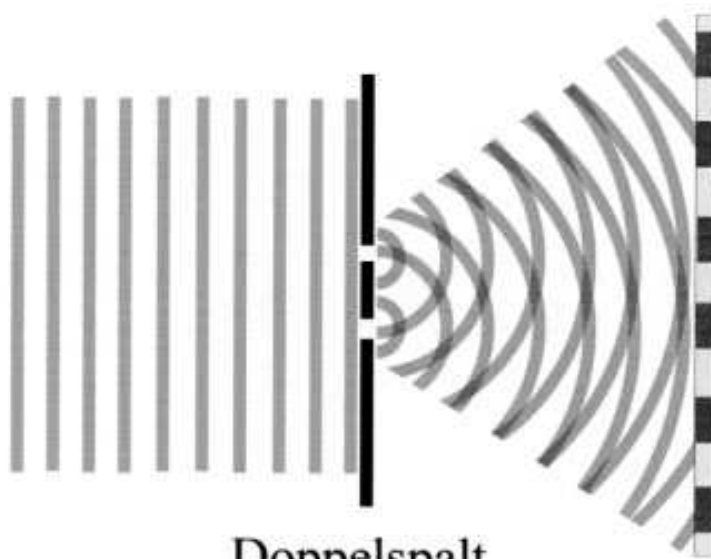
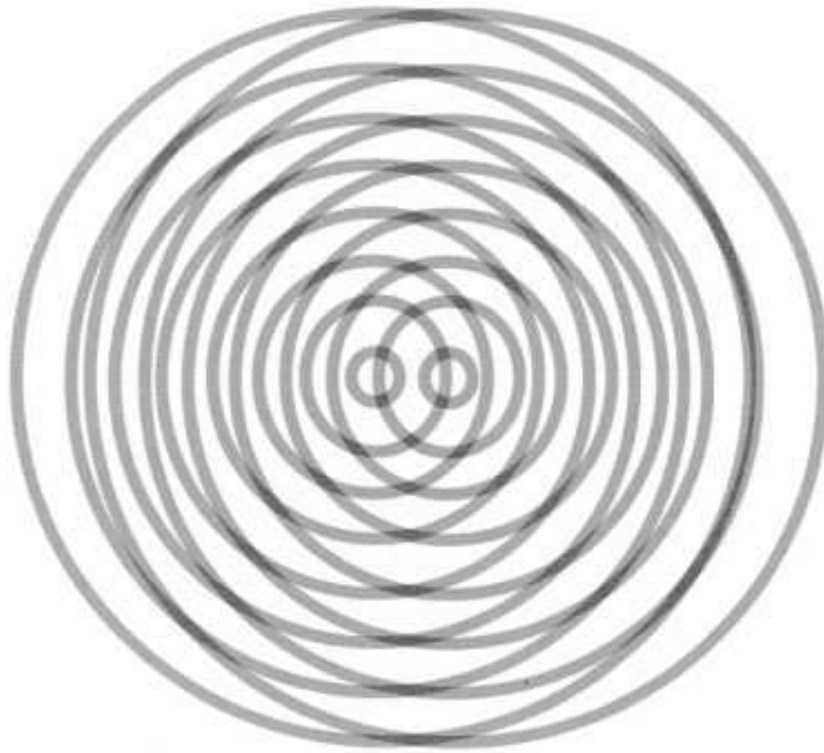
Wie gesagt, für die nächsten hundert Jahre war Newtons Theorie das Maß aller Dinge, und nur ganz wenige zogen sie ernsthaft in Zweifel. Einer von ihnen war der deutsche Mathematiker Leonhard Euler, der zwischen 1760 und 1762 eifrig mit der jungen Prinzessin von Anhalt-Dessau korrespondierte [Zajonc (1995), S. 99]. Die Prinzessin hatte ihm brieflich einige Fragen zur Physik gestellt, die sie bewegten, und Euler hatte ihr geantwortet, dass die Frage nach der Natur der Sonnenstrahlen in der Tat die wichtigste Frage in der Physik sei. Von Newtons Korpuskulartheorie hielt Euler nicht viel und teilte vielmehr Huygens' Ansicht, dass Licht sich in einem »Äther« genannten Medium ähnlich ausbreitete wie Schall in der Luft. Bereits 1746 hatte er unter dem Titel *Neue Theorie des Lichts und der Farbe* (die Ähnlichkeit mit Newtons Titel war sicherlich kein Zufall) seine Wellentheorie veröffentlicht. Doch auch Eulers Ausführungen enthielten noch keine Erklärung für ein wichtiges Lichtphänomen, das sich jedermann sozusagen direkt vor Augen halten konnte: die Beugung.

Hält man zwei Finger nah beieinander, so dass nur noch ein kleiner Spalt offen bleibt, und betrachtet dann durch diesen Spalt die Sonne oder eine Lampe, so sieht man viele helle und dunkle Streifen. Vergrößert man den Abstand zwischen den Fingern etwas, so

verschwinden die dunklen Streifen. Was geht da vor sich? Mit der Korpuskulartheorie lässt sich jedenfalls nicht erklären, warum durch einen engen Spalt das Licht nicht in alle Richtungen »durchpasst«. Auch andere Erscheinungen dieser Art, die unter dem Begriff Beugung zusammengefasst werden (zum Beispiel der unscharfe Rand des Schattens, den ein scharfkantiger Gegenstand wirft), entzogen sich hartnäckig einer Interpretation durch Newtons Theorie.

Anfang des 19. Jahrhunderts war dann die Zeit reif für eine Abnabelung von den Ideen des großen Newton. Der frühreife Wunderknabe Thomas Young, der bereits als Teenager ein Dutzend Sprachen gelernt hatte und später Teile des berühmten Rosetta-Steines übersetzte, gab der Wellentheorie neuen Auftrieb. Young war für einige Zeit Dozent am Emmanuel College in Cambridge, wo er sich häufig am Ententeich des College zur Entspannung etwas in die Sonne legte. Angeblich beobachtete er eines Tages zwei Enten, die nebeneinander schwammen und kleine Wellen hinter sich ließen. Die Wellen der beiden Enten überschneiden sich, und an einigen Stellen war das Wasser ruhig, obwohl beide Wellen zugleich dort ankamen [Singh (1999), S. 321]. Wirft man zwei Steine in den Teich, so sieht man einen ähnlichen Effekt: Von jedem Stein gehen beim Eintauchen in das Wasser kreisförmige Wellen aus. Nach einer Zeit überschneiden sich die Wellen der beiden Steine, wobei sie sich an einigen Stellen verstärken und an anderen gegenseitig auslöschen. Dieses Prinzip der Überlagerung und Interferenz wandte Young konsequent auch auf Lichtwellen an. Das hieß, dass Licht plus Licht unter bestimmten Umständen Dunkelheit ergeben konnte! Um diese unerhörte Behauptung zu beweisen, ließ Young Licht auf zwei enge, nahe beieinander liegende Spalte in einem schwarzen Schirm fallen. Die beiden Spalte sollten (das hatte schon Huygens so gesehen) Ausgangspunkt von sich halbkreisförmig ausbreitenden Lichtwellen sein, die sich etwas vom Schirm entfernt überschneiden konnten.

In einiger Entfernung vom schwarzen Schirm stellte Young einen zweiten, weißen Schirm auf und betrachtete das Licht, das aus den Spalten des ersten Schirms auf den zweiten fiel. Und siehe da: An einigen Stellen blieb der zweite Schirm dunkel, so dass sich ein Muster aus hellen und dunklen Streifen bildete. Es gab nun keinen Zweifel mehr: Dort, wo die dunklen Streifen entstanden, fiel von beiden



Doppelspalt

Beobachtungsschirm

Wasserwellen auf einem Teich (oben) und Youngs Doppelspaltexperiment (unten). In Youngs Experiment werden durch die von links einfallende Lichtwelle an den beiden Spalten halbkreisförmig sich ausbreitende Wellen erzeugt, die sich gegenseitig verstärken oder auslöschen können und so auf dem Schirm ein streifenförmiges Muster erzeugen. Aus den Abständen zwischen den Streifen und der Entfernung des Schirms von den Spalten konnte Young die Wellenlänge des Lichts ausrechnen.

Spalten Licht auf den Schirm – doch Licht plus Licht ergab dort tatsächlich Dunkelheit. Young hatte mit seinem einfachen Versuch ein wichtiges Prinzip entdeckt, das nicht nur in der Optik eine zentrale Stellung einnimmt: die Interferenz. Jede Welle, ob es sich nun um Licht-, Wasser- oder Materiewellen handelt (über die wir im nächsten Kapitel ausführlich sprechen werden), kann man sich als eine Abfolge von Bergen und Tälern vorstellen. Am Beispiel der Wasserwellen sind diese beiden Begriffe besonders anschaulich. Treffen nun an einer bestimmten Stelle die Berge zweier Wellen aufeinander, so summieren sich an dieser Stelle deren Höhen und es entsteht ein umso höherer Berg. Trifft jedoch ein Wellenberg auf ein Wellental, so füllt der Berg das Tal (das man sich als Anti-Berg, also quasi unter dem Meeresspiegel liegend vorstellen kann) aus und zurück bleibt eine Ebene – gerade so, als wäre an dieser Stelle überhaupt keine Welle vorhanden.

Thomas Young (1773 – 1829):

Thomas Young wurde 1773 in Milverton (Somerset) geboren. Nach dem Studium der Medizin, das er 1799 in Göttingen mit der Promotion abschloss, studierte er für einige Jahre an der Universität in Cambridge, bevor er 1800 in London seine Tätigkeit als Arzt aufnahm. Young veröffentlichte

wissenschaftliche Arbeiten auf den verschiedensten Gebieten, unter anderem über die Funktion der Augenlinse und das Farbsehen. Durch seinen Doppelspaltversuch von 1801 verhalf er der Wellentheorie des Lichts zum Durchbruch. Young starb 1829 in London.

Young zeigte nicht nur, dass Lichtwellen sich tatsächlich auf diese Weise gegenseitig auslöschen können – mit Newtons Korpuskulartheorie war das unmöglich zu erklären –, sondern er benutzte die Interferenz sogar, um damit die Wellenlänge des Lichts zu messen, also den Abstand zwischen zwei »Bergen« oder »Tälern«. Aus den Abständen der hellen und dunklen Streifen, die er auf dem Schirm sah, rechnete er die Wellenlänge für rotes und violettes Licht aus. Die Werte, die er dafür fand, lagen bei 0,7 Mikrometer (millionstel Meter) und 0,4 Mikrometer (was den tatsächlichen, heute bekannten Werten sehr nahe kommt). Youngs Wellentheorie erlaubte es also, quantitative Angaben über die von ihm angenommenen Lichtwellen zu machen – ein enormer Fortschritt. Zudem war nun klar, dass die verschiedenen Farben des Regenbogens nicht etwa unterschiedliche Teilchen waren, sondern vielmehr Wellen mit verschiedenen Wellenlängen.

Durch die Arbeiten des Franzosen Augustin Fresnel wurde die Wellentheorie, der sich mittlerweile immer mehr Forscher angeschlossen hatten, um einen weiteren wesentlichen Punkt erweitert. Bislang war man nämlich davon ausgegangen, dass Lichtwellen longitudinale Wellen seien, das heißt, das Medium, in dem sie sich fortpflanzen, schwingt in dieselbe Richtung, in die sich die Wellen ausbreiten. Das offensichtliche Beispiel dafür war der Schall. Luftmoleküle sind so schwach aneinander gekoppelt, dass sich in Luft nur Wellen ausbreiten können, die die Moleküle in Ausbreitungsrichtung der Welle zum Schwingen bringen. Fresnel dagegen schlug vor, Lichtwellen als transversale Wellen zu betrachten, also wie die erwähnten Wasserwellen auf dem Teich: Die Welle breitet sich entlang der Wasseroberfläche aus, doch die Wassermoleküle tanzen senkrecht dazu auf und ab.

Mit dieser Neuerung ließ sich auch auf einen Schlag das Phänomen der Polarisierung erklären. Wenn nämlich Licht eine transversale Welle war, dann konnte die Schwingungsrichtung des Mediums – also des Äthers – in eine beliebige Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zeigen. Und damit war es auch möglich, Lichtwellen nach ihrer Schwingungsrichtung oder »Polarisierung« zu sortieren. Bestimmte Materialien lassen nämlich nur Wellen mit einer bestimmten Schwingungsrichtung passieren, andere Wellen dagegen werden reflektiert. Zum anderen waren bereits seit längerem Materialien bekannt, in denen sich Lichtwellen mit verschiedenen Polarisierungen unterschiedlich schnell ausbreiten, was zur so genannten Doppelbrechung führt.

Gesucht: Ein Medium

Zu Anfang des 19. Jahrhunderts hatte man also einen kompletten Steckbrief des Lichts: eine Welle, die sich über transversale Schwingungen ausbreitete und deren Wellenlänge etwas weniger als einen millionstel Meter betrug. Man wusste also, wie die Schwingungen der Lichtwellen in etwa aussahen, doch eines hatte man noch immer nicht herausgefunden: Was war es eigentlich, das da schwang?

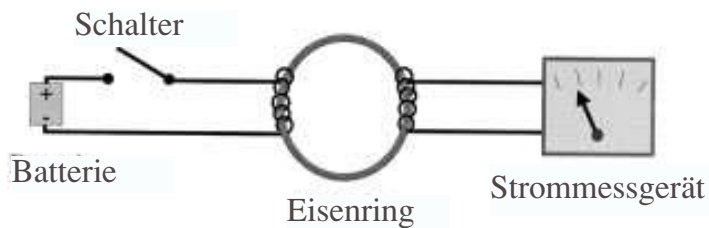
Seit Isaac Newtons phänomenalen Erfolgen bei der Beschreibung der Planetenbewegung durch seine Mechanik und Gravitationstheorie waren viele Physiker der Meinung, die Natur ließe sich alleine

durch konsequente Anwendungen der Newton'schen Gesetze erklären. Demnach mussten auch Lichtwellen sich mit Newtons Mechanik erklären lassen. Wenn Licht aber ein mechanisches Phänomen war, dann musste es auch ein Material, den Äther, geben, in dem sich Wellen mit der Geschwindigkeit des Lichts ausbreiten konnten. Ein solches Material musste ungeheuer starr sein. Anders ausgedrückt: Sollten sich Lichtwellen ähnlich wie Wellen auf einem gespannten Seil fortbewegen, so musste die Spannung dieses Seils ungeheuer groß sein. Doch der Äther musste noch eine Eigenschaft haben: Da sich Licht überall im Raum ausbreiten konnte, musste das gesamte Universum mit diesem Material gefüllt sein. Gleichzeitig durfte es aber den sich bewegenden Sternen und Planeten keinen Widerstand entgegensetzen.

Ein Material, das diese beiden Bedingungen gleichzeitig erfüllte, widersprach eigentlich jeder physikalischen Erfahrung. Dennoch sagte noch 1841 Lord Kelvin, einer der größten Physiker seiner Zeit, dass das Universum notwendigerweise vollständig mit Äther gefüllt sein müsse und dass dies eine Tatsache sei, die niemand in Frage stellen könne [Zajonc (1995), S. 152]. Während Lord Kelvin allerdings an der mechanistischen Interpretation des Lichts festhielt, bastelte ein anderer legendärer Physiker zur gleichen Zeit bereits an einer alternativen Erklärung, die bis in unsere Tage Bestand haben sollte. Sein Name war Michael Faraday.

Wenn man sich Michael Faradays Werdegang ansieht, dann fällt einem spontan der Ausdruck »Physik-Junkie« ein. Faraday war in der Tat besessen von der Physik, geradezu süchtig nach ihr. In einfachen Verhältnissen aufgewachsen, hatte Faraday als ungelernter Handlanger im Labor des berühmten Chemikers Humphrey Davy an der Royal Institution in London mit seinen Forschungen begonnen [Zajonc (1995), S. 128]. Eine universitäre Ausbildung hatte er nicht genossen, doch innerhalb weniger Jahre wurde er zum besten Experimentalphysiker seiner Zeit. 1831 entdeckte Faraday das Prinzip der elektrischen Induktion, das zum Beispiel die Grundlage für Transformatoren bildet.

Wickelt man zwei Drähte um einen Eisenring und schließt dann einen der Drähte über einen Schalter an eine Batterie an, so wird ein an den zweiten Draht angeschlossenes Strommessgerät keinen Stromfluss registrieren. Die beiden Stromkreise sind in sich geschlossen und nicht miteinander in Kontakt, und so kann kein



Faradays Experiment zur elektromagnetischen Induktion. Öffnet oder schließt man den Schalter, so fließt für kurze Zeit ein Strom im rechten Stromkreis.

Strom vom einen zum anderen fließen. In dem Moment jedoch, in dem man den Schalter im ersten Stromkreis öffnet, fließt für eine kurze Zeit auch ein Strom im zweiten Draht. Gleiches geschieht, wenn man den Schalter wieder schließt – allerdings fließt diesmal der Strom im zweiten Draht in die entgegengesetzte Richtung.

Mit seiner Erklärung dieses seltsamen Verhaltens legte Faraday einen der Grundsteine der modernen Physik (und gleichzeitig einer ganzen Industrie). Der Strom im zweiten Draht wurde Faraday zufolge von einer »Welle der Elektrizität« hervorgerufen, die beim Öffnen oder Schließen des Schalters im ersten Stromkreis – also bei einer plötzlichen Änderung des Stromflusses im ersten Draht – entstand und vom zweiten Draht aufgenommen wurde. Faradays Interpretation der elektrischen Induktion war äußerst mutig und weitsichtig zugleich, doch noch revolutionärer war die Idee, die er 1846 in einem Vortrag verkündete. Licht, so mutmaßte Faraday, könnte letzten Endes nichts anderes sein als die Schwingungen elektrischer und magnetischer Feldlinien. Mit Hilfe von Eisenfeilspänen hatte Faraday einige Jahre zuvor die Feldlinien eines Stabmagneten sichtbar gemacht, und an der Realität eines elektrischen Feldes, das sich wellenförmig ausbreiten konnte, war seit seinem Versuch zur Induktion kein Zweifel mehr.

Ein Funke springt über

Knapp zwanzig Jahre nach Faradays Vorlesung gab Maxwell, dessen Beitrag zur kinetischen Theorie wir im vorhergehenden Kapitel kennen gelernt haben, Faradays Ideen ein rigoroses mathematisches Gewand. Nachdem er, ausgehend von Faradays Beobachtungen, seine berühmten Formeln für das elektrische und magnetische

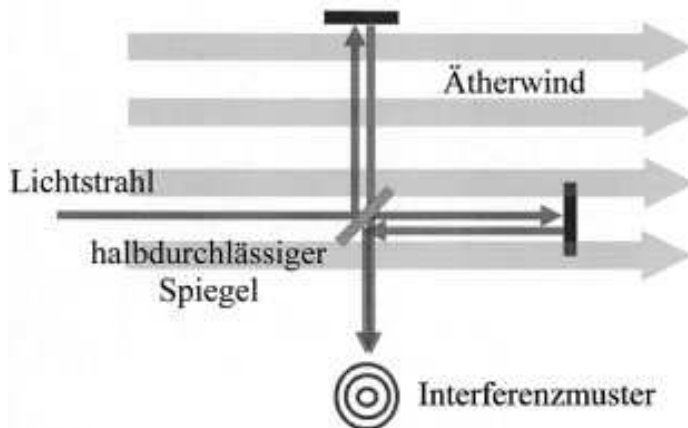
Feld gefunden hatte, bemerkte er, dass sich aus all diesen Formeln eine Gleichung herleiten ließ, die vollkommen identisch war mit einer Wellenformel für Wellen auf einem Seil. Wie Faraday schon vermutet hatte, konnten sich also elektrische und magnetische Felder wie Wellen ausbreiten. Aus Maxwells Wellengleichung ließ sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen herleiten. Maxwell fand, dass diese ziemlich genau mit dem damals bekannten Wert für die Lichtgeschwindigkeit übereinstimmte. Nun war es kein riesiger Schritt mehr zu der Vermutung, dass es sich auch bei den Lichtwellen um elektromagnetische Wellen handeln könnte. Mit Hilfe einer einzigen Gleichung hatte Maxwell die Brücke geschlagen von elektrischen und magnetischen Phänomenen, wie sie sich im Stromfluss und in der Ausrichtung einer Kompassnadel zeigen, zu den Lichtwellen.

Experimentell untermauert wurde Maxwells Hypothese durch Experimente, die der deutsche Physiker Heinrich Hertz 1887 machte. Mit einem Funkgenerator erzeugte er elektromagnetische Wellen und untersuchte, wie diese von einer Metalloberfläche reflektiert und an einem Spalt gebeugt wurden. Hertz fand, dass sich die elektromagnetischen Wellen genauso verhielten wie Licht. Dieses identische Verhalten gemeinsam mit Maxwells Erkenntnis, dass sich Lichtwellen und elektromagnetische Wellen gleich schnell fortpflanzten, ließ keinen Zweifel mehr zu: Licht war tatsächlich eine elektromagnetische Welle.

Das Problem des Äthers war aber damit keineswegs aus der Welt geschafft. Zwar waren die elektromagnetischen Wellen eine bis dahin unbekannte Naturerscheinung, doch nichts sprach zwingend dafür, dass sie sich deshalb in ihrer Ausbreitung anders verhalten sollten als beispielsweise Wasserwellen. Ein Medium, in dem Maxwells Wellen schwingen konnten, schien also dennoch nötig zu sein.

Auch Albert A. Michelson und Edward W. Morley waren dieser Auffassung, als sie im Jahre 1887 ein Interferometer konstruierten, das über die Natur des Äthers Aufschluss geben sollte. Das Interferometer hatte zwei senkrecht zueinander stehende Arme, in denen eine Lichtwelle zunächst zweigeteilt und dann am Ende wieder zusammengefügt wurde (das Prinzip des Interferometers wird später noch eingehender behandelt). Auf diese Weise konnten winzige Unterschiede in der Lichtgeschwindigkeit in den Richtungen der Interferometer-Arme gemessen werden. Bewegte sich das Interfe-

rometer zum Beispiel entlang der Richtung eines der Arme, so konnte man feststellen, ob die Lichtgeschwindigkeit in der Bewegungsrichtung sich von der im dazu senkrechten Arm unterschied. Die Idee des Experiments war also einfach: Wenn Licht sich tatsächlich in einem Medium ausbreitete, so sollte sich die Lichtgeschwindigkeit in den beiden Richtungen unterscheiden, da sich ja das Interferometer relativ zum Äther bewegte und dieses das Licht »mitziehen« sollte, es sollte also eine Art »Ätherwind« entstehen.



Das Experiment, mit dem Michelson und Morley den Ätherwind nachweisen wollten. Die verschiedenen Lichtgeschwindigkeiten in den beiden Armen des Interferometers sollten sich in einer Änderung des Interferenzmusters bemerkbar machen, wenn sich die Richtung des Ätherwinds relativ zum Interferometer änderte.

Michelson und Morley nutzten aus, dass sich die Erde mit rund 30 Kilometern pro Sekunde um die Sonne bewegt und damit auch, wie sie annahmen, relativ zum Äther, der den gesamten Raum ausfüllt. Wenn sie nun ihren Apparat langsam drehten, so sollte erst einer der Arme in die Bewegungsrichtung der Erde zeigen und dann, nach einiger Zeit, der andere. Unterschied sich die Lichtgeschwindigkeit in Bewegungsrichtung der Erde und senkrecht zu ihr, so sollte sich dies im Signal des Interferometers bemerkbar machen. Doch zu ihrer Überraschung sahen die beiden Forscher nicht das geringste Anzeichen eines Ätherwinds. Dem Licht in ihrem Apparat schien es egal zu sein, in welche Richtung es sich ausbreitete: Die Bewegung der Erde durch den Äther erzeugte offenbar keinen messbaren »Wind«.

Der Abschied vom Äther

Die Physiker waren verblüfft. Nach Jahrhunderten des Rätselratens um die Natur des Lichts war innerhalb kurzer Zeit zuerst die mechanische Interpretation des Lichts verworfen und durch die neuen elektromagnetischen Wellen ersetzt worden, und nun sollte man noch nicht einmal die Bewegung des Mediums nachweisen können, in dem sich diese Wellen ausbreiten? Für einige Jahre noch wurden Rettungsversuche unternommen, um die Äthertheorie um jeden Preis zu erhalten, doch dann, weniger als zwanzig Jahre nach dem Null-Ergebnis von Michelson und Morley, beschäftigte sich ein Angestellter des Berner Patentamts mit der Frage des Ätherwinds und schuf damit ein neues Verständnis von Raum und Zeit.

Im selben Jahr, in dem Albert Einstein, der junge Patentassessor, seine Arbeit zur Brown'schen Bewegung verfasste, machte er sich auch über die Ausbreitung des Lichts Gedanken. Schon als kleiner Junge, so erinnerte er sich später, hatte er sich einen Ritt auf einem Lichtstrahl vorgestellt. Dabei war er auf einen Widerspruch gestoßen: Wenn er selbst sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegte, so musste aus seiner Sicht der Lichtstrahl stillstehen. Doch konnte für Licht dasselbe gelten wie für eine Fahrt auf der Rolltreppe? Konnte ein die normale Treppe benutzender Bekannter mit einem Schritt halten, wenn die Rolltreppe sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegte?

Einstein war tief davon überzeugt, dass dies schlicht unmöglich war. Einen Lichtstrahl einzuholen, das sollte die Natur nicht zulassen. Aus dieser Überzeugung reifte in seinem Kopf im Jahre 1905 die Theorie, die er »spezielle Relativitätstheorie« nannte. Natürlich können wir uns hier nicht mit allen Einzelheiten der Theorie beschäftigen. [Einstein selbst hat die Relativitätstheorie (1969) für Laien verständlich dargestellt. Auch Gamov (1994) bietet eine unterhaltsame Einführung in die Materie.] Doch eine Folgerung der Theorie ist an dieser Stelle besonders interessant: Licht, so nahm Einstein an, bewegt sich in allen Bezugssystemen immer mit der gleichen Geschwindigkeit. Das bedeutet, dass es zum Beispiel im Experiment von Michelson und Morley egal war, welcher Arm des Interferometers in die Bewegungsrichtung der Erde zeigte. Da nach Einstein die Lichtgeschwindigkeit immer gleich sein musste und sich daher die Bewegung der Erde nicht einfach zur Lichtgeschwin-

digkeit dazu addierte, konnte auch kein Unterschied der Lichtgeschwindigkeit in den beiden Armen gemessen werden.

Mit Einsteins Relativitätstheorie war nun also auch der Äther aus der physikalischen Beschreibung des Lichts verschwunden: Licht breitet sich ohne Medium im Raum aus und tut dies mit einer Geschwindigkeit, die völlig unabhängig von der Bewegung anderer Objekte ist. Man kann sie nicht einfach zu anderen Geschwindigkeiten addieren, und in diesem Sinne ist sie unendlich, obwohl sie einen messbar endlichen Wert hat [Zajonc (1995), S. 269]. Licht (und damit alle elektromagnetischen Wellen) ist also, in jeder Hinsicht, etwas ganz Besonderes.

Im gleichen Jahr, in dem Einstein seine spezielle Relativitätstheorie formulierte (die er später durch die allgemeine Relativitätstheorie ergänzte, aus der sich unter anderem die Ablenkung von Licht durch massive Objekte ergab), revolutionierte er nicht nur das Verständnis der Fortpflanzung von Lichtwellen. Er zeigte auch, dass es durchaus sinnvoll sein konnte, Licht in bestimmten Situationen nicht als Welle, sondern als Strom von Teilchen aufzufassen. Gemeinsam mit Max Planck begründete er so die Quantenphysik, die wir uns im folgenden Kapitel näher ansehen wollen.

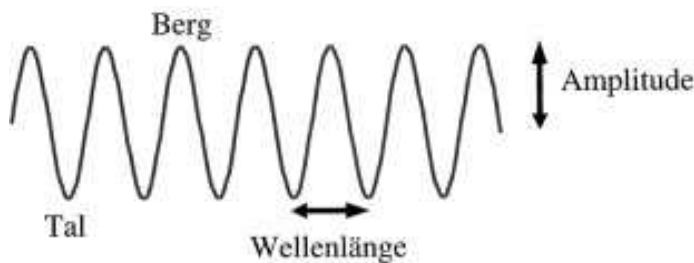
Licht: Eine kurze Gebrauchsanleitung

Zum Abschluss dieses Kapitels wollen wir noch rasch einige wesentliche Ideen zusammenfassen, die uns im Laufe dieses Buches noch häufiger begegnen werden. Besser gesagt, wir beschränken uns hier auf die »Wellen«-Eigenschaften des Lichts, wie sie auch Wasserwellen oder – wie wir im nächsten Kapitel sehen werden – Materiewellen aufweisen. Auf den Teilchencharakter, den wir eben schon kurz angerissen haben, kommen wir ebenfalls im folgenden Kapitel noch zu sprechen.

Fangen wir mit einer allgemeinen Feststellung an: Eine Welle ist das, was entsteht, wenn sich eine Störung fortpflanzt. »Störung« kann bedeuten, dass wir einen Stein ins Wasser werfen, der die Wasseroberfläche »eindellt« oder dass ein hin und her schwingendes Elektron eine elektromagnetische Störung verursacht. Im Falle des Wassers breitet sich die Störung in einem Medium aus, im Falle des

Elektrons dagegen braucht die entstehende Welle keine Substanz – sie genügt sich sozusagen selbst.

Licht ist, wie wir schon gesehen haben, eine Transversalwelle. Das bedeutet, dass das elektrische und magnetische Feld senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle schwingen. Die Richtung dieser Schwingung nennt man auch Polarisierungsrichtung. Die Polarisierung des Lichts ist verantwortlich für eine ganze Reihe von optischen Phänomenen. Polaroid-Sonnenbrillen zum Beispiel lassen nur Licht mit vertikaler Polarisierung passieren, das heißt, das elektrische Feld des Lichts schwingt auf und ab. Das hat zur Folge, dass man die Wasseroberfläche eines Sees oder des Meers beobachten kann, ohne geblendet zu werden. Das Wasser reflektiert nämlich hauptsächlich horizontal polarisiertes Licht, das aber von den Polaroid-Brillengläsern nicht durchgelassen wird.



Amplitude und Wellenlänge einer Lichtwelle.

Zwei wichtige Größen, um eine Welle zu beschreiben, sind ihre Amplitude und ihre Wellenlänge. Die Amplitude gibt an, wie stark die Störung ist, die sich in der Welle fortbewegt. Bei Wasserwellen entspricht die Amplitude damit dem Abstand zwischen dem höchsten und dem tiefsten Punkt der Welle (um ganz genau zu sein: der Hälfte dieses Abstands), bei Lichtwellen ist die Stärke des elektrischen Felds die entscheidende Größe. Die Wellenlänge wiederum gibt an, wie weit zwei aufeinander folgende »höchste Punkte«, auch Wellenberge (oder ihre Gegenstücke, die Wellentäler), räumlich voneinander entfernt sind. Diese Entfernung ist eng verbunden mit der Frequenz der Störung und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle.

Nehmen wir an, wir erzeugen Wasserwellen, indem wir ein kleines Stöckchen rhythmisch ins Wasser tauchen – sagen wir, einmal pro Sekunde. Bei jedem Eintauchen »stören« wir die Wasseroberfläche, und diese Störung breitet sich mit einer gewissen Geschwin-

digkeit aus. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt unter anderem davon ab, wie stark die Wassermoleküle einander anziehen. Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass diese Geschwindigkeit für unsere Wasserwellen einen Meter pro Sekunde beträgt. Nach einer Sekunde hat sich also das Wellental, das wir mit dem Stöckchen erzeugt haben, einen Meter weit von uns entfernt. Da wir unser Stöckchen einmal pro Sekunde, also mit einer Frequenz von einem Hertz (abgekürzt: Hz) eintauchen wollen, ist es jetzt gerade wieder soweit: Wir erzeugen ein neues Wellental. Der Abstand dieses frisch gemachten Tals vom ersten beträgt also genau einen Meter, und diesen Abstand nennt man Wellenlänge. Würden wir das Stöckchen in einer Sekunde zweimal eintauchen, also mit einer Frequenz von 2 Hertz, so könnte sich ein Wellental nur um einen halben Meter entfernen, bevor das nächste entsteht. Verdoppeln wir also die »Eintauchfrequenz«, so halbieren wir die Wellenlänge. Mathematisch ausgedrückt: Wenn wir die Wellenlänge wissen wollen, müssen wir die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die Frequenz teilen.

Auf alten Radiogeräten findet man für das Kurz-, Mittel- und Langwellenband noch häufig die Angabe der Wellenlänge der elektromagnetischen Radiowellen. Da sich Radiowellen ebenso wie Lichtwellen mit ungefähr 300.000 Kilometern pro Sekunde ausbreiten, können wir nun leicht ausrechnen, dass die Angabe »60 Meter« für die Wellenlänge einer Rundfunkstation einer Frequenz von 5 Megahertz (Millionen Hertz) entspricht. Für sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von 0,4 millionstel Meter ist die Frequenz um ein Vielfaches höher: 750 Billionen Mal in der Sekunde schwingt das elektrische Feld, das in unserem Auge den Farbeindruck »blau« entstehen lässt.

Da wir eben gerade von der Lichtgeschwindigkeit sprachen: Der Wert von 299.792.458 Metern pro Sekunde (der mittlerweile per Konvention festgelegt worden ist) gilt für die Ausbreitung von Licht im Vakuum. In einem Material, zum Beispiel in Wasser, bewegt sich das Licht langsamer fort, und in einem der folgenden Kapitel werden wir uns mit diesem Thema noch näher beschäftigen. Ist die Lichtgeschwindigkeit in einem Material um einen Faktor, sagen wir, 1,4 kleiner, so sagt man, dass dieses Material den »Brechungsindex« 1,4 hat.

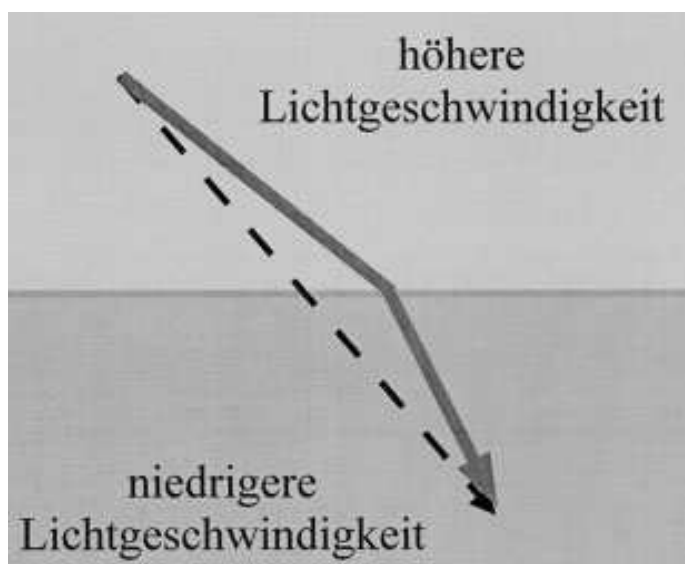
Der Ausdruck »Brechungsindex« legt nahe, dass die Lichtgeschwindigkeit etwas mit der Brechung von Licht zu tun hat oder,

besser gesagt, dass die Brechung ein Effekt der unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten ist. Trifft ein Lichtstrahl aus dem Vakuum (oder der Luft, was fast auf dasselbe hinausläuft) auf eine Wasseroberfläche, so ändert sich seine Richtung nach dem Eintauchen ins Wasser (es sei denn, er trifft in einem rechten Winkel auf). Dieser als »Lichtbrechung« bezeichnete Effekt, der die Grundlage für fast alle optischen Elemente (Linsen, Prismen) bildet, kann auf verschiedene Arten erklärt werden. Eine sehr einleuchtende Erklärung basiert auf dem »Prinzip der kürzesten Zeit« des Franzosen Pierre de Fermat.

Fermats Prinzip besagt, dass Licht immer den Weg wählen wird, der die Laufzeit des Lichts möglichst klein werden lässt. Im freien Raum breitet sich Licht also deshalb geradlinig aus, weil jeder andere Weg länger wäre und damit mehr Zeit beanspruchen würde. Muss sich das Licht allerdings durch Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes (und deshalb verschiedenen Lichtgeschwindigkeiten) fortbewegen, so ist der räumliche Abstand des Anfangs- und Endpunkts nicht mehr das wichtigste Kriterium. Man kennt das vom Autofahren: Manchmal ist es besser, einen Umweg zu machen, um damit eine größere Strecke auf der Autobahn fahren zu können, wo man viel schneller unterwegs ist als auf der Landstraße. Ähnlich geht es dem Licht: Legt es einen längeren Weg in der Luft zurück und dafür einen etwas kürzeren im Wasser, was zu einem Knick im Lichtstrahl führt, so wird seine gesamte Reisezeit kürzer, als wenn es den direkteren geradlinigen Weg genommen hätte.

Dieses Prinzip gilt übrigens ganz genauso, wenn sich der Brechungsindex nicht plötzlich ändert wie beim Übergang von Luft zu Wasser, sondern allmählich. Dies passiert zum Beispiel an einem heißen Tag über aufgeheiztem Wüstensand. Da sich in Bodennähe die Temperatur der Luft mit der Höhe schnell ändert und damit auch der Brechungsindex der Luft, kann ein Lichtstrahl vom Himmel das Auge eines Wüstenwanderers auf einer krummen Kurve erreichen. Da sein Gehirn natürlich davon ausgeht, dass Lichtstrahlen sich geradlinig ausbreiten, meint er, mitten im Sand eine Wasserpfütze zu sehen – dabei ist der arme Kerl auf eine Fata Morgana reingefallen, die ihm ein Stück blauen Himmel in die Wüste projiziert hat.

Am Beispiel von Youngs Doppelspaltversuch haben wir bereits die Interferenz kennen gelernt. Wenn ein Wellenberg und ein Wel-

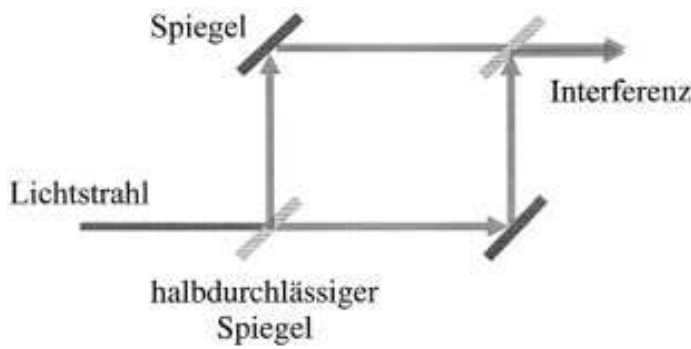


Das Prinzip der Brechung. Anstatt den direkten Weg zu nehmen (gestrichelter Pfeil), macht das Licht einen Umweg, um so schnell wie möglich ans Ziel zu kommen. Das führt zu einem geknickten Ausbreitungsweg.

lental aufeinander treffen, so löschen sich beide gegenseitig aus, wogegen zwei Wellenberge sich zu einem doppelt so hohen Berg summieren. Sind die Amplituden der beiden Wellen verschieden, so ist die Auslöschung natürlich nicht komplett, da ein 1 Zentimeter tiefes Wellental auf dem Wasser keinen 3 Zentimeter hohen Berg aufnehmen kann. Stattdessen würde in diesem Fall ein 3 Zentimeter – 1 Zentimeter = 2 Zentimeter hoher Wellenberg zurückbleiben. Das Prinzip der Interferenz spielt in der Physik eine zentrale Rolle, und an dieser Stelle wollen wir uns etwas näher mit einem Instrument beschäftigen, das uns später noch in verschiedenen Formen begegnen wird: dem Interferometer.

Die Funktionsweise eines Interferometers kann man sich vorstellen wie zwei Studienreisende, die sich nach einer kurzen Besprechung getrennt auf den Weg machen und sich nach einiger Zeit wieder treffen, um ihre Erlebnisse miteinander zu vergleichen. In einem Interferometer sind die »Studienreisenden« zwei Lichtstrahlen, die zunächst zum Beispiel mit einem halbdurchlässigen Spiegel aus einem einzigen Lichtstrahl erzeugt werden. Dadurch ist garantiert, dass die beiden Lichtstrahlen zu Beginn ihrer Reise »gleich« sind (dazu später mehr). Danach gehen sie getrennte Wege, bis sie schließlich wieder zusammengeführt werden.

Um die Bedeutung dieser »Zusammenführung« zu verstehen, müssen wir uns zunächst noch mit dem Begriff der Phase vertraut



In einem Interferometer wird das Licht durch einen Strahlteiler (zum Beispiel einen halbdurchlässigen Spiegel) auf verschiedenen Wegen ans Ziel geschickt. Dort hängt das Interferenzmuster davon ab, welchen Phasenunterschied die beiden Wellen auf ihrer Reise erlitten haben.

machen. Dazu stellen wir uns zwei Wellen mit gleicher Wellenlänge und Amplitude vor, die von einem bestimmten Punkt ausgehen. An diesem Punkt können die beiden Wellen ein Tal, einen Berg oder irgend etwas dazwischen haben. Wenn die beiden Wellen am Ausgangspunkt verschieden hoch sind, so spricht man von einer Phasenverschiebung. Die »relative Phase« zwischen den beiden Wellen ist dann der Betrag, um den man eine der Wellen nach vorne oder hinten verschieben muss, um die beiden zur Deckung zu bringen.

Haben beide Wellen am Ausgangspunkt einen Berg, oder jedenfalls die gleiche Höhe, so bezeichnet man sie als »in Phase«, das heißt, der Phasenunterschied ist gleich Null. In diesem Fall werden sich an jedem Punkt der Welle die Berge und Täler addieren, wodurch die Berge der resultierenden Gesamtwelle doppelt so hoch werden und die Täler doppelt so tief. Wenn wir uns jetzt an einen beliebigen Punkt der Gesamtwelle stellen und langsam die Phase zwischen den beiden Wellen verändern – also Berge und Täler gegeneinander verschieben –, so stellen wir fest, dass sich die Höhe der Gesamtwelle an unserem Messort ändert. Und genau das ist das Prinzip des Interferometers.

Im Interferometer nämlich haben beide Wellen unterschiedliche Wege zurückgelegt, wodurch sich ihre relative Phase ändern konnte. Eine solche Phasenänderung kann zum Beispiel dadurch entstehen, dass auf den beiden Wegen die Lichtgeschwindigkeit unterschiedlich war (auf diese Weise kann man den Brechungsindex eines Materials messen). Am Ende des Interferometers, wo beide Lichtstrahlen wieder zusammengefügt werden, erkennt man die

Phasenänderung daran, dass sich das gemessene Interferenzmuster oder, wie bei den gegenseitig verschobenen Wellen unseres obigen Beispiels, die Lichtintensität an einer bestimmten Stelle ändert.

Nun haben wir das nötige Rüstzeug, um uns in den folgenden Kapiteln anzusehen, wie Licht mit Atomen eine innige Verbindung eingeht.