

Einleitung

Wenn man an einem wolkenlosen Sommertag auf dem Balkon liegt und die Sonnenstrahlen auf der Haut spürt, dann kommen einem viele Gedanken. Südsee und Sandstrand sind sicher darunter, und vielleicht erinnert man sich auch daran, am Abend noch die Blumen zu gießen. Aber wer denkt bei einem Sonnenbad schon an CD-Spieler oder Atomuhren?

In diesem Buch wollen wir genau das tun. Es geht dabei um eine Beziehungsgeschichte, deren Hauptpersonen auch beim Sonnenbad vorkommen: Licht und Materie. Dass das Sonnenlicht unsere Haut wärmen und bräunen kann, wissen wir. Doch Licht und Materie können noch auf ganz andere Art und Weise aufeinander einwirken. Wer hätte zum Beispiel gedacht, dass Licht nicht nur wärmen, sondern auch äußerst gut kühlen kann? Oder dass man mit gebündeltem Licht nicht nur Löcher in Papier brennen, sondern auch einzelne Atome festhalten kann? Und was haben Lichtteilchen mit Geheimcodes zu tun? All das wollen wir uns in diesem Buch ansehen.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat sich unser Wissen vom Aufbau der Materie und vom Wesen des Lichts explosionsartig vermehrt. Dieses Wissen führte schließlich zu technologischen Revolutionen wie der Elektronik und dem Laser, und ständig kommen neue Anwendungen hinzu. Einen kleinen Abriss dieser Entwicklung will dieses Buch geben. Über all den nützlichen und segensreichen Anwendungen möchte ich aber auch zeigen, dass Physiker in ihrer Forschung vor allem von einer Kraft angetrieben werden: der Neugier. Auch wenn es im Rückblick oft so erscheint, als sei ein bestimmtes Gerät zielstrebig von schlaun Wissenschaftlern entwickelt worden, so ist die zeitliche Reihenfolge doch meist umgekehrt.

Das Gebiet, das auf den folgenden Seiten dargestellt werden soll, ist so umfangreich, dass ich notwendigerweise nur einen kleinen

Ausschnitt behandeln kann. Nach den einführenden Kapiteln zur Atomphysik und zur Geschichte des Lichts werden wir daher gleich in die aktuelle Forschung springen, die in den letzten Jahren für einige Schlagzeilen und Nobelpreise gesorgt hat. Insbesondere den Nobelpreis des Jahres 2001 für die Bose-Einstein-Kondensation und die möglichen Anwendungen, die sich aus dieser Forschungsrichtung ergeben, werde ich ausführlich besprechen.

Dieses Buch wendet sich in erster Linie an Nicht-Physiker, die wissen möchten, was es mit der Atom- und Laserphysik auf sich hat. Daher habe ich auf ein umfangreiches Verzeichnis der Originalliteratur verzichtet. Wer aber dennoch Informationen aus erster Hand sucht, der wird sie in den Übersichtsartikeln und Fachbüchern finden, die jeweils im Text erwähnt werden.

Auch eine ausgewogene Darstellung der Leistungen einzelner Forschungsgruppen war in der Kürze eines populärwissenschaftlichen Buchs nicht möglich. Die Erwähnung bestimmter Forscher oder Institutionen ist daher in den meisten Fällen keine bewusste Hervorhebung, sondern eine willkürliche Auswahl meinerseits, um dem Leser einen Einblick in die Welt der Physik zu geben.

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 Farbtönungen 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 stütze 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 Sonnelicht, 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

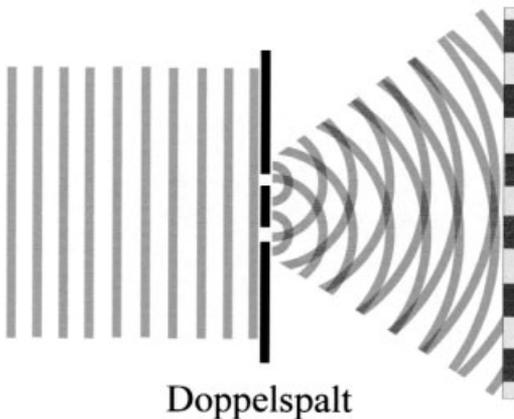
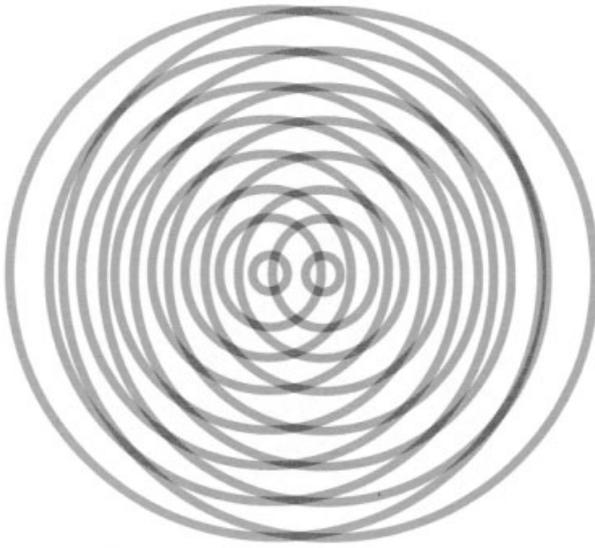
Wie gesagt, für die nächsten hundert Jahre war Newtons Theorie das Maß aller Dinge, und nur ganz wenige zogen sie ernsthaft in Zweifel. Einer von ihnen war der deutsche Mathematiker Leonhard Euler, der zwischen 1760 und 1762 eifrig mit der jungen Prinzessin von Anhalt-Dessau korrespondierte [Zajonc (1995), 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?

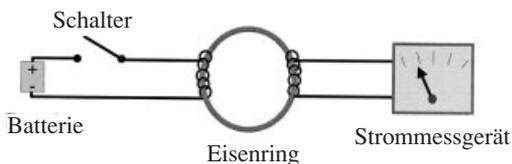
Seit Isaac Newtons phänomenalen Erfolgen bei der Beschreibung der Planetenbewegung durch seine Mechanik und Gravitationstheorie waren viele Physiker der Meinung, die Natur ließe sich alleine

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

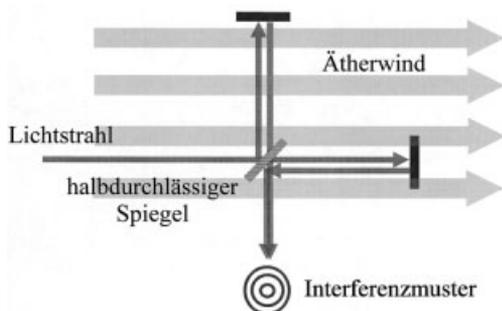
Feld gefunden hatte, bemerkte er, dass sich aus all diesen Formeln eine Gleichung herleiten ließ, die vollkommen identisch war mit einer Wellenformel für Wellen auf einem Seil. Wie Faraday schon vermutet hatte, konnten sich also elektrische und magnetische Felder wie Wellen ausbreiten. Aus Maxwells Wellengleichung 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 Funkengenerator 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 Rätselrätens 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.

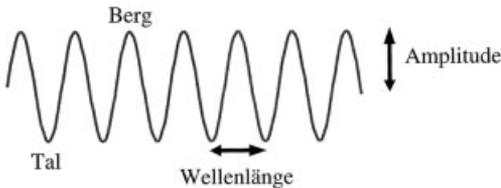
Licht: Eine kurze Gebrauchsanleitung

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.

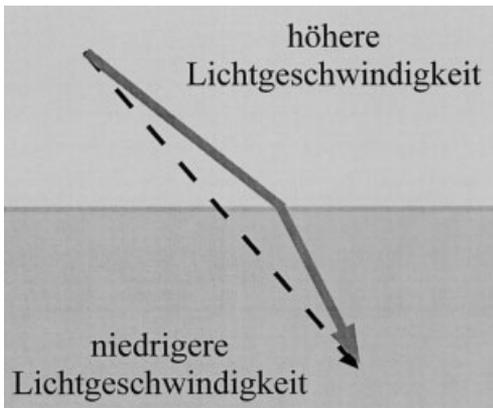
Der Ausdruck »Brechungsindex« legt nahe, dass die Lichtgeschwindigkeit etwas mit der Brechung von Licht zu tun hat oder,

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.

Diese 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-

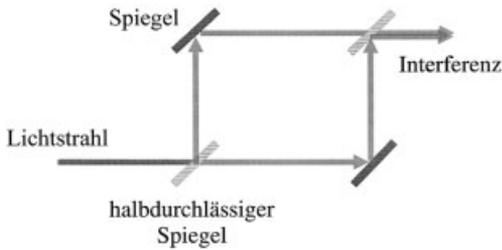


Das Prinzip der Brechung. Anstatt den direkten Weg zu nehmen (gestrichelter Pfeil), macht das Licht einen Umweg, um so schnell wie möglich ans Ziel zu kommen. Das führt zu einem geknickten Ausbreitungsweg.

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 $3 \text{ Zentimeter} - 1 \text{ Zentimeter} = 2 \text{ Zentimeter}$ 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.

8

Vertauschte Rollen

Wie man Licht zum Stillstand bringt

Im Jahr 2001 flog Lene Vestergaard Hau aus den Vereinigten Staaten von Amerika zurück in ihre Heimat. Die dänische Quantenphysikerin sollte dort einen Vortrag über ihre neuesten Forschungsergebnisse halten. Während sie den Atlantik in Richtung Europa überquerte, dachte sie über ihre Experimente nach, die sich mit der Ausbreitung von Lichtstrahlen befassten. Und als sie in Kopenhagen aus dem Flugzeug stieg, rechnete sie kurz im Kopf nach, dass der Lichtpuls, den sie vor ihrem Abflug in ihrem Labor erzeugt hatte, erst einige Stunden nach ihr in Kopenhagen eingetroffen wäre [Hau (2001), S. 38].

Auch wenn es wie das Hirngespinnst eines verrückten Forschers klingt: Lene Hau hatte tatsächlich kurz zuvor einen Lichtpuls von 300.000 Kilometern pro Sekunde auf – im wahren Wortsinne – Schrittgeschwindigkeit abgebremst. Und mehr noch: Kurze Zeit später gelang es ihr und ihren Kollegen sogar, Licht für einen Moment völlig zum Stillstand zu bringen! »Haltet den Lichtstrahl an, ich will runter!«, lautete daraufhin die Schlagzeile einer amerikanischen Tageszeitung, die diese unglaublich klingende Geschichte sofort aufgriff – vielleicht in Anspielung auf Einsteins berühmten Ritt auf dem Lichtstrahl, aus dem später die spezielle Relativitätstheorie entstand. Einen Lichtstrahl anzuhalten, das klingt so unmöglich, als wolle man eine Sternschnuppe einfangen oder einen Fluss bergauf fließen lassen. Doch im Gegensatz zum Plan der Schildbürger, Licht in Säcken zu transportieren, funktioniert Lene Haus Methode – wie, das sehen wir uns in diesem Kapitel an.

Licht auf Reisen

Dass Licht sich in verschiedenen Materialien unterschiedlich schnell bewegt, sehen wir jeden Tag mit unseren eigenen Augen. Die Wirkung der Linse unseres Auges, die die aus unserer Umgebung kommenden Lichtstrahlen bündelt und als Bild auf die Netzhaut wirft, basiert nämlich auf dem Prinzip der Lichtbrechung. Und die Lichtbrechung an der Linse wiederum beruht, wie wir bereits gesehen haben, darauf, dass sich die Lichtgeschwindigkeit beim Übergang zwischen der Luft und dem Hornmaterial der Linse ändert und damit der schnellste Weg nicht mehr eine Gerade ist, sondern einen Knick hat. Wie schnell sich Licht in einem Material bewegt, hängt von dessen Zusammensetzung ab. Gegenüber der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einigen Stoffen bis zu 60 oder 70 Prozent verringert sein. In Glas zum Beispiel ist sie um das 1,4-fache niedriger, der Brechungsindex von Glas ist daher 1,4. Um Licht aber auf die Geschwindigkeiten abzubremsen, die Lene Hau in ihrem Labor erzielte, müsste man ein Material mit einem Brechungsindex von 30 Millionen finden – doch in der Natur gibt es solch ein Material nicht. Und selbst wenn wir einen Stoff mit einem einigermaßen hohen Brechungsindex – sagen wir 1000 – herstellen könnten, so würde uns doch ein Effekt einen Strich durch die Rechnung machen: die Absorption. Ist nämlich der Brechungsindex hoch, so absorbiert das Material in der Regel das Licht auch stark. Mit anderen Worten: Auf diese Art könnten wir unseren Lichtstrahl vielleicht abbremsen, doch gleichzeitig würden wir ihn auch vernichten.

Um eine bessere Lösung zu finden, sehen wir uns zunächst etwas näher an, wie sich Licht in einem Material fortpflanzt. Im Vakuum breitet sich Licht als elektromagnetische Welle aus, ohne dass es dazu ein Medium bräuchte. Die Geschwindigkeit, mit der sich Licht im Vakuum fortbewegt, ist immer dieselbe: knapp 300.000 Kilometer pro Sekunde. In einem materiellen Körper allerdings sieht die Sache etwas anders aus. Hier trifft das Licht ständig auf Atome, mit denen es in Wechselwirkung tritt. Vereinfacht gesprochen passiert Folgendes: Das (sehr schnell oszillierende) elektrische Feld des Lichts regt das äußerste Elektron eines Atoms zum Schwingen an. Das so schwingende Elektron sendet – wie jede beschleunigte Ladung – seinerseits eine Lichtwelle aus, die sich mit der eintreffenden Licht-

welle überlagert. Die vom Atom ausgesandte Welle hat die gleiche Frequenz wie die eintreffende, ist aber dieser gegenüber ein klein wenig verzögert, da das Elektron des Atoms ja erst einmal in Schwung gebracht werden musste. Im Physikerjargon nennt man das auch Phasenverschiebung.

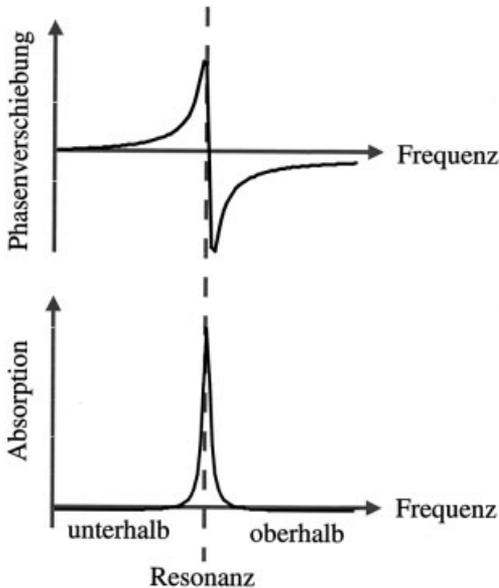
Dieser Vorgang der Phasenverschiebung spielt sich bei jeder Begegnung der eintreffenden Lichtwelle mit einem Atom des Materials ab, das die Lichtwelle durchquert. Addiert man alle Phasenverschiebungseffekte zusammen, so stellt sich heraus, dass sich die Lichtwelle in dem Material langsamer fortbewegt. Der Gesamteffekt der Verzögerungen an jedem einzelnen Atom und der Überlagerung der derart verzögert ausgesandten Wellen ist also, dass sich die Lichtwelle insgesamt langsamer ausbreitet.

Weingläser und Telefonhörer

An dieser Stelle erinnern wir uns, dass es bei der Wechselwirkung einer Lichtwelle mit einem Atom eine große Rolle spielt, ob die Frequenz des Lichts mit der Resonanzfrequenz eines atomaren Übergangs übereinstimmt oder zumindest nahe daran ist. Bisher haben wir so getan, als bringe das Licht einfach ein Elektron des Atoms zum Schwingen. Das kann es unabhängig von seiner Frequenz. Interessanter wird es allerdings, wenn sich die Frequenz des einfallenden Lichts einer Resonanz des Atoms nähert. Zielt man mit einem Laserstrahl auf ein Gas aus lauter gleichen Atomen und stimmt die Frequenz der Lichtwelle genau auf die Resonanzfrequenz der Atome ab, so werden diese sehr effizient Photonen aus dem Laserstrahl aufnehmen. Mit anderen Worten, das Gas wird den Laserstrahl schlucken, was natürlich nicht unser Ziel war.

Wenn wir also auf der Resonanz des Atoms kein Glück haben, dann vielleicht in einiger Entfernung davon, also bei einer etwas höheren oder niedrigeren Frequenz? Machen wir zur Abwechslung ein kleines Experiment mit unserem Telefon, wobei dieses ausnahmsweise nicht schnurlos sein darf. Wir nehmen den Hörer ab und lassen ihn am Spiralkabel herunter baumeln. Nun bewegen wir die Hand, in der wir das Kabel halten, langsam auf und ab. Tun wir dies langsam genug, so wird der Telefonhörer am Ende des Kabels sich genauso bewegen wie unsere Hand: Heben wir sie an, so geht auch

der Hörer nach oben. Bis jetzt hat unser kleines Experiment also noch keine Überraschungen produziert. Doch nun bewegen wir unsere Hand etwas schneller. Zunächst sehen wir, dass der Hörer stärker auf und ab schwingt. Zudem kommt er immer mehr aus dem Rhythmus und folgt den Bewegungen unserer Hand nicht mehr. Erhöhen wir die Geschwindigkeit weiter, so beruhigt sich der Hörer langsam wieder, doch nun ist etwas Merkwürdiges passiert: Folgte er anfangs unserer Handbewegung, so tut er nun genau das Gegenteil. Bewegen wir die Hand nach unten, so kommt uns der Hörer entgegen anstatt ebenfalls abwärts zu schwingen.



In der Nähe einer Resonanz ändert sich die Phasenverschiebung eines angeregten Oszillators (zum Beispiel eines Telefonhörers am Kabel oder eines Elektrons im Atom) sehr stark. Unterhalb der Resonanzfrequenz schwingt er im Gleichtakt mit der anregenden Kraft, oberhalb davon jedoch im Gegenteil. Die Absorption ist auf der Resonanz besonders stark.

Ende des Experiments. Was wir soeben an einem Alltagsbeispiel ausprobiert haben, lässt sich allgemein auf Resonanzerscheinungen anwenden. Wir können also zusammenfassen: Nähert man sich mit steigender Frequenz der Resonanz eines Systems (zum Beispiel un-

seres Spiralkabels), so schwingt dieses immer stärker und zunächst im Gleichtakt mit der anregenden Kraft (unserer Hand). Nahe an der Resonanzfrequenz kommt das System dann immer mehr aus dem Rhythmus, bis es schließlich im Gegentakt schwingt, sobald man die Resonanz überschritten hat.

Jetzt müssen wir uns noch ansehen, was in der Nähe der Resonanz mit der Absorption passiert. In unserem Telefonhörerexperiment wurden die Schwingungen des Hörers immer stärker, je näher wir an der Resonanzfrequenz des Systems Spiralkabel plus Hörer waren. Und wir haben auch gemerkt, dass wir immer mehr Kraft aufwenden mussten, um es im Zaum zu halten. Mit anderen Worten, das Hörer-Spiralkabel-Gespann hat unserer Hand Energie entzogen und diese dazu verwendet, immer heftiger zu schwingen. Dasselbe geschieht in einem Atom, dessen äußerstes Elektron von einer Lichtwelle angeregt wird: Stimmt die Frequenz des Lichts mit der Resonanzfrequenz des Atoms überein (und damit mit dem Abstand zwischen zwei Quantenzuständen), so absorbiert das Atom ein Photon der Lichtwelle.

Auch wenn es noch nicht ganz offensichtlich ist, so sind wir dem Geheimnis des abgebremsten Lichts doch schon ein gutes Stück näher gekommen. Denn die Tatsache, dass unser Telefonhörer (oder das Elektron des Atoms) immer mehr außer Takt mit unserer Hand (der Lichtwelle) gerät, wenn wir uns der Resonanzfrequenz nähern, kann sozusagen als Bremse für Lichtwellen ausgenutzt werden. Es gibt also abermals einen Rollentausch: Während bei der Laserkühlung die Lichtteilchen der Laserstrahlen die Bewegung der Atome stoppten, so sind jetzt die Atome an der Reihe, ihrerseits die Lichtwellen anzuhalten.

Bisher haben wir häufiger von Lichtwellen und Lichtpulsen gesprochen, als ob sie ein und dasselbe wären. Nun, bisher brauchten wir uns um den feinen Unterschied auch nicht zu kümmern, da er nie eine große Rolle spielte. Doch in diesem Kapitel geht es sozusagen ans Eingemachte, und deshalb kommen wir nicht umhin, nochmals ein paar geistige Klimmzüge zu machen, um das Wesen eines Lichtpulses genauer zu ergründen.

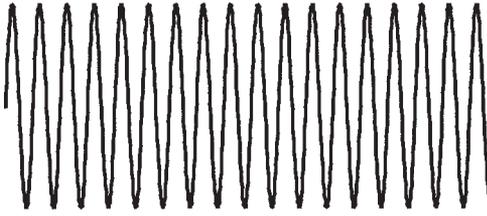
Je kürzer, desto breiter

Fangen wir mit einer offensichtlichen Feststellung an: Ein Lichtpuls hat ein Anfang und ein Ende, während eine Lichtwelle sich (theoretisch) ins Unendliche erstreckt. In gewisser Weise ist ein Lichtpuls also ein kleiner Teil einer unendlichen Lichtwelle. Wir können einen Lichtpuls erzeugen, indem wir beispielsweise eine Taschenlampe kurz aufblitzen lassen. Die räumliche Länge des Lichtpulses hängt dann davon ab, wie lange wir die Taschenlampe anknipsen. Lassen wir sie für eine Sekunde an, so wird der Lichtpuls, den wir auf diese Weise erzeugt haben, ungefähr bis zum Mond reichen. Gelingt es uns, den Schalter nur für eine tausendstel Sekunde zu betätigen, so entspricht die Länge des Lichtpulses immerhin noch der Entfernung München–Stuttgart.

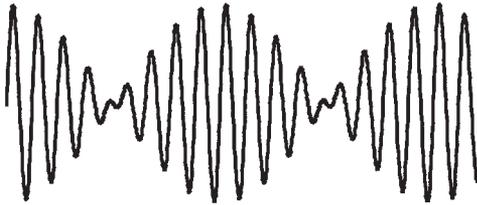
Was aber hat all dies mit unserer Lichtbremse zu tun? Dazu müssen wir uns unseren Lichtpuls aus einer anderen Perspektive ansehen. Mittlerweile wissen wir ja, dass in der Physik neue Einsichten oft dadurch gewonnen werden, dass man ein Problem unter einem neuen und oftmals scheinbar vollkommen entgegengesetzten Blickwinkel betrachtet. Unseren Lichtpuls betrachten wir deshalb nun nicht mehr als Lichtwelle mit einer bestimmten Frequenz, aus der wir ein Stück von der Länge unseres Pulses herauspicken, sondern als viele Wellen verschiedener Frequenzen, die wir überlagern.

Wellen gleicher Frequenz können einander verstärken oder auslöschen, je nachdem, ob sich gerade zwei Wellenberge oder ein Wellenberg und ein Wellental treffen. Auch Wellen verschiedener Frequenzen können miteinander interferieren, was man hören kann, wenn man auf dem Klavier zwei benachbarte Tasten anschlägt. Man hört dann einen Ton, dessen Stärke sehr schnell variiert. Die Überlagerung zweier Frequenzen führt also dazu, dass die resultierende Schallwelle in regelmäßige »Pakete« zerlegt wird. Nimmt man nun eine ganze Palette an Frequenzen, so kann man damit ein einziges Paket erzeugen, also einen Puls. Je kürzer dieser Puls sein soll, desto mehr verschiedene Frequenzen braucht man allerdings dazu.

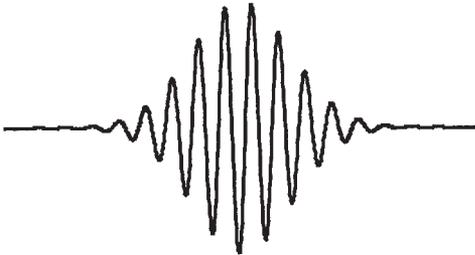
Das können wir uns relativ einfach erklären. Nehmen wir an, wir lassen zwei Wellen mit leicht unterschiedlichen Frequenzen an einem Wellenberg loslaufen. Ganz zu Anfang verstärken sich also die beiden Wellen, doch nach einiger Zeit machen sich die unterschiedlichen Frequenzen (und damit auch unterschiedlichen Wel-



eine Frequenz (Welle)



zwei Frequenzen (Schwebung)



viele Frequenzen (Puls)

Überlagert man zwei Wellen mit leicht unterschiedlichen Frequenzen, so entsteht ein Schwebungsmuster.

Werden sehr viele Wellen überlagert, so kann ein Puls entstehen, der eine begrenzte Länge hat. Je kürzer der Puls, desto mehr verschiedene Frequenzen werden benötigt.

lenlängen) bemerkbar: Die beiden Wellen kommen langsam außer Takt und löschen sich nach einiger Zeit sogar gegenseitig aus, da ein Wellenberg der einen Welle ein Wellental der anderen eingeholt hat. Etwas später jedoch treffen wieder zwei Wellenberge oder -täler aufeinander, so dass sich die beiden Wellen verstärken.

Solange nur zwei Wellen überlagert werden, geht dieses Spiel ewig weiter, so dass wir bei den Klaviersaiten das rhythmische Lauter- und Leiserwerden des Tons hören, das man auch Schwebung nennt. Sind jedoch viele Wellen mit verschiedenen Frequenzen im Spiel, so wird es immer schwieriger, alle Wellenberge auf einmal zusammenfallen zu lassen. Im Extremfall verstärken sich alle Wellen nur einmal für kurze Zeit, wogegen sie sich für andere Zeiten gegenseitig auslöschen – mit anderen Worten, ein kurzer Puls ist entstanden. Je größer das Spektrum an Frequenzen ist, das die einzelnen Wellen aufweisen, desto kürzer wird der Puls.

Wenn wir hier ein Déjà-vu-Erlebnis haben und dabei an die Heisenberg'sche Unschärferelation denken, so ist das kein Zufall. Denn schließlich verbirgt sich ja auch hinter dem Lichtpuls eine Art Unschärferelation: Je genauer wir wissen, wo der Lichtpuls ist (je kürzer er ist, desto genauer können wir seine Position bestimmen!), desto weniger wissen wir über seine genaue Frequenz (je kürzer der Lichtpuls, desto mehr Frequenzen enthält er). Eine ähnliche Beziehung haben wir auch im Zusammenhang mit dem Ramsey-Interferometer (die getrennten oszillierenden Felder) schon kennen gelernt.

Doch nun zurück zu unserem eigentlichen Thema. Wir wissen also jetzt, dass man einen Lichtpuls letztendlich als Überlagerung vieler Einzelwellen mit verschiedenen Frequenzen betrachten kann. Wie schnell breitet sich so ein Puls aus? Zunächst wird man wohl annehmen, dass er sich genauso schnell bewegt wie eine Lichtwelle. Doch halt: Welche Welle meinen wir da eigentlich? Gerade haben wir gesagt, dass unser Lichtpuls aus vielen Wellen mit einer ganzen Palette an verschiedenen Frequenzen besteht. Und die Ausbreitungsgeschwindigkeit jeder dieser Wellen kann natürlich unterschiedlich sein, da die Phasenverschiebung (und damit der Brechungsindex), wie wir eben gesehen haben, davon abhängt, wie nah oder fern die Frequenz der Lichtwelle von der Resonanzfrequenz der Atome entfernt ist. Wir müssen also herausfinden, wie schnell sich jede dieser Wellen ausbreitet und welche Konsequenzen das für die Geschwindigkeit des Pulses hat.

Die Rechnung, die man dazu durchführen muss, ist in Worten nur umständlich auszudrücken, weshalb uns hier das Ergebnis genügen soll. [Wer an der mathematischen Herleitung interessiert ist, findet diese zum Beispiel in Fowles (1989), S. 13.]. Und das besagt,

dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Lichtpulses (oder jedes beliebigen anderen Wellenpulses) davon abhängt, wie sehr sich der Brechungsindex des Materials, durch das sich der Puls fortbewegt, mit steigender Frequenz ändert. Ist diese Änderung gering, so unterscheidet sich die Geschwindigkeit des Pulses (die auch Gruppengeschwindigkeit genannt wird) kaum von der Geschwindigkeit der Einzelwellen (der Phasengeschwindigkeit). Je stärker allerdings die Änderung des Brechungsindex wird, desto langsamer bewegt sich der Puls fort. Das führt dazu, dass sich das durch die Überlagerung mehrerer Wellen entstandene Gebilde langsamer fortbewegt als die einzelnen Wellen, aus denen es besteht.

Damit haben wir ein Etappenziel erreicht. Das Telefonhörereperiment hat uns gezeigt, dass sich in der Nähe der Resonanz die Phasenverschiebung des Hörers gegenüber unserer Hand schnell ändert. Dasselbe gilt für eine atomare Resonanz, und damit haben wir unsere Lichtbremse endlich gefunden. Lassen wir einen Lichtpuls durch ein Material fliegen, dessen Atome eine Resonanz in der Nähe des Frequenzspektrums des Pulses haben, so sollte die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Pulses im Material deutlich niedriger sein als im luftleeren Raum (wo, das haben wir stillschweigend vorausgesetzt, der Brechungsindex für jede Frequenz einer Lichtwelle gleich ist, nämlich eins).

Ein Laser sorgt für Durchblick

Ein Problem müssen wir allerdings noch aus dem Weg räumen, das wir bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt haben: die Absorption. Nähern wir uns nämlich einer Resonanz, so ändert sich nicht nur der Brechungsindex stark, sondern die Absorption nimmt auch zu. Dort also, wo unsere Lichtbremse am besten funktionieren sollte, zerstört sie gleichzeitig den Lichtpuls, den wir ja nur verlangsamen wollen. Das wäre dann genauso nützlich wie eine neuartige Autobremse, die unser Gefährt zwar schnell zum Stehen bringt, es dabei aber gleichzeitig in seine Einzelteile zerfallen lässt. Man müsste also irgendwie die Absorption in der Nähe der Resonanz verhindern können – und genau das war der eigentliche Kunstgriff von Lene Hau.

Zugegeben: Schon bis hierher war die ganze Sache recht kompliziert, und es wird gleich noch vertrackter. Fassen wir also noch einmal kurz zusammen, welche Bausteine für die Lichtbremse wir bisher gesammelt haben und welche uns noch fehlen. Da wäre zum einen die Tatsache, dass ein Lichtpuls aus vielen überlagerten Lichtwellen mit verschiedenen Frequenzen besteht. Wie schnell sich ein solcher Puls in einem Material fortbewegt, hängt zudem davon ab, wie stark sich der Brechungsindex des Materials im Frequenzspektrum des Pulses ändert. Was uns jetzt noch stört, ist die Absorption, die normalerweise immer in der Nähe einer Resonanz auftritt – also genau da, wo wir sie eigentlich nicht haben wollen.

Der Trick, mit dem wir uns die störende Absorption vom Halse schaffen, heißt elektromagnetisch induzierte Transparenz und ist ein weiteres Beispiel dafür, wie perfekt man mit Laserlicht die Eigenschaften von Atomen kontrollieren kann. Während die Laserkühlung sich in erster Linie mit der Bewegung der Atome befasst, zielt die elektromagnetisch induzierte Transparenz sozusagen ins Herz des Atoms: Sie manipuliert die für ein bestimmtes Atom charakteristischen Energiezustände.

In der Quantenmechanik versagt die Erfahrungsregel, dass eine Münze entweder Kopf oder Zahl zeigt, wenn man sie in die Luft wirft und auf dem Boden landen lässt. Während uns der gesunde Menschenverstand sagt, dass die Münze stets auf der einen oder anderen Seite zum Liegen kommen wird, zwingt uns die Quantenmechanik, eine dritte Möglichkeit in Betracht zu ziehen: Nämlich die, dass die Münze gleichzeitig Kopf und Zahl zeigt und dass die Seite, die wir letztendlich sehen, erst dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erscheint, wenn wir die Münze beobachten. Die beiden Zustände »Kopf« und »Zahl« sind in diesem Fall überlagert, und erst durch die Beobachtung springt die Münze auf die eine oder andere Seite. Für tatsächliche Münzen gelten diese Quantenregeln natürlich nicht, sondern nur für mikroskopische Objekte wie zum Beispiel Atome.

Auf dem Prinzip der Überlagerung beruht auch die elektromagnetisch induzierte Transparenz. Die Idee dabei ist folgende: Um zu verhindern, dass das Atom aus seinem Grundzustand heraus durch Aufnehmen eines Lichtteilchens in einen angeregten Zustand übergehen kann, überlagert man den Grundzustand mit einem anderen Zustand (nennen wir ihn Hilfszustand). Diesen wählt man so, dass

er dem Bestreben des Atoms, ein Photon zu absorbieren, entgegenwirkt. Die Überlagerung erreicht man, indem man einen schwachen Laserstrahl (Kopplungsstrahl genannt) auf die Atome richtet, dessen Frequenz so gewählt ist, dass sie dem Energieabstand zwischen dem Hilfszustand und dem angeregten Zustand entspricht.

Die Wirkung des Kopplungsstrahls können wir uns im Telefonhörerexperiment vereinfacht so vorstellen: Der Hörer ist von unten an ein zweites, dünnes Spiralkabel angeschlossen, das wir mit der anderen Hand festhalten. Wenn wir das obere Spiralkabel immer schneller auf und ab bewegen und uns so der Resonanz nähern, fangen wir gleichzeitig an, das untere Spiralkabel im Gegentakt schwingen zu lassen. Auf diese Weise wird der Telefonhörer von den beiden Kabeln in entgegengesetzte Richtungen gezogen und wird sich deshalb deutlich weniger oder sogar überhaupt nicht mehr bewegen, obwohl wir unsere Hände mit der Resonanzfrequenz auf und ab bewegen.

Die quantenmechanische Beschreibung ist natürlich etwas komplizierter, aber letztendlich läuft auch sie darauf hinaus, dass der zusätzliche Kopplungsstrahl für eine Überlagerung von Quantenzuständen sorgt, die dem Resonanzeffekt des Laserstrahls entgegenwirkt. [Die Wirkung der elektromagnetisch induzierten Transparenz wird eindrucksvoller, wenn man sich konkrete Zahlen ansieht. Während zum Beispiel die kalten Atome von Lene Hau bei genau auf die Resonanz gestimmtem Laserlicht weniger als den billionsten Teil des billionsten Teils (eine Zahl mit 23 Nullen hinter dem Komma) des einfallenden Lichts durchlassen würden, sorgt der Kopplungsstrahl dafür, dass fast das gesamte Licht die Gaswolke ungehindert passieren kann.] Zusätzlich macht der Kopplungsstrahl den Verlauf des Brechungsindex in der Nähe der Resonanz noch steiler, was zu einer extrem niedrigen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtpulses führt.

Mit dem Fahrrad auf Lichtjagd

Jetzt können wir uns endlich ansehen, wie Lene Hau den Lichtpuls herstellte, der für die Strecke Boston–Kopenhagen viel länger gebraucht hätte als ein Flugzeug. In ihrem Experiment benutzte sie als »Material« ein Gas aus lasergekühlten Atomen. Diese sind auf

grund ihrer niedrigen Temperatur sehr langsam, was das Treffen der richtigen Frequenz für den Kopplungsstrahl leichter macht: Je langsamer sich die Atome bewegen, desto weniger spielt der Doppler-Effekt eine Rolle, der die Frequenz des Kopplungslasers aus der Sicht der Atome »verschmieren« würde. Auf dieses Atomgas wurde nun einerseits der Kopplungsstrahl geschickt, der es nahe der Resonanzfrequenz »durchsichtig« machte. Sodann wurde ein Lichtpuls erzeugt, der vier millionstel Sekunden dauerte und im freien Raum eine Länge von 1,5 Kilometern gehabt hätte. Sobald er allerdings in das Gas eintrat, verringerte sich seine Gruppengeschwindigkeit von knapp 300.000 Kilometern pro Sekunde auf weniger als 50 Kilometer pro Stunde – Lene Hau hätte ihr gebremstes Licht also sogar mit dem Fahrrad einholen können!

Nobelpreisträger Eric Cornell hat das Kunststück der dänischen Forscherin mit einem anschaulichen Vergleich beschrieben: »Stellen Sie sich vor, Sie warten am Bahnhof auf den nächsten IC. Vor Ihnen ist ein hauchdünnes Stück seltsamen Stoffes über die Schienen gespannt, das der ankommende Zug eigentlich im Nu zerreißen sollte. Zu Ihrem Erstaunen aber bricht der Stoff nicht sofort zusammen, als die Lokomotive auf ihn stößt – stattdessen scheint diese von dem Material verschluckt zu werden!« [Cornell (2002), S. 461]. Tatsächlich erscheint der Bremsseffekt von Lene Hau noch eindrucksvoller, wenn man die Länge des Pulses im freien Raum mit der im atomaren Gas vergleicht: Ein ursprünglich mehr als ein Kilometer langer Lichtpuls wurde durch die atomare Superbremse auf weniger als einen zehntel Millimeter zusammengestaucht.

Alleine bei dem Gedanken, Licht so weit abzubremsen, dass man es mit dem Fahrrad überholen könnte, kann einem schwindlig werden. Doch nach den ersten Experimenten mit dem extrem langsam Licht drängte sich sofort die Frage auf: Wenn man Licht schon so weit verlangsamen kann, warum sollte man es dann nicht auch vollständig anhalten können? Das Abbremsen von Licht mag man vielleicht noch als nettes Spielchen ansehen, doch einen Lichtpuls komplett zu stoppen, hat ganz offensichtliche Anwendungen. Für die Datenübertragung, das haben wir zu Anfang dieses Buchs schon gesehen, ist Licht ideal geeignet. Bei jeder Datenübertragung aber müssen früher oder später Informationen umgeleitet, sortiert oder zwischengespeichert werden. All diese Funktionen müssen bisher noch über den Umweg der Elektronik ausgeführt werden, da man

mit Licht Informationen zwar hervorragend transportieren, aber eben nicht »lagern« kann. Denn das Wesen des Lichts liegt ja darin, dass es sich sehr schnell ausbreitet – stehen zu bleiben, widerstrebt ihm ganz entschieden.

Zunächst scheint dem Plan, einen Lichtpuls »einzufrieren«, ein fundamentales Problem entgegenzustehen. Je kleiner man die Gruppengeschwindigkeit des Lichtpulses im atomaren Gas machen will, desto stärker muss sich der Brechungsindex in der Nähe der Resonanz ändern. Dies kann man erreichen, indem man den Kopplungsstrahl immer schwächer macht. In letzter Konsequenz bedeutet das, dass man ihn ganz ausschaltet, um damit die Gruppengeschwindigkeit auf Null zu verringern. Doch dass diese Logik nicht ganz stimmen kann, liegt auf der Hand: Denn wenn der Kopplungsstrahl nicht mehr da ist, dann funktioniert auch die elektromagnetisch induzierte Transparenz nicht mehr. Auf diese Weise kann man also den Lichtpuls nicht zum Stehen bringen.

Umkehrschub für Photonen

Doch Lene Hau hatte einen Plan. Schließlich verlangte niemand, dass man den Lichtpuls abrupt zum Stillstand brachte. Ein Flugzeug lässt man ja nach der Landung auch nicht in eine Mauer rasen. Stattdessen betätigt der Pilot zunächst den Umkehrschub und dann, wenn die Maschine schon deutlich langsamer geworden ist, die Bremsen des Fahrwerks. Auf die gleiche Weise kann man die Lichtbremse dazu benutzen, einen Lichtpuls anzuhalten. Dazu lässt man diesen zunächst in das Gas aus kalten Atomen eindringen, wo er sofort auf wenige Kilometer pro Stunde abgebremst wird. Durch das Abbremsen wird der Puls stark gestaucht, so dass er sich nach kurzer Zeit vollständig im Gas befindet. In diesem Moment betätigt man die Scheibenbremse, das heißt, man verringert die Stärke des Kopplungsstrahls, bis dieser schließlich ganz verschwunden ist. Hat es der Lichtpuls bis jetzt noch nicht geschafft, der Gaswolke zu entkommen, so ist er gefangen – seine Geschwindigkeit ist gleich Null.

Anders als beim Flugzeug jedoch kann dieser Vorgang vollkommen rückgängig gemacht werden: Schaltet man den Kopplungsstrahl langsam wieder ein, so gewinnt der im Gas geparkte Lichtstrahl an Fahrt und verlässt schließlich die Wolke. Einmal entkom-

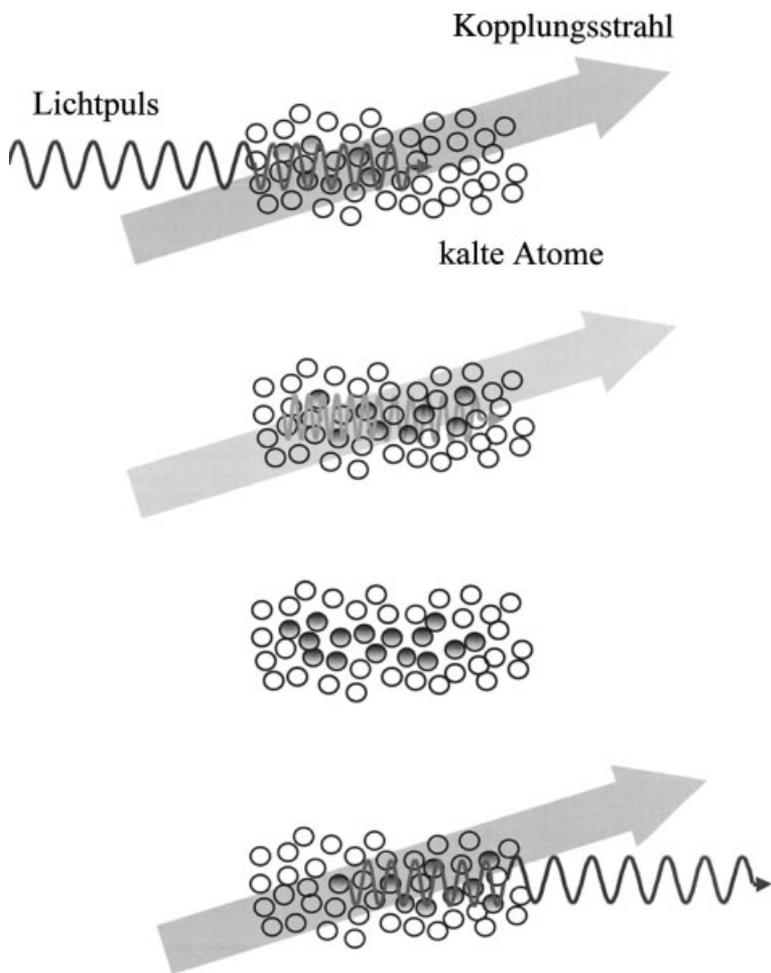
men, fliegt er mit unverminderter Lichtgeschwindigkeit weiter, als sei nichts gewesen. Lene Hau gelang es auf diese Weise, einen Lichtpuls für eine tausendstel Sekunde in einer nur einen viertel Millimeter großen Gaswolke zwischenzulagern. Auch wenn eine tausendstel Sekunde nur sehr kurz scheint: Im freien Raum wäre der Puls in der gleichen Zeit 300 Kilometer weit geflogen!

Das klingt zunächst alles ganz einleuchtend, doch etwas unbehaglich wird einem spätestens dann, wenn man über den Verbleib der im ursprünglichen Lichtpuls enthaltenen Photonen nachdenkt. Was ist mit ihnen geschehen? Wie in einem atomaren Bermuda-Dreieck scheinen sie spurlos verschwunden zu sein. Langsames Licht konnten wir uns mit Hilfe der Phasenverschiebung und Gruppengeschwindigkeit gerade noch anschaulich erklären, aber ein vollkommen bewegungsloses Lichtteilchen? Das erscheint uns als Widerspruch in sich.

Ein Zwitterwesen im kalten Gas

Verabschieden wir uns also zuerst einmal von der Vorstellung eines Photons mit »Identität«: Das Wesen von Lichtteilchen ist es ja gerade, ununterscheidbar zu sein. Als Bosonen können beliebige von ihnen im gleichen Quantenzustand Platz nehmen, und sie können in beliebiger Zahl erzeugt (zum Beispiel von einer Lampe) oder vernichtet werden (von einem absorbierenden Körper). Wenn wir also sagen, der Lichtpuls fliegt auf der einen Seite in die Wolke hinein, bleibt dann für einige Zeit in ihr stecken, bevor er schließlich auf der anderen Seite wieder hinausfliegt, so dürfen wir das nicht unbedingt ganz wörtlich nehmen. Vielmehr können wir sagen: Ein Lichtpuls fliegt hinein, und ein *genau gleicher* Lichtpuls fliegt später wieder hinaus. Gleich heißt hier: mit gleichem Frequenzspektrum und gleicher Polarisierung. Während seines Aufenthalts im Gas jedoch wandelt sich der Lichtpuls in eine Art Zwitterwesen aus Licht und Materie um.

Sein Name – Dunkelzustandspolariton – erinnert tatsächlich an ein Wesen aus einer anderen Welt, doch was da im Gas mit dem Lichtpuls passiert, hat bei genauem Hinsehen nichts Übernatürliches an sich. Vielmehr sind wieder einmal die Gesetze der Quantenmechanik mit im Spiel. Die überlagerten Zustände nämlich



Der Bremsvorgang für einen Lichtpuls. Zunächst wird der eintreffende Puls von den kalten Atomen mit eingeschaltetem Kopplungslaser abgebremst. Dann wird der Kopplungsstrahl abgeschwächt, wodurch der Lichtpuls noch langsamer wird und sich in ein Dunkelzustandspolariton verwandelt, das aus dem Lichtpuls und den Überlagerungszuständen der Atome (graue Kugeln) besteht. Schaltet man den Kopplungsstrahl nun ganz aus, ist der Lichtpuls »gefangen«, das heißt, seine charakteristischen Eigenschaften sind in den Atomen gespeichert. Durch erneutes Anschalten des Kopplungslasers kann der Lichtpuls wieder zum Leben erweckt werden.

(auch Dunkelzustände genannt, da sie kein Licht absorbieren), die für die niedrige Gruppengeschwindigkeit und die aufgehobene Absorption verantwortlich sind, bilden gewissermaßen einen Gipsabdruck des ursprünglichen Lichtpulses. Die charakteristischen Eigenschaften des Pulses, wie seine Polarisierung und sein Frequenzspektrum, werden beim Abschalten des Kopplungsstrahls immer mehr von den Quantenzuständen der Gasatome aufgenommen, bis der Puls schließlich ganz verschwindet und alle Informationen über ihn auf die Atome übergegangen sind. Aus dem so entstandenen Dunkelzustandspolariton – oder Lichtpuls-Gipsabdruck – kann nun aber, wenn man den Kopplungsstrahl wieder einschaltet, ein dem ursprünglichen völlig gleicher Lichtpuls »gegossen« werden, der dann die Gaswolke verlassen und davonfliegen kann.

Das Interesse der Physiker gilt übrigens nicht zuletzt dem Zwitterwesen, zu dem der Lichtpuls in der Gaswolke mutiert. Denn abgesehen davon, dass das Anhalten des Pulses schon äußerst nützlich ist, um optische Daten zwischenspeichern, könnte man während dieses »Boxen-Stopps« vielleicht sogar noch an dem Lichtpuls feilen. Nachdem sich der Puls nämlich in das Dunkelzustandspolariton verwandelt hat, steckt die gesamte Information über ihn in den Quantenzuständen der Gasatome. Wenn man es nun schaffte, diese Quantenzustände auf kontrollierte Weise zu frisieren, bevor man den Lichtpuls wieder weiterfliegen lässt, würde das eine ganze Reihe von Möglichkeiten eröffnen. So wie bei einem Formel-Eins-Rennen ein Rennwagen in der Box mit neuen Reifen und Sprit versehen werden kann, so könnte man auch den ruhenden Lichtpuls auf Vordermann bringen. Zum Beispiel könnte man an den Daten, die er überträgt, bestimmte Rechnungen vornehmen oder eventuell bei der Übertragung entstandene Fehler korrigieren.

An all diesen Techniken arbeiten weltweit mehrere Forschungsgruppen, und einige dieser möglichen Anwendungen werden vielleicht eines Tages Wirklichkeit. Der Traum jedoch, Licht anzuhalten, hat sich bereits erfüllt. Nicht nur über Atome haben die Physiker jetzt also nahezu vollkommene Kontrolle, auch das flüchtige Licht ist ihnen hörig.