

6 Licht

Licht ist unsere wichtigste Energie- und Informationsquelle. Wenn wir es nicht gerade selbst erzeugen, so stammt das Licht um uns herum fast ausschließlich von der Sonne. Der Rest wird durch Feuer, Vulkanismus und Blitze erzeugt. Aber auch im Tierreich und bei manchen Pilzen sind Leuchterscheinungen zu finden. Glühwürmchen, Tiefseefische oder Quallen halten sich Leuchtbakterien, deren Licht sie für die Kommunikation mit Artgenossen oder zum Anlocken von Beute nutzen. Erst in der Nacht bemerken unsere Augen schließlich, dass das Universum vollständig von Licht erfüllt ist.

Die Sonne ist für die Erde sozusagen der Generalunternehmer in Sachen Energieversorgung. Wir werden von ihrem Licht buchstäblich am Leben gehalten. Würden wir die Sonne in Gedanken einmal völlig abschalten, wäre es auf der Erde nicht nur ziemlich dunkel, sondern in Kürze auch bitterkalt. Wenn wir von der Wärme im Erdinneren absehen, ergäbe sich eine Temperatur von minus 270 Grad Celsius. Das sind gerade einmal drei Grad über dem absoluten Nullpunkt der Temperaturskala. Und dies entspricht der durchschnittlichen Temperatur unseres Universums.

Für irgendeine Form von Leben wären diese Verhältnisse auf keinen Fall ausreichend. Nicht nur die Erdoberfläche und die Ozeane wären komplett durchgefroren, auch die Luft wäre zu Eis geworden. Über dem gefrorenen Sauerstoff und Stickstoff befände sich direkt das Vakuum des Weltalls. Allerdings wird in ein paar Milliarden Jahren nicht dieses Szenario Realität werden, sondern das genaue Gegenteil: Die Sonne wird sich am Ende ihres Sternendaseins so weit aufblähen, dass es auf der Erde unerträglich heiß wird und schließlich unsere Ozeane verdampfen.

Das Energieangebot der Sonne übersteigt unseren eigenen Bedarf um das Mehrtausendfache. Sie stellt über die Fotosynthese die Nährstoffproduktion der Pflanzen sicher. Von der kleinsten Alge bis zu den höchsten Bäumen beliefern Pflanzen wiederum nahezu das gesamte Tierreich mit Nahrung und Sauerstoff. Ohne Licht gäbe es daher für uns weder etwas zu essen noch zu atmen. Die einzigen Lebewesen, die nicht von der Sonne abhängen, sind Bakterienarten, die ihren Energiebedarf auf chemischem Wege decken. Sie leben zum Beispiel an heißen Quellen in der Tiefsee oder in hermetisch abgeschlossenen Höhlen. An diesen Orten haben sich im Lauf der Jahrtausende einzigartige Lebensgemeinschaften herausgebildet.

Aber nicht nur das Leben, sondern auch die globalen Energieströme an der Erdoberfläche werden vom Sonnenlicht angetrieben. Durch den unterschiedlichen Winkel, mit dem es auf die Erde trifft, erhalten die Äquatorregionen wesentlich

mehr Energie als die polaren Bereiche. Dieses ständige Ungleichgewicht ist der Motor für das Wetter und die Meeresströmungen. Ein Temperatúrausgleich kann aber wegen der Rotation der Erde nicht einfach auf einem geraden Weg erfolgen. Der Drehimpuls der Luft- und Wassermassen ist am Äquator maximal und an den Polen gar nicht vorhanden. Wegen der Drehimpulserhaltung kann somit warme Luft aus den Tropen nicht direkt zu den Polen strömen.

Daher bilden sich drehende Luftmassensysteme heraus, die wir als Hoch- und Tiefdruckgebiete kennen. Diese sind wiederum nicht gleichmäßig verteilt, da sich Land und Wasser unterschiedlich leicht erwärmen. Insgesamt bildet sich ein chaotisches Wettergeschehen heraus, das sich langfristigen Vorhersagen entzieht. Mittelt man aber die täglichen Variationen über einen längeren Zeitraum, so betrachtet man nicht mehr das Wetter, sondern das Klima. Dessen Verlauf lässt sich auch langfristig wieder mit Modellen beschreiben. Die wichtigsten Wärmetransportsysteme für das Klima sind jedoch nicht die Luft-, sondern die Meeresströmungen, denn Wasser kann pro Kubikmeter etwa 4000-mal mehr Wärme aufnehmen als Luft.

Licht versorgt das Leben aber auch mit einer Unmenge an Informationen. Eine schnelle und sichere Fortbewegung hängt im Tierreich weitgehend vom Sehen ab. Erst der direkte Blickkontakt auf Hindernisse, Artgenossen, Beute und Fressfeinde ermöglicht das Reagieren, Planen und Kommunizieren über größere Distanzen. Wir sind optische Wesen, die mit den Augen mehr Sinnesreize aufnehmen und verarbeiten als mit allen anderen Sinnesorganen zusammen. Egal ob beim Lesen, Autofahren oder am Computer, immer ermöglicht Licht die schnelle Erfassung einer beträchtlichen Datenmenge. Dabei sind unsere Augen nur in einem relativ kleinen Wellenlängenbereich für Licht empfindlich. Sie registrieren nur dasjenige Licht, das wir als *sichtbares Licht* bezeichnen. Alle anderen Arten von Licht können wir nicht sehen, und dies sind eine ganze Menge.

Sichtbares Licht umfasst in etwa die Farben eines Regenbogens. Es erstreckt sich über Violett, Blau, Grün, Gelb und Orange bis hin zum Rot. Dabei entspricht jeweils eine Farbe einer ganz bestimmten Wellenlänge des Lichts. Ähnlich wie bei Wasserwellen ist auch bei Licht die Wellenlänge gerade der Abstand zwischen zwei Wellenbergen. Nur werden die Berge und Täler dieser Welle von elektrischen und magnetischen Feldern gebildet. Doch möchte ich diesen Vergleich nicht überstrapazieren, denn schon bei der Wellenhöhe werden wir Probleme bekommen.

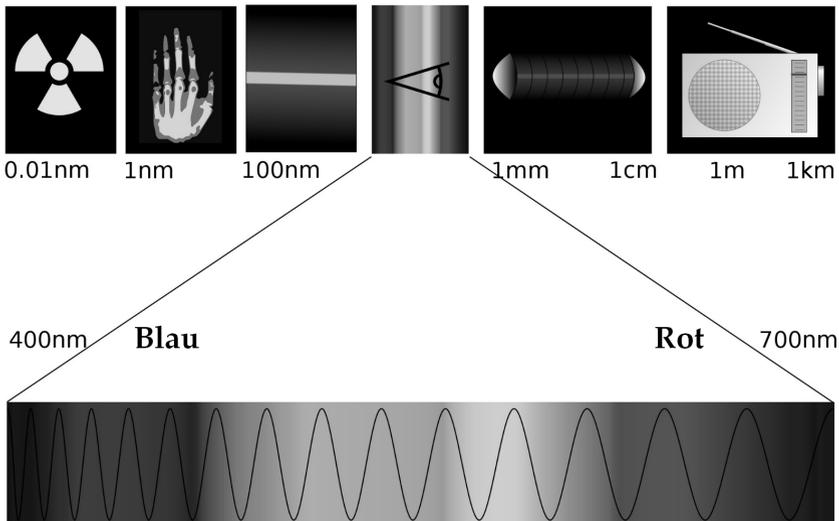
Licht einer bestimmten Wellenlänge ruft in den farbempfindlichen Sehzellen unserer Augen immer die gleiche Reaktion hervor. Drei Arten dieser Zellen sind jeweils für unterschiedliche Wellenlängenbereiche zuständig. Die eigentliche Farbinformation entsteht jedoch erst im Gehirn durch die nachgelagerte Signalverarbeitung aller Nervenreize. Schauen wir beispielsweise eine rote Rose an, so entsteht ein für Rot typisches Reizmuster. Ob wir dabei aber alle denselben Farbeindruck

haben, weiß niemand. Wie soll ich wissen, ob Ihr Rot genauso aussieht wie meines oder völlig anders?

Sichtbares Licht belegt Wellenlängen zwischen 380 und 780 milliardstel Meter oder kurz Nanometer. Dieser Bereich ist aber lediglich durch unser Sehvermögen begrenzt. Verlassen wir ihn in Richtung Rot zu noch größeren Wellenlängen, so gelangen wir ins Infrarot. Wir befinden uns nun im Abschnitt der Wärmestrahlung, die jeder Körper gemäß seiner Temperatur abstrahlt. Lassen wir die Wellenlänge noch weiter anwachsen, so erreichen wir nach den Mikrowellen, dem Bereich für Mobilfunk und Radar schließlich die Radiowellen, deren Wellenlängen bis zu Kilometern erreichen können.

Bewegen wir uns in entgegengesetzter Richtung über das Violett zu kürzeren Wellenlängen hinaus, so kommen wir zur ultravioletten Strahlung, kurz UV-Strahlung. Erweitern wir den Bereich erneut, so erreichen wir über die Röntgenstrahlung und Gammastrahlung am Ende den Bereich der kosmischen Gammastrahlung, die in den Tiefen des Universums erzeugt wird. Ihre kürzesten Wellenlängen liegen mit 10^{-15} Metern in derselben Größenordnung wie ein Atomkern.

Für alle diese Bereiche besteht außer der Wellenlänge keinerlei Unterschied zum sichtbaren Licht. Deshalb spricht man auch ganz allgemein von elektromagnetischer Strahlung. Auf der langwelligen und auf der kurzwelligen Seite sind bislang keine Einschränkungen der Wellenlänge bekannt, sodass es auch Licht jenseits der erforschten 20 Größenordnungen geben sollte.



8 Das Spektrum von Licht reicht von der Gamma- und Röntgenstrahlung, über das Ultraviolett, das sichtbare Licht und das Infrarot bis hin zur Radiostrahlung.

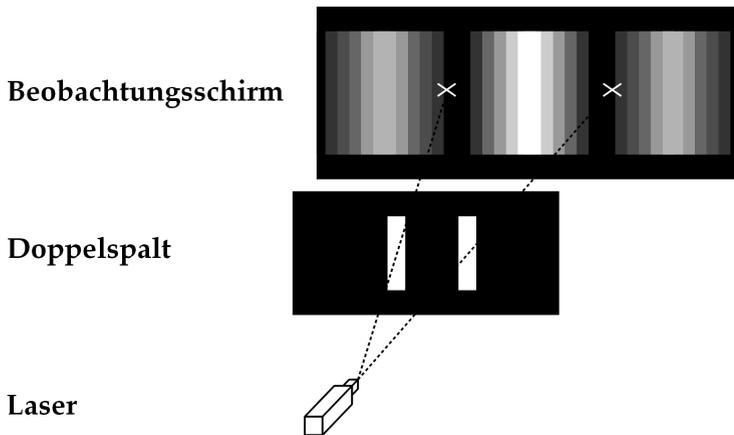
Licht bewegt sich immer mit einer endlichen Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit. Das klingt zunächst einmal ziemlich banal, denn Schall bewegt sich ja auch immer mit Schallgeschwindigkeit. Vielmehr ist jedoch damit gemeint, dass sich zumindest im luftleeren Raum alle Lichtarten immer mit genau der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen. Es gibt keine Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Wellenlänge und egal, welche Messung wir auch durchführen, wir erhalten immer denselben Wert für die Lichtgeschwindigkeit. Auch das klingt noch nicht besonders aufregend, wird uns aber trotzdem überraschende Konsequenzen bescheren, wenn wir später die spezielle Relativitätstheorie betrachten.

Die Lichtgeschwindigkeit ist für unsere Alltagsbegriffe mit fast genau 300 000 Kilometern pro Sekunde sehr schnell. Trotzdem bewirkt sie, dass wir alles niemals so sehen, wie es genau jetzt ist, sondern immer nur so, wie es einmal war. Normalerweise bemerkt man diese Zeitdifferenz überhaupt nicht. Doch telefonieren wir zum Beispiel über eine Satellitenverbindung mit einem anderen Kontinent, so ist der Weg dorthin schon etwa 80 000 km lang, also eine Viertelsekunde mit Lichtgeschwindigkeit. Wir registrieren dies an den verzögerten Reaktionen unseres Gesprächspartners und wegen unseres Echos auf der Leitung. Der Mond hingegen ist mit seinen 380 000 km schon ganze 1,3 Lichtsekunden von uns entfernt. Und wenn wir die Sonne anschauen, so sehen wir sie dort, wo sie vor 8 Minuten geschienen hat. Ihr Licht hat in dieser Zeit 150 Millionen Kilometer zu uns zurückgelegt.

Wir haben *keine* Möglichkeit diese Zeitschluchten zu überbrücken oder zu verkürzen. Niemand auf der Erde weiß, wie sich die Sonne genau jetzt verhält. Wir erfahren es immer erst im Nachhinein. Demzufolge ist ein Blick in die weite Ferne des Weltalls auch immer ein Blick in die Vergangenheit, der sogar viele Milliarden Jahre zurückreichen kann. In der Astronomie und auch beim Verständnis der Relativitätstheorie wird dies noch sehr wichtig sein.

In einem Medium wie Glas oder Wasser ist Licht langsamer unterwegs als im Vakuum. Auch ist hier die Geschwindigkeit nicht mehr für alle Wellenlängen genau gleich. Dieser Effekt ist die Ursache für die Aufspaltung des Sonnenlichts in seine unterschiedlichen Farbanteile. Dies geschieht beispielsweise beim Durchlaufen eines Glasprismas oder in den Wassertröpfchen eines Regenbogens. Die unterschiedlichen Laufzeiten der verschiedenen Wellenlängen, also Farben, führen zu einem jeweils anderen Brechungswinkel, da Licht stets den Weg der kürzesten Laufzeit einschlägt. Deshalb liegen die Farben des Regenbogens, des sogenannten Spektrums, nun nicht mehr übereinander, sondern nebeneinander.

Bisher bin ich die ganze Zeit stillschweigend davon ausgegangen, das Licht eine Wellenerscheinung ist. Tatsächlich gibt es sehr viele optische Versuche, die dies nahelegen. Beugungseffekte an Linsen, Kanten oder Spalten lassen sich nur mit dem Vorhandensein einer Lichtwelle erklären. Ein klassischer Versuch dazu ist das

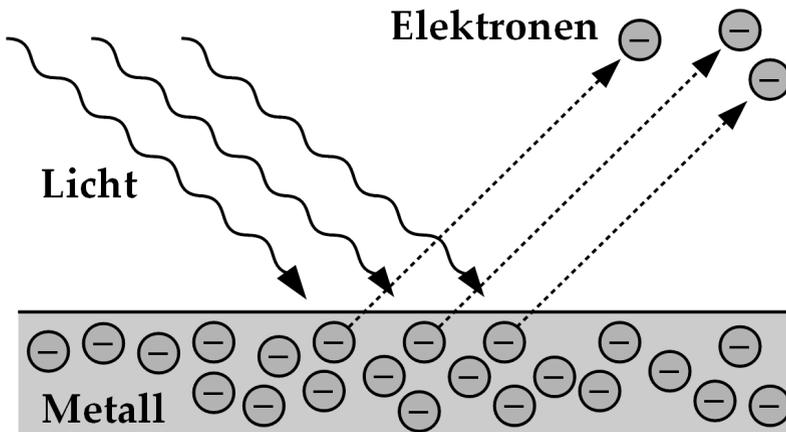


- 9 Beim Doppelspaltexperiment mit Licht entsteht ein Überlagerungs- oder Interferenzmuster. Die Kreuze markieren den direkten Lichtweg durch die Spalte.

Doppelspaltexperiment von Thomas Young (1773–1829), das wir später im Rahmen der Quantentheorie ausgiebig unter die Lupe nehmen werden.

Eine Lichtquelle beleuchtet zwei nebeneinanderliegende schlitzförmige Öffnungen in einer undurchsichtigen Wand. Dahinter befindet sich in einem Abstand ein Beobachtungsschirm, der das Licht auffängt, das die Spalte passiert. Auf dem Schirm zeigt sich ein charakteristisches Überlagerungsmuster, wie man es auch von Wasserwellen her kennt. Tatsächlich könnten wir auch denselben Versuch in einer Badewanne durchführen, wobei wir allerdings die Lichtquelle durch einen Finger ersetzen müssten, der gleichmäßig auf das Wasser tippt. Die so entstehenden Wellen laufen dann durch zwei Schlitzlöcher und bilden auf der nächsten Wand dasselbe Überlagerungs- oder Interferenzmuster. Überall wo sich jeweils Wellenberge und Wellentäler von beiden Spalten treffen, wird die resultierende Welle verstärkt. Dort jedoch, wo sich ein Berg mit einem Tal vom anderen Spalt trifft, wird die Welle ausgelöscht. Dasselbe Interferenzmuster sieht man auf dem Beobachtungsschirm hinter dem Doppelspalt. Dort, wo das Licht auf direktem Weg durch die Spalte läuft und auf den Schirm trifft, ist wegen der Auslöschung sogar fast keine Helligkeit vorhanden.

Licht verhält sich in diesem Versuch also genau so, als wenn es eine Welle wäre. Diese Ansicht war allerdings historisch gesehen weder die Erste noch die Letzte. Zuvor hatte unter anderem Newton die Meinung vertreten, dass Licht aus kleinen Teilchen bestünde. Mit Young schlug das Pendel dann in die Richtung einer Wellenvorstellung aus, um 1905 mit Albert Einstein (1879–1955) zu einem Teilchenbild zurückzukehren.



10 Beim Photoeffekt werden Elektronen von Licht aus einer Metalloberfläche herausgeschlagen

Einstein konnte als Erster ein Phänomen erklären, mit dem wir heute Solarzellen und elektronische Kameras betreiben, den sogenannten *Photoeffekt*. In dem ursprünglichen Versuch wurden aus verschiedenen Metallen mittels Licht jeweils Elektronen herausgeschlagen und deren Energie gemessen. Ohne in die Details zu gehen, muss dabei je nach Metall eine charakteristische Mindestenergie vorhanden sein. Falls das Licht diese Energie nicht liefern kann, so passiert einfach gar nichts und die negativ geladenen Elektronen verbleiben im Metall.

Einstein erkannte, dass man hier mit einer Wellenvorstellung nicht weiter kommt. Denn nach dieser sollte die Lichtenergie von der Wellenhöhe oder gleichbedeutend von der Helligkeit abhängen. Helleres Licht wäre demnach auch energiereicher. Dies stimmt zwar für die mittlere Lichtenergie, die auf eine Fläche trifft, doch für den Einzelprozess des Herausschlagens eines Elektrons trifft dies nicht zu. Auch ganz schwaches Licht kann Elektronen herauslösen, vorausgesetzt es hat die richtige Farbe oder Wellenlänge. Dort, wo nach der Wellentheorie eigentlich nichts passieren sollte, weil nicht genügend Energie vorhanden wäre, ließen sich freie Elektronen sehr wohl nachweisen. Also ist nicht die Helligkeit des Lichts, sondern seine Wellenlänge entscheidend für das Herausschlagen der Elektronen.

Nur lokalisierte Lichtteilchen, die sogenannten Photonen, sind in der Lage, die Lichtenergie sozusagen auf einen Punkt zu konzentrieren. Für diese Lichtquantenhypothese erhielt Einstein schließlich 1922 seinen Nobelpreis. Photonen und keine Lichtwellen schlagen Elektronen aus einer Metalloberfläche. Ihre Energie ist um so höher je kürzer die Wellenlänge des betreffenden Lichts ist. Dies sieht man am besten bei der kurzwelligen Röntgenstrahlung, die eine große Energie und damit ein hohes Durchdringungsvermögen für eine Körperaufnahme mitbringt. Die

Photonen der langwelligen Radiostrahlung sind dagegen energiearm. Neben dem Zusammenhang zwischen der Energie von Photonen und ihrer Wellenlänge gibt es auch die direkte Beziehung zwischen der Energie und ihrer Schwingungsfrequenz, die oft statt der Wellenlänge angegeben wird. Je öfter das Licht im Sinne einer Welle pro Sekunde schwingt, desto höher ist die Energie eines seiner Photonen.

Heute steht das Pendel genau zwischen dem Bild eines Teilchens und einer Welle. Umfassend beschreiben können wir Licht aber erst, wenn wir die Quantentheorie genauer betrachtet haben. Licht *ist* nicht einfach nur eine Welle, so wie wir es von einer Wasserwelle her kennen. Ebenso *ist* es aber auch kein Teilchen im Sinne einer kleinen umherfliegenden Kugel. Seine Natur ist komplexer und trägt beide Aspekte in sich. Diese Besonderheit trifft jedoch nicht nur auf Licht, sondern wie wir noch sehen werden, auf die gesamte Materie. Wie wir uns dies trotzdem anschaulich vorstellen können, möchte ich Ihnen im zweiten Teil meines Buches vermitteln.