

Was ist Licht?

Rolf Heilmann

„Was ist das. – Was – ist das...“ – Mit diesen schlichten Worten beginnt Thomas Mann seinen Roman „Buddenbrooks“. Er beschreibt dabei, wie die kleine achtjährige Tony den auswendig gelernten Katechismus aufsagen muss und dabei immer wieder ins Stocken gerät.

Wer sich mit der Biographie Thomas Manns beschäftigt, weiß um den Hass, den er der Institution Schule entgegenbrachte. Er hat es wohl deshalb nie bis zum Abitur gebracht. Das sture, formale Auswendiglernen lag ihm nicht. Trotzdem oder vielleicht gerade deshalb kennen wir von ihm eine Reihe von Texten, in denen er komplizierte, abstrakte Sachverhalte mit der ihm eigenen Tiefe und mit fachfremden Worten ausleuchtet und darstellt. Auswendig gelernt ist da nichts. Man spürt es in seinen Texten, wie er regelrecht um die Begriffe ringt, um im Ergebnis die Sache auf den Punkt zu bringen.

Ich möchte deshalb einen Satz von ihm als Motto für diesen Vortrag wählen. In seinen Josephsromanen lässt er den Pharao über das Licht und den, der es betrachtet, sagen: „Selige Helligkeit, die sich das Auge schuf, ihr zu begegnen.“ – Wie begegnen wir dem Licht, dem wir unsere Existenz zu danken haben?

Wir lernen in den oberen Klassen der Gymnasien, Licht sei ein Strom von Quanten. Das ist die gängige, aktuelle Beschreibung, mit der wir die meisten Phänomene und Effekte, die mit dem Licht zu tun haben, erklären können: Wir können begreifen, weshalb das Licht Voraussetzung für unser Existenz ist, denn ohne die Energie des Lichts gebe es keine Leben auf der Erde. Wir analysieren – an die in Heidelberg tätigen Wissenschaftler Gustav Kirchhoff, Robert Bunsen und Theodor Hänsch anknüpfend – Lichtspektren und können damit über die Ursachen des Treibhauseffektes, der unser Klima dominiert, bis zur Entwicklung des Universums ziemlich viel erklären. Zudem würde es die moderne Beleuchtungstechnik, Digitalkameras, Laser

oder die auf Licht basierende Kommunikationstechnik für Telefon und Internet, ja sogar die gesamte Elektronik ohne dieses „Bild“ vom Licht nicht geben.

In der Wissenschaft brauchen wir Begriffe, Definitionen und Gesetze, mit denen wir operieren können. Deshalb kommen wir auch heute in den Schulen nicht ohne das Auswendiglernen aus. Doch wenn wir etwas wörtlich wiedergeben können, heißt es nicht automatisch, dass wir den Sachverhalt wirklich verstanden haben.

Andererseits hinterfragen wir die erlernten oder uns durch alltäglichen Gebrauch vertraut gewordenen Begriffe nicht ständig. Denn wenn wir das tun würden, kämen wir nicht nur – wie die kleine Tony Buddenbrook – ins Stocken, weil wir den genauen Wortlaut der Definitionen nicht wüssten. Wir kämen sehr schnell an die Grenzen unseres Wissens und sogar an die Grenze des prinzipiell Wissbaren. Wir nutzen Begriffe, ohne immer genau zu wissen, was sie bedeuten. Am Beispiel Licht möchte ich das im Folgenden darstellen.

Wenn wir etwas Unbekanntes erklären wollen, uns selbst oder anderen, so müssen wir dieses Unbekannte auf Bekanntes, Vertrautes, Einfaches, möglichst auch Anschauliches zurückführen. Wenn wir dies können, sagen wir, wir haben etwas verstanden. Wir können dann die Sachverhalte in gewisser Weise akzeptieren.

Wenn wir diese Rückführung vom Komplizierten und noch Unbekannten auf das Einfache im Rahmen einer wissenschaftlichen Begriffswelt realisieren können, sprechen wir vom Aufbau eines Modells, das wesentliche Eigenschaften des Originals abbildet. Stützen wir das Ganze durch eine mathematische Beschreibung, sprechen wir von einer Theorie. Beim Phänomen Licht haben wir aber damit bis auf den heutigen Tag unsere Schwierigkeiten.

Licht als Strom von Quanten: Was ein Strom ist, wissen wir. Wir kennen Wasser- oder Luftströme als gerichtete Bewegung von kleinen Wasser- bzw. Luftteilchen. Denken wir dabei an den Neckar oder an den Wind. Deren Bewegung ist für uns unmittelbar sinnlich erfahrbar.

Wir haben diese Erfahrung auch auf den elektrischen Strom übertragen. Obwohl wir dessen Bewegung im Alltag nicht sehen, hat sich dieses Bild als eingängig für jedermann und vorteilhaft in Wissenschaft und Technik erwiesen. Allerdings muss erwähnt werden, dass man dieses Modell schon entwickelt hatte, bevor man wusste, was da eigentlich fließt. Man legte fest (!), dass es kleine, positiv geladene Teilchen seien, die sich vom Pluspol der Batterie zum Minuspol be-

Was ist Licht?

wegten. Als dann im Jahre 1897 Joseph John Thomson das Elektron als „Stromträger“ entdeckte, erwies es sich als negativ geladen. Und es bewegte sich gerade in die entgegengesetzte Richtung. Die Ingenieure ließen sich davon aber nicht beeindrucken, blieben bei ihrer Festlegung und rechnen bis heute mit der „falschen“ Richtung. Hier sehen sie schon, dass der Begriff Strom nicht so einfach ist, wie es vielleicht den Anschein hat.

Licht als Strom ist noch viel schwerer zu greifen. Denn wenn wir fragen, was denn den Lichtstrom antreibt, geraten wir in Erklärungsnöte. Wasserströme werden durch die Erdanziehung angetrieben (alles fließt nach unten), beim Wind sind es Druckunterschiede, denn Luft bewegt sich von Gebieten mit hohem Druck in Gebiete, wo niedrigerer Druck herrscht. Elektrischer Strom hat seine Ursache in der elektrischen Anziehung unterschiedlich geladener Teilchen. Doch was bewirkt die schnelle, gerichtete Bewegung des Lichts?

Was treibt das Licht aus einem Laserpointer mit einer Geschwindigkeit von 300.000 Kilometern pro Sekunde an die Wand und von dort in die Augen des Zuhörers? Was treibt das Licht an, damit es in achteinhalb Minuten von der Sonne 150 Millionen Kilometer durch den leeren Raum auf unsere Erde gelangt? Was bewegt das Licht seit 13,8 Milliarden Jahren quer durch unser Universum? Mit Gravitation, Druckunterschieden oder elektrischer Anziehung ist das nicht erklärt! Wir müssen also eine Ursache suchen, die nicht offensichtlich und damit möglicherweise unseren Erfahrungen nicht zugänglich ist.

Und schließlich noch ein ganz entscheidendes Problem: Was bewegt sich denn beim Licht? Beim Wasser sind es die Wassermoleküle, beim Wind die Luftteilchen, beim elektrischen Strom haben wir die schon erwähnten Elektronen. Alle diese Teilchen haben eine Masse, sie sind wägbare. Wir können sie abbremsen und beschleunigen, auffangen und aufbewahren.

Doch sobald Licht irgendwo auftrifft, verschwindet es. Es ist buchstäblich nicht greifbar. Es breitet sich auch dort aus, wo augenscheinlich „nichts“ ist: im Weltraum. Trotzdem kann es auch in einige durchsichtige Stoffe eindringen und sich dort etwas abgebremst und im Weg abgelenkt ausbreiten, um beim Austritt wieder mit der alten Geschwindigkeit und scheinbar unbeeindruckt von der leichten Verzögerung seinen ziemlich geraden Weg fortzusetzen.

Wenn sich Lichtstrahlen kreuzen, beeinflussen sie sich normalerweise nicht. Es kann aber auch vorkommen, dass sich Licht über

anderes Licht legt und es damit regelrecht auslöscht. Diesen Effekt nutzen wir beispielsweise bei der Entspiegelung von Brillen. Normales Tageslicht lässt sich beim Durchgang durch Glas oder Wasser in verschiedenfarbiges Licht aufspalten, das unterschiedliche messbare Effekte hervorrufen kann. Sie bemerken es selbst: Rotes Licht stimmt Sie ganz anders als grünes oder blaues.

All diese Effekte lassen sich erklären, wenn man annimmt, dass Licht von etwas getragen wird, was wir Quanten nennen. Doch was ist ein Quant? Nach der oben beschriebenen Vorgehensweise beim Erklären müssten wir das Quant wiederum auf etwas Einfacheres, Bekanntes zurückführen. Doch – und hier treffen wir auf eines der Hauptprobleme der modernen Physik – das geht nicht. Es gibt in unserer Erfahrungswelt nichts (!), was mit einem Quant vergleichbar wäre. Es hat einige Eigenschaften, die wir von kleinen, harten, lokalisierbaren Teilchen oder Bällen kennen. Es zeigt Eigenschaften, die uns von ausgedehnten, weichen Wellen bekannt sind. Es hat jedoch auch Eigenschaften, die uns von nichts Irdischem und Materiellem bekannt sind – zum Beispiel kann es in gewisser Weise hier und da gleichzeitig sein. Dabei ist ein Quant nicht teilbar. Zudem kann es sich mit einem anderen Quant so verbinden, dass es nach einer Trennung und über große Abstände hinweg mit seinem Partner auf wundersame Weise – Einstein nannte es sogar „spukhaft“ – verbunden bleibt.

Warum nun, werden Sie berechtigterweise fragen, misst man diesen Lichtquanten solche merkwürdigen Eigenschaften zu, die dem gesunden Menschenverstand eklatant widersprechen? Kann man nicht sagen, Licht ist ein Strom von irgendetwas anderem und dieses hat uns bekannte und nicht so widersprüchliche Eigenschaften? Oder vielleicht kann man auf die Vorstellung vom Strom verzichten und es lässt sich ein anderer Vergleich, ein gänzlich anderes Bild finden?

Nach allem, was wir heute wissen, kann man kein anderes Bild finden. Alle anderen Modelle blieben Stückwerk und konnten bestenfalls nur einige mit dem Licht verbundene Effekte erklären. So müssen wir leben mit diesen Widersprüchen und abstrakten Eigenschaften, die sich allerdings mathematisch fassen und handhaben lassen. Und wie die moderne Technik vom Licht, die Photonik, belegt, ist dieses Bild vom Quantenstrom auch ziemlich erfolgreich. Ich möchte im Folgenden kurz skizzieren, wie und warum wir zu diesem widersprüchlichen und irritierenden Bild gekommen sind.¹

1 R. Heilmann: *Licht. Die faszinierende Geschichte eines Phänomens*, München 2013.

Was ist Licht?

Durch das Licht können wir sehen. Licht fällt auf Gegenstände, wird an deren Oberfläche rückgestreut, gelangt in unsere Augen und erzeugt Signale, die weitergeleitet an unser Gehirn als visuelle Eindrücke aufgenommen und verarbeitet werden.

Doch das Sehen wird ja von uns als ein sehr subjektiver Prozess empfunden, der von uns selbst ausgeht und nicht unbedingt etwas mit dem Abstraktum Licht zu tun hat. Einige Denker des Altertums gingen daher davon aus, dass wir unsere Umgebung visuell wahrnehmen, weil unsere Augen „Sehstrahlen“ aussenden. Diese sollten die betrachteten Gegenstände „abtasten“. Die alten Griechen hatten die Erfahrung mit dem Tastsinn vor Augen: Was wir berühren, können wir erfühlen. Auf Pythagoras, im 6. Jahrhundert vor Christus, geht vermutlich die Vorstellung zurück, diese Wechselwirkung käme durch heiße Ausdünstungen zustande, die von den Augen zu den betrachteten Gegenständen ströme. Dort zurückgeworfen, werde diese Strömung umgelenkt und wirke so auf das Auge zurück. Empedokles verglich später das Auge mit einer Laterne, deren Strahlen die Welt erleuchteten. Wir sprechen ja heute auch noch vom „Augenlicht“.

Nach den Vorstellungen der frühen Atomisten verlief der Sehprozess jedoch umgekehrt: Danach lösen sich von den Gegenständen ununterbrochen hauchdünne Atomschichten ab, treffen auf unsere Augen und rufen dabei entsprechende „Eindrücke“ hervor. Doch alle diese Vorstellungen bleiben Spekulation, denn sie konnten weder bewiesen noch widerlegt werden. Also hielt man sich an die Gegebenheiten und diese besagen: Der Blick geht immer geradeaus.

Auf dieser Erfahrung bauend entwickelte wahrscheinlich Euklid um 300 v. Chr. – seine Urheberschaft ist allerdings nicht gesichert – eine axiomatisch aufgebaute Geometrie des Sehens, die er „Optik“ nannte. Dabei ging er zwar von der Vorstellung der „Sehstrahlen“ aus, doch deren Natur spielte bei seinen Ableitungen keine Rolle mehr. Wie wir heute wissen, ist es nicht von Bedeutung, ob sich die gedachten und gezeichneten Strahlen vom Auge zum Gegenstand oder umgekehrt von dort zum Auge ausbreiten. Die geometrischen Betrachtungen führten zu richtigen, grundlegenden Erkenntnissen, zum Beispiel dem Reflexionsgesetz von Lichtstrahlen. Damit lassen sich Bilder im Spiegel oder die Reflexionen der Sonnenstrahlen auf dem Wasser erklären [Abb. 1].

Das verwendete Strahlenmodell ist, wie jedes Modell, ein vereinfachendes Abbild der Wirklichkeit und darf nicht mit der Wirklichkeit selbst gleichgesetzt werden. So kann Licht zwar mit (ma-

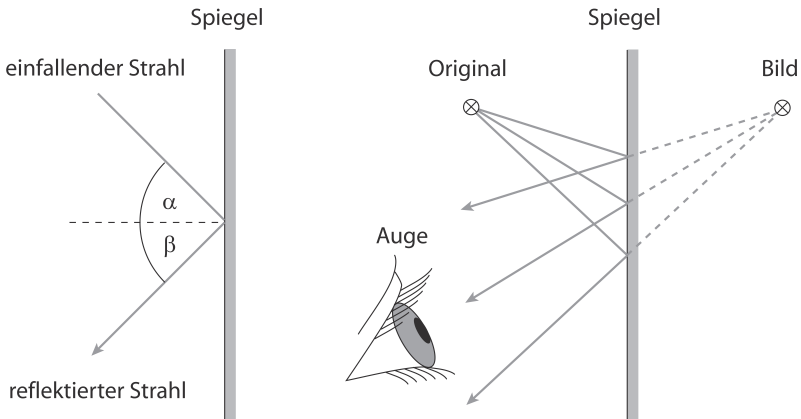


Abb. 1: Das Strahlenmodell vom Licht erklärt Reflexionen und die Entstehung von Spiegelbildern.

thematischen) Strahlen beschrieben werden. Es bedeutet aber nicht, dass Licht unabhängig von der Ausbreitungsrichtung „aus Strahlen besteht.“ Die Wesensfrage bleibt in der Naturwissenschaft im Wesentlichen ausgespart.

Nach dem Untergang Westroms wurden die wissenschaftlichen Traditionen fast ausschließlich in Byzanz und den aufstrebenden islamischen Reichen aufrechterhalten. So schlussfolgerte der in Europa unter der lateinischen Form seines Namens Alhazen bekannte Ibn al-Haitham aus seinen anatomischen Studien, dass Lichtstrahlen vom Auge aufgenommen werden. Er untersuchte den Weg des Lichts, um die Entstehung der Bilder im Auge genauer zu verstehen. Dazu benutzte er eine Camera obscura, ein – wörtlich aus dem Lateinischen übersetzt – „dunkles Gewölbe“. Sie ist die Vorläuferin unserer heutigen Kameras. Fällt Licht durch eine kleine Öffnung in einen dunklen Raum, dann erscheint an der Wand ein verkleinertes, auf dem Kopf stehendes Bild der Außenwelt [Abb. 2]. Wenn man außen Lampen bewegte, bewegten sich innen deren Bilder. Damit waren die Sehstrahlen vom Tisch.

Mit dem Zurückdrängen des Islam aus Spanien und Sizilien erhielten europäische Gelehrte Zugriff auf das arabische und griechische Wissen. Die im Mittelalter aus Latein- oder Domschulen hervorgegangenen Universitäten entwickelten sich zu geistigen Zentren.

Was ist Licht?

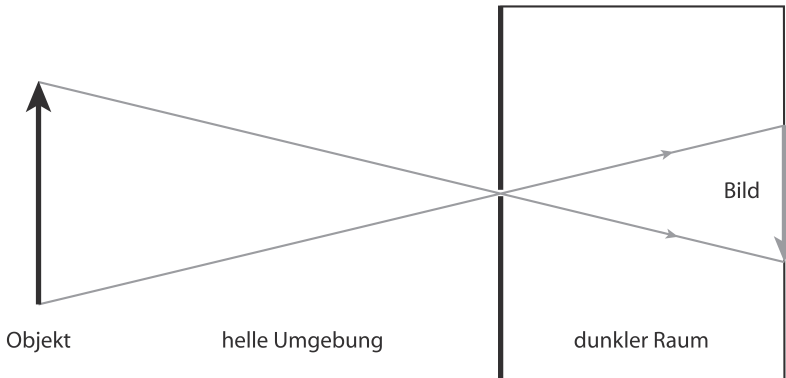


Abb. 2: Die Entstehung von auf dem Kopf stehenden Bildern in einer Camera obscura mithilfe des Strahlenmodells.

Naturwissenschaften im heutigen Sinne – mit Experimenten und Messungen und mit mathematischer Formulierung der gefundenen Sachverhalte – wurden dort jedoch noch nicht betrieben. Trotzdem wurde um die Wende zum 13. Jahrhunderts von Albertus Magnus, Roger Bacon, Robert Grosseteste und anderen damit begonnen, das Wissen über die Natur und also auch über das Licht, in Enzyklopädien zusammenzufassen und durch eigene Beobachtungen zu erweitern. Doch die Erklärungen blieben zum größten Teil noch spekulativ.

Die vergrößernde Wirkung speziell geformter Glaskugeln oder Linsen war schon seit der Antike bekannt. Doch speziell geformte optische Elemente wurden vermutlich erst im 11. Jahrhundert als so genannte Lesesteine verwendet, um die nachlassende Sehkraft etwas zu unterstützen. Um das Jahr 1280 wurde in Italien schließlich die Brille erfunden.

Inwiefern Untersuchungen mit dem Strahlenmodell entscheidend zur Entwicklung der Sehhilfen beigetragen haben, ist nicht bekannt. Es ist wohl fast ausschließlich durch Probieren und Nachmachen soweit gekommen, dass die Brille allmählich zum Allgemeingut in den Klöstern, Schulen und Schreibstuben wurde. Die erklärende Wissenschaft hinkte hier lange dem praktischen Handwerk hinterher. Und auch Fragen zum Wesen des Lichts konnten nicht schlüssig beantwortet werden.

Letzteres änderte sich auch nicht, als zu Beginn des 17. Jahrhunderts mit der Erfindung von Fernrohr und Mikroskop der durch das Licht vorgegebene Erfahrungshorizont der Menschen deutlich erweitert wurde. Johannes Kepler konnte als erster den Strahlengang des Lichts in Fernrohren konstruieren. Zehn Jahre später fand der Niederländer Snell einen geometrischen Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Brechungswinkel eines Lichtstrahls [Abb. 3].

Einen ziemlich abstrakten Weg bei der Erklärung der Brechung beschritt der französische Mathematiker Pierre de Fermat. Er hatte eine Methode entwickelt, bei mathematischen Funktionen rechnerisch Maxima und Minima zu finden. Er benutzte dieses Verfahren, um den Weg der Lichtstrahlen bei der Brechung zu beschreiben. Dabei fand er heraus, dass Licht immer den Weg „einschlägt“, für den es die kürzeste Zeit „braucht.“ Dabei musste er annehmen, dass sich das Licht in Medien langsamer bewegt als im leeren Raum. Das hat sich später ja auch bewahrheitet.

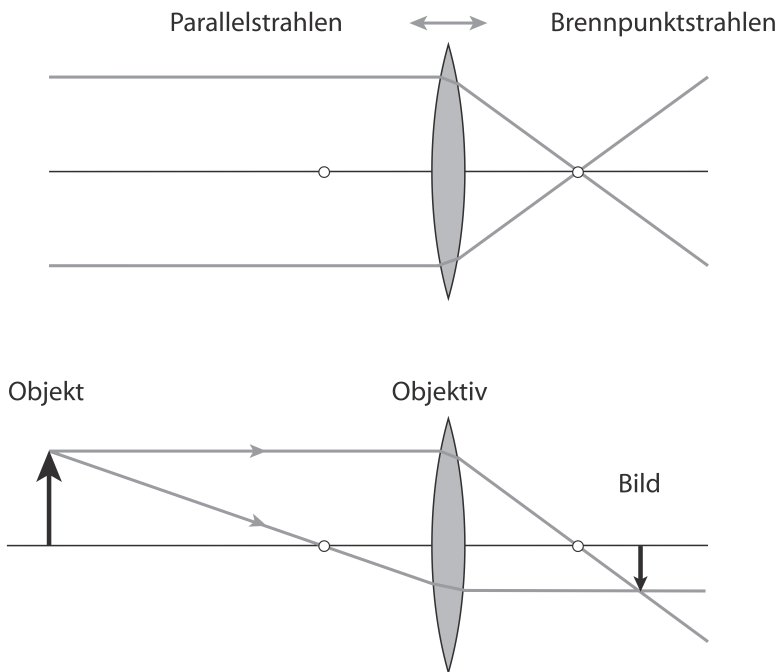


Abb. 3: Konstruktion des Strahlengangs bei Linsen.

Was ist Licht?

Fermats Vorgehen bei der Ableitung ist insofern bemerkenswert, als er kein mechanisch-anschauliches Bild für das Wesen des Lichts benötigt. Er hat eine mathematisch formulierbare Vermutung, eine Hypothese, aufgestellt und damit einen Zusammenhang abgeleitet. Dieser ließ sich durch Messungen überprüfen.

Man betrieb an der Wende vom 17. zum 18. Jahrhundert natürlich nicht nur Optik. Besondere Erfolge feierte die Mechanik durch die Genieleistung von Isaac Newton. Die Welt wurde damit allmählich zur berechenbaren Maschine. Das führte im Wesentlichen dazu, dass während des ganzen 18. Jahrhunderts Licht als ein Strom von (wie auch immer gearteten) Teilchen angesehen wurde, deren Bewegung man mit Newtons Gleichungen beschreiben konnte.

Es gab jedoch eine Reihe von Beobachtungen, die man nicht schlüssig verstehen konnte: Man wusste nicht, wie man sich die Zerlegung des Lichts in die verschiedenen Spektralfarben an Prismen oder Wassertropfen erklären sollte. Es gab Farbmuster an dünnen Schichten, die aus farblosem Material bestehen. (Denken wir dabei an das Schillern von Seifenblasen.) Licht wird an Kanten und Spalten um die Ecke gelenkt. In bestimmten Kristallen spaltete sich ein Lichtstrahl in zwei unterschiedliche Wege auf. Das Resultat dieses Phänomens waren zwei Sorten von Licht, die sich bei Reflexion verschieden verhalten, die aber vom Auge nicht unterschieden werden können.

Dabei blieb natürlich im Hintergrund immer die Frage, wie man sich die Natur des Lichts vorzustellen habe. Einerseits schien Licht nichtmaterieller Natur zu sein, doch es benötigte – unsere Erfahrung lehrt das – einen materiellen Träger.

Schon René Descartes betrachtete im 17. Jahrhundert Licht als eine mechanische Eigenschaft der leuchtenden Objekte und der übertragenden Stoffe. Die Lichtausbreitung verläuft in seinen Vorstellungen wie eine Art elastische Druckfortpflanzung in einer überall vorhandenen sehr feinen Substanz, die in den folgenden zweieinhalb Jahrhunderten unter dem Namen „Äther“ einen festen Platz in vielen physikalischen Modellen einnahm. Descartes stellte sich diese merkwürdige Substanz aus kleinen Kügelchen bestehend vor, die aneinander stoßen und so die Wirkung des Lichts übertragen können.

Die Vorstellungen von Descartes wurden von Huygens, Grimaldi und Hooke weiterentwickelt, indem sie dem Licht Welleneigenschaften zuschrieben, wie sie vom Wasser oder vom Schall bekannt waren. Dabei wurden jedoch auch Erkenntnisse formuliert, für die man den geheimnisvollen Äther gar nicht zu Hilfe nehmen musste.

Einen großen Erkenntnisfortschritt erzielte der englische Augenarzt, Physiker und Sprachforscher Thomas Young. Er untersuchte um 1801 die Frage, wie sich Wellenvorgänge gegenseitig beeinflussen. Beim Wasser lässt sich das gut bei zwei Wellenvorgängen beobachten: Fallen zwei Steine in einigem Abstand gleichzeitig ins Wasser, durchdringen sich die Wellen gegenseitig und es ergeben sich sichtbare Streifenmuster. Diese so genannte Überlagerung, die Interferenz, erwies sich als typisch für alle Wellenvorgänge.

Die an Kanten und Spalten gefundene Lichtablenkung erzeugte solche charakteristischen Hell-Dunkel-Muster. Young erklärte dieses Phänomen, indem er das Licht als Wellen betrachtete, die sich überlagern können. Licht und Licht kann demnach unter bestimmten Umständen entweder doppeltes Licht oder Dunkelheit ergeben [Abb. 4].

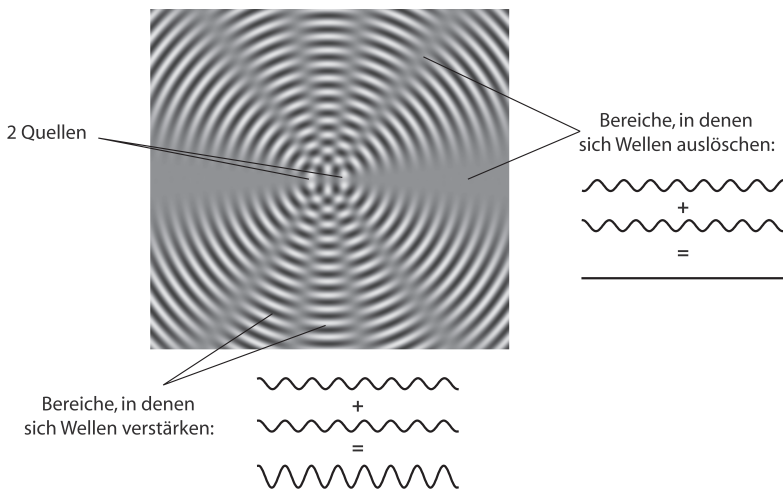


Abb. 4: Das Wellenmodell erklärt Beugung und Überlagerung und die dabei entstehenden Interferenzmuster von Licht.

Young konnte durch seine Untersuchungen erstmals die Wellenlänge des Lichts – also den Abstand zwischen zwei Wellenbergen – auf ungefähr ein Millionstel Meter (= ein Mikrometer) abschätzen. Rotes Licht erwies sich dabei als „langwelliger“ als blaues.

Obwohl Youngs Experimente und Berechnungen gut nachvollziehbar waren, erfuhren sie wenig Beachtung. 15 Jahre später musste

Was ist Licht?

deshalb der Franzose Fresnel, ohne die Ergebnisse Youngs zu kennen, zunächst ähnliche Experimente durchführen, und er gelangte zu mathematisch formulierbaren Beziehungen, die wir heute als Fresnel'sche Formeln noch benutzen. Schließlich gab es keinen Zweifel mehr: Licht musste eine Welle sein!

Blieb nur noch eine wichtige Frage: Was schwingt denn beim Licht? Ist es wirklich der merkwürdige Äther? Die Antworten blieben noch für fast hundert Jahre unbefriedigend, doch es gab eine Richtung, in die man denken konnte: Es war der Elektromagnetismus.

Zur Erklärung einiger Effekte stellte sich der Engländer Michael Faraday um Magneten, stromdurchflossenen Drähten oder zwischen elektrisch geladenen Platten „Kraftlinien“ vor, die wir zwar nicht direkt wahrnehmen, doch durch ihre Wirkung nachweisen können. Er legte damit die Grundlage für den später in der Physik so wichtigen Begriff „Feld“. Ein Feld ist – einfach gesprochen – der Raumbereich, in dem Kräfte wirken.

Faraday war Autodidakt und besaß keine mathematische Ausbildung. Gerade deshalb dachte er wohl häufiger in Bildern als andere. Er konnte aber seine Vorstellungen von elektrischen und magnetischen Kraftfeldern nicht mit einer mathematisch formulierbaren Theorie untermauern.

Das blieb dem Schotten James Clerk Maxwell überlassen. Er konnte vier Gleichungen aufstellen, mit denen sich viele Effekte aus Elektrizität und Magnetismus beschreiben ließen. Doch das wohl Überraschendste waren die Lösungen dieser Gleichungen: Sie sagten voraus, dass sich mit einander verkoppelte elektrische und magnetische Felder in Form von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit(!) ausbreiten können.

Als Heinrich Hertz im Jahre 1887 dann solche elektromagnetische Wellen erstmals technisch erzeugte und nachwies, war klar, dass Licht auch eine elektromagnetische Welle sein muss. Die Wellenlänge ist nur bis zu einer Million Mal kleiner als bei den Hertz'schen Wellen, die später für Radio, Fernsehen oder Handy verwendet wurden.

Licht ist also ein periodisches Kraftfeld, das sich in seiner Ausprägung alle Mikrometer „wiederholt“ und das sich mit 300.000 Kilometer pro Sekunde im leeren Raum ausbreitet. Als man den Äther trotz größter Anstrengung nicht finden konnte, wurde klar: Licht und andere elektromagnetische Wellen sind objektiv vorhandene, wirksame Felder, die keinen materiellen Träger benötigen [Abb. 5].

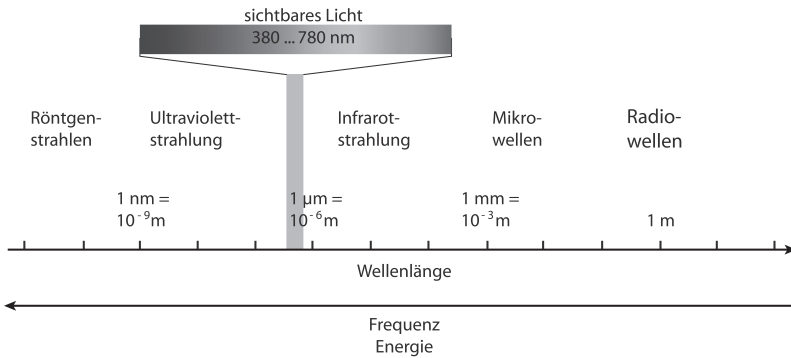


Abb. 5: Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums.

Mit der gedanklichen Abschaffung des Äthers am Ende des 19. Jahrhunderts schien die Physik prinzipiell vollendet zu sein. Die uns als klassische Disziplinen bekannten Gebiete Mechanik, Wärmelehre, Elektrizitätslehre und Optik waren etabliert. Die darauf aufbauende Technik funktionierte, und sie bildete die Grundlage für eine sich enorm entwickelnde Industrie. Es gab nur noch einige Randphänomene, die noch nicht geklärt waren, die seltsamerweise alle etwas mit Licht zu tun hatten. Ich möchte drei davon näher erläutern.

Das erste waren die Lichtspektren, die Kirchhoff und Bunsen nutzten, um chemische Elemente zu identifizieren. Es hatte sich herausgestellt, dass jedes Element bei Absorption oder Emission von Licht eine charakteristische Linienstruktur im Spektrum aufweist. Die Entstehung dieser Spektren war jedoch völlig unverstanden.

Zweitens war nicht klar, wieso nur Licht bestimmter Farbe beim Auftreffen auf eine Metalloberfläche einen elektrischen Strom hervorruft.

Drittens schließlich: Die spektrale Verteilung, d. h. die Farben des Lichts erhitzter Körper, seit Jahrtausenden aus den Schmieden bekannt, konnte nicht erklärt werden. Für die gerade sich entwickelnde Elektro- und Beleuchtungsindustrie war das natürlich wichtig.

Max Planck fand die Lösung des Problems für das ausgesandte Licht erhitzter Körper im Jahre 1900. Er ging dabei einen völlig neuen Weg in der Physik: Er nahm etwas allen Erfahrungen Widersprechendes an und kam damit zu vernünftigen Ergebnissen. Alle seine

Was ist Licht?

Vorgänger waren von vernünftigen, erfahrbaren Annahmen ausgegangen – und waren gescheitert.

Planck setzte zwei Dinge voraus:

1. Er benutzte Statistik. Das heißt, er konnte nur Aussagen über ein großes Ensemble von atomaren Einheiten treffen – und nicht über ein einzelnes Element.
2. Alles, was schwingt, hat eine Energie, die ein Vielfaches einer bestimmten Energieportion, eines Quantums, ist.

Die zweite Annahme klingt derart konstruiert, dass Planck selbst zunächst auch immer nur vorsichtig von einer Hypothese sprach. Die kleinste Wirkung, die es demnach gibt, bezeichnete er mit h wie „h_{ilf!}“ Trotz dieser merkwürdigen Annahmen konnte Planck die Spektralverteilung des Lichts erhitzter Körper exakt beschreiben.

Fünf Jahre später, 1905, nutzte und erweiterte Albert Einstein die Überlegungen Plancks und erklärte damit den lichtelektrischen Effekt, die Entstehung von Strom bei Lichtbestrahlung auf Metalloberflächen.

Mit seinen Erkenntnissen gab er den bislang immer noch als Hilfshypothese angesehenen Quanten quasi eine physikalische „Gestalt“. Seine Überlegungen waren die folgenden: Wenn Systeme nur bestimmte Energiewerte annehmen können, so muss die Aufnahme und Abgabe von Energie auch in Portionen erfolgen. Der Energieträger, also das Licht, kann folglich auch nur portionsweise, sozusagen in Teilen, existieren. Eine derartige Vorstellung widersprach jeglicher physikalischer Erfahrung! Seit nahezu einem Jahrhundert war klar, dass Licht als eine kontinuierliche Welle beschrieben werden kann.

Doch auch hier galt: Trotz der offensichtlich widersprüchlichen Annahmen konnte erst der Foto-Effekt erklärt werden. Schließlich erwiesen sich damit noch viele andere Effekte quantitativ fassbar.

Einstein setzte voraus, dass die einzelnen Lichtquanten ein Energiepaket von „ h mal Frequenz“ besitzen. Je höher die Frequenz des Lichts, desto höher ist folglich die getragene Energie. Blaue Lichtquanten besitzen damit eine weit höhere Energie als rote. Nur wenn ein Lichtquant mit ausreichender Energie auf ein Elektron trifft, wird dieses aus dem Metall herausgeschleudert und fliegt durch den leeren Raum.

Zunächst benutzte man nur den Begriff Lichtquanten, um derlei Prozesse zu diskutieren. 1926 führte dann der Chemiker Gilbert Newton Lewis den Begriff „Photonen“ ein, der sich mit der Zeit etablierte.

Das „Herausschlagen“ von Elektronen mag zwar in diesem Bild einigermaßen einleuchtend sein, doch wir müssen bedenken, dass es sich in unseren alltäglichen Verhältnissen so verhalten würde, als wenn eine große, ausgedehnte Wasserwelle im Meer beim Auftreffen an Land sich zusammenziehen, verschwinden und mit ihrer Energie einen Kieselstein durch die Luft schleudern würde. Dergleichen war nie beobachtet worden.

Genauso widersprüchlich blieben die Prozesse beim Entstehen oder Verschwinden von Photonen. Niels Bohr entwickelte dazu 1913 ein Atommodell, mit dem sich quantitativ die Absorption und die Emission von Licht erklären ließen. Das Problem war aber nur: Das Modell fußt auch auf Annahmen, die der klassischen Physik und damit den alltäglichen Erfahrungen völlig widersprechen.

Besonders merkwürdig erschienen die sogenannten Quantensprünge: Wenn Elektronen Energie von Photonen aufnehmen, sind sie erst „unten“, dann „oben“ – aber „dazwischen“ sind sie nie. Man stelle sich derlei bei dem als Vergleich herangezogenen Kieselstein vor! Solche Prozesse sollten zudem auch nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ablaufen. Wenn also ein passendes Photon auf ein Elektron trifft, bedeutet es nicht automatisch, dass dann ein Quantensprung stattfindet. Er ist möglich aber nicht sicher.

Am Anfang der zwanziger Jahre schien deshalb die Quantenphysik noch eine vorläufige Übergangs-Theorie zu sein, irgendwann würde man die „richtigen“, anschaulichen, widerspruchslösen und erfahrbaren Zusammenhänge erkennen. Doch es wurde nicht besser mit der Anschaulichkeit. Es wurde noch viel schlimmer. Die Modelle, die mit den Namen Schrödinger und Heisenberg verknüpft sind, seien hier genannt. Mit diesen Theorien stellte sich heraus, dass die im Alltag und der klassischen Physik gebrauchte Begriffe und Definitionen in der Mikrowelt zum Teil überhaupt keine Gültigkeit besitzen. Zudem setzte sich der ungeliebte Wahrscheinlichkeitsbegriff endgültig in der Physik durch. Die Naturwissenschaft wurde dadurch in ihren Grundfesten erschüttert. In der Welt der Atome war es nicht mehr möglich, den zeitlichen Ablauf von Prozessen genau vorauszusagen.

Daher blieben vorerst viele Zweifler – unter ihnen der große Einstein. So schrieb er in einem Brief an Max Born:

Die Quantenmechanik ist sehr achtungsgebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten

Was ist Licht?

bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der Alte nicht würfelt.²

Doch „der Alte“, also Gott, scheint tatsächlich zu würfeln.

Eindrucksvoll zeigt sich das, wenn wir einzelne Photonen untersuchen. Gehen wir dazu von einem alltäglichen Beispiel aus: Licht fällt auf eine Glasscheibe. Ein kleiner Teil des Lichts wird reflektiert, der größere geht hindurch. Der Einfachheit halber wollen wir uns im Weiteren eine speziell beschichtete Glasscheibe vorstellen, die einen Lichtstrahl in zwei gleiche Strahlen mit jeweils halber Intensität aufteilt. Die beiden Detektoren in der Abbildung 6 (links) liefern daher das gleiche Signal.

Doch was passiert, wenn wir einzelne Photonen auf einen solchen „Strahlteiler“ schicken? Da sich ein Photon nicht aufspalten kann – es trägt ja schon die kleinstmögliche Menge an Energie – muss es entweder den einen oder den anderen Weg „wählen.“ Doch bevor ein Photon auf den Teiler trifft, kann niemand sagen, welchen Weg es einschlagen wird. Die „Entscheidung“ ist rein zufällig. Solche absoluten Zufälle wollte Einstein nicht akzeptieren, als er vom „Alten“ sprach, der würfelle. So können wir an einer simplen Glasscheibe den statistischen Charakter der Quantenphysik erkennen.

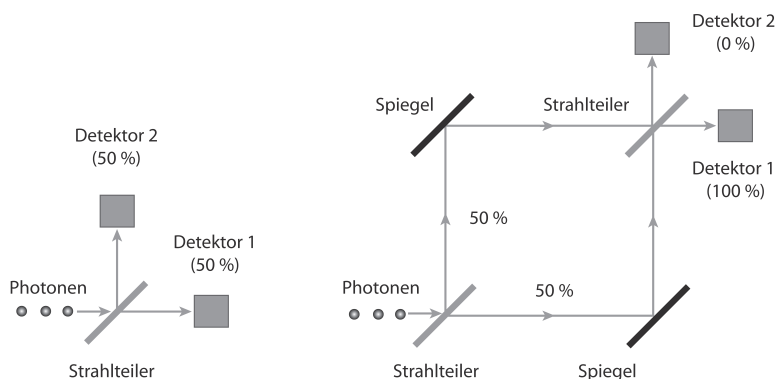


Abb. 6: Links: Mit dem Quantenmodell lässt sich nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen, welchen „Weg“ die Photonen (als Teilchen gezeichnet) nehmen werden. Rechts: Photonen nehmen offenbar beide Wege gleichzeitig.

² A. Einstein, H. und M. Born: *Briefwechsel 1916–1955*. Reinbek bei Hamburg, 1972, S. 97 f.

Wie wir schon beim Wellenmodell des Lichts gehört haben, kann die Überlagerung von Licht zu Verstärkung oder zur Auslöschung führen. Wir erweitern den eben geschilderten Versuch etwas und führen die beiden Teilstrahlen über Spiegel und Strahlteiler wieder zusammen [Abb. 6 rechts]. So werden sich die Strahlen bei ihrer Überlagerung – abhängig von ihren verschiedenen Wegen – abschwächen oder verstärken. Die Detektoren können die entsprechende Lichtintensität messen.

Bei kontinuierlichen Lichtstrahlen ist das Ergebnis wieder wie erwartet: Bei Detektor 1 haben beide Teilstrahlen das gleiche „durchgemacht“: Sie wurden zweimal reflektiert und einmal durchgelassen. Das heißt, sie sind nicht gegeneinander verschoben und können sich so überlagern, dass die volle Intensität gemessen wird. Die Wege zu Detektor 2 unterscheiden sich jedoch: Beim unteren Weg wird das Licht einmal durchgelassen, einmal reflektiert und noch einmal durchgelassen. Bei oberen wird es dreimal reflektiert. Die Folge davon ist, dass die beiden Teilstrahlen so gegeneinander verschoben sind, dass sie sich auslöschen. Detektor 2 misst also kein Licht.

Doch was passiert, wenn wir einzelne Photonen durch diese Anordnung schicken? Das Photon wählt ENTWEDER den oberen ODER den unteren Weg. Das lässt sich nachweisen, wenn wir Detektoren hinter den ersten Strahlteiler einsetzen. Doch wenn wir die Wege offen lassen, dann treten am Ausgang tatsächlich Überlagerungseffekte auf: Die Photonen kommen immer am Detektor 1 an und bei Detektor 2 überhaupt keines. Wenn wir aber einen Weg blockieren, verteilen sich die restlichen Photonen 50:50 auf beide Detektoren. Das lässt sich nur erklären, wenn man annimmt, dass ein Photon GLEICHZEITIG auf beiden(!) Wegen zugange ist und es sich am Ende des Weges „mit sich selbst“ überlagert.

Einem einzelnen Photon kann daher offensichtlich kein genauer Weg zugeordnet werden. Es nimmt in gewisser Weise alle möglichen Wege auf einmal, und alle diese Zustände überlagern sich zu dem, was wir „Photon“ nennen. Und nur wenn ein Detektor (allgemein: irgendein Messgerät) ein Photon aufnimmt, bricht dessen weite räumliche Verteilung regelrecht auf den Punkt des Nachweises zusammen.

Doch damit ist es immer noch nicht genug mit dem merkwürdigen Verhalten der Photonen. So emittieren spezielle Strukturen (z. B. nichtlineare Kristalle) gleichzeitig zwei Photonen. Diese sind auf ungewöhnliche Weise miteinander verbunden (die Physiker sagen: „verschränkt“). Wird die Schwingungsrichtung eines Photons bestimmt,

so wird dadurch die Schwingungsrichtung des zweiten Photons – soweit es sich auch vom ersten entfernt haben mag – im gleichen Augenblick festgelegt. Die „Übertragung“ der Wirkung erfolgt dabei instantan, also offenbar mit unendlich hoher Geschwindigkeit.

Auch wenn auf diese Weise weder Stoff noch Informationen transportiert werden, so lassen sich doch „Zustände“ übermitteln, indem man Photonen miteinander verkoppelt. Unter anderem in der Arbeitsgruppe um den Österreicher Anton Zeilinger konnte so 1997 erstmals eine solche „Quantenteleportation“ gezeigt werden, bei der ein Zustand von einem auf ein anders Photon übertragen wurde. In diesem Jahr (2014) gelang es Zeilingers Gruppe sogar, Photonen auf ein Objekt zu führen, und aus den anderen, verschränkten Photonen ein Bild dieses Objekts zu generieren.³ Das aus Science-fiction-Filmen bekannte „Beamen“ wurde hier quasi in einer Vorstufe demonstriert.

Trotz der Widersprüchlichkeit und Unanschaulichkeit der Quantentheorie entwickelte man mit der Zeit einen gewissen Pragmatismus. Man wusste zwar um die Problematik der begrenzten Aussagekraft von Modellen, doch man benutzte – und benutzt noch heute – möglichst anschauliche Bilder, um die Gegebenheiten zu beschreiben. So lässt sich beispielsweise die Funktionsweise einer Licht emittierenden Diode (LED) im so genannten Bändermodell auf die im Bild 7 gezeigte Weise darstellen. Die Elektronen sind in der Realität keine Kugeln. Fehlende Elektronen sind es noch weniger. Photonen sehen auch nicht wie Zickzacklinien aus. Doch Ingenieure und Experimentalphysiker operieren in genau dieser Bilderwelt. Und ihr Erfolg – die moderne Technik – gibt ihnen Recht. Sie diskutieren nicht mehr über Sinn und Widersinn. Sie „machen“ einfach. „Shut up and calculate“ wurde hier zum geflügelten Wort.

Doch ungeachtet von so viel allgegenwärtigem Pragmatismus müssen wir noch einen Aspekt des Lichts berücksichtigen. Albert Einstein hat ja nicht nur das Lichtquant entdeckt, sondern er revolutionierte zudem unsere Vorstellungen von Raum, Zeit und dem gesunden Menschenverstand mit seiner Relativitätstheorie. In ihr kommt dem Licht auch eine zentrale Rolle zu.

In seinem „Wunderjahr“ 1905 veröffentlichte Einstein sowohl die Lichtquantenhypothese als auch seine Spezielle Relativitätstheorie. In der erkannte er, dass die Lichtgeschwindigkeit generell eine un-

3 G. B. Lemos et al.: *Quantum imaging with undetected photons*, Nature 512, 409–412 (2014).

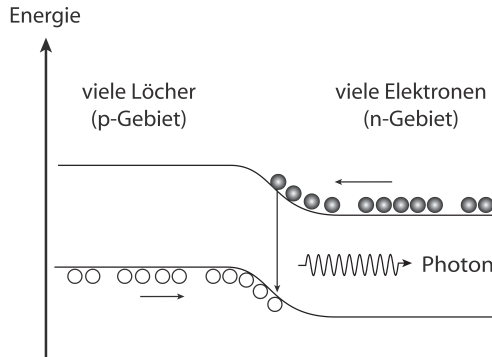


Abb. 7: Arbeitsmodelle zur Emission und Absorption des Lichts sind zwar „nicht ganz richtig“, doch erleichtern sie das Verstehen und Optimieren der ablaufenden Prozesse.

überwindbare Grenzgeschwindigkeit für Vorgänge darstellt, bei denen Energie transportiert oder Kraft übertragen wird. Licht kann im Vakuum gerade diese Geschwindigkeit erreichen. Für alles, was „schwer“ ist und eine Masse hat, ist diese Geschwindigkeit unerreichbar.

Die Photonen, die Lichtteilchen, haben jedoch keine Ruhemasse. Sie „wiegen nichts“ und können sich deshalb mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Je näher ein bewegtes System der Lichtgeschwindigkeit kommt, desto langsamer vergeht in ihm – von außen gesehen – die Zeit. Für Photonen dehnt sich die Zeit theoretische ins Unendliche. Für sie bleibt die Zeit stehen. Für ein Photon ist es also egal, ob es einen Zentimeter fliegt oder von einem Stern zu einem anderen. Wenn aber für Photonen der Zeitbegriff nicht definiert ist, dann gäbe es auch keinen Raum, da sich ja ein „Hier“ und ein „Dort“ nur durch eine Bewegung innerhalb einer Zeitspanne begreifen lässt. Unter diesem Aspekt bekommt auch die Verschränkung von Photonen einen ganz anderen Sinn: Die betreffenden Photonen „empfinden sich“ gar nicht als räumlich getrennt, denn sie haben sich ja gar nicht auseinanderbewegt.

Jedoch gibt es keine Theorie, aus der die „ewige“ Existenz von Photonen abgeleitet werden könnte. So könnten sie durchaus eine extrem kleine Masse haben, damit die Grenzgeschwindigkeit nicht ganz erreichen, ggf. in noch leichtere Teilchen zerfallen und folglich nicht ewig leben. Julian Heeck vom Max-Planck-Institut für Kernphysik

Was ist Licht?

hier in Heidelberg untersuchte die Reststrahlung vom Urknall, die kosmische Hintergrundstrahlung.⁴ Dabei stellte sich heraus, dass die Daten der These nicht widersprechen, dass Photonen durchaus eine winzige Masse haben und dadurch auch nur begrenzt lange leben könnten.

Es gibt noch viel zu tun, um hinter die Geheimnisse des Lichts zu kommen. Die Materie, die wir kennen, wechselwirkt mit Licht. Doch sie macht nur knapp 5 % dessen aus, was das Universum erfüllt. 23 % des Weltalls besteht aus sogenannter Dunkler Materie und der Rest aus Dunkler Energie. Mit anderen Worten: Von 95 % des Weltinhaltes haben wir keine Ahnung.

Möglicherweise kommen wir bei der Erklärung dieser ganz grundlegenden Phänomene an eine gewisse Grenze der herkömmlichen Physik, und wir brauchen völlig neue Ansätze im Denken. Dass wir in Zukunft mit noch abstrakteren und widersprüchlicheren Modellen operieren müssen, scheint fast sicher. Umso wichtiger ist es, dass wir um Begriffe und Vorstellungen ringen und uns Gedanken machen, wie wir über diese Erkenntnisse innerhalb der Physik-Community aber auch mit Nichtfachleuten sprechen können.

Auf Bilder, auch wenn sie die Sachverhalte nicht ganz richtig wiedergeben, werden wir da nicht verzichten können. Es gibt leider Tendenzen in den heutigen Schulen und Hochschulen, nur noch abstrakt zu argumentieren und dabei auf anschauliche Bilder zu verzichten. Das scheint mir der falsche Weg.

So können wir beispielsweise die Bilder des Michelangelo auch nicht als überlebte Vorstellung abtun – nur weil es beim Entstehen unserer Welt nicht genau so zu gegangen ist, wie wir es in der Sixtinischen Kapelle sehen. Analoges gilt natürlich auch für die wissenschaftlichen Bilder unserer Vorfahren. Die Praxis von Physikern und Ingenieuren lehrt, dass auf Bilder nicht zu verzichten ist. Wir müssen nur die Grenzen benennen und beachten, in denen die Modelle und ihre anschauliche Darstellungen Gültigkeit besitzen.

Sicher sollten wir uns beim Finden von Bildern auch auf die alten Denker besinnen, deren Weisheit ja das Resultat von Einsichten in grundlegende Sachverhalte, Strukturen oder Beziehungen in unserer Welt war. Diese sind heute immer noch vorhanden und wirken. Aber aufgrund unseres modernen Denkens, unserer neuen Maßstäbe und

4 J. Heeck, *How stable is the photon?*, Phys. Rev. Lett. 111, 021801 (2013).

Rolf Heilmann

unserer hochgezüchteten Sensorik können wir sie unter Umständen in unserer Informationsflut gar nicht mehr wahrnehmen.

Ich möchte deshalb anknüpfend an Thomas Mann mit einem schönen Zitat von Bernhard von Clairvaux aus dem 12. Jahrhundert enden. Er schreibt: „Reinige das Auge, damit du das reinste Licht schauen kannst.“ Diese Worte sollten für uns alle ein Programm sein.