

# Die seltsamen Eigenschaften des Lichts

**2015 ist das Internationale Jahr des Lichts und der lichtbasierten Technologien. Ein Blick zurück zeigt: Unser Verständnis von Licht hat sich im Laufe des vergangenen Jahrhunderts grundlegend verändert. Obwohl die duale Wellen-Teilchen-Natur des Lichts heute zweifelsfrei erwiesen ist, bereitet diese auch heute noch Kopfzerbrechen.**

Um das Jahr 1900 schien klar zu sein, dass Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht. Die drahtlose Kommunikation feierte ihre ersten Triumphe und bestätigte die Wellennatur des Lichtes. Bis auf Kleinigkeiten schien sogar die Entwicklung der Physik am Ende angelangt zu sein – ein grosser Irrtum!

## **Bist du nicht willig, brauch ich Quanten**

Max Planck, Professor für Physik an der Universität Berlin, wollte den Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Körpers und seinem Strahlungsspektrum verstehen. Die idealisierte Strahlungsquelle sollte schwarz sein, damit Strahlung jeder Frequenz absorbiert und emittiert wird. Es gelang ihm jedoch nur eine mathematische Beschreibung des langwelligen (roten) Endes des Spektrums, während sein Modell auf der kurzwelligen (blauen) Seite viel zu hohe Emissionswerte lieferte. Es war mehr eine Verzweiflungstat als eine Einsicht, die ihm verhasste Idee von Quanten heranzuziehen, um die Emissionswerte bei hohen Frequenzen zu reduzieren. Sein mit Quanten modifiziertes Strahlungsgesetz (Planck, 1901) war jedoch ein bahnbrechender Erfolg.

## **Einstein macht Quanten real**

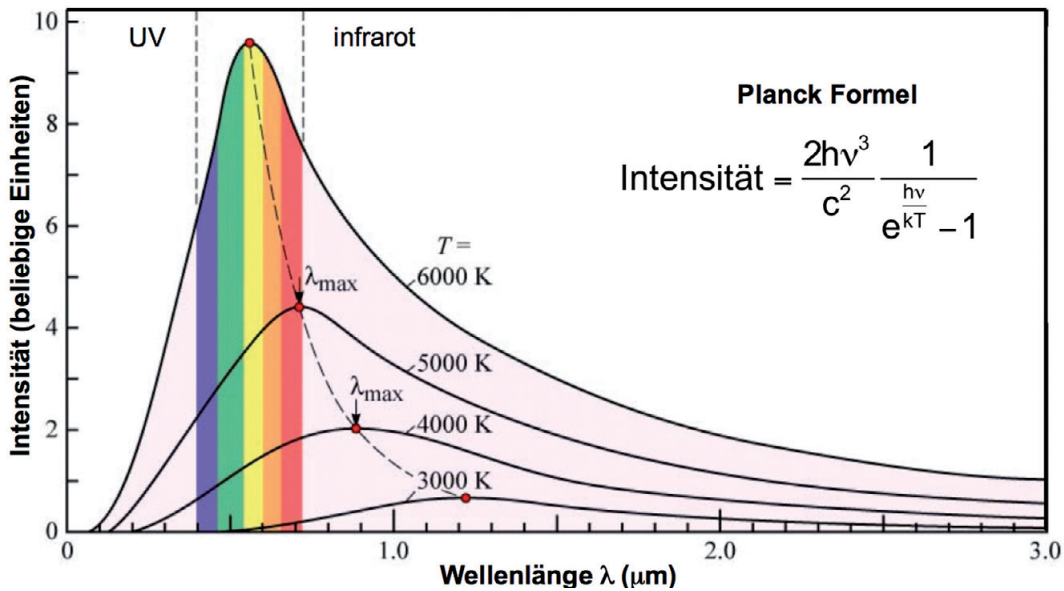
So perfekt die Übereinstimmung des Quanten-Strahlungsgesetzes mit den Messungen auch war, man konnte Licht nicht plötzlich als Quanten auffassen, nachdem seine Wellennatur durch Fresnel und Maxwell vermeintlich über alle Zweifel bewiesen war. Der fundamentale Schritt gelang Albert Einstein (1905), indem er die rätselhaften Ergebnisse von Untersuchungen des Photoeffektes mit Quanten deutete. Bei der Bestrahlung von Metallen mit ultravio-

lettem Licht werden Elektronen aus der Oberfläche herausgeschleudert, deren kinetische Energie mit Hilfe eines elektrischen Abbremsfeldes gemessen werden konnte. Erstaunlicherweise wurden die Elektronen selbst mit sehr intensivem Licht nicht schneller, wohl aber bei der Erhöhung seiner Frequenz! Einstein, übrigens ein korrespondierendes Mitglied der NGZH, zeigte in seinem gut lesbaren Artikel, dass der Photoeffekt vollständig verstanden werden kann, wenn man wie Planck Lichtquanten (Photonen) der Energie  $E=h\nu$  annimmt. Einsteins einfache Erklärung des Photoeffekts und sein Zusammenhang durch die Konstante  $h$  mit der Schwarzkörperstrahlung waren derart überzeugend, dass die Realität von Quanten akzeptiert wurde.

## **Kann man ein einzelnes Photon sehen?**

Ja, aber nicht mit unseren Augen! Unser gut dunkeladaptiertes Auge braucht rund 10 sichtbare Photonen, um zu reagieren. Wir besitzen jedoch einen technischen Detektor, der ein einzelnes Photon «sehen» kann: den Photomultiplier. Ein Photon schlägt dort ein Elektron aus einer speziellen Metalloberfläche heraus (Photoeffekt). Dieses Elektron wird durch eine Spannung beschleunigt und schlägt wiederum aus einer Metallanode mehrere Elektronen heraus. Durch zehnfache Wiederholung dieses Prozesses entsteht an der letzten Anode ein Stromstoss, der mit Transistoren weiter verstärkt und über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden kann.

Betrachten wir eine immer schwächer werdende Lampe. Zu Beginn sehen wir ihr Licht und können es mit einfachen Photodioden messen. Die Photodiode gibt eine sehr konstante Gleichspannung ab; nichts deutet auf eine körnige Struktur des Lichts hin. Starkes Licht verhält sich also wie ein perfektes Kontinuum, darstellbar durch Wellen. Am besten stimmt diese Vorstellung für Laserlicht, das eine gute Kohärenz über lange Strecken zeigt. Ein roter 1 mW-Laser emittiert pro Sekunde rund  $3 \times 10^{15}$  Photonen. Mit 10 Reflexionen an Glasplatten wird der Photonenstrom auf rund 20 Photonen pro Sekunde abgeschwächt. Ein Photomultiplier würde über einen Lautsprecher ein Geräusch erzeugen, das sich wie Regen auf ein Dachfenster anhören würde. Mehr



Plancksches Strahlungsgesetz. In der Formel begrenzt der zweite Term die Emission, sobald  $h\nu$  grösser ist als  $kT$ , also bei hohen Frequenzen  $\nu$ . Mit zunehmender absoluter Temperatur  $T$  (in Grad Kelvin) werden höhere Frequenzen (also Licht kürzerer Wellenlänge) verstärkt ausgestrahlt. Die Naturkonstante  $h$  wird heute als Plancksches Wirkungsquantum bezeichnet,  $k$  ist die Boltzmannsche Konstante und  $c$  die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit. Beispiel Kerzenflamme: Im hellen oberen Teil einer Kerzenflamme beträgt die Temperatur etwa  $1200^\circ\text{C}$ . Die am meisten Strahlung emittierenden Körper sind kleinste Russpartikel, die aus Millionen von Kohlenstoffatomen bestehen und mangels Sauerstoff noch nicht verbrannt sind. Die maximale Strahlungsemission liegt bei einer Wellenlänge von  $2\ \mu\text{m}$ , also im infraroten Bereich. Deshalb erzeugt eine Kerze in erster Linie Wärme und nur wenig sichtbares Licht. Bei den sichtbaren Wellenlängen emittiert sie am meisten Rot und fast kein Blau, deshalb ist das Kerzenlicht stark gelblich und «warm».

noch: Würde man den Reststrahl auf einem räumlich hoch auflösenden Pixel-Detektor anschauen, würde man sehen, dass jedes Photon nur ein Pixel aktiviert. Die Wechselwirkung von Photonen und Materie ist also räumlich sehr eng begrenzt. Aber wie passt dies mit der Wellennatur des Lichtes zusammen?

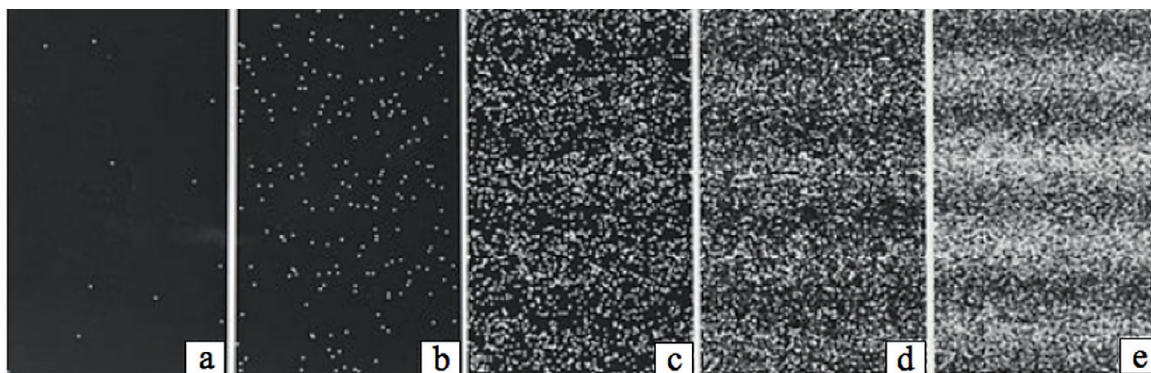
### Licht widerspricht dem gesunden Menschenverstand

Trifft ein Laserstrahl auf zwei parallele Spalten in einer Platte, deren Abstand wenige Wellenlängen beträgt (d.h. wenige  $\mu\text{m}$ ), beobachtet man das bekannte Interferenzmuster mit abwechselnden Maxima und Minima der Lichtintensität. Es kann mit Hilfe der Vorstellung von sich überlagernden Wellen berechnet werden. Wir schwächen nun den Laserstrahl auf rund 20 Photonen in der Sekunde ab und führen das Doppelspaltexperiment mit einem räumlich hoch auflösenden Pixeldetektor durch. Jedes Photon aktiviert genau ein Pixel. Wenn wir uns vorstellen, dass ein einzelnes Photon entweder durch den einen oder den anderen Spalt fliegt, können wir uns das erstaunliche Resultat des Experimentes nicht erklären. Wir

stellen nämlich fest, dass die Photonen vor allem dort detektiert werden, wo bei starkem Licht die Interferenzmaxima waren.

Beobachten wir viele einzelne Photonen, ergibt sich sogar eine Häufigkeitsverteilung von Photoneinschlägen, die exakt mit dem Interferenzmuster bei starkem Licht übereinstimmt! Es gibt nur eine Art, diesen Sachverhalt zu beschreiben: Wir müssen annehmen, dass ein einzelnes Photon gleichzeitig durch beide Spalte fliegt und hernach mit sich selbst interferiert! Das Hirn kann sich noch so stark dagegen sträuben, und Physiker versuchten wirklich alles Denkbare, um diese irre Vorstellung zu widerlegen: Sie ist eine unumstössliche Tatsache.

Anstelle der nahe beieinanderliegenden Wege durch zwei Spalte kann man einem Photon auch Wege offerieren, die meterweit voneinander entfernt verlaufen. Trotzdem entscheiden sich die Photonen nicht für den einen oder den anderen Weg, sondern gehen beide gleichzeitig und interferieren hernach mit sich selbst! Die Theorie der Quantenelektrodynamik erhebt diesen «Irrsinn» zur Methode und baut auf der Vorstellung auf, dass Photonen grundsätzlich



Doppelspaltexperiment durchgeführt mit 11 (a), 200 (b), 6000 (c), 40 000 (d) und 140 000 (e) Photonen

alle möglichen Wege gleichzeitig nehmen, um von einer Lichtquelle  $Q$  zu einem vorgegebenen Punkt  $P$  zu gelangen. Richard Feynman hat eine Vortragsreihe für Nichtphysiker gehalten und zeigt dort, wie die «Alle-Wege-Theorie» mit anschließender Interferenz sämtliche Gesetze der Optik fast mühelos wiedergibt (Feynman, 1985).

### Seltene Überraschungen

Die Physiker haben sich in den vergangenen 80 Jahren mit der «Alle-Wege-Theorie» angefreundet. Kopfzerbrechen bereitet aber heute noch eine weitere Eigenschaft von Photonen: die Verschränktheit (engl. entanglement). Neben den Eigenschaften Energie, Frequenz und Impuls hat ein Photon noch einen Spin von  $+1$  oder  $-1$ . Dies ist eine Art Drall und bewirkt die Polarisierungseigenschaften (rechts oder

links zirkular polarisiert) von Licht. In bestimmten Experimenten kann man zwei diametral auseinanderfliegende Photonen erzeugen, deren Gesamtspin null sein muss. Welches Photon hat Spin  $+1$  und welches  $-1$ ? Die Theorie sagt, dass beide Photonen sich in einem Überlagerungszustand beider Spins befinden. Erst bei der Messung des Spins EINES der Photonen z.B. als  $+1$  steht INSTANTAN fest, dass eine Messung des Spins des anderen Photons  $-1$  ergeben MUSS, selbst wenn die beiden Photonen kilometerweit voneinander entfernt sind. Diese «spooky interaction at a distance» war für Einstein jedoch vollständig inakzeptabel. Unterdessen konnte man experimentell beweisen, dass sich die Photonen tatsächlich wie von der Theorie gefordert verhalten. Mehr noch: Es wurde ein Quanten-Verschlüsselungsverfahren getestet, das auf der Verschränkung basiert und theoretisch absolut sicher ist, da ein Abhören durch Dritte sofort bemerkt würde. Falls zukünftige Quantencomputer die heutige RSA-Verschlüsselung wirklich knacken sollten, wäre mit der Quantenverschlüsselung bereits heute für Abhilfe gesorgt.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.



Quanten-Skifahrer

### Literatur

Einstein, A. 1905. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Ann. d. Phys. 17: 132-148

Feynman, R. P. 1985. QED – The strange theory of light and matter. Princeton Univ. Press, Princeton. Deutsche Ausgabe 1988: QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper, München, Zürich

Planck, M. 1901. Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. Ann. d. Phys. 4: 553-563