

Zeitschrift: Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaften beider Basel
Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Basel ; Naturforschende Gesellschaft Baselland
Band: 16 (2016)

Artikel: Die seltsamen Eigenschaften des Lichts
Autor: Gassmann, Fritz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-676538>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 04.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die seltsamen Eigenschaften des Lichts

FRITZ GASSMANN

Zusammenfassung: Als Beitrag zum UNESCO-Jahr des Lichts 2015 wird die faszinierende Entwicklung der Lichttheorien ab dem 17. Jahrhundert skizziert. Es wird erklärt, weshalb die überzeugende Wellentheorie ab 1900 durch eine Partikeltheorie ergänzt wurde. Die zentrale Rolle von Licht für die Entwicklung der modernen physikalischen Theorien in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wird damit klar. Die praktische Bedeutung dieser Theorien wird mit Querbezügen zu Alltagserfahrungen illustriert. Es wird auch auf die sehr seltsamen Phänomene eingegangen, die sich beim Experimentieren mit einzelnen Photonen zeigen. Obwohl diese Effekte den «gesunden Menschenverstand» arg strapazieren, werden sie alle durch die Quantenelektrodynamik (QED) korrekt beschrieben und dürften grundlegend neue Technologien ermöglichen. Warum scheut man sich, die Basis der heutigen und zukünftigen Technologien in den Gymnasien zu thematisieren?

Abstract: The strange properties of light. As a contribution to the UNESCO Year of Light 2015, we look into the fascinating development of the light-theories beginning with the 17th century. We show the key experiments leading to the complementation of the successful wave theory with a particle theory after 1900. In this context, the important role of light for the development of the modern physical theories in the first half of the 20th century becomes obvious. The practical impact of these theories is illustrated with everyday-examples. We will also concentrate on very strange phenomena encountered with single-photon experiments that severely contradict «normal human thinking». However, all these phenomena are correctly described by the theory of Quantum Electro Dynamics (QED) and they will probably lead to groundbreaking new technologies. Why do Gymnasias hesitate to explain the basis of today's and future's technologies?

Key words: Licht, Photon, Wellentheorie, Quantentheorie, Quantenelektrodynamik

Lichttheorien vor 1900

Bereits vor 2'500 Jahren war Licht bei den griechischen Naturphilosophen zur Erklärung alles Seienden von zentraler Bedeutung. Licht wurde mit Feuer gleichgesetzt, was sich im Neugriechischen durch die enge Verwandtschaft der Begriffe *fos* (Licht), *fota* (Lichter, Lampen) und *fotia* (Feuer) immer noch zeigt. Feuer war über rund zwei Jahrtausende hinweg eines der vier Elemente Feuer, Wasser, Luft und Erde, mit denen versucht wurde, alle Naturerscheinungen zu erklären. Heraklit ging sogar so weit, Feuer als Urstoff aufzufassen, der in alle anderen Elemente umgewandelt werden kann. Mit dieser Ansicht kam er erstaunlich nahe an die heutige Physik, nach der Materie *m* und Energie *E* ineinander umwandelbar sind: $E = mc^2$ (*c* = Lichtgeschwindigkeit).

Tiefere Einblicke in das Wesen des Lichts wurden erst im 17. Jahrhundert durch Huygens ermöglicht, der die erste Wellentheorie entwickelte und damit die Abbildungsfehler astronomischer Teleskope deutlich verringern konnte. Trotz Newtons Festhalten an seiner Partikeltheorie für Licht setzte sich die Wellentheorie zu Beginn des 19. Jahrhunderts vollends durch, als Fresnel mit deren Hilfe die Reflexions- und Brechungsgesetze an Mediengrenzen (z.B. an einer Glasoberfläche) berechnen konnte, die mit Messungen exakt übereinstimmten.

Licht besteht also aus Wellen, doch welches Medium ist Träger dieser Wellen? In Analogie zu den damals bekannten Schall- und Wasserwellen musste neben Luft und Wasser ein weiteres Medium her, das bis zur Sonne und den Sternen reichte, um deren Licht zu transportieren. Es war naheliegend, den durch Aristoteles ausgedachten Äther zu verwenden, der als fünftes Element (lateinisch *quinta essentia*, Quintessenz) die vier Grundelemente ergänzte und sich «bis weit über den Mond hinaus» erstrecken sollte. Doch was der Äther sein sollte, wurde auch im 19. Jahrhundert nicht klar. Die Vorstellung war, dass sich Lichtwellen im ruhenden Äther mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegen, und dies müsste auf Grund der Geschwindigkeit der Erde von 30 Kilometern pro Sekunde auf ihrer Bahn um die Sonne beobacht-

bar sein. Von der Erde aus betrachtet müsste das Licht auf einem Ätherwind reiten, der parallel und senkrecht zur Erdbahn verschieden war, so dass sich die entsprechenden Lichtgeschwindigkeiten um rund ein Zehntel Promille unterscheiden sollten. Da die Lichtgeschwindigkeit nur auf etwa 5 % genau gemessen werden konnte, schien es nicht möglich, den Ätherwind zu beweisen, bis Michelson und Morley ein Interferometer erfanden, das die Differenz der Lichtgeschwindigkeit längs zweier senkrecht aufeinander stehender Achsen direkt messen konnte. Der Trick bestand darin, geringste Laufzeitunterschiede längs der beiden Achsen in Phasendifferenzen zu übersetzen und diese als mit blossen Auge beobachtbare Interferenzmuster sichtbar zu machen. Nach vielen Versuchen mussten jedoch Michelson und Morley (1887) einräumen, dass kein Ätherwind festgestellt werden konnte.

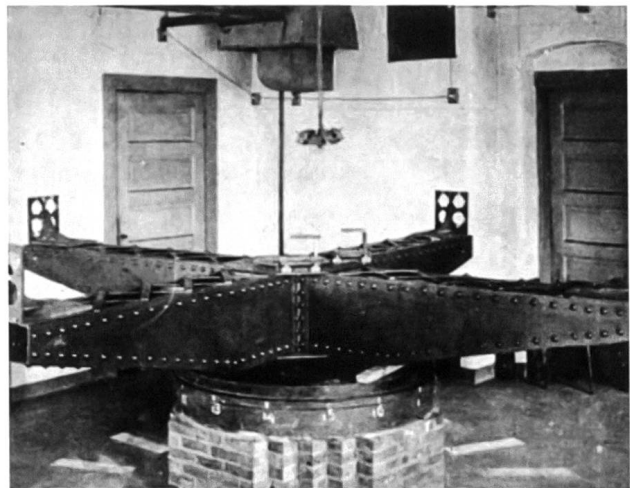


Abb. 1: Verbessertes Interferometer von Morley und Miller, das bei Messungen 1903–1905, wie die rund 20 Jahre früheren Messungen von Michelson und Morley keinen Ätherwind zeigte (Photo AIP Emilio Segre Visual Archives).

Zu Recht wird dieses Experiment als der berühmteste Misserfolg der Naturwissenschaft bezeichnet: Einerseits war Michelson sein Leben lang überzeugt und zerknirscht, dass er versagt hatte; andererseits hat Einstein das Resultat positiv bewertet und die Nichtexistenz des Äthers als Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in jedem noch so schnell bewegten Referenzsystem 1905 als Grundlage für seine spezielle Relativitätstheorie genommen. Doch bevor wir diese Über-

legungen weiter verfolgen, betrachten wir die Errungenschaften der Elektrizitätslehre (Elektrodynamik) im 19. Jahrhundert.

Aufbauend auf den Entdeckungen von Coulomb, Volta, Oersted, Ampère, Faraday und Thomson entwickelte Maxwell (1865) ein System aus vier Differentialgleichungen, das in eleganter mathematischer Form alle bekannten elektrischen und magnetischen Eigenschaften zusammenfasste. Erstaunlicherweise enthalten die heute noch in unveränderter Form gültigen Gleichungen als einzige Naturkonstante die Lichtgeschwindigkeit, und Lösungen des Gleichungssystems im Vakuum ohne Ladungen und Ströme sind elektromagnetische Wellen, die sich ohne Äther mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen! Es drängte sich förmlich auf, diese Wellen mit Lichtwellen gleichzusetzen. Doch waren diese elektromagnetischen Wellen rein theoretische Konstrukte, bis Heinrich Hertz 1887 mit oszillierenden Elektronenströmen tatsächlich Wellen erzeugen konnte, die sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegten. Marconi entwickelte darauf basierend in Bologna eine kurze drahtlose Telegrafieverbindung. Da in Italien

kein Interesse dafür gefunden werden konnte, zog er nach England und konnte dort 1897 mit Unterstützung des Ministeriums für Post und Telegrafie die erste drahtlose Telegrafieverbindung der Welt 6 km übers offene Meer demonstrieren. Damit war klar: Radiowellen lassen sich mit bewegten Elektronen herstellen und sind wie Licht elektromagnetische Wellen. Wie aber kommen die rund eine Milliarde mal höheren Frequenzen in einer Edison-Glühlampe zustande?

Bist du nicht willig, so brauch ich Quanten

Um dieselbe Zeit wollte Max Planck an der Universität Berlin die Effizienz von Glühlampen verbessern und untersuchte deshalb den Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Körpers und dem Spektrum sowie der Leistung des emittierten Lichtes. Trotz mehrjähriger Bemühungen gelang ihm jedoch nur eine mathematische Beschreibung des langwelligen (roten) Endes des Spektrums, während sein Schwarzkörperstrahlungs-Modell auf der hochfrequenten (blauen) Seite des Spektrums Emissionswerte lieferte, die entsprechende Messungen um ein



Abb. 2: Guglielmo Marconi (1874–1937) demonstrierte 1897 die erste drahtlose Telegrafieverbindung über 6 km (Photo 1901 von unbekanntem Autor, LIFE Photo Archive).

Vielfaches überstiegen. Es war mehr eine Verzweiflungstat als eine Einsicht, die ihm verhasste Idee von Quanten heranzuziehen, um die Emissionswerte bei hohen Frequenzen zu reduzieren. Allerdings war der Effekt der Quantenkorrektur einfach zu verstehen: Wenn nur Energiequanten mit Grössen proportional zur Frequenz zugelassen wurden, konnten mit zunehmender Frequenz immer weniger Quanten emittiert werden und zudem hatte Planck die noch offene Proportionalitätskonstante h zur Justierung seiner Strahlungsformel zur Verfügung. h wird heute Plancksches Wirkungsquantum genannt und sein Wert beträgt rund $6.6 \cdot 10^{-34}$ Js. Sein Ende 1900 gefundenes Strahlungsgesetz (Planck 1901) war ein durchschlagender Erfolg und gilt unverändert noch heute. Mehr noch: Die verhasste Quantisierung hat Planck zum Begründer der wohl besten physikalischen Theorie aller Zeiten gemacht, nämlich der Quantentheorie! Planck stellte sich einen glühenden Körper aus

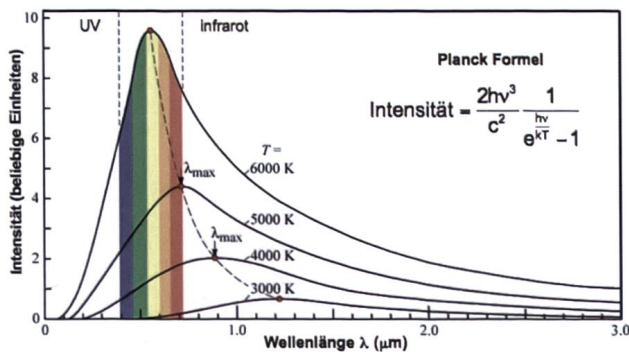


Abb. 3: Plancksches Strahlungsgesetz. In der Formel für die Intensität der Strahlung eines schwarzen Körpers begrenzt der zweite Term die Emission stark, sobald $h \cdot \nu$ grösser als kT ist, also bei hohen Frequenzen ν . Mit zunehmender absoluter Temperatur T (in Grad Kelvin) werden höhere Frequenzen und zufolge des ersten Terms mit höherer Energie ausgestrahlt (Grafik E. F. Schubert, Light Emitting Diodes slide show).

einer Vielzahl von Oszillatoren zusammengesetzt vor, die Licht jeder Frequenz ausstrahlen können. Anstelle der relativ langsam oszillierenden Elektronenströme in Marconis Antennen, oszillierten bei Planck die positiv geladenen Atomkerne, die in einem Festkörper in einer Gitterstruktur elastisch festgehalten sind. Dank der das Gitter zusammenhaltenden starken elektrischen Kräfte und der kleinen Masse der Atome

ergeben sich, wie wir heute wissen, Gitterschwingungen zu jeder Frequenz aufgrund der thermischen Bewegung der Atome. Die Energie der Gitter-Oszillatoren ist proportional zur absoluten Temperatur T (gemessen in Grad Kelvin K) und die bestimmende Proportionalitätskonstante ist die Boltzmann-Konstante k mit einem Wert von rund $1.4 \cdot 10^{-23}$ J/K. Dies ist der Grund, dass im Planckschen Strahlungsgesetz neben $h \cdot \nu$ auch kT erscheint; es ist die perfekte Kombination von Quantentheorie und Thermodynamik! Einige Beispiele sollen dies illustrieren:

Kerzenflamme: Im leuchtend hellen oberen Teil einer Kerzenflamme beträgt die Temperatur um die $1'200^\circ\text{C}$ und die am meisten Strahlungsenergie abgebenden Körper sind kleinste Russpartikel (schwarze Körper), die aus Millionen von Kohlenstoffatomen bestehen, die mangels Sauerstoff noch nicht verbrannt sind. Die Entstehung dieser Russpartikel nahe beim Docht sieht man überzeugend nach dem Ausblasen der Kerze! Die maximale Strahlungsemission liegt für $1'200^\circ\text{C}$ bei einer Wellenlänge von $2\text{ }\mu\text{m}$, also im infraroten Bereich. Deshalb erzeugt eine Kerze in erster Linie Wärme und nur relativ wenig sichtbares Licht. Bei den sichtbaren Wellenlängen emittiert sie am meisten Rot und fast kein Blau, deshalb ist das Kerzenlicht stark gelblich und «warm». Analog sind Flammen einer Petrolampe oder eines Holzfeuers.

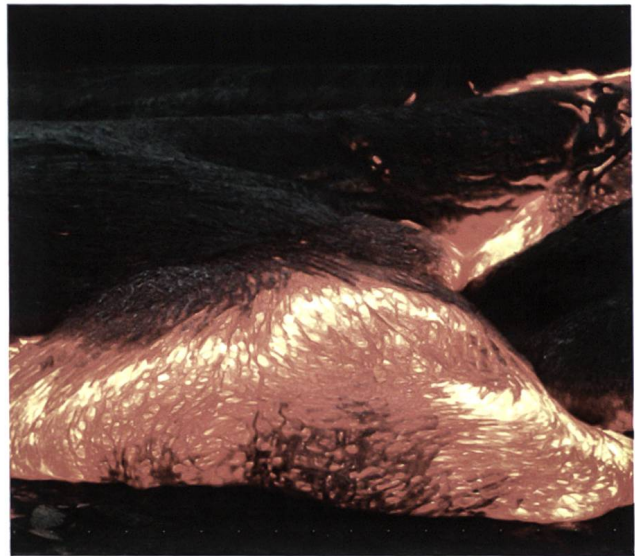


Abb. 4: Rot bis gelb glühende Lava des Vulkans Kilauea (Hawaii) mit Temperaturen von 800 bis $1'200^\circ\text{C}$ (Bild 2003, US Geological Survey).

Glühlampe: Das Licht emittierende Element ist eine Wolfram-Glühwendel, die bei rund $3'400\text{ }^{\circ}\text{C}$ schmilzt. Normale Betriebstemperaturen sind deshalb um $2'400\text{ }^{\circ}\text{C}$ mit einer maximalen Emission bei $1.1\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge. Dies liegt im Infrarot, weshalb Glühlampen in erster Linie Heizgeräte sind: Nur etwa 5 % der Energie wird in sichtbares Licht umgewandelt, der Rest ist Wärme. Es ist also höchste Zeit, die Glühlampen durch effizientere Lampen zu ersetzen (z.B. LED)! Auch ein glühender Eisenstab emittiert Licht auf dieselbe Art und Weise. Mit zunehmender Temperatur verändert sich seine Farbe von dunklem Rot über Orange bis zu gelblichem Weiss. Aus seiner Farbe lässt sich seine Temperatur abschätzen.

Sonne: Die extraterrestrische Sonnenstrahlung (oberhalb der Atmosphäre) ist sehr nahe bei der Schwarzkörperstrahlung für $5'600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Emissionsmaximum liegt deshalb bei rund 500 nm , also im grün-bläulichen Bereich. Das Sonnenspektrum erscheint uns weiss, weil alle Spektralfarben in genügender Stärke vorliegen. Evolutionsbiologisch betrachtet ist dies kein Zufall, denn es ist am einfachsten, ein Auge zu entwickeln, das Wellenlängen im Bereich des Maximums der Sonnenstrahlung sehen kann. Weiter ist verständlich, dass diese stets vorhandene Mischung von Wellenlängen uns als neutrales Weiss erscheint. Wie die Sonne haben auch andere Sterne nahezu ein Schwarzkörper-Spektrum. Mit Spektrometern kann man diese Spektren messen und daraus auf die Oberflächentemperatur der Sterne schliessen. Leider sind die farbensehenden Zellen in unserem Auge (Zapfen) nicht genügend empfindlich, um uns die Farbenpracht der Sterne zu zeigen. Wir sehen Sterne fast nur mit den empfindlicheren aber nur schwarz-weiss sehenden Zellen (Stäbchen).

So perfekt die Übereinstimmung des Quanten-Strahlungsgesetzes mit Messungen auch war, konnte man Licht nicht plötzlich als Quanten auffassen, nachdem seine Wellennatur mit Fresnel und Maxwell vermeintlich über alle Zweifel bewiesen war! Für diesen fundamentalen und mutigen Schritt brauchte es Albert Einstein.

Das Wunderjahr 1905

Albert Einstein, ein 26-jähriger Technischer Experte 3. Klasse im Patentamt Bern, hat 1905 vier grundlegende physikalische Artikel publiziert, von denen zwei Licht direkt betreffen. Die vier recht kurzen und für heutige Physikstudenten gut verständlichen Artikel waren in der Reihenfolge ihrer Erscheinung:

Photoeffekt $E=h\cdot\nu$: Bei der Bestrahlung von Metallen mit ultravioletttem Licht werden Elektronen aus der Metalloberfläche herausgeschleudert, deren kinetische Energie mit Hilfe eines elektrischen Abbremsfeldes einfach gemessen werden konnte. Man erwartete, dass die Elektronen das Metall umso schneller verlassen, je intensiver die UV-Strahlung ist, was jedoch überhaupt nicht zutraf. Die Elektronen wurden selbst

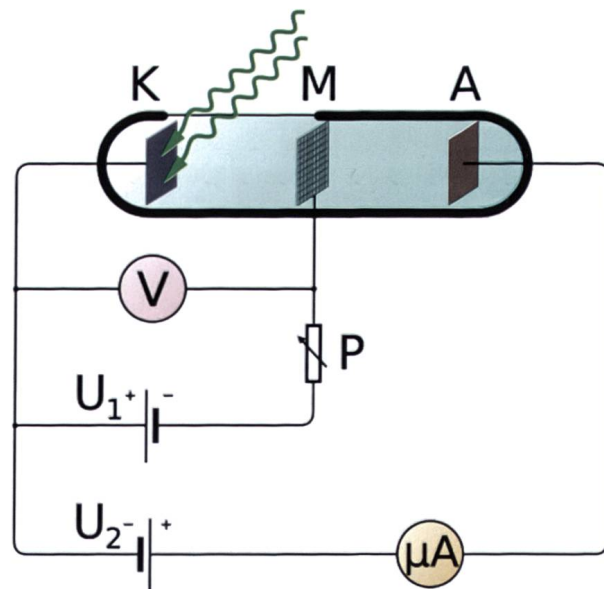


Abb. 5: Photoeffekt. UV-Licht fällt auf die Kathode K einer Vakuumröhre und schlägt Elektronen aus der Metalloberfläche heraus. Diese werden durch ein negativ geladenes Maschengitter M abgebremst und der an der positiven Anode A registrierte Strom wird kleiner. Mit Hilfe des Reglers P wird die negative Gitterspannung gerade so weit erhöht, bis der Anodenstrom verschwindet und man kann am Voltmeter V die Energie in eV ablesen, die die Elektronen beim Austritt aus der Kathode hatten. Diese Energie E hängt nicht von der Strahlungsintensität ab, sondern ausschliesslich nur von deren Frequenz: $E = h \cdot \nu$. Aus der für entsprechende Messungen verwendeten Vakuumröhre wurden Radioröhren entwickelt, die die Grundlage für die Nachrichtentechnik bis in die 1950er Jahre waren (Grafik Miraceti, Wikimedia Commons).

bei sehr intensivem Licht nicht schneller, wohl aber bei der Erhöhung seiner Frequenz ν ! Einstein (1905a) zeigt in seinem Artikel, dass der Photoeffekt vollständig verstanden werden kann, wenn man annimmt, dass die Wechselwirkung zwischen Licht und Elektronen in Quanten $h \cdot \nu$ erfolgt, wobei h die durch Planck eingeführte Proportionalitätskonstante ist. Die Lichtquanten wurden fortan auch Photonen genannt. Einsteins einfache Erklärung des Photoeffekts und sein Zusammenhang via h mit der Schwarzkörperstrahlung waren derart überzeugend, dass die Quanten langsam Realität wurden: Einstein hat die Quantentheorie ins Rollen gebracht!

Die reale Existenz der Atome: Einstein (1905b) hat die bekannte Brownsche Molekularbewegung als Stösse von Molekülen auf kleine suspendierte Partikel interpretiert und konnte einen beobachtbaren quantitativen Zusammenhang zwischen der Thermodynamik und der Zitterbewegung der suspendierten Teilchen herstellen, der sich in Experimenten als korrekt erwies. Die nicht enden wollenden Diskussionen über die Möglichkeit, dass Atome nur praktische Hilfsvorstellungen für die Chemie sein könnten, haben damit ein Ende gefunden.

Spezielle Relativitätstheorie: Einstein (1905c) untersuchte, wie Zeit und Raum bei einem Übergang auf ein bewegtes Koordinatensystem transformiert werden müssen, damit die Lichtgeschwindigkeit im ruhenden und im bewegten System dieselbe bleibt. Insbesondere konnte er beweisen, dass die entsprechenden sogenannten Lorentz-Transformationen die Maxwellgleichungen unverändert lassen, womit der Äther definitiv abgeschafft wurde! Dieselben Gleichungen gelten also z.B. auf der Erde und auf einem GPS-Satelliten zur Beschreibung der Radiosignale, die vom Satelliten zum Empfänger in einem Auto gelangen. Würden die Transformationen von Raum und Zeit (Längenkontraktion und Zeitdilatation) nicht angewendet, wäre das GPS instabil!

Äquivalenz von Masse und Energie $E=mc^2$ (Einstein 1905d): In Einsteins Worten ist Masse «verfestigte Energie». Masse kann in Licht umgewandelt werden (z.B. bei der Annihilation von einem Elektron mit seinem Antiteilchen, dem Positron) oder Licht kann in Masse umgewan-

delt werden (z.B. bei der Paarerzeugung, der inversen Reaktion zur Annihilation). Es muss in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass die Physiker nach und nach dazu übergingen, den Begriff Licht nicht nur für menschliche Augen sichtbares Licht zu verwenden, sondern für jede elektromagnetische Strahlung, also für Radiowellen, Mikrowellen, Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung, IR), sichtbares Licht, Ultraviolettstrahlung (UV), Röntgenstrahlung und die später entdeckte Gammastrahlung.



Abb. 6: Das Kernkraftwerk Gösgen gibt eine elektrische Leistung von rund 1 GW (ein Gigawatt) ans Stromnetz und 2 GW in der Form von Verdampfungswärme und erwärmter Luft an die Atmosphäre ab. Diese jährliche Energiemenge E von 3 Gigawattjahren gibt durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c dividiert gerade etwa 1 kg Masse m , die in Energie umgewandelt wurde: $m = E/c^2$ (Bild KKG).

Licht und Materie werden sich noch ähnlicher

In der Folgezeit wurde die duale Wellen-Teilchen-Natur des Lichtes immer deutlicher und in den 1920er Jahren zeigten Experimente mit Elektronen, dass auch diese Interferenzerscheinungen zeigen, wie dies sonst nur Wellen tun. Louis de Broglie (1923) fand die korrekte Beziehung zwischen dem Impuls p der Elektronen (Impuls = Masse $\times$ Geschwindigkeit) und der Wellenlänge λ der zugehörigen Materiewellen als $\lambda = \frac{h}{p}$. Wiederum ist das Plancksche Wirkungsquantum h involviert! Wenn sich Materie wie Wellen verhalten kann, musste man also nach einer Wellengleichung suchen. Dies gelang Erwin Schrödinger, Professor für theoretische Physik an der Universität Zürich, erstaunlich

schnell in den Skiferien in Arosa Ende Dezember 1925 (Schrödinger 1926). Seine Wellengleichung, zusammen mit einer mathematisch ganz anders formulierten aber äquivalenten Matrizenmechanik von Werner Heisenberg, bildeten die Ausgangspunkte für weitere ähnliche Theorien für die Kernkräfte (starke Wechselwirkung), den radioaktiven Betazerfall (schwache Wechselwirkung) und schliesslich für die Quantenelektrodynamik zur Beschreibung der dualen Wellen-Teilchen-Natur des Lichtes.

Mit diesen Theorien konnte man auch eine andere als thermische Erzeugung von Licht verstehen. Die Schrödinger-Gleichung lieferte diskrete Energieniveaus in Atomen und Molekülen. Wird ein Atom angeregt, geht eines seiner Elektronen auf ein höheres Energieniveau. Dieses ist jedoch instabil und das Elektron fällt in typischerweise 10 ns wieder auf das stabile Grundniveau zurück, wobei die Dauer der Lichtemission rund 10^{-5} ns beträgt und einen etwa 3 μm langen Wellenzug (sog. Kohärenzlänge) erzeugt. Dabei gibt es die Differenzenergie in Form eines Lichtquants der Grösse $h \cdot \nu$ ab. Da die Energieniveaus sehr genau bestimmt sind, ergeben sich äusserst schmale Emissionslinien.

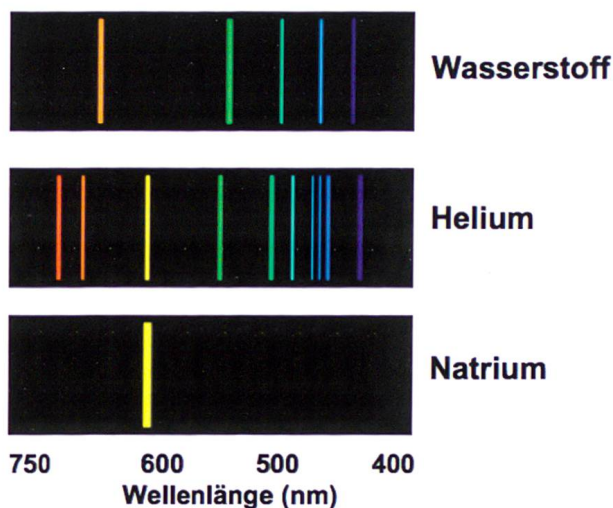


Abb. 7: Sichtbare Emissionslinien von Wasserstoff, Helium und Natrium. Die Linien sind wie Fingerabdrücke der Atome, mit denen z. B. die Zusammensetzung von Sternatmosphären bestimmt werden kann. Da Atome bei denselben Frequenzen auch absorbieren, treten die Linien vor dem Hintergrund der kontinuierlichen Schwarzkörperstrahlung von Sternen als dunkle sog. Fraunhofer-Linien auf (Bild E. und M. Forno, Landau (D) 2007).

Die Anregung von Atomen oder Molekülen kann auf verschiedene Weise erfolgen: durch thermische Bewegungen, durch elektrische Spannungen, durch Stösse mit Elektronen, anderen Elementarteilchen, Atomen oder Molekülen oder durch die Absorption von Licht. Es stehen also viele Möglichkeiten offen, um Licht effizient herzustellen.

Leuchtstofflampe: Die bekannten Energiesparlampen sind Niederdruck-Quecksilberdampflampen. Sie enthalten eine kleine Menge Quecksilber, das beim Einschalten verdampft und nach 10-20 Sekunden einen Dampfdruck von etwa einem Prozent des Atmosphärendruckes bildet. Zwei heisse Kathoden (Glühwendel auf beiden Seiten der meist gebogenen Röhre) liefern die Energie zum Verdampfen des Quecksilbers und emittieren Elektronen, die gegen die jeweils andere Kathode beschleunigt werden (richtigerweise müsste man diese andere Elektrode als Anode bezeichnen; da die Lampe aber mit Wechselstrom von rund 40 kHz betrieben wird, bezeichnet man beide Heizdrähte als Kathoden). Die beschleunigten Elektronen stossen mit den Quecksilberatomen zusammen und regen diese so an. Die wichtigste Emissionslinie liegt bei 254 nm im UV und weniger intensive Linien liegen im blauen und grünen Bereich. Ein phosphorhaltiger fluoreszierender Leuchtstoff auf der Innenseite der Röhre absorbiert diese UV-Strahlung und gibt sie in Form von Licht über einen grösseren Wellenlängenbereich zwischen Blau und Rot wieder ab. Je nach der Zusammensetzung des Leuchtstoffes wird das Licht «wärmer» (mehr gelb-rot-Anteil) oder «kälter» (mehr blau-Anteil). Ähnlich funktionieren rote Neonröhren (enthalten Neon anstelle von Quecksilber) oder orange Strassenlampen (enthalten Natrium anstelle von Quecksilber).

LED: Weisse Leuchtdioden sind im Grunde genommen blaue Leuchtdioden, die schmalbandiges blaues Licht um 450 nm erzeugen. Dies geschieht mittels einer elektrischen Spannung von rund 3 Volt, mit der Elektronen ins sog. Leitungsband eines Halbleiters befördert werden. Diese fallen hernach ins Valenzband (Grundniveau) zurück und geben blaue 3 eV-Photonen ab. Um daraus weisses Licht zu erzeugen, wird wie bei der Leuchtstofflampe eine Phosphorschicht verwendet (Gassmann 2014b).

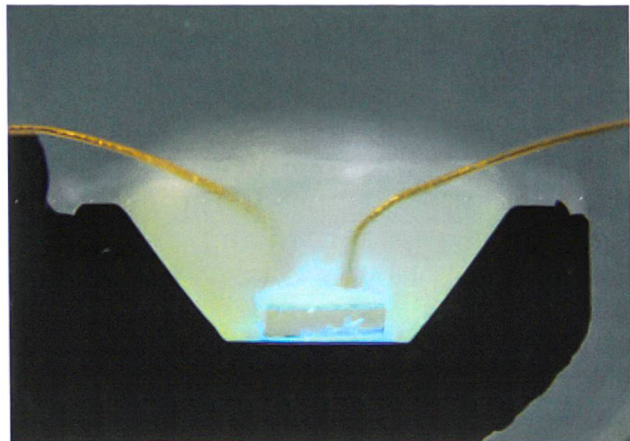


Abb. 8: Weisse LED.

Links: Raumleuchte mit gut erkennbarer gelber Phosphorschicht, mit der das blaue LED-Licht in weisses Licht transformiert wird (Bild Golden Dragon Plus, Osram Opto Semiconductors).

Rechts: Das blaue LED-Primärlicht vermischte sich mit dem Photolumineszenzlicht der Phosphorschicht (Bild urgent necessity@de.wikipedia).

Wie gross ist ein Photon?

Gross ist hier im Sinne von energiereich gedacht und die Energie E eines Photons ist $E = h \cdot \nu$. Da das Plancksche Wirkungsquantum h enorm klein ist, wird E ebenfalls sehr klein, wenn man die übliche Masseinheit Joule oder Wattsekunden verwendet. Die am besten bekannte Kilowattstunde wäre noch schlechter geeignet, weil sie 3.6 Mio. mal grösser ist als eine Wattsekunde (kilo x Stunde = 1'000 x 60 x 60 Sekunden). Es ist also eine wesentlich kleinere Energieeinheit gefragt und die Wahl der Physiker fiel auf die kinetische Energie eines Elektrons, wenn es durch eine Spannung von einem Volt beschleunigt wird. Diese winzige Energie wird ein Elektronenvolt (1 eV) genannt. Die Umrechnung lautet: $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$. Diese sehr kleine Energieeinheit ist praktisch, weil auf die Atome bezogene chemische Reaktionsenergien die Grössenordnung von eV haben. So braucht es z.B. 13.6 eV, um einem Wasserstoffatom sein Elektron zu entreissen (Ionisierungsenergie). In eV ausgedrückt ist $h = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$, immer noch klein, aber schon wesentlich praktischer!

Beginnen wir mit den höchsten Radiofrequenzen, die heute im Satellitenfernsehen verwendet werden. Sie liegen um die 10 GHz (Gigahertz) oder 10^{10} Hz und die entsprechenden Photonenenergien sind etwa $4 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$. Der maximal erreichbare Effekt ist die Anregung von

Schwingungen in einem Atomgitter oder anders ausgedrückt, eine Erwärmung von Stoffen, die solche Wellen absorbieren. Ein gutes Beispiel dafür ist das Mikrowellengerät mit 2.5 GHz (Gassmann 2014a), das polare Moleküle wie Wassermoleküle in Rotation versetzen kann, was gleichbedeutend mit einer Erwärmung ist. Wärme ist ungeordnete kinetische Energie (Geschwindigkeit, Rotation, Vibration) von Atomen oder Molekülen. Ein Mikrowellengerät oder ein Radiosender werden aber keine chemischen Reaktionen erzeugen wie beispielsweise die Schwärzung einer Photoplatte. Um Radiowellen zu detektieren, braucht es deshalb ausgedehnte Antennen und nicht bloss einzelne Moleküle.

Um chemisch wirksam zu sein, braucht es Photonen mit Energien im Bereich von 0.1 bis 10 eV. Unsere Formel liefert dafür Wellenlängen von 10 bis 0.1 μm (Wellenlänge = Frequenz/Lichtgeschwindigkeit). Dieser Bereich umfasst alle sichtbaren Wellenlängen (0.75 μm Rot bis 0.40 μm Blau) sowie Infrarot (Wärmestrahlung, IR) und Ultraviolett (UV). Sichtbares Licht interagiert deutlich mit Atomen und Molekülen, deshalb können wir es sehen. UV-Photonen sind aber bereits so stark, dass sie Biomoleküle oder auch Plastikmaterialien schädigen.

Röntgenphotonen sind noch rund 1'000 mal energiereicher als UV-Photonen und die energiereichsten bis heute entdeckten Gamma-Photonen haben Energien über 10^{18} eV oder rund 0.1

Joule! Solche faszinierenden Photonen werden im Auger Observatorium in den argentinischen Pampas beobachtet. Sie sind Teil der kosmischen Strahlung und lösen beim Durchgang durch die Atmosphäre eine viele Quadratkilometer überdeckenden Schauer von Milliarden von Sekundärteilchen aus. Die Detektion dieser energiereichsten Photonen kann im Internet fast in Echtzeit verfolgt werden (Auger Observatorium).

Kann man ein einzelnes Photon detektieren?

Die Antwort ist für Photonen über 1 eV ein klares Ja, aber nicht mit unseren Augen! Ein gut dunkeladaptiertes Auge braucht 10 bis 100 sichtbare Photonen, um zu reagieren. Wir besitzen aber einen wunderbaren technischen Detektor, der ein einzelnes Photon in einen elektronisch weiterverarbeitbaren Stromimpuls umwandelt: der Photomultiplier oder Photovervielfacher. Ein einzelnes Photon schlägt ein Elektron aus einer speziellen

Metalloberfläche heraus (Photoeffekt). Dieses Elektron wird dann durch eine Spannung von rund 100 Volt beschleunigt, bekommt also 100 eV. Mit dieser Energie prallt es auf eine +100 V Anode und vermag mehrere Elektronen aus ihr herauszuschlagen. Diese werden über weitere 100 Volt gegen eine +200 V Anode beschleunigt, wo jedes Elektron wieder mehrere Elektronen heraus schlägt. In einem lawinenartigen Prozess gelangen auf die zehnte Anode um eine Million Elektronen, eine genügend grosse Ladung für eine weitere Verstärkung durch Transistoren (elektronische Verstärkerelemente, wie sie z.B. in TVs, Handys oder Computern verwendet werden), so dass Strompulse entstehen, die über einen Lautsprecher hörbar gemacht werden können.

Überlegen wir uns was geschieht, wenn eine Lampe immer schwächer wird. Zu Beginn sehen wir das emittierte Licht und können es mit Photodioden (z.B. Photozellen, die auf dem Hausdach Sonnenstrahlung in Strom umwandeln)

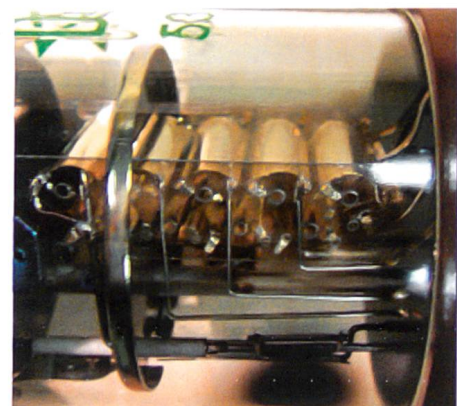
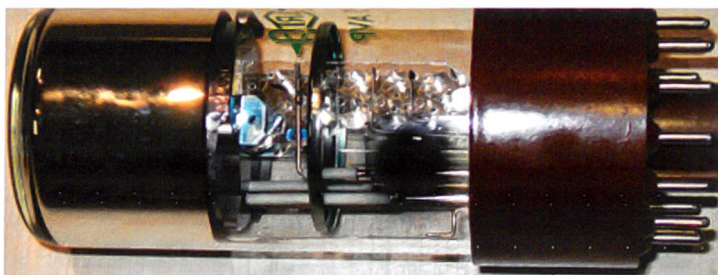
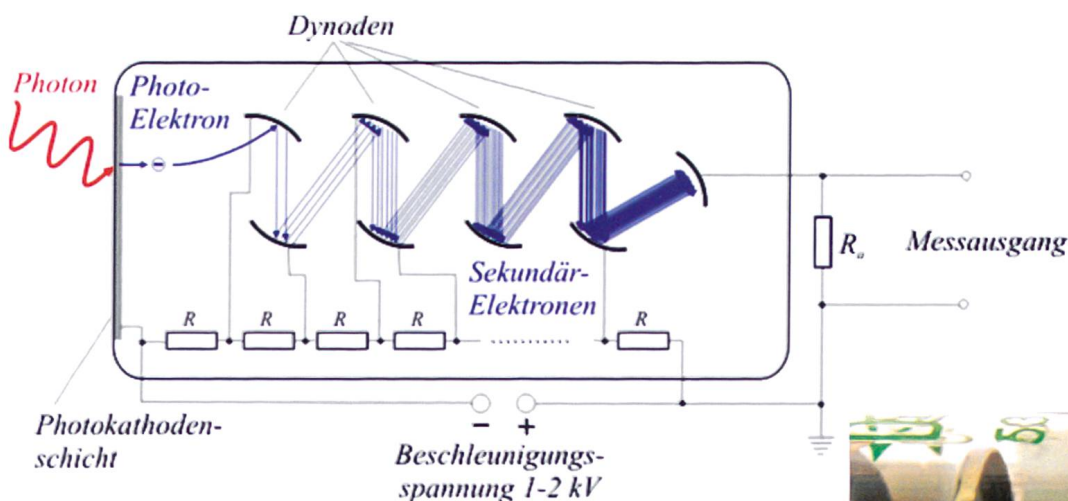


Abb. 9: Photomultiplier.

Oben: Schematische Darstellung der Funktionsweise (Bild de:Benutzer:Jkrieger, 2007)

Unten links: Ansicht eines typischen modernen Photomultipliers mit 10 Multiplikationsstufen oder Dynoden (Bild Poil22:18, 2005).

Unten rechts: Detailansicht desselben Photomultipliers mit 5 gut sichtbaren Dynoden (Bild Poil22:13, 2005).

detektieren; ein Photomultiplier wäre grenzenlos überlastet und würde sogar durch derart helles Licht zerstört. Die Photodiode gibt hingegen eine sehr konstante Gleichspannung ab, und nichts deutet auf eine körnige Struktur von Licht hin; starkes monochromatisches Licht verhält sich wie ein perfektes Kontinuum, darstellbar durch eine Welle mit genau bestimmter Wellenlänge. Am besten stimmt diese Vorstellung für Laserlicht (Gassmann 2015a), das eine gute Kohärenz über lange Strecken zeigt. Um einen Laserstrahl abzuschwächen, könnten zwei parallele Glasplatten verwendet werden. Der etwas schräg eingestrahlte Laserstrahl würde zwischen den beiden Platten einen Zickzackweg beschreiben, und bei jeder Reflexion würde der grösste Teil des Lichtes durch die Glasplatten hindurch verloren gehen: nur etwa 4 % des Lichtes (d.h. 4 % der Photonen) verbleiben bei jeder Reflexion. Ein schwacher roter 1 mW-Laser emittiert pro Sekunde rund $3 \cdot 10^{15}$ Photonen zu je 2 eV. Um nur noch 25 Photonen pro Sekunde zu erhalten, müsste der Strahl 10 mal reflektiert werden. Ein Photomultiplier würde dann über einen Verstärker und Lautsprecher ein Geräusch erzeugen, das sich etwa wie ein Gewitterregen auf ein Dachfenster anhören würde. Mehr noch: Würde man den Reststrahl nach 10 Reflexionen auf einem räumlich hoch auflösenden Pixel-Detektor anschauen (am Paul Scherrer Institut werden Halbleiter-Röntgendetektoren mit 17'700 Pixeln pro cm^2 hergestellt), würde man feststellen, dass jedes Photon nur genau ein Pixel aktiviert. Die Wechselwirkung von Photonen und Materie ist also räumlich eng begrenzt, vielleicht sogar punktförmig. Aber wie geht dies mit der Wellennatur des Lichtes zusammen?

Es kommt noch seltsamer

Trifft ein roter Laserstrahl auf zwei parallele, spaltförmige Öffnungen in einer Platte, deren Abstand wenige Wellenlängen beträgt (d.h. wenige μm), beobachtet man das bekannte Interferenzmuster mit abwechselnden Maxima und Minima der Lichtintensität. Es kann mit Hilfe der Vorstellung von sich überlagernden halbkreisförmigen Wellen hinter jedem Spalt einfach berechnet werden. Ein überzeugendes Argu-



Abb. 10: Quanten-Skifahrer (Zeichnung David Angel 2005).

ment, dass Licht aus Wellen besteht! Wir schwächen nun den Laserstrahl wie oben beschrieben ab und führen das Doppelspaltexperiment mit einem 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 Millionen von einzelnen Photonen, ergibt sich sogar eine Häufigkeitsverteilung von Photoneneinschlägen auf dem Pixeldetektor, die auch quantitativ exakt mit der Intensität des Interferenzmusters übereinstimmt! Es gibt nur eine Art diesen Sachverhalt zu beschreiben: Ob es uns gefällt oder nicht, 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

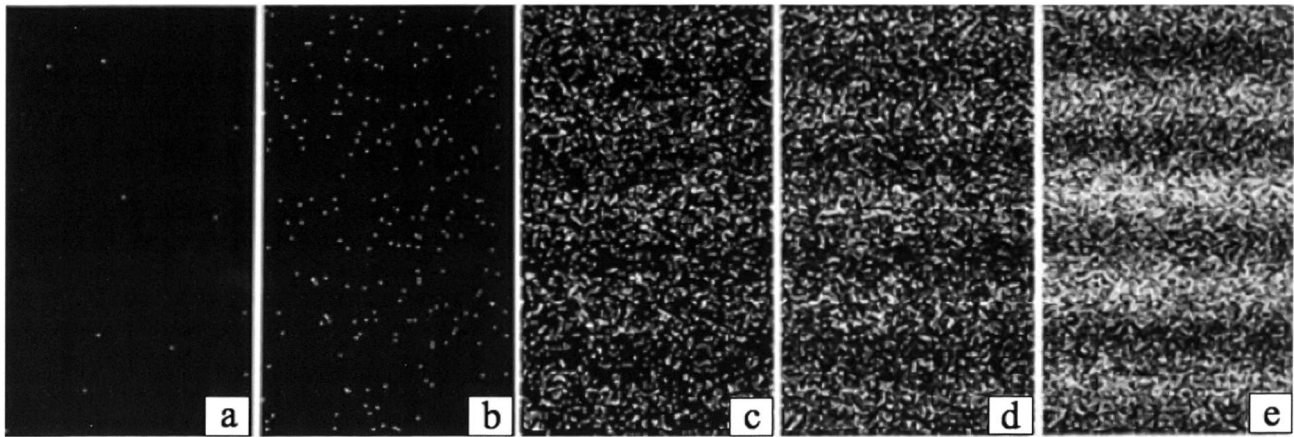


Abb. 11: Doppelspaltexperiment durchgeführt mit 11 (a), 200 (b), 6'000 (c), 40'000 (d) und 140'000 (e) Photonen (Bild zur Verfügung gestellt durch Tonomura, user:Belsazar, 2012).

Vorstellung zu widerlegen, es ist eine unumstößliche Tatsache.

Anstelle der sehr nahe beieinanderliegenden Wege durch die zwei Spalte kann man einem Photon auch Wege offerieren, die meterweit voneinander entfernt sind. Dies erreicht man mit semipermeablen Spiegeln (die Hälfte des Lichts geht durch, die andere Hälfte wird reflektiert), an denen sich das Photon eigentlich entscheiden müsste, ob es durchgehen oder reflektieren soll. Obwohl nie halbe Photonen festgestellt werden konnten, entscheidet sich das Photon nicht, sondern geht beide Wege und erzeugt beim Zusammentreffen der Wege Interferenzmuster. Blockiert man den einen Weg, indem man die Hand in den einen Strahlengang hält, verschwindet das Interferenzmuster. Versucht man, mit Detektoren zu bestimmen, welchen Weg ein Photon nimmt, verschwindet die Interferenz ebenfalls: Photonen lassen sich nicht austricksen! Die Theorie der Quantenelektrodynamik (QED) erhebt diesen «Irrsinn» zur Methode und baut auf der Vorstellung auf, dass Photonen grundsätzlich alle möglichen Wege gleichzeitig nehmen, um von einer Lichtquelle Q zu einem vorgegebenen Punkt P zu gelangen. Dies ist wörtlich zu nehmen: Ein Photon fliegt nicht nur geradeaus, sondern nimmt jeden noch so gewundenen Weg von Q nach P. Warum sind wir so überzeugt, dass Licht nur geradeaus fliegt? Wenn keine Hindernisse vorhanden sind, gibt es zu jedem gewundenen Weg einen um eine halbe Wellenlänge kürzeren Weg, und Interferenz löscht diese Wege aus; bis auf die direkte gerade und kürzeste Ver-

bindung QP, zu der es keine kürzere «Auslöschverbindung» gibt. Im Vakuum ist die kürzeste Verbindung auch die schnellste. Tatsächlich bleibt in der QED allgemein nicht die kürzeste, sondern die schnellste Verbindung übrig (z.B. beim Übergang in ein anderes Medium, wo normalerweise das Brechungsgesetz herangezogen wird). Man erkennt auch leicht den Zusammenhang zwischen der QED und dem Prinzip von Fermat, das besagt, dass das Licht immer den schnellsten Weg nimmt. Fermat konnte aber nicht verstehen, weshalb dies so ist. Zumindest gibt die QED darauf eine klare Antwort, und das Licht muss nicht mehr den schnellsten Weg suchen oder sich entscheiden, ob es reflektiert werden soll oder nicht. Höchst erstaunlich ist, dass die QED nicht nur alle Eigenschaften von Photonen korrekt wiedergibt, sondern auch diejenigen von Materieteilchen wie Elektronen oder Protonen und deren Wechselwirkungen. Kurz gesagt, die QED beschreibt im Prinzip alle Phänomene ausser der Gravitation und der Nuklearphysik, also die gesamte Chemie und Biologie. Das «im Prinzip» bedeutet, dass es ebenso unpraktisch wäre, die Brechung von Licht an einer Glasplatte mit der QED zu berechnen wie die Fallzeit mit Hilfe der Relativitätstheorie zu bestimmen, die ein Stein von der obersten Etage des Schiefen Turms von Pisa bis zum Boden braucht. Richard Feynman, der für seine Beiträge zur QED 1965 den Nobelpreis erhielt, hat kurz vor seinem Tod eine Vortragsreihe für Nichtphysiker gehalten. Seine brillante und kurzweilige Art, diese abstrakte Theorie

einem intelligenten und aufgeschlossenen Publikum zu «verkaufen», widerspiegelt sich auch in seinen entsprechenden, sehr lesenswerten Büchern (Feynman 1985).

Die QED hat noch seltsamere Überraschungen auf Lager

Die Physiker haben sich in den vergangenen 80 Jahren mit der «viele Wege gleichzeitig»-Theorie angefreundet. Kopfzerbrechen bereitet aber auch heute noch eine weitere Eigenschaft von Photonen: die Verschränktheit (engl. entanglement). Neben den Eigenschaften Energie E , Frequenz ν und Impuls p ($E = h \cdot \nu$, $p = E/c = h/\lambda$) hat ein Photon noch einen Spin. Dies ist eine Art Drall und bewirkt die Polarisierungseigenschaften von Licht. Das Photon kann sich wie eine Rechts- oder Linksschraube fortbewegen; sein Spin oder Drehimpuls kann die Stärke $+\hbar$ oder $-\hbar$ haben (schon wieder das Plancksche Wirkungsquantum!). Trifft ein Positron (Antimaterieteilchen zum Elektron mit positiver Ladung, aber gleicher Masse) auf ein Elektron, wird die Masse zerstrahlt (annihiliert) und nach $E = mc^2$ entstehen zwei Photonen (Gamma-Quanten) mit Energien $E/2$ von je 511 keV. Falls die beiden Masseteilchen sich vor dem Zusammentref-

fen nur langsam bewegten, ist der Gesamtimpuls und der Drehimpuls null. Nach dem Impulserhaltungsgesetz müssen Gesamtimpuls und Gesamtdrehimpuls auch nach dem Stoss null sein, was nur möglich ist, wenn die beiden Photonen in genau entgegengesetzte Richtungen fliegen und entgegengesetzten Spin haben. Welches Photon hat Spin $+\hbar$ und welches $-\hbar$? Die QED sagt, dass beide Photonen in einem Überlagerungszustand sind, sich also nicht entscheiden, sondern mit 50 % Wahrscheinlichkeit Spin $+\hbar$ und gleichzeitig mit 50 % Wahrscheinlichkeit Spin $-\hbar$ haben. Erst bei der Messung des Spins eines der Photonen z.B. als $+\hbar$ steht INSTANTAN fest, dass eine Messung des Spins des anderen Photons $-\hbar$ ergeben MUSS, da der Quantenzustand der beiden Teilchen korreliert (verschränkt) ist. Diese «spooky interaction at a distance» war für Einstein jedoch absolut inakzeptabel und er verfasste mit zwei Koautoren einen Artikel, der als EPR (Einstein et al. 1935) heute noch diskutiert wird. Einstein vertrat darin die Ansicht, dass die Quantentheorie unvollständig sein müsse, da die instantane Wirkung der Relativitätstheorie widerspreche, weil sie sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Unterdessen konnte man experimentell mit Hilfe der Bell-

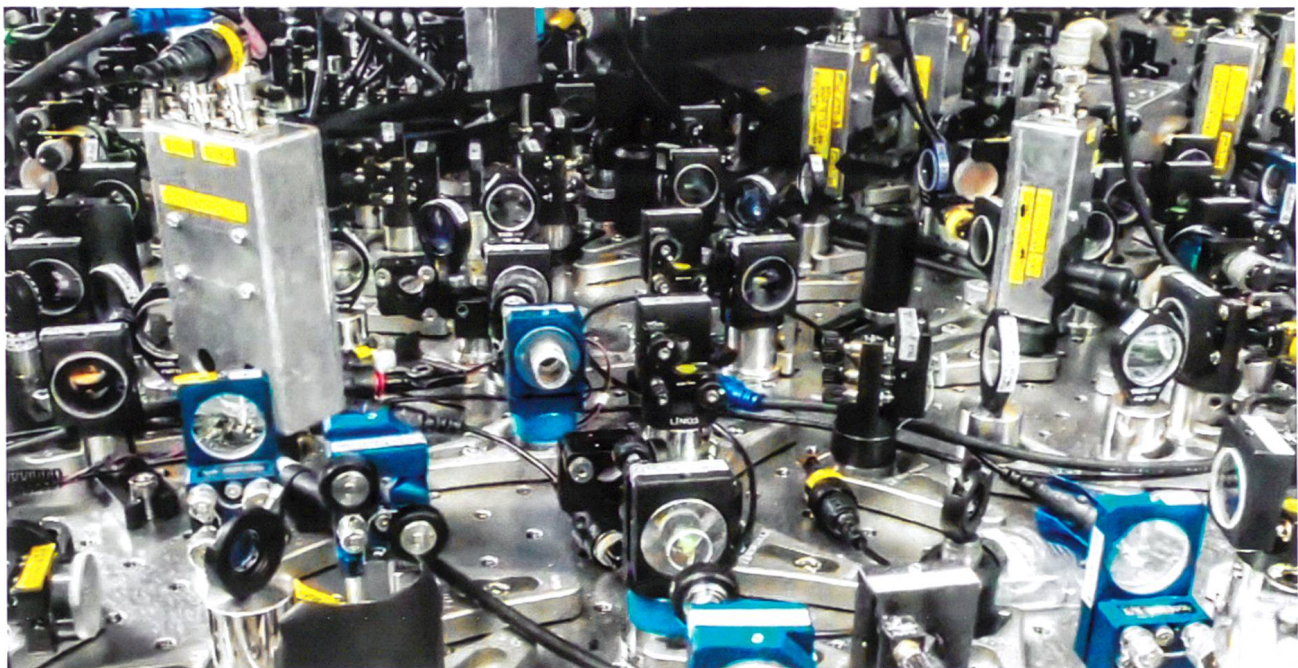


Abb. 12: Quanten Teleportation. Bild aus dem Kurzfilm der Univ. Tokyo mit Titel «A world first! Success at complete quantum teleportation». www.diginfo.tv, Beitrag vom 11. Sept. 2013.

schen Ungleichung den statistischen Beweis erbringen, dass sich die Photonen tatsächlich wie von der QED gefordert verhalten (Bell 1964). Mehr noch, es wurde bereits ein Quanten-Verschlüsselungsverfahren getestet, das auf der Verschränkung basiert und theoretisch absolut sicher ist (zumindest, wenn die beteiligten Apparate keine störenden Fehler aufweisen). Falls zukünftige Quantencomputer die heutige RSA-Verschlüsselung wirkung knacken sollten, wäre mit der Quantenverschlüsselung definitiv für Abhilfe gesorgt, wenn sie denn wirklich einwandfrei funktionieren sollte!

Epilog

Im heutigen Physikunterricht in Kantonsschulen und Gymnasien werden die in diesem Artikel berührten Themen nicht oder höchstens in freiwilligen Ergänzungs- oder Vertiefungskursen behandelt. Für die aktuelle Technik und für die Technik der Zukunft der Jugendlichen sind sie jedoch von grundlegender Bedeutung. Vielleicht könnte der Physikunterricht an Bedeutung und Beliebtheit gewinnen, wenn die Errungenschaften des 20. Jahrhunderts thematisiert würden (Gassmann 2014c und 2015b)?

Literatur

- Auger Observatorium: www.auger.org
- Bell, J. S. (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics* 1: 195–200.
- de Broglie, L. (1923): Ondes et quanta. *Compt. Rend.* 177: 507–510.
- Einstein, A. (1905a): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Ann. d. Phys.* 17: 132–148.
- Einstein, A. (1905b): Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Ann. d. Phys.* 17: 549–560.
- Einstein, A. (1905c): Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Ann. d. Phys.* 17: 891–921.
- Einstein, A. (1905d): Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Ann. d. Phys.* 17: 639–641.
- Einstein, A., B. Podolsky & N. Rosen (1935): Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* 47: 777–780.
- 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.
- Gassmann, F. (2014a): Mikrowelle – gut oder schlecht? *Naturforsch. Ges. in Zürich, Vierteljahrsschrift* 1: 14–15.
- Gassmann, F. (2014b): LED – Die magische Lichtquelle. *Naturforsch. Ges. in Zürich, Vierteljahrsschrift* 2: 14–15.
- Gassmann, F. (2014c): Was läuft schief in der Schule mit dem Naturwissenschafts-Unterricht? *Aargauische Naturforsch. Ges., Fokus* 2: 96–107.
- Gassmann, F. (2015a): Vom Maser zum Laser – Licht als Werkzeug. *Naturforsch. Ges. in Zürich, Vierteljahrsschrift* 2: 12–13.
- Gassmann, F. (2015b): Theorie der Atome für Primar- bis Kantonsschule – Moderne Physik ist verständlich. *Aargauische Naturforsch. Ges., Fokus* 1: 22–32.
- Maxwell, J. C. (1865): A dynamical theory of the electromagnetic field. *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London* 155: 459–512.
- Michelson, A. A. & E. W. Morley (1887): On the relative motion of the earth and the luminiferous ether. *Am. J. of Science* 34: 333–345.
- Planck, M. (1901): Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. *Ann. d. Phys.* 4: 553–563.
- Schrödinger, E. (1926): Quantisierung als Eigenwertproblem. *Ann. d. Physik* 79: 361–376.

Dr. Fritz Gassmann
Limmatstrasse 6
5412 Vogelsang/AG
gassmann@bluewin.ch