



Das Atom im Spiegel –

Forscher auf der Jagd nach einzelnen Photonen

Warum können wir diesen Text lesen? Weil das vom Blatt reflektierte Licht die Schriftinformation in unsere Augen transportiert. Dort wandeln Sehzellen sie in Nervensignale um. Diese „Wechselwirkung“ zwischen Licht und Materie, wie die Physik solche Vorgänge nennt, geschieht permanent in unserer Welt. Pflanzen gewinnen damit Energie aus Sonnenlicht, setzen Sauerstoff frei und wachsen. Dank der Licht-Materie-Wechselwirkung können wir also sehen, atmen und essen. Aber was geschieht da ganz genau, wenn Licht auf Materie trifft? Oder wenn umgekehrt Materie Licht ausstrahlt?

Solche Fragen haben vor über hundert Jahren zur Geburt der Quantenphysik geführt. Im späten 19. Jahrhundert kam es zum Streit, ob Licht von Gaslampen oder von elektrischen Glühlampen „besser“ sei. Doch wie sollte man so unterschiedlich erzeugtes Licht vergleichen? Dazu brauchte man eine ideale Lichtquelle als Maßstab. Die Lösung kam aus der Physik in Form des Hohlraumstrahlers. Diese seltsame Lichtquelle besteht aus einem hohlen Raum, dessen Wände zum Glühen gebracht werden. Dadurch füllt sich der Hohlraum mit Licht, also einem elektromagnetischen Feld. Durch ein kleines Loch kann es den Strahler verlassen. Aber was macht dieses Licht ideal? Die Antwort lautet: Seine Eigenschaften hängen allein von der Temperatur der Hohlraumwände ab. Ihr Material spielt keine Rolle, anders als zum Beispiel beim Licht einer Gasflamme.

Die Hohlraumstrahlung stellte damals jedoch ein Rätsel auf, über das sich zahlreiche Physiker den Kopf zerbrachen – und scheiterten. Tatsächlich wollte keinem eine Formel gelingen, die das gemessene Spektrum der Hohlraumstrahlung korrekt beschreibt. Erst Max Planck, fand sie im Jahr 1900 mit Hilfe eines Tricks: Er baute in seine Strahlungsformel ein „Wirkungsquantum“ h ein (**Abb. A**) – und begründete damit ungewollt die **Quantenphysik**. Die enormen Konsequenzen konnte damals niemand erahnen, denn die Planck'sche Konstante ist „megawinzig“: $h \approx 6,6 \times 10^{-34}$ Joulesekunde. Das ist eine Zahl mit 33 Nullen nach dem Komma! Quantensprünge sind eben die kleinstmöglichen Sprünge in der Natur.

1905 zündete Albert Einstein die zweite Stufe der Quantenrevolution. Erneut ging es um die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Er fand die Lösung für ein weiteres Rätsel der Physik, den **Fotoeffekt**. Im 19. Jahrhundert hatte man entdeckt, dass Licht mit seiner Energie Elektronen aus Metallen oder Halbleitern heraus schlagen kann. Dabei zeigte sich, dass die Energie der freigesetzten Elektronen allein von der Frequenz des Lichts abhängt. Wie intensiv die Lichtquelle strahlt, spielt keine Rolle. Einstein erkannte, dass dies mit Quantensprüngen zu tun hat. Er entdeckte ein grundlegendes Gesetz der Quantenphysik. Die Energie E des Lichts, die ein Elektron aufnehmen kann, entspricht der Lichtfrequenz f multipliziert mit dem Planck'schen

Abb. A Eine clevere Idee



© Grafik: Roland Wengenmayr

Max Planck findet 1900 die richtige Formel für das Spektrum eines Hohlraumstrahlers. Als Trick führt er ein Wirkungsquantum h ein. Damit revolutioniert er ungewollt die Physik.

Wirkungsquantum: $E = h \times f$. Damit war die Idee vom **Lichtquant** oder **Photon** geboren. Nach diesem Bild überträgt ein solches Photon seine frequenzabhängige Energie portionsweise auf Materie. Das war damals revolutionär. Rund hundert Jahre zuvor hatte schließlich der Brite Thomas Young mit seinem berühmten Doppelspaltexperiment bewiesen, dass Licht sich wie eine Welle verhält. Einstein bekam für seine Entdeckung 1921 den Nobelpreis für Physik. 1923 erhielt ihn der Amerikaner Robert Millikan unter anderem für Experimente, mit denen er Einsteins Beschreibung des Fotoeffekts bestätigte.

WAS IST LICHT? WELLE ODER TEILCHEN?

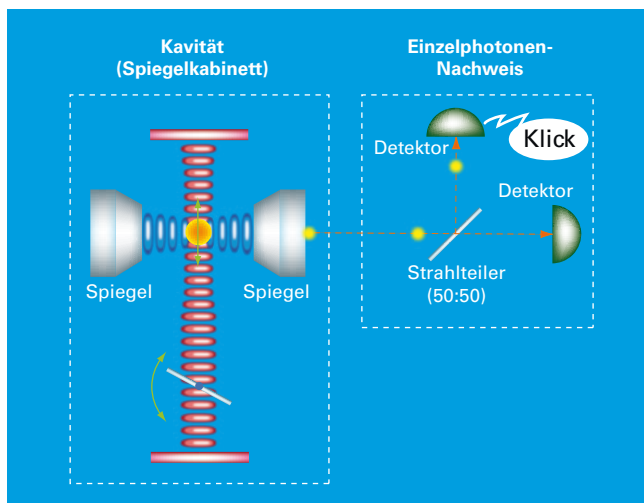
Heute wissen wir, dass Licht sich wie eine Welle und wie ein Teilchen verhalten kann. Diesen „**Welle-Teilchen-Dualismus**“ zeigen alle Quantenteilchen. Die Quantenmechanik beschreibt ihn präzise, sie entstand ab Mitte der 1920er-Jahre. Besonders wichtige Ideen steuerten der Deutsche Werner Heisenberg und der Österreicher Erwin Schrödinger bei. Schrödinger fand eine Gleichung, die die Welleneigenschaften von Quantenteilchen

exakt erfasst. Damit wurde die Quantenmechanik ein perfekter Werkzeugkasten zur Beschreibung der Mikrowelt der Quantenteilchen. Einige ihrer Vorhersagen widersprechen allerdings unserem Verständnis, das an den großen Dingen des Alltags geschult ist. Gerade diese seltsamen **Quanteneffekte** können jedoch zukünftig zu ganz neuen technische Anwendungen führen. Dazu zählen extrem leistungsfähige Quantencomputer oder die garantiert abhörsichere Kommunikation über Quantenteilchen, Quantenkryptographie genannt. Deshalb ist die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie nach wie vor ein wichtiges Forschungsgebiet der Physik.

Auf ihm arbeiten auch zwei Max-Planck-Teams. Das erste Team leitet Gerhard Rempe, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München. Bei ihm lernen wir: Wer die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ganz genau untersuchen will, muss die Materie extrem zerkleinern. „Das machen wir, bis das kleinstmögliche Stück Materie übrig bleibt“, erklärt der Physikprofessor: „Ein Atom.“ Atome bestimmen als kleinste Bausteine die Eigenschaften von Materie. Aber wie geht das mit einem Objekt, das nur wenige Zehntel Nanometer (ein Nanometer ist der Milliardste Teil eines Meters) winzig ist?

Zunächst müssen die Physiker ein Atom einfangen und „festhalten“. Das erfordert extremes Abkühlen. Denn warme freie Atome flitzen mit der Geschwindigkeit eines Kampffjets durch die Gegend. Die Garchinger stellen daher in einer Vakuumkammer eine ultrakalte Wolke aus beispielsweise Rubidium-Atomen her und bremsen diese zum Kühlen mit Laserlicht ab. Dabei erreichen die Atome fast den absoluten Temperaturnullpunkt bei minus $273,15^{\circ}\text{C}$. Nun kicken die Max-Planck-Forscher eines der langsamen Atome mit Laserlicht in eine Art Spiegelkabinett hinein (**Abb. B links**). In dessen Zentrum fängt eine „Laserpinzette“ das Atom ein. Zwischen den Spiegeln herrscht ein Hochvakuum, damit das Atom ungestört bleibt. Die beiden Spiegel haben einen Abstand von ungefähr einem Zehntel Millimeter – ein Menschenhaar würde gerade noch dazwischen passen. Könnte man seinen Kopf dazwischen stecken, dann würde man sich hunderttausend Mal selbst als Spiegelbild im Spiegelbild sehen.

Abb. B Gefangen im Spiegelkabinett



Links: Die blauen und roten „Ovale“ symbolisieren stehende Wellen aus Laserlicht, die das Atom (orange) festhalten. Mit der drehbaren Glasscheibe links unten lässt sich das Atom zum Beispiel über die rote stehende Welle senkrecht zur Spiegelachse verschieben (grüner Doppelpfeil). Wenn das Atom ein Photon (gelb) aussendet, dann fliegt dieses wie ein Pingpongball bis zu hunderttausend Mal zwischen den Spiegeln hin und her. Der rechte Spiegel ist ein kleines bisschen durchlässig, sodass das Photon irgendwann nach rechts entkommen kann.

Rechts: Hier trifft es auf einen Strahlteiler, der es mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 50 Prozent zu dem einem oder dem anderen der beiden Detektoren schickt, was dort ein Klick-Signal auslöst.

© Grafik: Roland Wengenmayr

Dieser Aufwand ist nötig, weil ein Atom eine extrem schwache Lichtquelle ist. Um sie aufzuspüren, helfen die Superspiegel. Sobald das Atom aufleuchtet, wird es mit seinen Spiegelbildern konfrontiert. „Für das Atom sieht es so aus, als wären hunderttausend andere leuchtende Atome da, die alle genau im selben Takt Lichtwellen abstrahlen“, erklärt Rempe. Diese Kette aus virtuellen „Atomblinker“ animiert das Atom dazu, sein Licht präzise entlang dieser Reihe auszusenden. So können die Garchingler das Licht gezielt mit einem Detektor einfangen und vermessen.

Doch was genau passiert nun, wenn ein Atom leuchtet oder umgekehrt Licht „absorbiert“? Seit Einsteins Erklärung des Fotoeffekts hat die Quantenphysik folgendes Bild geschaffen: Atome nehmen Licht portionsweise in Quantensprüngen auf oder senden es aus. Diese Lichtquanten heißen Photonen. Die Mitspieler in den Atomen sind die Elektronen. Sie können zwischen Quantenzuständen niederer und höherer Energie hinauf- oder herabspringen, wie auf den Sprossen einer Leiter. Beim Raufhüpfen nimmt ein Elektron Lichtenergie in Form eines Photons auf, beim Runterhüpfen sendet es wieder ein Photon aus. Beim sichtbaren Licht entsprechen die Leitersprossen den beiden untersten Energiezuständen eines Atoms. Deshalb heißen sie in Rempes Forschungsgebiet, der Quantenoptik, auch einfach Grundzustand und angeregter Zustand. Grundsätzlich ist dieses Bild korrekt. Doch es beschreibt nur den Zustand vor und nach der Wechselwirkung mit dem Licht – was genau dazwischen passiert, das müssen die Forscher erst noch herausfinden.

WIE MAN EIN PHOTON ZWEIFELSFREI NACHWEIST

Das Gespräch mit Rempe zeigt vor allem, wie schwierig es ist, echte einzelne Photonen zu produzieren und nachzuweisen. Mit Laserlicht ist das, praktisch gesehen, schier unmöglich. In herkömmlichen Lichtquellen, seien es die Sonne oder eine Glühbirne, senden Atome zufällig Photonen aus. In der Physik heißt das **spontane Emission**. Wann ein Atom spontan kurz aufleuchtet, lässt sich nicht vorhersagen. In einem Laser dagegen werden Atome dazu angeregt, im Gleichtakt mit vorbeifliegenden Photonen weitere Photonen gleicher Energie auszusenden (siehe auch **TECHMAX 6**). Diese **induzierte** oder **stimulierte Emission** hat Einstein 1917 theoretisch vorhergesagt. Das Resultat ist beim Laser eine lange, nahezu perfekte Lichtwelle. Einzelne Photonen gehen in ihr auf wie Wassertropfen in einer Meerewelle. Sie sind kaum nachweisbar, selbst wenn man das Laserlicht ganz schwach macht, lernt man bei Rempe. Gibt es überhaupt einzelne Photonen? Es gibt sie! Und um sie dingfest zu machen, schickt man den zu untersuchenden Lichtstrahl auf einen halbdurchlässigen, um 45 Grad zum Strahl gedrehten Spiegel (**Abb. B rechts**). Dieser teilt das Licht in zwei gleich intensive Teilstrahlen auf – ein Strahl durchdringt den Spiegel, der andere wird senkrecht dazu abgelenkt. Beide Teilstrahlen kann man nun auf empfindliche Lichtempfänger schicken.

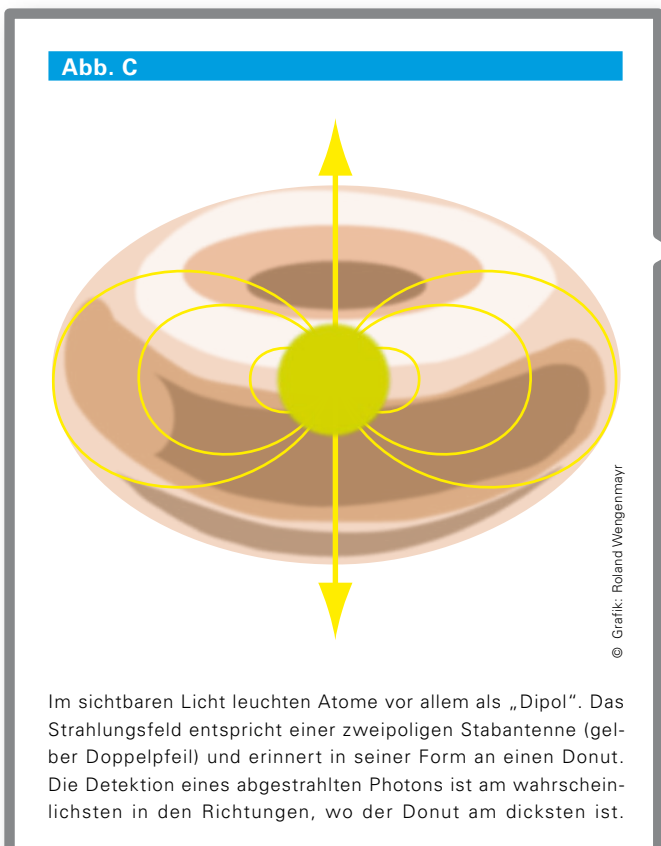
In unserem Beispiel sollen sie den Empfang von Licht mit einem „Klick“ quittieren. Bei normal intensivem Laserlicht würden beide Empfänger ein Dauersignal liefern, aus dem man keine Klicks heraushören kann. Bei extrem schwachem Licht zerfällt dieses Dauersignal tatsächlich in hörbare Klicks. Bei ultraschwachem Laserlicht klicken beide Empfänger zwar selten, aber trotzdem hin und wieder auch gleichzeitig. Das darf bei einzelnen Photonen

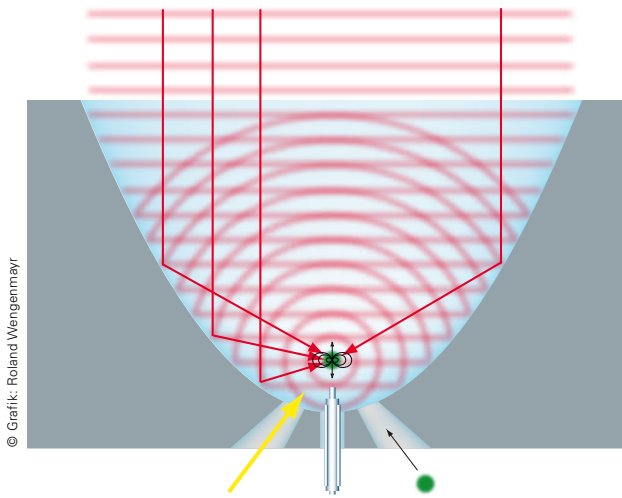
nicht geschehen. Denn: „Photonen sind unteilbar“, erklärt Rempe die entscheidende Quanteneigenschaft. Also kann ein Photon mit jeweils 50 Prozent Wahrscheinlichkeit entweder den Spiegel geradlinig durchfliegen oder abgelenkt werden. Auf jeden Fall wird es nur einen der beiden Empfänger klicken lassen. Dieser Einzelklick ist der sichere Nachweis eines Photons. Die ultimative Lichtquelle für einzelne Photonen ist das Atom – zum Beispiel im Garchingler Spiegelkabinett. Und die Garchingler zwingen es mit ihren Spiegeln, aktiv Photonen in eine Richtung abzustrahlen, womit sie die spontane Emission kontrollieren.

ATOME LEUCHTEN ALS DIPOL

Und wie leuchtet ein freies, unbeeinflusstes Atom? Treffen die Vorhersagen der Physik zu? Das will das zweite Max-Planck-Team um Gerd Leuchs ganz direkt beobachten. Leuchs ist Direktor am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen und Physikprofessor an der Universität Erlangen. Dort an der Uni feilt das von Markus Sondermann geleitete Team an einem Experiment mit dem Namen 4piPAC. Es soll einerseits den gesamten Raum rund um ein Atom herum erfassen – daher der Namensteil „4pi“. Denn die Zahl 4π entspricht dem vollen dreidimensionalen Raumwinkel, der das Atom wie eine Kugel umschließt. Andererseits soll die „Kopplung“ eines Photons an ein Atom untersucht werden. Genau das passiert, wenn ein Atom ein Photon aussendet oder aufnimmt. „PAC“ steht daher für das englische *Photon Atom Coupling*.

4piPAC soll das Verhalten eines Atoms als „Lichtantenne“ genau vermessen. Im Normalfall sollte es sich nach der Physik fast wie eine stabförmige Antenne verhalten. In einer solchen Antenne schwingen die Elektronen von einem Ende zum anderen, wenn sie eine elektromagnetische Welle empfangen oder aussenden –





© Grafik: Roland Wengenmayr

Querschnitt durch das 4piPAC-Experiment: Der Parabolspiegel ist präzise aus Aluminium gefräst. Seine Öffnung hat zwei Zentimeter Durchmesser. Der Brennpunkt, in dem das Atom gefangen ist, befindet sich zwei Millimeter über dem tiefsten Punkt. Von oben trifft das Laserlicht (rot) in den Parabolspiegel. Der Spiegel reflektiert die ebenen Wellen so, dass sie als Kugelwellen im Brennpunkt zusammenlaufen (rote Pfeile). Dort ist das Atom (grün, Dipolfeld schwarz) gefangen, das ein Photon aufnehmen soll. Die Geometrie ist mit einer Lampe in einem Autoscheinwerfer vergleichbar. Der Spiegel hat unten drei Öffnungen: Durch die rechte Öffnung wird das anfangs elektrisch neutrale Atom in die Falle geladen; durch die linke strahlen Laser (gelb), die dem Atom ein Elektron wegschlagen und das so entstandene Ion kühlen. Anders als die Garchingler setzen die Erlanger auf elektrisch geladene Atome. Zum Beispiel ein Ytterbium-Atom, dem sie ein bis zwei Elektronen wegschießen. Diese „Ionen“ lassen sich nämlich mit elektrischen Kräften gefangen halten. Dafür sorgt eine sogenannte Paul-Falle, deren Elektroden in der mittleren Öffnung stecken.

so wie eine Boje auf einer Wasserwelle auf und ab tanzt. Wegen der zwei Enden (Pole) heißt eine solche Antenne Dipol. „Im Atom sind Dipol-Übergänge am strahlungsstärksten“, erklärt Sondermann. Das Wort „Übergang“ beschreibt, dass das Elektron dabei zwischen zwei Quantenzuständen wechselt. Das unterscheidet Atome von großen Antennen.

PHOTONAUFNAHME UNTER KONTROLLE GEBRACHT

Das Experiment ist noch im Aufbau. Technisch ist es eine gewaltige Herausforderung. Die Form des **atomaren Dipol-Strahlungsfelds** erinnert an einen Donut (Abb. C). Die Wahrscheinlichkeit, dass das Atom ein Photon entlang seiner Dipolachse aussendet, also dort wo der Donut ein Loch hat, ist nahezu Null. Senkrecht dazu ist sie aber am größten. In dieser Hinsicht verhält sich das Atom wie eine stabförmige Radioantenne. Die Herausforderung: Wie kann man sein Abstrahlverhalten möglichst lückenlos erfassen? Die Erlanger haben sich entschlossen, den Film sozusagen rückwärts laufen zu lassen: Das Atom soll gut kontrolliert ein Photon aufnehmen, anstatt es abstrahlen. Nach der Quantenmechanik ist dieser zeitumgekehrte Vorgang gleichwertig, bietet aber technische Vorteile.

4piPAC soll daher eine kugelförmige Lichtwelle in dem Punkt zusammenlaufen lassen, in dem das Atom gefangen ist. Wichtig ist dabei, dass die Lichtwelle so gut wie möglich dem „Dipol-Donut“ ähnelt, mit dem das Atom ein Photon abstrahlt. Dabei wollen die Physiker beobachten, wie das Atom das Photon empfängt. Allerdings müssen sie dazu erst einmal eine kugelförmige Welle herstellen, die „falsch herum“ in ihren Ursprung zusammenläuft. „Dazu setzen wir das Atom in einen parabolförmigen

Spiegel“, erklärt Leuchs. Die Parabelform ist der Trick. In diesen „Trichter“ schicken die Erlanger einen Laserstrahl mit ebenen Wellenfronten hinein. Nach der Reflexion an den Parabelwänden formen diese eine Kugelwelle, die im Brennpunkt des Spiegels zusammenläuft (Abb. D). Dort muss das Atom sitzen. Bis das anspruchsvolle Experiment der Erlanger wunschgemäß läuft, wird es noch dauern – Grundlagenforschung ist oft ein Marathonlauf. Aber die Geschichte zeigt: Die Wechselwirkung von Licht und Materie hat die Physik immer wieder revolutioniert. Das erwarten die Forscher auch für die Zukunft.

Schlagwörter

Quantenphysik, Plancksches Wirkungsquantum, Fotoeffekt, Photon, Welle-Teilchen-Dualismus, Quanteneffekt, spontane/induzierte Emission, atomares Dipol-Strahlungsfeld

Lese-Tipps

- „Das dressierte Atom“, MaxPlanckForschung 1/2012, www.mpg.de/5764573/;
- „Mehr Licht ins Licht“, MaxPlanckForschung 1/2009, www.mpg.de/792557/;
- „Geheimcode im Laserblitz“, MaxPlanckForschung 1/2015, www.mpg.de/9221316/.

Video-Tipps

Harald Lesch: „Was ist Licht?“, www.youtube.com/watch?v=9yav89i5d8o