



c't 10/2021 S. 132

Wissen

Quanteneffekte

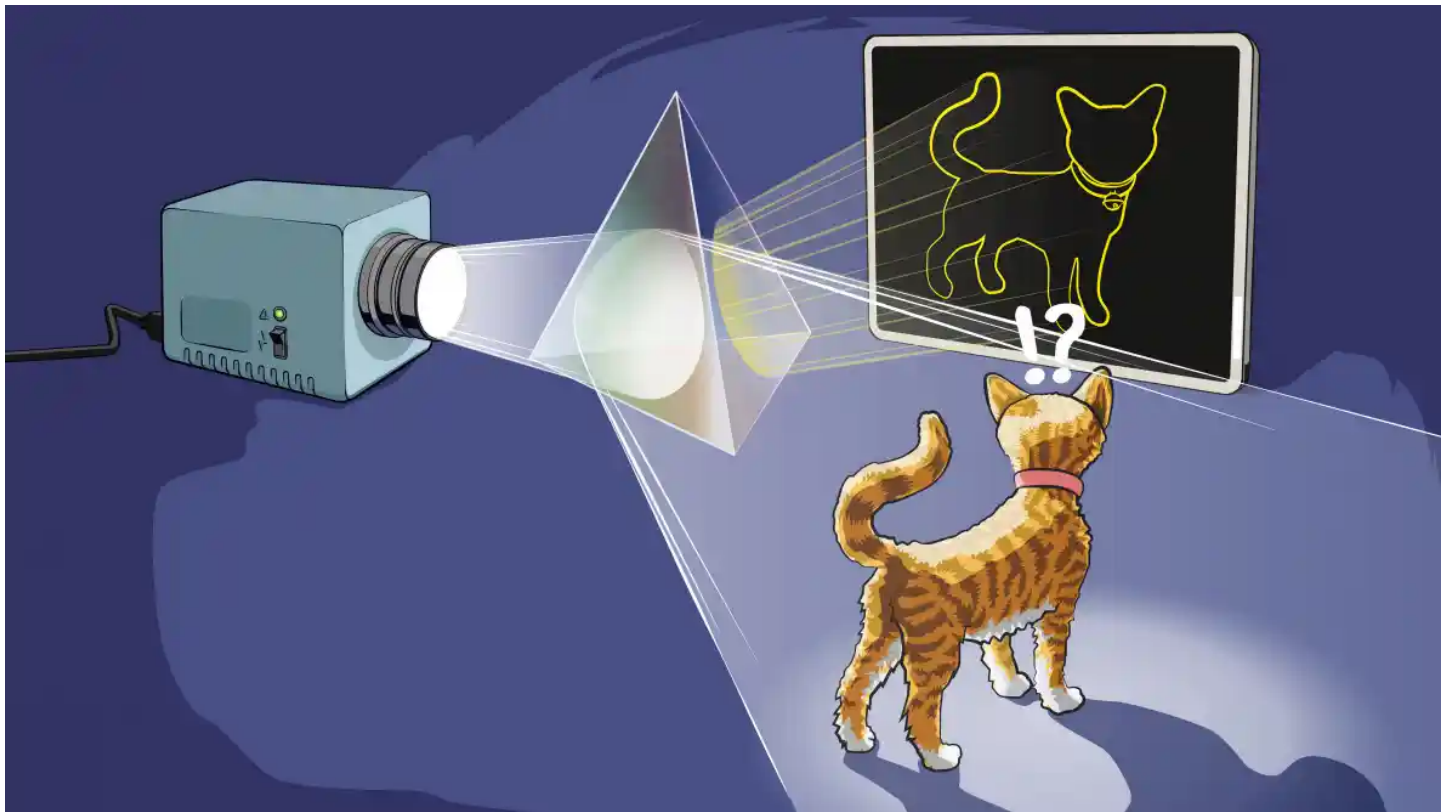


Bild: Rudolf A. Blaha

Spukhafte Aufnahmen

Gesünder Röntgen mit verschränkten Photonenpaaren

Quantenbildgebung mit Photonenpaaren in der Biomedizin: Während Photonen mit geringer Energie ein Objekt schonend durchleuchten, zeichnen deren energiereiche Partner die Konturen in den Detektor. Auch den Automobilbau kann diese - Quantentechnik verbessern.

Von Arne Grävemeyer

Optische Untersuchungen in der Biomedizin werfen Probleme auf: Einige energiereiche Strahlungsarten schädigen beispielsweise Körperzellen, Biomoleküle oder die DNA. Strahlung mit einer schonenderen Wellenlänge hingegen lässt sich nicht gut detektieren. Die Quantenbildgebung kann diesen Widerspruch auflösen, denn durch quan-





Bei der Quantenbildgebung mit nicht-detektiertem Licht kommen verschränkte Photonenpaare mit zwei unterschiedlichen Wellenlängen zum Einsatz. Während die Wellenlänge der einen Photonen auf die Durchleuchtung der eingespannten Probe abgestimmt ist, bewegt sich die Wellenlänge der anderen möglichst im sichtbaren Spektralbereich und lässt sich somit schon durch einfache CMOS-Sensoren erfassen. Das bedeutet tatsächlich, dass Photonen den Sensor mit Bilddaten von einem Objekt füttern, das sie selbst gar nicht durchleuchtet haben. Entscheidend dafür ist die Beziehung zwischen den beiden ungleichen Photonen eines Paares.

Für diese Quantenbildgebung kann es zahlreiche Anwendungen in der Medizin geben, in der Mikroskopie, aber auch in der Industrie. In Zukunft könnten derartige optische Verfahren ermöglichen, etwa Krebszellen schneller zu erkennen. Viren ließen sich optisch rascher analysieren als mit einem chemischen Schnelltest. Bereits heute gibt es erste Versuche für den Einsatz im Automobilbau, mit extrem langwelliger Strahlung die Dicke von Lackschichten zu messen und die Ergebnisse anhand der Partnerphotonen mit CMOS-Sensoren aufzuzeichnen.

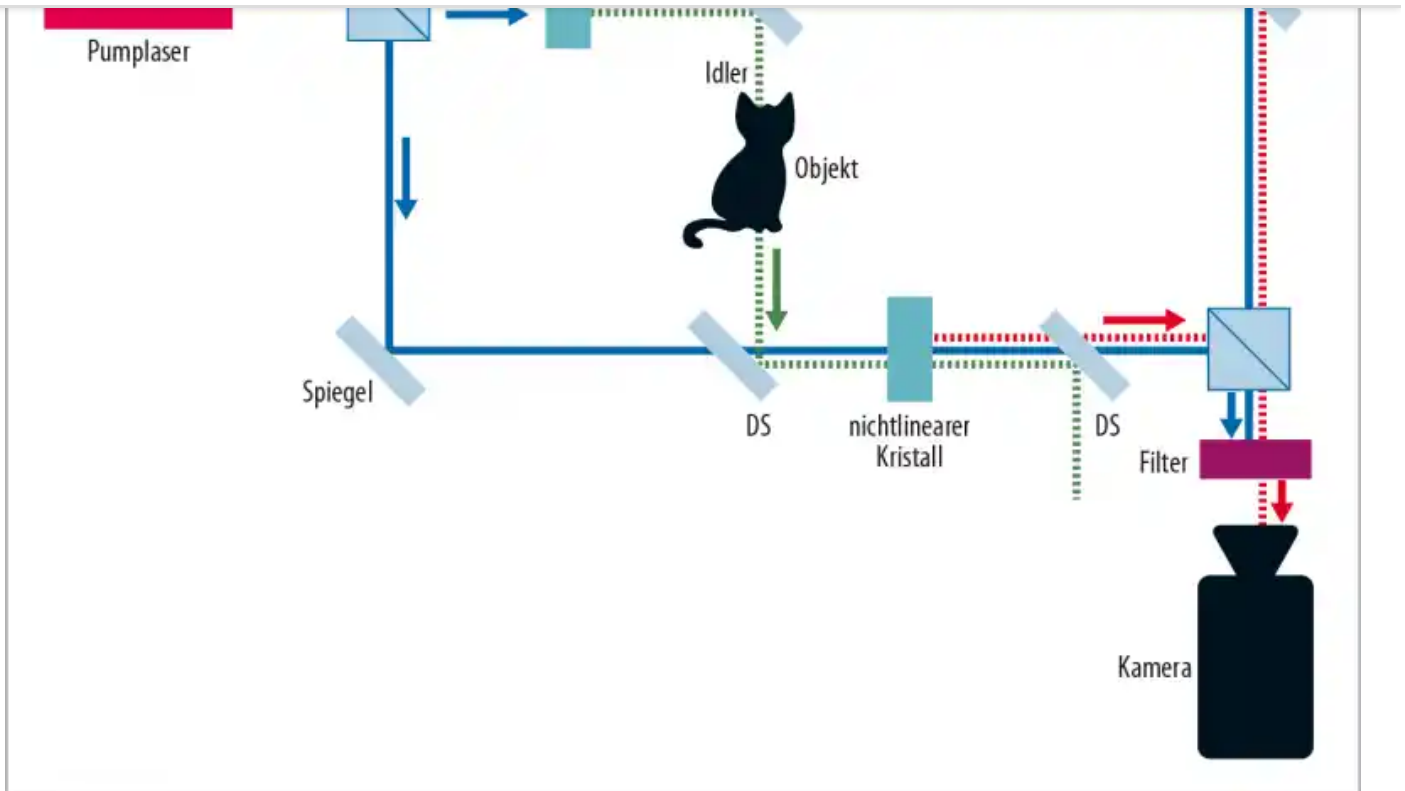
Photonenpaare aus dem Kristall

Photonenpaare ungleicher Wellenlängen entstehen in einem stochastischen Prozess, wenn ein Laser einen nichtlinearen Kristall durchstrahlt. Diese Wechselwirkung ist nicht mit einfacher Lichtbrechung zu verwechseln und nur in wenigen Materialien zu beobachten. Zum Einsatz kommen zum Beispiel Plättchen aus Bariumborat, Kaliumtitanylphosphat oder Bismutborat. Stochastisch ist der Vorgang, weil von einer Million passierenden Photonen vielleicht eines spontan mit dem Kristall wechselwirkt und tatsächlich in zwei Photonen zerfällt. Aber schon daraus entstehen zwei stetige, wenn auch schwächere, neue Lichtstrahlen.

Quantenbildgebung in Wien 2014

Die Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen, wie sie ein Team um Professor Anton Zeilinger an der Universität Wien 2014 verwirklichte: Ein Pumplaser (links oben) schickt Photonen durch einen Strahlteiler. Ein Strahlungsarm (oben) trifft auf einen nichtlinearen Kristall, in dem stochastisch Photonenpaare unterschiedlicher Wellenlängen (Idler und Signal) entstehen. Nur der Idler-Strahl wird abgelenkt und durchleuchtet ein Objekt. Danach trifft er auf den zweiten Strahlungsarm des Pumplasers (unten) und durchläuft mit ihm einen weiteren nichtlinearen Kristall, in dem erneut Idler- und Signal-Photonen entstehen können. Für jedes Idler-Photon hinter dem Kristall gibt es also zwei Pfadmöglichkeiten. Damit entsteht wie beim bekannten Doppelspaltexperiment eine Interferenz, was aber kein Sensor detektiert. Dieselbe Interferenz zeigen auch die Signal-Photonen, die auf zweierlei Wegen zur





Dieser Vorgang der spontanen parametrischen Fluoreszenz (Spontaneous Parametric Down-Conversion, SPDC) folgt den Gesetzen zur Energie- und Impulserhaltung. Demnach summiert sich die Energie der beiden Tochterphotonen zur Energie des Ursprungsphotons und ihre Richtungsvektoren stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Aus der Energie und Richtung des einen Photons lässt sich die Energie und Richtung des anderen herleiten.

Darüber hinaus sind sie miteinander verschränkt. Bei diesem Phänomen der Quantenmechanik ist der Zustand des einen Photons zwar nicht unbedingt gleich dem Zustand des anderen, aber fest mit diesem verwoben, auch wenn beide räumlich getrennt sind. Im vorliegenden Fall sind die Photonen Energie-Zeit-verschränkt, das heißt, der exakte Zeitpunkt ihres Entstehens im Kristall und ihre präzise Frequenz sind unbestimmt. Verschränkte Photonen befinden sich in Superposition, ihr tatsächlicher Zustand bezüglich der verschränkten Freiheitsgrade ist innerhalb einer Bandbreite nicht festgelegt. Erst ein Messvorgang an einem Photon legt den Gesamtzustand fest.

Interferenz bildet Objekt ab

Um das Prinzip der Quantenbildgebung mit undetektierten Photonen zu verstehen, muss man sich die Quanteneffekte vergegenwärtigen. Das Photon als Lichtquant weist sowohl Teilchencharakter als auch Welleneigenschaften auf. Nur als Welle kann ein einzelnes Photon im bekannten Doppelspaltexperiment durch zwei Spalte gleichzeitig dringen und dahinter mit sich selbst ein Interferenzmuster bilden. Hier beeinflusst schon eine theoretische Messung





Am Fraunhofer IOF (Institut für angewandte Optik und Feinmechanik) in Jena setzt man für die Quantenbildgebung auf das Prinzip eines nichtlinearen Interferometers. Ein Laserstrahl trifft auf einen nichtlinearen Kristall, in dem daraufhin spontan Photonenpaare entstehen. Entscheidend ist, dass sowohl die ein Objekt beleuchtenden als auch die zu detektierenden Photonen zwei Wege zur Auswahl haben. Und in beiden Fällen darf keine Welcher-Weg-Information bestehen, erläutert Dr. Markus Gräfe, Leiter der Quantum-Enhanced Imaging Group am IOF gegenüber c't. Nur dann können durch die Beleuchtung eines Versuchsobjekts Interferenzen entstehen, die dessen Konturen und Eigenschaften verraten.

Bereits 2014 hat eine Gruppe um Anton Zeilinger an der Universität Wien einen entsprechenden Aufbau gezeigt (siehe Grafik „Quantenbildgebung in Wien 2014“). Dabei setzten die Forscher zwei gleichartige nichtlineare Kristalle in ihr Interferometer ein. Ein Strahlteiler lenkt den Laserstrahl auf zwei Bahnen zu den beiden nichtlinearen Kristallen, wo jeweils Photonenpaare entstehen. Dichroitische Spiegel, bei denen die Reflektivität von der Farbe des Lichts abhängt, trennen die Photonenpaare nach ihren Wellenlängen auf. Es entstehen zusätzlich zum Hauptlaserstrahl aus dem sogenannten Pumplaser neue Photonenstrahlen, die man traditionell als Idler und Signal bezeichnet. Die Idler-Photonen aus dem ersten Kristall beleuchten das Objekt, die Signal-Photonen nicht.

Am Ende treffen Idler-Strahlen aus beiden Kristallen aufeinander und interferieren gemäß Quantenmechanik, da keine Welcher-Weg-Information vorgegeben ist. Ein Idler-Photon an dieser Stelle könnte vom Pumplaser ausgehend im ersten oder im zweiten Kristall entstanden sein. Nur der Idler-Strahl aus dem ersten Kristall trifft auf das Objekt und wird dadurch abgeschwächt und verzögert. Deshalb wären Interferenzmuster der beiden Idler-Strahlen (also der beiden Pfadmöglichkeiten der Idler-Photonen) aus dem ersten und zweiten Kristall zu beobachten, wenn man sie messen würde.

Auch die Signal-Strahlen treffen am Ende wieder zusammen, und auch bei ihnen ist keine Welcher-Weg-Information vorhanden. Also lässt sich hier ebenfalls eine Interferenz messen. Überraschenderweise ergeben sich an dieser Stelle aufgrund der Korrelation zwischen den ungleichen Schwestern jedes Photonenpaars dieselben Interferenzmuster wie bei den Idler-Photonen. „Das lässt sich mathematisch gut nachvollziehen, auch wenn es der menschlichen Intuition widerspricht“, sagt Gräfe. Die Versuchsergebnisse der Wiener Zeilinger-Gruppe bestätigten ihren Ansatz: Sie gaben akkurat die Umrisse einer Katze wieder, entsprechend der als Objekt eingespannten Schablone.



hen aus dem Pumplaserstrahl kontinuierlich Idler- und Signal-Strahlen, die entweder auf ein Objekt treffen (Idler) oder eben nicht (Signal). Anschließend werfen Spiegel alle drei Strahlen (Pumplaser, Idler und Signal) wieder zurück auf den Kristall. Der Spiegel für den Idler-Strahl ist übrigens möglichst nah am Objekt platziert, um spätere Bildverzerrungen gering zu halten.

Ghost Imaging ist seit den 90er-Jahren bekannt. Das bildgebende Verfahren nutzt das gleichzeitige Entstehen zweier Photonen eines Paares aus, hier im visuellen (VIS) und im mittleren Infrarot-Spektrum (MIR). Ghost Imaging erfordert den Einsatz eines Single-Pixel-Detektors.

Bild: Fraunhofer IOF

Auch beim zweiten Durchgang durch den nichtlinearen Kristall können neue Photonenpaare entstehen. Danach interferieren also auch in diesem Aufbau die Pfadmöglichkeiten von Idler-Photonen, die beim ersten Durchgang durch den Kristall entstanden sind und das Objekt durchleuchtet haben mit denen, deren Ursprungsphoton zunächst mit dem Pumplaserstrahl weitergelaufen sind und erst auf dem Rückweg im Kristall ein Signal-Idler-Paar gebildet haben. Auch am IOF wird diese Interferenz nicht selbst gemessen, da die Idler-Wellenlänge in der Regel nur schwer detektierbar ist.

Ebenso kommt es zwischen den Möglichkeiten der Signal-Photonen, die entweder auf dem Hinweg oder auf dem Rückweg durch den Kristall entstanden sind, zur Interferenz. Wie beim Zeilinger-Aufbau spiegelt diese Interferenz die zu erwartende Interferenz der Idler-Photonen wider, lässt sich aber rein technisch wesentlich besser und genauer detektieren, da die Wellenlänge der Signal-Photonen im sichtbaren Bereich liegt.

Dass die Signal-Photonen überhaupt ein Objekt detektieren können, in dessen Nähe sie nie gewesen sind, verursacht bei Fachfremden oft Kopfschütteln, weiß Gräfe. Viele vermuteten daher beim Anblick des IOF-Aufbaus, dass Idler- und Signal-Strahl sich beim zweiten Durchgang durch den Kristall gegenseitig beeinflussen. Aber eine Datenübertragung zwischen den Photonen verschiedener Wellenlängen findet nicht statt, der wäre ja beim Wiener Aufbau auch nicht möglich.

Gräfe geht sogar noch weiter: „Im Grunde ist die Verschränkung der Photonen eines Paares für die Quantenbildgebung nicht relevant.“ Die ausgenutzten Effekte betreffen lediglich die Korrelation von Signal- und Idler-Photon bezüglich ihrer Wellenlängen und Richtungsvektoren. Schon daraus ergebe sich das gleichartige Interferenzmuster bei den Idler-Photonen hier und den Signal-Photonen da. Da ist dann wieder so ein Moment, in dem die menschliche Intuition der Quantenmechanik hilflos gegenübersteht.





Wellenlängen aus einer SPDC-Aufspaltung. Während die Idler-Photonen eine Schablone durchleuchteten und diese nur zum Teil durchdrangen, trafen ihre Schwestern auf eine Sensorplatte. Um nun nur die Signal-Photonen zu detektieren, deren Partner das Objekt passieren konnten, gehörte zum Versuchsaufbau ein Single-Pixel-Detektor hinter dem Objekt. Sobald der das Eintreffen eines Idler-Photons erkannte, gab er den Sensor hinter dem Signal-Strahl frei. Die detektierenden Photonen mussten daher eine Verzögerungsstrecke durchlaufen, um erst im passenden Moment auf den Sensor aufzutreffen.

Erstmals gelang es so, Objekte abzubilden, die die detektierenden Photonen gar nicht selbst durchleuchtet hatten. Shih durchleuchtete in seiner Arbeit ausgeschnittene Schablonen und nahm in weiteren Versuchen die Umrisse kleiner Soldatenfigürchen auf. Auch in dieser Form des Ghost Imaging ist die Verschränkung der eingesetzten Photonenpaare nicht von Bedeutung, sondern nur ihre Korrelation in Bezug auf Wellenlänge und Strahlrichtung. Einen begrenzenden Faktor stellt allerdings die Effizienz des Single-Pixel-Detektors dar. Wenn dieser beispielsweise nur zwei Prozent der eintreffenden Photonen sicher erkennt, dann kann auch die Gesamteffizienz des Systems nicht über zwei Prozent hinausgehen.

Portables System

Die Interferometer-Lösungen à la Zeilinger und Gräfe benötigen keinen Single-Pixel-Detektor und arbeiten dadurch effizienter. Zudem ist mit der Konfiguration am Fraunhofer IOF inzwischen ein robustes und sogar portables System entstanden. Laut Gräfe ist der Aufbau inzwischen so stabil, dass man ihn über Tage und Wochen ohne Nachjustierungen einsetzen kann. Die Videoaufnahme der Bildgebung ist bereits installiert. Jetzt arbeiten die Forscher daran, ihren Aufbau robuster und kompakter zu gestalten. Zusätzlich planen sie, die Objektaufnahme mit einem Scanning-Mikroskop zu koppeln, um auf diese Weise direkt hochauflösende mikroskopische Aufnahmen zu ermöglichen.

Die portable Anlage zur Quantenbildgebung mit undetektierten Photonen in Jena kommt mit einem Kristall aus, den alle Strahlen zweimal durchlaufen. Die das Objekt beleuchtenden Idler-Photonen (grün) erreichen den Detektor nicht.

Bild: Fraunhofer IOF

Für ein breites Spektrum an Wellenlängenpaaren steht eine Auswahl an verschiedenen nicht-linearen Kristallen zur Verfügung. So entstehen Photonenpaare mit einem Partner im sichtbaren Spektrum und einem im Bereich des Nahinfrarots oder sogar im mittleren Infrarot, also mit Wellenlängen im Mikrometerbereich. Forscher am Fraunhofer ITWM (Institut für Technik und Wirtschaftsmathematik) und der TU Kaiserslautern experimentieren schon mit Quantenbildgebung, bei der zur Beleuchtung Terahertzwellen zum Einsatz kommen, die liegen sogar





Nach wie vor ist die Suche nach immer neuen nichtlinearen Kristallen in vollem Gange. Sie alle wechselwirken mit Laserstrahlen auf ihre eigene Art. Zusätzlich beeinflusst die Temperatur des Kristalls die Wellenlängen der erzeugten Photonenpaare. So ist heute bereits die Steuerung des Vorgangs innerhalb eines Spektralbands möglich. Für die Zukunft arbeiten die Forscher an einer Anlage, die eine möglichst breite Palette an Wellenlängenpaaren einsetzen kann.

Bei der Erzeugung von Photonenpaaren mit zum Teil besonders kurzwelliger Strahlung tritt das Problem auf, dass der Eingangslaser die Gesamtenergie des resultierenden Photonenpaares liefern muss. Daher tüfteln die Forscher inzwischen an einem neuen Prozess zur Erzeugung besonders energiereicher Photonenpaare: einer Variante der Vier-Wellen-Mischung (four wave mixing, FWM). Am Fraunhofer IOF erzeugen so zwei Wellenlängen in einem nichtlinearen Material wieder korrelierte Photonen. Damit sind dann höhere Energien möglich. Allerdings erweist sich das Verfahren derzeit noch als weniger effizient.

Aufnahmen in 3D und 4D

Eine weitere Idee der Forscher ist, die Quantenbildgebung mit optischer Kohärenztomografie zu verknüpfen. Auch bei dieser Technik entstehen die Bilddaten durch Interferenz von beleuchtendem Strahl und Referenzlicht. Der Vorteil: Bei der optischen Kohärenztomografie entstehen dreidimensionale Aufnahmen aus der Analyse der Streuwirkung durch das Objekt.

Schließlich könnte man bei der Bildgebung auch verschiedene Wellenlängen durchtunen und damit spektroskopische Anwendungen gestalten, die unterschiedliche Farbinformationen des Objekts aufdecken. Damit würde sich in der Detektion quasi eine vierte Dimension eröffnen.

[\(agr@ct.de\)](mailto:agr@ct.de)

Leitprojekt zum Quantum Imaging: ct.de/y9br

► Kommentare lesen (8 Beiträge)



Leserbrief schreiben



Artikel als PDF herunterladen



Auf Facebook teilen



Auf Twitter teilen





[Impressum](#)

[Datenschutzhinweis](#)

[Nutzungsbedingungen](#)

[Mediadaten](#)

