

Das menschliche Auge kann einzelne Photonen sehen

Albert Einstein hat im Jahr 1905 die erfolgreiche Hypothese aufgestellt, dass Licht quantisiert ist. Diese Quanten wurden später als Photonen bezeichnet. Experimente in den 1940er-Jahren ergaben, dass vermutlich eine Schwelle von fünf bis sieben Photonen überschritten werden muss, damit das menschliche Auge sie erkennen kann. Erst neuere Experimente konnten mit Hilfe von verschränkten Photonen Klarheit schaffen: Das menschliche Auge ist tatsächlich in der Lage, auch einzelne Photonen zu sehen.

Abgeschwächtes Laserlicht ist für Experimente ungeeignet

Das menschliche Auge reagiert am empfindlichsten auf grünes Licht. Deshalb werden Experimente, mit denen man die Empfindlichkeit des Auges untersuchen will, mit grünem Laserlicht (Wellenlänge 561 nm) durchgeführt. Dessen Photonen enthalten die unvorstellbar kleine Energie von rund 4×10^{-19} Joule. Die Photonenenergie berechnet sich dabei aus dem Produkt $h \times f$, wobei h für das Plancksche Wirkungsquantum steht und f für die Lichtfrequenz.

Es wäre naheliegend, das Laserlicht für diese Experimente so stark abzuschwächen, bis nur noch eine Art Regen von einzelnen voneinander getrennten Photonen im Laserstrahl vorhanden ist. Dieses Vorgehen ist mit geeigneten Filtern absolut möglich und der entstehende Photonenregen kann mit Einzelphotonendetektoren aufgefangen und verstärkt werden, so dass der «Regen» via Lautsprecher hörbar gemacht werden kann. Es hört sich an wie auf eine Platte fallende Regentropfen oder der mit einem Geiger-Zähler registrierte Zerfall von radioaktiven Elementen.

Für die Experimente zur Bestimmung der ultimativen Empfindlichkeit des Auges möchte man aus diesem «Regen» am liebsten genau einen Tropfen, also ein einzelnes Photon, auf Knopfdruck erhalten. Zu diesem Zweck könnte man einen spe-

ziellen Laser verwenden, der auf Knopfdruck einen Lichtblitz von rund 10 Nanosekunden Länge abgibt (sog. *passively Q-switched laser*). Naheliegender wäre es dann, mit Filtern die Lichtblitze so abzuschwächen, dass im Mittel ein Photon übrig bleibt.

Wie bekommt man zuverlässig einzelne Photonen?

Weil die Photonen in einem statistischen Prozess erzeugt werden, ist es jedoch unmöglich, in einem noch so kleinen Zeitintervall genau ein Photon zu erhalten. Im Falle von Regentropfen oder beim radioaktiven Zerfall wäre dies genau gleich. In allen diesen Fällen haben wir es mit einer Poissonverteilung zu tun, die verwandt ist mit der bekannten Normalverteilung (auch Gaussverteilung oder Glockenkurve genannt).

Während die Normalverteilung für Ereignisse gilt, die mit einer nicht allzu kleinen Wahrscheinlichkeit p eintreten (z.B. $p=0,5$ um beim Werfen einer Münze Kopf zu erhalten), gilt die Poissonverteilung immer dann, wenn die Eintretenswahrscheinlichkeit p sehr klein ist (z.B. $p=0,0001$).

Die Gegenwahrscheinlichkeit $1-p$ kann in diesem Fall als 1 angenommen werden und die Formeln werden dadurch vereinfacht. So ist bei der Poissonverteilung die Varianz σ^2 gleich dem Mittelwert. Ist der Mittelwert z.B. 10 000, ist die Varianz auch 10 000 und die Standardabweichung σ ist die Wurzel daraus, also $\sigma=100$. Relativ zum Mittelwert sind solche Fluktuationen für dieses Beispiel nur 1 Prozent und normalerweise zu vernachlässigen.

In unserem Fall der Augenmessungen wollen wir jedoch einen Mittelwert von 1 haben (wir möchten im Mittel 1 Photon in jedem Intervall). Die Varianz und die Standardabweichung werden für diesen Fall auch 1 (die Wurzel aus 1 ist 1) und die Fluktuationen relativ zum Mittelwert erreichen 100 Prozent. Dies bedeutet, dass viele Intervalle leer sind und andere enthalten mehrere Photonen (bis etwa 5). Die entsprechende Poisson-Verteilung ist in **Abb. 1** grafisch dargestellt. So kann man also keine einzelnen Photonen erhalten.

Es ist auch nicht möglich, die Photonen irgendwie zu zählen, bevor sie ins Auge gelangen. Jede vorgeschaltete Zählapparatur würde die Photonen absorbieren und sie würden nicht mehr als Signal für das Auge zur Verfügung stehen. Lange Zeit schien diese Situation ausweglos.

Durchbruch dank verschränkter Einzelphotonenquelle

Erst die revolutionäre experimentelle Bestätigung der Verschränkung von Photonen ermöglichte eine Lösung dieses Problems. In einem speziellen Kristall werden zwei verschränkte Zwillingphotonen erzeugt (vgl. Gassmann 2023a,b), die sich im gleichen Quantenzustand befinden und voneinander getrennte Wege gehen.

Das eine Photon (*Idler* genannt) wird zu einem Detektor geleitet und sein Zwillingphoton (*Signal* genannt) wird via einen Lichtleiter dem Auge zugeführt. Sobald im Detektor ein Idler registriert wird, ist also ein identisches Signal im Auge angelangt. So kann man nun die Idler-Photonen zählen, ohne die Signal-Photonen zu beeinflussen.

Man kann mit diesem Verfahren auch das Mittel der Anzahl Photonen pro Laserpuls deutlich kleiner einstellen als 1. In den Experimenten von Tinsley et al. 2016 wurde der Mittelwert auf etwa 0,05 eingestellt. Gemäss der Poisson-Verteilung sind so allerdings 95 Prozent der Intervalle leer und ein Photon erscheint nur in rund 5 Prozent der per Knopfdruck angeforderten Fälle.

Da man nachträglich die leeren Messungen eliminieren kann, spielt dies jedoch keine Rolle. Der einzige Nachteil ist, dass die Versuchspersonen 20 mal mehr Beobachtungen machen müssen, um für die statistische Auswertung genügend viele Einzelphotonen zu beobachten. Um die rund 0,1 Prozent verbleibenden Fälle mit 2 Photonen ebenfalls auszuschliessen, wurde als Idler-Detektor eine elektronische Kamera mit sehr hoher Quanteneffizienz verwendet. Damit können Fälle mit 2 oder mehr Photonen nachträglich ebenfalls eliminiert werden.

Von der Theorie zur Praxis

Würde alles wie in der idealen Theorie ablaufen, wäre damit unser Messziel erreicht. Doch wie so häufig weichen die konkreten Experimente von der idealen Theorie ab.

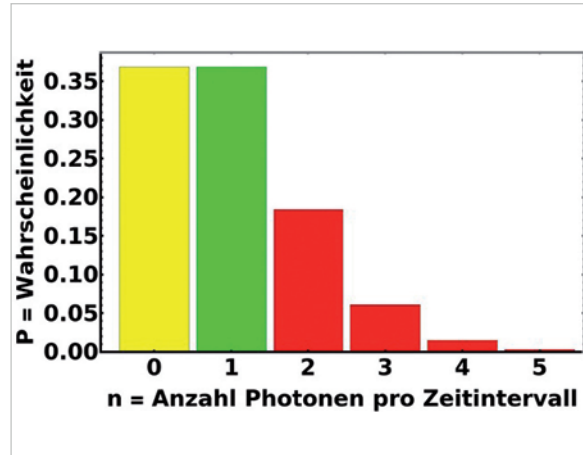


Abb. 1: Poissonverteilung $P(n)=1/(e \cdot n!)$ für Mittelwert 1. Varianz und Standardabweichung sind ebenfalls 1. Alle Photonen mit mehr als 5 Quanten machen zusammengenommen nur noch ein Promille der Fälle aus. Der Anteil der Intervalle, die kein Photon enthalten (gelb, $n=0$), ist gleich hoch (36,8 Prozent) wie derjenige der gewünschten Intervalle (grün) mit genau einem Photon ($n=1$). Die Intervalle mit mehr als einem Photon (rot, $n>1$) verfälschen die Messungen und müssen eliminiert werden. (Bild Fritz Gassmann)

Zum einen treten durch verschiedene Unvollkommenheiten des Idler-Detektors störende Fluktuationen auf. So kann der sehr empfindliche Einzelphotonen-Detektor ungewollt ansprechen auf interne thermische Fluktuationen und im Falle eines Leerintervalls ein Photon vortäuschen. Weiter beträgt die Effizienz des Lichtleiters zum Auge nur etwa 40 Prozent und in der Augenlinse sowie im Glaskörper können weitere Photonen absorbiert werden. Das bedeutet, dass insgesamt deutlich weniger Photonen die Netzhaut erreichen als angenommen.

Es wurde theoretisch geschätzt, dass nur etwa 6 Prozent der Signal-Photonen Reaktionen in den Stäbchenzellen der Retina auslösen können. Zusätzlich ist auch noch die Weiterleitung des sehr kleinen Reizes durch das mit Fluktuationen verschiedenster Art belastete Nervensystem zu berücksichtigen, wo kleine Signale verloren gehen können.

Aus all diesen Gründen ist deshalb nicht mit einer Erkennungswahrscheinlichkeit von Einzelphotonen von gegen 100 Prozent zu rechnen. Der Nachweis, dass das Auge Einzelphotonen realisieren kann, ist jedoch erbracht, wenn die Beobachtungen deutlich über der Zufallsgrenze von 50 Prozent liegen.

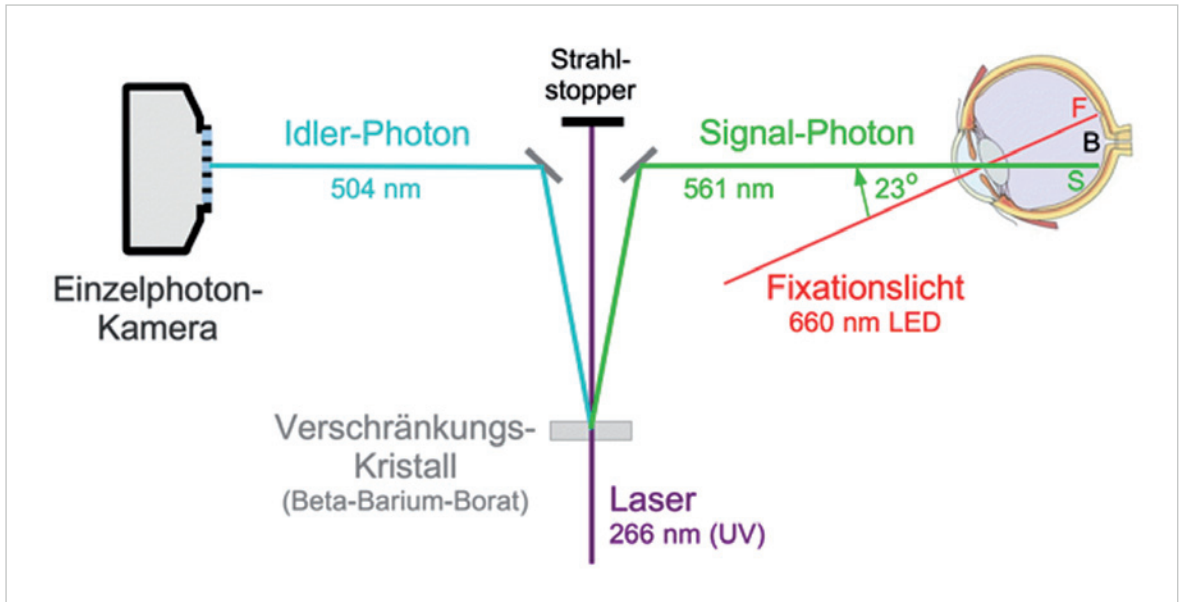


Abb. 2: Experiment zur Messung der ultimativen Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Die Wellenlängen von Idler- und Signal-Photon wurden optimal auf die Empfindlichkeiten der Einzelphotonkamera und des Auges eingestellt. Damit das Signal-Photon immer auf eine Stelle der Netzhaut mit grosser Dichte von Stäbchenzellen S (empfindlich für Nachtsicht, nur schwarz/weiss) trifft, musste die Versuchsperson ein schwaches Fixationslicht fokussieren, das so in die Fovea F (Sehgrube, Zentrum für scharfes Sehen) fällt, wo sich fast keine Stäbchenzellen befinden, sondern farbbempfindliche Zapfenzellen, die weniger lichtempfindlich sind als Stäbchenzellen. B ist der blinde Fleck. (Bild F. Gassmann: vereinfachte Prinzipskizze nach Tinsley et al. 2016, Fig. 1a)

Testpersonen müssen gut trainiert sein

An den Messungen haben drei gut trainierte, junge Männer teilgenommen, deren Augen an die Dunkelheit adaptiert waren. Die Versuchspersonen sassen in einer kleinen lichtdichten Box, die in einer Dunkelkammer platziert war. Sie konnten per Knopfdruck ein Photon verlangen. Es wurden immer zwei Intervalle im Abstand von 0,8 Sekunden gesendet und durch ein akustisches Signal gekennzeichnet.

Durch eine Zufallsauswahl des Steuercomputers war das eine Intervall leer und das andere enthielt das Resultat des Laserpulses, also meistens kein Photon, manchmal ein Photon oder sehr selten mehr als ein Photon. Die Versuchsperson musste mit zwei Knöpfen entscheiden, ob sie das Photon im ersten oder im zweiten Intervall gesehen hat. Mit drei weiteren Knöpfen musste sie danach in drei Stufen angeben, wie sicher sie das Licht empfunden hat. Damit das zu sehende Photon immer auf die empfindlichste Stelle der Retina trifft, wurde der Kopf der Versuchsperson mit Hilfe eines Beissblocks stabilisiert und das zu testende Auge musste auf eine sehr schwache rote Lichtquelle gerichtet werden.

Das Photon wurde in einem Winkel von 23° zu dieser Lichtquelle eingestrahlt. Abb. 2 zeigt das Prinzipschema des experimentellen Aufbaus. Für weitere Details sei auf die Beschreibung der Experimente durch Tinsley et al. 2016 verwiesen.

Ergebnisse der Experimente

Insgesamt wurden Beobachtungen von 2420 Einzelphotonen ausgewertet. Wären die Photonen überhaupt nicht gesehen worden, müsste der Anteil der Treffer (d.h. die Versuchsperson hat dasjenige Intervall ausgewählt, in dem sich tatsächlich das Photon befand) sehr genau bei 50 Prozent liegen, was einer zufälligen Wahl des Intervalls entsprechen würde. Der Erfolg des Experimentes zeigt sich also dadurch, wie weit der Anteil der Treffer über 50 Prozent liegt.

Betrachtet man nur die 242 Beobachtungen, die mit der höchsten Sicherheitsstufe 3 bewertet wurden, konnten 60 ± 3 Prozent Treffer gefunden werden, was deutlich über einem Zufallsergebnis liegt. Das menschliche Auge kann also tatsächlich ein einzelnes Photon sehen.

Ein weiteres unerwartetes Ergebnis betraf die Steuerung der Empfindlichkeit des Auges. Da

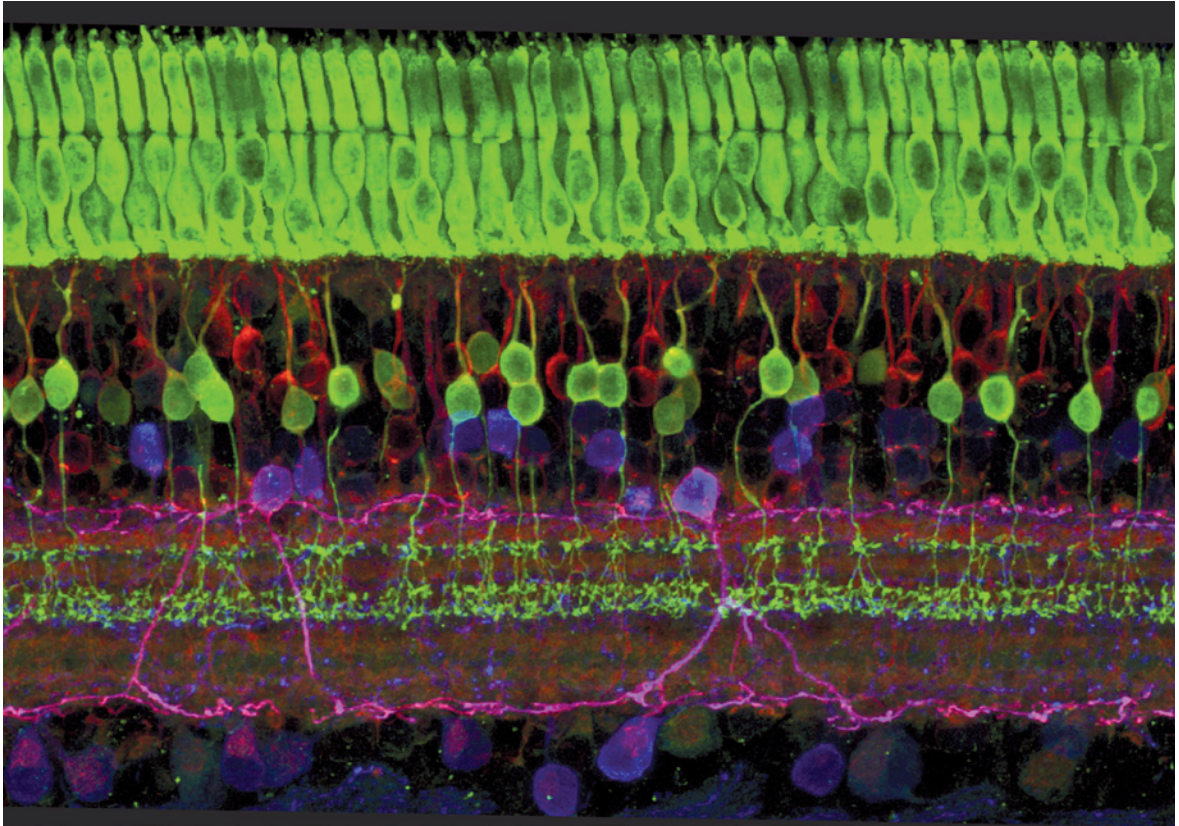


Abb. 3: Diese mikroskopische Aufnahme zeigt die vielen Schichten von Nervenzellen in der Netzhaut, die sich im Laufe der Evolution bis ans Limit des physikalisch Möglichen entwickelt hat. Die oberste Schicht (grün) besteht aus Zellen, die als Photorezeptoren bezeichnet werden und Licht in elektrische Signale umwandeln, die an das Gehirn weitergeleitet werden. Die beiden bekanntesten Arten von Photorezeptorzellen sind Stäbchen- und Zapfenzellen. Stäbchen helfen uns, bei schlechten Lichtverhältnissen zu sehen, können jedoch keine Farben unterscheiden. Zapfen wiederum funktionieren im Dunkeln nicht gut, ermöglichen es uns jedoch, bei Tageslicht lebendige Farben zu sehen. (Bild: Wei Li, National Eye Institute, National Institutes of Health)

das Auge Lichtintensitäten über einen Bereich von eins bis eine Milliarde verarbeiten kann, muss die Empfindlichkeit durch ein Regelsystem dauernd der mittleren Umgebungintensität angepasst werden. Erstaunlicherweise wurde ein solcher bisher noch unbekannter Adaptionseffekt selbst bei den hier untersuchten extrem niedrigen Intensitäten gefunden: Wenige Sekunden nach der Beobachtung eines einzelnen Energiequants scheint die Retina konditioniert zu sein, ein weiteres einzelnes Quant mit höherer Wahrscheinlichkeit feststellen zu können.

Fazit

Es erstaunt, dass die evolutiven Prozesse die Empfindlichkeit der Sehzellen bis hin zu den physikalischen Grenzen optimiert haben (Abb. 3). Dazu kommt noch eine weitere Erkenntnis: Es ist schwer verständlich, dass das äusserst geringe Signal ei-

ner einzelnen Stäbchenzelle der Retina durch das Nervensystem weitergeleitet werden kann, ohne verloren zu gehen.

Das im neurologischen System durch Zufallsprozesse ausgelöste Rauschen müsste eigentlich derart schwache Signale so stark verwischen, dass sie aus dem Rauschpegel nicht mehr herauszufiltern sind. Es muss also bisher unbekannte Prozesse geben, die sehr schwache Signale durch stark verrauschte Kanäle übertragen können!

Fritz Gassmann

Literatur

Gassmann F. 2023a. Verschränkte Photonen – Phänomen ausserhalb Raum und Zeit. VJS 2|2023: 6-10.

Gassmann F. 2023b. Die Bellsche Ungleichung einfach erklärt. VJS 2|2023: 11-13. (Abb. 2)

Tinsley J. N. et al. 2016. Direct detection of a single photon by humans. Nat. Commun. 7:12172 doi: 10.1038/ncomms12172.