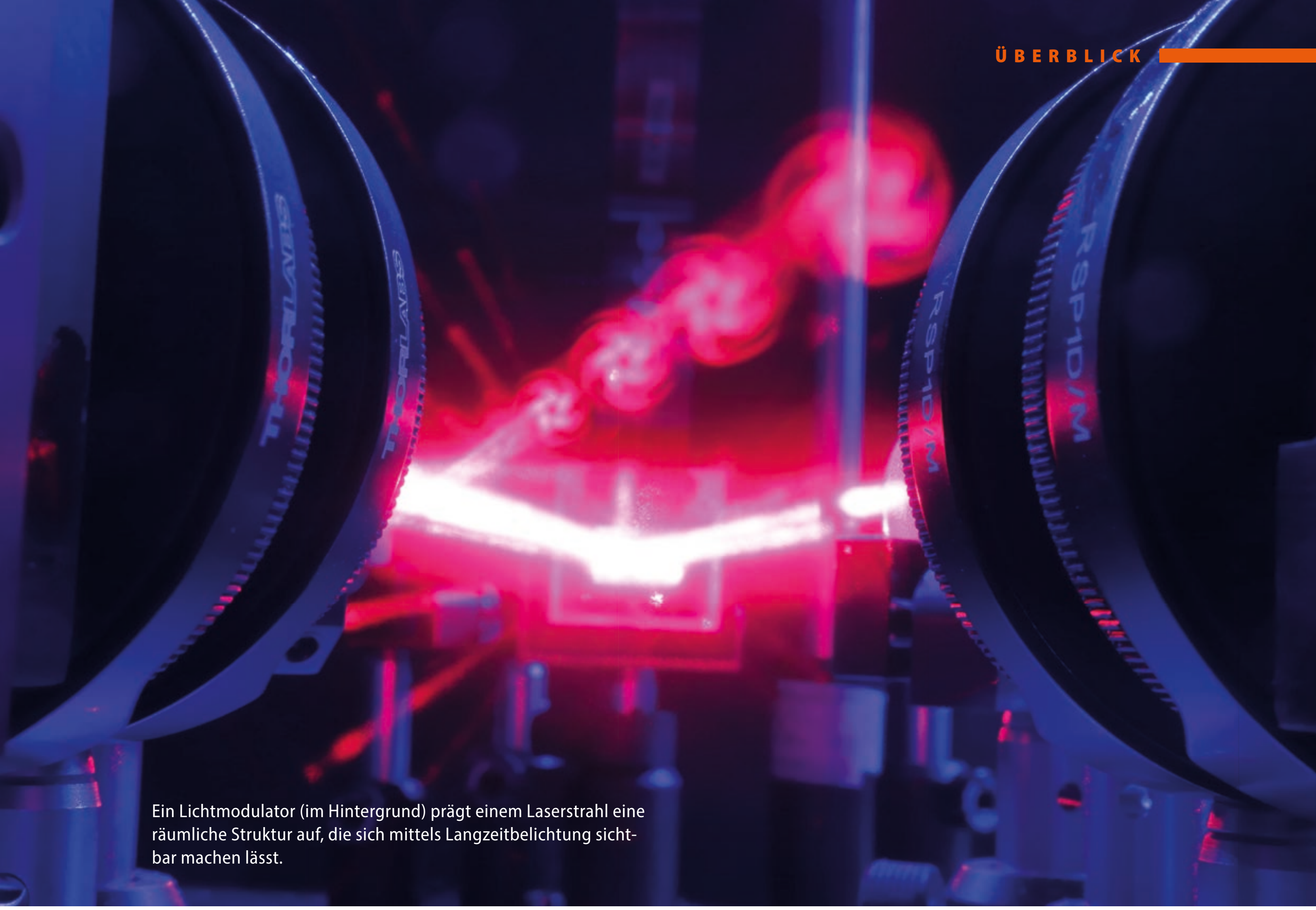

Ein Lichtmodulator (im Hintergrund) prägt einem Laserstrahl eine räumliche Struktur auf, die sich mittels Langzeitbelichtung sichtbar machen lässt.

QUANTENOPTIK

Strukturierte Photonen

Photonen mit schraubenartiger Phasenstruktur besitzen einen Bahndrehimpuls und eröffnen in der Grundlagenforschung und für Quantentechnologien neue Möglichkeiten.

Robert Fickler

Licht, dessen Eigenschaften nur quantenoptisch zu beschreiben sind, ist als Quantenlicht bekannt. Seit vielen Jahrzehnten liefert es kontinuierlich neue Erkenntnisse in der Grundlagenforschung und initiiert die Entwicklung neuer Technologien und deren Anwendungen. Die technischen Fortschritte in der Modulierung von Licht zusammen mit neuen Erkenntnissen in der Quanteninformation eröffnen neue Möglichkeiten wie die Anwendung hochdimensionaler Quantenzustände oder das Zusammenspiel verschiedener Eigenschaften von Photonen. Das hat zu einem äußerst erfolgreichen Wissenschaftsgebiet geführt: der Erforschung und Anwendung strukturierter Photonen.

Wie vieles in der modernen Physik geht die Idee von Photonen, also einzelnen Lichtquanten, auf Albert Einstein zurück. In einer Arbeit aus dem Jahr 1905 erklärte Einstein den photoelektrischen Effekt durch die Existenz von Photonen und gab somit der von Max Planck zuvor heuristisch eingeführten Konstante eine physikalische Bedeutung. In den späten 1920er-Jahren erhielt das Konzept der Photonen im Zuge der Quantisierung des elektromagnetischen Feldes eine formalere Basis. Photonen sind demnach die Feldquanten des elektromagnetischen Feldes. Ihre Eigenschaften sind durch die Freiheitsgrade des Lichts gegeben, also durch die Lichtmoden, die durch Photonen angeregt werden. Die Schwingungsfrequenz ν der ebenen Lichtwelle entspricht der Energie des Lichtquants

($E = h\nu$), der Wellenvektor k bezieht sich auf dessen Impuls [$p = (h/2\pi)k = \hbar k$], und die Polarisation beschreibt den Spindrehimpuls eines Photons ($S = \pm\hbar$). Besonders die Polarisation von Photonen stand in den vergangenen Jahrzehnten im Fokus: Zum einen untersuchte die Grundlagenforschung verblüffende Effekte wie die Überlagerung zweier Zustände, Quantenverschränkung oder Quantenteleportation. Zum anderen wurden bereits früh Anwendungen dieser Quanteneffekte vorangetrieben, sodass Geräte zur Quantenkommunikation oder Quantencomputer bereits verfügbar sind bzw. bald verfügbar sein werden. Der Siegeszug der Photonen und die Untersuchung ihrer grundlegenden Quanteneigenschaften gipfelten in der Vergabe des letztjährigen Physik-Nobelpreises an John Clauser, Alain Aspect und Anton Zeilinger für ihre quantenoptischen Experimente zur Verschränkung [1].

Interessanterweise wurde ein weiterer Freiheitsgrad des Lichts vor nicht allzu langer Zeit erstmals beschrieben: der Bahndrehimpuls. Les Allen, J. P. (Han) Woerdman und Kollegen brachten diesen 1992 mit der transversalen Phasenstruktur in Verbindung [2]. Diese Arbeit war die Initialzündung für das äußerst ergebnisreiche Forschungsgebiet des strukturierten Lichts. Die Wissenschaftler zeigten, dass Licht mit einer um die optische Achse ansteigenden Phase, d. h. einer schraubenartigen Phasenfront, einen zusätzlichen Drehimpuls besitzt. Im Gegensatz zum Spindrehimpuls, der eine Teilchendrehung um die eigene Achse bewirkt, kann der neu entdeckte Drehimpuls zu einer Drehbewegung um die optische Achse führen. Er entspricht somit einem Bahndrehimpuls (**Abb. 1**). Dieser Bahndrehimpuls des Lichts ist definiert als $L = \pm\hbar\ell$, wobei ℓ die Windungszahl ist, die dem Vielfachen eines azimutalen Phasenanstiegs um 2π entspricht. Die nähere Betrachtung zeigt, dass solche „Lichtschrauben" entlang der optischen Achse alle möglichen Phasenwerte zugleich annehmen müssten. Da dies unmöglich ist, weist ein solcher Lichtstrahl an diesem Punkt keine Intensität auf. Mathematisch entspricht dies einer Phasensingularität entlang der optischen Achse. Eine Kameraaufnahme des Lichts gleicht daher einem Donut, d. h. einem hellen Ring mit dunklem Zentrum.

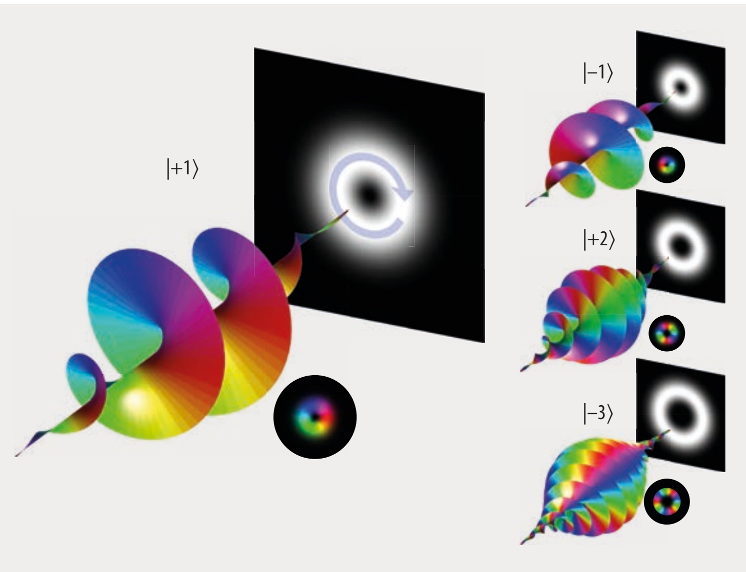

Abb. 1 Photonen mit schraubenartiger Phase besitzen Donut-förmige Intensitätsstrukturen. Die Phasenstruktur kann unterschiedlich stark ansteigen und rechts- bzw. linksdrehend sein: Sie ist mit einem positiven bzw. negativen quantisierten Bahndrehimpuls $|\pm\ell\rangle$ verbunden. Im linken Bild deutet dies der graue Pfeil an. Die runden Insets zeigen eine häufig verwendete zweidimensionale Darstellung des Phasen- und Intensitätsverlaufs in einem Querschnitt des Lichts.

Der experimentelle Nachweis dieses Drehimpulses gelang der Gruppe um Halina Rubinsztein-Dunlop im Jahr 1995 mittels optischer Pinzetten [3]. Diese frühen Arbeiten zeigten, dass die transversale räumliche Struktur von Licht nicht nur komplexe Formen annimmt, sondern auch zu interessanten Eigenschaften wie einem Bahndrehimpuls führt. Der Startschuss in der Quantenoptik folgte 2001 mit dem ersten experimentellen Beleg einer schraubenartigen Phasenstruktur einzelner Photonen [4]. Die Gruppe um Anton Zeilinger wies zudem nach, dass zwei Photonen in ihrem Bahndrehimpuls verschränkt sein können. Die Windungszahl ℓ gilt somit als Quantenzahl. Basierend auf diesen Resultaten entwickelte sich ein äußerst lebendiges Forschungsgebiet innerhalb der Quantenoptik, das nicht nur neue Erkenntnisse in der Grundlagenforschung liefert, sondern auch für zukünftige Quantentechnologien entscheidend ist. Bevor wir einige aktuelle Forschungsfragen und ihre Anwendungen beleuchten, gilt es zu klären, wie man strukturierte Photonen im Labor erzeugt und untersucht.

Was sind strukturierte Photonen?

Die Eigenschaften von Photonen sind direkt mit den Freiheitsgraden des Lichts verknüpft. Die einfachste Art, Lichtstrahlen zu beschreiben, sind ebene Wellen. Doch eine einzelne Elementarwelle ist unphysikalisch, da diese notwendigerweise unendlich ausgedehnt ist. Ein realistischer Lichtstrahl, etwa der eines Lasers, muss immer in der Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung begrenzt sein. Eine solche räumliche Begrenzung ist bei Laserstrahlen gewöhnlich ein rundes Profil in Form einer Gaußschen Intensitätsverteilung. Bei nicht allzu starker Fokussierung lässt sich ein solcher Strahl durch die paraxiale Wellengleichung beschreiben, d. h. eine transversale Welle, bei der die Amplitude in transversaler Richtung moduliert ist. Diese Amplitudenstruktur ist als räumliche Mode des Lichts bekannt. Die paraxiale Wellengleichung erlaubt als Lösung neben der fundamentalen Gauß-Mode auch beliebig viele Moden höherer Ordnung mit komplexeren Strukturen. Diese breiten sich, ebenso wie eine Gauß-Mode von der natürlichen Divergenz abgesehen, unverändert im Raum aus. Sie sind stabil und heißen daher ausbreitungsinvariant. Zudem ergeben sich verschiedene Modenfamilien, die jeweils eine vollständige Menge an orthogonalen Moden bilden, also eine Basis darstellen, um sämtliche Lichtfelder zu beschreiben. Obwohl es keine ausgezeichneten Modenfamilien gibt, sind Laguerre-Gauß-Moden besonders populär. Sie ergeben sich als Lösung der paraxialen Wellengleichung in Zylinderkoordinaten und verdanken ihren Namen den herangezogenen Polynomen. Sie besitzen eine schraubenartige Phasenstruktur und somit einen Bahndrehimpuls (**Abb. 2**).

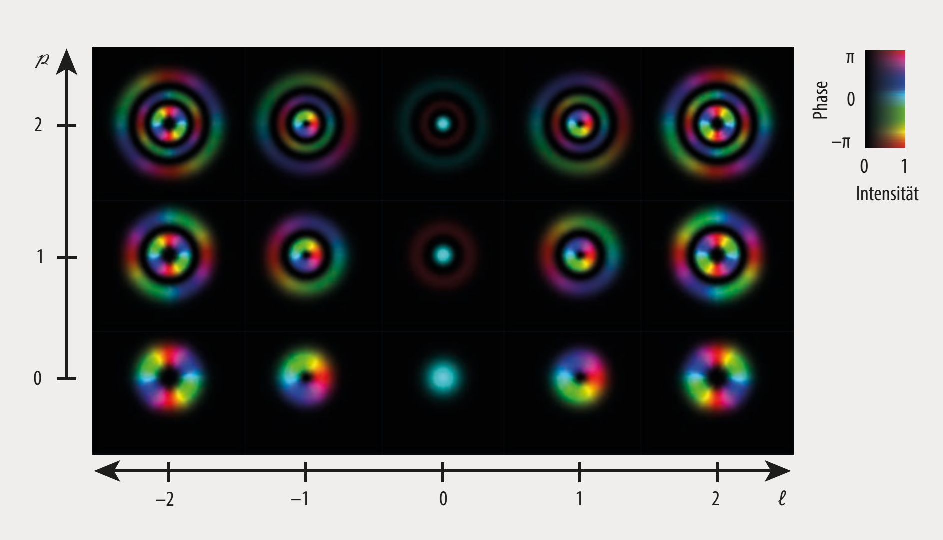

Abb. 2 Lichtmoden des Zylinderkoordinatensystems heißen Laguerre-Gauß-Moden und können eine schraubenartige Phasenstruktur besitzen, die durch die Quantenzahl ℓ gekennzeichnet ist. Höhere Ordnungen können zusätzliche Ringe aufweisen, die mit der Quantenzahl p charakterisiert werden.

Was bedeuten diese räumlichen Strukturen bzw. Moden für einzelne Photonen? Zunächst entspricht die Intensitätsverteilung der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Photon an einer bestimmten Stelle zu finden ist. Eine Kamera, die einzelne Lichtteilchen detektieren kann, registriert somit ein Photon, das sich in dieser Mode befindet, zufällig auf einem ihrer Pixel. Die Intensitätsverteilung der Modenstruktur entspricht hier der Detektionswahrscheinlichkeit. Durch Aufsummieren vieler Detektionen einzelner Photonen in der gleichen Mode offenbart sich ihre Struktur (**Abb. 3**). Die Einzelphotonen-Aufnahmen zeigen somit den Teilchencharakter des Photons in Form eines einzelnen Pixels. Zugleich tritt der Wellencharakter des Photons an der transversalen Struktur der Mode als Lösung einer Wellengleichung hervor.

Quantenzustände in hohen Dimensionen

Zusätzlich zum fundamentalen Welle-Teilchen-Dualismus der Photonen ist es für Quantenexperimente besonders wichtig, dass sich einzelne Photonen nicht nur in einer einzelnen Mode befinden können, sondern auch in einer kohärenten Überlagerung verschiedener Moden. Ähnlich der Überlagerung zweier Pfade in einem Doppelspaltexperiment und dem daraus resultierenden Interferenzmuster ergibt sich bei der Detektion strukturierter Photonen durch die Überlagerung zweier oder mehrerer Moden eine neue, oftmals komplexere Modenstruktur (**Abb. 4**). Die Komplexität der Strukturen eines einzelnen Photons verdeutlicht eindrucksvoll, welches Potenzial in strukturierten Photonen schlummert: In der Quanteninformationsverarbeitung können orthogonale Moden als Quanteninformationsträger dienen. Aufgrund der unbegrenzten Anzahl an räumlichen Moden sind sie ein hervorragender Kandidat, um hochdimensionale Quantenzustände physikalisch zu realisieren. Im Gegensatz zu den bekannten Qubits, also den zweidimensionalen Quantenzuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$, haben hochdimensionale Quantenzustände (Qudits) d mögliche Zustände: $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|2\rangle$, …, $|d\rangle$. Der zugrunde liegende Hilbert-Raum, der die Quantenzustände mathematisch beschreibt, ist somit d-dimensional. Die vielfachen Vorteile solcher Quantensysteme sind zwar theoretisch bekannt, wurden aber oftmals erst unter Verwendung strukturierter Photonen im Labor verifiziert. So leisten strukturierte Photonen immer wieder Pionierarbeit in dem noch jungen Forschungszweig der hochdimensionalen Quanteninformation [5].

Die räumliche Struktur von Photonen kann sogar noch komplexere Formen annehmen. Bisher wurde die transversale Struktur einzelner Photonen unabhängig von ihrer Polarisation als skalare Amplitude diskutiert. Diese Vereinfachung ist nur korrekt, wenn alle beteiligten Moden die gleiche Polarisation besitzen. Nutzt man jedoch explizit die Polarisation und damit die Vektornatur des elektromagnetischen Feldes aus, ergeben sich komplexere Lichtstrukturen. Beim Überlagern zweier (oder mehrerer) unterschiedlicher räumlicher Moden, die zudem eine unterschiedliche Polarisation aufweisen, ist die Polarisation des Lichts räumlich abhängig. Ein solch komplex strukturiertes Photon kann sämtliche Polarisationszustände in Form eines komplexen transversalen Polarisationsmusters gleichzeitig aufweisen (**Abb. 5**). Damit ist es möglich, die Dimensionalität der Zustände weiter auszudehnen.

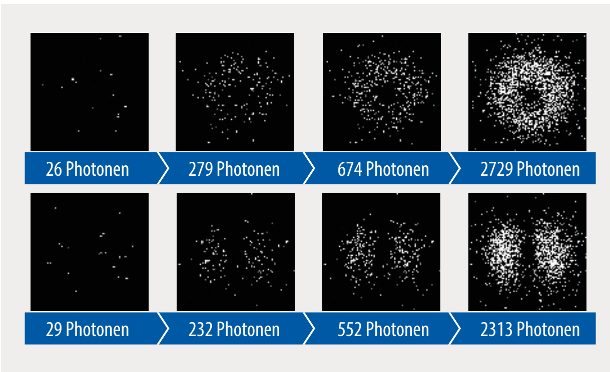

Abb. 3 Einzelphotonen können räumliche Strukturen samt deren Eigenschaften besitzen. Die unterschiedlichen Strukturen zeigen sich durch das Aufsummieren vieler Detektionen von Einzelphotonen in der gleichen Mode mittels einer empfindlichen Kamera.

Photonen geschickt strukturieren

Die gewonnene Komplexität der Struktur einzelner Photonen und deren Vorteile gehen aber auch mit neuen Anforderungen an Erzeugungs-, Manipulations- und Messmethoden einher. Das vermutlich wichtigste Experimentiergerät für strukturiertes Licht ist der räumliche Lichtmodulator (Spatial Light Modulator, SLM). Dieser erlaubt es mithilfe eines Computers, einen Lichtstrahl von mehreren Millimetern Durchmesser mit einer Auflösung von wenigen Mikrometern räumlich zu modulieren. Phasenmodulierende SLMs basierend auf Flüssigkristallen sind besonders effizient. Computerberechnete Hologramme prägen den Photonen die gewünschten Strukturen auf und ermöglichen es, die transversale Phase des Photons und indirekt auch deren Amplitude durch eine Modulation der Brechungseffizienz des Hologramms beliebig einzustellen (**Abb. 6a**). Die oben erwähnten Modenstrukturen und komplexe hochdimensionale Quantenzustände lassen sich dadurch recht einfach auf einzelne Photonen aufprägen. Eine ähnliche Herangehensweise, jedoch in umgekehrter Richtung, kann helfen, den Zustand des Photons beziehungsweise seine komplexe Struktur eindeutig auszulesen. Hierfür muss das Hologramm so programmiert sein, dass es die entgegengesetzte Phasenstruktur der zu messenden Mode aufprägt. Dies glättet ausschließlich die Phasenfront derjenigen Photonen, welche diese Struktur aufweisen. Werden diese Photonen fokussiert, erhalten sie eine Gauß-ähnliche Struktur im Fokus und koppeln dadurch effizient in Monomodenfasern ein. Hieraus resultiert somit ein Modenfilter, der mittels der einfachen Berechnung der jeweiligen Hologramme programmierbar ist und in Kombination mit einem Einzelphotonendetektor als vielseitiger Messapparat dienen kann.

Diese digitale Holografie ist wegen ihrer Flexibilität die vermutlich meistgenutzte Art, um strukturierte Photonen zu erzeugen und zu messen. Während der letzten Jahre wurden jedoch viele Strukturierungs- und Messmethoden entwickelt und in Quantenexperimenten angewandt. Hierzu zählen neue Techniken wie die Modulation von Licht mithilfe der geometrischen Phase. Speziell strukturierte Wellenplatten oder nanostrukturierte Oberflächen prägen dem Photon abhängig von seiner Polarisation eine räumliche Struktur auf. Die Umwandlung koppelt somit direkt die Polarisation an eine räumliche Struktur (**Abb. 5**). Zudem gibt es Aufbauten, die Photonen abhängig von ihrem Bahndrehimpuls in unterschiedliche Richtungen lenken und damit die Photonen strukturabhängig sortieren.

Die flexible unitäre Modentransformation ist ebenso wichtig im Umgang mit strukturiertem Quantenlicht und wurde vor nicht allzu langer Zeit demonstriert [6]. Unitäre Transformationen sind einer der essenziellen Bausteine in der Quanteninformation, denn sie erlauben es, das Quantensystem zu manipulieren, ohne dessen Kohärenz zu zerstören oder Photonen zu verlieren. Sie entsprechen einer Drehung des Quantenzustands in dessen Hilbert-Raum und sind die grundlegenden Operationen eines jeden Quantenalgorithmus. Ein populäres Beispiel hierfür sind Wellenplatten für den Polarisationsfreiheitsgrad, welche die Polarisation zwischen verschiedenen Richtungen unitär transformieren. Auf räumliche Strukturen übersetzt bedeutet dies, dass eine unitäre Transformation die Moden eines gewissen Satzes eindeutig und ohne Verluste ineinander oder deren Überlagerungen überführt.

Eine solche Manipulation der Modenstruktur ist nicht mit einem einfachen Hologramm möglich. Vielmehr benötigt es mehrere aufeinanderfolgende, sorgfältig konstruierte Phasenmodulationen, die über kurze Ausbreitungsstücke durch den freien Raum verbunden sind (**Abb. 6b**). Bereits wenige Phasenmodulationen reichen für eine begrenzte Menge an Moden aus, um flexibel hochdimensionale Quantengatter zu realisieren. Da mit der Anzahl an Moden auch die Anzahl an benötigten Phasenmodulationen steigt, ist es wichtig, die Möglichkeiten der Skalierbarkeit

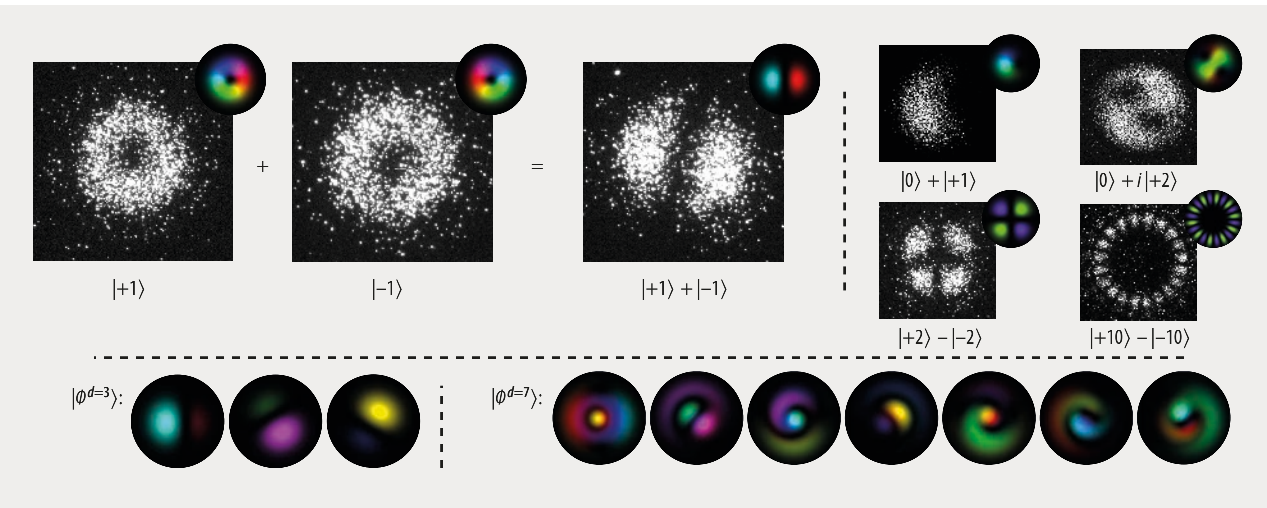

Abb. 4 Einzelne Photonen können sich in einer Überlagerung mehrerer Moden befinden. Oben sind beispielhaft Aufnahmen der Überlagerungsstrukturen von Einzelphotonen in Laguerre-Gauß-Moden sowie deren theoretische Phase und Intensität (Insets) gezeigt. Unten sind berechnete Strukturen von drei- bzw. siebendimensionalen Überlagerungen zu sehen. Die dreidimensionalen Strukturen setzen sich aus den Moden $|{-1}\rangle$, $|0\rangle$ und $|{+1}\rangle$ zusammen, die siebendimensionalen aus den Moden $|0{,}0\rangle$, $|{-1{,}0}\rangle$, $|{+1{,}0}\rangle$, $|0{,}1\rangle$, $|{-1{,}1}\rangle$, $|{+1{,}1}\rangle$ und $|0{,}2\rangle$. Hierbei entspricht der zweite Index der radialen Quantenzahl p und führt somit zu einer komplexeren Struktur in radialer Richtung.

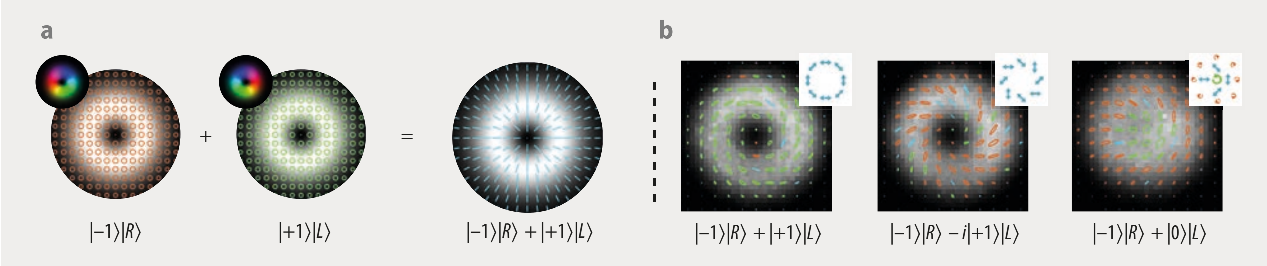

Abb. 5 Die Polarisationsmuster sind hier dargestellt durch Polarisationsellipsen (rot = rechtshändig, grün = linkshändig, blau = linear). Die Muster entstehen beim Überlagern zweier orthogonaler Moden mit jeweils unterschiedlicher Polarisation. Die Überlagerung einer Mode mit negativem Bahndrehimpuls und rechtszirkularer Polarisation $|-1\rangle|R\rangle$ mit einer linkszirkular polarisierten Mode mit positivem Bahndrehimpuls $|+1\rangle|L\rangle$ ergibt beispielsweise ein radiales Polarisationsmuster (a). Verschiedene Polarisationsmuster lassen sich aus Einzelphotonenaufnahmen rekonstruieren (b). Die Insets zeigen die theoretisch zu erwartenden Strukturen.

in Form kompakter Aufbauten genauer zu erforschen. Generell öffnet eine solche Technologie die Tür, strukturierte Photonen in Quantensimulationen, -algorithmen und in der Quantenkommunikation anzuwenden.

Strukturierte Photonen in der Quantenforschung

Wie bereits erwähnt, ist eine schraubenartige Struktur mit dem Bahndrehimpuls eines einzelnen Photons verknüpft. Offensichtlich stellt sich die Frage, wie groß dieser Bahndrehimpuls pro Photon sein kann. Theoretisch ist er unbegrenzt und sollte sogar makroskopische Werte annehmen können. Der aktuelle Rekord liegt bei mehr als 10 000 Bahndrehimpulsquanten, aufgeprägt auf ein einzelnes Photon [7]. Obwohl dieser Wert für ein Quantensystem recht hoch ist, ist der damit verknüpfte Bahndrehimpuls von makroskopischen Werten, mit denen sich makroskopische Objekte wie kleine Kügelchen bewegen lassen würden, noch weit entfernt. Die transversale Modenstruktur wächst mit ansteigendem Bahndrehimpuls und skaliert im Idealfall mit $\sqrt{\ell}$. Folglich sind makroskopische Werte aufgrund der notwendigerweise räumlich begrenzten Optik wohl auch in Zukunft nur schwer zu erreichen. Das Ergebnis zeigt jedoch eindrucksvoll, dass ein einzelnes Photon Strukturen mit fünfstelliger Modenordnung annehmen kann.

Unabhängig von diesen Schwierigkeiten ist damit gezeigt, dass sich eine große Zahl an Moden dazu eignet, um Quanteninformation zu kodieren. Verschränkte hochdimensionale Photonen erlauben zudem neue fundamentale Tests, um etwa die Frage nach einer lokal-realistischen Beschreibung der Quantenwelt ohne Statistik zu beantworten. Zusätzlich lassen sich die Grenzen ausloten, wie groß die Menge an Quanteninformation eines verschränkten Zustands sein kann, die nichtlokal gespeichert wird. Neue Wege der Erzeugung und Verifizierung maximaler Dimensionswerte der Verschränkung sind Gegenstand aktueller Forschung. Quantenzustände von zwei Photonen, die in jeweils 100 räumlichen Moden miteinander verschränkt sind, wurden bereits im Labor nachgewiesen. Der dazugehörige Hilbert-Raum besitzt eine Dimensionalität von 100^2, was ein riesiges Potenzial in der Quanteninformationsverarbeitung und der Quantenkommunikation verspricht [5].

Der Prozess, um diese komplexe Verschränkung zu erzeugen, ist heutzutage immer noch derselbe wie beim ersten Nachweis des photonischen Bahndrehimpulses, nämlich die spontane parametrische Fluoreszenz. In diesem nichtlinearen optischen Prozess wandelt sich ein hochenergetisches Photon eines Laserstrahls in einem speziellen Kristall in ein Paar niederenergetischer Einzelphotonen um. Da hierbei neben der Energie auch Impuls und Bahndrehimpuls erhalten bleiben, entstehen Photonen mit verschränkten Bahndrehimpulsen. Dies funktioniert für sämtliche andere Freiheitsgrade des Lichts. Daher gilt die spontane parametrische Fluoreszenz als eines der wichtigsten Werkzeuge in der Quantenoptik [8].

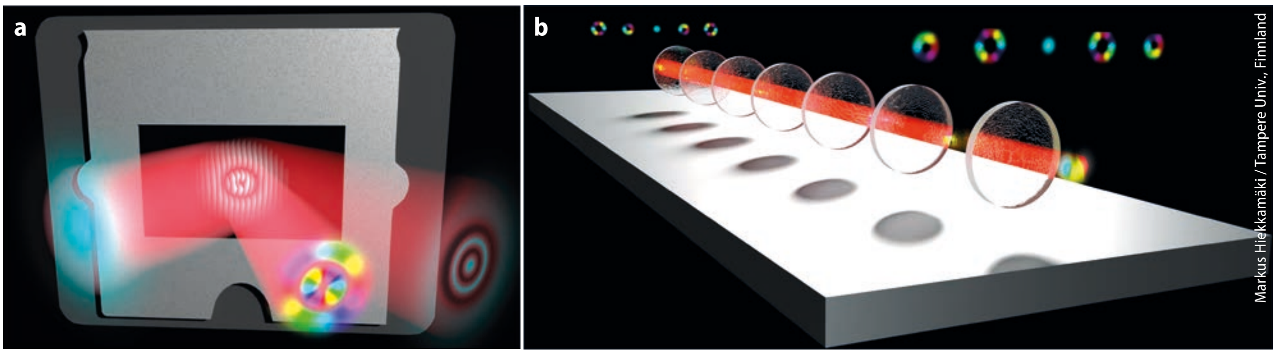

Abb. 6 Ein räumlicher Lichtmodulator strukturiert Licht, indem ein computergeneriertes Hologramm die Amplitude und Phase des Lichts in der ersten Brechungsordnung moduliert (a). Verschiedene Lichtmoden lassen sich theoretisch mithilfe mehrerer aufeinanderfolgender Phasenmodulationen, die von kurzen Ausbreitungsstücken im freien Raum unterbrochen sind, gleichzeitig verlustfrei und modenabhängig transformieren (b).

Die Verschränkung des Bahndrehimpulses ist intuitiv zu verstehen: Bei der Umwandlung des Laserphotons kann das Photonenpaar je nach Einstellung in mehreren unterschiedlichen Moden entstehen. Durch die Drehimpulserhaltung muss jedoch die Summe der Drehimpulse des erzeugten Photonenpaares gleich dem des Laserphotons sein. Besitzt der Laser in der Gauß-Mode keinen Bahndrehimpuls, müssen die beiden Photonen jeweils einen entgegengesetzten Bahndrehimpuls aufweisen. Es entsteht somit der $(2d + 1)$-dimensional verschränkte Zustand

$$|\Phi\rangle = (2d+1)^{-1/2} \textstyle\sum_{\ell=-d}^{d} |-\ell\rangle|\ell\rangle,$$

wobei die beiden Zustandsvektoren $|-\ell\rangle$ und $|\ell\rangle$ die vielen möglichen Bahndrehimpulse der beiden verschränkten Photonen beschreiben. Ähnliche Argumente helfen, die Verschränkung von Modenstrukturen ohne Bahndrehimpuls zu erklären. Somit ist es möglich, die räumliche Struktur, in welcher die Verschränkung vorhanden ist, an die jeweiligen Anforderungen anzupassen, die etwa ein Übertragungskanal in der Quantenkommunikation vorgibt. Weitere Möglichkeiten, den Hilbert-Raum des verschränkten Quantenzustands zu vergrößern, sind die Erweiterung der Verschränkung auf mehr als zwei strukturierte Photonen [5] sowie die oben erwähnte Kombination mit weiteren Freiheitsgraden.

Der vielleicht größte Nutzen strukturierter Photonen in Anwendungen der Quanteninformation liegt direkt in der Natur der hochdimensionalen Quantenzustände. So ist beispielsweise bekannt, dass sich mit ihnen mehr Information pro Photon übermitteln lässt und dass die Quantenzustände widerstandsfähiger gegen das unvermeidbare Hintergrundrauschen sind. Intuitiv ist dies dadurch zu erklären, dass ein hochdimensionaler Freiheitsgrad es ermöglicht, das Rauschen auf viele Messzustände zu verteilen und somit das relative Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Zudem erlauben hochdimensionale Zustände aufgrund der größeren Anzahl an Messbasen eine detailliertere Vermessung, welche die Quanteneigenschaft deutlicher vom Hintergrund abhebt. Entsprechende Experimente, die neben der räumlichen Struktur auch die zeitliche Komponente des Photons untersuchten, zeigten, dass Verschränkung sogar bei Tageslicht eindeutig nachweisbar und somit zur Quantenkommunikation zu verwenden ist [9].

Darüber hinaus gab es in den letzten Jahren in der Quantenkommunikation große Fortschritte. Für eine effiziente und störungsfreie Übertragung wurden verschiedene Möglichkeiten getestet und optimiert, um die bestmögliche Übertragung durch den freien Raum, unter Wasser sowie in Lichtwellenleitern zu realisieren. Auch bei Quantenberechnungen kann die Hochdimensionalität strukturierter Photonen vorteilhaft sein. Es lassen sich etwa Vielteilchen-Quantenoperationen wie ein cNOT-Gatter (controlled NOT) auf lokale Einteilchenquantenoperationen vereinfachen [6]. Dies ist gerade für photonische Systeme, bei denen Vielteilchenquantengatter besonders schwierig zu realisieren sind, ein großer Vorteil.

Überdies lassen sich durch geeignete Wahl der räumlichen Strukturen Quantenzustände erzeugen, die bei der Messgenauigkeit bis ans Quantenlimit heranreichen, deren Genauigkeit also jenseits des klassischen Schrotrauschens liegt. Diese Quantenmetrologie belegte, dass die räumliche Struktur die verbesserte Messgröße direkt beeinflusst. Photonen mit Bahndrehimpuls, also einer azimutalen Phase, erlauben eine quantenlimitierte Messgenauigkeit für Winkelmessungen [10]. Photonen mit einer radialen Struktur könnten hingegen dazu dienen, die optimale longitudinale Position zu bestimmen [11].

Ausblick

Der enorme Aufschwung der Forschung an strukturiertem Licht über die letzten 10 bis 20 Jahre treibt auch die Entwicklung der Quantenoptik voran [5]. Dabei ist man nicht auf photonische Systeme begrenzt, sondern hat die Ideen und Erkenntnisse erfolgreich auf weitere Quantensysteme wie Elektronen, Neutronen und Atome in Form von Materiewellen ausgedehnt. Obwohl erste Quantentechnologien basierend auf strukturierten Photonen bereits in Sicht sind, gibt es noch offene Fragen. Gerade die Skalierung zu mehreren Moden und die Erzeugung einer größeren Anzahl an verschränkten Photonen benötigt noch weitere Forschung. Aber auch neue Wege zur besseren Übertragung, schnelleren Modulation und effizienteren Messung sind gefragt, um das noch recht junge Forschungsgebiet weiter als einen wichtigen Bestandteil der zweiten Quantenrevolution zu etablieren.

*

Der Autor dankt Lea Kopf (Tampere Univ., Finnland) und Prof. Dr. Enno Giese (TU Darmstadt) für hilfreiche Anmerkungen und Kommentare.

Literatur

[1] *T. Schumm* und *H. Weinfurter*, Physik Journal, Dezember 2022, S. 24
[2] *L. Allen* et al., Phys. Rev. A **45**, 8185 (1992)
[3] *H. He* et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 826 (1995)
[4] *A. Mair* et al., Nature **412**, 313 (2001)
[5] *M. Erhard* et al., Light Sci. Appl. **7**, 17146 (2018) und Referenzen
[6] *F. Brandt* et al., Optica **7**, 98 (2020)
[7] *R. Fickler* et al., PNAS **113**, 13642 (2016)
[8] *M. Gräfe*, Physik Journal, Juni 2022, S. 40
[9] *S. Ecker* et al., Phys. Rev. X **9**, 041042 (2019)
[10] *M. Hiekkamäki, F. Bouchard* und *R. Fickler*, Phys. Rev. Lett. **127**, 263601 (2021)
[11] *M. Hiekkamäki* et al., Nat. Photon. **16**, 828 (2022)

Der Autor


Jonne Renvall / Tampere Univ.

Robert Fickler (FV Quantenoptik und Photonik) studierte Physik an der Universität Ulm und promovierte 2014 an der Universität Wien in Österreich. Nach Postdoc-Aufenthalten an der Universität Ottawa in Kanada und dem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Wien gründete er 2019 die Arbeitsgruppe „Experimental Quantum Optics“ an der Tampere Universität in Finnland. Mit seiner Gruppe erforscht er klassische und quantenoptische Effekte von strukturierten Photonen und deren Wechselwirkung mit Materie.

Assoc. Prof. Robert Fickler, Physics Unit, Tampere University, Korkeakoulunkatu 3, Tampere, Finnland

