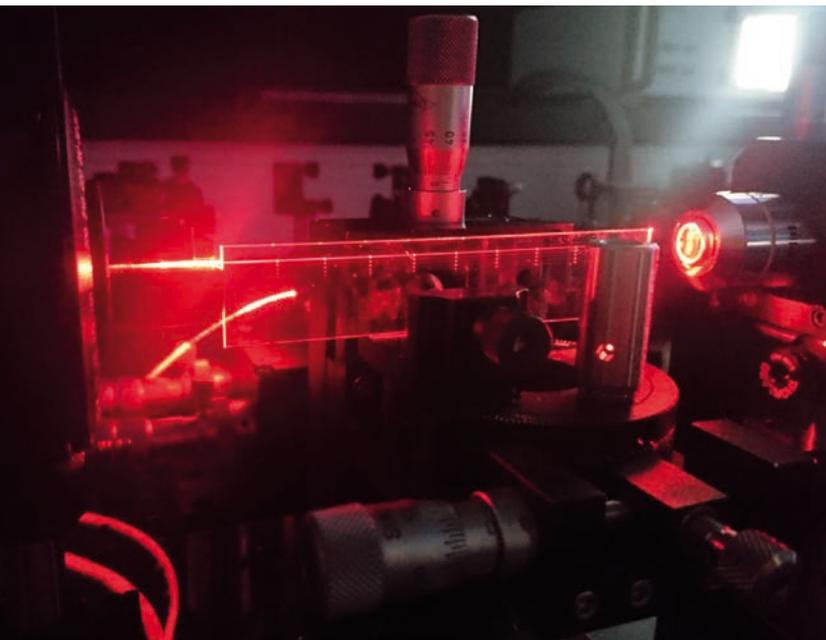


Photonen im Spiegel der Zeit

Die PT-Symmetrie könnte eine wichtige Rolle in der Quanteninformationstheorie spielen.

Alexander Szameit und Stefan Scheel



Experimenteller Aufbau zur Messung der PT-symmetrischen Quantenmechanik

Die Quantenmechanik ermöglicht faszinierende wie auch ungewöhnliche Phänomene. Kürzlich zeigten mathematische Überlegungen, dass es noch ein völlig neues Regime dieser Theorie jenseits dessen gibt, was bisher in den Laboratorien gemessen wurde. Diese neue Quantenmechanik würde nicht nur zu einem neuen Verständnis vieler physikalischer Prozesse führen, sondern wäre auch die Basis für revolutionäre Anwendungen.

Der Begriff Quant – vom lateinischen Wort „quantum“ (zu Deutsch: „wie viel“ oder „wie groß“) – wurde vermutlich durch Robert J. Mayer geprägt. Er nutzte ihn, um den ersten Hauptsatz der Thermodynamik zu beschreiben. Die Idee eines Energiequants – ohne es so zu nennen – stammt aus der bahnbrechenden Arbeit von Max Planck von 1900, in der er seine berühmte Formel zur Berechnung des elektromagnetischen Spektrums eines schwarzen Strahlers angibt [1]. Der zentrale Gedanke dieser Arbeit war der Ausdruck $\varepsilon = h \cdot f$, in dem die Frequenz f eines abstrakten Pendels proportional zu einem Energieelement ε (jenem Energiequant) ist. Die Naturkonstante h (die ihre Bezeichnung der schlichten Abkürzung für Hilfsvariable

verdankt) ist heute als Plancksches Wirkungsquantum bekannt.

Die Existenz dieser Konstanten besagt, dass sich Energie nicht kontinuierlich verändern kann, sondern mindestens in Sprüngen der Größe ε . Solche Quantensprünge beschreiben also die kleinstmögliche Änderung der Energie, insbesondere der von Atomen. Daher ist es mehr als erstaunlich, dass man in der heutigen Alltagssprache als Quantensprung einen Fortschritt bezeichnet, der eine Entwicklung innerhalb kürzester Zeit ein sehr großes Stück voranbringt.

Die erste Erwähnung des Wortes Energiequant findet sich in jener Arbeit Albert Einsteins, die ihm letztlich den Nobelpreis einbringen sollte [2]: Darin dachte er die Ideen Plancks weiter und schloss kühn, dass die Existenz von Energiequanten auch eine Quantelung des Lichts nach sich ziehen muss. Einstein zufolge besteht Licht aus „[...] in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können [...]“. Die faszinierende Konsequenz dieses Gedankens war, dass Licht nicht nur Welle war, sondern auch Teilcheneigenschaften haben musste. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts brach mit dem fundamentalen Gedankengebäude der klassischen Physik. Wie konnte etwas Welle und Teilchen zugleich sein? Diese Konzepte scheinen sich gegenseitig auszuschließen. Einstein hatte jedoch keine Ehrfurcht vor der klassischen Physik. Er versuchte, seine eigenen Gedanken voranzubringen, ohne sich von ihr beirren zu lassen: „[...] Phantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt [...]“.

Im Jahre 1924 verallgemeinerte Louis de Broglie den Welle-Teilchen-Dualismus auf alle Materieteilchen. In seiner Doktorarbeit beschrieb er, wie er aufgrund der von Albert Einstein gefundenen Äquivalenz von Masse und Energie zu der Überzeugung gelangte, dass Energie wie Masse in Form von Teilchen in kleinen Raumbereichen lokalisiert sei. Jedem massiven Teilchen, das sich mit dem Impuls p bewegt, ist eine Wellenlänge λ zugeordnet: $\lambda = h/p$. Im Umkehrschluss ist jeder Welle mit Wellenlänge λ ein (Wellen-) Impuls p zugeordnet. Der Welle-Teilchen-Dualismus ist heute ein grundlegendes und experimentell tausendfach bestätigtes Konzept moderner Physik, das kein seriöser Physiker mehr anzweifelt (Abb. 1).

Eine der kuriosen Folgerungen aus der Verknüpfung von Wellen- und Teilchencharakter ist die Unschärferelation, die Werner Heisenberg 1927 entdeckte [3]. Frei formuliert besagt dieses Prinzip, dass bei einem Teilchen zwei

komplementäre Eigenschaften niemals gleichzeitig einen bestimmten Wert besitzen können. So können Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nach Heisenberg niemals gleichzeitig exakt bekannt sein. Das Produkt der Unsicherheiten Δx des Ortes und Δp des Impulses erfüllen stets die Ungleichung

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi.$$

Hier kommt die gewaltige Bedeutung der Konstanten h zum Tragen: Je präziser der Ort eines Teilchens festgelegt ist, desto weniger genau ist sein Impuls definiert und umgekehrt. Es existiert auch eine Energie-Zeit-Unschärfe, die besagt, dass ein Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt keine wohldefinierte Energie haben kann, und dass umgekehrt eine wohldefinierte Energie nicht zu einem festen Zeitpunkt existiert. Howard Robertson verallgemeinerte 1929 die Heisenbergsche Unschärferelation und erkannte, dass es ähnliche Relationen zwischen anderen Größen wie der Energie eines Teilchens und seinem Ort bzw. seinem Impuls geben muss [4]. Diese Unschärfen sind prinzipieller Natur und kein Messeffekt. Sie bilden auch die Grundlage für die Stabilität der Atome und haben zudem technische Bedeutung, beispielsweise in der Gravitationswellenastronomie.

Interpretation mit Kopferbrechen

Die physikalische Interpretation des Welle-Teilchen-Dualismus sowie der Unschärferelation bereitete in der Physik zunächst großes Kopfzerbrechen. Im Laufe der Zeit setzte sich die Überzeugung durch, dass quantenphysikalische Naturvorgänge einen prinzipiell indeterministischen Charakter besitzen. Diese Kopenhagener Deutung arbeiteten Niels Bohr und Werner Heisenberg 1927 während ihrer Zusammenarbeit in Kopenhagen aus. Sie basiert auf Ideen von Max Born aus dem Jahr 1926. In dieser Interpretation gestattet die Quantentheorie lediglich die Vorhersage der relativen Häufigkeit von Messergebnissen. Die exakte Vorhersage von Einzelereignissen, beispielsweise beim radioaktiven Zerfall oder bei der Beugung von Teilchenstrahlen, sind nicht möglich; sie lassen sich nur

statistisch voraussagen. Die Kopenhagener Interpretation vertritt somit einen objektiven Indeterminismus, in dem der Zufall prinzipieller Natur ist und kein Ergebnis unzulänglicher Experimente.

Bei dieser Deutung der Quantentheorie bleibt jedoch unklar, wie und weshalb eine Messung aus einer Menge an Möglichkeiten ein einziges Ergebnis herausgreift (Messproblem). Albert Einstein war überzeugt, dass die fundamentalen Vorgänge deterministischer Natur sein müssten und betrachtete die Kopenhagener Deutung als unvollständig. Insbesondere der Unschärferelation stand er kritisch gegenüber. „[...] Eine innere Stimme sagt mir, dass das noch nicht der wahre Jakob ist. [...] Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der Alte (Gott) nicht würfelt. [...]“ Dennoch ist die Kopenhagener Interpretation als Arbeitsgrundlage heute weithin akzeptiert.

Bei den ursprünglichen Ideen zur Quantentheorie standen anfangs stets massive Teilchen im Mittelpunkt, allen voran das Elektron. Obwohl Einstein das Lichtquant bereits 1905 postulierte, dauerte es noch über 20 Jahre, bis sich die Forschung darauf einließ, die Quanteneigenschaften des Lichts näher zu untersuchen. Der erste Schritt bestand in der Suche nach einem griffigeren Namen. Dieser fand sich im Wort Photon, das sich vom griechischen phos ableitet, was „Licht“ bedeutet. Die Endung „-on“ impliziert, dass das Photon ein Elementarteilchen wäre – wie das Elektron und das Proton. Arthur Compton machte den Namen bekannt, als er sich auf eine Veröffentlichung des Chemikers Gilbert Lewis von 1926 berief [5].

Mit dieser neuen Bezeichnung begann die Entwicklung einer formalen Quantentheorie des Lichts. Beginnend mit Paul Dirac [6] führte der Weg über Arbeiten von Julian Schwinger, Shinichiro Tomonaga und Richard Feynman zur Quantenelektrodynamik. Diese Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes beschreibt die Photonen als Austauschteilchen, welche die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen Materie vermitteln. Sie ist bis heute eine der erfolgreichsten und experimentell am besten bestätigten physikalischen Gedankengebäude und erklärt unter anderem das magnetische Moment des Elektrons und kleine – aber messbare – Verschiebungen der Linien atomarer Spektren, die Lamb-Verschiebung (**Abb. 2**).

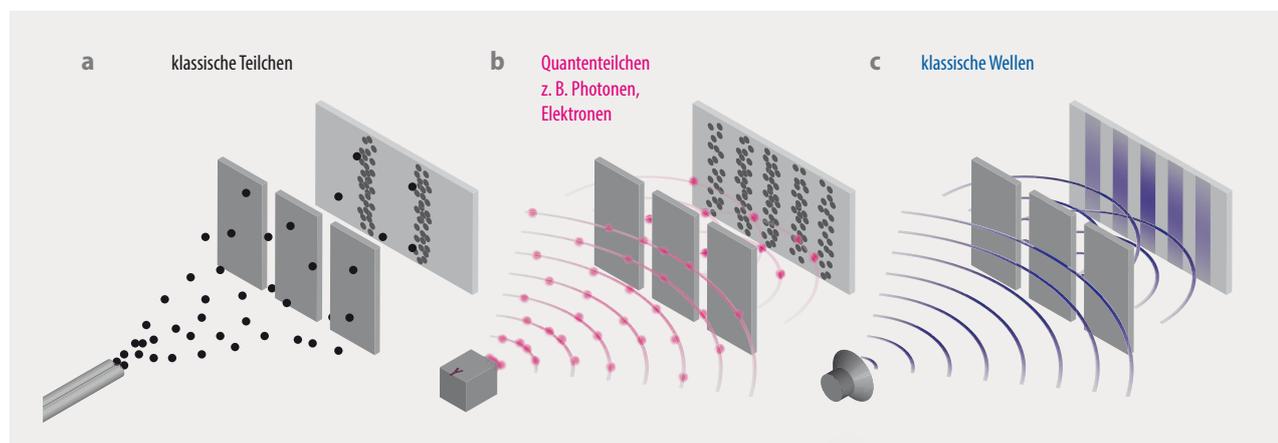


Abb. 1 Klassisch bekannt sind Teilchen, die an einem Hindernis blockiert werden (a), und Wellen, die an einem Spalt Interferenz erzeugen (c). Quantenobjekte sind Welle und Teilchen zugleich (b).

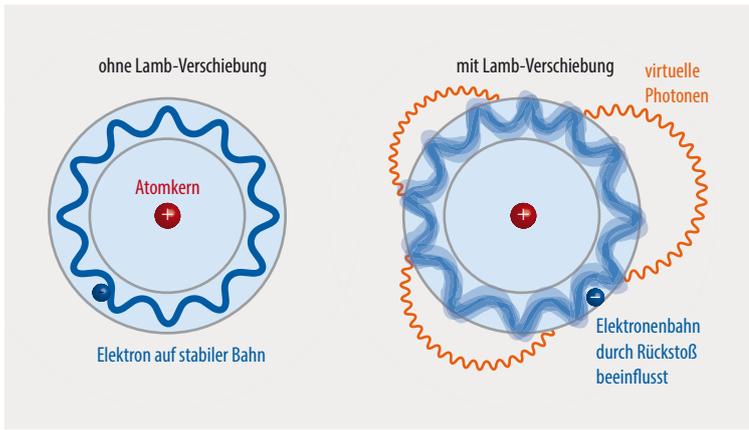


Abb. 2 Bewegt sich ein Elektron auf seiner Bahn um den Atomkern, erfährt es durch ausgesendete und absorbierte (virtuelle) Photonen einen Rückstoß, sodass es während seiner Bewegung leicht zittert. Dies sorgt für eine leichte Veränderung der Elektronenbahn (Lamb-Verschiebung). Diesen Effekt beschreibt die Quantenelektrodynamik mit hoher Genauigkeit.

Diese Studien behandelten jedoch vor allem die Physik einzelner Photonen; man nahm an, dass sich viele Photonen wie viele einzelne Photonen verhalten. Doch ein bahnbrechendes Experiment verdeutlichte, dass dieser Ansatz nicht korrekt sein konnte. Robert Hanbury Brown und Richard Twiss nutzten 1956 eine neuartige Messanordnung, um den Winkeldurchmesser von Sternen zu bestimmen [7]. Sie nutzten zwei Teleskope und untersuchten, wann die Photonen des Sternenlichts in das eine und wann in das andere Teleskop gelangten (**Abb. 3**). Sie stellten fest, dass immer dann, wenn zwei Photonen räumlich dicht beieinanderlagen, diese mit hoher Wahrscheinlichkeit die beiden Teleskope gleichzeitig erreichen. Ist der räumliche Abstand zwischen den Photonen groß, erreichen beide die Teleskope meist unabhängig voneinander. Anschaulich gesprochen „verklumpen“ zwei Photonen aus einer natürlichen Lichtquelle, sodass sie die Messapparatur zeitgleich erreichen. Dieser Hanbury-Brown-Twiss-Effekt verdeutlichte, dass sich Photonen nicht unabhängig voneinander ausbreiten.

Mit dem Bunching (auf Deutsch „Anhäufung“) begann die Entwicklung einer Quantentheorie vieler Photonen. Vorangetrieben vor allem von Roy Glauber, Leonard Mandel, George Sudarshan und John Klauder mündete dies im neuen Feld der Quantenoptik [8]. Diese Theorie ermöglicht es, optische Phänomene wie Sternenlicht, Laserlicht

oder die Überlagerung und Detektion einzelner Photonen zu beschreiben. Eines der bekanntesten Experimente der Quantenoptik ist das HOM-Experiment, das Chung-Ki Hong, Zhe-Yu Ou und Leonard Mandel 1987 durchführten [9]. Dabei treffen zwei einzelne identische Photonen aus derselben Lichtquelle aus unterschiedlichen Richtungen auf einen halbdurchlässigen Spiegel, hinter dem Detektoren ihre Ankunft messen (**Abb. 4**). Kommen die Photonen zu unterschiedlichen Zeitpunkten am Strahlteiler an, kann jedes Photon unabhängig vom anderen jeden Detektor erreichen. Kommen jedoch beide gleichzeitig an, verlieren sie ihre Unabhängigkeit und sind nicht mehr unterscheidbar. Durch das Bunching erreichen beide Photonen gemeinsam einen der beiden Detektoren. Somit zeigt stets nur ein Detektor ein Signal an, niemals beide gleichzeitig. Die Korrelation zwischen beiden Detektoren sinkt auf null, was klassisch nicht zu erklären ist.

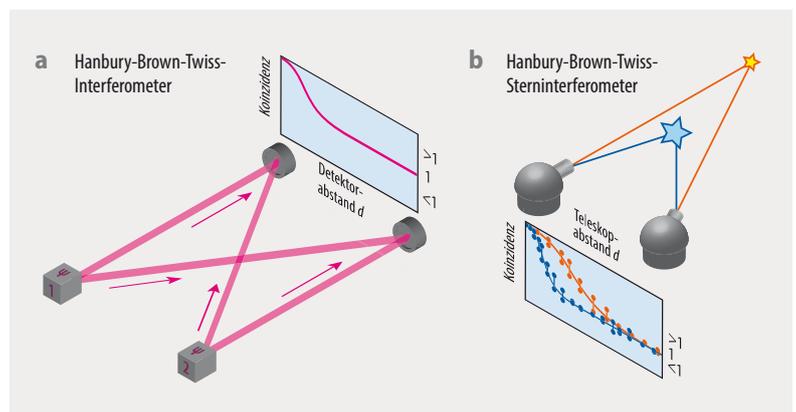
Symmetrie in Parität und Zeit

Quantenoptik als Teilgebiet der Quantenelektrodynamik fügt sich perfekt in die Interpretation und die Mathematik der Quantentheorie ein. Eine zentrale Annahme ist dabei von entscheidender Bedeutung: „Was man misst, muss es auch geben“. Dies hat profunde mathematische Auswirkungen: Die Messergebnisse, auch Eigenwerte genannt, müssen reelle Zahlen sein. Bisher kannte man nur eine mathematische Konstruktion, die diese Bedingung stets erfüllte: Die in den Gleichungen erscheinenden physikalischen Größen mussten eine bestimmte mathematische Symmetrie aufweisen, sie müssen hermitesch sein (nach Charles Hermite). Für nahezu einhundert Jahre war die Hermitizität der Quantentheorie ein eisernes Gesetz, dem alle mathematischen Beschreibungen genügen mussten.

Dies änderte sich 1998, als Carl Bender und Stefan Boettcher eine weitere Symmetrie entdeckten, die auch zu reellen Eigenwerten führt [9]. Wenn ein physikalisches System mit einem komplexen Potential an allen Raumachsen gespiegelt wird und es sich bei rückwärts laufender Zeit genauso wie das Originalsystem verhält, sind die Messwerte ebenfalls reell. Auch ein Name war schnell gefunden: PT-Symmetrie, was für „Parity“ (Parität) und „Time“ (Zeit) steht und wobei Parität auf die Raumpiegelung anspielt.

Die Existenz PT-symmetrischer Systeme hat fundamentale Auswirkungen: Es gäbe damit eine andere Quanten-

Abb. 3 Das Hanbury-Brown-Twiss-Interferometer (a) detektiert einzelne Photonen aus verschiedenen Quellen. Für kleine Abstände d der Detektoren treffen die Photonen mit erhöhter Wahrscheinlichkeit gleichzeitig ein (Koinzidenz). Bei größeren Abständen d sinkt diese Wahrscheinlichkeit. Photonen neigen also dazu, sich zu „verklumpen“. Bei einem Hanbury-Brown-Twiss-Sterninterferometer (b), das zwei Teleskope beinhaltet, kann der Verlauf der Koinzidenz dazu dienen, den Winkeldurchmesser und damit den Radius des beobachteten Sterns zu bestimmen.



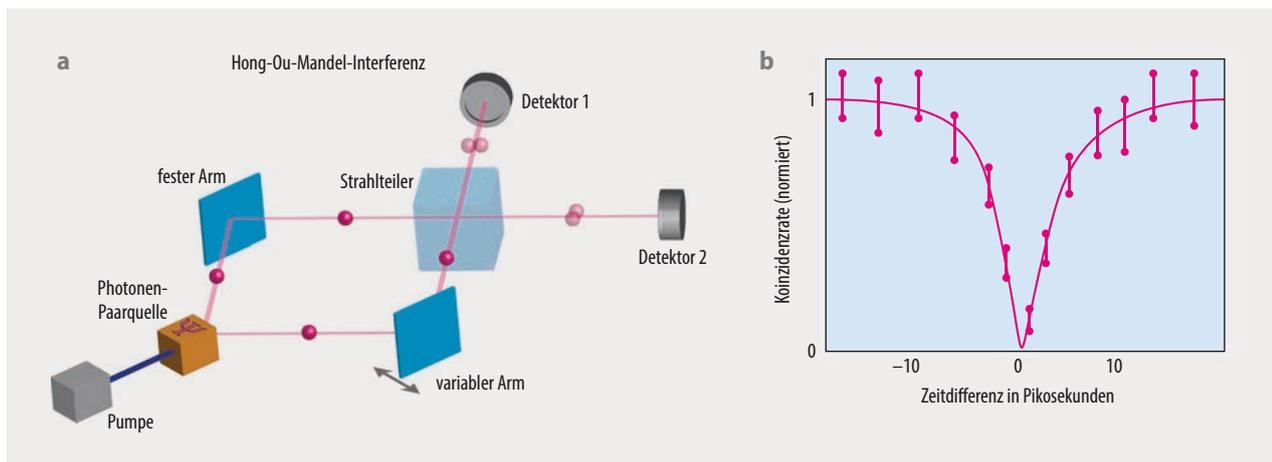


Abb. 4 Beim Hong-Ou-Mandel-Effekt treffen Photonen aus verschiedenen Richtungen auf einen halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler). Nach dem Strahlteiler wird untersucht, ob sie beide zusammen einen Detektor erreichen oder zwei verschiedene (a). Die Wahrscheinlichkeit, beide Detektoren zu erreichen, geht gegen null, wenn die Photonen gleichzeitig den Strahlteiler erreichen (b). In diesem Falle nehmen die Photonen nach dem Strahlteiler stets gemeinsam den gleichen Weg. Im Rahmen der klassischen Optik ist dies nicht erklärbar.

theorie, mit anderen Voraussagen und Möglichkeiten. Zum Beispiel existieren lokalisierte Zustände problemlos in den Energiebändern des Systems; dies ist in hermiteschen Systemen nur mit größten Mühen möglich. Zudem ist in PT-symmetrischen Strukturen nicht die Energie, sondern nur eine „Quasi-Energie“ erhalten. Zu guter Letzt ließen sich darin vermutlich auch reelle Zustände mit verschwindender Norm realisieren (Selbstorthogonalität), was für die Empfindlichkeit PT-symmetrischer Sensoren wichtig ist.

Allerdings ließ die Implementierung solcher Systeme auf sich warten. Anfangs war unklar, wie PT-Symmetrie experimentell zu realisieren ist. Schließlich kann man die Zeit nicht einfach rückwärtslaufen lassen. Auch gab es keine Vorstellung von einem „komplexen Potential“. Demetrios Christodoulides von der University of Central Florida erkannte 2007, dass die Prinzipien PT-symmetrischer Quantenmechanik auf klassische optische Systeme übertragbar sind. In einem optischen System übernimmt die Ausbreitungsdistanz die Rolle der quantenmechanischen Zeit. Das komplexe Potential resultiert, wenn gleichzeitig Verstärkung und Verluste im optischen System eingeführt werden, die in der klassischen Optik wohlbekannt sind [11] (**Abb. 5**). Bisher wurde Verstärkung nur mit Laserstrahlung in Verbindung gebracht; Verlust war stets unerwünscht.

In optischen PT-symmetrischen Systemen erhalten diese beiden Eigenschaften eine neue Bedeutung: Die geschickte Balance von Verlust und Verstärkung ermöglicht es, einen mikroskopischen Energiefluss von den Regionen mit Verstärkung zu denen mit Verlust direkt im System zu erzeugen. Mit dieser Idee folgte eine Vielzahl neuer Konzepte und Ergebnisse: Optische Dioden wurden entwickelt, neuartige Schichten realisiert, die völlig transparent von einer Seite und undurchsichtig von der anderen sind, und ein revolutionärer Laser mit überlegenen Effizienzwerten wurde vorgestellt.

PT-symmetrische Optik avancierte zum eigenen Forschungsfeld, auf dem unzählige Gruppen weltweit arbeiten und fast täglich neue Ergebnisse erzielen. Mittlerweile ließen sich PT-symmetrische Konzepte auch auf Bereiche der Physik jenseits der Optik übertragen. Beispiele sind elektrische Schaltkreise, kalte Atomgase und Fehlstellen in Festkörpern, wobei hier die Ergebnisse aber noch im grundlagenphysikalischen Bereich einzuordnen sind.

Der letzte, entscheidende Schritt zur vollen Quantenphysik fehlte jedoch bislang. In allen Realisierungen PT-symmetrischer Physik wurde stets nur die Evolution eines einzelnen klassischen Teilchens betrachtet. Auch bei der Untersuchung der Evolution eines einzelnen Photons in

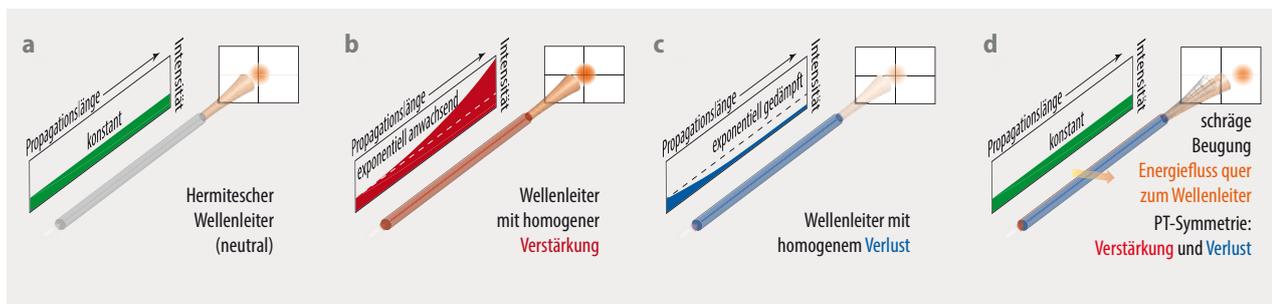


Abb. 5 In einem idealen (hermiteschen) Wellenleiter existiert weder Verlust noch Verstärkung (a), sodass die Lichtintensität darin konstant bleibt. Kommt nun Verstärkung (b) oder Verlust (c) hinzu, nimmt die Intensität des Lichts zu oder ab. Existieren im Wellenleiter wohldefinierte Bereiche von Verlust und Verstärkung (d), lässt sich Licht dennoch mit konstanter Intensität durch den Wellenleiter führen. Allerdings existiert nun ein transversaler Energiefluss im Wellenleiter, was die Lichtbeugung signifikant beeinflusst.

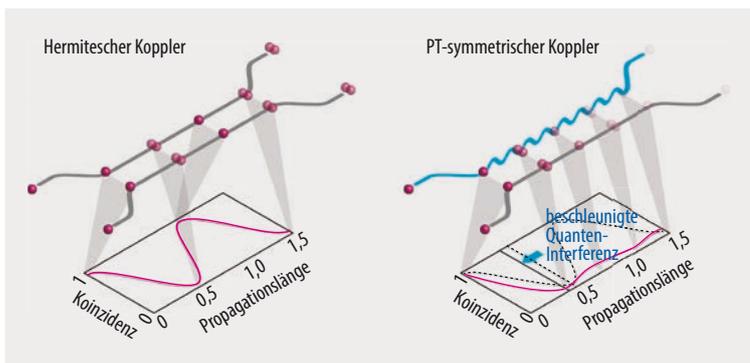


Abb. 6 Für ein quantenoptisches PT-symmetrisches Experiment werden zwei Einzelphotonen in zwei dicht stehende Wellenleiter eingekoppelt, wobei einer der Wellenleiter periodisch moduliert ist, um die Verluste zu erhöhen. Die Stelle, an der sich beide Photonen stets im selben Wellenleiter befinden, befindet sich näher am Anfang der Probe als in einer Probe ohne Verlust.

einem PT-symmetrischen System im Jahre 2017 [12] ist dies der Fall. Denn obwohl das Photon selbst ein quantenmechanisches Objekt ist, verhält es sich hier wie ein einzelnes klassisches Teilchen.

In Schlangenlinien schneller verklumpt

Echte PT-symmetrische Quantenoptik, bei der sich mindestens zwei Photonen gegenseitig beeinflussen, war bis vor kurzen theoretisch nicht hinreichend untersucht und auch jenseits bekannter experimenteller Messkonzepte. Gemeinsam mit unseren Doktoranden Friederike Klauk und Lucas Teuber analysierten wir die zugrundeliegenden Gleichungen und extrahierten ein Design für eine Probe für zwei Photonen, in denen wir ein PT-symmetrisches HOM-Experiment durchführen konnten. Die Probe besteht aus zwei Wellenleitern, in denen sich jeweils genau ein Photon befindet. Zusätzlich ist ein Wellenleiter leicht geschwängelt, sodass sich die Verluste darin leicht erhöhen (Abb. 6).

Bestimmt man nun die Stelle, an der sich beide Photonen stets in nur einem Wellenleiter befinden, stellt man etwas Überraschendes fest. Man würde vermuten, dass sich diese Stelle etwas weiter hinten in der Probe befindet im Vergleich zum verlustfreien (hermiteschen) Fall, denn die Photonen im PT-System tunneln langsamer. Doch der Punkt, an dem die Photonen verklumpen, liegt überraschenderweise näher am Anfang der Probe. Da – trotz Verlusten – für eine Messung beider Photonen stets beide die Probe durchquert haben müssen, ändert allein die Möglichkeit, dass eines davon verloren gehen könnte, die Physik, selbst wenn die Photonen letztlich verlustfrei die Probe durchqueren.

Im Rahmen der herkömmlichen Quantenoptik ist dies nicht zu verstehen. Unsere Ergebnisse stellen somit den erstmaligen Hinweis dar, dass in der Tat eine PT-symmetrische Quantenoptik jenseits des Hermiteschen existieren kann – mit neuen Möglichkeiten, Fragestellungen und Geheimnissen, die es zu ergründen gibt [13], beispielsweise in der Sensorik, der Telekommunikation und der Quantencomputerei. Von Albert Einstein ist das Zitat überliefert: „[...] 50 Jahre intensiven Nachdenkens haben mich der

Antwort auf die Frage ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht nähergebracht. Natürlich bildet sich heute jeder Wicht ein, er wisse die Antwort. Doch da täuscht er sich. [...]“

Durch die PT-Symmetrie bekommt diese Aussage neuen Glanz. Obwohl noch nicht vollständig geklärt ist, ob sich PT-symmetrische Systeme nicht doch als Untersysteme der hermiteschen Quantentheorie darstellen lassen, ist sich die wissenschaftliche Gemeinschaft einig, dass dem neuen Forschungsgebiet in vielerlei Hinsicht eine goldene Zukunft bevorsteht [14]. Neben dem offensichtlichen grundlagenphysikalischen Interesse werden diese neuartigen Prinzipien jenseits hermitescher Physik insbesondere im Rahmen der Quanteninformationstechnologie bei der Übertragung, der Manipulation und auch der Maskierung und Detektion von Quantenzuständen eine wichtige Rolle spielen.

Literatur

- [1] M. Planck, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft **2**, 245 (1900)
- [2] A. Einstein, Ann. Phys. (Leipzig) **17**, 132 (1905)
- [3] W. Heisenberg, Z. Phys. **43**, 172 (1927)
- [4] H. P. Robertson, Phys. Rev. **34**, 163 (1929)
- [5] G. N. Lewis, Nature **118**, 874 (1926)
- [6] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. **A114**, 243 (1927)
- [7] R. Hanbury Brown et al., Nature **178**, 1046 (1956)
- [8] J. R. Klauder und E. C. G. Sudarshan, Fundamentals of Quantum Optics. 1968, Dover 2006
- [9] C. K. Hong et al., Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987)
- [10] C. M. Bender et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 5243 (1998)
- [11] R. El-Ganainy et al., Opt. Lett. **32**, 2632 (2007)
- [12] L. Xiao et al., Nature Phys. **13**, 1117 (2017)
- [13] F. U. J. Klauk et al., Nature Photon. **13**, 883 (2019)
- [14] E.-M. Graefe, Nature Photon. **13**, 822 (2019)

Die Autoren



Alexander Szameit (FV Quantenoptik/Photonik, Oberflächenphysik) hat in Halle (Saale) und Jena Physik studiert. Nach der Promotion (2007) in Jena und einem zweijährigen Post-Doc-Aufenthalt am Technion in Haifa (Israel) kehrte er 2011 als Juniorprofessor an die Uni Jena zurück. Er

habilitierte sich 2015 und leitet seit Ende 2016 an der Universität Rostock den Lehrstuhl für „Experimentelle Festkörperoptik“. Der bekennende Star-Trek-Fan wurde mehrfach geehrt, u. a. mit der Adolph-Lomb-Medaille der Optical Society of America, dem Rudolf-Kaiser-Preis für experimentelle Physik, dem Alfred-Krupp-Preis für junge Hochschullehrer und dem Tomassoni-Preis.

Stefan Scheel (FV Quantenoptik/Photonik) hat in Leipzig und am Imperial College London Physik studiert. Nach seiner Promotion in Jena (2001) kehrte er als Feodor-Lynen-Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung ans Imperial College London zurück, wo er bis 2012 zunächst mit einem EPSRC Advanced Research Fellowship, danach als Lecturer und Reader arbeitete. Seit April 2012 leitet er an der Universität Rostock den Lehrstuhl für „Quantenoptik makroskopischer Systeme“.



Prof. Dr. Alexander Szameit und **Prof. Dr. Stefan Scheel**, Institut für Physik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Straße 23–24, 18059 Rostock