

Licht in ausgewählter Richtung

Basierend auf akusto-optischen Wechselwirkungen ermöglichen chirale photonische Kristallfasern, die Leistung ausgewählter Vortexmoden gezielt zu verstärken oder abzuschwächen.

Markus A. Schmidt

Analog zum gerichteten Stromfluss in einer elektrischen Diode ermöglichen optische Isolatoren eine unidirektionale Lichttransmission entlang einer ausgezeichneten Richtung. Sie kommen in zahlreichen Anwendungen der Telekommunikation zum Einsatz, um beispielsweise das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der übertragenen Information zu verbessern. Zudem helfen sie, Laserinstabilitäten zu reduzieren, indem sie eine starke Rückstreuung in die verwendete Laserlichtquelle vermeiden. Um einen optischen Isolator zu realisieren, muss das verwendete System ein nichtreziprokes Verhalten aufweisen: Die Brechung der Zeitumkehrinvarianz macht vorwärts und rückwärts laufendes Licht unterscheidbar [1, 2]. Dazu muss das System das Licht zeitlich fortschreitend anders transmittieren als für negative Zeiten. Im Bereich der Optik gibt es

mehrere Möglichkeiten, ein nichtreziprokes Verhalten zu realisieren. In der Magnetooptik gelingt dies mittels des Faraday-Effekts, der die Drehung der Polarisationsrichtung einer linear polarisierten Lichtwelle beim Durchgang durch ein isotropes Medium unter Einfluss eines starken Magnetfeldes beschreibt [3]. Eine Alternative sind nichtlineare Effekte wie der optische Kerr-Effekt, also die intensitätsabhängige Änderung des Brechungsindex. Ein weiterer, neuer Ansatz besteht darin, akusto-optische Effekte auszunutzen, wie die Wechselwirkung von Licht mit akustischen Anregungen, zum Beispiel mittels der Brillouin-Streuung. Für die optische Isolation ist hier der Wellencharakter der akustischen Anregungen entscheidend, da die akustische Welle, die sich entlang einer ausgezeichneten Richtung ausbreitet, die Zeitumkehrinvarianz bricht.

Photonische Kristallfasern (Photonic Crystal Fibers, PCF) stellen eine Art Lichtwellenleiter dar, der eine periodische Anordnung von Mikro- und Nanokanälen entlang der Faserachse nutzt, um Licht transversal einzuschließen. Die Eigenschaften des Lichts wie Dispersion oder Intensitätsprofil entlang der Faser lassen sich in einzigartiger Weise beeinflussen [4]. Basierend auf bedeutenden technologischen Verbesserungen hat sich jüngst das Forschungsgebiet der verdrillten photonischen Kristallfasern etabliert [5]. Wissenschaftlich interessant ist die strikte Periodizität im Millimeterbereich entlang der Faserachse: Ähnlich der elektronischen Zustände, die sich in einem periodischen atomaren Potential in einem Halbleiter formieren, ergeben sich in einer solchen Faser charakteristische Eigenzustände, die chiralen Bloch-Moden. Diese neuartigen Zustände, die ein wirbelartiges Intensitätsprofil mit verschwindender Amplitude im Zentrum aufweisen (sog. Vortexmoden), treten nur in verdrillten Systemen auf und können einen Bahndrehimpuls tragen. Sie haben in der Quanten- und Telekommunikation zu intensiver Forschungstätigkeit geführt. Für eine abhörsichere Kommunikation im Quantenbereich lassen sich Vortexzustände beispielsweise verschränken und stellen einen zusätzlichen Freiheitsgrad dar. In der klassischen Nachrichtenübertragung dienen sie dazu, die Informationskapazität zu steigern. Daher erscheint die Realisierung verschiedener faserintegrierter Ansätze zur Manipulation von Vortexstrahlen von zunehmend großer Bedeutung.

Eine aktuelle Arbeit am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen stellt ein konkretes Konzept vor, um experimentell einen integrierten Isolator für Vortexstrahlen auf Basis akusto-optischer

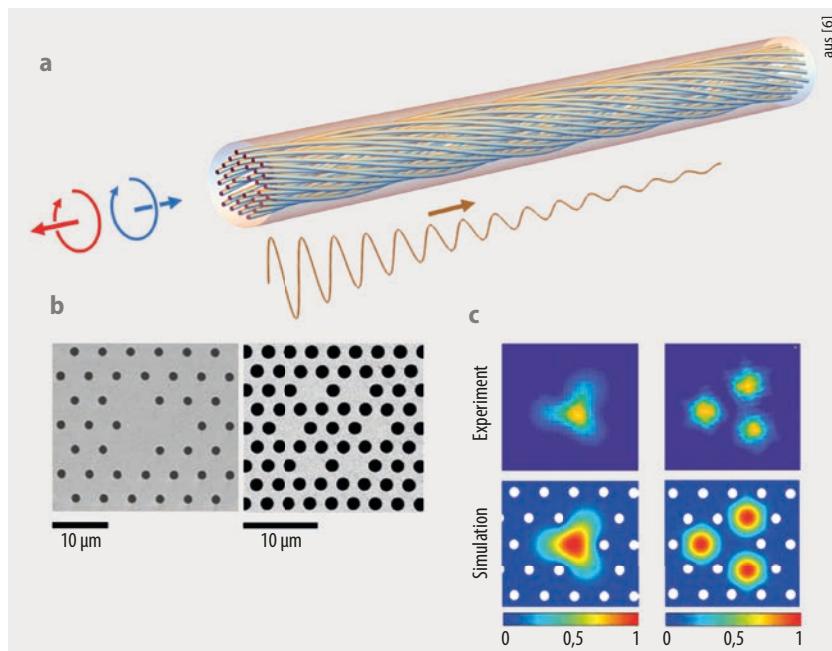


Abb. 1 In einer chiralen phototonischen Kristallfaser kann sich eine akustische Welle (a, braun) ausbreiten. Der Spin und die Richtung der azimutalen Phasen von Brillouin-Signal (rot) und Pumplicht (blau) bleiben erhalten. Im Querschnitt (b) unterscheiden sich die verwendeten chiralen Fasertypen. Die Intensitätsverteilung im Kern (c) stimmt für verschiedene Moden, die sich in den chiralen phototonischen Kristallfasern ausbilden, in Experiment und Simulation überein.

Wechselwirkungen in chiralen photonischen Kristallfasern zu realisieren (**Abb. 1a**) [6]. Birgit Stiller und Kollegen nutzten als Konzept das Topologie-sensitive Streuverhalten optischer Moden an einer akustischen Welle aus, welche sich entlang einer ausgewählten Faserrichtung in einer chiralen photonischen Kristallfaser ausbreiten (**Abb. 1b**): Starke Brillouin-Streuung und damit ein starkes Signal der rückwärts gestreuten optischen Welle (Stokes-Welle) tritt nur für eine bestimmte Kombination von Spin- und Bahndrehimpulsen von Pumpwelle und gestreuter Welle auf. Sind die Auswahlregeln nicht erfüllt, passiert die chirale Mode (**Abb. 1c**) die Kristallfaser ungestört. Das macht die vorwärts- und rückwärtslaufenden Moden effektiv diskriminierbar. Entscheidend für das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept ist der Einsatz der chiralen photonischen Kristallfaser: Sie ermöglicht es erstmals, gleichzeitig die Vortexmoden in einem Faserwellenleiter präzise zu kontrollieren und eine intensive akusto-optische Wechselwirkung innerhalb des Faserkerns zu realisieren. Die Pumpwelle dient dabei als Kontrolllicht, um das gestreute Signal zu beeinflussen und eine Ausbreitungsrichtung gezielt zu bevorzugen oder zu unterbinden. Insbesondere agiert dieser Mechanismus zudem modenselektiv. Somit wählt die Kontrollpumpe eine bestimmte Topologie, also eine bestimmte Kombination von Polarisation und Bahndrehimpuls einer Mode aus, während alle anderen Modentopologien unbeeinflusst bleiben. Das ermög-

licht es, bestimmte chirale Moden abzuschwächen oder zu verstärken. Aufgrund der Verstärkung ist diese Vorrichtung als akusto-optischer Leistungsverstärker oder -abschwächer für eine ausgewählte Mode zu betreiben.

Birgit Stiller und Kollegen konnten im Einzelnen in der Arbeit experimentell zeigen, dass die Hinzunahme des Kontroll-Pumpstrahls bei einer ausgewählten Frequenz einen Signalstrahl effektiv diskriminiert. Das System lässt sich daher als nichtreziproker Verstärker oder Abschwächer konfigurieren, indem die Frequenz des Kontrolllasers angepasst wird. In der Arbeit gelang es, eine sehr hohe Vortexstrahl-Diskriminierung von 22 Dezibel nachzuweisen (**Abb. 2**), die einem Abschwächungsfaktor von etwa 160 entspricht – ein Wert, der für akusto-optische Isolatoren bei der Grundmode den Stand der Technik darstellt.

Somit ist es in dieser Arbeit erstmals gelungen, ein vielversprechendes Konzept für einen moden-selektiven Isolator für Vortexstrahlen zu demonstrieren. Dieser basiert auf dem Prinzip der akusto-optischen Wechselwirkung, realisiert mittels Brillouin-Streuung. Wichtig ist hierbei, dass die generierte akustische Welle nur in eine Ausbreitungsrichtung propagiert, also die Reziprozität bricht, und dass alle involvierten Moden der Spin- und Bahndrehimpulserhaltung genügen müssen. Aufgrund des nahezu komplett faserintegrierten Aufbaus empfiehlt sich das Konzept für zahlreiche Anwendungen, von

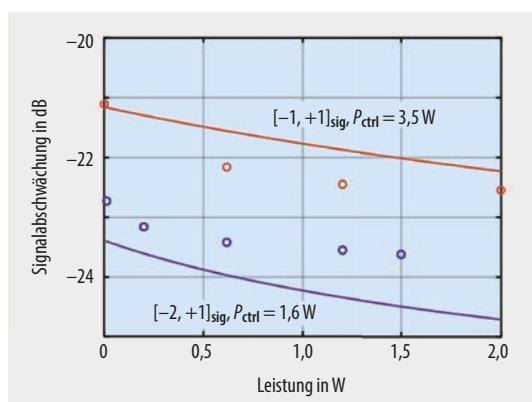


Abb. 2 Für verschiedene Topologien verläuft die gemessene Signalabschwächung der rückgestreuten Welle als Funktion der Leistung ähnlich. Experimentelle Daten (Punkte) und theoretische Vorhersagen (Linien) zeigen jeweils eine signifikante Signalabschwächung um 22 dB.

der Telekommunikation über Faserlaser bis hin zur Quanteninformationsverarbeitung und optischen Manipulation.

- [1] D. Jalas et al., *Nat. Photon.* **7**, 579 (2013)
- [2] C. Caloz et al., *Phys. Rev. Applied* **10**, 047001 (2018)
- [3] M. A. Schmidt et al., *Adv. Mat.* **23**, 2681 (2011)
- [4] P. St. J. Russell, *J. Lightwave Technol.* **24**, 4729 (2006)
- [5] P. St. J. Russell et al., *Phil. Trans. R. Soc. A* **375**, 20150440 (2017)
- [6] X. Zeng et al., *Sci. Adv.* **8**, eabq6064 (2022)

Der Autor

Prof. Dr. Markus A. Schmidt, Leibniz-Institut für Photonische Technologien, Albert-Einstein-Straße 9, 07745 Jena, Otto-Schott-Institut für Materialforschung, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Fraunhoferstr. 6, 07743 Jena

Kurzgefasst

Adieu, sterile Neutrinos

Das STEREO-Experiment nimmt seit 2017 Daten am Kernforschungsreaktor des Instituts Laue-Langevin in Grenoble. In zehn Metern Entfernung vom Reaktor und abgeschirmt von der äußeren Umgebung sucht es mit beispiellosem Präzision nach sterilen Neutrinos. Dieser zusätzliche Neutrino-Zustand, der nicht über die schwache Wechselwirkung agiert, könnte gemessene Anomalien in Antineutrinoströmen von Kernreaktoren oder die Natur der Dunklen Materie erklären. Im STEREO-Experiment würde sich ein steriles Neutrino durch eine positionsabhängige Ver-

zerrung der gemessenen Energieverteilung verraten. Bisher konnte das die französisch-deutsche Kollaboration, die STEREO betreibt, aber nicht beobachten – im Gegensatz zu mehr als 100 000 Neutrinos. Damit lässt sich die Existenz steriler Neutrinos mit einer statistischen Sicherheit von mehr als 95 Prozent ausschließen.

The STEREO Coll., Nature **613**, 257 (2023)

Ferroelektrischer Supraleiter

Ein Forschungsteam aus den USA und Japan hat nachgewiesen, dass zweidimensionales orthorhombisches Molybdän-Ditellurid

(T_d -MoTe₂) unterhalb seiner Sprungtemperatur zur Supraleitung von 2 K auch ferroelektrisch ist. Diese Kombination galt als unmöglich, weil sich Supraleitfähigkeit und makroskopische elektrische Polarisierung widersprechen. In T_d -MoTe₂ sind die Eigenschaften gekoppelt: Dreht ein äußeres elektrisches Feld die Richtung der Polarisierung um, wird aus dem Supraleiter ein normalleitendes Metall. Daher könnte T_d -MoTe₂ – je nach angelegtem Feld – als Magnetfeldsensor, Photonendetektor oder Qubit agieren.

A. Jindal et al., Nature **613**, 48 (2023)