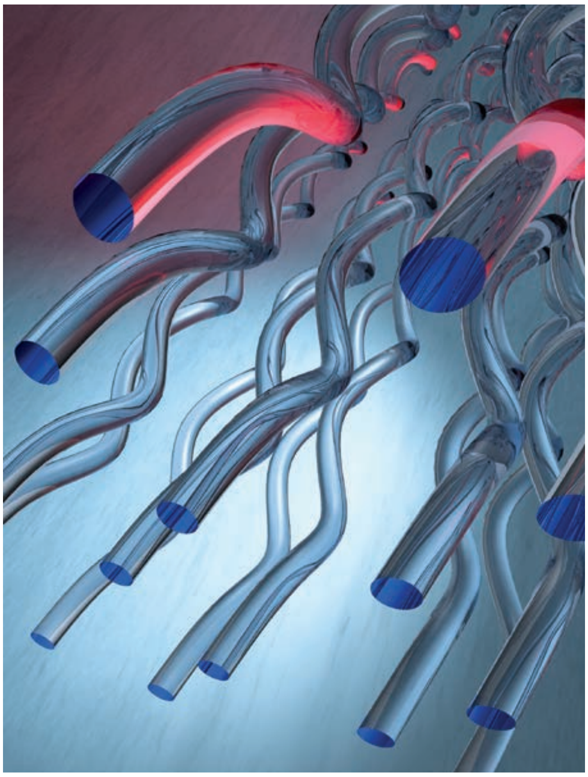
PHOTONIK

Erhellende Topologie

Topologische Methoden erklären exotische Materiezustände und bahnen neue Wege in der Photonik.

Eric Meyer und Alexander Szameit

Lange Zeit galt die Topologie als reines Teilgebiet der Mathematik, das sich allgemein mit Eigenschaften von Strukturen befasst, die unter stetigen Verformungen erhalten bleiben. Doch Topologie ermöglicht nicht nur einen neuen Blick auf abstrakte Strukturen, sondern hat mittlerweile auch Einzug in die Physik gehalten. Topologische Methoden erlauben neue Erkenntnisse bei exotischen Phasen der Materie und versprechen faszinierende Durchbrüche bei der optischen Kommunikation.



Das sind nicht etwa spiralförmige Trinkhalme, sondern Wellenleiter, die dank topologischer Prinzipien Photonen verlustfrei übertragen können.

Was verbindet die sieben Brücken in Königsberg, Schwarze Löcher und Krawatten? All dies sind Beispiele dafür, wie sich grundlegende Fragen mit topologischen Mitteln beantworten lassen. Topologie erklärt, weshalb sich kein Rundweg über die sieben Königsberger Brücken finden lässt, dass Schwarze Löcher im Universum eine Singularität besitzen müssen und wieso es genau 266 682 Möglichkeiten gibt, eine Krawatte zu binden [1].

Die Topologie ist als eigene mathematische Disziplin noch vergleichsweise jung. In einfachen Worten befasst sie sich mit den Eigenschaften geometrischer Gebilde, die bei „elastischen Verformungen“ wie Dehnen, Stauchen, Verbiegen oder Verzerren erhalten bleiben. Man sagt, die betreffenden Gebilde seien topologisch äquivalent oder „homöomorph“: Anschaulich gesagt bleiben Randpunkte weiterhin Randpunkte, und Kreuzungen bleiben Kreuzungen, selbst wenn sich Winkel und Abstände ändern (**Abb. 1**). Außerdem bleibt ein geschlossener Linienzug als solcher erhalten. „Auf dem Rand liegend”, „innen”, „außen”, „sich schneidend”, „geschlossen” sind topologisch invariante Eigenschaften. Topologie formalisiert den Begriff „Nähe“, ähnlich wie die algebraischen Strukturen die Rechengesetze formalisieren. Ziel ist es dabei, eine Menge von Objekten zu klassifizieren, d. h. topologisch äquivalente Objekte in Klassen zusammenzufassen.

Leonhard Euler war der erste Mathematiker, der topologische Fragen eingehend untersucht hat. Das von ihm im Jahr 1736 behandelte Königsberger Brücken-Problem war im Grunde die erste Anwendung der heutigen Graphentheorie. Eine weitere seiner Leistungen ist die Eulersche Polyederformel. Ausgangspunkt ist dabei folgende Überlegung: Addiert man bei einer dreiseitigen Pyramide die Anzahl der Ecken ($E = 4$) und die der Seitenflächen ($S = 4$) und zieht davon die Anzahl der Kanten ($K = 6$) ab, ergibt sich $4 + 4 - 6 = 2$ (**Abb. 2 oben**). Erstaunlicherweise gilt dies bei einem Würfel genauso, mit $E = 8$, $S = 6$ und $K = 12$ liefert die obige Rechnung ebenfalls 2. Damit nicht genug, auch bei einer Doppelpyramide ($E = 5$, $S = 6$, $K = 9$) erhält man dasselbe Ergebnis. Aber es gibt auch Körper, bei denen $E + S - K$ den Wert 0 liefert (**Abb. 2 unten**). Euler erkannte, dass das Ergebnis dieser Rechnung nicht von der speziellen Form des Körpers abhängt, sondern nur

KOMPAKT

- Nicht nur Oberflächen von Körpern, sondern auch Banddiagramme periodischer Medien lassen sich topologisch charakterisieren.
- Das führte zur Entdeckung neuartiger „topologischer“ Phasenübergänge, die anders als klassische Übergänge die innere Symmetrie eines Systems nicht ändern.
- Topologische Isolatoren sind im Inneren Isolatoren, erlauben aber besonders stabile Oberflächenströme.
- Ein analoges Verhalten ist auch in der Photonik möglich, wo sich topologische Prinzipien nutzen lassen, um Licht gezielt zu steuern und zu kontrollieren.

M.Sc. Eric Meyer und **Prof. Dr. Alexander Szameit**, Institut für Physik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Str. 23 – 24, 18059 Rostock

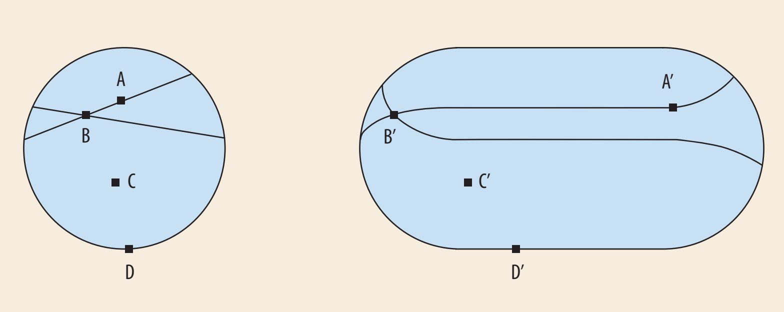


Abb. 1 Diese beiden Figuren sind im topologischen Sinne äquivalent: Man erkennt, dass Randpunkte weiterhin Randpunkte bleiben; Punkte im Innenraum bleiben im Innenraum und Kreuzungen bleiben Kreuzungen, auch wenn sich Winkel und Abstände ändern.

von der Anzahl seiner Löcher. Er fasste dies in seiner berühmten Polyederformel zusammen:

$$E + S - K = 2 - 2g,$$

wobei g die Anzahl der Löcher ist, auch „Genus" genannt. Geometrische Körper lassen sich in topologische Klassen einteilen, die nur durch ihren Genus, also die Zahl ihrer Löcher, definiert sind. Eine Brezel hat beispielsweise den Genus 3. Der Mensch ist übrigens topologisch gesehen einer Brezel äquivalent – den interessierten Lesern sei dies als Denkaufgabe mit auf den Weg gegeben. Die Größe $\chi = 2 - 2g$ ist heute als „Euler-Charakteristik" bekannt und kennzeichnet die zugrundeliegende Topologie eines Körpers.

Rund hundert Jahre nach Euler hoben Carl Friedrich Gauß und der französische Mathematiker Pierre Ossian Bonnet diese Erkenntnis auf eine neue Stufe. Sie konnten zeigen, dass sich die Euler-Charakteristik eines Körpers mit Hilfe der Krümmung seiner Oberfläche berechnen lässt. Dieser Satz von Gauß-Bonnet zeigt auf eindrucksvolle Weise, dass die Topologie eines Körpers, also die Euler-Charakteristik, untrennbar mit seiner Geometrie, d. h. der Oberflächenkrümmung, verbunden ist. Dadurch kann man Körper mit glatten Oberflächen ohne Ecken und Kanten dennoch topologisch eindeutig charakterisieren (**Abb. 3**): Die Kugel ist somit der Grenzfall eines Würfels oder einer Pyramide mit unendlich vielen Ecken, Kanten und Flächen und besitzt die Euler-Charakteristik 2. Der Satz von Gauß-Bonnet bestätigt dieses Ergebnis direkt. Ein Quader mit einem Loch geht im gleichen Grenzübergang in einen Torus – einen „Donut" – über und besitzt somit den Genus 1 und die Euler-Charakteristik 0. In der Tat ist es möglich, alle Körper, egal welcher Form, jeweils eindeutig einer topologischen Klasse zuzuordnen. Alle Körper einer bestimmten Klasse gehen durch Dehnen, Stauchen, Verbiegen und Verzerren ineinander über, mit faszinierenden Konsequenzen: So lässt sich eine Kreisscheibe in ein Dreieck deformieren, eine Kugel in einen Löffel oder ein Donut in eine Kaffeetasse mit einem Henkel. „Stechen" und „Schneiden" sind dabei ausdrücklich nicht erlaubt, denn das würde die Topologie verändern.

Von der Mathematik in die Physik

Das Besondere am Satz von Gauß-Bonnet ist, dass er in seiner allgemeinsten Form allen Flächen eine Euler-Charakteristik zuordnet, also nicht nur Oberflächen von Körpern wie einer Kugel oder einem Torus, sondern insbesonders auch offenen Flächen mit einem Rand, z. B. einem Möbius-Band oder auch einer perfekten Ebene (**Abb. 4**). Diese Erkenntnis war ein wissenschaftlicher Paukenschlag: Damit hielt die Topologie als ursprünglich rein mathematische Disziplin Einzug in die Naturwissenschaften, vor allem in die Physik.

Der mit Abstand wichtigste Typ von Flächen in der Physik sind die Banddiagramme periodischer Medien. Ein wichtiges Beispiel ist das Banddiagramm von Graphen (**Abb. 5**), das als „Wundermaterial" seit einigen Jahren höchste Aufmerksamkeit erhält [2]. Diese Banddiagramme existieren nur im inversen Raum (Fourier-Raum) und beschreiben den Zusammenhang zwischen Energie und Impuls einer sich im Medium ausbreitenden Welle. Alle Eigenschaften des Systems sind im Banddiagramm kodiert; die Kunst ist, diese Informati-

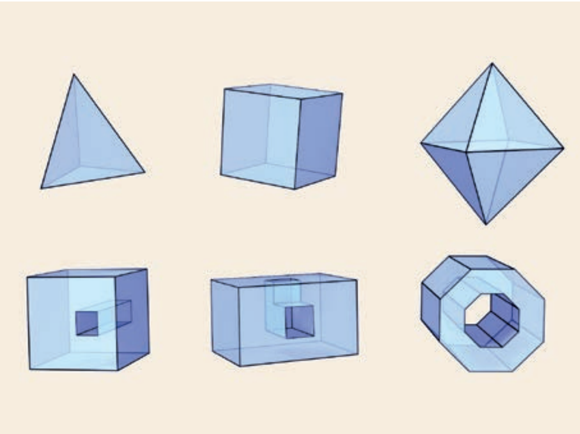


Abb. 2 Die Eulersche Polyederformel teilt Körper in topologische Klassen ein und berechnet sich aus der Anzahl der Ecken (E) plus der Anzahl der Seiten (S) minus der Anzahl der Kanten (K). Für alle oberen Körper ergibt sich $E + S - K = 2$, für alle unteren 0.

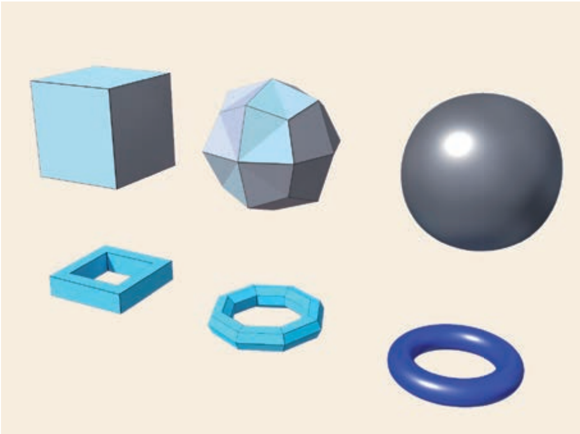


Abb. 3 Das Gauß-Bonnet-Theorem verbindet die globalen Eigenschaften eines Körpers (seine Topologie) mit seinen lokalen geometrischen Eigenschaften (seiner Oberflächenkrümmung). In diesem Sinne sind eine Kugel und ein Würfel topologisch äquivalent, ebenso ein Quader mit Loch und ein Donut.

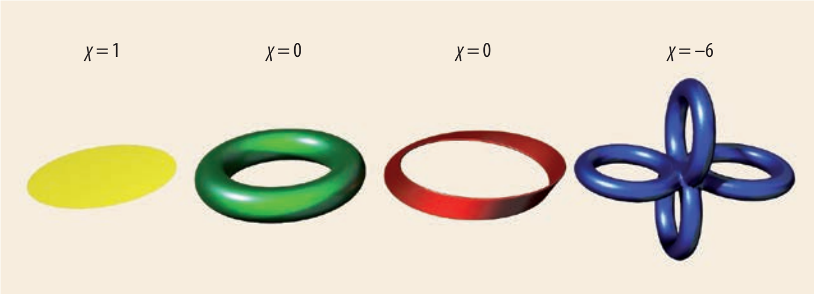


Abb. 4 Jeder Fläche lässt sich durch eine Euler-Charakeristik $\chi = 2 - 2g$ topologisch klassifizieren. Dabei zeigt sich, dass ein Torus zur selben topologischen Klasse wie ein Möbius-Band gehört.

on geschickt zu extrahieren. Eine fortschrittliche Möglichkeit dafür sind topologische Methoden zur Analyse der Bandstruktur. Dazu ist es jedoch nötig, dem Medium eine Topologie zuzuordnen. Das ist alles andere als trivial, da die Bandstruktur im Fourier-Raum definiert ist. Dort ist die Bedeutung von „Loch“ eine völlig andere. Ein heute allgemein akzeptierter Ansatz ist, der Bandstruktur eine so genannte Berry-Krümmung zuzuordnen, eine Größe, die Michael Berry im Jahr 1984 eingeführt hat. Auf Basis dieser Krümmung ist es möglich, mit Hilfe eines dem Gauß-Bonnet-Satzes ähnlichen Ausdrucks eine Größe zu definieren, die analog zur Euler-Charakteristik ist: die „Chern-Nummer“, eingeführt 1946 durch Shiing-Shen Chern. Zu jedem einzelnen Band in der Bandstruktur eines periodischen Mediums gehört eine eigene Chern-Nummer, je nachdem, welche Berry-Krümmung im Band vorzufinden ist. Die Chern-Nummern in einem System können nur ganzzahlige Werte annehmen, was somit wiederum die Einordnung eines Bandes in eine topologische Klasse erlaubt. Dies ist die Grundlage einer ganzen Reihe erst kürzlich entdeckter physikalischer Phänomene, insbesondere der topologischen Isolatoren, von denen noch die Rede sein wird.

Topologische Phasen

Wie wertvoll topologische Methoden in der Physik sind, belegt der Physik-Nobelpreis 2016. Die drei britischen Forscher David Thouless, Michael Kosterlitz und Duncan Haldane wurden damit geehrt, weil sie mit topologischen Methoden erklären konnten, wie exotische Materiezustände entstehen [3]. Die drei bekanntesten Zustände von Materie sind fest, flüssig und gasförmig. Wandeln sich diese Aggregatzustände ineinander um, ändert sich die Symmetrie, etwa indem Wasser, wenn es zu Eis gefriert, eine Kristallstruktur ausbildet. Daneben können unter bestimmten Bedingungen weitere Zustände bzw. „Phasen“ auftreten. Eines der wichtigsten Beispiele ist die 1911 erstmals beobachtete supraleitende Phase, bei der ein Festkörper bei sehr niedrigen Temperaturen sprungartig seinen elektrischen Widerstand verliert. Ein weiterer Typus exotischer Phasen sind Suprаflüssigkeiten, in denen es keine innere Reibung mehr gibt und die als dünner Film an der Wand eines Behälters langsam emporkriechen. Doch obwohl diese Phänomene experimentell sehr gut untersucht waren, fehlte es der Physik an einer guten Erklärung für deren Auftreten.

Lange schien es ausgemacht, dass Supraleitung und Suprafluidität nur in ausgedehnter dreidimensionaler Materie auftreten sollte, nicht aber in dünnen Schichten, in denen sich die Ladungsträger nur in zwei Raumrichtungen bewegen können. Dort, so nahm man an, würden Wärmefluktuationen jegliche Ordnung der Elektronen und Atome sofort zerstören, sogar am absoluten Temperatur-Nullpunkt. Dass man sich hier gründlich geirrt hatte, zeigten viele Experimente deutlich. Thouless und Kosterlitz fanden 1973 schließlich eine zufriedenstellende Erklärung für die Phasenübergänge in ultradünner, kalter Materie. Bei

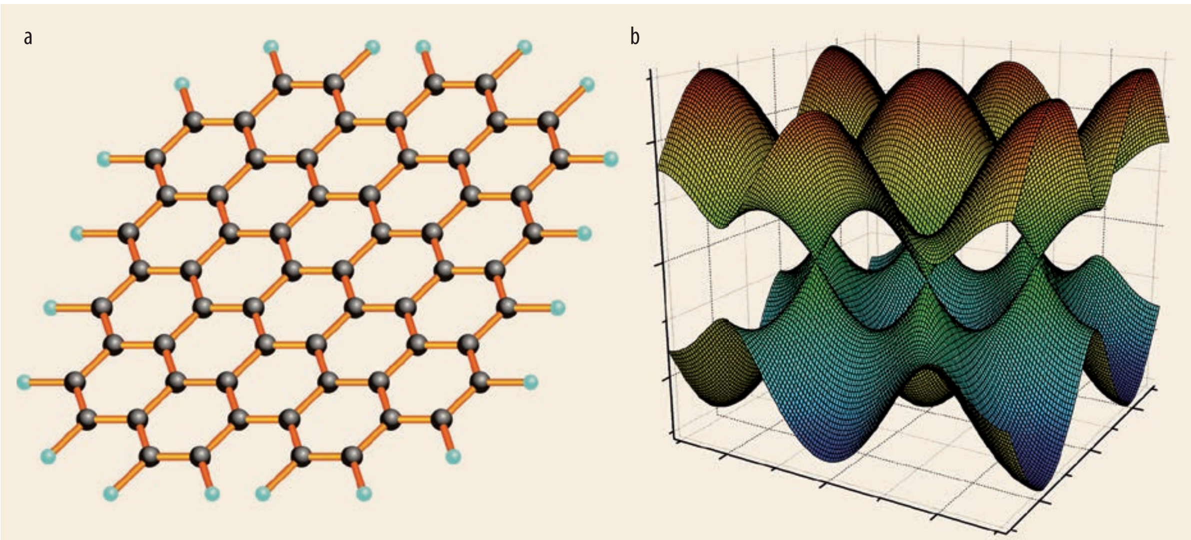


Abb. 5 Graphen ist eine einzige Lage aus Kohlenstoffatomen in Honigwabenform (a) und zeigt in seiner Bandstruktur komplexen Flächen, die sich topologisch charakterisieren lassen (b).

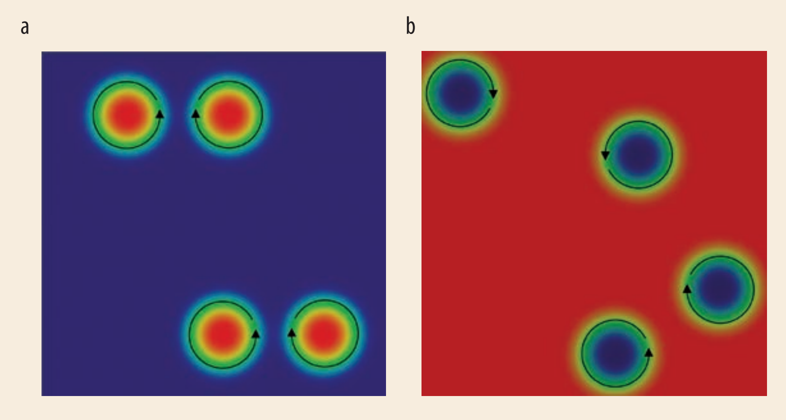


Abb. 6 Bei niedrigen Temperaturen treten zwei gegenläufige Wirbel in den Elektronenspins als Paar auf, sodass der Drehsinn sich aufhebt (a). Oberhalb einer bestimmten Temperatur trennen sich beide Wirbel, sodass sich das Verhalten des Materials plötzlich auf großen Skalen ändert (b).

der Betrachtung der Eigenschaften eines Stoffes, die unverändert bleiben sollten, selbst wenn sich das Material stark verformt, verwendeten sie topologische Modelle. Ihre Idee war, dass sich bei den topologischen Phasenübergängen eines zweidimensionalen (also völlig flachen) Systems die innere Symmetrie des Systems nicht ändert, im völligen Gegensatz zu den klassischen Zustandsänderungen.

Physikalisch lässt sich der inzwischen nach Kosterlitz und Thouless benannte Übergang interpretieren, indem man das Verhalten spezieller quantenmechanischer Wirbel, die sich aus den Elektronenspins bilden, auf einer Oberfläche betrachtet (**Abb. 6**): Bei niedrigen Temperaturen treten zwei gegenläufige Wirbel als Paar auf. Analog zu den entgegengesetzten Ladungen in einem Atom, das nach außen elektrisch neutral ist, hebt sich der Gesamtdrehsinn der beiden gekoppelten Spinwirbel auf. Beim Kosterlitz-Thouless-Phasenübergang trennen sich allerdings beide Wirbel ähnlich wie zwei gleichnamige Ladungen. Dies hat weitreichende Folgen: Das Verhalten des Materials ändert sich plötzlich auf großen Skalen. Dieser topologische Ansatz erklärte erstmals, wie und warum extrem dünne Materialschichten in die supraleitende Phase wechseln und schuf die Basis für ein völlig neues Kapitel in der Festkörperphysik. Haldane, der zeitweise mit Thouless zusammenarbeitete, übertrug die Ergebnisse seiner Kollegen auf Atomketten – also von einer zweidimensionalen auf eine eindimensionale Struktur. Auch dies sorgte für eine neue Sicht auf Vorgänge im atomaren Bereich, mit der sich voraussagen ließ, welche Materialien in die supraleitende Phase übergehen und welche nicht.

David Thouless konnte zudem 1983 den drei Jahre zuvor von Klaus von Klitzing entdeckten Quanten-Hall-Effekt beschreiben – ein ebenfalls zweidimensionales, quantenmechanisches Phänomen. Bei diesem tritt an Grenzflächen bei extrem tiefen Temperaturen und starken Magnetfeldern senkrecht zu einem Strom eine Spannung auf, die nur Vielfache eines bestimmten Werts annimmt. Thouless übertrug auch hier Eigenschaften der Topologie auf die stufenweise Erhöhung der Leitfähigkeit beim Quanten-Hall-Effekt und konnte dabei an sein Erfolgsrezept aus den 1970er-Jahren anknüpfen. Seine Theorie der „topologischen Quantenflüssigkeiten“ wurde später vollständig experimentell bestätigt.

Die Arbeiten von Thouless, Kosterlitz und Haldane haben die Macht topologischer Argumente in der Physik eindrucksvoll demonstriert. Ihre Ideen waren der Anfang einer ganzen Reihe bahnbrechender Forschungsresultate; eine Entwicklung, die in der Beschreibung einer völlig neuartigen Materialklasse kulminierte. 2005 postulierten Charles Kane und Shoucheng Zhang die Existenz von „topologischen Isolatoren“. Diese Materialien sollten sehr ungewöhnliche Eigenschaften besitzen: Eigentlich sind sie Isolatoren, leiten in ihrem Inneren also keinen elektrischen Strom [4]. An ihrer Oberfläche jedoch verhalten sie sich wie metallische Leiter und können Strom sogar fast verlustfrei transportieren. Darüber hinaus sind diese Oberflächenströme, auch „Oberflächenzustände“ genannt, äußerst stabil gegenüber Fehlstellen im Kristall und Temperaturschwankungen, lassen sich jedoch gezielt durch Magnetfelder beeinflussen. Möglich wird all das durch die Spin-Bahn-Kopplung, also die Wechselwirkung zwischen den für die Stromleitung verantwortlichen Elektronen und ihrem Spin (**Abb. 7**).

Dieses außergewöhnliche Verhalten geht auf topologische Gesetzmäßigkeiten zurück, was auch den Namen dieser neuartigen Materialien prägte: Die Chern-Nummer in der Bandstruktur ist bei topologischen Isolatoren ungleich Null; das System wird als „topologisch nicht-trivial“ bezeichnet. Das umgebende Medium, normalerweise Luft oder Vakuum, ist jedoch topologisch trivial, d. h. die Chern-Nummern der Bänder sind Null. David Thouless zeigte in den 1970er-Jahren, dass zwischen einem topologisch trivialen und einem topologisch nicht-trivialen Medium stets mindestens ein Oberflächenzustand existiert, der „topologisch geschützt“, also äußerst robust gegen nahezu alle Formen von Störung ist. Die Oberflächenströme in topologischen Isolatoren entsprechen genau solchen Zuständen. Die Chern-Nummer gibt die Anzahl solcher

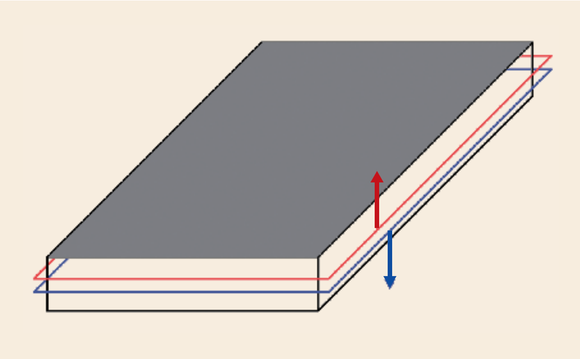


Abb. 7 An der Oberfläche topologischer Isolatoren können Ströme verlustfrei transportiert werden, da sie stabil gegen Fehlstellen im Kristall und Temperaturschwankungen sind. Die farbigen Pfeile stellen die jeweilige Ausrichtung des Elektronenspins dar; die Ströme bewegen sich in entgegengesetzter Richtung um den Körper.

topologisch geschützten Oberflächenzustände an. Im übertragenen Sinne sind dies Zustände, die nun im Inneren des Systems fehlen, sodass die Chern-Nummer zumindest etwas ähnliches wie „Loch“ bedeutet. Da topologische Isolatoren vermutlich auch bei Raumtemperatur existieren, sind diese Materialien insbesondere für die Computertechnik hochinteressant: So wären neuartige Schalt- und Speicherelemente denkbar, die wesentlich schneller und ressourceneffizienter als ihre heutigen Versionen sind. Schon rasch nach der Vorhersage konnten Physiker die ersten topologischen Isolatoren identifizieren, allen voran Laurens Molenkamp von der Universität Würzburg. Heute kennt man bereits 30 verschiedene Materialien, die entsprechende Eigenschaften zeigen.

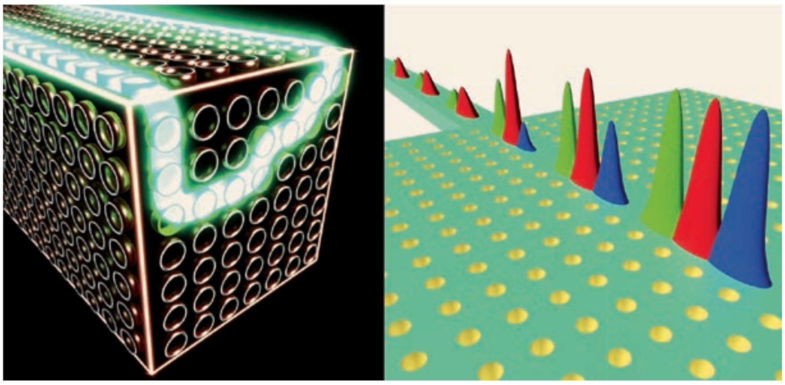


Abb. 8 Mit topologisch geschützten Zuständen in optischen Medien könnte sich Licht innerhalb kleinster Bereiche auf beliebigen dreidimensionalen Pfaden führen lassen (links). Davon könnten neuartige und robuste Kommunikationssysteme profitieren. Darüber hinaus wäre es denkbar, langsames Licht in speziellen Kanälen streufrei über bisher unerreichte Distanzen zu führen (rechts).

Topologische Photonik

Mit dem Erfolg der topologischen Isolatoren in der Festkörperphysik kam der Wunsch auf, topologische Prinzipien auch auf Licht anzuwenden. Denn topologisch geschützte Zustände versprechen faszinierende Anwendungen in der Photonik. So könnte sich Licht innerhalb kleinster Bereiche auf beliebigen dreidimensionalen Pfaden führen lassen, was von unschätzbarem Wert für rein optische Schaltkreise wäre (**Abb. 8**). Zusätzlich eröffnet sich die Möglichkeit, „langsames Licht“ in speziellen Kanälen über bisher unerreichte Distanzen zu führen. Bisher ist langsames Licht nur auf Strecken unterhalb eines Millimeters gezähmt. Mit topologischen Mechanismen könnte es gelingen, in den Meterbereich vorzustoßen. Langsames Licht wäre besonders attraktiv für die Telekommunikation, weil es deutlich weniger rauschanfällig ist und daher auch weniger Verstärkung erfordert. Darüber hinaus könnte man es für optische Schaltvorgänge nutzen und damit praktisch überall einsetzen – vom Telefon bis zum Supercomputer. Langsames Licht ist allerdings sehr empfindlich in Bezug auf Schwankungen in der Frequenz. Damit eignet es sich aber in besonderem Maße für die optische Sensorik, speziell in Interferometern.

All diese Aussichten zeigen, dass die „topologische Photonik“ keine anwendungsferne Spielerei darstellt. Leider ist es aber nicht einfach, die Idee des topologischen Isolators auf Licht zu übertragen. Der von Kane und Zhang vorgeschlagene Mechanismus funktioniert nur bei Fermionen wie den Elektronen, nicht jedoch bei Photonen, die Bosonen sind. Um topologisch geschützte photonische Oberflächenzustände zu realisieren, ist es jedoch zwingend notwendig, im Inneren des Systems eine von Null verschiedene Chern-Nummer zu erreichen. Eine Möglichkeit ist der Einsatz starker Magnetfelder und gyromagnetischer Komponenten, was Haldane 2005 theoretisch vorgeschlagen hat. Dieser Idee folgend gelang es der Gruppe um Marin Soljacic am MIT im Jahre 2009 erstmals, topologisch geschützte Randzustände im Mikrowellenbereich zu demonstrieren. Das gilt gemeinhin als Beginn der experimentellen Phase der topologischen Photonik. Dieser Ansatz ist jedoch für optisches Licht nicht möglich, da in diesem Wellenlängenbereich die magnetischen Eigenschaften aller Materialien vernachlässigbar klein sind.

Eine vielversprechende Idee für topologische Effekte im sichtbaren Spektralbereich war es, das zugrundeliegende photonische System zeitlich zu modulieren,

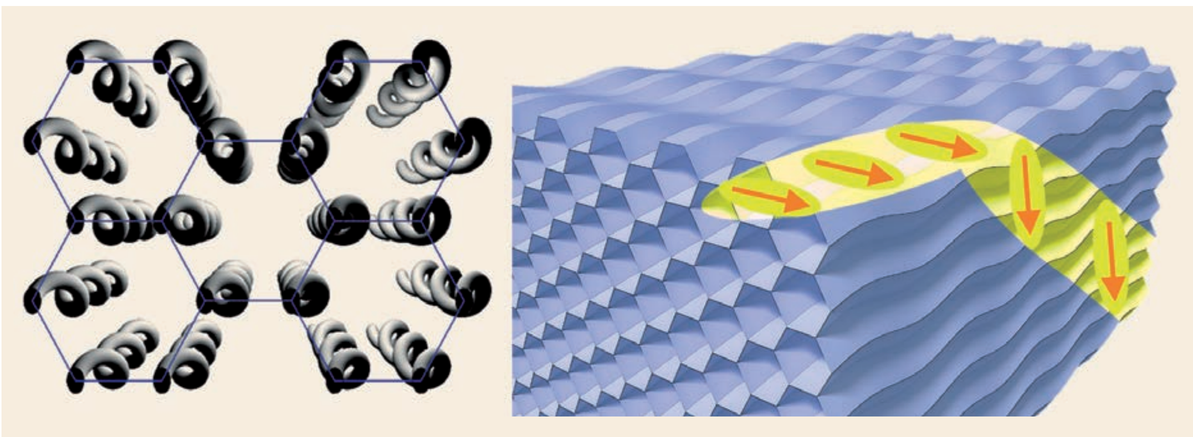


Abb. 9 Photonische topologische Isolatoren ließen sich erstmals in komplexen Systemen verdrillter Wellenleiter realisieren (links). Das Licht, das am Rand der Struktur eingekoppelt wird, läuft streufrei und ungehindert am Rand des Systems entlang, um Ecken und Kanten, selbst um Defekte herum (rechts).

sodass die fundamentale Zeitumkehrsymmetrie gebrochen wird. Dies – so lässt sich theoretisch zeigen – sollte die Chern-Nummer des Systems ändern. Die Modulationsfrequenz sollte jedoch im gleichen Bereich wie die Lichtfrequenz liegen, was bei optischem Licht einer Freqenz im Petahertz-Bereich entspricht. Eine Schwingung dauert dann nur etwa zehn Femtosekunden (10^{-14} s). Elektronisch ist dies nicht zu erreichen; die schnellsten elektronischen Schaltungen sind immer noch rund 10 000-mal langsamer.

Verdrillt moduliert

Das Problem der nötigen hohen Modulationsfrequenz konnten wir lösen, indem wir ein System gekoppelter Wellenleiter benutzten, in dem die Propagationsdistanz in der photonischen Struktur die Rolle der herkömmlichen Zeit übernimmt [5].[1)] Eine Distanz von einem Zentimeter entspricht dabei ungefähr einer Zeit von zehn Femtosekunden. Auf diese Weise beeinflusst eine räumliche Modulationsfrequenz entlang der Wellenleiter im Millimeterbereich das propagierende Licht wie eine echte zeitliche Modulation im Petahertz-Bereich. Dies gelang durch helixförmig verdrillte Wellenleiter. Unsere Berechnungen ergaben, dass in einem solchen System in der Tat die Chern-Nummern im Banddiagramm von Null verschieden sind, sodass sich topologisch geschützte Randzustände bilden. Mit den spiralförmigen optischen Wellenleitern in einem speziellen Bienenwabengitter konnte Licht streufrei und ungehindert am Rand des Systems entlang und um Ecken und Kanten laufen (**Abb. 9**). Selbst Defekte im System, etwa in Form von entfernten oder hinzugefügten Wellenleitern, würden die Lichtpropagation nicht stören. Unsere Ergebnisse demonstrierten daher erstmalig, dass topologisch geschützte Randzustände auch für optische Systeme im sichtbaren Wellenlängenbereich existieren und dass sich in optischen Strukturen die Chern-Nummern der Bänder in der Tat durch periodische Modulation des Systems beeinflussen lassen.

Nach Bekanntwerden unserer Experimente brachten weitere Arbeiten in kurzer Folge das Feld der topologischen Photonik entscheidend weiter. So gelang es, topologische Randzustände in Metamaterialien im Subwellenlängenbereich [6] oder auch in Ringresonatoren aus Silizium [7] zu demonstrieren, was von überragender Bedeutung für die Siliziumoptik ist. Ein großer Vorteil optischer Systeme ist, dass in ihnen eine Reihe experimenteller Einschränkungen wie in der Festkörperphysik nicht vorkommen: insbesondere Vielteilcheneffekte, welche die Beobachtung einzelner Elektronen äußerst erschweren, und Gitterschwingungen, die viele Effekte überdecken, die nur in statischen Systemen auftreten. Daher lassen sich in optischen Systemen auch Phänomene beobachten, die in Festkörpern nur sehr schwer oder gar nicht nachzuweisen sind. So gelang es, in speziell entworfenen optischen Systemen einen „anomalen topologischen Isolator“ nachzuweisen, bei dem topologisch geschützte Oberflächenzustände existieren, obwohl die Chern-Nummer Null ist [8]. Weiterhin wurden ungewöhnliche „PT-symmetrische“ topologische Oberflächenzustände nachgewiesen; diese Zustände basieren auf einer alternativen „nicht-hermitischen“ Quantenmechanik, die erst vor wenigen Jahren entwickelt wurde [9].

1) „Wir“ sind in diesem Fall meine Arbeitsgruppe, die damals noch an der Universität Jena angesiedelt war, und die Gruppe um Moti Segev am Technion in Israel.

Randzustände im Zentrum der Forschung

Neben dem offensichtlichen Interesse der Grundlagenphysik, basierend auf der unerwarteten Verbindung von Topologie und Licht, ermöglichen topologische Prinzipien hochgradig robuste optische Elemente, die unempfindlich gegen äußere und innere Störungen sind. Damit könnten sich etwa Einkoppelverluste und Fabry-Pérot-Rauschen durch Rückreflexion in optischen Systemen um Größenordnungen verringern lassen. Topologisch geschützte Oberflächenzustände könnten bei der klassischen Signalübertragung den Energiebedarf deutlich reduzieren und bei der Übertragung nichtklassischer Zustände die quantenmechanische Kohärenz erhöhen. Genau wie topologische Isolatoren in der Festkörperphysik ist für das neue Forschungsgebiet der topologischen Photonik in vieler Hinsicht eine leuchtende Zukunft zu erwarten [10].

Literatur

[1] *D. Hirsch* et al., PeerJ Computer Science **1**:e2 (2015)
[2] *B. Trauzettel*, Physik Journal, Juli 2007, S. 39 und *P. Recher* und *B. Trauzettel*, Physik Journal, Dezember 2010, S. 22
[3] *R. Thomale*, Physik Journal, Dezember 2016, S. 24
[4] *F. Pollmann* und *A. Schnyder*, Physik Journal, August/September 2015, S. 65
[5] *M. C. Rechtsman* et al., Nature **496**, 196 (2013)
[6] *A. P. Slobozhanyuk* et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 123901 (2015)
[7] *M. Hafezi* et al., Nature Phot. **7**, 1001 (2013)
[8] *L. J. Maczewsky* et al., Nature Commun. **8**, 13756 (2017)
[9] *S. Weimann* et al., Nature Mater. doi:10.1038/nmat4811 (2015)
[10] *L. Lu* et al., Nature Photonics **8**, 821 (2014)

DIE AUTOREN

Eric Meyer (FV Quantenoptik / Photonik) hat in Rostock Physik studiert. Nach seinem B.Sc. (2014) und seinem M.Sc. (2016) über theoretische quantenoptische Themen arbeitet er nun in der Gruppe um Alexander Szameit an seiner Promotion.

Alexander Szameit (FV Quantenoptik/ Photonik, Oberflächenphysik) hat in Halle (Saale) und Jena Physik und Astronomie studiert. Nach Diplom und Promotion in Jena und einem zweijährigen PostDoc-Aufenthalt am Technion in Haifa (Israel) kehrte er als Nachwuchsgruppenleiter und Juniorprofessor 2011 an die Uni Jena zurück. Er habilitierte sich 2015 und leitet seit 1. Dezember 2016 an der Uni Rostock den Lehrstuhl für „Experimentelle Festkörperoptik“. Der bekennende Star-Trek-Fan wurde für seine Arbeiten mehrfach geehrt, etwa mit dem Promotionspreis der DPG, der Adolph-Lomb-Medaille der Optical Society of America und dem Rudolph-Kaiser-Preis für experimentelle Physik.

