

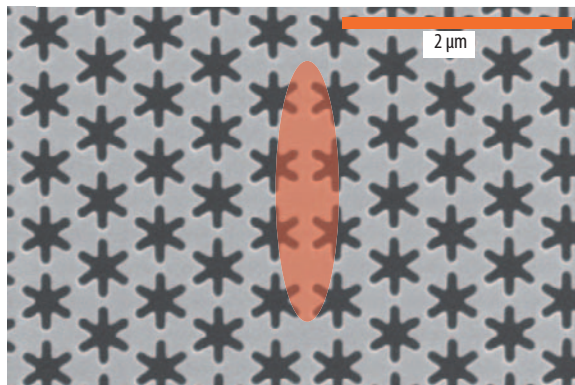
■ Licht und Schall im künstlichen Kristall

Zweidimensionale „optomechanische Kristalle“ versprechen neue Möglichkeiten für die Kopplung elektromagnetischer und mechanischer Schwingungen.

Schrödingers Katze, das berühmte Gedankenexperiment aus dem Jahr 1935, hatte einen weniger bekannten, aber sehr viel realistischeren Vorläufer. In einem Brief an Sommerfeld vom Dezember 1931 stellt Schrödinger folgende Situation dar: Ein Lichtquant wird von einem makroskopischen Spiegel reflektiert und überträgt auf diesen seinen doppelten Impuls. Dadurch würden die Zustände von Licht und Spiegelbewegung quantenmechanisch miteinander verschränkt. Heutzutage studieren weltweit zahlreiche Forscher genau diese Wechselwirkung in der „Optomechanik“ [1] – ein sich rasch entwickelndes Gebiet mit großem Potenzial, nicht zuletzt für sensitive Messungen, Quanteninformationsverarbeitung, fundamentale Tests der Quantenmechanik oder die Kopplung hybrider Quantensysteme.

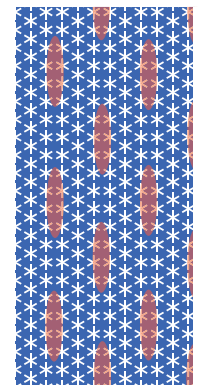
Unter den vielen möglichen experimentellen Realisierungen sind die „optomechanischen Kristalle“ besonders vielversprechend [2]. Dabei handelt es sich um periodisch strukturierte Dielektrika, etwa aus Silizium. Sie stellen für das Lichtfeld einen photonischen Kristall dar, generieren also eine Bandstruktur für die Ausbreitung von Lichtwellen. Wenn ein solcher „Kristall“, z. B. in der Form eines eindimensionalen Nanobalkens, freitragend fabriziert wird, können auch Schallwellen mit geringen Verlusten propagieren und sehen ebenfalls eine Bandstruktur. Am Ort eines gezielt eingebrachten Defektes werden dann sowohl optische Moden als auch mechanische Vibrationsmoden auf der Mikrometerskala lokalisiert. Die optomechanische Wechselwirkung zwischen Licht und Bewegung ist dabei sehr stark und ließ sich bereits nutzen, um per Laserkühlung eine Vibrationsmode auf eine geringe Phononenzahl nahe dem Grundzustand abzukühlen [3].

Amir Safavi-Naeini und Kollegen vom Caltech stellen nun eine vielversprechende neue zweidi-



Eine Aufnahme der Silizium-Struktur mit dem Rasterelektronenmikroskop zeigt die Löcher in Form von Schneeflocken (links). In der Mitte ist eine vertikal verlaufende Versetzungslinie sichtbar. Bewusst eingebrachte winzige Veränderungen in der Geometrie (nicht sichtbar) führen zu einem Defekt, an dem sich lo-

dimensionale Struktur nach diesem Prinzip vor [4]. Diese könnte die Grundlage bilden für zukünftige zweidimensionale (2D) optomechanische Gitter und Schaltkreise. Das neue Design basiert auf einer dünnen Siliziumschicht mit einem periodischen Dreiecks-Gitter von Löchern. Jedes Loch hat die Gestalt einer Schneeflocke mit sechszähliger Symmetrie, was der Struktur ihren Namen einbrachte. Alternativ kann man darin auch eine Anordnung von Dreiecken erblicken, welche mittels dünner Brücken mechanisch miteinander verbunden sind. Jedes Dreieck für sich hätte diskrete Vibrationsnormalmoden. Durch die Kopplung an die Nachbarn entsteht nun eine Bandstruktur, mit Bandlücken für die Ausbreitung von Schallwellen. Lichtwellen können zwar prinzipiell immer aus einer Schicht entweichen, wenn sie sich nahezu senkrecht dazu bewegen. Das vorliegende Design gewährleistet aber, dass sich dennoch eine Pseudo-Bandlücke für elektromagnetische Wellen ergibt, die sich in der Ebene bewegen. Lokalisierte Lichtmoden haben daher nur einen geringen Überlapp mit den entweichenden Wellen und sind so von hoher optischer Güte.



O. Painter, Caltech / F. Marquardt

kalisierte Vibrationsmoden und optische Moden bilden (schematisch angedeutet). In Zukunft könnten sich zweidimensionale Gitter aus solchen Defektmoden produzieren lassen (rechts), in denen Photonen und Phononen miteinander wechselwirken und sich bewegen.

Um nun einen Defekt zu generieren, an dem lokalisierte Lichtmoden und Vibrationsmoden entstehen können, würde es im Prinzip ausreichen, beispielsweise die Größe einer Schneeflocke zu verändern. Für die Optimierung von Eigenschaften wie der optischen Güte und der Robustheit des Designs gegenüber Unordnung greifen die Autoren zu einem Trick: Sie erzeugen zunächst eine Versetzungslinie, die für sich genommen einen Wellenleiter ergeben könnte. Nun verändern sie die Struktur gezielt entlang dieser Richtung, um schließlich einen lokalisierten Punktdefekt zu erzeugen (Abb.). Durch optische Spektroskopie haben sie nachgewiesen, dass am Defekt zwei Vibrationsmoden mit Frequenzen im Bereich um die 10 GHz entstehen, die eine mechanische Güte von über 10^5 aufweisen und stark an die optische Mode koppeln. Die Lebensdauer von Photonen in dieser optischen Mode ist länger als die mechanische Oszillationsperiode. Das ist wichtig für mögliche Anwendungen, beispielsweise die Laserkühlung oder die Übertragung quantenmechanischer Zustände vom Lichtfeld auf die Mechanik.

Die hier gefundenen Systemparameter sind vergleichbar mit

jenen, die dieselbe Gruppe zuvor für eindimensionale Balkenstrukturen beobachtet hatte. Die 2D-Struktur ist sehr vielversprechend, da ihr größerer thermische Leitwert es ermöglichen sollte, mit dem unerwünschten Aufheizen durch absorbiertes Laserlicht umzugehen. Außerdem besteht in solchen Strukturen viel mehr Platz für weitere Moden und optische oder akustische Wellenleiter.

Diese Entwicklung hat das Potenzial, ein fruchtbares neues Gebiet zu erschließen. Dadurch könnten sich nämlich größere optomechanische Gitter und Schaltkreise realisieren lassen, die aus vielen optischen und Vibrations-Defektmoden bestehen, z. B. angeordnet in einem zweidimensionalen Gitter. Jede dieser Moden hat einen exponentiell nach außen abklingenden Ausläufer, der mit einer benachbarten Mode überlappen kann. Dadurch entsteht

automatisch eine Tunnelkopplung, die für den kohärenten Transport von Photonen und Phononen im Gitter sorgt. Der resultierende Hamilton-Operator für Photonen und Phononen hat die Gestalt eines Hubbard-Holstein-Modelles, wie es in der Festkörperphysik herangezogen wird, um die Wechselwirkung von Elektronen und Phononen auf einem Tight-Binding-Gitter zu beschreiben – allerdings ersetzen hier die Photonen die Elektronen.

Zukünftig könnten sich an solchen Systemen interessante Quanteneffekte studieren lassen. So ist es denkbar, die resultierende Bandstruktur durch die Stärke und Frequenz des antreibenden Laserlichtfeldes zu ändern – eine Situation, wie man sie sonst nur in optischen Gittern für kalte Atome antrifft. Weitere Möglichkeiten optomechanischer Gitter und Schaltkreise sind „langames Licht“ [5], künstliche Magnetfelder für

Photonen [6], Quantensynchronisation [7] und phononische Quantennetzwerke [8]. „Schneeflocken-Kristalle“ werden damit vermutlich zu einem wichtigen Bestandteil der Optomechanik.

Florian Marquardt

Prof. Dr. Florian Marquardt, Institut für Theoretische Physik II, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstr. 7, 91058 Erlangen

- [1] *M. Aspelmeyer, T. J. Kippenberg und F. Marquardt*, arxiv:1303.0733 (2013)
- [2] *M. Eichenfield et al.*, Nature **462**, 78 (2009)
- [3] *J. Chan et al.*, Nature **478**, 89 (2011)
- [4] *A. H. Safavi-Naeini et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 153603 (2014)
- [5] *D. E. Chang et al.*, New Journal of Physics **13**, 023003 (2011)
- [6] *M. Schmidt, V. Peano und F. Marquardt*, arXiv:1311.7095
- [7] *M. Ludwig und F. Marquardt*, Phys. Rev. Lett. **111**, 073603 (2013)
- [8] *S. J. M. Habraken et al.*, New Journal of Physics **14**, 115004 (2012)