

## Von Seemäusen und optischen Transistoren

**Während die Wissenschaft noch die Grundlagen photonischer Kristalle erforscht, hat die Natur schon viele Beispiele parat.**

Noch ist es nahezu selbstverständlich, dass Computer immer schneller werden und dass ein neues Modell in wenigen Monaten bereits veraltet ist. Doch irgendwann wird die Datenübertragung im Gigahertzbereich an ihre physikalischen Grenzen stoßen – elektrische Leiter lassen sich nicht beliebig dicht packen. Lichtstrahlen hingegen beeinflussen sich nicht und eröffnen der Chipherstellung völlig neue Wege. Sollte es tatsächlich gelingen, Rechner zu konstruieren, die statt mit Elektronen und Transistoren mithilfe von Licht rechnen, steht der Computertechnologie ein gewaltiger Leistungsschub bevor.

Was man für die Herstellung optischer Transistoren bräuchte, sind Halbleiterstrukturen für Licht. Das haben Eli Yablonovitch und Sajeev John 1987 erkannt und ein solches Material, so genannte *photonische Kristalle*, theoretisch beschrieben.<sup>1)</sup> Die Arbeitsgruppe um Yablonovitch an der University of California stellte auch erstmals einen Kristall mit einer vollständigen Bandlücke her, die damals allerdings noch im Mikrowellenbereich lag. Dazu bohrten

die Wissenschaftler dünne Kanäle in ein Dielektrikum.

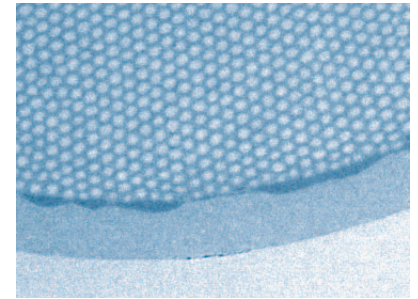
Die zentrale Eigenschaft eines Halbleiters ist seine elektronische Bandlücke. Gewöhnliche Kristalle besitzen ein periodisches Potential für Elektronen auf einer atomaren Skala. In photonischen Kristallen ist dagegen der Brechungsindex auf der Skala der Wellenlänge des Lichts periodisch moduliert, was zu einer Mehrfachstreuung des Lichts im Kristall führt. Analog zur Bandstruktur für Elektronen in Halbleitern bilden sich erlaubte und verbotene Bänder für die Ausbreitung der Photonen aus. Die Periodizität des Gitters muss dabei von der Größenordnung der halben Lichtwellenlänge sein. Da sich die optische Kommunikation im nahen Infrarot bei Wellenlängen um  $1,5 \mu\text{m}$  bewegt, muss der photonische Kristall eine Periodizität von grob einem Mikrometer haben, was etwa 2000-mal größer ist als die Gitterkonstante eines atomaren Kristalls.

### Die Natur als Vorbild

Die Natur erweist sich einmal mehr als der bessere Baumeister: Das Schillern von Schmetterlingsflügeln entsteht durch genau dieses Prinzip. Die obere Membran der Deckschicht eines Schmetterlingsflügels zum Beispiel besteht aus mehreren, nur 90 nm dicken Schichten, die abwechselnd aus Luft und Chitin zusammengesetzt sind. Die Chitinschichten sind über Chitinbrücken verbunden und durch viele Poren durchbrochen. In dieser Sandwichstruktur kommt es nun durch die Unterschiede im Brechungsindex zwischen Luft und Chitin zur Interferenz der einfallenden Lichtwellen und mithin, bei unterschiedlichen Einfallswinkeln des Lichts, zu unterschiedlichen Interferenzfarben.

Ein weiteres natürliches Material, das seine irisierende (in Regenbogenfarben schillernde) Oberfläche einer photonischen Struktur verdankt, ist der Opal. Dieser Edelstein ist im chemischen Sinne nicht kristallin, er besteht vielmehr aus winzigen ausgehärteten, wasserarmen Silikatkügelchen, die in eine regelmäßig parallel angeordnete Matrix aus weicherem wasserreichen Silikat eingebettet sind. Der Unterschied im Brechungsindex zwischen dem Trägermaterial und den Silikatkügelchen ist verantwortlich für das farbige Schimmern des Steins.

Eine im wahrsten Sinne des Wortes schillernde Entdeckung machten im letzten Jahr auch Andrew Parker et al. von der Universität Sydney.<sup>2)</sup> Bei der Seemaus (*Aphrodite aculeata*), einem ca. 20 cm langen marinen Wurm, der von langen, filzartigen Fäden oder Stacheln bedeckt ist und vor der



**Abb. 2:** Ein Querschnitt des Seemaus-Stachels unter dem Elektronenmikroskop zeigt die hexagonale Anordnung der zylindrischen Hohlräume. (Quelle: D. R. McKenzie, University of Sydney)

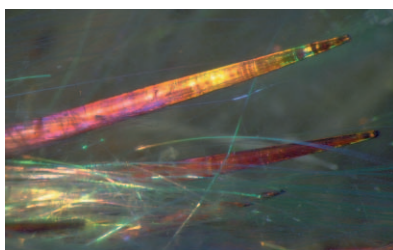
Küste Australiens in bis zu 2000 Metern Tiefe lebt, haben die Wissenschaftler ein seltsames Farbenspiel beobachtet: Bei senkrechtem Lichteinfall tiefrot, beginnt die Farbe seiner Stacheln bei achsenparallelem Lichteinfall zu irisieren und in kräftigen Blau- und Grüntönen zu schillern (Abb. 1). Diese beeindruckende Farbgebung beruht auf dem mikroskopischen Aufbau der Stacheln: Jeder einzelne Stachel ist ein natürlicher, perfekter zweidimensionaler photonischer Kristall. Ähnlich wie der Schmetterlingsflügel besteht die Wand des Seemausstachels aus in Chitin eingelassenen, mit Meerwasser gefüllten Poren, die hexagonal angeordnet sind. Nicht senkrecht einfallendes Licht erfährt so einen periodischen Wechsel des Brechungsindex.

### Photonische Glasfasern

Leider lassen sich die in der Tiefsee vorkommenden Materialien – insbesondere mit Meerwasser gefüllte Poren – nicht für die Informationstechnologie verwenden. Eine Untersuchung des Seemausstachels mit dem Transmissionselektronenmikroskop (Abb. 2) zeigt aber, dass die Struktur dieselbe ist wie bei einem neuem Typ Glasfaser (*photonic crystal fibres*), den eine Gruppe um Jonathan Knight an der University of Bath hergestellt hat.<sup>3)</sup> Sie entwickelten zwei Typen von photonischen Kristallfasern, also zweidimensionalen photonischen Kristallen, die in transversaler Rich-

1) E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987); S. John, Phys. Rev. Lett. 58, 2486 (1987)  
2) A. R. Parker et al., Nature 409, 36 (2001)  
3) siehe Physik Journal, Februar 2002, S. 43  
4) Y. A. Vlasov et al., Nature 414, 289 (2001)  
5) siehe Physik Journal, Januar 2002, S. 16

Dr. Ulrich Kilian,  
science & more  
redaktionsbüro,  
uk@science-and-  
more.de

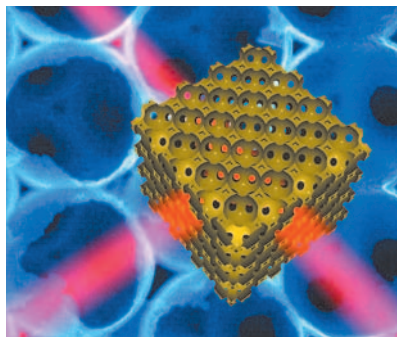


**Abb. 1:** Die Seemaus ist ein rund 20 cm langer mariner Wurm, der an den Küsten Australiens vorkommt (oben). Seine Stacheln sind natürliche photonische Kristalle. Sie bestehen aus einem Chitingerüst und mit Seewasser gefüllten Kanälen in Längsrichtung. Ähnlich wie der Flügel eines Schmetterlings schillern sie je nach Lichteinfall in unterschiedlichen Interferenzfarben – von rot bis blau (unten). (Quelle: G. Rouse, University of Sydney)

tung periodisch sind. Beim ersten Typ handelt es sich um Fasern, bei denen um einen Faserkern herum mit Luft gefüllte Kanäle angeordnet sind. Der Kern fungiert damit als Störstelle, Licht kann sich nur entlang dieses Defekts ausbreiten. Beim zweiten Typ wird das Licht durch eine vorhandene photonische Bandlücke im Kern gefangen. Bei diesem zweiten Typ besteht der Kern aus einem zusätzlichen Loch.

### Photonik statt Elektronik

Wie elektronische Halbleiter lassen sich auch photonische Kristalle gezielt mit Störstellen versehen. Beispielsweise führt eine einzelne Fehlstelle in einem ansonsten ideal geordneten photonischen Kristall dazu, dass Licht einer „verbotenen“ Wellenlänge an der Störstelle gefangen wird. Man erhält auf diese Weise einen Mikroresonator, der von der optischen Außenwelt isoliert ist. Durch Verkettung solcher Punktdefekte kann sich Licht bestimmter Wellenlängen entlang dieser Defekte ausbreiten: Der photonische Kristall wird zum Wellenleiter. Ein linienförmiger Defekt zwingt die Welle, in ihrer Bahn der Linienführung des Defektes zu folgen – selbst um scharfe Kanten herum. Diese Eigenschaft ist für die Optoelektronik von außerordentlichem Interesse. Bislang wird die Größe der optoelektronisch integrierten Schaltungen nämlich vor allem durch Lichtwellenleiter auf dem Chip bestimmt, die einzelne Elemente wie Dioden, Laser oder Polarisatoren miteinander verbinden. Gelingt es, die Lichtführung und die anderen optischen Elemente mithilfe photonischer Kristalle auf einem Chip zu integrieren, wür-



**Abb. 3:** Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines so genannten invertierten Opals, der aus einem periodischen Siliziumgerüst mit leeren kugelförmigen Zwischenräumen besteht. Im Vordergrund zu sehen ist das theoretische Modell der photonischen Struktur. (Quelle: S. John, [www.physics.utoronto.ca/~john](http://www.physics.utoronto.ca/~john))

de dies eine „Lichtelektronik“ oder Photonik von bisher nicht gekannter Perfektion ermöglichen.

Den ersten echten dreidimensionalen photonischen Kristalls dieser Art mit einer Bandlücke bei Wellenlängen um  $1,5 \mu\text{m}$  stellte im letzten Jahr eine Gruppe um Sajeev John und Ovidiu Toader an der Universität Toronto her. Es handelt sich dabei um einen *invertierten Opal* aus Silizium, dessen Gitter aus Luftkugeln mit einem Durchmesser von 870 nm (ein durchschnittliches Haar ist hundertmal dicker!) besteht, bei dem die Zwischenräume mit Silizium ausgefüllt wurden (Abb. 3). Dieser künstliche Opal weist dieselben Eigenschaften auf wie der natürliche Edelstein. Der Brechungsindexunterschied zwischen Luftlöchern und Trägermaterial reicht aus, um das Licht quasi im Kristallgitter zu fangen. Außerdem sind die Kugeln porös, und je kleiner die Poren, umso kürzer die Wellenlängen der darin gefangenen Wellen. Die Herstellung eines solchen Kristalls verlangt höchste Präzision, ist kostspielig und aufwändig.

### Neue Ansätze zur Herstellung

Eine weitere wichtige Entwicklung glückte Ende letzten Jahres Forschern am NEC Research Institute und an der Princeton University. Sie nutzten das Prinzip der Selbstorganisation („self assembly“), um photonische Kristalle herzustellen.<sup>4)</sup> Im Gegensatz zu den bis dahin benutzten lithographischen Methoden zur Positionierung der Luftkugeln, macht das Ausnutzen der natürlichen Anordnung die Herstellung eines photonischen Kristalls relativ einfach. In einem Kolloid, das auf ein Silizium-Substrat aufgebracht wird, schwimmen dabei winzige Silizium-Partikel – Kugeln von 855 nm Durchmesser. Sie schließen sich, nachdem die Flüssigkeit verdampft ist, selbst zu dreidimensionalen periodischen Strukturen zusammen und bilden einen synthetischen Opal. Nach Entfernen der Partikel erhält man mit den entstandenen Hohlräumen eine Schablone zur Herstellung photonischer Kristalle.<sup>5)</sup>

Trotz dieser Fortschritte werden wir allerdings auf serienreife Lichtcomputer noch eine Weile warten müssen. Aber wer weiß, vielleicht hält die Natur ja noch weitere interessante Überraschungen parat...

ULRICH KILIAN