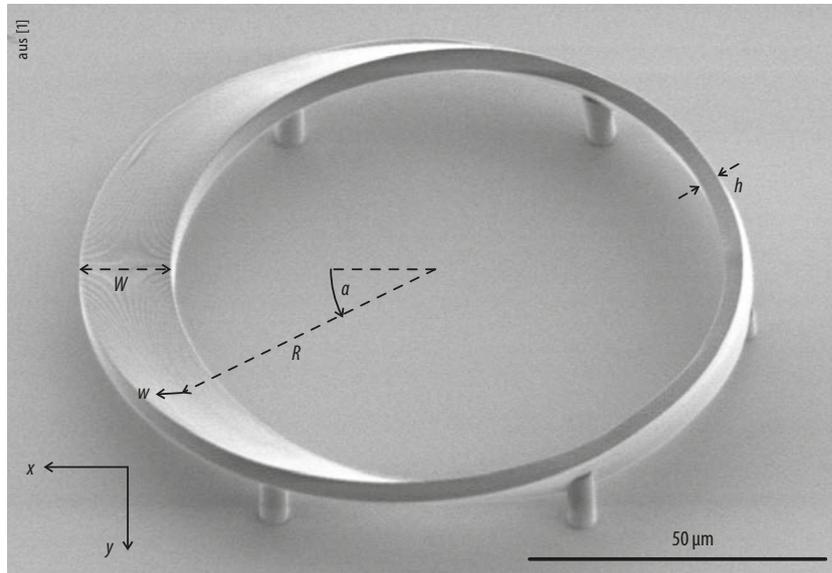


# Licht auf krummen Wegen

Ein sogenannter Möbius-Mikrolaser erlaubt es, die Lichtausbreitung in gekrümmten Räumen zu untersuchen.

Ronny Thomale



**Abb. 1** Der Durchmesser dieses Möbius-Rings beträgt 100 Mikrometer bei einer Dicke  $h = 3 \mu\text{m}$  und einer Breite  $W = 15 \mu\text{m}$ . Geodätische Resonanzmoden lassen sich als Funktion des Winkels  $a$  und der Breitenkoordinate  $w$  bestimmen.

Von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie geht eine besondere Faszination aus: Masse verändert den Raum, der aus Ort und Zeit aufgebaut ist. Auch wenn der mathematische Überbau der Theorie für den Laien zu anspruchsvoll ist, sind die Konsequenzen der Relativitätstheorie sehr konkret: Masse krümmt den Raum. Eine eindrucksvolle Konsequenz zeigt das Verhalten von Licht, das durch Masse abgelenkt wird. Dieser Effekt lässt sich bereits an der Ablenkung des Lichts durch den Mond messen und reicht bis zum Extremfall eines Schwarzen Lochs, das den Raum so stark krümmt, dass es das Licht in seiner Umgebung verschluckt.

Den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in der Gruppe von Melanie Lebental an der Universität Paris-Saclay ist es nun gelungen, die Ausbreitung von Licht in einem gekrümmten Medium in einem Laborexperiment zugänglich zu machen (**Abb. 1**) [1]. Dies ist auf den ersten Blick erstaunlich: Auf kleinen Län-

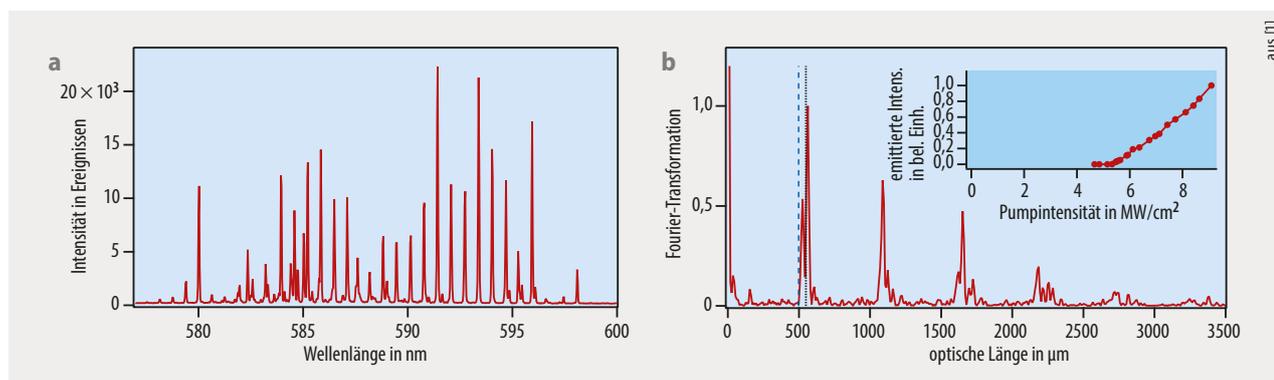
genskalen wie im Labor kann man den uns umgebenden Raum näherungsweise euklidisch, also flach, annehmen. Der Trick, dessen sich die Forschungsgruppe hier bedient, ist die Herstellung gekrümmter Materialstreifen, die als optische Resonatoren fungieren. Deren Größe von rund einem Zehntel Millimeter Durchmesser ist immer noch deutlich größer als die betrachtete Lichtwellenlänge. Somit ist in guter Näherung davon auszugehen, dass sich hier ein punkartiges Lichtteilchen im Materialring fortbewegt.

Für die Krümmung, die das Licht im Material durchläuft, sorgt ein Möbius-Ring. Ein solcher entsteht, wenn man die beiden Enden eines Papierstreifens gegeneinander verdreht und zusammenklebt. Verfolgt man einen sich am Streifen entlang bewegenden Punkt, kommt man nach einem vollständigen Durchlauf des Streifens an der zum Startpunkt entgegengesetzten Oberfläche an. Mathematisch handelt es sich um eine

nicht-orientierbare Fläche. Um einen Möbius-Ring aus optisch aktivem Material herzustellen, kommen moderne lithografische Methoden zum Einsatz, wie die Forschungsgruppe von Martin Wegener am Karlsruher Institut für Technologie sowie deren Firmengründung Nanoscribe sie entwickelt. Ist die Probe einmal hergestellt, wird sie mit Licht bestrahlt. Wie bei einem optisch aktiven Material üblich, existiert eine kritische Intensitätsschwelle der hinzugefügten Lichtenergie, ab der die Probe beginnt, selbst ein Lichtemittent und somit ein Laser zu werden (Inset **Abb. 2b**). Für die zu beobachtende Physik macht es einen großen Unterschied, ob sich der Möbius-Ring wie beim Papierstreifenbeispiel in eine planare Fläche entfalten lässt oder nicht (**Abb. 1**), weil sich dadurch die Randbedingungen und mithin die mathematische Struktur für Resonanzmoden verändern.

Die Forschenden strahlen mit Licht auf die Möbius-Mikrolaserstrukturen ein und untersuchen, welche Lichtzustände (Resonanzen) im Material besonders stabil sind (**Abb. 2**). Ohne die Ränder zu berücksichtigen, vollziehen die stabilen Resonanzmoden im Material einen möglichst kurzen geschlossenen Lichtweg. In einem gekrümmten Material hat dies interessante Konsequenzen: Der bevorzugte Lichtweg sind sogenannte Geodäten des gekrümmten Raums, die abhängig von der Struktur der Krümmung exotische Formen annehmen können. Im Alltag kommt man beispielsweise bei Interkontinentalflügen mit Geodäten in Berührung, wenn man auf dem Bildschirm die Flugroute auf die Weltkarte projiziert betrachtet. Hier zeigt sich auf den ersten Blick, dass die kürzeste Strecke zwischen zwei Punkten dann keine Gerade ist.

Die Untersuchung der geodätischen Resonanzmoden der Mikrolaser erlaubt Rückschlüsse auf dessen



**Abb. 2** Das Spektrum eines Möbius-Lasers zeigt äquidistante Resonanzen (a), die auf entlang des Materialstreifens verlaufende Resonanzmoden schließen lassen. Das Inset von (b) zeigt die Intensität des einfallenden Lichts und die Intensitätsschwelle, ab welcher der Möbius-Resonator in den Laserzustand übergeht. Kombiniert mit weiteren Materialeigenschaften resultieren aus dem Fourier-Spektrum von (a) die geodätischen Resonanzen.

gekrümmten Charakter. Im Allgemeinen würden hier Flüstermoden (Whispering Gallery Modes) stören. In der westlichen Welt kennt man sie aus Beobachtungen von Lord Rayleigh in der St.-Pauls-Kathedrale in London: Zwei einander am Rand der Kathedrale gegenüberstehende Personen können sich flüsternd verstehen, während eine Person im Mittelpunkt der Kathedrale sie nicht hören kann. Ähnliche Phänomene sind auch in ostasiatischen Tempelbauten wie dem Himmelstempel in Peking zu beobachten. Ihr mathematischer Ursprung liegt in der Endlichkeit der homogenen gekrümmten Materieabschnitte und dem damit verbundenen Rand, an dem spezielle Randmoden entstehen können.

Für generische Ringstrukturen sind Flüstermoden oft die stabilsten Resonanzen und könnten somit die noch interessantere Struktur der geodätischen Resonanzen überdecken. Glücklicherweise schlägt man hier mit dem Möbius-Laser zwei Fliegen mit einer Klappe: Neben ausgeprägter Krümmung führt die Nicht-Orientierbarkeit der Möbius-Streifen dazu, dass sich die Flüstermoden aufgrund der Randbedingungen auslöschen. Die geodätischen Resonanzen sind somit dominant und lassen sich mit hoher Auflösung messen.

Diese aktuelle Arbeit läutet eine neue experimentelle Richtung nicht-euklidischer Photonik ein, in der Phänomene der Ausbreitung von Licht in gekrümmten Medien mit hoher Prä-

zision und Flexibilität unter Laborbedingungen realisierbar sind. Zum einen wird es nun in naher Zukunft möglich sein, optische Knotenfelder [2] oder sogar neue Arten der Lichtpolarisation [3] zu untersuchen, um die bekannten Grenzen der Maxwell'schen Theorie weiter auszutesten und zu verschieben.

- [1] Y. Song et al., Phys. Rev. Lett. **127**, 203901 (2021)
- [2] W. T. M. Irvine und D. Bouwmeester, Nat. Phys. **4**, 716 (2008)
- [3] T. Bauer et al., Science **347**, 964 (2015)

## Der Autor

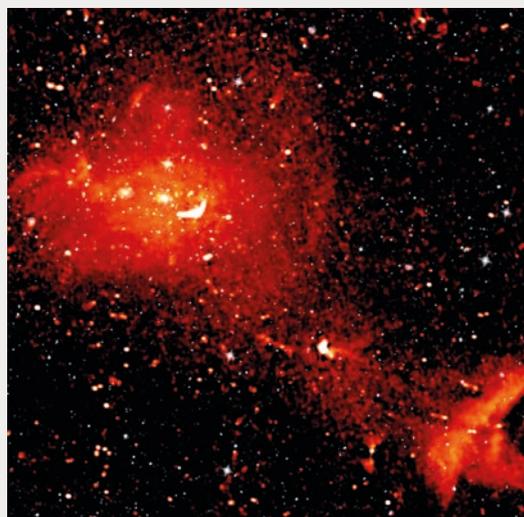
**Prof. Dr. Ronny Thomale**, Theoretische Physik I, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

## Himmelskarte reloaded

Das größte Radioteleskop der Welt hat eine neue Himmelskarte veröffentlicht. Das Low Frequency Array LOFAR hat mehr als 4,4 Millionen Galaxien im Radiowellenbereich aufgenommen – davon war knapp ein Viertel bislang unbekannt. Die Empfängerstationen des Radioteleskops sind über sieben europäische Länder verteilt, was eine aufwändige zeitliche Synchronisation der gemessenen Signale nach sich zieht. Um die Himmelskarte zu erstellen, brauchte es mehrere tausend Beobachtungsstunden; etwa acht Petabyte Daten kamen zusammen und stehen nun öffentlich zur Verfügung.

Viele der beobachteten Objekte sind Milliarden von Lichtjahren von uns entfernt. Darauf bezogen befindet sich der Coma-Cluster (**Abb.**) mit etwa 300 Millionen Lichtjahren Entfernung in unserer Nachbarschaft: Er besteht aus mehr als tausend Galaxien. Die Daten, die der neuen Himmelskarte zugrundeliegen, erlauben es auch, kollidierende Galaxienhaufen oder den Massenverlust sogenannter Quallengalaxien zu beobachten. Zusammen mit Beobachtungen anderer Spektralbereiche könnten sie zu neuen Erkenntnissen zur Galaxienentstehung führen. Bisher hat LOFAR etwas mehr als ein Viertel des nördlichen Himmels kartiert, den es in Zukunft vollständig erfassen soll.

T. W. Shimwell et al., Astron. & Astroph. **659**, A1 (2022)



Annalisa Bonafede