

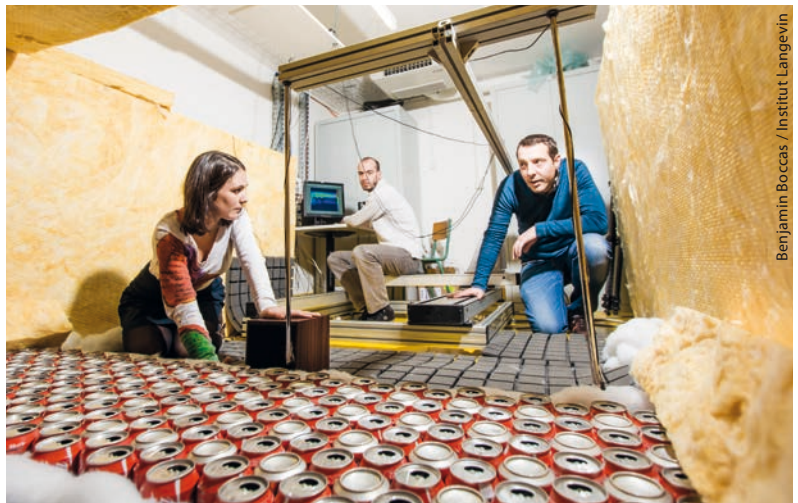
Ein Fokus auf Getränkedosen

Die Beugungsbegrenzung entfällt für akustische Wellen beim Fokussieren mit Subwellenlängenresonatoren.

Den Nobelpreis für Chemie 2014 erhielten Stefan W. Hell, Eric Betzig und W. E. Moerner für ihre bahnbrechenden Arbeiten zur optischen Fernfeld-Fluoreszenzmikroskopie mit einer räumlichen Auflösung jenseits der Abbeschen Beugungsbegrenzung [1]. Betzig und Moerner gelang dies, weil das Zentrum eines Fluoreszenzflecks viel besser lokalisierbar ist als seine Breite. Hell nutzte die Abregung der Fluoreszenzmoleküle mittels eines speziellen Fokus mit einer Nullstelle im Zentrum aus. Der Lichtfokus blieb dabei aber beugungsbegrenzt.

Ist es prinzipiell unmöglich, aus dem Fernfeld auf Breiten deutlich unterhalb der Wellenlänge zu fokussieren? Diese Frage betrifft nicht nur die Optik, sondern alle Wellenphänomene in der Physik, also auch den Schall. Hierzu stellte nun eine Gruppe vom Institut Langevin in Paris ein Modellexperiment im hörbaren akustischen Bereich vor, das mit einfachen Mitteln auskommt und dennoch ganz raffinierte Physik benutzt [2]. In dem Experiment fällt Schall aus einem Lautsprecher so auf ein Gitter aus leeren Getränkedosen, dass es mit Hilfe beweglicher Mikrofone möglich ist, den akustischen Druck über den Dosen zu messen (Abb. 1).

Die Getränkedosen fungieren hierbei als Helmholtz-Resonatoren [3, 4] mit erstaunlich großer Güte. Der Ton, der beim Blasen in eine Weinflasche entsteht, stammt auch von einer Helmholtz-Resonanz:



Mit 124 Getränkedosen schlagen französische Forscher der Beugungsbegren-

zung beim Fokussieren von Schallwellen ein Schnippchen.

Die Luft in der Flasche agiert als Hookesche Feder und die Luft im Flaschenhals als Masse. Bei der Dose spielt ein Teil der Luft die Rolle der Feder, der andere die Rolle der Masse. Die Eigenfrequenz dieses Feder-Masse-Systems kann dabei einer Wellenlänge in Luft entsprechen, die viel größer ist als der Resonator selbst.

Dabei handelt es sich nicht etwa um eine stehende akustische Welle in der Flasche. Die Flasche – und auch die Getränkedosen – sind vielmehr Subwellenlängenresonatoren. Die Resonanzfrequenz der Dosen liegt bei 420 Hz. In normaler Luft mit einer Schallgeschwindigkeit von 343 m/s beträgt die zugehörige Wellenlänge 82 cm. Sie ist damit rund zwölfmal größer als der Durchmesser der Dosen von 6,6 cm.

Dicht gepackt zu einem zweidimensionalen periodischen Gitter stehen 124 Dosen auf dem Fußboden. Betrachtet man eine Dose als analog zu einem Atom in dem Sinne, dass die recht scharfe Eigenfrequenz der Dose einem scharfen elektronischen Energieniveau im Atom entspricht, kann man das Dosenraster als einen künstlichen Kristall oder als ein „Metamaterial“ [4] auffassen. Die Kopplung der Dosen untereinander über die normalen Schallwellen in der Luft

oberhalb der Dosen ist dabei erstaunlich groß.

Aus der Festkörperphysik ist bekannt, dass die Lösungen der Wellengleichung in jeder periodischen Struktur Bloch-Wellen sind. Das sind Produkte aus einer gewöhnlichen ebenen Welle und einer gitterperiodischen Funktion. Die Bloch-Wellen führen zu einem charakteristischen Zusammenhang zwischen Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ und Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$ der Welle, der Dispersionsrelation $\omega(k)$.

In einem einfachen Quadratgitter aus Getränkedosen entsteht so aus der linearen Dispersionsrelation der Schallwelle in Luft und der räumlich lokalisierten und spektral scharfen Helmholtz-Resonanz eine neue Dispersionsrelation. Diese ist der von Phonon-Polaritonen in gewöhnlichen Kristallen sehr ähnlich. Dabei handelt es sich um gekoppelte Moden aus ebenen elektromagnetischen Wellen und lokalisierten Gitterschwingungen.

Für eine solche Dispersionsrelation ist kein besonders scharfer Fokus zu erwarten. Verstimmt man jedoch in einem Schachbrettmuster jede zweite Dose etwas oder ordnet die Dosen zu einem Dreiecksgitter mit einem Dosenpaar als Basis an, reduziert sich die Symmetrie des Gitters, und die Dispersionsrelation der Bloch-Wellen ändert sich

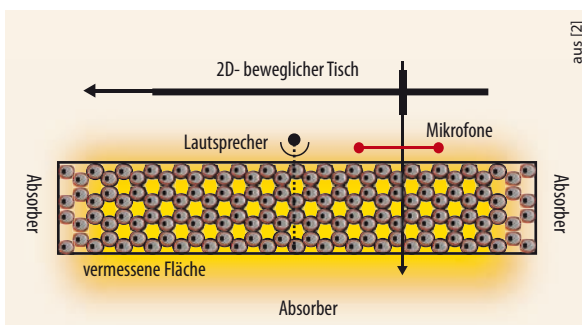


Abb. 1 Dicht über den Kanten platzierte Lautsprecher beschallen die hexagonal angeordneten Getränkedosen. Zwei Mikrofone vermessen an einem zweidimensional beweglichen Gestell den Schalldruck über dem Dosenraster.

qualitativ. Sie weist dann in einem sehr kleinen Frequenzbereich in der Nähe der Resonanzfrequenz der einzelnen Getränkedosen einen zusätzlichen Ast auf, für den die Kreisfrequenz ω der Bloch-Wellen mit steigender Wellenzahl k sinkt. Die Gruppengeschwindigkeit $d\omega/dk$ wird damit bezogen auf die Phasengeschwindigkeit ω/k negativ.

Umfangreiche analytische Rechnungen und numerische Simulationen zeigen, dass sich die zugehörigen Bloch-Wellen effektiv wie Schallwellen in einem isotropen Material mit einer negativen Brechzahl verhalten [2]. In Analogie zur Brechzahl in der Optik sind so der scharfe Fokus und die verbesserte Auflösung anschaulich zu verstehen: Entscheidend ist in der Optik gemäß des Fermatschen Prinzips der optische Weg, der in einem homogenen Material durch

das Produkt aus geometrischem Weg und Brechzahl gegeben ist. Bei mehreren Materialien oder Bereichen addieren sich die einzelnen optischen Wege auf. Ist ein Material mit negativer Brechzahl beteiligt, können sich die optischen Wege zu Null wegheben. Optisch gesehen haben damit ein Objekt und sein Bild den Abstand Null [5]. So verwundert es nicht weiter, dass die übliche Beugungsbegrenzung nicht gilt.

Negative Brechzahlen und „perfekte Linsen“ wurden vor einigen Jahren in der Optik heiß diskutiert [5]. Negative optische Brechzahlen, die auf magnetischen Metamaterialien basieren, ließen sich zwar im sichtbaren Spektralbereich experimentell demonstrieren [6], eine verbesserte Auflösung war aber nicht überzeugend nachweisbar. Das lag unter anderem an der hohen

optischen Absorption der Metamaterialien. Lässt sich vielleicht der neue akustische Zugang auf Lichtwellen oder andere Wellen in der Physik übertragen? Nötig wären dafür Resonatoren mit geringen Verlusten, die Abmessungen deutlich unterhalb der Wellenlänge sowie eine große Kopplung untereinander besitzen. Bislang war es noch nicht möglich, diese Bedingungen im optischen Bereich zu realisieren.

Martin Wegener

Prof. Dr. Martin Wegener, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76128 Karlsruhe

- [1] J. Bewersdorff, Ch. Eggeling und T. A. Klar, *Physik Journal*, Dezember 2014, S. 23
- [2] N. Kaina et al., *Nature* **525**, 77 (2015)
- [3] H. von Helmholtz und J. Reine, *Angew. Math.* **55**, 25 (1858)
- [4] M. Kadic et al., *Rep. Prog. Phys.* **76**, 126501 (2013)
- [5] J. B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3966 (2000)
- [6] C. M. Soukoulis, S. Linden und M. Wegener, *Science* **315**, 47 (2007)

■ Mars mit Hang zum Wasser?

Trotz tiefer Temperaturen und niedrigem Druck scheint es Wasser auf dem Mars zu geben. Möglich ist dies durch verschiedene Salzverbindungen, die den Gefrierpunkt senken.

Im September machte die NASA Schlagzeilen mit der Nachricht, das Geheimnis des Mars sei gelöst. Den Grund für diese Sensationsmeldung lieferten Forscher um Alfred McEwen vom Lunar & Planetary Laboratory der University of Arizona und um Lujendra Ojha vom Georgia Institute of Technology, die ihre neuesten Ergebnisse zu „Recurrent Slope Lineae“ vorgestellt hatten [1]. Der Ausdruck lässt sich am besten mit „wiederkehrende Hanglinien“ übersetzen und beschreibt dunkle Linien bzw. Streifen, die sich wiederholt zu bestimmten Jahreszeiten an manchen Hängen auf dem Mars bilden und wieder verschwinden. Diese Streifen waren vor vier Jahren erstmals entdeckt worden und hatten damals tatsächlich für eine Sensation gesorgt [2]. Sie ließen sich nämlich nicht einfach mit trockenen Hangrutschungen erklären, da sie sich viel langsamer ausbreiteten (Abb. 1), als es von Lawinen aus trockenem, granulearem Material

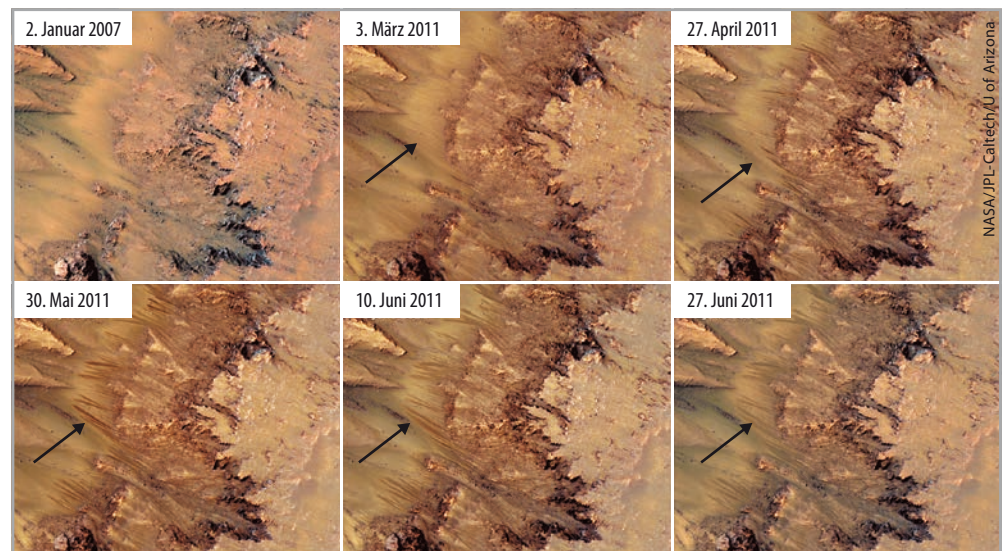


Abb. 1 Im Palikir Krater in der südlichen Hemisphäre des Mars zeigen sich wiederkehrend Hanglinien. Diese erscheinen als dünne, dunkle Streifen, die sich hangabwärts (nach links oben) ausbreiten.

Erstmals tauchten sie sehr schwach auf einem Bild vom 3. März 2011 auf. Besonders deutlich zeigten sie sich zwischen dem 27. April und dem 30. Mai 2011.

zu erwarten wäre. Zwar war es nicht möglich, die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Linien direkt zu messen. Denn sie zeigten sich lediglich auf Bildern der hochauflösenden Kamera HiRISE auf dem

Mars Reconnaissance Orbiter, die im Abstand von Tagen oder Wochen aufgenommen wurden. Dennoch war klar, dass nur ein Prozess, der mit Kriechen oder Sickern zu tun hat, die Beobachtungen erklä-