

Verkehrt herum geknickte Wellen

Linsen mit negativer Brechung verstoßen gegen die physikalische Lehrmeinung. Doch bald soll es sie geben

Negative Brechung ist einfach nicht möglich. Punkt.“ Fett gedruckt steht der Satz auf der Homepage von Physikern der Universität Texas. Was die Forscher um Prashant Valanju vehement abstreiten, halten Kollegen inzwischen für realistisch – und vielversprechend. Sie träumen von optischen Superlinsen und tüfteln bereits an Material mit negativem Brechungsindex, das elektromagnetische Wellen in die „falsche“ Richtung ablenkt.

Schon in den sechziger Jahren folgte der russische Physiker Victor Veselago aus den Maxwell-Gleichungen, dass Stoffe mit negativem Brechungsindex möglich sind. Der Brechungsindex beschreibt, wie Licht oder andere elektromagnetische Strahlung beim Übergang in das jeweilige Material abgelenkt wird. Normalerweise ist er positiv – der Lichtstrahl wird leicht gebeugt. Ein Strohhalm in einem Glas Wasser scheint an der Wasseroberfläche leicht nach vorn abzuknicken. Bei einem negativen Brechungsindex des Wassers hätte man den Eindruck, der Strohhalm würde von der Flüssigkeit scharf nach hinten geknickt (siehe Grafik). Eine solche Flüssigkeit gibt es bisher allerdings nicht.

Da kein natürlicher Stoff einen negativen Brechungsindex zeigt, hielt Veselago seine Berechnungen für Spielerei. Das blieben sie, bis 1999 der britische Physiker John Pendry ein Rezept für Material mit negativem Brechungsindex vorlegte.

Er errechnete, dass sich mit einer Kombination aus Drähten und Ringen der magische Stoff zusammenbasteln ließe. Man nennt eine solche Konstruktion ein Metamaterial, da es sich um verschiedene Stoffe handelt, die in einer sich wiederholenden Struktur angeordnet werden. Trotzdem kann man das Metamaterial als homogen betrachten, solange die Strukturen klein im Verhältnis zur Wellenlänge der untersuchten Strahlen sind. Die von Pendry vorgeschlagene Struktur war zu grob, um sichtbares Licht auf Abwege zu bringen. Aber für Mikrowellen sollte sie funktionieren.

Forscher der kalifornischen Universität von San Diego bauten nach dieser Anleitung ein Experiment auf und publizierten 2001 die Ergebnisse. Siehe da: Die Mikrowellen wurden über das Lot hinaus gebrochen. Die Ergebnisse der Gruppe um David Smith und Sheldon Schultz lösten einen Boom von Forschungsarbeiten aus. Viele variierten den Aufbau aus San Diego. Andere, wie George Eleftheriades, Professor für Elektrotechnik und Informatik an der Universität von Toronto, entwickelten ihrerseits ein Material mit negativem Brechungsindex.

Doch einige Physiker trauten den ersten experimentellen Ergebnissen nicht. Die Theorie dahinter war zu ungewohnt. So verläuft in dem neuartigen Material die Phasengeschwindigkeit der Wellen entgegengesetzt zur Ausbreitungs-

richtung. Das ist etwa so, als drehten sich die Räder eines Autos rückwärts – obwohl die Karre vorwärts fährt. Zwar sind Physiker gewohnt, dass Phasen- und Signalgeschwindigkeit verschieden sind. Aber gleich entgegengesetzt? Außerdem galt, dass die Auflösung einer Linse durch die Wellenlänge des Lichts begrenzt ist. Pendry jedoch sagte voraus, dass eine Linse aus Material mit negativer Brechzahl eine weit bessere Detailschärfe liefere. Der Trick: Metamaterial „verstärkt“ die so genannten evaneszenten Wellen – Lichtanteile, die normalerweise schnell in ihrer Intensität abnehmen.

Skeptiker glaubten, Fehlinterpretationen in den Arbeiten von Veselago und Pendry gefunden zu haben. In mehreren Artikeln stritten sie die Möglichkeit von negativer Brechung und Superlinsen grundsätzlich ab. So gestanden die Physiker um Prashant Valanju den neuen Materialien in den *Physical Review Letters* zwar seltsame Eigenschaften zu. Aber negative Brechung von elektromagnetischen Signalen sei nur im theoretischen Fall eines vollkommen monochromen Strahls denkbar. Bei realen Lichtimpulsen jedoch würde negative Brechung verlangen, dass sich ein Teil des Lichts mit Überlichtgeschwindigkeit bewege – was unmöglich sei.

Weder Eleftheriades noch andere ließen sich entmutigen. In den letzten Monaten zeigten mehrere Experimente negative Brechung. Auch

die Linseneigenschaft flachen Metamaterials konnte Eleftheriades erstmals beobachten; entsprechende Ergebnisse werden demnächst auch Forscher des Massachusetts Institute of Technology veröffentlichen. Außerdem bestätigte der Theoretiker Clifford Krowne vom Naval Research Lab der US-Marine kürzlich, dass es sich um Effekte eines negativen Brechungsindex handelt. Die Berechnungen des kritisierenden Valanju hingegen steckten voller Fehler, sagt Krowne. Er hält alle grundsätzlichen Einwände für erledigt und sieht spannenden Zeiten entgegen: „Die neuen Materialien bergen ein enormes Potenzial.“ Auch Eleftheriades ist sicher: „Was wir sehen, ist real. Es ist eine neue Physik.“

Sie ist bald im Einsatz. Große Hoffnungen richten sich auf leistungsfähigere Antennen für Mobilfunknetze. Das Militär verspricht sich eine miniaturisierte Überwachungstechnik. Die Forscher wollen bald auch Materialien für den Einsatz mit sichtbarem Licht herstellen. „Photonische Kristalle“ sind aussichtsreiche Kandidaten. Mit den dann möglichen optischen Superlinsen ließe sich etwa die Speicherkapazität von CDs steigern. Auch die Halbleiterindustrie wäre dankbar. Mit Superlinsen ließen sich integrierte Schaltkreise noch deutlich verkleinern, ohne von der bewährten optischen Lithografie abrücken zu müssen.

FERDINAND MUGGENTHALER

Seltsame Brechung

Das Prinzip des „negativen Brechungsindex“



In gewöhnlichen optischen Medien wie Wasser oder Luft werden Lichtstrahlen beim Übergang zwischen zwei Materialien so abgelenkt, dass sie mit dem Lot der Grenzfläche einen positiven Winkel bilden



In einer (hypothetischen) Flüssigkeit mit negativem Brechungsindex würden die Strahlen so abgelenkt, dass der Winkel mit dem Lot einen negativen Wert hätte

ZEIT-Grafik