

Materialien mit negativem Brechungsindex

Der falsche Knick im Licht

GUNNAR DOLLING | MARTIN WEGENER | STEFAN LINDEN

Materialien mit negativem Brechungsindex galten lange Zeit als akademische Spielerei. Heute ermöglicht die Nanotechnologie jedoch die Herstellung von Metamaterialien, die das Brechungsgesetz gewissermaßen auf den Kopf stellen: In ihnen können Phase und Energie einer Lichtwelle in entgegengesetzte Richtungen laufen. Eine physikalische Kuriosität oder ein neues Kapitel der Optik?

Seit vier Jahrhunderten zerbrechen sich Wissenschaftler den Kopf über die Frage, was passiert, wenn Licht an einer Grenzfläche zweier transparenter Materialien gebrochen wird. Willebrord Snellius (1580-1626), René Descartes (1596-1650), Isaac Newton (1643-1727) und Johann Wolfgang von Goethe (1749-1823) haben sich hierzu geäußert. Das Snelliussche Brechungsgesetz – in Frankreich übrigens als das Brechungsgesetz von Descartes bekannt – lernt heute jedes Kind in der Schule: Das Licht wird von Vakuum oder Luft her kommend im Material mit Brechzahl $n > 1$ zum Lot hin gebrochen.

Die Nanotechnologie ermöglicht es heute jedoch, maßgeschneiderte künstliche Materialien herzustellen, bei denen der „Knick im Licht“ gleichsam falsch herum ist. Bei diesem Phänomen kämen wohl selbst diese klugen Köpfe noch einmal ganz schön ins Grübeln. Um der Sache auf den Grund zu gehen, müssen wir uns fragen: Was bedeutet in diesem Zusammenhang eigentlich „das Licht“? Ist es der Vektor der Phasengeschwindigkeit der Lichtwelle, der Vektor der Gruppengeschwindigkeit, der Vektor des Energieflusses (Poynting-Vektor) oder der Impulsvektor des Lichts?

Oft zeigen alle diese vier Vektoren in die gleiche Richtung. Im Allgemeinen sind sie aber paarweise voneinander verschieden. Mit üblichen Detektoren, zu denen auch unser

Auge zählt, messen wir das zeitliche Mittel des einfallenden Energieflusses der elektromagnetischen Welle. In diesem Fall beschreibt also der Poynting-Vektor S die Richtung des Lichts richtig.

Dies alles ist nicht neu. Interessant ist nun die Frage, ob es überhaupt sein kann, dass die optische Brechzahl n auch negativ wird? Das klingt seltsam, denn es hieße, dass auch die Phasengeschwindigkeit $c = c_0 / n$ des Lichts im Material negativ würde (c_0 ist die Vakuumlichtgeschwindigkeit). Und wie sähe ein Stilleben mit einem solchen negativ brechenden Material aus?

„Negative“ Stilleben

Ganz abgesehen von der Frage, wie sich ein Material mit negativem Brechungsindex realisieren ließe, können wir uns fragen, welche Effekte ein solches hervorrufen würde. Die linke Seite der Abbildung 1 zeigt die fotorealistische Computersimulation [1] eines Glases, das links mit Wasser ($n = 1,3$) gefüllt ist und in dem ein Metallstab steht. Bekanntermaßen sieht der Stab gebrochen aus, und zwar vom Lot weg (obschon das Licht zum Lot hin gebrochen wird). Ersetzt man das Wasser durch eine fiktive Flüssigkeit mit negativer Brechzahl $n = -1,3$, so wirkt der Stab zur anderen, „falschen“ Seite des Lotes hin gebrochen (Abbildung 1 rechts).

Aber das ist noch nicht alles. Man sieht beispielsweise nun auch die Unterseite der Flüssigkeitsoberfläche. Lichtstrahlen, die von der Oberfläche nach unten ausgehen, werden an der Grenzfläche des Glases nach oben gebrochen und treffen so das Auge des Betrachters. Man kann gleichsam „um die Ecke schauen“. Aus dem gleichen Grund ist der Boden des Glases bei negativer Brechzahl nicht mehr erkennbar.

Diese Effekte könnte man sich zu Nutze machen, um andersartige Linsen herzustellen (Abbildung 2). Normale Glaslinsen mit $n = 1,5$ haben gekrümmte Oberflächen, konvex oder konkav, um zu bündeln oder zu zerstreuen. Bei Linsen mit $n < 0$ kehrt sich das gerade um. Interessanterweise wirkt nun auch eine planparallele Platte mit $n = -1$ wie eine Linse. Selbst eine einzelne ebene Grenzfläche hat plötzlich abbildende Eigenschaften. Schaut man beispielsweise einen Pfeil an, der sich in einer Flüssigkeit mit $n = -1$ von einem Beobachter mit konstanter Geschwindigkeit v bewegt, so scheint sich der Pfeil zunächst auf den Beobachter zuzubewegen (Abbildung 3, Videos hierzu finden Sie auf www.phiu.de unter „Special Features/Zusatzmaterial zu den Heften“). Die negative Brechzahl, die unmittelbar mit einer negativen Phasengeschwindigkeit des Lichts einhergeht, übersetzt sich in diesem Bereich in eine scheinbar negative Geschwindigkeit des Pfeils. Dann wird er unendlich

INTERNET

Photorealistische Bilder und Filme
www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-14-5-1842

Special Features/Zusatzmaterial zu den Heften
www.phiu.de



Abb. 1 Strahlenoptische Computersimulation eines Wasserglases mit Metallstab und normalem Wasser mit Brechzahl $n = 1,3$ (links) und fiktiver Flüssigkeit mit $n = -1,3$ (rechts).

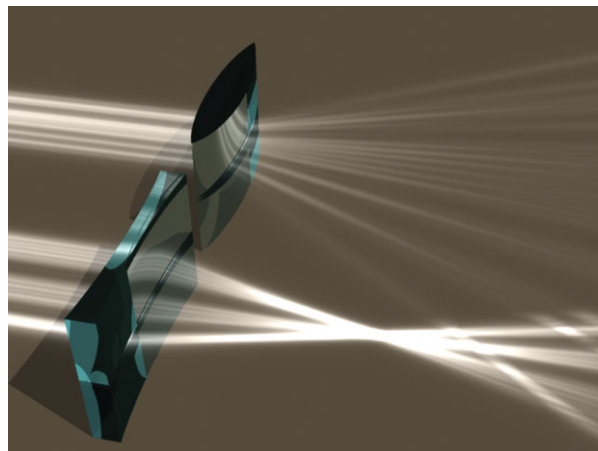
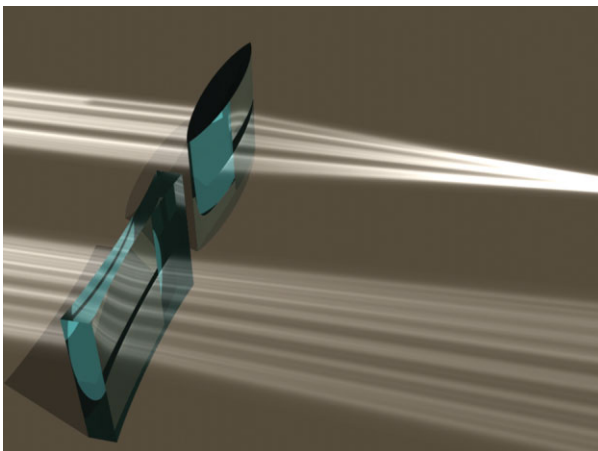


Abb. 2 Strahlenoptische Computersimulation verschiedener zylindrischer Linsen mit Brechzahl $n = 1,5$ (links) und $n = -1,5$ (rechts).

groß, in zwei Stücke zerrissen, stülpt sich gleichsam über den Beobachter und bewegt sich schließlich seitenverkehrt von ihm weg.

Hinter diesen spektakulären Effekten steckt physikalisch gesehen immer „nur“ das Snelliussche Brechungsgesetz. Für den letzten Fall erläutert Abbildung 4 (links) schematisch, wie das Bild zustande kommt. Der „falsche Knick“ im Licht an der Grenzfläche vergrößert den Sehwinkel, unter dem der Betrachter das Objekt sieht. Somit wirkt das Objekt vergrößert. Gleichet der Abstand des Betrachters zur Wasseroberfläche genau dem Abstand der Wasseroberfläche zum Objekt, so wird die Vergrößerung sogar unendlich.

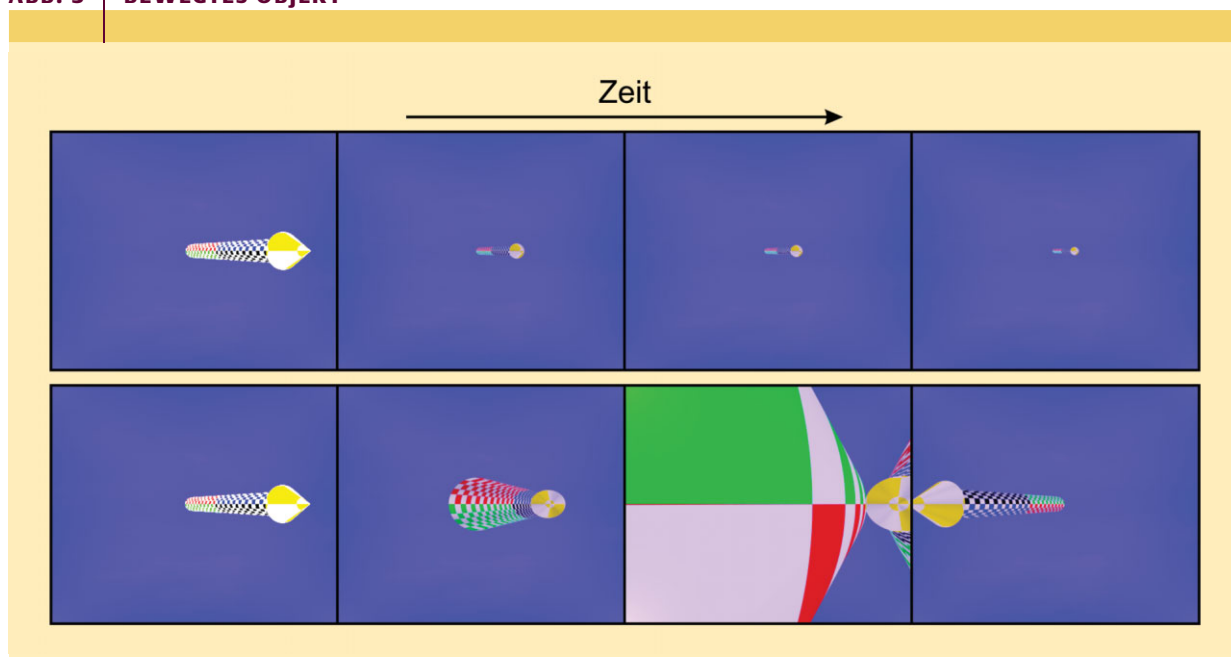
Das bedeutet auch, dass jede noch so kleine Struktur des Objekts aufgelöst werden kann. Insbesondere wird die Auflösung nicht mehr durch die übliche Beugungsbegrenzung auf circa die halbe Lichtwellenlänge limitiert. Für den

Fall $n = -1$ wurde dies von Sir John Pendry im Jahr 2000 [2] erstmals mathematisch gezeigt. Wer nun aber das Ende aller normalen Linsen gekommen sieht, sei gewarnt: Für $n = -0,9999999$ wird die Auflösung schon wieder endlich.

An dieser Stelle wollen wir kurz das sehr hilfreiche Prinzip des optischen Weges erläutern. In einem homogenen isotropen Material ist der optische Weg definiert als das Produkt aus dem physischen Weg $x > 0$, den das Licht zurücklegt und der Brechzahl n . Bei mehreren homogenen Teilen ergibt sich der gesamte optische Weg aus der Summe $x_1 n_1 + x_2 n_2 + \dots$. Sind hierbei Materialien mit $n < 0$ enthalten, so kann der optische Weg Null oder negativ werden.

Mit diesem Prinzip lassen sich manche Probleme der Optik kompakt formulieren. So besagt beispielsweise das Fermatsche Prinzip, dass das Licht den Weg von einem Punkt A zu einem Punkt B einschlägt, für den der zugehörige

ABB. 3 | BEWEGTES OBJEKT



Bildsequenz eines Pfeils, der sich mit konstanter Geschwindigkeit v in einem Medium mit Brechzahl n vom Beobachter weg bewegt. Oben: $n = 1$, unten: $n = -1$.

optische Weg ein lokales Extremum aufweist. Hieraus folgt das Snelliussche Brechungsgesetz – auch für $n < 0$.

Die Geschichte der Entdeckung

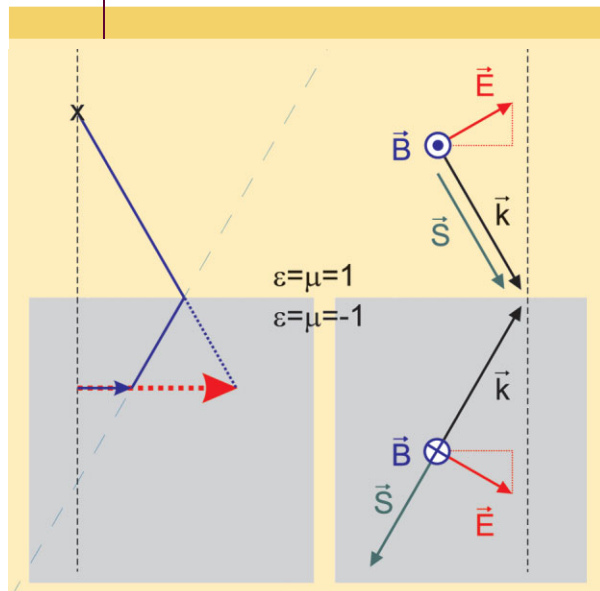
Bei diesen Gedankenspielen mit solchen hypothetischen Flüssigkeiten stellt man sich unweigerlich die Frage, wer zuerst auf die Idee kam, eine negative Brechzahl, also eine negative Phasengeschwindigkeit des Lichts, zu diskutieren. Im Rahmen der Elektrodynamik wird hierzu häufig Victor Veselago mit seiner Arbeit von 1968 [3] genannt. Jahrzehnte vor ihm betrachtete schon Sir Arthur Schuster 1904 nega-

tive Brechung von Licht. Sein Lehrbuch [4] zeigt dazu sogar eine Abbildung. Schuster machte aber keine Aussage darüber, wie $n < 0$ erreicht werden könnte. Georgy Danilovich Maluzhinets schlug 1951 [5] ein eindimensionales Modellsystem bestehend aus Kondensatoren und Spulen vor, das eine negative Phasengeschwindigkeit aufweist. Wir werden auf dieses einfache und ebenso anschauliche wie konkrete Modell weiter unten zurückkommen.

Das Konzept negativer Brechzahlen blieb aber über viele Jahrzehnte bestenfalls eine akademische Kuriosität oder wurde völlig vergessen – schließlich gab und gibt es keine natürlich vorkommenden optischen Materialien mit dieser Eigenschaft. Das heißt aber nicht, dass man sie nicht künstlich herstellen könnte. In der erwähnten Arbeit von Victor Veselago [3] findet man sogar eine Art Anleitung hierzu: Mit den bekannten Gesetzen der Elektrodynamik konnte er zeigen, dass die Kombination einer negativen elektrischen Permittivität ($\epsilon < 0$) und einer negativen magnetischen Permeabilität ($\mu < 0$) eines Materials zu einer negativen Brechzahl führt.

Den Kern des Beweises kann man Schritt für Schritt nachvollziehen: Nach den Maxwell'schen Gleichungen ist die Tangentialkomponente des \mathbf{E} -Feldes einer elektromagnetischen Welle an der Grenzfläche stetig und die Normalkomponente von $\mathbf{D} = \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}$ auch. Dasselbe gilt für die Tangentialkomponente von \mathbf{H} und die Normalkomponente von $\mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}$ (Abbildung 4 rechts). Macht nun beispielsweise die elektrische Permittivität ϵ einen Sprung von 1 auf -1 , so ändert sich das Vorzeichen der Normalkomponente von \mathbf{E} . Macht zudem die magnetische Permeabilität μ auch einen Sprung von 1 auf -1 , so ändert sich das Vorzeichen der Tangentialkomponente von \mathbf{B} .

ABB. 4 | NEGATIVE BRECHUNG



Links: Negative Brechung an einer Grenzfläche führt zu einem vergrößerten Bild. Ein Beobachter am Punkt x sieht das Objekt (blauer Pfeil) vergrößert (roter Pfeil). Rechts: Illustration der zugrundeliegenden elektrischen und magnetischen Felder (\mathbf{E} und \mathbf{B}) sowie des Poynting-Vektors \mathbf{S} und des Wellenvektors des Lichts \mathbf{k} .

Aus den nunmehr bekannten Vektoren \mathbf{E} und \mathbf{H} ergibt sich der Poynting-Vektor aus dem Vektorprodukt $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$. Der Wellenvektor \mathbf{k} resultiert aus dem Induktionsgesetz, das besagt, dass die Vektoren \mathbf{k} , \mathbf{E} und \mathbf{B} (in dieser Reihenfolge) ein Rechtssystem bilden – immer! Das Ergebnis ist verblüffend. Das Licht wird zur ungewohnten Seite des Lotes gebrochen, also zu negativen Winkeln im Snelliusschen Brechungsgesetz. Folglich ist die Brechzahl negativ.

In der Tat ist der Wellenvektor des Lichts, also auch der Vektor der Phasengeschwindigkeit, antiparallel zum Poynting-Vektor und damit auch negativ. Reflexion tritt übrigens im diskutierten Fall an der Grenzfläche nicht auf, weil die Impedanz des Mediums identisch zur Vakuumimpedanz ist.

Ein Bauplan

Ein fertiger Konstruktionsplan für ein Material mit negativer Brechzahl ist das noch nicht. Es zeigt aber, dass wir nicht nur eine elektrische ($\epsilon < 0$), sondern auch eine magnetische ($\mu < 0$) Antwort des Materials benötigen.

Lokale elektrische Felder können beispielsweise von Plattenkondensatoren hervorgerufen werden, Magnetfelder durch Spulen. Kann man also ein effektives Material mit $n < 0$ aus einer Kombination von Kondensatoren und Spulen aufbauen, die in Form eines Kristalls zusammengesetzt sind?

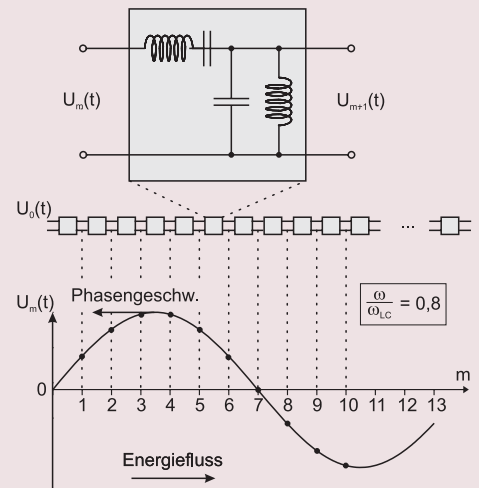
Genau das ist der Punkt bei einem Metamaterial. Das einfachste Modell hierfür ist eine eindimensionale Anordnung in einer Kette von Schaltelementen (künstlichen „Atomen“), die jeweils aus zwei Kapazitäten C und zwei Induktivitäten L bestehen (siehe Abbildung in „Ein einfaches eindimensionales Modellsystem“ rechts). Regt man ein solches „Atom“ auf seiner linken Seite mit einer harmonisch variierenden externen Spannung $U(t)$ an (dies entspricht dem einfallenden Licht in der Optik), dann breitet sich auf ihm eine Strom- und eine Spannungswelle aus (in der Abbildung skizziert). Gezeigt ist der Fall, für den die Wellenlänge viel größer als die räumliche Periode der Einzelschaltkreise ist. Die Welle mittelt über die „Atome“ und sieht effektiv ein homogenes Medium – ganz genau so, wie eine Lichtwelle über die richtigen Atome in einem Kristall mittelt. Für Frequenzen unterhalb der LC -Schwingkreisfrequenz laufen Punkte konstanter Phase der Spannung von rechts nach links, wohingegen die Energie von links nach rechts, also von der Spannungsquelle weg transportiert wird.

Ganz rechts könnte sich ein Glühbirnchen oder ein anderer Verbraucher befinden. Die Richtung des Energietransports ist antiparallel zur Richtung der Phasengeschwindigkeit – die Brechzahl ist negativ.

Wo stehen wir heute?

Gegenwärtig stellen wir uns die Frage, wie man von solchen Schaltkreisen in den optischen Bereich kommt. Das entspricht einem Sprung von Zentimeter- zu Mikrometerwellen. Erstens müssen die Kapazitäten und Induktivitäten entsprechend der Wellenlänge um circa fünf Zehnerpoten-

EIN EINFACHES EINDIMENSIONALES MODELLSYSTEM



Einfaches eindimensionales Modellsystem für ein Metamaterial mit einer negativen Phasengeschwindigkeit.

Der oben gezeigte Schaltkreis ist ein einfaches eindimensionales Modellsystem für ein Metamaterial mit einer negativen Phasengeschwindigkeit, das auf Georgy Danilovich Maluzhinets zurückgeht [5]. Es besteht aus einer periodischen Anordnung „künstlicher Atome“. Jedes davon ist aus zwei Kapazitäten C und zwei Induktivitäten L aufgebaut. Im oberen Teil sind L und C jeweils in Serie geschaltet, im rechten Teil parallel in Form eines Schwingkreises mit LC -Schwingkreisfrequenz $\omega_{LC} = 1/(LC)^{1/2}$.

Regt man die Anordnung auf der linken Seite mit einer Spannungsquelle mit Spannung $U(t) = U_0 \cos(\omega t)$ und Kreisfrequenz $\omega > 0$ an, so führt dies zu einem Strom $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$, der einen Energiefluss von links nach rechts beschreibt ($U_0 I_0 > 0$). Für die Spannung $U_m(t)$ am „Atom“ mit Index m erhält man nach einer kleinen Rechnung die Spannungswelle

$$U_m(t) = U_0 \cos(\omega t - km)$$

mit der Relation

$$k = \frac{\omega}{\omega_{LC}} - \frac{\omega_{LC}}{\omega}$$

Sie gilt im Limes $|k| \ll \pi$, wenn also die Wellenlänge viel größer als die räumliche Periode der Einzelschaltkreise ist.

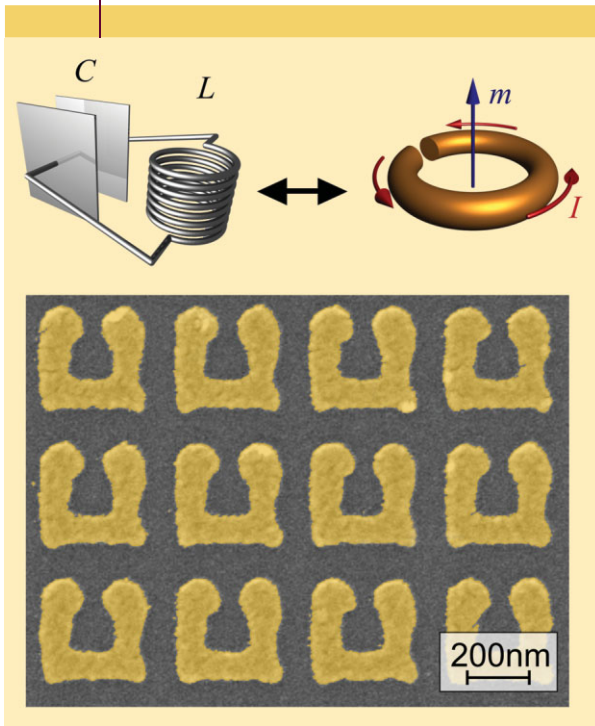
Der Energiefluss ist unabhängig von der Frequenz von links nach rechts gerichtet, also weg von der Spannungsquelle. Die Richtung der Phasengeschwindigkeit der Spannungswelle hängt aber von der Frequenz ab. Für Frequenzen oberhalb der LC -Frequenz laufen die Phasenfronten ganz normal von links nach rechts ($k > 0$). Für Frequenzen unterhalb der LC -Frequenz laufen sie umgekehrt von rechts nach links ($k < 0$), also entgegen der Energieausbreitung. In der Sprechweise der Optik entspricht diese Situation einer negativen Brechzahl $n < 0$.

Ersetzt man beispielsweise die LC -Serienschaltung oben im „Atom“ durch eine Induktivität L und die LC -Parallelschaltung durch eine Kapazität C , so ergeben sich nach rechts laufende Phasenfronten für alle Frequenzen ($k = \omega/\omega_{LC} > 0$). Dies entspräche einem normalen optischen Material mit $n > 0$.

zen verkleinert werden. Hier kommt die Nanotechnologie ins Spiel. Zweitens braucht man in der Optik keine elektrischen Verbindungsdrähte zwischen den „photonischen Atomen“. Drittens muss letztlich eine dreidimensionale statt einer eindimensionalen Struktur maßgeschneidert werden.

Aus diesen Gründen sehen die Strukturen der Optik auf den ersten Blick anders aus. Sie folgen aber im Kern demselben Gedanken, nämlich eine elektrische und eine mag-

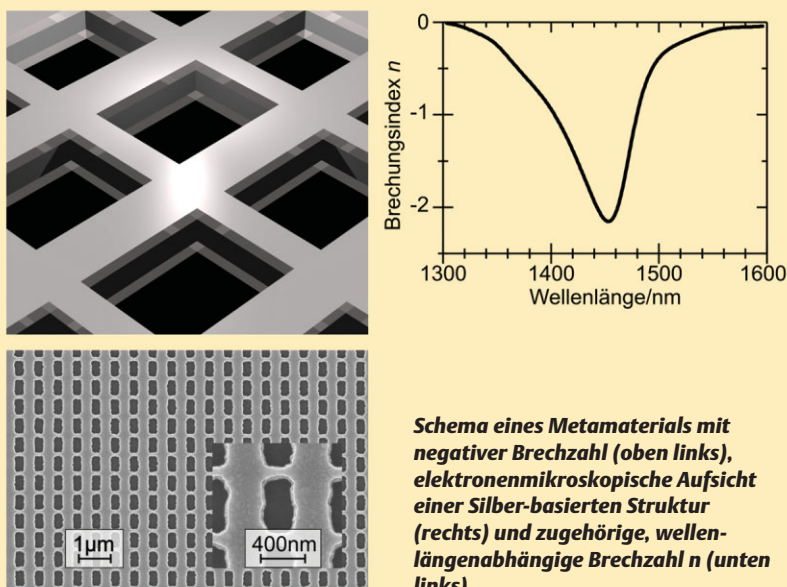
ABB. 5 | METAMATERIAL I



Schema eines geschlitzten Rings und Analogie zu einem LC-Schwingkreis, bestehend aus einer Spule und einer Induktivität (oben). Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Metamaterials bestehend aus nanoskopischen geschlitzten Gold-Ringen mit einer Resonanzwellenlänge von 3 µm (unten).

netische Beeinflussung geschickt zu kombinieren. Hierbei ist der elektrische Teil einfach zu realisieren, da einem die Natur hilft: Eine negative elektrische Permittivität $\epsilon < 0$ bekommt man von jedem Metall unterhalb seiner Plasmafrequenz. Die negative Permittivität bedeutet, dass das lokale elektrische Feld im Metall dem externen elektrischen Feld entgegen gerichtet ist und es vom Betrage her überträgt.

ABB. 6 | METAMATERIAL II



Schema eines Metamaterials mit negativer Brechzahl (oben links), elektronenmikroskopische Aufsicht einer Silber-basierten Struktur (rechts) und zugehörige, wellenlängenabhängige Brechzahl n (unten links).

Eine negative magnetische Permeabilität $\mu < 0$ entspricht einem starken Diamagneten – dieser Aspekt ist schon schwieriger zu realisieren. Das einfachste Beispiel eines Diamagneten ist ein geschlossener metallischer Ring. Hat das Licht eine Magnetfeldkomponente senkrecht zur Ebene des Rings, induziert diese ein elektrisches Wirbelfeld im Ring. Bei einem leitfähigen Ring resultiert hieraus weiterhin ein elektrischer Wirbelstrom I , der ein Magnetfeld senkrecht zur Leiterschleife hervorruft. Dieses ist dem externen Magnetfeld des Lichts entgegengesetzt.

Eine quantitative Behandlung zeigt aber leider, dass das resultierende magnetische Dipolmoment eines geschlossenen Rings recht klein ist, so dass selbst bei räumlich dichter Packung der Ringe zwar $\mu < 1$ möglich wird, $\mu < 0$ aber nicht. Letztlich liegt der physikalische Grund darin, dass ein geschlossener Ring (mit Induktivität L) keine Resonanz aufweist. Schlitzt man den Ring hingegen an einer Stelle auf, so formen die beiden Enden des Drahtes die Platten eines Plattenkondensators mit Kapazität C , die in Serie zur Induktivität L des Rings geschaltet ist (Abbildung 5 oben). Daher ergibt sich eine elektromagnetische Resonanz bei der LC-Frequenz $\omega_{LC} = 1/(LC)^{1/2}$. Bei räumlich dichter kristalliner Packung der geschlitzten Ringe in ein Metamaterial kann so eine stärkere diamagnetische Antwort des Systems und somit $\mu < 0$ erreicht werden [6, 7].

Abbildung 5 zeigt zudem eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Struktur, die den Magnetismus erstmals zu einer Frequenz von 100 THz (3 µm Wellenlänge) gebracht hat [8]. Das Konzept geschlitzter Ringe ist extrem robust. Man kann auch zwei sehr große gegenüberliegende Schlitze in einen Ring einfügen, so dass praktisch nur noch zwei sich gegenüberstehende Drähte übrig bleiben. Fügt man senkrecht zu den Drahtpaaren noch parallele Drähte ein, erhält man die Gitterstruktur aus Abbildung 6. Die Drähte sind dabei parallel zum elektrischen Feld und wirken wie ein „verdünntes Metall“ mit $\epsilon < 0$.

Das Prinzip des verdünnten Metalls ist übrigens identisch zur Tür am Mikrowellenherd: Die Wellenlänge der elektromagnetischen Welle (circa 10 cm) ist viel größer als der Abstand zwischen den Drähten, so dass die Welle effektiv ein Metall mit reduzierter Elektronendichte und somit reduzierter Plasmafrequenz „sieht“. Die Mikrowellenstrahlung kommt nicht raus und man kann dennoch hineinschauen. Der rechte Teil von Abbildung 6 zeigt die aus Experimenten resultierende Brechzahl n [9].

Wie kann man die zugehörige negative Phasengeschwindigkeit des Lichts in einem solchen Material möglichst direkt experimentell nachweisen? Zum Beispiel mit einem Laufzeitexperiment [10]. Hierzu lässt man einen Lichtimpuls durch das Metamaterial laufen und misst (durch Interferenz mit einer Referenzwelle) den Ankunftszeitpunkt eines Wellenberges der transmittierten Lichtwelle. Bei einer Materialdicke $d > 0$ ergibt sich eine Laufzeit $\Delta t = d/c$. Eine negative Phasengeschwindigkeit $c = c_0/n < 0$ führt also zu einer negativen Laufzeit. Genau dies haben wir in unseren Experimenten gefunden. Variiert man die Zentralfrequenz

des Impulses, kann die Dispersion ausgemessen werden [10].

Um in den sichtbaren Spektralbereich vorzudringen, ist allerdings eine weitere Miniaturisierung der diskutierten Strukturen [9,10] um circa einen Faktor zwei erforderlich. Weitere technische Herausforderungen sind die Reduktion der Verluste sowie die Herstellung großflächiger und wirklich dreidimensionaler isotroper Strukturen für die Optik und Photonik, bei denen negative, von der Wellenlänge abhängige Brechung zudem in einem großen spektralen Bereich auftritt. Wahrscheinlich lassen sich diese Probleme aber in den nächsten Jahren lösen. Dann ist unsere Phantasie gefragt, um etwas Nützliches damit anzufangen.

Zusammenfassung

Durch Maßschneidern funktioneller nanoskaliger Baugruppen photonische Atome, dicht zusammengepackt zu einem effektiven Medium, können künstliche Materialien mit qualitativ neuartigen optischen Eigenschaften hergestellt werden. Ein Beispiel sind Materialien mit einer negativen Brechzahl. Die Strahlen- und Wellenoptik dieser Materialien steckt voller Überraschungen, wie bereits einfache computergenerierte Abbildungen und erste Experimente zeigen.

Stichworte

Snelliussches Brechungsgesetz, negativer Brechungsindex, Metamaterialien, photonisches Atom.

Literatur

- [1] G. Dolling et al., Opt. Express **2006**, *14*, 1842. Diese Arbeit wie auch die Abbildungen 1-3 Artikel basieren auf dem Software-Paket POV-Ray 3.6 (www.pov-ray.org).
- [2] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **2000**, *85*, 3966.
- [3] V. G. Veselago, Sov. Phys. Usp. **1968**, *10*, 509.
- [4] A. Schuster, An introduction to the theory of optics, Edward Arnold, London 1904.

- [5] G.D. Malyuzhinets, Zhurnal Technicheskoi Fiziki **1951**, *21*, 940.
- [6] J. B. Pendry et al., IEEE Trans. MTT **1999**, *47*, 2075.
- [7] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, Science **2001**, *292*, 77.
- [8] S. Linden et al., Science **2004**, *306*, 1351.
- [9] G. Dolling et al., Opt. Lett. **2006**, *31*, 1800.
- [10] G. Dolling et al., Science **2006**, *312*, 892; G. Dolling, M. Wegener, S. Linden, Phys. Unserer Zeit **2006**, *37*(4), 157.

Die Autoren



Gunnar Dolling promoviert in der Arbeitsgruppe von Martin Wegener am Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe (TH) und am DFG-Forschungszentrums für Funktionelle Nanostrukturen (CFN).



Martin Wegener ist Ordinarius am Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe (TH), Arbeitsgruppenleiter am Institut für Nanotechnologie des Forschungszentrums Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft und Koordinator des Karlsruher DFG-Forschungszentrums CFN.



Stefan Linden ist Leiter einer Helmholtz-Hochschul-Nachwuchsgruppe am Institut für Nanotechnologie am Forschungszentrum Karlsruhe und am Institut für Angewandte Physik der Universität Karlsruhe (TH).

Anschrift

Gunnar Dolling, Prof. Dr. Martin Wegener, Dr. Stefan Linden, DFG-Center for Functional Nanostructures, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe. gunnar.dolling@physik.uni-karlsruhe.de