

# Photonische Metamaterialien

S. Linden, M. Wegener, INT

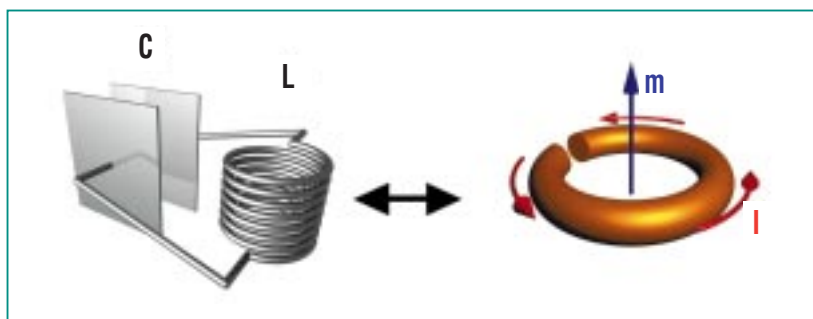
Warum ist die Phasengeschwindigkeit  $c$  des Lichts im Glas oder in einem Kochsalzkristall kleiner als im Vakuum? Eine typische Antwort eines Physikers oder Ingenieurs könnte lauten: „Das elektrische Feld des Lichts regt im Material mikroskopische elektrische Dipole zu Schwingungen an. Diese Dipole strahlen dann wieder elektromagnetische Wellen ab, regen damit andere elektrische Dipole an, usw. Daher bewegt sich das Licht (meist) langsamer um einen gewissen Faktor, den wir die optische Brechzahl  $n = c_0/c$  nennen. Ihr Quadrat ist gleich der elektrischen Permittivität:  $n^2 = \epsilon$ .“ Meistens richtig, denn in jedem typischen Optik-Lehrbuch liest man circa auf Seite 10, dass magnetische Dipole bei optischen Frequenzen keine Rolle spielen. In anderen Worten: Die magnetische Permeabilität ist  $\mu = 1$ , sonst müsste es nämlich heißen  $n^2 = \epsilon\mu$ , also  $n = \pm(\epsilon\mu)^{1/2}$ .

Im Jahr 2000 stellten David R. Smith und Mitarbeiter [1], basierend auf den theoretischen Vorarbeiten von Sir John Pendry [2] aus dem Jahr 1999 ein künstliches Material vor, ein sogenanntes „Metamaterial“, das im Mikrowellenbereich (10-GHz-Frequenz) nicht nur eine magnetische Antwort mit  $\mu < 0$  aufwies, sondern zusammen mit  $\epsilon < 0$  im gleichen Frequenzbereich auch noch eine negative Brechzahl  $n = -(\epsilon\mu)^{1/2} < 0$ . Ein Jahr später konnte die Gruppe sogar experimentell zeigen, dass mit der negativen Brechzahl beim Übergang einer elektromagnetischen Welle vom Material in Luft eine Brechung zur „falschen“ Seite des Lots einhergeht [3]. Im Snellius-Brechungsgesetz wird der Bre-

chungswinkel negativ, die Brechzahl somit auch.

Was versteht man eigentlich unter Metamaterialien? Normale Materialien (z. B. Kristalle) haben typische interatomare Abstände (Gitterkonstanten) im Bereich eines halben Nanometers. Dies ist circa drei Größenordnungen kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Daher mittelt das Licht über die atomare Struktur und „sieht“ – abgesehen von den Symmetrien des Kristalls – die atomare Periodizität nicht. Die Materialien können deshalb als effektive homogene Medien beschrieben werden. Metamaterialien bestehen aus funktionellen Bausteinen, künstlichen „Atomen“, deren Eigenschaften maßgeschneidert werden können. Sie können z. B. unter anderem auch ein magnetisches Dipolmoment aufweisen. Diese „Atome“ können zu einem „Kristall“ mit einer künstlichen „Gitterkonstanten“ angeordnet werden. Ist diese „Gitterkonstante“ deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts, kann auch das Metamaterial als effektives homogenes Medium beschrieben werden.

Wie kann man mit Hilfe von Metamaterialien Magnetismus (also  $\mu \neq 1$ ) bei optischen Frequenzen erreichen? Offenbar werden magnetische „Atome“ benötigt, also magnetische Dipole, die auch bei optischen Frequenzen noch nennenswert auf das äußere Feld reagieren. Metallische Ringe mit einem Schlitz [2] sind eine Möglichkeit: Die beiden Enden des Drahtes formen die Platten eines Plattenkondensators mit Kapazität  $C$ , die in Serie zur Induktivität  $L$  des Rings geschaltet ist (siehe Abb. 1). Daher ergibt sich eine elektromagnetische Resonanz bei der LC-Frequenz  $\omega_{LC} = 1/(LC)^{1/2}$ . Das magnetische Dipolmoment eines Rings steht bekanntermaßen senkrecht auf der Ebene des Rings. Bei räumlich dichter (kristalliner) Packung der geschlitzten Ringe („split-ring resonators“) in einem Metamaterial kann so  $\mu < 0$  erreicht werden [2]. Die Frequenzabhängigkeit der magnetischen Permeabilität  $\mu(\omega)$  des geschlitzten Rings ist das magnetische Analogon zum Lorentz-Oszillatormodell für die elektrische Permittivität  $\epsilon(\omega)$  eines elektrischen Dipols: Unterhalb der Resonanz reagiert das Material paramagnetisch, oberhalb diamagnetisch.



**Abb. 1: Illustration der Analogie zwischen einem LC-Schwingkreis und einem geschlitzten Ring. Durch Anregung eines zirkulierenden Stroms  $I$  im geschlitzten Ring durch das äußere elektromagnetische Feld wird ein magnetisches Moment  $m$  hervorgerufen.**

Für nicht zu kleine Strukturen sind sowohl die Induktivität  $L$  als auch die Kapazität  $C$  des geschlitzten Rings proportional zum Durchmesser des Rings. Somit wird die LC-Frequenz umgekehrt proportional zur Ringgröße. Möchte man zu Wellenlängen der Telekommu-

nikation um 1500 nm gelangen, sind Ringdurchmesser im Bereich von 150 nm, also minimale Strukturbreiten von circa 50 nm, erforderlich (siehe Abb. 2) – die Methoden der Nanotechnologie sind also einmal mehr gefragt.

Nach entsprechenden Vorexperimenten mit circa doppelt so großen Strukturen [4] und nachfolgenden Designstudien [5] konnten wir 2005 in der Tat in den Telekommunikationsbereich vorstoßen [6,7]. Die gemessenen optischen Transmissions- und Reflexionsspektren der mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellten Strukturen zeigen je nach Anregungsgeometrie mehrere ausgeprägte Resonanzen (siehe Abb. 3). Die eingehende Analyse der Spektren sowie der Vergleich mit der Theorie zeigen [4-6], dass die Resonanz um 1500 nm Wellenlänge in der Tat der Bedingung  $\mu < 0$  genügt (bei geeigneter Polarisation).

Die außerordentlich schnelle Entwicklung auf dem Gebiet der Metamaterialien in den letzten fünf Jahren hat künstlichen Magnetismus über mehr als vier Zehnerpotenzen der Frequenz hinweg von ersten Demonstrationen im Mikrowellenbereich bis hin zur Optik

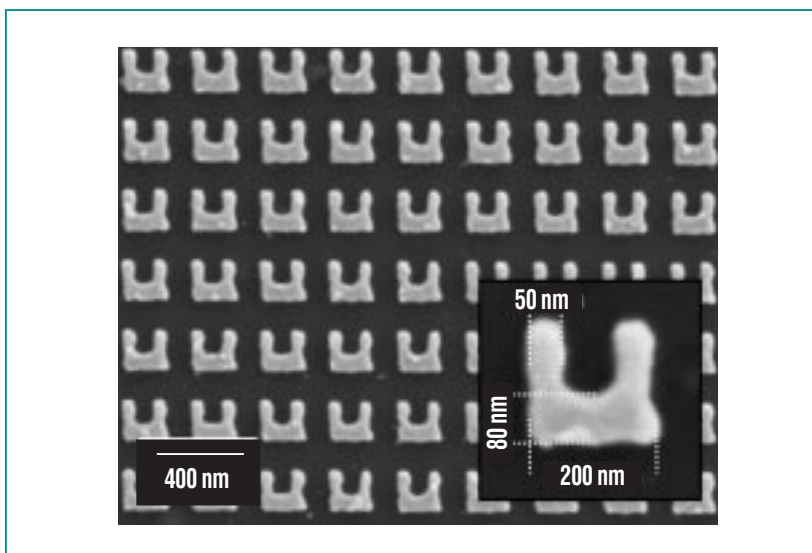


Abb. 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme einer periodischen planaren Anordnung von geschlitzten Ringen aus Gold.

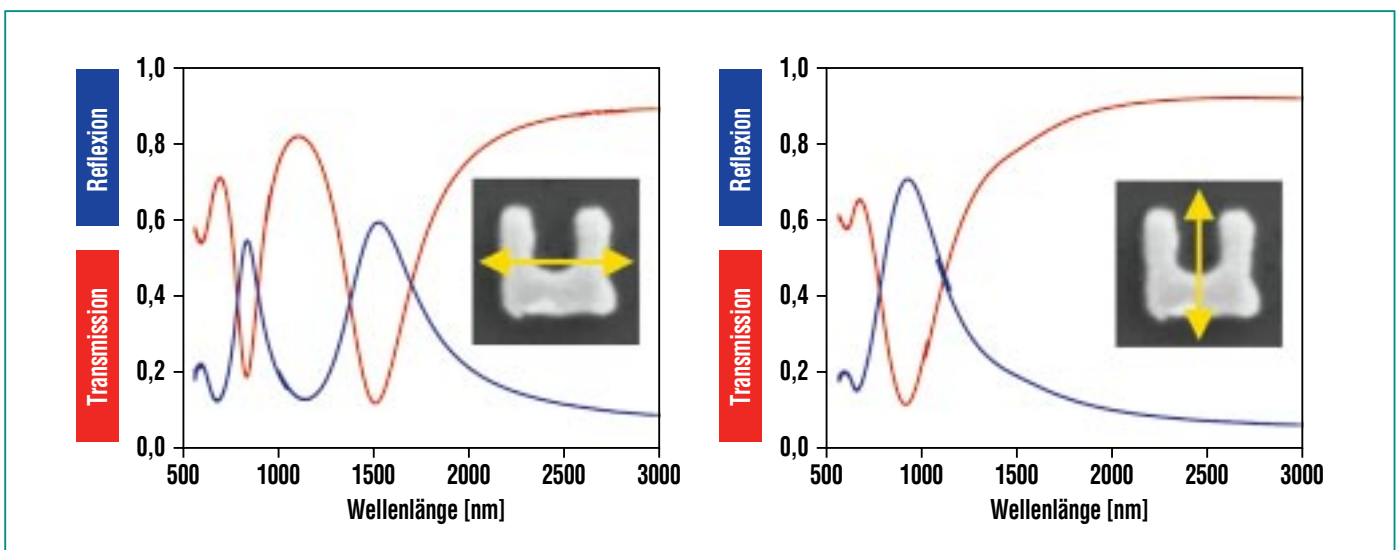


Abb. 3: Transmissions- und Reflexionsspektren der in Abb. 2. gezeigten Probe für senkrechten Einfall. Linke Seite: Anregung mit horizontal polarisiertem Licht. Rechte Seite: Anregung mit vertikal polarisiertem Licht. Für horizontal polarisiertes Licht mit einer Wellenlänge  $\lambda = 1500$  nm kann die fundamentale magnetische Mode des geschlitzten Ringes beobachtet werden.

gebracht. Kombiniert man die negative magnetische Permeabilität  $\mu$  mit einer negativen elektrischen Permittivität  $\epsilon$  („verdünntes Metall“), so gelangt man zu einer negativen optischen Brechzahl  $n$  [8].

Die Phasengeschwindigkeit des Lichts  $c$  wird negativ, also dem Poynting Vektor der Welle entgegengesetzt. Dies ermöglicht nicht nur interessante quantenoptische oder nichtlinear optische Experi-

mente, sondern eröffnet auch neue optische Elemente wie z. B. die so genannte „perfekte Linse“ [9], die prinzipiell optische Abbildungen mit einer Auflösung weit unterhalb der Wellenlänge des Lichts erlaubt.

## Literatur

- [1] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4184 (2000)
- [2] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, *IEEE Trans. MTT* 47, 2075 (1999)
- [3] R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz, *Science* 292, 77 (2001)
- [4] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, C. Soukoulis, *Science* 306, 1351 (2004)
- [5] C. Enkrich, F. Pérez-Willard, D. Gerthsen, J. Zhou, C.M. Soukoulis, M. Wegener, S. Linden, *Adv. Mater.* 17, 2547 (2005)
- [6] C. Enkrich, M. Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. Zhou, T. Koschny, C.M. Soukoulis, *Phys. Rev. Lett.* 95, 203901 (2005)
- [7] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, J. F. Zhou, C.M. Soukoulis, S. Linden, *Opt. Lett.* 30, 3198 (2005)
- [8] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis, S. Linden, *Science* 312, 892 (2006)
- [9] J.B. Pendry, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966 (2000)

**SONOSYS®**  
Measuring microCounts together

Hochfrequente Ultraschall-Reinigungssysteme (**Megasonic**) für die Halbleiter-Produktion und die Mikro-/Nano-Technik

Effiziente Abreinigung kleinster Partikel bis 80 nm von empfindlichen Oberflächen und aus Gräben von Nanostrukturen

**SONOSYS® GmbH**  
Daimlerstraße 6 D-75305 Neuenbürg  
Tel. 07082 / 79184-0 Fax 07082 / 79184-99  
E-Mail: info@sonosys.de <http://www.sonosys.de>