

Fast sichtbar

Metamaterialien mit negativem Brechungsindex sind auf dem Weg in den sichtbaren Spektralbereich

1967 hat Viktor Veselago aus Moskau in einem Theoriewerk die Möglichkeit diskutiert, Materialien mit negativem Brechungsindex n in der Optik einzusetzen. Dies sei möglich, wenn man in einem Material sowohl negative Permittivität ϵ als auch negative Permeabilität μ vorliegen habe, sodass die Brechzahl $n = \pm\sqrt{\epsilon\mu}$ negativ würde. Er sagte voraus, dass man einerseits einen umgekehrten Doppler-Effekt und eine inverse Tscherenkow-Strahlung sehen müsste, dass andererseits der Poynting-Vektor in die entgegengesetzte Richtung des Wellenvektors zeigt und dass das Dreibein aus \mathbf{k} , \mathbf{E} und \mathbf{B} linkshändig ist. In der Optik im Nahinfraroten und Sichtbaren würden solche Materialien ein ganz neues Feld eröffnen, zum Beispiel bei der Licht-Materie-Wechselwirkung, bei der Solitonen ausbreiten und bei Effekten der Hohlraum-Quantenelektrodynamik. Im Jahre 2000 erregte der britische Physiker John Pendry dann großes Aufsehen mit der Vorhersage, dass ein Material mit negativem Brechungsindex zu einer perfekten Linse führen könnte, die nicht mehr ans Beugungslimit gebunden ist [1].

Allerdings existieren in der Natur keine Materialien mit negativem Brechungsindex oder mit negativer Permeabilität. Künstlich lassen sich diese Eigenschaften mit sog. Metamaterialien erzielen, die aus kleinen periodisch angeordneten Strukturen bestehen, die deutlich kleiner als die Wellenlänge sind, sodass die elektromagnetischen Wellen nur effektive Materialeigenschaften spüren. Mithilfe einer Kombination aus Metallstangen und sog. Split-Ring-Resonatoren (Abb. 1), die eine magnetische Resonanz mit negativer

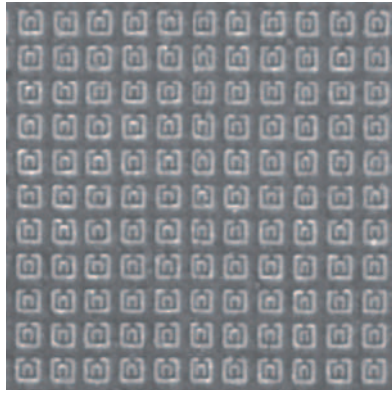


Abb. 1: Dieses Metamaterial besteht aus 400 nm großen Doppel-Split-Ring-Resonatoren aus Gold auf GaAs und weist eine magnetische Resonanz bei 3 μm Wellenlänge auf (Quelle: MSL, Uni Stuttgart).

Permeabilität μ erzeugen, gelang es 2001 David Smith in San Diego erstmals, einen negativen Brechungsindex bei GHz-Frequenzen nachzuweisen [2]. Verluste spielten in diesem Material kaum eine Rolle, da Metalle in diesem Frequenzbereich fast perfekte Leiter sind. Ihm gelang es anschließend in der Tat, experimentell negative Brechung an solchen Materialien nachzuweisen.

In den letzten 14 Monaten hat die Forschung an Metamaterialien einen riesigen Sprung zu optischen Wellenlängen hin gemacht, und die Anzahl hochklassiger Forschungsarbeiten ist geradezu explodiert. Einen ganz entscheidenden Schritt dazu haben Stefan Linden und Martin Wegener aus Karlsruhe mit der Herstellung von Gold-Nanoring-Strukturen mithilfe von Elektronenstrahl-Lithographie geleistet. Diese Strukturen besitzen eine negative Permeabilität bei einer Wellenlänge von 3 μm (entspricht einer Frequenz von 100 THz) [3]. Da man negative Permittivität zum Beispiel mit Hilfe von Plasmonen bei optischen Wellenlängen erzeugen kann, war diese Realisierung einer magnetischen Resonanz bei der bisher höchsten Frequenz ein fundamentaler Fortschritt auf dem Weg zu einem negativen Brechungsindex in der Optik.

Die einer solchen Resonanz zugrunde liegende Idee ist relativ einfach: Ein Metallring, der an einer Seite offen ist, bildet einen LC-Schwingkreis (Abb. 2). Die Lücke bildet dabei einen Kondensator, und die freien Elektronen im Leitungsband des Metalls werden aufgrund der Geometrie auf eine Kreisbahn gezwungen, was ein H -Feld zur Folge hat. Dieses H -Feld kann ent-

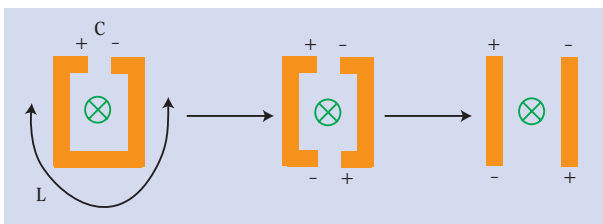


Abb. 2: Ein an einer Seite offener Metallring, ein Split-Ring-Resonator, bildet einen LC-Schwingkreis. Ist das einfallende E -Feld parallel zum Kondensator, kann ein H -Feld senkrecht zu der Struktur resultieren. Die Serie zeigt die schrittweise Vereinfachung zur Doppeldrahtstruktur.

weder direkt aufgrund der B -Komponente des Lichtfeldes oder aber indirekt über die E -Komponente angeregt werden, die über den Kondensator wirkt. Das magnetische Feld H als Funktion der Frequenz an dieser LC-Resonanz hat einen dispersiven Verlauf, und unter geeigneten Bedingungen ist ein negatives μ möglich, das den Zusammenhang zwischen H und B herstellt.

Das Fernziel dieser Arbeiten ist die Herstellung eines Materials mit negativem Brechungsindex im sichtbaren Spektralbereich bei gleichzeitig kleinen Verlusten und möglichst isotropen Eigenschaften. Auf diesem Weg wurde diese Struktur im vergangenen Jahr in mehrerer Hinsicht verbessert. Christian Enkrich aus der Karlsruher Gruppe [4] gelang es, die magnetische Resonanz bis in den Telekommunikations-Wellenlängenbereich nach 1,2 μm zu schieben, indem er die Basislinie der U-förmigen Split-Ring-Resonatoren verdickte. Zwar sagte eine japanische Gruppe mit Simulationen voraus, dass sich die magnetische Resonanz durch zwei Lücken und die Verwendung von Silber statt Gold in den blauen Spektralbereich schieben lässt [5], andere Simulationen zeigen jedoch eine Maximalfrequenz aufgrund der Elektronenenergie bei etwa 600 THz [6].

Verstärkt versucht man daher, alternative, einfacher herzustellende Strukturen als Metamaterialien einzusetzen. Dazu muss im Prinzip nur sichergestellt sein, dass ein Kreisstrom fließt, der durch eine Kapazität Rückstellkräfte erfährt und zu einem LC-Schwingkreis bei optischen Frequenzen führt.

Vladimir Shalaev von der Purdue-Universität [7] und Gunnar Dolling aus der Karlsruher Gruppe [8] haben im Dezember 2005 eine Alternativ-Struktur präsentiert, die einfach aus zwei übereinander liegenden Gold-Nanodrähten oder -platten besteht. Damit erreichten sie eine negative Permeabilität bei 1,5 μm . Shalaev wies sogar mit einer interferometrischen Methode bei dieser wichtigen Telekom-Wellenlänge einen Brechungsindex von $-0,3$ nach. Den Höhepunkt des letzten Jahres setzte dann eine Gruppe aus Manchester und Birmingham, die die Doppeldraht-Struktur als kleine Goldpfosten aufrecht hinstellte [9]. Dies führte zu einer negativen Permeabilität von $\mu = -0,3$ sowie einer negativen Permittivität

von $\varepsilon = -0,7$ bei der Wellenlänge von 550 nm im grünen Spektralbereich. Da jedoch auch die Imaginärteile in die Berechnung von n mit eingehen und diese aufgrund von hohen Verlusten sehr groß waren, gelang es in dieser Konfiguration nicht, einen negativen Brechungsindex im Sichtbaren nachzuweisen.

Weitere Alternativstrukturen hat die Gruppe von Stephen Brueck aus Albuquerque vorgeschlagen: zum einen benutzte er einen Mäander vor einem Spiegel, der mit seinem eigenen Spiegelbild eine Stromschleife bildet und zu einem negativen μ bei 60 THz führt [10]. Zum anderen demonstrierte seine Gruppe eine Struktur aus zwei gegenüberliegenden Metallfolien mit einem regelmäßigen Schachbrettmuster aus Nanolöchern. Die beiden Folien verhalten sich analog zu den gegenüberliegenden Drähten und führen den Kreisstrom, während die Löcher als Kondensatoren dienen. Diese Struktur weist einen negativen Brechungsindex von $n = -2$ bei einer Wellenlänge von $2 \mu\text{m}$ auf. Allerdings ist auch hier der Imaginärteil von n sehr groß, sodass diese Struktur hohe Verluste aufweist [11].

Die große Hoffnung ist, dass bald ein negativer Brechungsindex im Bereich der sichtbaren Wellenlängen bei gleichzeitig niedrigen Verlusten erreicht wird. Vielleicht geschieht dies mit Unterstützung aus der Hochfrequenz-Elektrotechnik, wo im Rahmen der „Transmission Line Theory“ solche linkshändigen Materialien schon länger untersucht werden.^{#)}

HARALD GIessen

[1] J. B. Pendry et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000)
 [2] R. A. Shelby et al., Science **292**, 77 (2001)
 [3] S. Linden et al., Science **303**, 1494 (2004)
 [4] C. Enkrich et al., Adv. Mat. **17**, 2547 (2005)
 [5] A. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 237401 (2005)
 [6] J. Zhou et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 223902 (2005)
 [7] V. Shalaev et al., Opt. Lett. **30**, 3356 (2005)
 [8] G. Dolling et al., Opt. Lett. **30**, 3198 (2005)
 [9] A. N. Grigorenko et al., Nature **438**, 335 (2005)
 [10] S. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 37402 (2005)
 [11] S. Zhang et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 137404 (2005)

Quantenelektrodynamik im Test

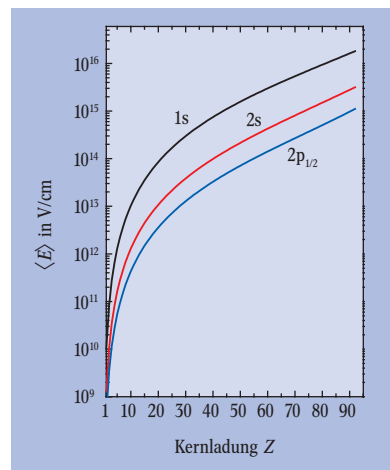
Ein Experiment mit lithiumähnlichem Uran ist ein neuer Meilenstein beim Test der Quantenelektrodynamik in starken Feldern.

Die Quantenelektrodynamik (QED), welche die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen beschreibt, ist eine der am besten überprüften und erfolgreichsten Theorien der Physik. Mittlerweile ist es gelungen, die Vorhersagen der QED für leichte Atome wie Wasserstoff mit einer extrem hohen Genauigkeit zu überprüfen. In den extrem starken elektrischen Feldern, die in den schwersten Atomen vorliegen, treten allerdings QED-Effekte höherer Ordnung auf, deren experimentelle Überprüfung noch aussteht. Daher ist seit vielen Jahren ein möglichst genauer Test der QED in starken elektrischen Feldern Gegenstand eines stetigen Wechselspiels zwischen Experiment und Theorie. Starke Felder mit Feldstärken größer als 10^{16} V/cm finden sich in der Nähe von Kernen mit Kernladungszahlen $Z > 80$ (Abb.). Sie übertreffen selbst die Felder, die sich mit den derzeit stärksten Lasern erzeugen lassen, um mehr als drei Größenordnungen. Unter diesen Umständen ist die elektromagnetische Kopplungskonstante αZ mit der Feinstrukturkonstante $\alpha \approx 1/137$ nicht mehr klein gegen 1. Damit lässt sich eine störungstheoretische Berechnung der quantenelektrodynamischen Effekte, die traditionell in einer Entwicklung nach dem Störparameter αZ durchgeführt wird, nicht mehr durchführen. Vielmehr müssen Beiträge höherer Ordnung mittels geeigneter analytischer oder numerischer Verfahren berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen erstrecken sich über einen weiten Bereich, der von der Bestimmung der Bindungsenergien in hochgeladenen, schweren Ionen oder der Hyperfeinaufspaltung bei Kernen mit nichtverschwindendem Spin bis hin zur Messung von g-Faktoren von gebundenen Elektronen in wasserstoffähnlichen^{*)} Ionen reicht [1]. Dabei behandeln die verschiedenen Ansätze unterschiedliche Aspekte der QED, und letztendlich wird erst die Gesamtheit der Daten den gewünschten QED-Test bedeuten.

Wasserstoff-, helium- oder lithiumähnliche schwere Ionen sind von besonderem Interesse, da große theoretische Fortschritte in den letzten Jahren heute eine zuverlässige Berechnung dieser Mehrelektronensysteme ermöglichen.

Im Experiment hat man dabei mit einem nicht zu unterschätzenden Problem zu kämpfen, nämlich dem der Herstellung dieser Ionen. Schwere wasserstoffähnliche



Der Mittelwert der elektrischen Feldstärke erreicht für die am stärksten gebundenen atomaren Zustände als Funktion der Kernladungszahl Z Werte von bis zu 10^{16} V/cm .

Ionen wie etwa U^{91+} , die eigentlich das ideale Forschungsobjekt wären, stehen für Experimente zur Zeit nur in den Beschleunigeranlagen der GSI in ausreichender Zahl zur Verfügung. Die mit der relativ hohen Geschwindigkeit der Ionen von bis zu 30 % der Lichtgeschwindigkeit verbundenen Probleme bei der Berücksichtigung des Doppler-Effekts begrenzen aber die erreichbare Genauigkeit. Demgegenüber befinden sich Ionen, die in einer Ionenfalle gespeichert werden, nahezu in Ruhe, sodass sich der Einfluss des Doppler-Effekts vernachlässigen lässt. Kombiniert man eine Ionenfalle mit einem energiereichen und intensiven Elektronenstrahl, so lassen sich hierdurch hochgeladene Ionen erzeugen und speichern. Solche Systeme wurden im Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) entwickelt und heißen EBIT (Electron Beam Ion Trap). Der Nachteil der zur Zeit verfügbaren EBIT-Anlagen besteht aber darin, dass nur Ionen mit mehreren Elektronen in hinreichender Zahl produziert werden können und das auch nur in einer Mischung von mehreren Ladungszuständen.

Die am LLNL entwickelte SuperEBIT erlaubt es, lithiumähnliche Uranionen in hinreichender Zahl zu produzieren und speichern. Diese Tatsache nutzte eine Gruppe vom LLNL um Peter Beiersdorfer aus,

Prof. Dr. Harald Giessen, 4. Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart

^{#)} Zu diesem Zweck wird in Bad Honnef vom 15. - 17.9.2006 eine Heraeus-Sommerschule stattfinden, bei der Optiker und Elektrotechniker gemeinsam über die Zukunft der Metamaterialien diskutieren. Anmeldung unter www.physik.uni-stuttgart.de/metamaterials.

^{*)} Unter wasserstoffähnlichen Ionen versteht man Atome, die neben dem Kern nur aus einem Elektron bestehen. Entsprechend haben helium- bzw. lithiumähnliche Ionen zwei bzw. drei Elektronen.