

■ Linsen mit Weitblick

Mit gewöhnlichen optischen Mikroskopen lassen sich dank neuartiger „Superlinsen“ aus Metamaterialien Objekte direkt beobachten, obwohl diese kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts.

Das optische Mikroskop ist eines der wichtigsten Forschungsinstrumente, denn schließlich will man das, was man untersucht, auch sehen. Gut hundert Jahre lang herrschte getreu dem Abbe-Rayleigh-Kriterium die Meinung, dass die Auflösungsgrenze optischer Komponenten bei etwa einer halben Wellenlänge des Lichtes liegt, da schnell veränderliche (Nahfeld-)Anteile des räumlichen Spektrums nicht erfasst werden können. Obwohl es bereits in den 1970er-Jahren gelang, diese Grenze mithilfe der Raster-Nahfeldmikroskopie zu überschreiten, wird auch heute noch die Suche nach einem Verfahren fortgesetzt, das kein Abrastern erfordert.

Große Hoffnungen liegen dabei auf sog. Metamaterialien, die aus identischen Einheitszellen bestehen, deren Ausdehnung viel kleiner ist als die Wellenlänge der eingesetzten elektromagnetischen Strahlung. Im Jahr 2000 sagte Sir John Pendry voraus, dass eine Platte aus einem geeigneten Metamaterial eine perfekte Nahfeldlinse ergeben würde, welche die Nahfeldverteilung eines Objekts – inklusive des hochfrequenten nichtpropagierenden räumlichen Anteils – von einer Seite der Platte zur anderen überträgt [1]. Für transversal magnetische Polarisation¹⁾ wirkt eine dünne Silberschicht unterhalb der

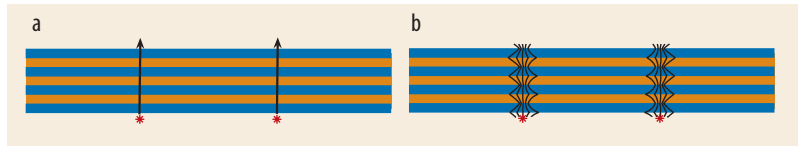


Abb. 1 Eine nicht-vergrößernde („kurzsichtige“) flache Superlinse besteht aus mehreren Silber-schichten (blau), getrennt durch Luft oder Dielektrikum (orange). Pfeile deuten auf die Über-

tragung des Feldes von zwei Subwellenlängenobjekten Richtung Austrittsfläche (a). Analytisch berechnete Feldlinien des Poynting-Vektors veranschaulichen den Abbildungsmechanismus (b).

Plasmafrequenz, wenn ihre Permittivität negativ ist ($\epsilon < 0$), als Superlinse. Dafür verantwortlich sind gekoppelte Moden aus elektromagnetischen Wellen einerseits und Schwingungen der Leitungselektronen (Plasmonen) andererseits, die an den Grenzflächen zwischen der Schicht und der Luft lokalisiert sind. Diese sog. Oberflächen-Plasmonpolaritonen (SPPs) haben sehr kurze Wellenlängen und sind in der Lage, an die nichtpropagierenden (evaneszenten) Wellen des Fourier-Spektrums des Objekts zu koppeln.

Damit die Superlinse funktioniert, müssen die an beiden Oberflächen angeregten SPPs koppeln. Dazu muss die Silberschicht jedoch ausreichend dünn sein.²⁾ Was aber, wenn die Abbildung über eine größere Entfernung übertragen werden soll? Einen Ausweg bieten Metamaterialien, die aus vielen dünnen Schichten mit abwechselnd $\epsilon < 0$ bzw. $\epsilon > 0$ bestehen (Abb. 1a) und 2001 erstmals vorgeschlagen wurden [2].

Als effektives Medium behandelt, ist das Silber-Luft-Sandwich ein anisotropes Medium, in dem die Komponenten ϵ_{\parallel} und ϵ_{\perp} des Permittivitätstensors – parallel und senkrecht zur optischen Achse – verschiedene Vorzeichen aufweisen (siehe z. B. [3]). Eine solche Anisotropie führt zu einer hyperbolischen Dispersionsrelation im k -Raum, $k_{\perp}^2/\epsilon_{\parallel} + k_{\parallel}^2/\epsilon_{\perp} = \omega^2/c^2$, mit Wellenvektorkomponenten k_{\perp} und k_{\parallel} . Die überraschende Konsequenz ist: Alle hochfrequenten räumlichen Komponenten mit $k_{\perp} > \omega/c$, die im Vakuum aufgrund der gewöhnlichen Dispersionsrelation $k_{\perp}^2 + k_{\parallel}^2 = \omega^2/c^2$ evaneszent sind (mit imaginären k_{\parallel}), verwandeln sich im Metamaterial in propagierende Komponenten (mit reellen k_{\parallel}). Bei geeigneter Wahl von Dicken und Permittivitäten der Metall- und Dielektrikumschichten wird die Nahfeldverteilung eines Objektes entlang der optischen Achse übertragen und an der Austrittsfläche der Linse ziemlich genau wiedergegeben.

1) TM, d. h. das magnetische Feld steht senkrecht auf der Ausbreitungsrichtung.

2) Beispielsweise ist bei der Wellenlänge von 360 nm eine Silberschicht von 60 nm bereits zu dick.

KURZGEFASST

■ Newton besteht Test

Das zweite Newtonsche Gesetz, $F = ma$, gilt bis herab zu winzigen Beschleunigungen von $5 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}^2$. Dies ist das Ergebnis eines an der University of Washington in Seattle durchgeführten Experiments mit einem Torsionspendel, bei dem nach einer Abhängigkeit der Frequenz von der sehr klein gewählten Amplitude (nrad bis μrad) gesucht wurde. Eine Verletzung dieses Gesetzes könnte Implikationen für die Kosmologie haben (Stichwort: Dunkle Energie) oder für die sog. Pioneer-Anomalie.^{#)} J. H. Gundlach et al., erscheint in Phys. Rev. Lett.

■ Tunneln in Echtzeit

Ein Forscherteam um Ferenc Krausz am MPI für Quantenoptik hat erstmals Elektronen beim Tunneln aus Neon-Atomen in Echtzeit beobachtet. Dazu dient ein nur 250 as kurzer Puls im extremen UV, der Elektronen aus einem tiefen in einen höheren Zustand anregt, von dem aus sie mit Unterstützung eines genau synchronisierten intensiven roten Laserpulses durch die Potentialbarriere tunneln können. Durch Variieren des zeitlichen Abstands zwischen den Pulsen lässt sich die Ionisierung genau rekonstruieren. M. Uiberacker et al., Nature 446, 627 (2007).

#) vgl. H. Dittus und C. Lämmerzahl, Physik Journal, Januar 2006, S. 25

Durchbruch dank neuem Design

Was ist der mikroskopische Mechanismus hinter diesem makroskopischen Verhalten? Die Feldlinien des Poynting-Vektors (Abb. 1b) laufen in Schichten mit positiver (negativer) Permittivität auseinander (zusammen) und erfahren dabei an jeder Grenzfläche eine negative Brechung. Eine flache Multischicht-Superlinse ist jedoch leider „kurzsichtig“: Sie vergrößert nicht, sodass eine Abbildung mit einem optischen Mikroskop nicht möglich ist.

Eine neue Wendung kam letztes Jahr, als die beiden Forschergrup-

pen von Nader Engheta (U Pennsylvania) und von Evgeniy Narimanov (U Princeton), unabhängig voneinander neuartige Designs für die Superlinse vorschlugen [4, 5]. Demnach sollte die flache Multischichtstruktur (Abb. 1a) zu einem Hohlzylinder mit Innenradius R_{in} und Außenradius R_{out} (Abb. 2a) gebogen werden. Die Autoren sagten voraus, dass ein kleines Objekt im Inneren der Linse auf der Außenoberfläche der Linse vergrößert, aber ansonsten unverzerrt abgebildet würde. Als effektives Medium behandelt, weist eine solche Struktur eine zylindrische Anisotropie auf, mit verschiedenen Vorzeichen für die Permittivitätskomponenten in tangentialer und radialer Richtung. Anteile mit großen Tangentialkomponenten $k_{\phi} > \omega/c$ wandeln sich, ganz analog zu dem Fall flacher Linsen, in propagierende Wellen um. Der einprägsame Name „Hyperlinse“ [5] spiegelt den hyperbolischen Charakter der Dispersionsrelation wider. Da die angulare Feldverteilung unverändert bleibt, wird die räumliche Verteilung mit zunehmendem Krümmungsradius immer größer (Abb. 2b). Die maximale Vergrößerung dieser Linse beträgt R_{out}/R_{in} .

Nun ist es zwei unabhängigen Gruppen aus Maryland [6] und aus Berkeley [7] gelungen, solche zylindrischen Hyperlinsen zu realisieren. Die „vergrößernde Superlinse“

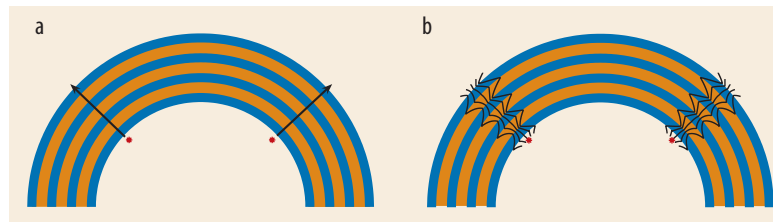


Abb. 2 Eine zylindrische Superlinse ist in der Lage, ein Objekt im Inneren zu vergrößern (vgl. Abb. 1).

von Smolyaninov et al. besteht aus konzentrischen Ringen aus Plexiglas (PMMA), aufgedampft auf die Oberfläche einer Goldschicht [6]. Das Objekt – ein Satz von aufgedampften PMMA-Punkten – wurde auf die Goldoberfläche aufgebracht und beleuchtet. Die „vergrößernde optische Hyperlinse“ von Zhangs Gruppe [7] besteht aus einem gekrümmten periodischen Stapel von Silber- und Aluminiumoxidschichten auf einem hohlen Halbzylinder aus Quarz. Subwellenlängenobjekte wurden in eine Chromschicht auf der Innenoberfläche imprägniert und beleuchtet. In jeder der beiden Anordnungen war das resultierende Bild auf der Außenseite der Linse groß genug, um von einem optischen Mikroskop aufgefangen zu werden. Dabei wurden Auflösungen von 70 nm [6] bzw. von 130 nm [7] erreicht.

Das neue Abbildungsprinzip ist allerdings nicht makellos, denn Dämpfungsverluste und Oberflächenrauheit der Linsenschichten setzen der Auflösung Grenzen. Darüber hinaus lässt sich die vergrößerte Abbildung zwar im

Fernfeld beobachten, das Objekt selbst muss sich jedoch im Nahfeld der Linse befinden; und schließlich lassen sich die für die Abbildung verantwortlichen gekoppelten SPP-Moden nur mit TM-polarisiertem Licht anregen, sodass eine Verallgemeinerung auf drei Dimensionen nicht ohne Weiteres möglich ist.

Anwendungen sind z. B. in der Medizin oder in der Biologie denkbar, wo kleine Objekte wie Viren, Proteine oder DNS bislang für übliche optische Mikroskope verborgen blieben. Die Tür zur Fernfeld-Welt steht für Metamaterialien, die bislang nur für Nahfeldstudien geeignet waren, nun offen.

Ekaterina Shamonina

- [1] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000)
- [2] E. Shamonina et al., Electron. Lett. **37**, 1243 (2001)
- [3] P. A. Belov und Y. Hao, Phys. Rev. B **73**, 113110 (2006)
- [4] A. Salandrino und N. Engheta, Phys. Rev. B **74**, 075103 (2006)
- [5] Z. Jacob et al., Opt. Express **14**, 8247 (2006)
- [6] I. I. Smolyaninov et al., Science **315**, 1699 (2007)
- [7] Z. Liu et al., Science **315**, 1686 (2007)

Priv.-Doz. Dr. Ekaterina Shamonina, Fachbereich Physik, Universität Osnabrück, 49069 Osnabrück