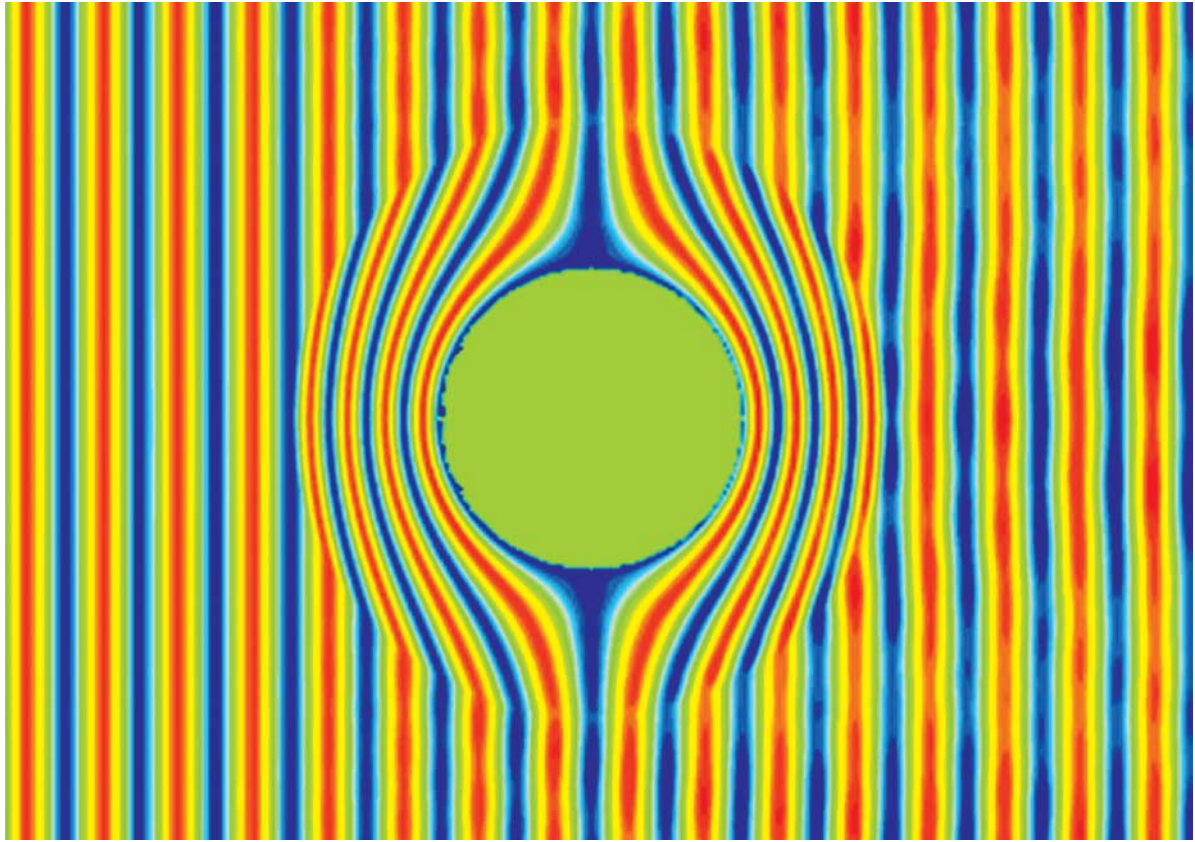




Magische  
Materie: Im  
Metamaterial  
wird eine  
Kupferscheibe  
so vom Licht  
umflossen, dass  
sie unsichtbar  
wirkt.



# BEZWINGER DES LICHTS

Metamaterialien manipulieren elektromagnetische Strahlung so feinsinnig, dass sich sogar Tarnkappen aus den neuartigen Stoffen herstellen lassen.

VON NIELS BOEING

Jede hinreichend fortgeschrittene Technologie ist von Magie nicht mehr zu unterscheiden“, lautet das dritte Clarkesche Gesetz, das der Science-Fiction-Autor Arthur C. Clarke in seiner Essaysammlung „Profiles of the Future“ formulierte. Oft zitiert, trifft es doch auf kaum ein Gebiet so gut zu wie das der sogenannten Metamaterialien. Sie manipulieren Licht oder Radiowellen – also elektromagnetische Strahlung – in einer Weise, wie es die Wissenschaft noch vor einiger Zeit nicht für möglich gehalten hat. Und

beeinflussen dadurch, in welche Richtung und mit welcher Geschwindigkeit sich die Strahlung in dem Material ausbreitet, wie sich ihre Wellenlänge verändert und ob ein Teil reflektiert wird.

Wie dies geschieht, hängt dabei von zwei für jedes Material charakteristischen Eigenschaften ab: der Durchlässigkeit für elektrische Felder, der Permittivität  $\epsilon$ , und der Durchlässigkeit für magnetische Felder, der Permeabilität  $\mu$ . Sie sind gewissermaßen die Stellschrauben für Wissenschaftler. An diesen Schrauben wurde bisher meist über die chemische Zusammensetzung eines Stoffes gedreht – indem die Struktur der Atome oder Moleküle

doch handelt es sich mitnichten um Magie.

Die ungewöhnlichen Effekte von Metamaterialien beruhen allesamt auf jenen bekannten physikalischen Gesetzen, die beschreiben, wie sich elektromagnetische Strahlung in Materie ausbreitet. Strahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen, in denen gleichzeitig ein elektrisches und ein magnetisches Feld schwingen. Trifft sie auf ein Material, versetzen die Felder dessen Elektronen in Schwingungen. Die wirken wiederum auf die Felder zurück und be-

verändert wurde. So lässt sich zum Beispiel Glas einfärben: Blaue Fenster etwa sind auf atomarer Ebene so strukturiert, dass sie nur noch Licht der entsprechenden Wellenlänge passieren lassen.

Der britische Physiker John Pendry fand in den neunziger Jahren eine zweite Möglichkeit, die beiden Größen  $\epsilon$  und  $\mu$  zu

## NEUE SUPERLINSEN AUS METAMATERIAL SPRENGEN DIE GRENZEN DER OPTIK

beeinflussen. Sie beruht darauf, dass sich bestimmte geometrische Strukturen in einem Material gegenüber langwelliger Strahlung, wie etwa Mikro- oder Radiowellen, ähnlich verhalten wie Atome. So zum Beispiel winzige geschlitzte Ringe und kurze Drähte aus Kupfer oder Gold. Die nano- bis mikrometerkleinen Metallstückchen werden von den ausgedehnten elektromagnetischen Wellen nicht als einzelne Einheiten wahrgenommen, wechselwirken aber mit der Strahlung und bilden damit eine Art künstlicher „elektrischer“ und „magnetischer“ Atome. Zu einem ausgedehnten Muster angeordnet, erzeugen sie ein „Metamaterial“. Dessen Parameter  $\epsilon$  und  $\mu$  lassen sich über die Größe und Form der künstlichen Atome so verändern, dass für geeignete Wellenlängen äußerst ungewöhnliche Effekte auftreten.

**Den spektakulärsten** demonstrierte Pendry zusammen mit dem US-Physiker David Smith erstmals vor drei Jahren: eine zweidimensionale „Tarnkappe“ für Mikrowellenstrahlung. Sie bestand aus einem relativ flachen ringförmigen Metamaterial, in dessen Innerem ein Kupferzylinder saß. Von der Seite betrachtet, war der Zylinder auf einer bestimmten Wellenlänge nicht mehr zu sehen: Die Strahlung schien um den Zylinder herum zu fließen – ähnlich wie Wasser in einem Fluss einen Stein umspült. Eigentlich ein Ding der Unmöglichkeit, da sich elektromagnetische Strahlung geradlinig ausbreitet. Doch im Metamaterial erscheint der Raum für die Strahlung gekrümmt, wie der deutsche Physiker Ulf Leonhardt mathematisch gezeigt hat.

Inzwischen gibt es auch Metamaterialien, die Gegenstände im sichtbaren Licht verschwinden lassen, und das – zumindest für sehr kleine Objekte – nicht nur in nahezu zweidimensionalen Ringen, sondern in allen drei Raumrichtungen. Verschiedene Physiker haben sogar Prototypen von „Unsichtbarkeitsfolien“ hergestellt. Allerdings schlucken Metamaterialien noch zu viel Strahlung, sodass nur ein Teil der Wellen umgelenkt wird, die Abschwächung der Lichtintensität das Objekt am Ende also doch verrät. Harald Giessen von der Universität Stuttgart hält es jedoch nicht für prinzipiell ausgeschlossen, dass derartige Folien eines Tages in größerem Maßstab einsetzbar sind. „Vielleicht macht man dann die Masten von Windrädern unsichtbar“, scherzt der Materialexperte. Nanodruckverfahren könnten die Herstellung solcher Folien in Zukunft einfach und billig machen.

Eine weitere verrückt anmutende Eigenschaft bekommen Metamaterialien, wenn ihre Parameter  $\epsilon$  und  $\mu$  für bestimmte

Frequenzen negative Werte annehmen. Dann wird nämlich auch ihre Brechzahl  $n$  negativ, die von den beiden Größen abhängt. Sie bestimmt, wie ein Lichtstrahl umgelenkt wird, wenn er etwa von Luft ( $n=1$ ) in Wasser ( $n=1,3$ ) eindringt – erklärt also, warum ein Strohhalm in einem Wasserglas leicht abgelenkt wirkt. Dass negative Werte von  $n$  möglich sind, hatte der russische Physiker Viktor Veselago bereits 1968 berechnet, obwohl alle damals bekannten Stoffe eine positive Brechzahl hatten. In einer Flüssigkeit mit negativer Brechzahl würde der Strohhalm auf groteske Weise in entgegengesetzter Richtung gebrochen erscheinen.

Scheiben aus Metamaterialien mit negativer Brechzahl können nun als Linsen dienen, deren Auflösungsvermögen die bekannten Grenzen sprengt. Mit herkömmlichen Linsen in Luft lassen sich maximal Details erkennen, die nicht größer sind als die halbe Wellenlänge des Lichts, mit der das Objekt beleuchtet wird – blaues Licht von 450 Nanometern Wellenlänge macht also bestenfalls 225 Nanometer große Strukturen sichtbar. Ein Metamaterial hingegen kann dank des stark gebrochenen Strahlenverlaufs in seinem Innern auch Feinheiten abbilden, die noch zehnmal kleiner sind, wie Forscher des Max-Planck-Instituts für Biochemie in Martinsried gezeigt haben. Das ist für biologische Untersuchungen interessant, aber auch für die Produktion sehr kleiner Transistoren, die mittels fotolithografischer Belichtung hergestellt werden. Einziger Haken: Diese Art der Abbildung funktioniert nur in unmittelbarer Nähe des untersuchten Objekts, in einem Abstand von wenigen hundert Nanometern.

Während Tarnkappen und Superlinsen spektakulär, aber noch weit von einer alltäglichen Nutzung entfernt sind, entdecken Forscher inzwischen auch praxisnähere Anwendungen für die strahlungsmanipulierenden Substanzen. Die Stuttgarter Gruppe von Harald Giessen hat ein Metamaterial aus gut 300 Nanometer langen Goldbalken konstruiert. Je drei von ihnen bilden eine Struktur, die an den Buchstaben „H“ erinnert, wobei der Querbalken nicht ganz in der Mitte über den beiden anderen schwebt. Diese Anordnung lässt sich als superempfindlicher Moleküldetektor etwa für medizinische Diagnosen nutzen: Lagern sich Biomoleküle an eine H-Struktur an, ändert sich an dieser Stelle der Brechungsindex des Metamaterials – und verrät so die Anwesenheit des gesuchten Moleküls, beispielsweise eines Proteins, das nur von Krebszellen produziert wird und damit auf die Krankheit hindeutet. „Der Effekt ist groß und reproduzierbar“, freut sich Giessen, dessen Arbeit – kürzlich in „Nature Materials“ veröffentlicht – derzeit für Furore in der Fachwelt sorgt.

**Einen etwas anderen Grundbaustein** für ein Metamaterial hat jüngst die Gruppe um Martin Wegener von der Universität Karlsruhe vorgestellt: winzige Korkenzieher aus Gold. In einer nur vier Mikrometer dicken Schicht angeordnet, wirken sie als Filter, der sogenanntes zirkular polarisiertes Licht erzeugt. In solcher Strahlung schwingen das elektrische und das magnetische Feld jeweils in einer Ebene, die sich während der Ausbreitung dreht. Laserschneider etwa arbeiten mit zirkular polarisiertem Licht. Um es zu erzeugen, musste man die Strahlung bislang durch zwei hintereinander gestellte Spezialelemente hindurchschicken. „Wir erreichen den Effekt jetzt mit einem einzigen kompakten, dünnen Material“, sagt Wegeners Kollege Stefan Linden und fügt hinzu: „Die Metamaterialien haben in der Optik eine Revolution ausgelöst. Es ist großartig, wenn man als Physiker bei einer solchen Entwicklung dabei sein kann.“ ☺