

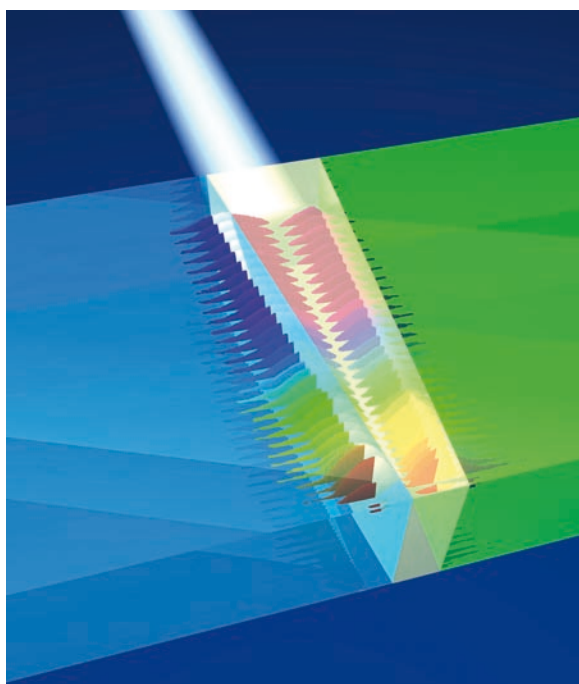
# Der gefrorene Regenbogen

Wie sich mit Metamaterialien Licht verlangsamen und sogar stoppen lässt.

Kosmas L. Tsakmakidis und Ortwin Hess

Rein optische Netzwerke würden den weltweiten Datenverkehr enorm beschleunigen. Doch dazu ist es erforderlich, mit Licht zu schalten – wofür es abgebremst werden muss. Erste Ansätze dazu gelangen mit ultrakalten Gasen. An Metamaterial-Grenzflächen und auf Oberflächen von plasmonischen Nanostrukturen könnte es mithilfe von negativen Phasenverschiebungen sogar gelingen, Licht gänzlich anzuhalten.

Photonen zum Stillstand zu bringen klingt nach dem wohlbekannten Streich der Schildbürger, die Licht in einem Sack einfingen, um es in ihr fensterloses Rathaus zu tragen. Doch bereits der sechzehnjährige Albert Einstein machte sich zum „gestoppten Licht“ ganz ernsthaft Gedanken, welche „die Wurzeln der Speziellen Relativitätstheorie“ berührten: „Verfolgte ich, mich mit der Geschwindigkeit  $c$  fortbewegend, einen Lichtstrahl, so müsste mir dieser Lichtstrahl als ein im Raum lokalisiertes, auf der Stelle oszillierendes elektromagnetisches Feld erscheinen. Dies scheint jedoch sowohl der Erkenntnis als auch den Maxwell'schen Gleichungen zu widersprechen“ [1]. Die Spezielle Relativitätstheorie lehrt uns in der Tat, dass die Lichtgeschwindigkeit  $c$  eine Naturkonstante ist und damit für alle Beobachter in Inertialsystemen gleich sein muss. Demnach sollte es unmöglich sein, Licht zu beobachten, das nur noch auf der Stelle oszilliert. Dies hat allerdings Physiker wie Sommerfeld und Brillouin nicht davon abgehalten, zu untersuchen, ob sich Licht nicht doch bremsen oder gar einfangen lässt – insbesondere, ohne es irgendwie umzuwandeln. Das wäre nicht nur ein grundlegender Durchbruch in der Optik bzw. Quantenoptik, sondern gerade auch technisch bedeutsam. Denn heutzutage bilden optische Signale in Glasfasern die Grundlage für den Datenverkehr im Internet. Um diesen zu steuern, sind Router nötig, welche die optischen Signale in elektrische umwandeln, einen Schaltvorgang durchführen und schließlich die elektrischen Signale wieder in optische zurückwandeln. Das bremst die Systeme um einen Faktor von bis zu Tausend. Die Lösung wäre ein rein optisches Netzwerk, das ohne Umwandlung in elektrische Signale auskommt. Aber um eine Breitbandspeicherung und -verarbeitung von Licht zu ermöglichen, gilt es Methoden zu entwickeln, die das Licht tatsächlich stoppen.



Fällt Licht in einen sich verjüngenden Wellenleiterkeil mit einem Kern aus einem Metamaterial mit negativem Brechungsindex, verlangsamt sich seine Gruppengeschwindigkeit. Jede Farbe kommt an unterschiedlicher Stelle zum Halt – ein „gefrorener Regenbogen“ entsteht.

Doch lässt sich Licht überhaupt speichern? Magnetische Festplattenlaufwerke legen Information als lokale Magnetisierung eines sonst homogenen Materials ab, also durch Ausrichten kleinster magnetischer Momente. Ähnliches auch für Licht zu erreichen erschien bislang völlig unmöglich, nicht zuletzt, da es wie oben erwähnt schwer vorstellbar war, Licht in seiner Ausbreitung innerhalb eines homogenen Mediums einfach anzuhalten. In der Tat können wir heute zwar durchaus optische Informationsbits verlangsamen und effektiv,

## KOMPAKT

- Läuft eine Lichtwelle durch ein dispersives Material, erhöht sich der Brechungsindex in der Nähe von Resonanzen teilweise sehr stark und die Gruppengeschwindigkeit reduziert sich bis auf ein Tausendstel, im Fall elektromagnetisch induzierter Transparenz bis auf ein Millionstel.
- Das Lichtfeld liegt dann jedoch nicht mehr als solches vor, sondern als atomare Spinkohärenz.
- An Metamaterial-Grenzflächen und auf Oberflächen von plasmonischen Nanostrukturen lässt sich Licht mithilfe von negativen Phasenverschiebungen drastisch verlangsamen und, wie sonst nur in ultrakalten Gasen, vollständig anhalten. Es liegt dann als gefrorener Regenbogen („Trapped Rainbow“) vor.

Dr. Kosmas L. Tsakmakidis, Prof. Dr. Ortwin Hess, Department of Physics, Imperial College London, London SW7 2AZ, Großbritannien

z. B. durch Umwandlung in eine sich langsamer ausbreitende akustische Welle (stimulierter Brillouin-Effekt), vorübergehend speichern. Die Speicherdauer ergibt sich dabei aus der im Vergleich zu Licht größeren Laufzeit des Schalls. Doch wie kann man es sich überhaupt vorstellen, Licht so stark zu verlangsamen, dass es sich de facto anhalten und damit speichern lässt?

### Transparent gebremst

Betrachten wir die Propagation einer Lichtwelle in einem homogenen, aber dispersiven Material mit einem Brechungsindex  $n$ . Ein Ausdruck für die Gruppengeschwindigkeit lautet

$$v_g = \frac{c}{n_R + \omega \frac{dn_R}{d\omega}}$$

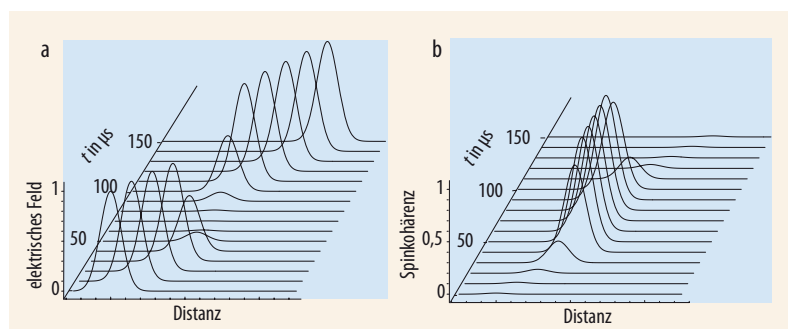
wobei  $n_R$  den Realteil von  $n$  bezeichnet. Somit kann die Gruppengeschwindigkeit in Bereichen mit normaler Dispersion, für die  $dn_R/d\omega > 0$  gilt, signifikant kleiner als die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ausfallen. Wenn die Frequenz einer Lichtwelle nahezu resonant zu einer Absorption ist, so verändert sich der Brechungsindex bei geringer Änderung der Frequenz ganz beträchtlich und  $\omega \frac{dn_R}{d\omega}$ , der dispersive Beitrag zum Brechungsindex, nimmt – je nach Schärfe der Resonanz – sehr hohe Werte an. Der (Gesamt-)Brechungsindex wächst dann sehr rasch an und die Lichtwelle verlangsamt sich dort entsprechend. Gleichzeitig absorbiert das Medium die Lichtwelle hier nur geringfügig. Jedoch ist dabei die beispielsweise in Zwei-Niveau-Systemen erzielbare Verlangsamung lediglich moderat, sie liegt im Bereich von 10- bis 20-fach. Kommen extreme Nichtlinearitäten wie die Resonanzanregung durch intensive kurze optische Pulse bei selbstinduzierter Transparenz ins Spiel, ist ein Abbremsen gegebenenfalls bis auf einige Tausendstel von  $c$  möglich.

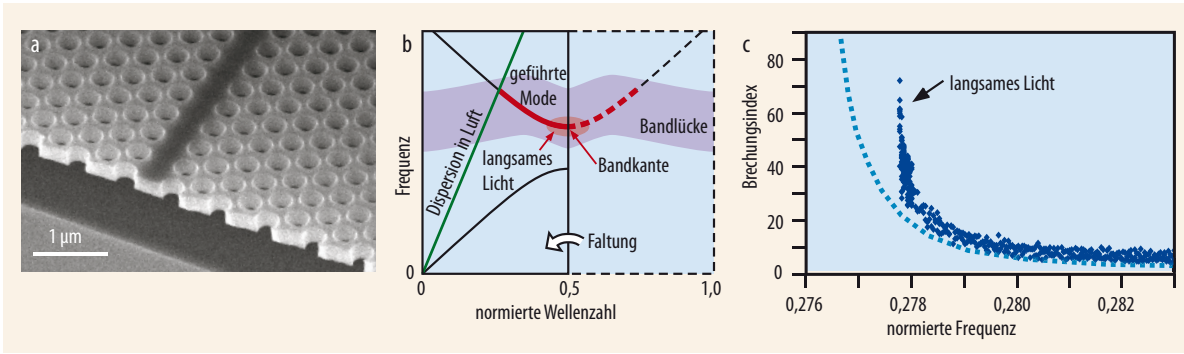
Doch mit einer anderen Methode lässt sich der Gruppengeschwindigkeits-Brechungsindex auf Werte von bis zu einigen Millionen erhöhen. Möglich macht dies die so genannte elektromagnetisch induzierte Transparenz (EIT) [2, 3]. Sie beruht auf der Wechselwirkung kohärenter Lichtfelder mit Drei-Niveau-Systemen, etwa in kalten Gasen, beispielsweise den  $\Lambda$ -artigen Hyperfeinzuständen von Natrium. Ein Kopplungsfeld, das mit den beiden unteren  $\Lambda$ -Niveaus kohärent wechselwirkt, kann die Emission des oberen Niveaus nahezu vollständig unterdrücken. Wird ein

geeignetes Probenfeld eingestrahlt, dessen Frequenz  $\omega_p$  sich gegenüber dem ersten Feld um genau die nicht erlaubte Frequenz unterscheidet, kann es ohne Absorption propagieren. Das System wird also in der unmittelbaren Umgebung der Probenfrequenz  $\omega_p$  schlagartig transparent. Über die Kramers-Kronig-Relationen sind Realteil  $n_R$  und Imaginärteil  $n_I$  des Brechungsindex verbunden [2]. Dadurch führt eine scharfe Resonanzabsorption zu einem enorm hohen dispersiven Anteil des Brechungsindex und damit zu einer extrem verlangsamteten Propagationsgeschwindigkeit bei der Probenfrequenz. Nun ist jedoch die erreichbare Gruppengeschwindigkeit  $v_g$  proportional zur Breite des Transparenzbandes um  $\omega_p$ . Dies bedeutet, je schärfer die Resonanz ist, desto langsamer propagiert zwar das Licht, aber auch mit umso geringerer Frequenzbandbreite. Mit dieser Methode lässt sich Licht somit zwar offensichtlich drastisch verlangsamen, jedoch nicht vollständig stoppen, da sonst der Transparenzbereich kleiner ausfiele als das Spektrum selbst, was wiederum zu Absorption führt.

Bislang haben wir bei der Diskussion von elektromagnetisch induzierter Transparenz implizit angenommen, dass die Rabi-Frequenz  $\Omega_c = dE_c/\hbar$  und damit das Kopplungsfeld  $E_c$  konstant ist ( $d$  ist das mit dem resonanten atomaren Übergang assoziierte Dipolmoment). Ein sehr langsam variierendes Kopplungsfeld ermöglicht nun aber eine effektiv adiabatische, also quasistationäre Veränderung der Rabi-Frequenz. Bei einem vergleichsweise langen Probenpuls lässt sich so die Frequenzbandbreite des Probenpulses kleiner als der EIT-Transparenzbereich halten. So ist es in der Tat möglich, durch die starke Wechselwirkung des Lichtpulses mit den atomaren Zuständen einen neuen gemeinsamen kohärenten Hybridzustand aus Licht und atomarer Anregung zu bilden, ein Polariton. Dabei ist die Gruppengeschwindigkeit des Polaritons grundsätzlich proportional zur Rabi-Frequenz des Kopplungsfelds. Reduziert man nun adiabatisch dessen Intensität und somit die Rabi-Frequenz, kann damit auch die Gruppengeschwindigkeit des Polaritons immer weiter sinken, bis sie schließlich verschwindet. An diesem Nullpunkt hätte das Polariton jedoch seinen Lichtcharakter zugunsten eines neuen, atomaren Charakters vollständig verloren. Die Amplitude des Signalpulses nimmt bei der Propagation in einem EIT-Medium stetig ab und sinkt an diesem Punkt auf exakt Null (Abb. 1a). Die Spinkohärenz nimmt dagegen zu und wird

**Abb. 1** Wenn ein Polariton in einem Medium mit elektromagnetisch induzierter Transparenz propagiert, nimmt die Amplitude des Signalpulses bei der Verlangsamung im Medium ab ( $t \approx 80 \mu\text{s}$ ). Am Punkt verschwindender Gruppengeschwindigkeit wird auch die elektrische Feldamplitude exakt Null (a). Entsprechend nimmt die Spinkohärenz dort zu (b). Am Stopp-Punkt hat das Polariton einen rein atomaren Charakter.





**Abb. 2** In einem photonischen Kristallwellenleiter pflanzt sich Licht in einem charakteristischen Liniendefekt fort; Aufnahme mit einem Rasterelektronenmikroskop). Das entsprechende schematische Banddiagramm zeigt den Bereich, in dem Licht verlangsamt ist (b). Die so erzielbaren Brechungsindizes sind jedoch meist deutlich kleiner als 100 (c).

hier maximal (Abb. 1b). Das Licht ist in diesem Fall also nicht als Feld gestoppt, sondern als atomare Spinkohärenz gespeichert.

### Langsamer durch Löcher

Ein alternativer, äußerst erfolgreicher Ansatz für langsames Licht nutzt den starken Einfluss periodischer Strukturen auf propagierende Lichtfelder, insbesondere von „photonische Kristallen“ (PC) [4]. In einem typischen Beispiel eines Wellenleiters pflanzt sich Licht innerhalb eines „Liniendefekts“ fort, wie dem Fehlen einer Reihe von Löchern in der sonst regelmäßigen Löcheranordnung (Abb. 2a). Während der Propagation erfährt das Licht aufgrund der seitlichen

Bragg-Reflexionen an den periodischen Strukturen ständig kleine Stöße in entgegengesetzter Richtung. Gegenüber einem unstrukturierten Medium erzeugt dies für das propagierende Feld einen erhöhten Widerstand, sodass sich seine Ausbreitungsgeschwindigkeit effektiv reduziert. Im entsprechenden Dispersionsdiagramm zeigt sich das Auftreten von langsamem Licht in spektralen Bereichen mit geringer Krümmung (Abb. 2b).

Auf Grundlage dieses Prinzips gelang es, über einen relativ breiten spektralen Bereich Gruppengeschwindigkeiten zu erzielen, die signifikant kleiner sind als die Lichtgeschwindigkeit mit Brechungsindizes im Bereich von 10 bis 100 (Abb. 2c). Leider gibt es auf diesem Weg zu langsamem Licht jedoch eine Grenze grundsätzlicher Art: Unordnung. Die Fortschritte bei

## NEGATIVE ELEKTROMAGNETISCHE PARAMETER IN METAMATERIALIEN

Mit Metamaterialien lässt sich Licht auf völlig neuartige Weise kontrollieren. Sie ermöglichen verschwindend geringe, außergewöhnlich hohe oder gar negative Brechungsindizes und bereiten die Grundlage für innovative Konzepte wie perfekte Linsen, elektromagnetische Tarnkappen oder die hier behandelte drastischen Verlangsamung und das Stoppen von Licht [16].

Doch wie entstehen negative elektromagnetische Parameter (dielektrische Permittivität, magnetische Permeabilität und Brechungsindex) in Metamaterialien? Um dies zu erläutern, betrachten wir eine typische Struktur (Abb. i). Wir nehmen dabei an, ein senkrecht zur Oberfläche der beiden hervorgehobenen U-förmigen Ringresonatoren polarisiertes magnetisches Feld  $H_0$  propagiere von links nach rechts. Zur Vereinfachung nehmen wir weiterhin an, jeder Ringresonator sei ausreichend vom nächsten Nachbar entfernt, sodass benachbarte Ringe nicht miteinander koppeln. Das Magnetfeld erzeugt sodann eine auf den Ring einwirkende elektromotorische Spannung  $U = -i\omega\mu_0 S H_0$ , wobei  $\omega$  die Kreisfrequenz,  $S$  die vom Ring aufgespannte

Fläche und  $\mu_0$  die Permeabilität des Vakuums sind. Bezeichnen wir nun mit  $I$  den in jedem Ring umlaufenden Strom, so ergibt sich annäherungsweise der daraus resultierende magnetische Fluss  $\Phi = \mu_0 S I / \ell$ , wobei  $\ell$  den Abstand zwischen verschiedenen Ringschichten angibt. Die wechselseitige Induktion zwischen zwei Ringen ist dann in erster Ordnung gegeben durch  $M = (S/\alpha^2)L := FL$  mit  $\alpha$  als Seitenlänge der Einheitszelle. Damit ist sodann das induzierte magnetische Moment pro Volumeneinheit  $M_d = IS/(\alpha^2\ell)$ , wobei:

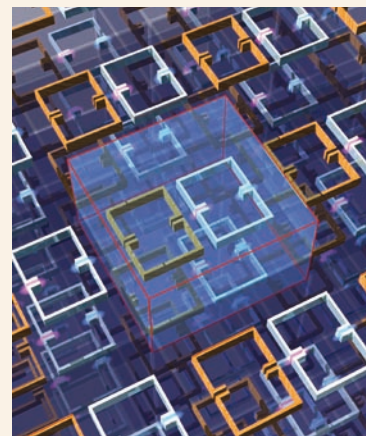
$$I = \frac{H_0 \ell}{(1 - F) - 1/(\omega^2 LC) + iR/(\omega L)}$$

Die resultierende effektive magnetische Permeabilität ergibt sich zu:

$$\mu_r = 1 - \frac{F}{1/(\omega^2 LC) + iR/(\omega L)}$$

wobei  $L$  und  $C$  die Induktivität und Kapazität eines Rings sind. Im Frequenzbereich  $1/\sqrt{LC} < \omega < 1/\sqrt{LC(1-F)}$  gilt demnach:  $\text{Re}\{\mu_r\} < 0$ . Dabei ist  $\omega_{m0} = 1/\sqrt{LC}$  die Resonanzfrequenz und  $\omega_{mp} = 1/\sqrt{LC(1-F)}$  die magnetische Plasmafrequenz des Mediums, bei welcher  $\text{Re}\{\mu_r\} = 0$ .

Bleibt anzumerken, dass die Resonanzwellenlänge  $\lambda_{m0}$  der Struktur vollständig von der effektiven Induktivität und Kapazität eines Rings bestimmt wird und sich damit signifikant größer als die Periodizität  $a$  wählen lässt. Dies berechtigt sodann die Annahme einer makroskopischen Homogenität des Metamaterials.



**Abb. i** Periodische Anordnung von aufgebroschenen Ringresonatoren in einem dreidimensionalen magnetischen Metamaterial.

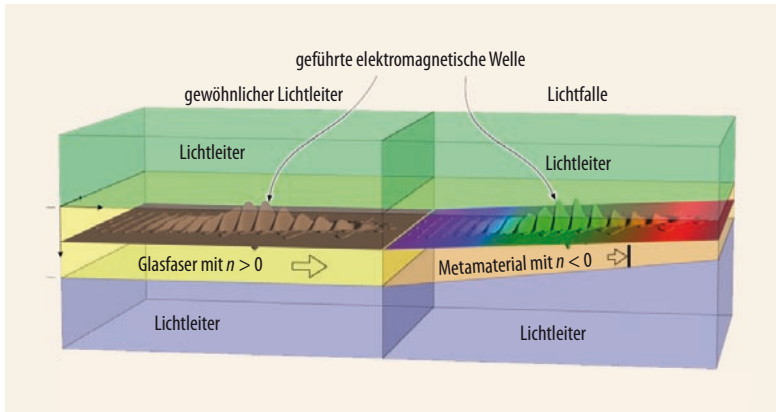


Abb. 3 Das „Trapped Rainbow“-Prinzip beruht auf einer Lichtfalle aus einem keilförmigen, sich adiabatisch verjüngenden Wellenleiter mit negativem Brechungsindex (rechts). In ihm verlangsamen

verschiedene Frequenzen eines Wellenpaketes unterschiedlich stark, stoppen (nach unendlicher Zeit) an unterschiedlichen Stellen und erzeugen so einen „gefrorenen Regenbogen“.

der nanotechnologischen Strukturierung sind dank der heute verfügbaren Verfahren beeindruckend. Dennoch zerstören unvermeidbare charakteristische Ungenauigkeiten in den Abmessungen und bei der Form der Strukturen (z. B. die in Abb. 3a gezeigten Löcher) den Punkt verschwindender Gruppengeschwindigkeit. Unglücklicherweise sind die Auswirkungen der Unordnung umso stärker, je langsamer sich das Licht im photonischen Kristall ausbreitet.

### Gestopptes Licht in Metamaterialien

Im Jahr 2007 haben wir die Theorie zum „Trapped Rainbow“-Prinzip vorgestellt und damit einen Weg aufgezeigt, Licht gänzlich anzuhalten [5]. Statt Rückreflexionen durch periodische Strukturen wie im Fall photonischer Kristalle oder starker Resonanzen in der Absorption in dichten kalten Gasen kommen hier die außerordentlichen Eigenschaften von nanoplasmonischen Metamaterialien zum Einsatz (Abb. 5. 25). Das sind gewissermaßen Materialien mit Bauplan

(Infokasten). Maßgeschneiderte dielektrische und/oder metallische (Nano-)Strukturen, die „Metamoleküle“, sind darin so angeordnet, dass ganz außergewöhnliche Eigenschaften auftreten, wie z. B. ein negativer Brechungsindex [7]. Bei der Propagation von Licht in Metamaterial-Heterostrukturen ist es insbesondere der Einfluss dieser „negativen Umgebung“, der an Oberflächen und Grenzflächen zu negativen Goos-Hänchen-Phasenverschiebungen führt [8]. Wie kann man sich dies vorstellen? Goos-Hänchen-Verschiebungen führen in „normalen“ Medien mit positiven Brechungsindizes dazu, dass bei einem Lichtstrahl, der beispielsweise in einer optischen Faser mittels Zickzackreflexionen an den Grenzflächen zwischen Kern und Mantel im Kern der Faser propagiert, die Reflexionen nicht am Punkt des eintreffenden Lichtstrahls erfolgen, sondern in Ausbreitungsrichtung etwas weiter. Die Lichtstrahlen erfahren effektiv eine gewisse zusätzliche „Vorwärtsverschiebung“; sie kommen etwas schneller voran als dem Brechungsindex des Kerns entsprechend erwartet. Haben nun die Kernschicht einen negativen und die Mantelschichten eine positiven Brechungsindex (oder umgekehrt), erfolgen diese Verschiebungen an den Grenzflächen *entgegengesetzt* zur Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahls. Auf diese Weise wird das Licht peu à peu in seiner Ausbreitung zurückgehalten und besitzt effektiv eine geringere Geschwindigkeit.

Liegt eine geeignete, der jeweiligen Wellenlänge angepasste Metamaterial-Heterostruktur mit keilförmig sich verjüngender Mittelschicht vor, erweist sich die Stärke der negativen Goos-Hänchen-Verschiebung – und damit die Gruppengeschwindigkeit des Lichtes – als von der Breite des Kerns abhängig: je dünner er ist, desto stärker wird die negative Goos-Hänchen-Verschiebung (entgegen der Ausbreitungsrichtung) an der Grenzfläche und umso langsamer das Licht. Eine detaillierte Lösung der Maxwellschen Gleichungen zeigt, dass sich das Licht mit adiabatisch langsam abnehmender Breite des Wellenleiters zunehmend ansammelt, d. h. an Intensität gewinnt, um schließlich an

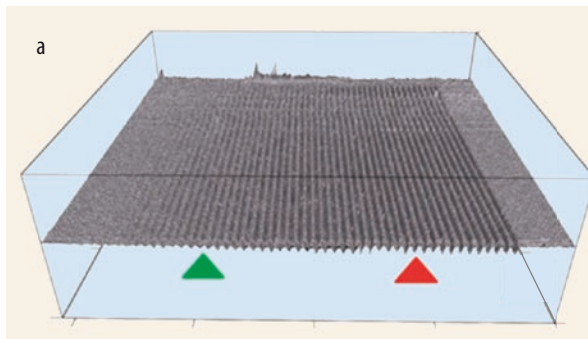
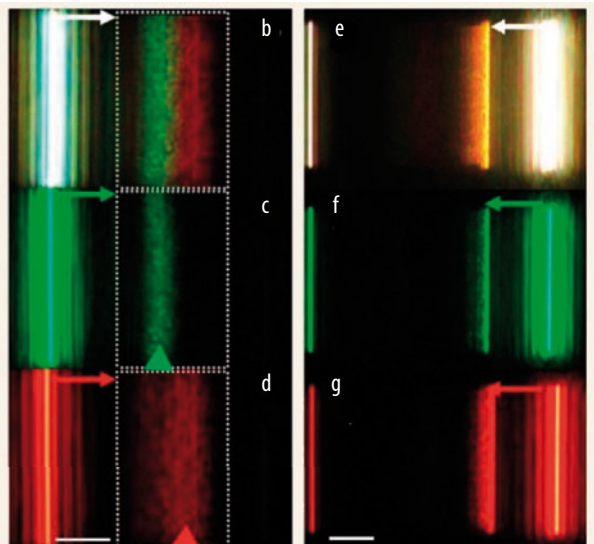


Abb. 4 Die atomare Kraftmikroskopieaufnahme eines nanoplasmonischen Furchengitters (Periodenlänge 475 nm, Breite der Furchen 150 nm) lässt die zunehmende Furchentiefe von 6 bis 100 nm erkennen (a). Aufnahmen mit verschiedenen Filtern zeigen das Anhäufen des Lichts an den markierten Stellen (Dreiecke; b-d), und den Unterschied für an der entgegengesetzten Seite eingekoppelte Oberflächenplasmonen (e-g).



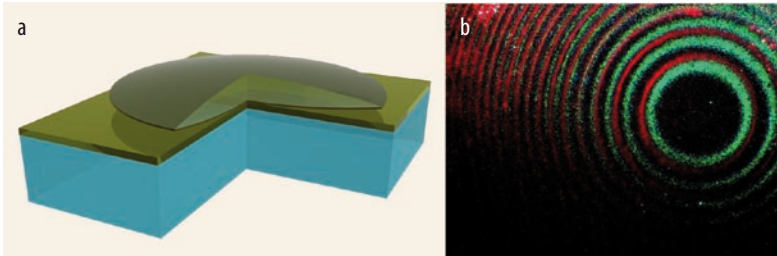


Abb. 5 Eine goldbeschichtete Glaslinse und ein ebensolches Substrat bilden einen sich adiabatisch verjüngenden nano-optischen Wellenleiter (a). Die optische Mikroskopaufnahme von oben lässt die Newtonschen Ringe erkennen (b).

einem charakteristischen kritischen Punkt zu stoppen. Allerdings dauert es aufgrund einer logarithmischen Divergenz der dazu notwendigen Zeit unendlich lange, bis das Licht wirklich an diesem kritischen Punkt ankommt – andernfalls fände hier eine Reflexion statt. Da die kritischen Punkte für jede Frequenz einer anderen Breite des Wellenleiters entsprechen, verlangsamt jede Farbe eines Lichtpakets im optischen Keil unterschiedlich schnell – es bildet sich ein „gefrorener Regenbogen“. Aufgrund der anomalen Dispersion des Metamaterials in der Mittelschicht stoppen die kürzesten („blauen“) Wellenlängen zuerst (d. h. bei größerer Breite des Kerns) und die längeren („roten“) Wellenlängen zuletzt (d. h. bei kleinsten Breiten, Abb. 3). Ist das Licht einmal angehalten, kann eine Änderung des Brechungsindex das Licht steuern und wieder zur Propagation anregen. Diese Brechungsindexänderung wiederum lässt sich mittels Verstärkung erreichen, beispielsweise durch Quantenpunkte, da aufgrund der Kramers-König-Beziehung jede Änderung am Imaginärteil des Brechungsindex<sup>2</sup> (Verstärkung/Absorption) eine Änderung des Realteils (Brechungsindex) hervorruft.

Doch worin liegt nun der Vorteil des Umwegs über eine „negative Umgebung“ gegenüber z. B. der verteilten Rückkopplung durch photonische Kristalle oder der enormen Verlangsamung durch EIT? Metamaterialien leiten ihre (negativen) Parameter von – jeweils im Vergleich zur Wellenlänge – mikroskopisch kleinen Metamolekülen ab. Diese sind so winzig, dass eine möglicherweise auftretende Unordnung keinen nachteiligen Einfluss hat. Weiterhin ist das „Trapped

Rainbow“-Prinzip – wie der Name schon besagt – breitbandig. Metamaterialien nutzen zur Erzeugung negativer Parameter zwar Resonanzen aus – ebenso wie EIT –, ein negativer Brechungsindex kommt jedoch mittels Kopplung der Metamoleküle über einen beachtlich weiten Frequenzintervall zustande [16]. Im Gegensatz zu EIT ist daher keine scharfe Resonanz notwendig. Auch bleibt Licht selbst im gestoppten Zustand immer noch Licht, wird also nicht zu einem quantenmechanischen Hybridzustand wie etwa Polaritonen. Schließlich ist das „Trapped Rainbow“-Prinzip ein linearer Effekt – ein wichtiger Aspekt für die aktuell intensiv diskutierten Quanteninformati- onstechnologien, in welchen viele der grundlegenden quantenmechanischen Konzepte, wie beispielsweise das Speichern eines Quantenzustandes, auf linearen Quantenoperationen beruhen.

### Eine anhaltende Entwicklung ...

Mittlerweile gibt es für das Konzept des „Trapped Rainbow“ bereits verschiedene experimentelle Indizien [9–12]. So lassen sich negative Phasenverschiebungen, die an der Oberfläche geeignet strukturierter metallischer Strukturen entstehen können, auch nutzen, um einen „Trapped Rainbow“ für Plasmonen zu schaffen. Nötig ist dafür etwa eine plasmonische Struktur mit Furchen kontinuierlich zunehmender Tiefe, in der sich über die plasmonische Lokalisierung Licht verschiedener Wellenlängen an unterschiedlichen Stellen ansammelt (Abb. 4) [9, 10].

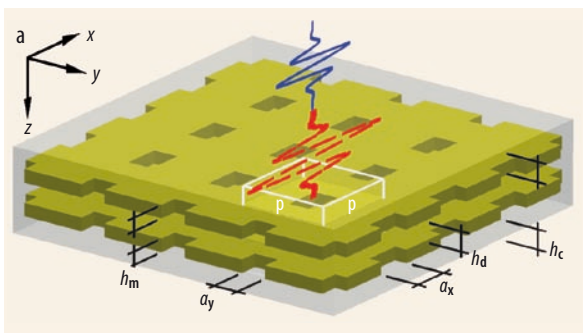
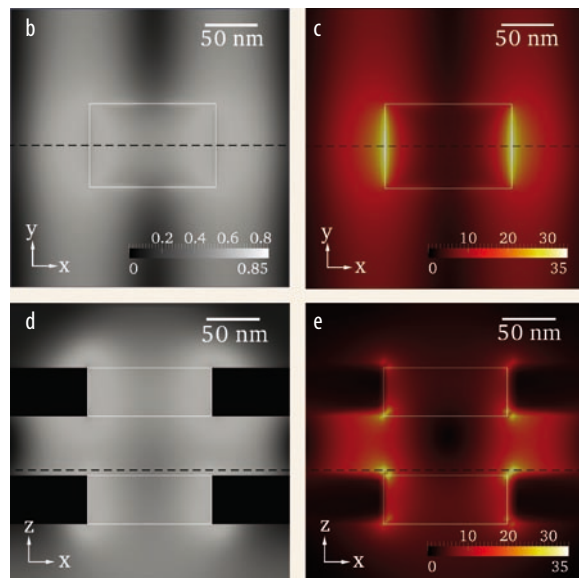


Abb. 6 Trifft ein intensiver Pump-Puls (rot) auf ein aktives „Fishnet“-Metamaterial mit negativem Brechungsindex, invertiert er das im Fishnet integrierte Gewinnmedium, sodass ein breitbandiger Signalpuls (blau) während des Aufbaus des negativen Brechungsindex<sup>2</sup> gleichzeitig Verstärkung erfährt (a). Dies ergibt ein bestimmtes räumliches Profil der Inversion und des Signalpuls-Feldes in der x-y-Ebene (b, c), sowie in der x-z-Ebene.



In Anlehnung an die „Newtonschen Ringe“ ist es in geschickter Weise gelungen, durch Ausnutzen der Krümmung einer auf goldbeschichtetem Substrat aufliegenden goldbeschichteten Linse einen sich adiabatisch verjüngenden Wellenleiterkeil mit negativer Permittivität herzustellen (Abb. 5) [11]. Unter seitlicher Lichteinstrahlung (in der ursprünglichen Newtonschen Anordnung kommt das Licht von oben) lassen sich die verschiedenen Frequenzen an unterschiedlichen Stellen entlang des Keils anhalten. Wesentlicher Punkt ist dabei das Abnehmen des effektiven Brechungsindex entlang des plasmonischen nanooptischen Wellenleiters. So nahm in diesem Experiment die effektive Wellenlänge des Lichtes kontinuierlich zu, bis zum kritischen Punkt, an dem sie schließlich bei verschwindendem Brechungsindex  $n_R \rightarrow 0$  divergierte. Da aufgrund der divergierenden Wellenlänge in dieser Anordnung ein quasistatisches Regime vorlag, ist das nächste Etappenziel bereits gesteckt – den „Trapped Rainbow“-Effekt experimentell auch im elektrodynamischen Regime, d. h. als oszillierendes gestopptes Licht, zu beobachten.

Bisherige Experimente und insbesondere aktuelle theoretische Arbeiten haben bereits gezeigt, dass Materialverluste oder Oberflächenrauigkeiten die Existenz der Singularität im Brechungsindex am Stopp-Punkt nicht beeinträchtigen. In der Tat werden die Moden, die eine solche bemerkenswerte Eigenschaft aufweisen, durch eine komplexwertige Frequenz beschrieben, d. h. Verluste erfolgen in der Zeit. Solche Moden können allgemein in all jenen Systemen auftreten, in denen die räumlichen und zeitlichen Randbedingungen einen reellen Wellenvektor erlauben.

Ein weiterer aktueller und vieldiskutierter Ansatz, die Verluste zu kompensieren und gleichzeitig die Speicherzeit zu erhöhen, ist die Integration von Verstärkung („gain and amplification“) [13, 14]. Erreichen lässt sich dies beispielsweise mit einem aktiven „Fishnet“-Metamaterial mit integrierten Farbstofflaser-molekülen, das einen negativen Brechungsindex aufweist (Abb. 6). Ein kurzer optischer Pumpimpuls invertiert das Gewinnmedium derart, dass für nachfolgende kurze Abfragepulse das Metamaterial wie ein effektiv verlustloses Material mit negativem Brechungsindex wirkt und die Kurzpulsanregung zudem auch das Rauschen unterdrückt.

Das Prinzip, negative Phasenverschiebungen zum Abbremsen in Metamaterialien mit negativen elektromagnetischen Parametern einzusetzen, funktioniert interessanterweise nicht nur bei Licht, sondern auch bei Elektronen in Graphen [15]. So kann die Phasenverschiebung, die ultrarelativistische Elektronen an einem p-n-Übergang erfahren, negativ sein für den Fall, dass die Energie der Elektronen kleiner ist als ein am p-Bereich angelegtes Potential. Je nachdem, ob die Phasenverschiebung nun positiv oder negativ ist, führt dies zu einem Erhöhen oder Reduzieren der Elektronengeschwindigkeit. Makroskopisch macht sich dies als entsprechende Änderung der Leitfähigkeit eines p-n-p-Übergangs von Graphen bemerkbar.

Die in diesem Beitrag angesprochenen theoretischen Erkenntnisse und neuen experimentellen Fortschritte sind wichtige Meilensteine auf dem Weg zu extrem langsamem und gestopptem Licht in Festkörpern bei Raumtemperatur und hohen (optischen) Frequenzen. Zweifelsohne geht damit nicht nur ein Durchbruch in der optischen und photonischen Grundlagenforschung einher, sondern die Erkenntnisse dienen gleichfalls als Wegbereiter zu einer ganzen Reihe außergewöhnlicher Anwendungen wie der Lokalisierung kohärenter photonischer Quantenzustände, extremer Nichtlinearitäten oder neuer schwellenloser Nanolaser. Ein Ausblick in die Zukunft könnte wohl schwerlich spannender sein.

**Literatur**

- [1] A. Einstein, Autobiographical Notes, Open Court Publishing, Illinois (1979)
- [2] P. W. Milonni, Fast Light, Slow Light and Left-Handed Light, Taylor & Francis, New Work (2005)
- [3] M. D. Lukin und A. Imamoglu, Nature **413**, 273 (2001)
- [4] T. Baba, Nature Photonics **2**, 465 (2008)
- [5] K. L. Tsakmakidis, A. D. Boardman und O. Hess, Nature **450**, 397 (2007)
- [6] K. L. Tsakmakidis et al., Phys. Rev. B **81**, 195128 (2010)
- [7] V. M. Shalaev und A. K. Sarychev, Electrodynamics of Metamaterials, World Scientific Publishing, New Jersey (2007)
- [8] F. Goos und H. Hänchen, Annalen der Physik **435**, 383 (1943)
- [9] Q. Gan et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 056801 (2009)
- [10] Q. Gan et al., Proc. Natl. Acad. Scie. **108**, 5169 (2011)
- [11] V. N. Smolyaninova et al., Appl. Phys. Lett. **96**, 211121 (2010)
- [12] X. P. Zhao et al., Appl. Phys. Lett. **95**, 071111 (2009)
- [13] S. Xiao et al., Nature **466**, 735 (2010)
- [14] S. Wuestner et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 127401 (2010)
- [15] C. W. J. Beenakker et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 146804 (2009)
- [16] O. Hess, Nature **455**, 299 (2008)

**DIE AUTOREN**

**Kosmas Tsakmakidis** wurde 1979 im griechischen Komotini geboren. Seinen Diplomabschluss in Elektro- und Computertechnik machte er 2002 an der Aristotle University of Thessaloniki, den „Master of Research“-Grad (MRes) als Elektroingenieur, als einer der Jahrgangsbesten an der University of Surrey (Guildford, Großbritannien), wo er 2009 auch promoviert wurde. Seit Juni 2007 ist er Research Fellow der Royal Academy of Engineering.

**Ortwin Hess** (FV Quantenoptik und Photonik) hält den Leverhulme Chair in Metamaterials im Department of Physics am Imperial College London. Er studierte Physik in Erlangen und an der TU Berlin. Während und nach der Promotion 1993 folgten Forschungsaufenthalte in Edinburgh und Marburg. Von 1995 bis 2003 war er Leiter der AG „Theoretical Quantum Electronics“ am Institut für Technische Physik des DLR und der Universität Stuttgart, wo er sich 1997 habilitierte. Er war Gastprofessor in Stanford (1997/98) und München (2000/01), seit 2001 ist er Dozent für Photonik im finnischen Tampere. Von 2003 bis 2010 hatte er den Lehrstuhl in „Theoretical Condensed Matter and Optical Physics“ an der Universität Surrey inne. Derzeit ist er dort weiterhin Gastprofessor.

