

fen handelt, sondern dass hier zwei Haufen mit einer Relativgeschwindigkeit von etwa 1200 km/s verschmelzen, was etwas über der Schallgeschwindigkeit des Intraaufengases liegt. Dieser Vorgang heizt das Gas in der Kollisionszone auf, die mit *Chandra* als Hotspot erkennbar wird (Abbildung 1).

Wir konnten zeigen, dass die Form der Jets sich nicht dadurch erklären lässt, dass das Jet-Plasma dem Druckgradienten im Intraaufengas folgt. Vielmehr ist die Relativbewegung der beiden Galaxienhaufen und damit auch der Schwarzen Löcher hierfür verantwortlich. Diese ist genau so groß, um die verbogene Form der Jets zu erklären: Die beiden Schwarzen Löcher bewegen sich mit Überschallgeschwindigkeit relativ zu dem Intraaufengas, wodurch die von den beiden Körpern ausgestoßenen Jets „zurückgebogen“ werden.

Die beiden Schwarzen Löcher führen diese Bewegung also gemeinsam durch – sie bilden ein Paar.

Die beiden Schwarzen Löcher sind etwa 25 Millionen Lichtjahre voneinander entfernt und befinden sich in der ersten Verschmelzungsphase. Frühestens in einigen Millionen Jahren werden sie starke Gravitationswellen aussenden. Auch wenn dies in weiter Zukunft liegt, bestärkt doch diese Entdeckung, dass solche Objekte nicht allzu selten sind. Sie zählen zu den Quellen, nach denen man mit zukünftigen Gravitationswellendetektoren suchen will.

- [1] D. Hudson et al., *A&A* 2006, im Druck, astro-ph/0603272.
- [2] D. Merritt, M. Milosavljevic, *Liv. Rev. in Relativity* 2005, 8, 8.
- [3] S. Komossa et al., *Astrophys. J.* 2003, 582, L15.

Thomas Reiprich, Daniel Hudson,
Universität Bonn

dann auch die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Material negativ. Was soll das eigentlich bedeuten? Kann man die negative Geschwindigkeit direkt in einem Experiment nachweisen?

Dies ist möglich, indem man einen kurzen Laserimpuls durch das Metamaterial laufen lässt und die zugehörige Laufzeit aufnimmt. Bei einer Dicke $d > 0$ und einer Phasengeschwindigkeit c wird die Laufzeit $\Delta t = d/c$. Aus $n < 0$ folgt $c < 0$ und damit eine negative Laufzeit $\Delta t < 0$. Das Maximum eines Wellenberges kommt also früher am hinteren Ende heraus als es an der Vorderseite der Probe eintritt. Da mit der Phase der Welle aber kein Informationstransport verknüpft ist, steht dies nicht im Widerspruch zur Kausalität.

Diesen Effekt konnten wir sichtbar machen, indem wir die Probe in einem Arm eines Michelson-Interferometers installiert (Abbildung 1 oben). Der Vergleich der beiden Interferogramme „mit Probe“ und „ohne Probe“ zeigte deutlich, dass der Wellenberg „mit Probe“ tatsäch-

METAMATERIALIEN

Licht im Rückwärtsgang

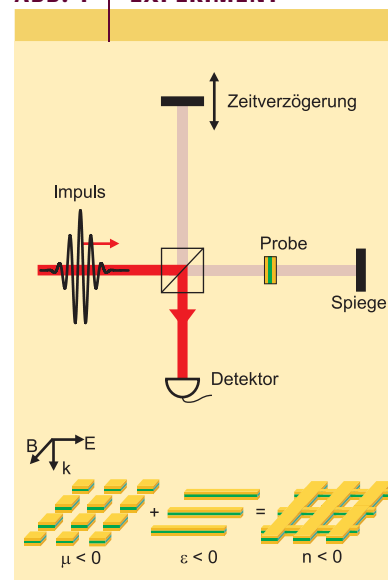
Metamaterialien können qualitativ neuartige optische Eigenschaften besitzen, zum Beispiel eine negative optische Brechzahl. Die resultierende negative Phasengeschwindigkeit des Lichts ist sicher gewöhnungsbedürftig. Kürzlich konnte dieses Phänomen aber ein internationales Team mit Wissenschaftlern aus Karlsruhe und Heraklion direkt nachweisen [1].

Man könnte die optische Brechzahl n auch als „Langsamkeitsfaktor“ bezeichnen. Schließlich gibt n an, um welchen Faktor die Phasengeschwindigkeit des Lichts im Medium c langsamer ist als die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 , also $c = c_0/n$. Physikalische Ursache hierfür sind in „normalen“ Materialien wie Glas mikroskopische elektrische Dipole, die vom elektrischen Feld des Lichts angeregt werden, wieder abstrahlen, so andere Dipole anregen usw. Ähnlich wie in einem System von Telegraphenstationen wird die Welle so von Dipol zu Dipol weitergereicht. Insofern ist es nicht überraschend, dass es „langsamer voran

geht“ als im Vakuum, dass also meistens gilt $n > 1$.

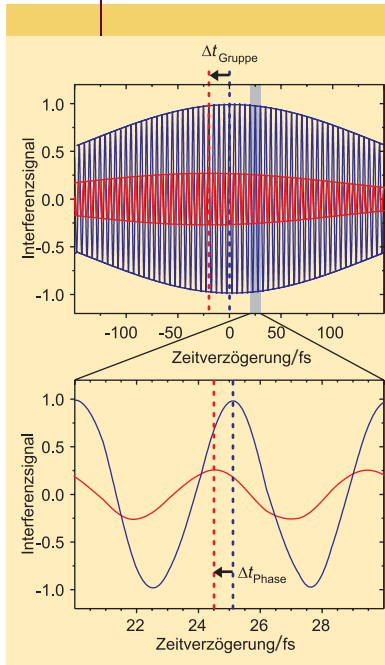
Seit kurzem ist es mit den Methoden der Nanotechnologie möglich, künstliche effektive Materialien, so genannte Metamaterialien, herzustellen. Mit diesen kann das Licht nicht nur durch elektrische Dipole, sondern auch durch magnetische Dipole beeinflusst werden [2]. Die Maxwell'sche Theorie sagt voraus, dass eine negative elektrische Permittivität ϵ zusammen mit einer negativen magnetischen Permeabilität μ des Materials zu einer negativen Brechzahl führen kann (siehe A. Pimenov, A. Loidl, *Physik in unserer Zeit* 2006, 37 (3), 112). Mit $n < 0$ wird

ABB. 1 | EXPERIMENT



Oben: Schema des Michelson-Interferometers. Unten: Schematische Darstellung des verwendeten Metamaterials. E und B sind die Vektoren des elektrischen und magnetischen Feldes, k ist der Wellenvektor des einfallenden Lichts.

ABB. 2 INTERFEROGRAMME



Oben: Gemessene Interferogramme „ohne Probe“ (blau) und „mit Probe“ (rot). Unten: Ausschnittsvergrößerung.

lich früher ankommt als ohne (Abbildung 2). Eine genauere Analyse zeigt sogar, dass es früher ankommt, als es bei $c = \infty$ der Fall wäre. Bei dem verwendeten Metamaterial handelt es sich um eine gitterartige Struktur, die aus drei Lagen besteht: Gold, MgF_2 , Gold (Abbildung 1 unten).

Was bedeutet das für die Geschwindigkeit eines Impulses, die Gruppengeschwindigkeit? Ein Impuls resultiert aus der Überlagerung von Wellen unterschiedlicher Frequenz. Wenn alle Teilwellen des Impulses die gleiche negative Phasengeschwindigkeit haben, bewegt sich natürlich auch der Impuls mit negativer Geschwindigkeit. Das Maximum eines gaußförmigen Impulses kommt also auch früher am hinteren Ende der Probe heraus als das Maximum des einfallenden Impulses am vorderen Ende eingetreten ist. Bei frequenzabhängiger Phasengeschwindigkeit wird die Diskussion komplizierter, und alle vier Vorzeichenkombinationen können vorkommen. Zum Beispiel kann die Phasengeschwindigkeit negativ, die Gruppengeschwin-

digkeit aber positiv sein. Keiner dieser Fälle erlaubt aber eine gegenüber dem Vakuum erhöhte Informationsrate. Zur Informationsübertragung ist eine Sequenz von Impulsen – Bits – erforderlich, ein einzelner Impuls reicht nicht aus. Der zeitliche Abstand zwischen den Bits bleibt derselbe im Vakuum.

Es drängt sich die Frage auf, warum eigentlich Licht durch die Probe gelangt, wenn sowohl Phasen- als auch Gruppengeschwindigkeit des Lichts negativ sind. Dazu muss man sich klarmachen, worauf sich das „negativ“ eigentlich bezieht. Es beschreibt die Richtung der Geschwindigkeiten relativ zur Richtung

der Energieausbreitung – Letztere findet also in Vorwärtsrichtung statt. Die experimentellen Ergebnisse sind vollauf im Einklang mit der Maxwell'schen Theorie elektromagnetischer Wellen, der Kausalität und der Speziellen Relativitätstheorie, gleichwohl aber stark gewöhnungsbedürftig, weil sie unserer naiven Erwartung widersprechen.

Literatur und Internet

- [1] G. Dolling et al., *Science* **2006**, 312, 892.
- [2] S. Linden et al., *Science* **2004**, 306, 1351. www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-14-5-1842

Gunnar Dolling, Stefan Linden, Martin Wegener; CFN, Karlsruhe

ELEMENT 112

Superschwergewicht untersucht

Einem internationalen Forschungsteam ist es gelungen, mit nur zwei Atomen des künstlichen Elements 112 chemische Untersuchungen durchzuführen. Das Problem bei den Untersuchungen bestand darin, dass sich von Element 112 nur wenige Atome pro Woche herstellen lassen. Hierfür haben die Wissenschaftler am Kernforschungszentrum in Dubna zwei Monaten lang ein Target aus Plutonium mit Kalzium-Ionen bestrahlt. Dabei bildeten sich in Kernfusionsreaktionen zunächst Isotope des Elements 114 mit der Massenzahl 287, die rasch in das Isotop 283 des Elements 112 zerfallen. Dessen Halbwertszeit von 4 Sekunden ist aber genügend lang, um es chemisch zu untersuchen.

Theoretische Berechnungen sagen für Element 112 ein chemisches Verhalten voraus, das sich zwischen demjenigen von Quecksilber als einem flüchtigen Schwermetall und demjenigen von Radon als einem Edelgas bewegt. Bei den Versuchen verhielten sich die zwei Atome vom Element 112 wie ein flüchtiges Schwermetall, also ähnlich wie Quecksilber.

www.psi.ch/medien/medien_news.shtml

GRAVITATIONSWELLEN

GEO600 im Dauerbetrieb

Der deutsch-britische Gravitationswellendetektor GEO600 befindet sich seit Ende Mai zusammen mit den beiden amerikanischen LIGO-Observatorien in einer auf 18 Monate angelegte Dauermessung. Seit Beginn der Probemessungen im Jahr 2002 wurde die Messempfindlichkeit von GEO600 kontinuierlich bis heute um einen Faktor 3000 verbessert. Ließ sich anfangs nur ein kleiner Bruchteil unserer eigenen Galaxie damit „abhören“, so sind nun kosmische Ereignisse wie Supernovae bis in Entfernungen nachweisbar, die ein Vielfaches der Distanz zwischen unserer und der benachbarten Andromeda-Galaxie betragen.

Die direkte Messung von Gravitationswellen gehört zu den größten Herausforderungen der modernen Physik. Sie bietet Einblicke in bisher unzugängliche Bereiche des Universums und sie soll Einsteins Vorhersage von Gravitationswellen bestätigen.

P. Aufmuth, A. Rüdiger, *Physik in unserer Zeit* **2000**, 37 (1), 14. www.geo600.de