

sind Ladungs- und Wärmetransport entkoppelt und das Wiedemann-Franz-Gesetz verletzt.

Um die Lorenz-Zahl  $L$  experimentell zu bestimmen, ist es erforderlich, die elektrische und die thermische Leitfähigkeit zu messen – letztere ist nur schwierig zu ermitteln. Das Experiment erfolgte bei Temperaturen von etwa 150 mK. Die Source-Elektrode ließ sich mittels einer weiteren, supra-leitenden Elektrode erwärmen oder kühlen, wobei der Wärmestrom durch die Insel sich aus der Energiebalance ableitete. Insgesamt

erlaubte dies die Messung der Lorenz-Zahl als Funktion der mittleren Elektronenzahl  $n_g$ . Für halbzahlige  $n_g$  folgte ein Wert  $L/L_0 = 1$  in Übereinstimmung mit dem Wiedemann-Franz-Gesetz. Im Gegensatz dazu traten für ganzzahlige  $n_g$  Werte bis zu  $L/L_0 = 4$  auf. In diesem Fall ist der Wärmetransport im Vergleich zum elektrischen Transport demnach vierfach erhöht, da nur Elektronen der Energie  $E > E_C$  zum elektrischen Transport beitragen. Die gemessenen Ergebnisse stimmen hervorragend mit den theoretischen Vorhersagen überein [5].

In Zukunft ist geplant, die Insel weiter zu verkleinern – in der Hoffnung, dass dies zu noch unbekanntem, quantenmechanischen Phänomenen im Wärmetransport führt.

Dirk Schuricht

Dr. Dirk Schuricht, Institute for Theoretical Physics, Center for Extreme Matter and Emergent Phenomena, Utrecht University, Niederlande

- [1] G. Wiedemann und R. Franz, Annalen der Physik und Chemie **89**, 32 (1853)
- [2] N. Wakeham et al., Nature Commun. **2**, 396 (2011)
- [3] J. Crossno et al., Science **351**, 1058 (2016)
- [4] B. Dutta et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 077701 (2017)
- [5] B. Kubala, J. König und J. Pekola, Phys. Rev. Lett. **100**, 066801 (2008)

## ■ Unerwartete Verstärkung

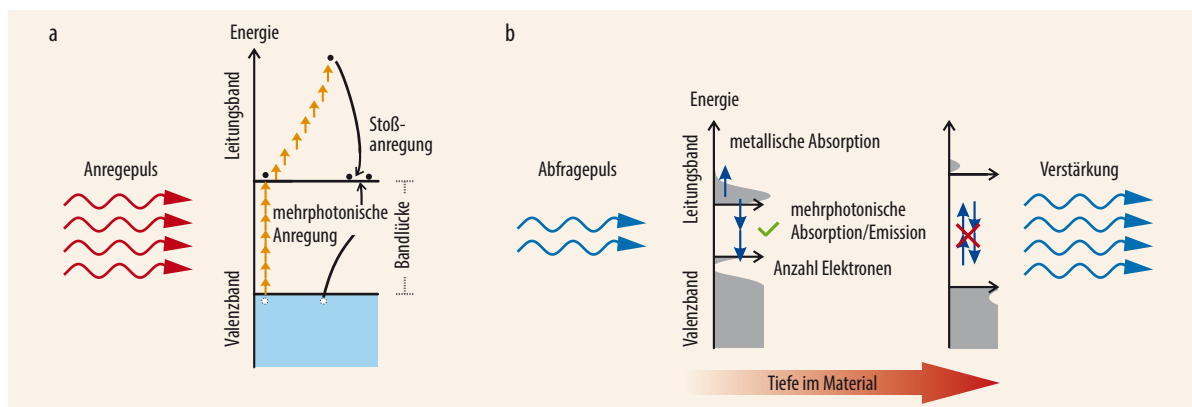
**Dielektrika, die mit ultrakurzen Laserpulsen angeregt wurden, können einen Abfragepuls verstärken.**

Vor gut hundert Jahren hat Albert Einstein die stimulierte Emission postuliert und damit den gedanklichen Grundstein für die Entwicklung des Lasers gelegt. Heute findet man Anwendungen des Lasers in sehr vielen Geräten, und als eines der meistgenutzten Forschungswerkzeuge der Physik stehen Laser in fast jedem Labor. Die Lichtverstärkung in klassischen Lasermedien wie Gasen, Festkörpern oder Farbstoffen ist ein linearer Prozess, bei dem jeweils ein Photon die Emission eines weiteren Photons stimuliert. Vor Kurzem haben Wissenschaftler aus Deutschland und Dänemark einen Effekt entdeckt, bei dem die Emission mehrerer Photonen in einem nicht-linearen Prozess stimuliert wird [1].

Eigentlich wollten die Forscher das Absorptionsverhalten von Dielektrika untersuchen: Materialien mit großer Bandlücke, z. B. Gläser oder Wasser, erscheinen im Normalfall durchsichtig, weil Licht im sichtbaren Bereich nicht absorbiert wird. Für ultrakurze, hochintensive Laserpulse ändern verschiedene nichtlineare Anregungsprozesse die optischen Eigenschaften des Materials vom transparenten zu einem metallartigen Zustand. Zeitaufgelöste Untersuchungen des Transmissions- und Reflexionsverhaltens des Materials geben Aufschluss über grundlegende Prozesse wie die Dynamik angeregter Elektronen und ihre Relaxation [2, 3].

Bei einem solchen Experiment beobachteten die Forscher aus Kas-

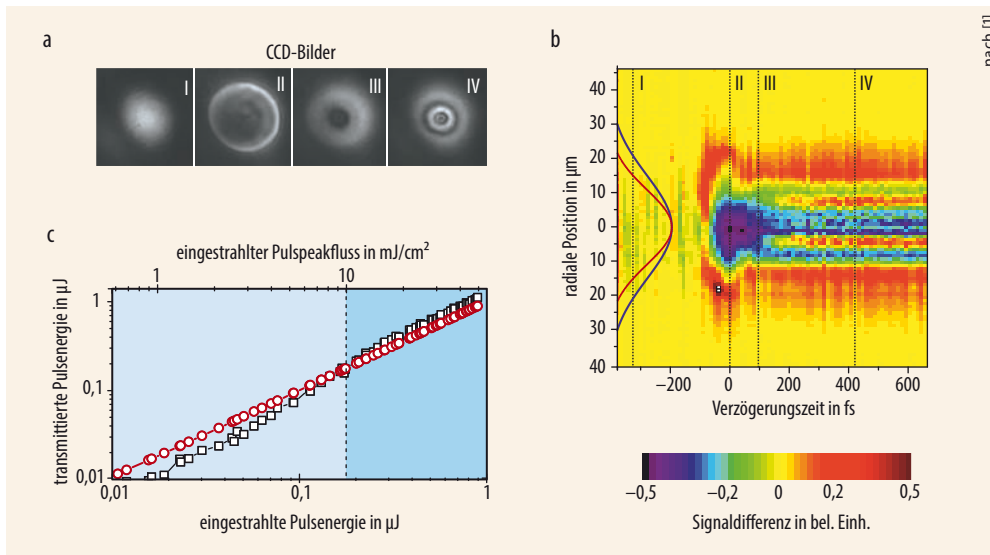
sel und Aarhus, dass Licht in einem angeregten Material nicht stark absorbiert, sondern – im Gegenteil – verstärkt werden kann. Zunächst wurde eine Saphir-Probe mithilfe eines ultrakurzen nur 30 fs langen Laserpulses von 800 nm Wellenlänge in einen angeregten Zustand versetzt. Die zeitgleiche Absorption mehrerer Photonen erlaubt den Elektronen, aus dem voll besetzten Valenzband in das anfangs leere Leitungsband zu wechseln. Hier können sie weitere Energie aus dem Laser aufnehmen. Übertragen sie die Energie durch Stoßanregung auf andere Elektronen des Valenzbandes, erreichen diese ebenfalls das Leitungsband (Abb. 1a) [4]. Wieviele Elektronen zu welcher Zeit und bei welcher Energie im



**Abb. 1** Ein ultrakurzer Anregepuls erzeugt im Dielektrikum über nichtlineare Prozesse eine hohe freie Elektronendich-

te im Leitungsband (a). Die Absorption des Abfragepulses wird zeitversetzt gemessen (b). Kommt es nahe der Oberflä-

che des Dielektrikums zur stimulierten Emission zweier Photonen, passiert ein verstärkter Abfragepuls das Material.



**Abb. 2** Die transmittierte Lichtverteilung erscheint in CCD-Bildern als Ringstruktur (a), wobei sich die räumlich aufgelöste Intensitätsverteilung mit der Zeit ändert (b). Vertikale Linien und römische Ziffern zeigen, wann die CCD-Aufnahmen entstanden. Der Vergleich der Transmission ohne Bestrahlung (c, rote Kreise) und 500 fs nach der Anregung (schwarze Quadrate) belegt die Verstärkung des Pulses.

Leitungsband sind, lässt sich mittels eines weiteren Laserpulses messen. Dieser Abfragepuls wird wenige Femto- bis Pikosekunden nach der Laseranregung auf die Probe geschickt. Überraschend zeigt sich weit nach dem zeitlichen Überlapp mit dem anregenden Laserpuls eine erhöhte Intensität des Abfragepulses. Die entstandene Strahlung ist kohärent wie bei stimulierter Emission.

In CCD-Aufnahmen der durch die Probe transmittierten Lichtverteilung erscheint deutlich eine Ringstruktur, die eine intensitätsabhängige Absorption (dunkle Ringe) oder Verstärkung (helle Ringe) widerspiegelt (Abb. 2a). Diese Intensitätsverteilung verändert sich mit der Zeit (Abb. 2b). Dabei wird die Intensität des Abfragepulses nicht nur im ursprünglich Gaußförmigen Profil umverteilt. Die insgesamt transmittierte Energie, gemessen mittels einer Photodiode, wird ab einer bestimmten Gesamtenergie des Abfragepulses deutlich verstärkt (Abb. 2c). Das zeigt der Vergleich der Transmission durch die Saphir-Probe 500 fs nach der Anregung mit der Transmission einer unbestrahlten Probe. Stimulierte Emission scheint die Ursache für die beobachtete Lichtverstärkung in dem Material mit großer Bandlücke zu sein. Das ist mit einem einfachen Zwei-Niveau-System nicht realisier-

bar, sodass die Besetzungsinversion auf einen dreistufigen Prozess zurückgehen muss.

Der erste Schritt ist die Anregung des Saphir-Kristalls mit einem infraroten Laserpuls, die eine Nichtgleichgewichtsverteilung der Elektronen im Leitungsband des Materials zur Folge hat. Im zweiten Schritt thermalisiert das System: Elektron-Elektron-Stöße im Leitungsband sowie Loch-Loch-Stöße im Valenzband führen zu Fermi-verteilten Elektronen und Löchern, deren Dichte deutlich über der Gleichgewichtsdichte liegt, die dem Energieinhalt entspricht. Dies ist bereits eine Besetzungsinversion. Die Rekombination kann nun durch einen weiteren Laserpuls erfolgen, wodurch zusätzliche Photonen gemäß Einsteins Vorhersage frei werden.

Für eine netto messbare Verstärkung des Abfragepulses beim Durchgang durch ein über 100  $\mu\text{m}$  dickes Material muss die stimulierte Emission über einen vergleichsweise großen Längenbereich im Material aufrecht erhalten bleiben. Die beteiligten Wissenschaftler bieten eine alternative Erklärung an: Der verstärkte Lichtstrahl passiert im weiteren Verlauf Material mit anderen Absorptionseigenschaften als am Ort seiner Entstehung. Tatsächlich sind die durch den ersten Laserpuls angeregten Elektronen

und damit auch die Besetzungsinversion hauptsächlich nahe der Oberfläche des Dielektrikums zu finden. Die metallähnlichen optischen Eigenschaften nach Anregung führen zu einer deutlich geringeren Eindringtiefe des Lasers als im unangeregten Material [2, 3]. Aus der Halbleiterphysik ist bekannt, dass die Größe der Bandlücke von der Dichte der Elektronen im Leitungsband abhängt. Dies sollte auch für Dielektrika mit großer Bandlücke gelten, wobei die Bandlücke dann nahe der Oberfläche verkleinert sein könnte. Dazu passen weitere Messgrößen, die auf eine stimulierte Zwei-Photonen-Emission hinweisen, während die ursprüngliche Bandlücke mindestens einen Drei-Photonen-Prozess des ultravioletten Abfragepulses erfordern würde.

Die messbare Lichtverstärkung beim Durchlauf des zweiten Laserpulses durch das angeregte Material lässt sich durch eine Bandlückenverkleinerung erklären (Abb. 1b). Diese ermöglicht die stimulierte Emission zweier Photonen, die bei der weiteren Propagation nicht absorbiert werden können. Obwohl die Lichtverstärkung in der Tiefe stark lokalisiert ist, kann das emittierte Licht das gesamte Material durchdringen.

Der hier gefundene Effekt der Lichtverstärkung in angeregten Dielektrika (Laser Amplification in DIElectrics, LADIE) ist ein neuartiger zeitlich sowie räumlich stark lokalisierter Prozess. Er bietet neue Einblicke in die Wechselwirkung von Licht und Materie. Darüber hinaus ergeben sich durch die Initialisierung mit einem vorangehenden ultrakurzen Anregepuls sehr präzise Kontrollmöglichkeiten in Raum und Zeit.

**Bärbel Rethfeld**

- [1] Th. Winkler et al., Nat. Phys., doi: 10.1038/nphys4265 (2017)
- [2] Th. Winkler et al., Appl. Surf. Sci. 374, 235 (2016)
- [3] K. J. Wædegaard et al., Europhys. Lett. 105, 47001 (2014)
- [4] P. Balling und J. Schou, Rep. Prog. Phys. 76, 036502 (2013)