

dung 2). Nach einer bestimmten Zeit sind die Phasen der einzelnen Atome so weit auseinandergelaufen, dass keine klaren Oszillationen mehr nach dem zweiten Puls zu sehen sind, die Überlagerung ist dann nicht mehr kohärent. Deshalb ist die Amplitude der Einhüllenden dieses Signals ein direktes Maß für die Kohärenz.

Bei hohen Atomdichten und folglich vielen Kollisionen zwischen den Atomen kommt es zu einem interessanten Effekt: Die Kohärenz bleibt deutlich länger erhalten als bei geringerer Dichte. Durch die elastischen Zusammenstöße der Atome verändert sich die kinetische Energie eines Atoms. Dadurch ist die Phasenverteilung der Atome die Summe aus randomisierten Phasen, und die Breite der Phasenverteilung wächst nur noch diffusiv und nicht mehr linear an. Dieser Effekt heißt Collisional Narrowing [1]. Wie stark er ausfällt,

hängt maßgeblich von der Weichheit der Stoßprozesse ab, die im System vorherrschen. Dabei gilt: Je härter die Zusammenstöße sind, desto länger bleibt die Kohärenz bestehen.

Die Weichheit von elastischen Stößen zwischen ultrakalten, bosonischen Atomen in harmonischen Potentialen wurde durch Computersimulationen ermittelt, aber noch nie direkt gemessen. Wir haben eine spektroskopische Methode entwickelt, die dies ermöglicht [2]. Sie setzt sich aus zwei Sequenzen zusammen. Zunächst bestimmen wir bei hoher Atomdichte die Energiedekorrelationsrate Γ . Diese lässt sich aus dem funktionellen Abfall der Kohärenz bestimmen. In einer zweiten Sequenz (Echosequenz) bei niedriger Atomdichte messen wir die Kollisionsrate Γ_{Koll} . Mit Kenntnis der experimentellen Parameter (Temperatur, Atomdichte), bei denen

die jeweiligen Sequenzen durchgeführt wurden, lassen sich die beiden gemessenen Raten normalisieren und die Weichheit bestimmen als $s = \Gamma_{\text{Koll}}/\Gamma$. Wir erhalten einen Wert für die Weichheit von $2,5 \pm 0,3$, der sehr gut mit dem in der Literatur bisher verwendeten Wert von 2,5 übereinstimmt.

Die von uns gezeigte Methode kann genutzt werden um die Weichheit anderer nichttrivialer Stoßprozesse zu bestimmen, darunter Stöße bei höheren Temperaturen, zwischen fermionischen und bosonischen Atomen oder Atom-Ion-Stöße.

Literatur

- [1] Y. Sagi et al., Phys. Rev. Lett. **2010**, 105, 093001.
[2] J. Coslovsky et al., Phys. Rev. A, **2017**, 96, 032713.

Alexander Mil, Uni Heidelberg

FESTKÖRPERPHYSIK

Laser-Verstärkung in angeregten Dielektrika

Ultrakurze Laserpulse können überraschenderweise in einem laserangeregten Glasstück verstärkt werden. Diese von unserem Team der Universitäten Kassel und Aarhus entdeckte Verstärkung ist, ähnlich wie bei einem klassischen Laser, gerichtet und kohärent. Simulationen des bisher unbekannt dreistufigen Prozesses konnte die experimentellen Ergebnisse reproduzieren und somit das entwickelte theoretische Modell verifizieren.

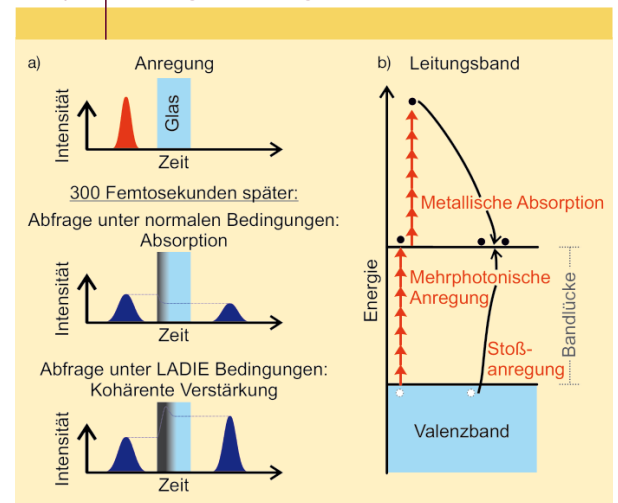
Wird ein dielektrisches Material wie Wasser oder Glas im sichtbaren, infraroten oder UV-Bereich bestrahlt, so erfährt das Licht keine Absorption. Dies ändert sich jedoch, wenn Femtosekunden-Laserpulse (1 fs = 10^{-15} s) verwendet werden (Abbildung 1a): Mit ihren hohen Intensitäten sind sie in der Lage, Elektronen aus dem vollen Valenz- in das üblicherweise leere Leitungsband zu befördern. Der wesentliche Mechanismus ist die mehrphotonische Absorption: Da die Bandlücke, also die energetische Lücke zwischen

beiden Bändern mit etwa 10 eV um ein Vielfaches größer ist, als die Energie eines einzelnen Photons im sichtbaren oder infraroten Bereich (beispielsweise 800 nm Wellenlänge, entsprechend 1,55 eV), muss das Valenzband-Elektron mehrere Photonen gleichzeitig absorbieren, um ins Leitungsband zu gelangen (Abbildung 1b). Dort verleiht es dem dielektrischen Material vorübergehend metallische Eigenschaften, denn es kann einzelne Photonen des Laserpulses absorbieren. Mit jeder Absorption wird die Energie des Leitungs-

band-Elektrons größer, was dazu führen kann, dass dieses Elektron über Stoßanregung ein weiteres Elektron aus dem Valenz- in das Leitungsband befördert.

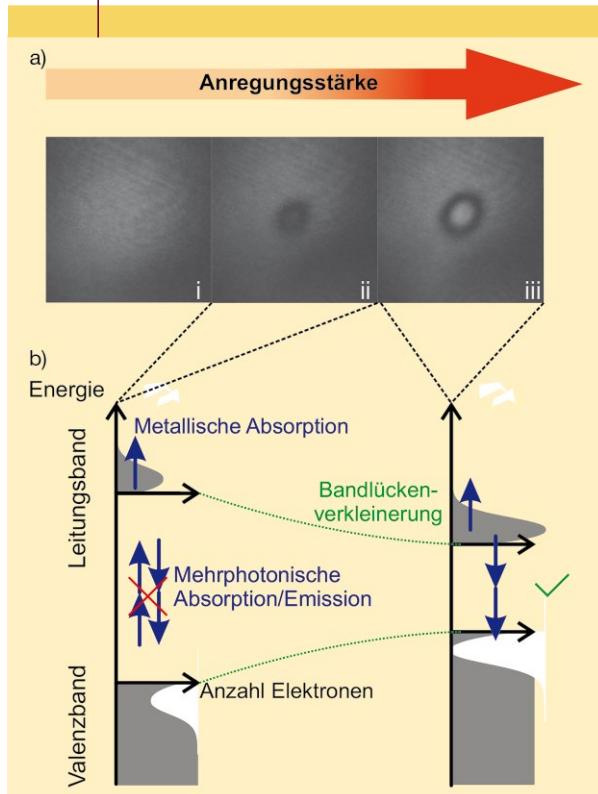
Um diese Anregung und die darauffolgende Dynamik der Elektronen im Leitungsband auf der Femtosekun-

ABB. 1 | ANREGGE-ABFRAGE-EXPERIMENTE



Skizze a) der Anregge-Abfrage-Experimente unter „normalen“ und LADIE-Bedingungen; b) Anregungsprozesse in einem Dielektrikum mit infraroten Laserpuls.

ABB. 2 | LASER-VERSTÄRKUNG



a) CCD-Bilder des Abfrage-Pulses unter drei verschiedenen Bedingungen. i: ohne Anregung, ii: Absorption, iii: Verstärkung; b) Skizze des Lichtverstärkungsprozesses: Eine genügend hohe Anregungsstärke und somit Anzahl von Elektronen im Leitungsband führt zu einer ultraschnellen Bandlückenverkleinerung. Diese erlaubt den zuvor verbotenen zweiphotonigen Übergang. Dies ist entweder Zweiphotonen-Absorption oder stimulierte Emission zwischen Valenz- und Leitungsband, abhängig von der Anzahl der Elektronen am Anfang und Ende des Übergangs.

den-Skala zeitaufgelöst zu beobachten, haben sich Anrege-Abfrage-Experimente (engl. Pump-Probe) mit zwei zeitlich verzögerten, ultrakurzen Laserpulsen als eine sehr nützliche Methode bewährt (Abbildung 1a). In der Tat zeigen alle diese Experimente [1], dass die Anregung dielektrischer Materialien zu einer hohen Reflektivität und Absorption führt, wie man es von Metallen im sichtbaren und nahen UV-Wellenlängenbereich kennt.

Als wir in Kassel vergleichbare Experimente an dünnem Saphirglas (nur 0,1 mm dick) durchführten, wurden wir von den Ergebnissen mehr als überrascht [2]. Das von einem 30 fs kurzen infraroten ($\lambda = 800$ nm) Laserpuls angeregte Saphirglas zeigte bei bestimmten

Stärken der Anregung nicht die klassische, metallische Absorption, sondern eine Verstärkung des 43 fs kurzen, ultravioletten Abfragepulses ($\lambda = 400$ nm). Diesen Effekt nennen wir Laser Amplification in Excited Dielectrics, kurz LADIE.

Beobachten konnten wir diese Verstärkung nicht nur räumlich aufgelöst mit einer CCD-Kamera, sondern mit einer Photodiode auch als realer „Gain“. Dies bedeutet, dass die Energie des Abfragepulses nach dem Verlassen der Probe höher war als beim Eintreten. Abbildung 2a zeigt CCD-Bilder des Abfragepulses unter ansteigender Anregung: ohne Anregung (i), klassische Absorption (ii) und Verstärkung, umgeben von einem absorbierenden Ring (iii).

Unsere Messungen deckten zudem auf, dass das verstärkte Licht ähnlich wie in einem Laser kohärent und gerichtet ist und durch stimulierte Emission erzeugt wird. Auch zeigte sich, dass der Verstärkungsfaktor mit steigender Intensität des Abfragepulses stark ansteigt. Das war eine wichtige Indikation für einen zweiphotonigen Verstärkungsprozess. Bei diesem lösen zwei ankommende Abfragephotonen eine stimulierte Emission aus, bei der somit am Ende vier Abfragephotonen vorliegen. Da dieser Prozess im ungestörten Material wegen der hohen Bandlücke nicht mög-

lich ist, vermuten wir, dass diese aufgrund der hohen Ladungsträgerdichte kleiner wird und so einen zweiphotonigen Übergang für den Abfragepuls erlaubt. Ob dann eine Absorption oder stimulierte Emission stattfindet, hängt – wie in einem klassischen Laser – davon ab, ob sich mehr Elektronen am unteren oder oberen Ende des Überganges befinden, also den passenden Energiewerten im Valenz- und Leitungsband.

Mit Simulationen der Anregung der energetischen Verteilung der Elektronen in Valenz- und Leitungsband sowie der Propagation des Abfragepulses konnten wir die experimentellen Beobachtungen reproduzieren.

Während die Entdeckung des Effektes selbst neue Einblicke in die Licht-Materie-Wechselwirkung bietet, kann diese erstmalig entdeckte Lichtverstärkung auch neue Anwendungen eröffnen, etwa in der nichtlinearen Mikroskopie oder zur Realisierung neuartiger UV-Laser.

Literatur

- [1] P. Balling, J. Schou, Rep. Prog. Phys. **2013**, 76(3), 36502.
- [2] T. Winkler et al., Nature Phys., Adv. onl. publ., 18.9.2017; DOI: 10.1038/nphys4265

Thomas Winkler, Thomas Baumert, Arne Senfleben, Uni Kassel

GRAVITATIONSPHYSIK

Alles fällt gleich schnell

Der im April 2016 gestartete französische Forschungssatellit *Microscope* hat zur Aufgabe, das Äquivalenzprinzip mit unerreichter Genauigkeit zu studieren. Das erste Untersuchungsergebnis bestätigt den freien Fall von Körpern mit unterschiedlicher Zusammensetzung bis auf 10^{-14} . Damit konnte die Genauigkeit solcher Tests um das Zehnfache verbessert werden. Im Innern des Satelliten wird die Bewegung von zwei Hohlzylindern relativ zueinander gemessen. Sie bestehen aus einer Platin- beziehungsweise Titanlegierung. Im kommenden Jahren soll die Messgenauigkeit nochmals um einen Faktor zehn verbessert werden. Das Äquivalenzprinzip ist Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie.

P. Touboul et al., Phys. Rev. Lett. **2017**, 119, 231101.

TB