

## Luftiger Laser

Amerikanischen Forschern ist es gelungen, durch optische Anregung rückwärts gerichtete Strahlung in Luft zu erzeugen, welche Eigenschaften von Laserlicht hat.

Der Stickstofflaser ist vermutlich die einfachste Realisierung des Laserprinzips: Um stimulierte Emission in Luft bei Atmosphärenbedingungen zu erzeugen, reicht es aus, eine Hochspannungsentladung zwischen zwei V-förmigen Elektroden zu erzeugen. Dabei sind weder ein sorgfältig justierter Laserresonator noch dotierte Kristalle bzw. Gläser erforderlich. Da ein solcher Stickstofflaser keine Rückkopplung aufweist, sind Strahlqualität und Kohärenz verglichen mit resonatorbasierten Laserkonzepten deutlich geringer. Allerdings ist die Strahlung des Stickstofflasers gerichtet und signifikant verstärkt gegenüber der ungerichteten Fluoreszenz, die normalerweise in einem Lichtbogen auftritt.

Mittels elektrischer Entladung lässt sich gepumptes „Lasern in Luft“ recht unproblematisch erreichen. Dagegen ist es ausgesprochen anspruchsvoll, einen Luft-Laser rein optisch anzuregen – trotz jahrelanger Forschung und immer aufwändigeren Pumpschemata. Besonders reizvoll wäre die Anregung eines Luft-Lasers in großer Entfernung und in Rückwärtsrichtung. Das würde die Einsatzmöglichkeiten von LIDAR (Light Detection And Ranging) deutlich verbessern,

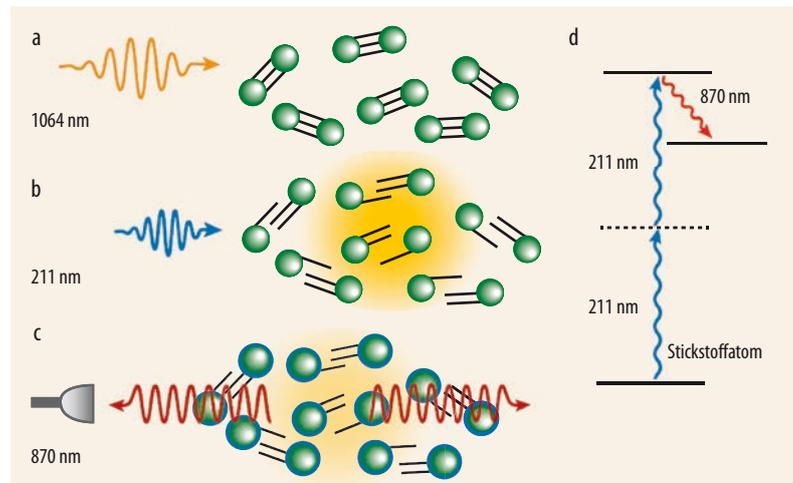


Abb. 1 Lasern in Luft nach dem neuen Zwei-Schritt-Verfahren beginnt mit einem Infrarot-Puls, der auf atmosphärische Luft trifft (a). Durch Multi-Photonen-Absorption kommt es zur Dissoziation der Moleküle, speziell von

Stickstoff (grün). Ein UV-Puls regt die resultierenden Stickstoffatome (b) in einen fluoreszierenden Zustand an (d). Die stimulierte Emission breitet sich in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung aus (c) und lässt sich schließlich detektieren.

weil die Fluoreszenz nicht mehr in alle Raumrichtungen ausgesandt wird, sondern gerichtet zurück zum Erzeugungsort. Kürzlich stellten Alexandre Laurain und seine Kollegen am College of Optical Sciences in Tucson einen neuen Weg vor, um dieses Ziel zu erreichen. Ihr Ansatz basiert auf der unabhängigen Dissoziation von Sauerstoff- oder Stickstoffmolekülen in einem durch Infrarotstrahlung induzierten Plasmakanal. Verglichen mit der Dissoziation von Luftmolekülen

durch UV-Strahlung ist dieser indirekte Ansatz deutlich effizienter und ermöglicht eine höhere Verstärkung und eine niedrigere Schwelle.

Die Detektion von Spurengasen oder möglicherweise gefährlichen Substanzen aus der Entfernung ist eine anspruchsvolle Aufgabe mit Anwendungen von der Umweltforschung bis hin zur Sicherheit von Militär und Luftfahrt [1]. Spezielle Spektroskopietechniken erlauben es, beispielsweise Sprengstoffe chemisch zu identifizieren, oder sie zielen auf den Nachweis von chemischen oder bakteriologischen Kampfstoffen wie Anthrax. Meist geht es darum, kritische Stoffe aus Entfernungen von wenigen Metern bis zu vielen Kilometern zu detektieren. Messungen basieren häufig auf differentieller Absorptionsspektroskopie kombiniert mit LIDAR. Mit zunehmendem Abstand wird die sichere Identifikation erschwert, da die optisch angeregte Fluoreszenz isotrop abgestrahlt wird. Die Zahl der Photonen im Detektor fällt mit dem Quadrat des Abstands. Daher sinkt bei niedrigen Stoffkonzentrationen das detektierbare Fluoreszenzsignal schnell unter

### KURZGEFASST

#### ■ Rasante Elektronen

Ein Elektron benötigt 40 Attosekunden, um eine Lage von Magnesiumatomen zu durchdringen. Das hat ein internationales Team um Forscher der TU München und des MPI für Quantenoptik gemessen. Dazu brachten die Physiker eine definierte Anzahl Lagen Magnesiumatome auf einen Wolframkristall auf. Trifft ein EUV-Puls auf dieses System, schlägt er im Wolfram Elektronen heraus. Mit einem zweiten Laserpuls lässt sich messen, wie lange die Elektronen benötigen, um an die Oberfläche zu gelangen. Die Ergebnisse könnten nützlich sein für die Entwicklung schnellerer Elektronikbauteile.

S. Neppl et al., Nature 571, 342 (2015)

#### ■ Neue Baryonen entdeckt

Der LHCb-Kollaboration ist es gelungen, im Massenspektrum von Proton-Proton-Kollisionen zwei neue Teilchen der Baryonen-Familie bei einer Masse von etwa  $5,9 \text{ GeV}/c^2$  zu entdecken:  $\Xi_b^-$  und  $\Xi_b^0$ . Die beiden Teilchen bestehen jeweils aus einem beauty-, einem strange- und einem down-Quark und werden vom Quarkmodell vorhergesagt. Neben der Masse haben die Wissenschaftler auch die relative Produktionsrate und den Zerfall der neuen Teilchen untersucht. Alle Ergebnisse stimmen mit Vorhersagen der Quantenchromodynamik überein. R. Aaij et al. (LHCb-Coll.), akzeptiert bei Phys. Rev. Lett., arXiv:1411.4849

das Einzelphotonenlimit. Lasern in Luft scheint hier aufgrund der gerichteten Fluoreszenzemission der einzig mögliche Ausweg zu sein. Allerdings muss die Emission in Rückwärtsrichtung geschehen – eine weitere Schwierigkeit in der praktischen Anwendung.

Optisch induziertes Lasern in Luft gelang bereits vor mehr als zehn Jahren [2]. Dieser erste Ansatz basierte darauf, dass die ultraviolette Laserstrahlung in Luft durch Selbstfokussierung ein Filament erzeugt, in dem sie geführt wird. Dabei kommt es zu einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Selbstphasenmodulation und plasmainduzierter Defokussierung [3]. Das Plasma im Kern des Filaments reduziert den Brechungsindex, wodurch das Licht ähnlich wie in einer Glasfaser geführt wird. In den letzten Jahren gelang es, diesen Ansatz stark zu verbessern. Dennoch war die rückwärts gerichtete Emission bislang immer recht schwach, sodass Photomultiplier zur Detektion erforderlich waren. Ein großer Fortschritt ist Kartashov und Kollegen im Jahr 2012 gelungen, die bei Anregung in einem Filament bei  $4\ \mu\text{m}$  (mittleres Infrarot, MIR) erheblich stärkere Stickstofflinien als bei anderen Anregungswellenlängen beobachten konnten [4]. Allerdings fanden diese Experimente nicht unter Atmosphärenbedingungen statt, sondern mit Stickstoff unter Druck. Aufbauend auf früheren Experimenten mit Filament-Erzeugung durch UV-Strahlung haben Laurain und Kollegen ein völlig neues Anregungsschema vorgeschlagen und gezeigt, dass sich damit die Laserverstärkung in Stickstoff und Sauerstoff deutlich erhöhen lässt [5]. Des Weiteren erfolgte die Laseremission hierbei nahezu schwellenlos.

In vorherigen Experimenten hatte der UV-Pumpstrahl die beiden Aufgaben, Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle zu dissoziieren und die erzeugte atomare Spezies mittels Zwei-Photonen-Anregung in das obere Laserniveau zu pumpen. Nur für letzteren Schritt ist strenggenommen ein UV-Pumplaser bei einer genau abgestimmten Wellen-

länge von 211 nm (für Stickstoff) nötig. Ultraviolettes Licht bei diesem schmalen Pumpübergang zu erzeugen, umfasst drei nichtlineare Umwandlungsschritte, welche die Gesamteffizienz erheblich verringern. Daher ist eine Pumpleistung von einigen Joule im Infraroten erforderlich, um wenige Millijoule bei 211 nm zu erhalten. Da nur die Anregung des Laserprozesses in Stickstoff von der genauen Wellenlänge abhängt, bietet es sich an, einen kleinen Teil der Infrarotstrahlung zu nutzen, um den ersten Schritt der Dissoziation mittels Multiphotonen-Prozessen durchzuführen (Abb. 1). Diese Aufteilung ermöglicht es zudem, den zweiten Schritt zeitlich zu verzögern und den Prozess damit weiter zu optimieren.

Mithilfe dieses Zwei-Schritt-Verfahrens gelang es Laurain et al., die Laserenergie in Rückwärtsrichtung in atmosphärischem Stickstoff von bescheidenen 0,5 auf etwa 100 nJ zu steigern – bei gleicher Pumpenergie bei 211 nm. Eine Erhöhung um den Faktor 3 tritt in atmosphärischem Sauerstoff bei einer Pumpwellenlänge von 226 nm auf. Wichtiger noch ist die Tatsache, dass beide Laserprozesse in diesem Schema offenbar schwellenlos sind – so ist Lasern bereits bei UV-Pumpenergien unterhalb von 100  $\mu\text{J}$  zu beobachten.

Die Autoren haben die hier vorgestellten Ergebnisse zwar nur im Labormaßstab erzielt, dennoch extrapolieren sie, dass Lasern in

Luft auch bei Entfernungen jenseits von hundert Metern möglich sein sollte. Der experimentelle Nachweis dafür steht aus, und bis zu Entfernungen von einigen Kilometern, die für die Detektion von Spurengasen in der oberen Atmosphäre erforderlich sind, ist es noch ein weiter Weg. Auch lassen sich mit dem vorgeschlagenen Schema nur solche Stoffe unmittelbar nachweisen, die innerhalb der Laserbandbreite Absorptionslinien besitzen. Dennoch ist ein großer Schritt für das Lasern in Luft gelungen. Selbst wenn die Spektroskopie nur über Entfernungen von bis zu hundert Metern möglich wäre, würde sie bereits viele Anwendungen eröffnen, die mit konventionellen Methoden nicht zu realisieren sind. An diesem Punkt scheint es vielversprechend, die MIR-Entwicklungen aus [4] mit dem UV-Anregungsschema zu verbinden. Vielleicht ermöglicht gerade die exotische Kombination aus extremer UV- und extremer IR-Strahlung Spektroskopie aus atmosphärischen Distanzen.

Günter Steinmeyer

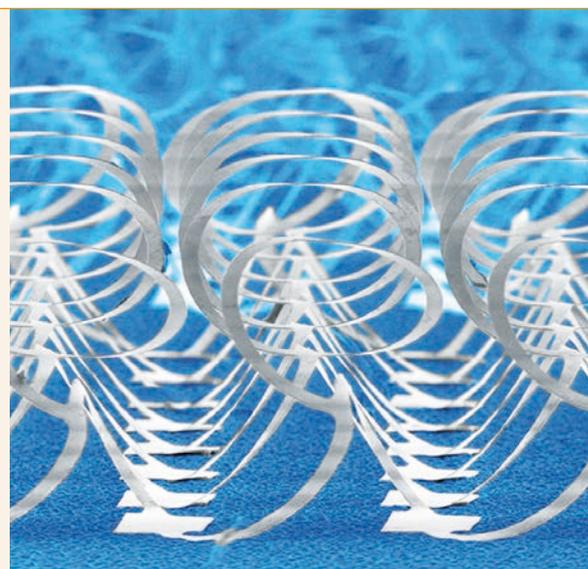
Dr. Günter Steinmeyer, Max-Born-Institut, Max-Born-Str. 2a, 12489 Berlin

- [1] P. R. Hemmer et al., PNAS **108**, 3130 (2011)
- [2] Q. Luo, W. Liu und S. L. Chin, Appl. Phys. B **76**, 337 (2003)
- [3] L. Bergé et al., Rep. Prog. Phys. **70**, 1633 (2007)
- [4] D. Kartashov et al., Phys. Rev. A **86**, 033831 (2012)
- [5] A. Laurain, M. Scheller und P. Polynkin, Phys. Rev. Lett. **113**, 253901 (2014)

## BLUMEN AUS SILIZIUM

Winzige Blumen, Pfaue oder Schmetterlinge konnten Forscher der University of Illinois aus Silizium herstellen. Dies gelang mit einem neuen Verfahren, bei dem die Wissenschaftler zunächst eine elastische Silikonunterlage vorgespannt haben. Auf diese brachten sie zweidimensionale filamentartige Siliziumstrukturen auf, deren Form sie zuvor per Computer berechnet hatten. An definierten Punkten wurden diese Strukturen chemisch fixiert. Entspannt sich nun die Unterlage, falten und verdrillen sich die Filamente und bilden filigrane dreidimensionale Muster. Diese Methode könnte sich beispielsweise für die Herstellung von Metamaterialien eignen.

S. Xu et al., Science **347**, 154 (2015)



John Rogers, University of Illinois