

Berührungslose Lichtkontrolle in Luft

Forscherguppen aus Jena, Darmstadt, Hamburg und Aalen haben eine neue Methode entwickelt, um hochenergetische Laserpulse direkt in Luft abzulenken. Mithilfe hochintensiver Ultraschallwellen, die sich in gasförmigen Medien ausbreiten, ist es gelungen, ultrakurze Laserpulse mit einer bisher unerreichten Spitzenleistung von 20 Gigawatt in Luft abzulenken und dabei gleichzeitig eine herausragende Strahlqualität beizubehalten. Diese innovative Technologie birgt das Potenzial für viele Anwendungen in der Laserphysik und Optik und könnte in Zukunft neue, äußerst robuste optische Bauteile wie beispielsweise Linsen oder Wellenleiter in bislang unerschlossenen spektralen Bereichen ermöglichen.

Intensive Laserstrahlung ist aus der modernen Forschung nicht wegzudenken. Ob in der Materialbearbeitung, Teilchenbeschleunigung oder Kernfusion – an vielen Stellen wird die Forschung erst durch Laserlicht und dessen genau steuerbare Eigenschaften ermöglicht. Diese Eigenschaften, insbesondere Intensität, Phase, Wellenlänge sowie die räumliche Strahlgröße und Form, lassen sich auf unterschiedliche Arten steuern. Für optische Komponenten werden fast immer Elemente aus Festkörpermaterialien eingesetzt, wie Linsen aus Glas, Wellenleiter aus Glasfasern oder akusto-optische Modulatoren aus dem kristallinen Tellurdioxid.

Allerdings limitieren die genutzten Festkörper zugleich auch die möglichen Einsatzgebiete optischer Komponenten. Zum Beispiel sind die unterstützten spektralen Bereiche sehr begrenzt, da Festkörper in vielen Wellenlängenbereichen wie im Ultravioletten und im Infraroten stark absorbieren. Eine weitere Einschränkung betrifft die Spitzenleistung, da in Festkörpern nichtlineare Effekte Laserstrahlen hoher Spitzenleistung beeinflussen können, zum Beispiel führen sie zur Selbstfokussierung. Hier werden Laserstrahlen durch die eigene Leistung immer weiter fokussiert, was am Ende zu Zerstörung der Strahlqualität und eventuell sogar der optischen Elemente selbst führt.

In Gasen sind diese Einschränkungen viel schwächer ausgeprägt. So sind etwa tausendfach höhere optische Spitzenleistungen und der Einsatz in signifikant größeren spektralen Bereichen möglich. Der Grund, weshalb Gase selten zur Lichtkontrolle eingesetzt werden, ist der geringe Einfluss, den unterschiedliche Gase auf die Propagation von Licht haben. Außerdem ist es nicht einfach, ein Gas zum Beispiel zu einer Linse zu formen und diese Form beizubehalten. Nichtsdestotrotz wurden Gase schon vereinzelt zu Fokussierung und leichten Ablenkung, zum Beispiel von extrem ultraviolettem Licht [1] unter Nutzung von Gasdüsen und unter hohem Druck im fernen Infrarot wie ein optisches Gitter verwendet [2]. Sogar in der Natur sind gasförmige Medien unter besonderen Umständen in der Lage, die Ausbreitungsrichtung von Licht wesentlich zu verändern. So führen Schichten unterschiedlicher Temperatur in der Wüste zu Lichtablenkung: ein Phänomen, das als Fata Morgana bekannt ist.

Ein interdisziplinäres Forschungsteam, bestehend aus Forschern von der Hochschule Aalen, der Technischen Universität Darmstadt, dem Helmholtz-Institut Jena und dem Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY, hat nun einen anderen Ansatz verfolgt, um die genannten Einschränkungen von Festkörpern in der modernen Optik zu umgehen. Wir haben hochintensiven Ultraschall genutzt, um die optischen Eigenschaften von Gasen zu verändern und zu formen und somit Licht zu brechen. Dazu haben wir ein Piezoelement mit 7 cm Durchmesser als Ultraschallwandler genutzt und mit 500 kHz betrieben. Um eine ausreichende Dichtemodulation zu erreichen, haben wir diesen Wandler mit extrem hoher Leistung betrieben und zusätzlich durch einen akustischen Reflektor eine Resonatorgeometrie realisiert. Damit haben wir Schalldruckpegel erreicht, die mit 148 dB vergleichbar zu einem Düsentriebwerk sind. Trotzdem mussten wir den Strahl noch sieben mal durch das Schallfeld schicken, um die Stärke des akusto-optischen Effekt zu maximieren.

In einem ersten Experiment gelang dies sogar direkt in Luft, wobei hochintensives Laserlicht im nahen Infrarot nur mit Ultraschall und ohne sonstige transmittierende Elemente abgelenkt wurde [3]. In dieser ersten Demonstration haben wir eine Ablenkeffizienz von über 50 % erreicht. Simulationen zeigen, dass in Zukunft mit höheren Schalldrücken noch viel höhere Effizienzen möglich sein werden. Abbildung 1a zeigt eine schematische und vereinfachte Darstellung des akusto-optischen Effekts, welcher in Umgebungsluft einen Laserstrahl moduliert und nach Propagation in zwei getrennten Strahlen teilt. Zum Vergleich zeigt Abbildung 1b ein Foto des verwendeten experimentellen Aufbaus.

Diese Methode demonstriert erstmals einen elektronisch steuerbaren Spiegel aus Luft. Mit diesem Spiegel konnten wir ultrakurze Laserpulse mit einer Spitzenleistung von über 20 Gigawatt ablenken, was bisherige Spitzenleistungslimits um etwa drei Größenordnungen übertrifft. In Zukunft sind auch andere optische Elemente in dichtemodulierten Gasen denkbar, um die moderne Photonik auf zukünftige Anforderungen vorzubereiten.

Literatur

1. L. Drescher et al., Nature **2018**, 564, 91.
2. W. Dürr et al., Int. J. Infrared Millimeter Waves **1986**, 7, 1537.
3. Y. Schrödel et al., Nat. Photon. **2024**, 18, 54.

Yannick Schrödel, Christoph Heyl, Helmholtz-Institut Jena; Jan Helge Dörsam, Mario Kupnik, TU Darmstadt

Abbildungen:

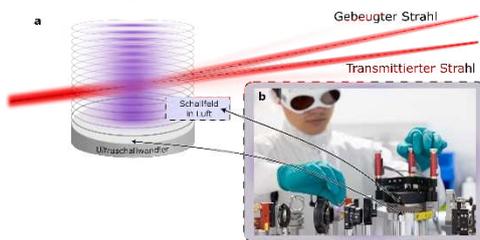


Abb. 1: Schema des präsentierten Experiments zur Ablenkung und Steuerung von Licht mittels hochintensiven Ultraschalls. a) Ein Laserstrahl (rot) wird im flachen Winkel in ein Ultraschallfeld (lila) geschickt und abgelenkt. Nach der Interaktion trennen sich die Beugungsordnungen. Adaptiert von Referenz [3] unter Creative Commons-Lizenz CC BY 4.0. b) Ein Foto des Aufbaus, bei dem ein Wissenschaftler den Ultraschallwandler justiert.