

■ Neue Phase für Filamente

In der Filamentierungsdynamik ultrakurzer hochintensiver Laserpulse tritt ein neuartiger Phasenübergang auf.

Schießt man hochintensive Laserpulse in die Atmosphäre oder in andere transparente Medien, zeigt sich ein faszinierender Effekt: Selbstführung [1]. Durch nichtlineare Wechselwirkung mit dem Laserlicht wirkt das Medium wie eine fokussierende Linse. Dahinter steckt der optische Kerr-Effekt, durch den sich vereinfacht gesprochen der Brechungsindex mit der Intensität erhöht. Je nach Medium lässt sich eine kritische Leistung ermitteln, ab welcher der Strahldurchmesser entlang der Ausbreitungsrichtung immer kleiner wird, die Lichtintensität folglich immer größer. Dieser Prozess, der in Luft bei etwa 10 GW einsetzt, heißt Selbstfokussierung. Bei sehr hohen Intensitäten wird allerdings das Medium ionisiert; für die Sauerstoffmoleküle der Atmosphäre ist dies ab ca. 10 TW/cm² der Fall. Dadurch entsteht ein selbst-induziertes Plasma, das auf den Laserstrahl stark defokussierend wirkt. Diese beiden Mechanismen, Selbstfokussierung und Defokussierung, können ein dynamisches Gleichgewicht ausbilden, welches Selbstführung des Laserlichts ermöglicht; es entsteht ein *Femtosecond Filament*.⁸⁾ Im Prinzip wird der Laserpuls dann ähnlich wie in einer Glasfaser geleitet, wobei das Licht selbst den Wellenleiter erzeugt (Abb. 1).

Die räumliche Dynamik solcher fs-Filamente ist sehr komplex und

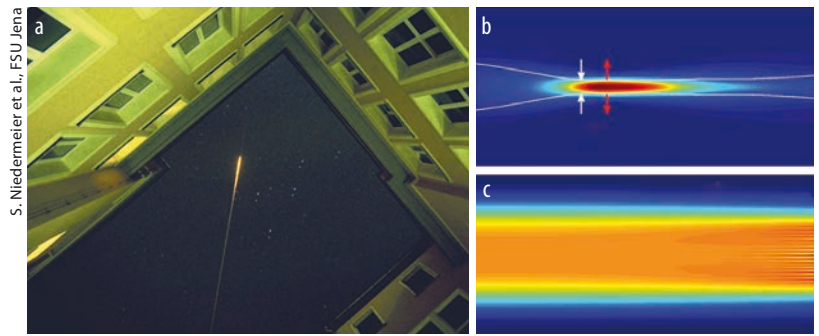


Abb. 1 Selbstgeführte Laserpulse (a, in der Atmosphäre) entwickeln oft multiple Filamentierung (vgl. Abb. 2). Fs-Filamente entstehen infolge eines dynamischen Gleichgewichts zwischen Selbstfokussierung (weiße Pfeile in b) und Defokussie-

rung durch selbstinduziertes Plasma (rote Pfeile). Für sehr hohe Laserleistungen führt eine Modulationsinstabilität zum Aufbrechen eines breiten Strahlprofils in mehrere Filamente (c).

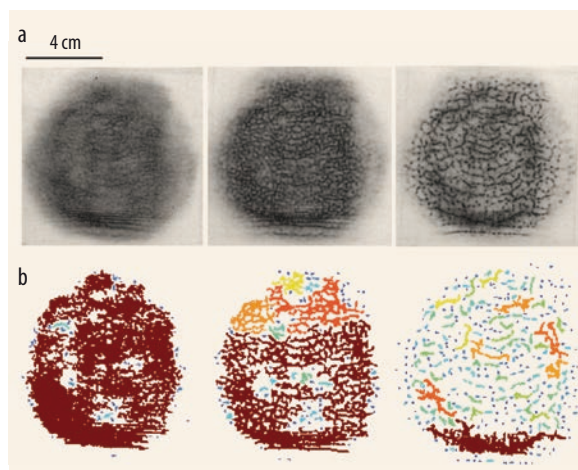
auch zwanzig Jahre nach der ersten experimentellen Realisierung [1] immer wieder für neue Überraschungen gut. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass moderne Laser ultrakurze Lichtpulse mit immer höherer Leistung liefern. Systeme im nahen infraroten Spektralbereich (z. B. bei einer Wellenlänge von 800 nm) mit Pulsdauern von einigen zehn Femtosekunden und mehreren Terawatt Spitzenleistung stehen heute in vielen Labors weltweit zur Verfügung. Für solche Hochleistungslaserpulse bilden sich statt einem einzelnen Filament gleich mehrere parallel zueinander aus (multiple Filamentierung). Wenn die Laserleistung sehr viel größer als die kritische Leistung für Selbstfokussierung ist, können so hunderte Filamente entstehen, die auch miteinander wechselwir-

ken, zum Beispiel fusionieren oder weiter aufspalten [2]. Trotz dieser komplexen Dynamik ist die transversale Modulationsinstabilität, die der multiplen Filamentierung zugrunde liegt, recht einfach zu verstehen [3]: Eine einfache lineare Stabilitätsanalyse eines sehr breiten Strahlprofils zeigt bereits, dass wieder der optische Kerr-Effekt für das exponentielle Anwachsen transversaler periodischer Störungen sorgt (Abb. 1).

Praktisch genutzt werden fs-Filamente bisher vor allem zur Kompression von ultra-kurzen Laserpulsen [4]. Aber auch ihre lange Reichweite macht sie interessant für viele Anwendungen, beispielsweise zur Fernerkundung der Atmosphäre [5]. Ein Schweizer Team um Jérôme Kasparian hat nun die multiple Filamentierung von Hochleistungslaserpulsen genauer analysiert und dabei Erstaunliches festgestellt [6]. Ausgangspunkt war die Beobachtung von Mustern in den am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf aufgenommenen Strahlprofilen. Diese erinnern stark an Perkolationsmuster, wie sie beispielsweise bei der Zubereitung des morgendlichen Filterkaffees entstehen. Um diese Beobachtung zu quantifizieren, wurden die aufgenommenen Strahlprofile zunächst in Graustufen gescannt und einer Prozedur des „coarse graining“ unterworfen. Dadurch erhält man

⁸⁾ Mehr Informationen zu fs-Filamenten finden sich auf www.filamentation.org.

Abb. 2 Experimentelle Strahlprofile (a) des DRACO-Lasers ($P = 96$ TW) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf zeigen multiple Filamentierung. Die Profile wurden nach (von links) 2,5, 5 bzw. 15 Metern auf Fotopapier aufgenommen [7]. Der Schwärzungsgrad spiegelt die transversale Fluenzverteilung wider. In den aufbereiteten Strahlprofilen (b, vgl. Text) lassen sich die Cluster-Strukturen besser erkennen und analysieren [6]. Die Größe der einzelnen Cluster ist farbkodiert.



eine gepixelte Version des Strahlprofils, und der Graustufenwert eines jeden Pixels repräsentiert die lokale mittlere Fluenz. Nach Festlegung eines Schwellenwertes lassen sich zusammenhängende Strukturen mit hoher Fluenz (Cluster) identifizieren und ihrer Größe nach klassifizieren (Abb. 2). Damit gelang es, relevante Größen wie Füllfaktor (Flächenanteil mit hoher Fluenz), mittlere Cluster-Größe oder Perkolationswahrscheinlichkeit (dass sich ein Cluster über praktisch das gesamte Strahlprofil erstreckt) für verschiedene Propagationsdistanzen zu bestimmen. Trägt man die mittlere Cluster-Größe oder die Perkolationswahrscheinlichkeit gegen den Füllfaktor auf, beobachtet man einen Sprung nahe des kritischen Füllfaktors $p_c \approx 0,5$. Im zugrundeliegenden Experiment entspricht dieser kritische Füllfaktor einer Propagationsdistanz von etwa elf Metern. Bei dieser Distanz springt zum Beispiel die Perkolationswahrscheinlichkeit relativ

schnell von nahe eins auf praktisch null, und das Strahlprofil zerfällt in viele kleinere Cluster. Die Forscher sehen in diesem Verhalten den Beleg für einen kontinuierlichen Phasenübergang. Eine detaillierte mathematische Analyse zeigt sogar, dass es sich um einen Phasenübergang einer neuen Universalitätsklasse handeln müsste.

Ob man wirklich von einem Phasenübergang hin zu multipler Filamentierung sprechen kann, ist nicht unumstritten. Trotzdem sind die Resultate bemerkenswert und werden noch Stoff für einige Diskussionen liefern, da sie einen neuen, systematischen Ansatz zur Analyse multipler Filamentation aufzeigen. Und hier gibt es noch viel zu tun. Vor etwa einem Jahr haben US-Wissenschaftler gezeigt, dass man die multiple Filamentationsdynamik mit Hilfe eines zweiten „Tank-Lasers“, stark beeinflussen beziehungsweise sogar kontrollieren kann [5]. Können die neuen Schweizer Erkenntnisse vielleicht

helfen, diesen interessanten Ansatz weiter auszubauen? Bis hin zum Traum einiger Science-Fiction-Autoren, der kontrollierten Blitzableitung mittels Laserfilamenten, ist es jedenfalls noch ein weiter, aber wahrscheinlich sehr spannender Weg.

Stefan Skupin

- [1] A. Braun et al., Opt. Lett. **20**, 73 (1995)
- [2] M. Mlejnek et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 2938 (1999)
- [3] V. Bespalov und V. I. Talanov, JETP Lett. **3**, 307 (1966)
- [4] C. P. Hauri et al., Applied Physics B: Lasers & Optics, **79**, 673 (2004)
- [5] M. Scheller et al., Nature Photonics **8**, 297 (2014)
- [6] W. Ettoumi, J. Kasparian und J.-P. Wolf, Phys. Rev. Lett. **114**, 063903 (2015)
- [7] S. Henin et al., Appl. Phys. B **100**, 77 (2010)

Dr. Stefan Skupin,
Univ. Bordeaux –
CNRS – CEA, Centre
Lasers Intenses et
Applications, UMR
5107, 33405 Talence,
Frankreich