

■ Kugeln aus Licht

Das Auseinanderlaufen von Lichtfeldern lässt sich in Faserbündeln vollständig unterdrücken.

Entgegen unserer täglichen Erfahrung bewegt sich Licht nicht unbedingt geradlinig. Je kleiner der Durchmesser eines Lichtstrahls ist, desto stärker ist die Beugung, also die Tendenz, dass der Strahl breiter wird. Auch die Dauer von Lichtpulsen ändert sich, denn jedes zeitveränderliche Signal besteht aus verschiedenen Frequenzkomponenten, die sich in transparenten Materialien unterschiedlich schnell ausbreiten und so auseinander driften. Als Beispiel betrachte man einen 30 fs kurzen Puls mit einer Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$, der auf $10 \mu\text{m}$ Durchmesser fokussiert wurde. Bei der Ausbreitung durch vier Zentimeter Glas dehnt er sich auf etwa die 140-fache Breite und doppelte Dauer aus. Licht neigt also dazu, sich in Raum und Zeit zu „verdünnen“, und zwar umso schneller, je stärker es konzentriert wurde. Dies ist beispielsweise bei der optischen Datenübertragung äußerst hinderlich. Abhilfe schaffen hier Glasfasern, in deren Kern der Brechungsindex erhöht ist. Daher führt die Faser Licht durch Totalreflexion und unterbindet, dass sich das Feld transversal verbreitert. Natürlich bringt dieses Konzept einen erheblichen Verlust an Flexibilität mit sich. Dem Ideal einer zeitlich wie räumlich konstanten hochkonzentrierten Lichtverteilung, die sich in jede beliebige Richtung ausbreiten kann, kommt man so kaum näher.

Hier setzt das von Yaron Silberberg im Jahr 1990 entwickelte Konzept der Lichtkugeln an („light

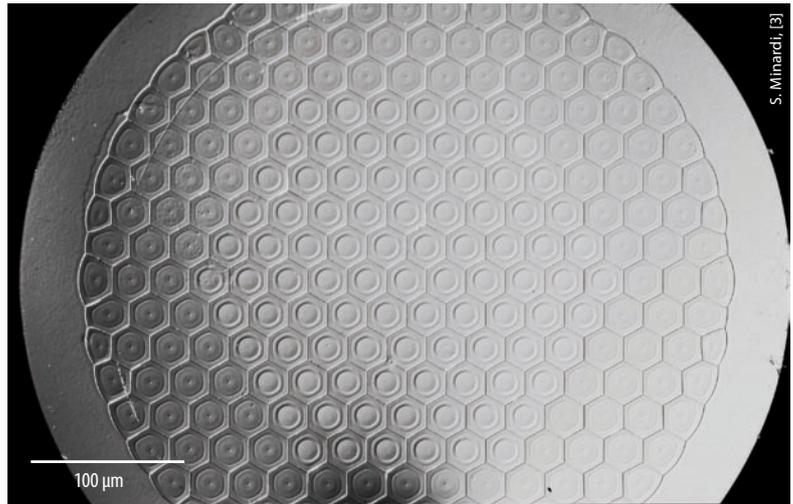


Abb. 1 In einem solchen Bündel aus verschmolzenen Glasfasern lassen sich Lichtkugeln erzeugen.

bullets“) [1]. Der Clou dabei besteht darin, den schwachen Anstieg der Brechzahl bei höherer Lichtintensität im Glas so auszunutzen, dass die Verbreiterung des Lichtfeldes gerade kompensiert wird. Ein intensiver Strahl bildet so eine effektive Sammellinse, die der Beugung entgegenwirkt und das Licht fokussiert. In ähnlicher Weise verhindert die Nichtlinearität der Brechzahl in Glas auch das zeitliche Auseinanderlaufen von Pulsen im Bereich der für die Telekommunikation genutzten Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$. Leider führt der angestrebte Prozess der Selbstfokussierung nicht unbedingt zu stabilen Strukturen. Ist die Pulsenergie hoch genug, dass es zur Selbstfokussierung kommt, verstärkt sich die nichtlineare Wirkung selbst, was wiederum das Strahlprofil weiter einengt. Stabile Strukturen entstehen nur,

wenn sich das Feld nur in einer Richtung zusammenziehen kann. So bilden sich sog. zeitliche Solitonen in Glasfasern, in denen ein Indexprofil die räumliche Feldverteilung festlegt und nur noch eine Pulskompression möglich ist. In einem unstrukturierten Glasblock kann sich das Feld hingegen in drei Richtungen zusammenziehen, was zu einer wesentlich höheren Intensität führt. Oberhalb einer kritischen Pulsenergie kann das Glas dann sogar schmelzen, und es kann sich keine stabile Lichtkugel ausbilden.

Mitte der Neunzigerjahre wurde als Ausweg aus diesem Dilemma erstmals vorgeschlagen, das Material, in dem sich die Lichtkugel bewegen soll, dreidimensional zu strukturieren [2]. In Bündeln miteinander verschmolzener Glasfasern führen demnach die einzelnen

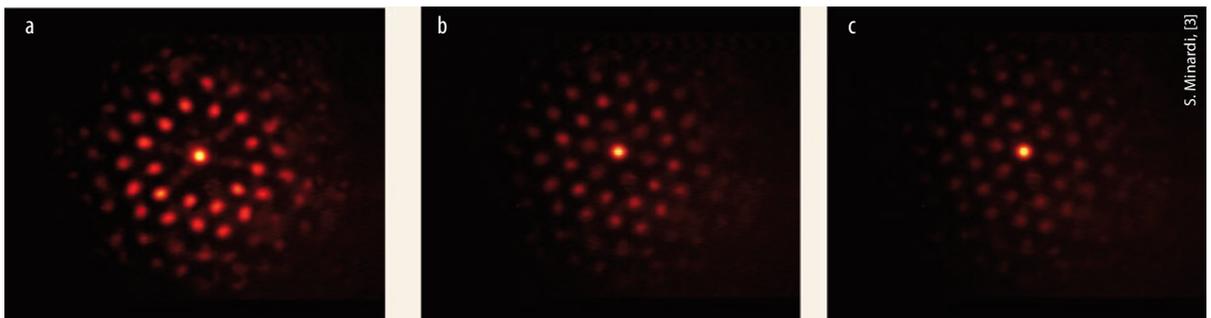


Abb. 2 In Abhängigkeit von der Leistung eines Lichtpulses ist dieser nach Ausbrei-

tung durch ein vier Zentimeter langes Faserbündel unterschiedlich stark räumlich

komprimiert. Die Leistung beträgt dabei 200 kW (a), 500 kW (b) bzw. 1000 kW (c).

Faserkerne das Licht, tauschen es aber auch untereinander aus, wenn die Profile der an unterschiedlichen Kernen gebundenen Moden überlappen. Die Stärke des damit verbundenen transversalen Energie-transportes oder der resultierenden effektiven Beugung lässt sich durch eine entsprechende Wahl der Kernabstände bestimmen. Für bestimmte Pulsenergien reicht dann die nichtlineare Wirkung aus, um diese effektive Beugung zu unterbinden, ohne einen Kollaps in den einzelnen Faserkernen auslösen zu können. Das Lichtfeld kontrahiert also nur, bis seine Ausdehnung vergleichbar mit den Faserabständen ist. Danach stoppt die Selbstfokussierung und eine stabile Lichtkugel entsteht.

Allerdings scheiterte die technische Realisierung dieses Konzepts lange daran, entsprechend homogene Faserbündel herzustellen. Das ist nun erstmals einer Gruppe in Jena gelungen (Abb. 1) [3]. Zur optischen Charakterisierung der hergestellten Glasfaserarrays wurden 170 fs kurze Pulse mit einer Wellenlänge um $1,55 \mu\text{m}$ in einen zentralen

Faserkern injiziert. Für niedrige Leistungen verbreiterte sich die Feldverteilung erheblich, sodass am Ende einer vier Zentimeter langen Probe praktisch alle Kerne angeregt waren (Abb. 2). Ab einer Pulsleistung von 400 kW bildete sich jedoch eine stabile Lichtkugel aus, die sich in Ausbreitungsrichtung auf etwa 60 fs zusammengezogen hatte. Für noch höhere Pulsenergien kontrahierte die Feldverteilung immer weiter, bis zu Pulsdauern unterhalb von 30 fs. Darüber hinaus beobachteten Minardi et al. eine komplexe Dynamik der Feldverteilung, die erheblich über das Bild der einfachen Lichtkugel hinausgeht. Durch die Anregung von Gitterschwingungen im Glas wurde der Puls rotverschoben und die Lichtkugel veränderte sich adiabatisch, insbesondere durch die mit steigender Wellenlänge stark zunehmende effektive Beugung im Faserarray. Teilweise reichte dann ab einer bestimmten Ausbreitungslänge die fokussierende Kraft der nichtlinear induzierten Brechzahl-erhöhung nicht mehr aus, und die gesamte Feldverteilung riss schließlich auseinander.

Die hier erstmals experimentell erzeugten Lichtkugeln sind ein wichtiger erster Schritt auf dem Weg zu dreidimensionalen selbstorganisierten Lichtkonfigurationen mit großem Potenzial in Kommunikation, Pulskompression oder Materialbearbeitung. Es wäre interessant zu wissen, ob ein angepasstes Design des Faserarrays den letztendlichen Zerfall der Lichtkugeln durch Rotverschiebung verhindern kann. Die bisher noch sehr hohen Pulsenergien lassen sich in stärker nichtlinearen Gläsern noch erheblich reduzieren. Schließlich wäre zu prüfen, ob sich das Material auch über optisch eingeschriebene Gitterstrukturieren ließe, was dem Konzept der Lichtkugel ein viel breiteres Anwendungsgebiet erschließen würde.

Ulf Peschel

- [1] Y. Silberberg, Opt. Lett. **15**, 1282 (1990)
- [2] A. B. Aceves et al., Phys. Rev. Lett. **75**, 73 (1995)
- [3] S. Minardi et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 263901 (2010)

Neugierig?

Sachbücher
von
WILEY-VCH

www.wiley-vch.de/sachbuch

514710906_bu