

NICHTLINEARE OPTIK

Auffallend diskret

Nichtlineare Lichtausbreitung und Solitonen in gekoppelten Wellenleiterstrukturen

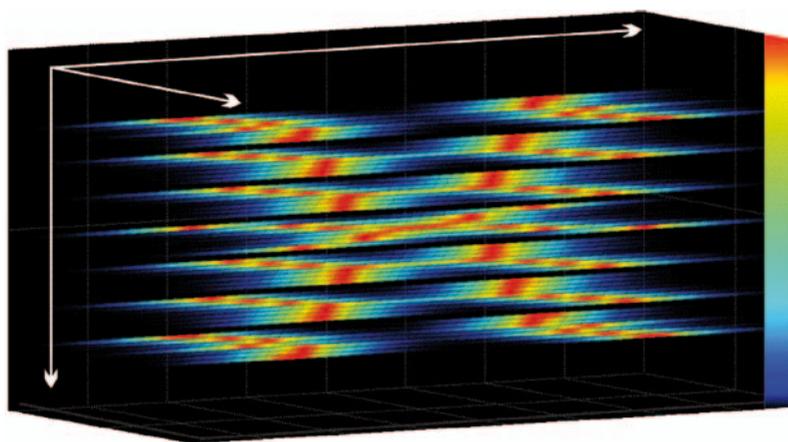
Alexander Szameit und Patrick Rose

Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile: Ein eindrucksvolles Beispiel dafür liefern diskrete optische Systeme, bei denen das Zusammenspiel von vielen, vergleichsweise einfachen Grundbausteinen zu erstaunlich komplexen optischen Effekten führt, wie sie in homogenen, kontinuierlichen Materialien nicht vorkommen. Kommen dann auch noch Nichtlinearitäten ins Spiel, so ist das Spektrum möglicher Phänomene noch reichhaltiger, wie der Nachweis von Solitonen, diskreten optischen Wirbeln oder „Lichtkugeln“ in den letzten Jahren gezeigt hat.

Betrachtet man ein herkömmliches Medium, das in allen drei Raumrichtungen weitgehend homogen ist, so lassen sich darin auftretende optische Phänomene im Rahmen einer kontinuierlichen Theorie beschreiben. Insbesondere ist es damit möglich, die Ausbreitung von Licht und die damit einhergehende Beugung und Dispersion mit hoher Genauigkeit vorherzusagen. Verglichen mit homogenen Medien erweitern mikro- und nano-optische (sog. mesoskopische) Systeme die Möglichkeiten beträchtlich, Licht und seine Propagation gezielt zu kontrollieren. In diesen Systemen ist Licht typischerweise in wohldefinierten Raumbereichen lokalisiert, beispielsweise in Mikroresonatoren, photonischen Kristallen oder Wellenleitern. Da das Licht sich nun nicht mehr an jedem Punkt des optischen Mediums aufhalten kann, wird es gewissermaßen diskretisiert.

Eine Vielzahl solcher physikalischer Systeme, sowohl natürliche als auch künstliche, ist trotz eines insgesamt eher komplexen Aufbaus durch das Wechselspiel relativ ähnlicher Grundkomponenten gekennzeichnet [1]. So bestehen organische Makromoleküle häufig aus einer Vielzahl fast gleicher Untereinheiten, sind Halbleiter-Supergitter aus einer Sequenz identischer Quantentröge aufgebaut oder ist ein elektrisches Netz als Ensemble schwach wechselwirkender Einzelschaltkreise aufzufassen. Oftmals sind die entsprechenden kleinen Einheiten gut verstanden und lassen sich mithilfe weniger Parameter und einfacher Differentialgleichungen sehr genau beschreiben. Das Gesamtsystem kann jedoch trotz verhältnismäßig schwacher Wechselwirkung zwischen den diskreten Elementen eine faszinierende Komplexität zeigen.

Diesen qualitativen Unterschied zu kontinuierlichen Systemen muss auch die theoretische Beschreibung



Durch das komplexe Zusammenspiel von Raum (Beugung) und Zeit (Dispersion) kann in einem diskreten System

aus Wellenleitern eine X-förmige Lichtstruktur entstehen (vgl. Abb. 5).

berücksichtigen. Das Konzept des diskreten Systems trägt diesen Gegebenheiten Rechnung und beruht auf der Analyse des Anregungs- und Energietransfers zwischen diskreten Einheiten. Die Einfachheit und Klarheit dieser mathematischen Beschreibung hat grundlegende theoretische Analysen mit zum Teil überraschenden Ergebnissen ermöglicht. So wird insbesondere deutlich, dass sich diskrete Systeme ungeachtet ihrer Unterschiede mithilfe ähnlicher Modelle beschreiben lassen, bei denen die Antwort des Gesamtsystems auf eine spezifische Anregung letztlich nur von den Eigenschaften der diskreten Einheitszellen und der Wechselwirkung der Zellen untereinander abhängt. Daher ist es möglich, Phänomene, die gemeinhin mit einem bestimmten diskreten System assoziiert sind,

KOMPAKT

- Die Theorie diskreter Systeme zeigt, dass die Eigenschaften des Gesamtsystems letztlich nur von den Eigenschaften der diskreten Einheiten sowie deren Wechselwirkung untereinander abhängen.
- Ein Beispiel für ein solches System sind Arrays von planaren Wellenleitern, in denen 1998 erstmals diskrete optische Solitonen nachgewiesen wurden.
- Zweidimensionale diskrete optische Systeme lassen sich mithilfe nichtlinearer photorefraktiver Kristalle oder durch gezielte Fokussierung ultrakurzer Laserpulse in ein Material erzeugen. Mit diesen Strukturen gelang es, viele aus der Festkörperphysik bekannte Phänomene optisch nachzuweisen.

Prof. Dr. Alexander Szameit (Jun.-Prof.), Institut für Angewandte Physik, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena; Dipl.-Phys. Patrick Rose, Institut für Angewandte Physik und Center for Nonlinear Science (CeNoS), Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstraße 2/4, 48149 Münster

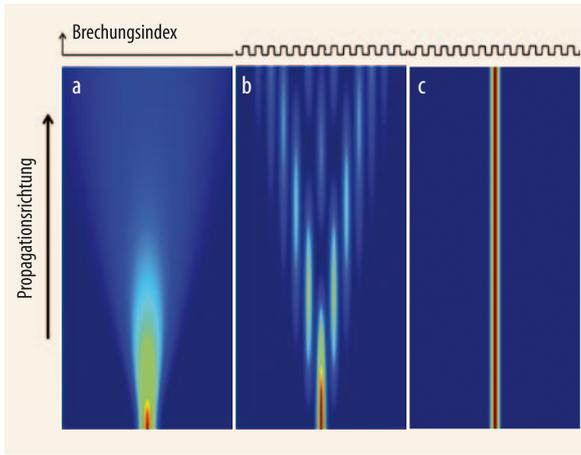


Abb. 1 In einem homogenen Medium mit konstantem Brechungsindex verbreitert sich ein propagierender Lichtstrahl aufgrund von Beugung gleichmäßig (a). Bei periodisch moduliertem Brechungsindex wie in einem Wellenleiterarray unterscheidet sich die (diskrete) Beugung erheblich, da sich das Licht nur in den Wellenleitern ausbreiten kann (b). Bei ausreichender Eingangsleistung und geeigneter Nichtlinearität können sich Strahlfokussierung und Beugung gerade kompensieren, sodass ein diskretes Soliton entsteht (c).

mathematisch auf andere diskrete Systeme abzubilden, um sie dort gegebenenfalls auch experimentell untersuchen zu können.

Diskrete Systeme in der Optik

Aufgrund dieser Universalität und der kompakten mathematischen Beschreibung interessierten sich Theoretiker schon früh für diskrete Systeme. Systeme aus lichtleitenden Komponenten erhielten jedoch erst mit der Entwicklung der optischen Datenübertragung besondere Aufmerksamkeit. So beschäftigte sich Alan Jones 1965 erstmals mit der Theorie von gekoppelten optischen Wellenleitern, und einem Forscherteam rund um Sasson Somekh gelangten 1973 die ersten Experimente zur Feldausbreitung in einer Struktur aus parallelen Wellenleitern, die durch strukturierte Protonen-Implantation in Gallium-Arsenid hergestellt worden war. Dabei fiel sofort auf, dass sich in diesem ersten diskreten optischen System der Energietransport senkrecht zu den Wellenleitern erheblich von der in homogenen Medien beobachteten Beugung unterschied. Dennoch blieben Wellenleiterarrays zunächst weiter unbeachtet.

Erst 1988 diskutierte Demetrios Christodoulidis den Einfluss optischer Nichtlinearitäten auf die Feldausbreitung in Wellenleiterarrays. Er erkannte, dass bei hoher Eingangsleistung und entsprechender Nichtlinearität der Brechungsindex im angeregten Wellenleiter ansteigt und dass dies zu einer Fokussierung des Strahls führt, die bei genauer Abstimmung die diskrete Beugung gerade kompensieren kann. Dadurch sollte ein forminvariant propagierendes Gebilde entstehen, ein diskretes Soliton (**Abb. 1**). Mit dieser wegweisenden Arbeit waren Wellenleiterarrays erstmals schlüssig in das Konzept der diskreten Systeme eingebettet. Dies

ermöglichte Untersuchungen über die allgemeine Natur nichtlinearer diskreter Systeme innerhalb einer optischen Umgebung, die durch die einfache und intuitive Handhabbarkeit und Detektion optischer Felder in experimenteller Hinsicht große Vorteile bietet. Eine Vielzahl an theoretischen Folgearbeiten befasste sich mit Existenzbedingungen, Topologien, Anregung, Stabilität, Dynamik und gegenseitige Wechselwirkung diskreter optischer Solitonen.

Zehn Jahre später wies die Forschergruppe um Yaron Silberberg 1998 erstmals ein diskretes optisches Soliton in einer Aluminium-Gallium-Arsenid-Struktur nach (**Abb. 2**) [2]. Nach diesem bahnbrechenden Experiment gelang es, in Halbleiter-Wellenleiterarrays zahlreiche weitere Phänomene zu beobachten, die großteils eine direkte Folge der diskreten Struktur sind und in kontinuierlichen optischen Systemen nicht existieren. Die Optik hatte sich damit zur bevorzugten Experimentierplattform für die Dynamik diskreter Systeme entwickelt. Gleichzeitig kam es zur Renaissance der diskreten Optik in linearen Systemen. So wurde gezeigt, dass in Wellenleiterarrays Vorzeichen und Stärke der intrinsischen Beugung richtungsabhängig sind und dass sich Beugung sogar vollständig unterdrücken lässt. Darüber hinaus gelang es, in einem Wellenleiterarray die unterschiedlichen Energiebänder und die Wechselwirkung der zu verschiedenen Bändern gehörenden Anregungen nachzuweisen [3], die wie in einem Festkörper aufgrund der periodischen Struktur existieren.

Die Entdeckung der zweiten Dimension

All diese experimentellen Untersuchungen beschränkten sich zunächst auf Wellenleiterarrays mit nur einer transversalen Dimension, da sich herkömmliche Plantechnologien nur dafür eignen. Mehrere theoretische Arbeiten sagten für die Feldausbreitung jedoch grundlegende Unterschiede voraus, wenn die Arrays statt einer transversalen Dimension zwei aufweisen. Vor allem die Propagation eines optischen Feldes bei Inhomogenitäten, Defekten oder Nichtlinearitäten sollte stark von der Dimension abhängen. So treten im

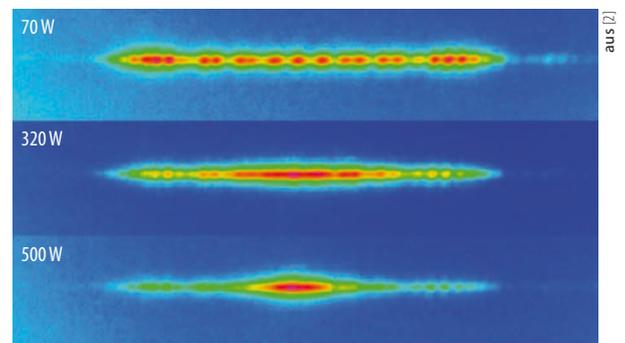


Abb. 2 Erhöht man die Spitzenleistung am Eingang einer AlGaAs-Struktur von 70 W (a) über 320 W (b) bis zu 500 W (c), so zeigt die Lichtverteilung am Probenausgang („oben“ in **Abb. 1**) den Übergang von der linearen diskreten Beugung (a) zur deutlich engeren, lokalisierten Verteilung des diskreten Solitons (c).

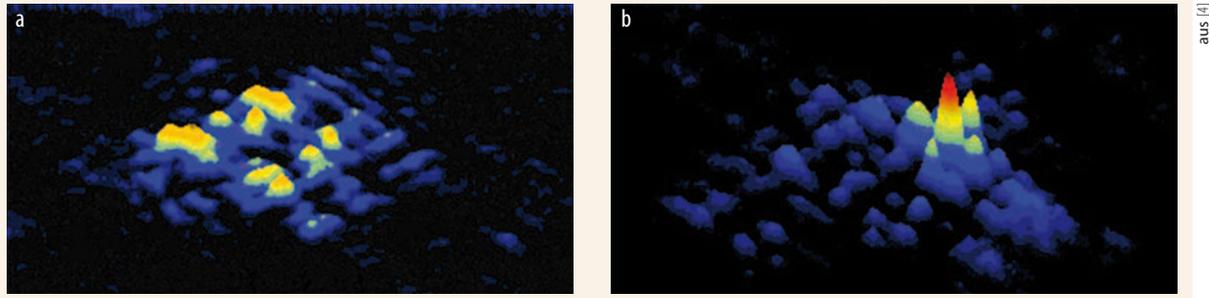


Abb. 3 Die zweidimensionale Intensitätsverteilung am Probenende (analog zu Abb. 2) eines optisch induzierten photonischen Gitters zeigt bei niedriger Eingangsleistung die lineare

Beugungsverteilung des propagierenden Lichts (a). Bei hoher Eingangsleistung ist eine deutliche Lokalisierung zu erkennen – die Bildung eines 2D-Solitons (b).

zweidimensionalen Array diskrete Solitonen erst oberhalb einer bestimmten Anregungsleistung auf – im Gegensatz zu eindimensionalen Systemen, bei denen dies stets der Fall sein kann. Darüber hinaus sind bestimmte nichtlineare Feldverteilungen, beispielsweise optische Vortices (Infokasten), nur in Strukturen mit zwei transversalen Dimensionen möglich oder generell nur in diskreten Systemen stabil.

Der experimentelle Durchbruch bei den zweidimensionalen diskreten optischen Systemen gelang jedoch erst 2003, als die Forschergruppe um Mordechai Segev erstmals zeigen konnte, dass sich in einem Wellenleiterarray zweidimensionale diskrete Solitonen ausbilden (Abb. 3) [4]. Ihr Array war dabei besonders revolutionär: Sie verwendeten einen nichtlinearen photorefraktiven Kristall, also einen Kristall, dessen Brechungsindex sich durch Licht ändert, und erzeugten darin durch Überlagerung mehrerer kohärenter Laserstrahlen eine periodische Interferenzstruktur. Damit geht eine entsprechende Modulation des Brechungsindex im Kristall einher, sodass ein Wellenleiterarray entsteht.

Das Konzept der optisch induzierten diskreten Strukturen hatte überwältigende Auswirkungen und erzeugte eine wahre Flut an theoretischen und experimentellen Studien zu zweidimensionalen diskreten Systemen. Bis heute wurde diese Originalpublikation in weit über 600 Veröffentlichungen zitiert. Darunter findet sich neben vielen Arbeiten zu unterschiedlichen nichtlinearen Solitonen beispielsweise auch die Beschreibung einer optischen Brillouin-Zonen-Spektroskopie, mit der es erstmals möglich ist, die Brillouin-Zone eines Arrays oder Gitters direkt zu visualisieren. Darüber hinaus gibt es viele Analogien zu Effekten aus der Festkörperphysik. Dazu zählen Zener-Tunneln oder Bloch-Oszillationen, die in einem optisch induzierten photonischen Gitter nachgewiesen wurden. Dies unterstreicht einmal mehr, dass sich mit diskreten optischen Systemen hervorragend Fragen aus anderen Disziplinen untersuchen lassen.

Auch aktuelle Forschungsprojekte zu diskreten nichtlinearen Strukturen setzen aufgrund der großen Flexibilität häufig optische Wellenleitersysteme auf Basis von photorefraktiven Medien ein. In diesen Materialien stellt der photorefraktive Effekt die Nichtlinearität bereit, die sowohl die optische Induktion diskreter Brechungsindexverteilungen ermöglicht als auch für die gewünschten nichtlinearen Eigenschaften der optisch induzierten diskreten Systeme sorgt. Nach vergleichsweise einfachen Strukturen zu Beginn sind heute auch komplexe zwei- oder sogar dreidimensionale Brechungsindexmodulationen möglich [5]. Darüber hinaus ist auch die Propagation von komplexen Lichtfeldern – beispielsweise diskreten Vortices – in strukturierten nichtlinearen Medien sehr wichtig (Abb. 4) [6]. Ähnlich einem klassischen optischen Vortex ist auch ein diskreter Vortex über seine Phasenverteilung definiert (Infokasten). Doch während die Stabilität eines optischen Vortex in einem nichtlinearen homogenen Medium bei zunehmender Ladung abnimmt, kann in einem diskreten System ein Vortex mit doppelter Ladung stabil propagieren, während er mit einfacher Ladung zerfällt. Dies macht abermals den bedeutenden Unterschied zwischen diskreten und kontinuierlichen physikalischen Systemen deutlich.

OPTISCHER VORTEX

In einem Lichtfeld entsteht ein optischer Wirbel, wenn die Phase des Feldes um einen Punkt herum ein ganzzahliges Vielfaches m von 2π durchläuft. Der Faktor m heißt topologische Ladung des Vortex, sein Vorzeichen gibt die Rotationsrichtung des optischen Wirbels an. Die Abbildung zeigt in (a) den Verlauf der Phase eines optischen Vortex mit $m=+1$. An der Stelle des Wirbels selbst ist die Phase des Lichtfelds nicht definiert,

dort verschwindet auch die Intensität. Dadurch ergibt sich eine ringförmige Intensitätsverteilung (b). Die Phasenstruktur eines Vortex lässt sich durch die Überlagerung mit einer schräg einfallenden, kohärenten ebenen Welle analysieren. Das resultierende Interferenzmuster zeigt pro Einheit der topologischen Ladung eine zusätzliche Linie, die zu einer Gabelung des Musters im Mittelpunkt des Wirbels führt (c für $m=+1$).

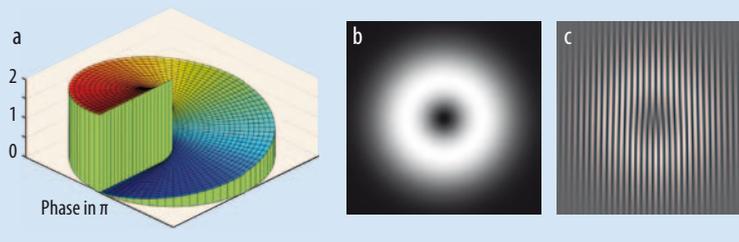
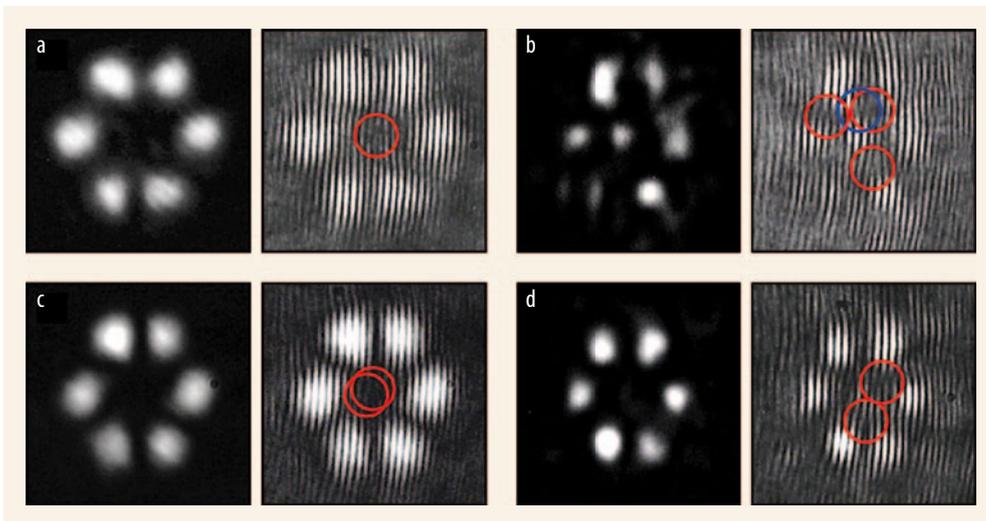


Abb. 4 Ein diskreter Vortex mit der topologischen Ladung $m = 1$ (a) zerfällt bei der Propagation in einem Medium mit fokussierender Nichtlinearität (b), während ein diskreter Vortex mit der topologischen Ladung $m = 2$ (c) ein diskretes Vortex-Soliton bildet (d). Links ist jeweils die Intensitätsverteilung des Strahls gezeigt, rechts das Interferenzmuster mit einer verkippten ebenen Welle, das zur Phasenanalyse dient. Die Kreise markieren die verschiedenen Phasensingularitäten.



Optische Nichtlinearitäten in Raum und Zeit

Neben der optischen Induktion wurde in den letzten Jahren noch eine zweite Technologie zur Herstellung diskreter Strukturen entwickelt, die nahezu beliebige zweidimensionale Wellenleiterarrays ermöglicht. Dabei werden ultrakurze Laserpulse in ein transparentes Medium (z. B. herkömmliches Kieselglas) fokussiert, sodass im Fokusbereich höchste Energiedichten entstehen, die das Medium auf molekularer Ebene in nichtlinearer Weise verändern. Bei einigen Materialien führt dies zu einem lokal höheren Brechungsindex in diesem winzigen Bereich. Verschiebt man nun das Medium in eine transversale Richtung, so entsteht eine lineare Brechzahlhöhung, ein Wellenleiter. Im Vergleich zu anderen Techniken hat dieser Ansatz den Vorteil, dass die Wellenleiter nahezu jedem beliebigen Pfad folgen können. Da zudem alle Wellenleiter individuell geschrieben werden, sind prinzipiell fast alle Geometrien realisierbar. Dies ist vor allem für Anordnungen ohne intrinsische Periodizität oder mit gekrümmten Wellenleitern von großem Vorteil. Insbesondere ein- und zweidimensionale diskrete optische Solitonen, deren Propagation Defekte oder

Grenzflächen entscheidend beeinflussen, werden so experimentell zugänglich. Diese Technologie erlaubt es, neue Formen nichtlinearer mehrdimensionaler diskreter Phänomene zu untersuchen, bei denen nicht nur die Evolution im Raum, sondern auch in der Zeit stattfindet (Abb. 5). Aufgrund dieser komplexen Dynamik bilden sich neuartige Phänomene heraus, die erst durch das Zusammenspiel von Raum und Zeit entstehen können [7, 8].

Zurzeit arbeiten viele Wissenschaftler an einer verallgemeinerten Form der diskreten optischen Solitonen, den so genannten Light Bullets, und erst vor kurzem ist es gelungen, diese hochkomplexen nichtlinearen Gebilde experimentell zu erzeugen und nachzuweisen [9]. Im Gegensatz zu den bisher diskutierten räumlichen Solitonen lokalisieren Light Bullets nicht nur in den transversalen Raumdimensionen, sondern auch entlang der Zeitkoordinate, sodass die zugrundeliegende Dynamik vierdimensional ist. Neben quadratischen und kubischen könnten auch höhere oder kombinierte Nichtlinearitäten nützlich sein, um diese Gebilde zu realisieren. Über die faszinierende Grundlagenphysik hinaus, die man mit solchen raumzeitlichen Solitonen betreiben kann, ist auch eine

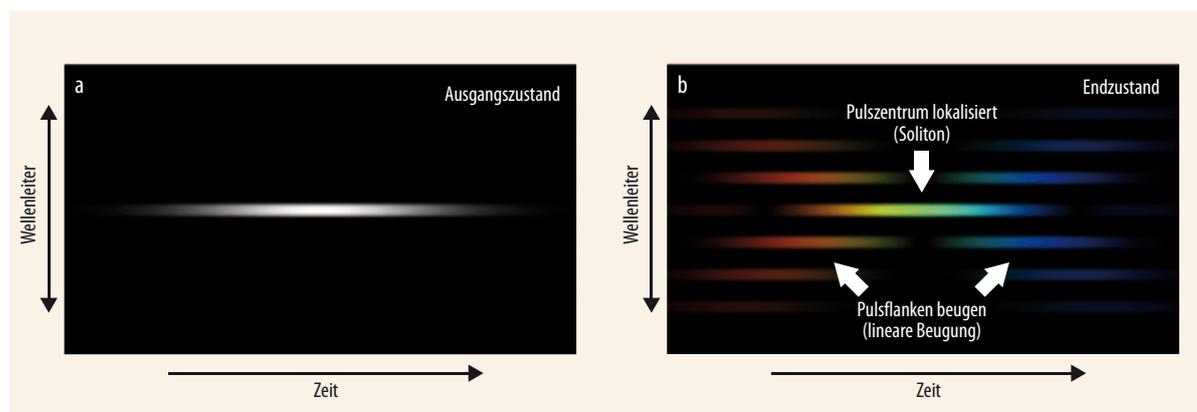


Abb. 5 Durch das komplexe Zusammenspiel von Raum (Beugung) und Zeit (Dispersion) kann in Wellenleiterarrays aus ultrakurzen Laserpulsen eine sog. X-Welle entstehen. Zu Beginn der Propagation, wenn das Licht in Form eines gaußförmigen Pulses in einen einzelnen Wellenleiter eingekoppelt wird, ist die Intensität in der Mitte des Pulses wesentlich höher

als in den Pulsflanken (a). Daher bildet sich dort ein diskretes Soliton aus, während die Pulsflanken normaler diskreter Beugung unterliegen. Auf diese Weise entsteht eine raumzeitliche X-förmige Lichtstruktur, die einzigartige Beugungs- und Dispersionseigenschaften besitzt (b).

Reihe von interessanten Anwendungen, insbesondere in der Datenkommunikation, denkbar. All diese Entwicklungen machen deutlich, dass das fruchtbare Forschungsfeld der nichtlinearen Lichtpropagation und diskreten Solitonen in Wellenleiterarrays auch in Zukunft viele spannende Entdeckungen erwarten lässt.

Literatur

- [1] P. G. Kevrekidis, *The Discrete Nonlinear Schrödinger Equation: Mathematical Analysis, Numerical Computations and Physical Perspectives*, Springer Berlin Heidelberg (2009)
- [2] H. S. Eisenberg, Y. Silberberg, R. Morandotti, A. R. Boyd und J. S. Aitchison, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 3383 (1998)
- [3] S. Longhi, *Laser Phot. Rev.* **3**, 243 (2009)
- [4] J. W. Fleischer, M. Segev, N. K. Efremidis und D. N. Christodoulides, *Nature* **422**, 147 (2003)
- [5] P. Rose, M. Boguslawski und C. Denz, *New J. Phys.* **14**, 033018 (2012)
- [6] B. Terhalle, T. Richter, K. J. H. Law, D. Görries, P. Rose, T. J. Alexander, P. G. Kevrekidis, A. S. Desyatnikov, W. Krolikowski, F. Kaiser, C. Denz und Y. S. Kivshar, *Phys. Rev. A* **79**, 043821 (2009)
- [7] Y. Lahini, E. Frumker, Y. Silberberg, S. Droulias, K. Hizanidis, R. Morandotti und D. N. Christodoulides, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 023901 (2007)
- [8] M. Heinrich, A. Szameit, F. Dreisow, R. Keil, S. Minardi, T. Pertsch, S. Nolte, A. Tünnermann und F. Lederer, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 113903 (2009)
- [9] S. Minardi, F. Eilenberger, Y. V. Kartashov, A. Szameit, U. Röpke, J. Kobelke, K. Schuster, H. Bartelt, S. Nolte, L. Torner, F. Lederer, A. Tünnermann und T. Pertsch, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 263901 (2010)

DIE AUTOREN

Alexander Szameit (FV Quantenoptik/Photonik, Oberflächenphysik) hat in Halle/Wittenberg und Jena Physik und Astronomie studiert. Nach Diplom und Promotion (2007) in Jena und einem zweijährigen PostDoc-Aufenthalt am Technion in Haifa (Israel) kehrte er als Nachwuchsgruppenleiter an die Friedrich-Schiller-Universität Jena zurück. Im Oktober 2011 wurde er dort zum Juniorprofessor für Diamant-/Kohlenstoffbasierte optische Systeme berufen. Eines seiner Hauptforschungsgebiete ist die Dynamik nichtlinearer optischer Wellen in periodischen Strukturen und komplexen Flüssigkeiten.



Patrick Rose hat sein Physikstudium an der Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster im Jahr 2008 mit dem Diplom beendet. Seitdem promoviert er am dortigen Institut für Angewandte Physik in der Arbeitsgruppe von Cornelia Denz. Im Rahmen seiner Arbeit untersucht er besonders die Erzeugung optisch induzierter photonischer Strukturen und die nichtlineare Lichtpropagation in diesen komplexen diskreten Systemen.

