

Nichtlineare Optik – ein Dauerbrenner



Cornelia Denz ist Direktorin des Instituts für Angewandte Physik und Prektrorin für Internationales und Wissenschaftlichen Nachwuchs der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Die 1960er Jahre waren nicht nur kulturell eine wilde Zeit, sondern auch für die Optik aufregend. Mit der Entdeckung des Lasers 1960 entstand aus der „altbackenen“ klassischen Optik fast schlagartig das neue Gebiet der nichtlinearen Optik.

Unsere Vorstellung von der linearen Licht-Materie-Wechselwirkung geht von am Atomrumpf gebundenen Elektronen aus. Wie Hertzsche Dipole schwingen sie in der Frequenz des einfallenden Lichts mit und leiten es in dieser weiter. Mit dem Laser war plötzlich eine intensive, kohärente Lichtquelle verfügbar. Schon der erste Rubinlaser konnte mit seinen starken Pulsen ein am Atomkern gebundenes Elektron kräftig „durchschütteln.“ Dessen Schwingung enthält nun höhere Harmonische und damit nichtlineare Anteile, die es dem Licht, das aus dem Material austritt, als neue Frequenzen mitgibt. Im Umkehrschluss können mehrere in ein Material eingestrahlte Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz eine ungeahnte Vielfalt neuer Lichtfrequenzen erzeugen.

Bereits im Sommer 1961 beobachtete Peter Franken, dass die rote Wellenlänge eines Rubinlasers in einem Quarzkristall eine Strahlung doppelter Frequenz im blauen Wellenlängenbereich erzeugt. Ende 1961 war demonstriert, dass sich so zwei eingestrahlte Frequenzen addieren lassen. Heute ist die Summenfrequenzerzeugung eines der wichtigsten Verfahren zu Erzeugung neuer Laserfrequenzen. 1962 entwickelte Nobelpreisträger Nicolas Bloembergen das semiklassische Modell der nichtlinearen Optik, das die meisten ihrer Phänomene hervorragend erklären kann. Gegen Mitte der 1960er Jahre waren die heute vielfältig genutzten Effekte gefunden. So schien dieses junge Gebiet bereits wieder am Ende.

Das war eine Fehleinschätzung, denn es zeigte sich, dass starke Laserintensitäten Änderungen des Brechungsindex verursachen können, die wie Linsen wirken. Dies führt zu einer Selbstfokussierung des Laserstrahls im Material. Bloembergens Modell kann solche Effekte durch einen intensitätsabhängigen Brechungsindex erklären. Heute wird der Effekt eingesetzt, damit ultrakurze Pulse in Glasfasern nicht zerfließen – oder um „langsam Licht“ in Übertragungssystemen zu piffen (Physik in unserer Zeit 2011, 42(4), 185).

Die 1970er und 1980er Jahre wurden zur Ära der Anwendung dieses „Handwerkszeugs.“ Die dynamische

Holographie entstand, doch die faszinierendste Entdeckung war die Phasenkonjugation: Die Mischung dreier Wellen erzeugt eine neue, vierte Welle, die entgegen der Richtung einer der wechselwirkenden Wellen propagiert und Phasenabberationen korrigiert. Dieses Phänomen entspricht in der Grundlagenphysik einer Zeitumkehr und erlaubte zahlreiche Anwendungen in der Bildverarbeitung und der Objektverfolgung.

Heute ist die Frequenzverdopplung von Lasern oder die Nutzung von Brechungsindexänderungen zur Erzeugung künstlicher Materialien so selbstverständlich geworden, dass die nichtlineare Optik erneut kaum mehr als eigenständiges Gebiet wahrgenommen wird. Auch dies ist wieder eine Fehleinschätzung, was kaum mehr verwundert.

Nach wie vor ist die nichtlineare Optik Motor für neue Forschungsbereiche – eben ein Dauerbrenner. Ultrakurze Laserpulse erzeugen Laserleistungen, die Harmonische bis weit über Hundert ermöglichen. Die Möglichkeit, Materialien periodisch zu polen, schafft ungeahnte Effizienzsteigerungen in der Frequenzkonversion oder etwa neue nichtlineare Techniken der Mikroskopie. Photonische Kristalle oder Metamaterialien werden heute meist mit nichtlinearer Optik hergestellt und beeinflussen auf faszinierende Weise nichtlinear die Lichtpropagation. So entstehen erneut Effekte, die neue Anwendungen der optischen Datenübertragung hervorbringen.

Ein gerade entstehender neuer Bereich der nichtlinearen Optik nutzt nicht mehr einfache Strahlen, sondern strukturierte Lichtfelder. Diese Strukturierung wird meist über Flüssigkristallzellen realisiert. Auch Flüssigkristalle sind ein Beispiel für die Anwendung eines nichtlinearen optischen Effekts dritter Ordnung, der Orientierungs-Nichtlinearität. Das ermöglicht die Erzeugung ganz besonderer Lichtfelder, die Christian Spielmanns Jenaer Gruppe am Beispiel optischer Wirbel auf S. 134 vorstellt.

Die nichtlineare Optik, heute photonische Technologien genannt, bleibt also eine treibende Innovationskraft. Auch im 21. Jahrhundert wird sie für manche Überraschung sorgen.

Cornelia Denz