

Kapitel 1

Einleitung

Physics would be dull and life most unfulfilling if all physical phenomena around us were linear. Fortunately, we are living in a nonlinear world. While linearization beautifies physics, nonlinearity provides excitement (...)

Y. R. Shen in „The Principles of Nonlinear Optics“

15 Jahre lang – von 1985 bis 2000 – existierte an der Universität Osnabrück der Sonderforschungsbereich SFB 225 „Oxidische Kristalle für elektro- und magnetooptische Anwendungen“. Der SFB war der umfassenden Untersuchung oxidischer Kristalle gewidmet, denen man ein großes Anwendungspotential bescheinigte. Zu diesem Zweck waren Kristallzucht, Kristallcharakterisierung und die Erforschung möglicher Anwendungen gleichermaßen in Osnabrück zusammengefasst. Nicht zuletzt die umfangreiche und intensive Zusammenarbeit der verschiedenen Arbeitsgruppen hat dazu geführt, dass Osnabrück auf dem Gebiet der oxidischen Kristalle zu einem international anerkannten Kompetenzzentrum geworden ist. Die erfolgreiche Arbeit fand ihre Bestätigung auch in der Einrichtung des Graduiertenkollegs „Nichtlinearitäten optischer Materialien“ im Jahr 2001, in dem Arbeiten auf diesem Gebiet weitergeführt werden. Wichtige Themen im Anwendungsbereich waren und sind unter anderem die dauerhafte volumenholographische Speicherung großer Datenmengen [1] und die Herstellung aktiver optischer Bauelemente [2]. Beides ist rein optisch nur in nichtlinearen Medien realisierbar.

Was geeignete Medien angeht, vereint kaum eine andere Materialklasse die physikalischen Qualitäten der oxidischen Kristalle in solchem Maße. Dennoch sind die bis heute tatsächlich realisierten Anwendungen seltener, als anfangs euphorisch angenommen. Zu aufwändig ist der Herstellungsprozess der Kristalle, zu individuell sind die Eigenschaften jedes einzelnen gezogenen Kristallboules. Längst nicht alle für Anwendungen relevanten Vorgänge in oxidischen Kristallen konnten vollständig aufgeklärt werden. Genau diese Faktoren sind allerdings auch ein Grund für das andauernde Forschungsinteresse an den oxidischen Ferroelektrika. Einen erneuten Forschungs„boom“ gab es in den Jahren nach 1993. In diesem Jahr wurden in oxidischen Kristallen zwei neue Effekte entdeckt: räumliche Solitonen und Musterbildung. Beides war bereits früher in anderen nichtlinearen

optischen Medien realisiert worden. Die oxidischen Ferroelektrika machen die hochinteressanten Phänomene jedoch unter deutlich vereinfachten experimentellen Bedingungen zugänglich – etwa bei in der Regel um Größenordnungen geringeren benötigten Laserleistungen.

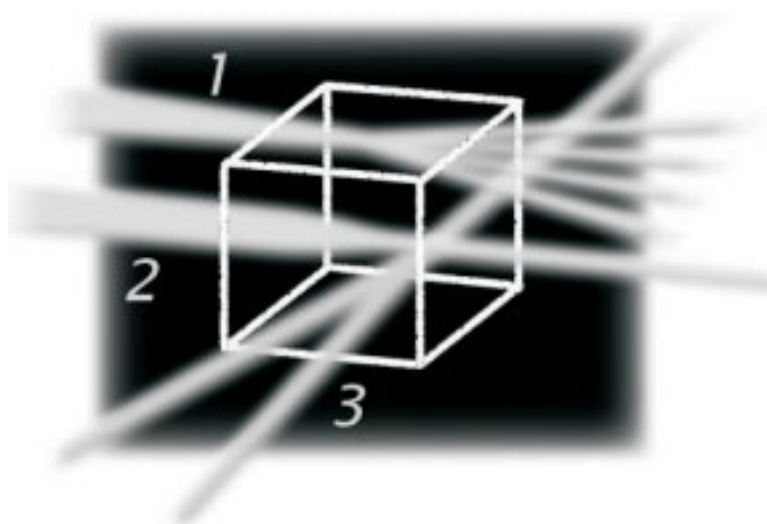
„Nichtlinear-optisch“ kann häufig mit „den Brechungsindex verändernd“ gleichgesetzt werden. Ein Brechungsindex, oft lediglich als statische Materialeigenschaft aufgefasst, entsteht aus der Wechselwirkung von Licht und Materie. Augenfälligstes Ergebnis der Wechselwirkung ist die Dispersion, die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Lichtwellenlänge. Im einfachen Oszillatormodell regt eine Lichtwelle die elektrischen Dipole eines Mediums zum Mitschwingen an. Diese emittieren ihrerseits eine neue Lichtwelle, die sich im Medium ausbreitet. Anregung und Lichtemission sind abhängig von der Frequenz des einfallenden Lichts; es existieren Resonanzfrequenzen. Nichtlinear wird die Schwingung der Oszillatoren im Medium analog zum bekannten mechanischen Modell einer schwingenden Feder dann, wenn die anregende Kraft groß oder die Feder weich ist.

Oxidische, ferroelektrische Kristalle zeigen große nichtlineare Effekte. Es sind „weiche Federn“. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, ihren Brechungsindex durch äußere Einwirkung zu verändern. Von den zahlreichen bisher synthetisierten einkristallinen oxidischen Verbindungen ist das Strontiumbariumniobat (SBN) für viele nichtlineare optische Experimente bevorzugt geeignet. Es besitzt besonders große nichtlineare, beispielsweise pyroelektrische, piezoelektrische und elektrooptische Koeffizienten. Deutliche Brechungsindexänderungen können in SBN zum Beispiel thermooptisch durch lokale Temperaturänderung oder photorefraktiv durch lichtinduzierte Ladungsumverteilung erzeugt werden. Dabei besitzt SBN keine die uniaxiale Symmetrie brechenden Domänenstrukturen („90°-Domänen“) und keinen zerstörerischen Phasenübergang. In der Kombination findet man diese Eigenschaften bis heute bei keinem weiteren gut untersuchten und in hoher Qualität herstellbaren ferroelektrischen Kristall.

Unter den Begriff der nichtlinearen Optik fasst man optische Phänomene, die einer nichtlinearen Ausbreitungsgleichung unterliegen. Das klassische nichtlineare optische Phänomen, das 1961 erstmals von Franken, Hill, Peters und Weinreich demonstriert wurde, ist die optische Frequenzverdopplung. Neben diesem wohl bekanntesten Beispiel gibt es diverse weitere – gut bekannt sind in der nichtlinearen Physik die Strahlselfokussierung, Modulationsinstabilitäten, Solitonen oder die Musterbildung. Alle genannten Phänomene sind nicht auf das Gebiet der nichtlinearen Optik, auf Licht oder allgemein elektromagnetische Wellen beschränkt. Sie können bei jeder anderen Wellenform vorkommen, die durch eine geeignete nichtlineare Ausbreitungsgleichung beschrieben wird. Die Eigenschaften sind universell, die Nichtlinearität ist jeweils eine andere. Tatsächlich lässt sich eine unabsehbare Vielfalt von Effekten im Prinzip als sich ausbreitende Erregung – als Welle – auffassen. Zu traditionellen Wasserwellen und Schall gesellen sich Plasmaschwingungen, Vermehrungszyklen von Lebewesen, die Wanderung von Sanddünen oder Dichteschwankungen in Spiralgalaxien. Bei all diesen Wellenformen werden verschiedene der genannten nichtlinearen Phänomene tatsächlich beobachtet.

Nichtlineare optische Phänomene mit deutlich unterschiedlichem Erscheinungsbild können dennoch eng miteinander zusammenhängen. Zur Strahlselfokussierung kommt

es, wenn eine fokussierend wirkende Nichtlinearität stärkere Effekte hervorruft als die auf einen Lichtstrahl verbreiternd wirkende Dispersion. Wird die Dispersion über eine längere Ausbreitungsstrecke exakt von der fokussierenden Nichtlinearität kompensiert, spricht man von einem räumlichen Soliton. Neben ihrem konstanten Strahlprofil haben Solitonen weitere besondere Eigenschaften. Sie sind Attraktorlösungen der zu Grunde liegenden Wellengleichung, und sie sind stabil gegenüber Störungen [3]. Jede ausgedehnte Lichtwelle, die sich in einem nichtlinearen Medium ausbreitet, wird auf Grund von Modulationen, d. h. von in der Praxis stets vorhandenen Störungen ihres Intensitätsprofils nach einer gewissen Ausbreitungsstrecke instabil und zerfällt in einzelne Filamente. Dieser Vorgang kommt erst zum Stillstand, wenn mit Filamenten in der Größenordnung des Solitons eine stabile Lösung der Wellengleichung erreicht ist. Die Filamente der Modulationsinstabilität sind regellos angeordnet. Aus zwei gegenläufigen, in Filamente zerfallenden Strahlen entstehen jedoch bei geeigneter Kopplung auch geordnete Muster, insbesondere Hexagons.



Schematische Darstellung von in dieser Arbeit realisierten nichtlinearen Ausbreitungsformen von Licht. 1: Thermooptische Strahlselfokussierung mit anschließender Strahlfilamentierung und Verteilung auf mehrere Teilstrahlen. 2: Photorefraktives „getapertes“ Soliton. 3: Photorefraktiver solitärer Y-Verzweiger.

Diese Arbeit behandelt die oben angesprochenen nichtlinear-optischen Phänomene. Einige Beispiele sind in der obigen Abbildung dargestellt. Grundlage sind zwei verschiedene Nichtlinearitäten, die thermooptische und die photorefraktive. Darüber hinaus wird eine neue Methode des elektrischen Fixierens von Domänenstrukturen realisiert, die ebenfalls zu Brechungsindexänderungen führt. Als nichtlineares Medium werden Strontiumbariumniobat-Kristalle verwendet. In verschiedenen Experimenten kommen zudem planare Strontiumbariumniobat-Wellenleiter zum Einsatz. In solchen $(1 + 1)$ -dimensionalen Systemen, die neben einer Ausbreitungsrichtung lediglich eine transversale Richtung zulassen, kann man Strahlselfokussierung bewirkende thermooptische Linsen und photorefraktive Solitonen in bisher nicht erreichter Qualität und Übereinstimmung mit den theoretischen Vorhersagen erzeugen. Die besonderen Eigenschaften der photorefraktiven Solitonen kommen auch dadurch zum Ausdruck, dass sie erstmals bis hin zu den infraroten Telekommunikationswellenlängen erzeugt werden können - ein Wellenlängenbereich, der für photorefraktive Phänomene in oxidischen Kristallen selten in Betracht gezogen wird. Die in Strontiumbariumniobat nach einem ganz neuen Ver-

fahren erzeugten fixierten Domänenstrukturen sind aussichtsreiche Kandidaten für die holographische Speicherung; insbesondere erscheinen sie für die quasiphasenangepasste Frequenzverdopplung geeignet.