

NICHTLINEARE OPTIK

Der Beginn einer Erfolgsgeschichte

Vor 50 Jahren schlug die Geburtsstunde der nichtlinearen Optik.

Cornelia Denz

Aus wissenschaftlicher Neugier bestrahlten Experimentatoren ab 1961 Materie mit Laserlicht und beobachteten völlig neuartige Effekte. Damit revolutionierten sie nicht nur unser Bild der Wechselwirkung von Licht und Materie, sondern hoben auch die nichtlineare Optik aus der Taufe. Als Geburtsstunde gilt die Veröffentlichung der zugrunde liegenden Theorie im Herbst 1962. Die nichtlineare Optik ist heutzutage im Laboralltag und in Anwendungen allgegenwärtig.

Für die moderne Optik waren die Sechzigerjahre eine aufregende Zeit, die bis heute unsere wissenschaftlichen Arbeiten prägt und zahlreiche, aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenkende Innovationen hervorgebracht hat. Der Laser war gerade erst entdeckt. Dieses Gerät, welches das Konzept des zehn Jahre zuvor entwickelten Masers in das optische Spektrum übertrug, galt als Lösung ohne Problem. Nur wenig später – mit Kinostart 1964 – traktierte Bösewicht Goldfinger den Geheimagenten James Bond mit einem Laser und belehrte ihn, dass der industrielle Laser sehr viele Anwendungen habe und man damit auch Metall schneiden könne. Dieser schnelle Wandel der Einschätzung des Lasers hat viel damit zu tun, dass innerhalb kürzester Zeit ein neues Gebiet der Optik entstanden war, das bis heute maßgeblich Laserlichtquellen und -anwendungen bestimmt: die nichtlineare Optik.

Nichtlineare Effekte entstehen in der Optik, wenn die Polarisation eines Materials nichtlinear vom elektrischen Feld abhängt. Aus der klassischen linearen Optik wissen wir, dass die Polarisation direkt proportional zum elektrischen Feld ist, wobei die dielektrische Suszeptibilität die verbindende Konstante darstellt. Sie ist proportional zum Quadrat des komplexen Brechungsindex, der die Absorption und Dispersion im Material bestimmt. Unsere atomare Vorstellung dieser linearen Licht-Materie-Wechselwirkung geht von Elektronen aus, die fest am Atomrumpf gebunden sind. Einfallendes Licht kann diese zu Schwingungen um ihre Ruhelage anregen. Diese Oszillationen erzeugen wie beim Hertzschen Dipol erneut Lichtstrahlung mit der Frequenz der Ladungsozillation, solange die einfallende Lichtintensität klein genug relativ zur Coulomb-Feldstärke der äußeren gebundenen Elektronen ist.

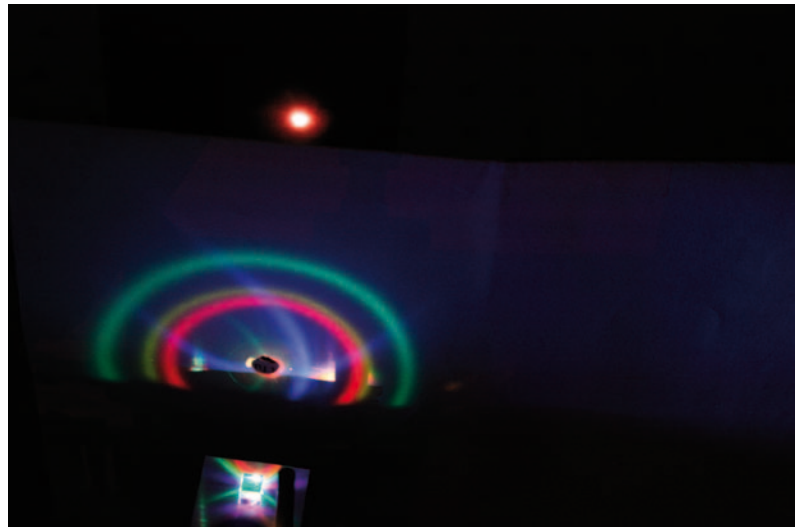


Abb. 1 Mehrere infrarote Laserpulse erzeugen in einem nichtlinearen Kristall neue Frequenzen, indem die Frequenzen verdoppelt und summiert werden.

Durch den Laser war nun eine intensive Lichtquelle verfügbar. Schon der erste Rubinlaser konnte mit Pulsen im Nanosekundenbereich eine Leistung von mehreren Kilowatt pro Quadratzentimeter erzielen. Fokussiert erreichte er den Megawatt-Bereich und erzeugte dadurch elektrische Felder von 10^5 Volt pro Zentimeter. Bedenkt man, dass in einem Atom mittlerer Größe, z. B. in einem Natriumatom, das Elektron am Atomrumpf mit einer Feldstärke von 10^9 Volt pro Zentimeter gebunden ist, wird ein solches Feld das Elektron zwar nicht aus der Atombindung lösen, aber zumindest kräftig „durchschütteln“. Als Folge davon schwingt das Elektron nicht mehr harmonisch um den Atomrumpf. Seine Schwingung enthält höhere Harmonische und damit nichtlineare Anteile, die sich auf das Licht übertragen. Daher enthält das aus dem Material austretende Licht ebenfalls Anteile mit neuen Frequenzen. Im Umkehrschluss können mehrere in ein Material einfallende Laserstrahlen mit unterschiedlichen Frequenzen Licht mit einer ungeahnten Vielfalt neuer Frequenzen erzeugen (Abb. 1).

Im Photonenbild betrachtet, bedeutet dies, dass zwei Photonen im Material gemeinsam zu neuen Absorptions- oder Streuprozessen führen. Solche Effekte wurden bereits in den ersten Jahren der Quantenmechanik diskutiert. Ursprünglich hatte Einstein die Voraussetzungen zur Photoionisation in seinem

Prof. Dr. Cornelia Denz, Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstr. 2–4, 48149 Münster

Photoeffekt erklärt: Eine Lichtenergie von $E = h\nu$ ist erforderlich, um ein Elektron vom Atom zu trennen. Paul Dirac und die spätere Nobelpreisträgerin Maria Göppert-Mayer postulierten zu Beginn der Dreißigerjahre, dass auch Licht mit einer Energie viel kleiner als $h\nu$ zur Ionisation führen kann, und zwar durch Zwei-Photonen-Prozesse [1]. Zwei Photonen schaffen also gemeinsam, was ein einzelnes Photon aufgrund seiner geringen Energie nie erreichen würde. Noch 1959, als Thomas Neubauer an der Akademie der Wissenschaften in Budapest (Ungarn) „die Vereinigung von zwei Photonen gleicher Frequenz in Materie“ berechnete, musste er sich rechtfertigen, ob diese Überlegung „eine physikalische Realität besäße“ [2].

Das änderte sich mit Erfindung des Lasers schlagartig. Die ersten Experimentatoren waren nicht so sehr von der Aussicht beflügelt, die theoretischen Berechnungen der Zwanziger- und Dreißigerjahre zu belegen. Eher aus wissenschaftlicher Neugier untersuchten sie den Einfluss von Laserstrahlung auf Materie und beobachteten eine Reihe eigenartiger Effekte. Dass sie damit die nichtlineare Optik aus der Taufe hoben, war ihnen sicher zu Beginn nicht bewusst. Allerdings beeindruckt die imposante Zahl hochkarätiger Artikel in kürzester Zeit, die alle heute bekannten grundlegenden Effekte der nichtlinearen Optik beschreiben.

Schlag auf Schlag

Den Beginn machte ein spektakuläres Experiment im Sommer 1961: Peter Franken und seine Kollegen von der Universität Michigan in Ann Arbor testeten mit den ersten optischen Rubin-„Masern“ bei einer Wellenlänge von 694,3 nm, ob die oben genannten Feldstärken ausreichen würden, im Material Veränderungen zu erzeugen. Sie wählten als dielektrisches Material Quarz und beobachteten ein spektakuläres Ergebnis (Abb. 2): Die Einstrahlung von Licht einer Frequenz bewirkt die Abstrahlung von Licht der doppelten Frequenz! Ein Prismenspektrometer diente dazu, die Frequenzen zu trennen. Auf einer Photoplatte war schließlich das Signal der frequenzverdoppelten, harmonischen Welle gerade noch zu erkennen.

A. Yariv und P. Yeh, Photonics, Oxford University Press (2006)

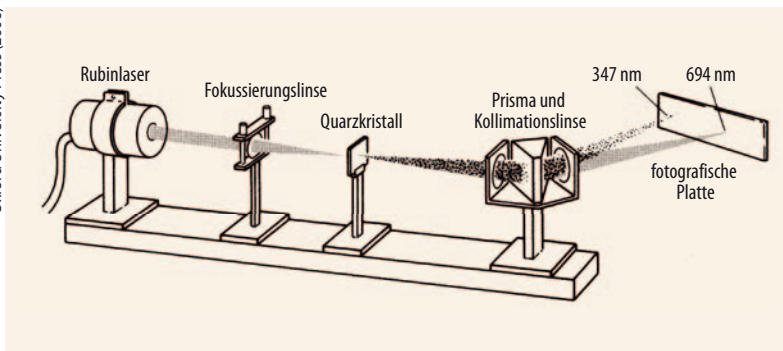


Abb. 2 Mit diesem Aufbau gelang der Nachweis der Frequenzverdopplung. Ein Rubinlaser bei einer Wellenlänge von 694 nm ist auf einen Quarzkristall fokussiert, wo er einen schwachen Strahl bei 347 nm erzeugt. Ein Prisma trennt die beiden Strahlen, sodass sie sich auf einer fotografischen Platte nachweisen lassen.

Die Herausgeber von Physical Review Letters teilten den Enthusiasmus der Autoren: Bereits drei Wochen nach der Einreichung erschien der eineinhalbseitige Artikel [3], der in den folgenden fünf Jahren über hundertmal zitiert wurde – ein beeindruckendes Resultat für die damalige Zeit. Der Artikel erlangte auch aus einem anderen Grund Berühmtheit: Der Setzer wollte ebenfalls zum Gelingen dieses spektakulären Artikels beitragen. Als er einen vermeintlichen Staubfleck in der einzigen Abbildung sah, griff er beherzt zum Korrekturstift und entfernte damit den experimentellen Beweis des harmonischen Signals (Abb. 3). So wurde dieser Meilenstein der nichtlinearen Optik im Original ohne das Resultat veröffentlicht.

Danach ging es Schlag auf Schlag: Weltweit arbeiteten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler fieberhaft an der Entdeckung und Untersuchung neuer nichtlinearer Effekte. Auch in Deutschland entstanden mit den ersten Lasern in den Laboren nichtlineare optische Experimente. Kaiser und Garrett in den Bell Laboratorien bewiesen eindrucksvoll, dass Zwei-Photonen-Anregung experimentell möglich ist. Dieser Prozess tritt nur auf, wenn die Wahrscheinlichkeit, dass zwei Photonen gleichzeitig am gleichen Ort sind, ausreichend hoch ist. Aufgrund der Unschärferelation müssen sich die beiden Photonen daher innerhalb einer Nanosekunde in einem Volumen von einem Femtoliter befinden. Im Experiment erzeugten zwei Photonen der Wellenlänge 694,3 nm in Europium-dotiertem Calciumfluorid einen Zustand, der eben nicht zur Emission der zweiten Harmonischen führt, sondern durch die Absorption der beiden Photonen zu einer Fluoreszenzantwort des Materials bei 425 nm [4].

Mit einer kleinen Erweiterung der ursprünglichen Idee der Frequenzverdopplung eröffnete Franken mit seinem Team zur Jahreswende 1961/1962 einen großen Bereich der nichtlinearen Optik. Durch Einstrahlung zweier Frequenzen realisierten sie Frequenzmischungen, d. h. Additionen von Frequenzen [5]. Im selben Monat zeigten zeitgleich J. A. Giordmaine in den Bell Labs [6] in New Jersey und P. D. Maker und sein Team in den Ford Werken in Michigan, die in das neue „Business“ ganz schnell eingestiegen waren, dass der Winkel der einfallenden Laserstrahlen relativ zur Kristallorientierung über die Stärke der Harmonischen entscheidet. Dieses als Phasenanpassung bekannte Phänomen erlaubte es, systematisch höhere Harmonische zu erzeugen [7]. Das Maker-Fringe-Experiment ist heute eine Standardmesstechnik, um nichtlineare Suszeptibilitäten zu bestimmen.

Mit diesen drei Artikeln aus einem legendären Heft der Physical Review Letters im Januar 1962 waren fast alle Meilensteine der nichtlinearen Optik veröffentlicht. Nun fehlte nur noch eine umfassende theoretische Beschreibung dieser Effekte. Im September 1962 erklärte Nicolas Bloembergen gemeinsam mit Kollegen von der Harvard University in einem Artikel in Physical Review alle beobachteten Phänomene in einer bis heute gültigen Theorie [8]. Diese Publikation gilt als Geburtsstunde der nichtlinearen Optik.

In dem Artikel entwickelte Bloembergen das semiklassische Modell der nichtlinearen Optik (Infokasten): Die Abhängigkeit der Polarisation eines Materials stellte er mit einem störungstheoretischen Ansatz als Taylor-Entwicklung des elektrischen Feldes dar, die Anteile mit quadratischen, kubischen und höheren Feldtermen beinhaltet. Die Proportionalitätskonstante, die dielektrische Suszeptibilität, wurde zu einem Tensor, dessen Ordnung mit steigender Entwicklung zunahm. Diese nichtlineare Polarisation sorgt dann dafür, dass gekoppelte Wellengleichungen für die Einstrahlung von einer, zwei oder mehreren Wellen entstehen. Bloembergen löste diese Gleichungen für den Fall zweier wechselwirkender Wellen und zeigte, dass in diesem semiklassischen Modell die als Manley-Rowe-Beziehung bekannte quantenmechanische Energieerhaltung gilt und dass es neben der Frequenzverdopplung auch Summen- und Differenzfrequenz-erzeugung sowie Gleichrichtung geben muss. Zudem leitete er alle Effekte dreier wechselwirkender Wellen her, zu denen neben der Frequenzverdreifung auch die Erzeugung nichtlinearer Absorption und Brechungsindexänderungen gehörten. Dieses Modell erlaubte es erstmals, nichtlineare Effekte zu klassifizieren: Effekte mit drei wechselwirkenden Wellen wurden fortan entsprechend der Entwicklung $\chi^{(2)}$ -Effekte genannt, die noch nicht entdeckten Effekte mit vier Wellen $\chi^{(3)}$ -Effekte.

Damit war die Theorie für eines der wichtigsten neuen Gebiete der Optik definiert. Nichtlineare Optik, wie wir sie heute in zahlreichen Lehrbüchern finden [9], basiert exakt auf diesem Modell und kann die meisten nichtlinearen optischen Effekte hervorragend erklären. Dass damit auch neuartige Methoden der Materialuntersuchung entstanden, war ein weiterer Schritt mit großen Folgen: Die nichtlineare optische Spektroskopie ist seitdem eines der wichtigsten Analyseinstrumente von dielektrischen Materialien.

Daher verwundert es nicht, dass in den Folgejahren die Entwicklung des Lasers und die Beschreibung der nichtlinearen Optik meist in einem Atemzug genannt wurden. Nicolas Bloembergen erhielt gemeinsam mit Arthur Schawlow 1981 den Physik-Nobelpreis „für

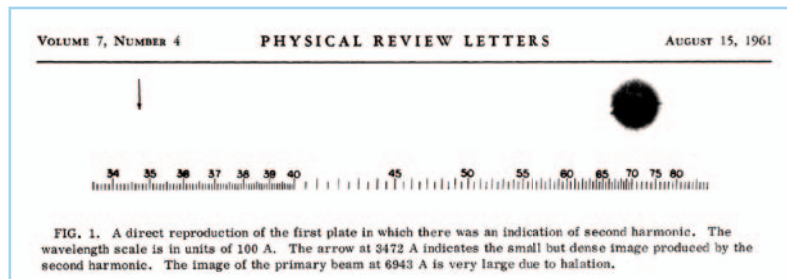


Abb. 3 Einmalig in der Geschichte der Physical Review Letters wurde ein Paper ohne das wesentliche Ergebnis publiziert. Der Pfeil sollte auf das winzige Messsignal zeigen – aber diesen „Fleck“ entfernte der übereifrige Setzer.

ihren Beitrag zur Entwicklung der Laserspektroskopie“. Diese Auszeichnung ehrte die enge Verbindung der Entwicklung des Festkörper-Masers mit der Entdeckung der nichtlinearen Optik und „heilte“ zudem die unbefriedigende Situation, dass der 1964 so schnell nach Entdeckung des Lasers vergebene Nobelpreis an C. Townes, N. G. Bassow und A. Prochorow, die unabhängig die theoretischen Grundlagen für das Maser- und Laserprinzip geschaffen hatten, diese beiden herausragenden Wissenschaftler nicht berücksichtigt hatte.

In der Euphorie dieser Tage verfasste Franken gemeinsam mit J. F. Ward im August 1962 einen ersten Review-Artikel [10]. Darin gab Franken eine Übersicht über alle Effekte nichtlinearer Optik und musste eingestehen, dass einige noch nicht entdeckt waren: Die optische Gleichrichtung, also die Erzeugung einer konstanten, nicht oszillierenden Polarisationskomponente, entdeckte er selbst einen Monat nach Veröffentlichung des Artikels [11]. Die Erzeugung dritter Harmonischer, die er fälschlicherweise einem Artikel von Maker zuschrieb, sowie alle Effekte der nichtlinearen Brechungsindexänderung einschließlich der Änderung des Materialverhaltens bei gleichzeitig wirkenden elektrischen und magnetischen Feldern sollten erst in den Siebzigerjahren realisiert werden. Wie schnell während des Schreibens und Redigierens des Artikels die Forschung fortschritt, ist den Fußnoten anzumerken: Auf fast jeder Seite finden sich „Notes added in proof“ über zwischenzeitlich entstandene neue Ergebnisse.

MODELL DER NICHTLINEAREN OPTIK

Die Polarisation $P(x,t)$ beschreibt die Antwort eines Mediums auf eine Anregung durch ein elektromagnetisches Feld $E(x,t)$. In der linearen Optik ist der Betrag der Polarisation proportional zum erzeugenden elektromagnetischen Feld, da die Laserfeldstärke sehr viel kleiner als die Coulomb-Feldstärke für die äußeren gebundenen Elektronen ist. Bei höherer Feldstärke wird die Antwort des Mediums nichtlinear und die Polarisation durch eine Taylor-Reihe beschrieben,

$$P(x,t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(x,t) + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2(x,t) + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(x,t) + \dots$$

mit den Suszeptibilitäten $\chi^{(n)}$ in den verschiedenen Ordnungen der Taylor-Reihe. Für sichtbares Licht ist diese Entwicklung bei Intensitäten von 10^8 bis 10^{12} W/cm² eine gute Näherung. Dieser Bereich ist als perturbative nichtlineare Optik bekannt, da es sich um einen störungstheoretischen Ansatz handelt. Basierend auf dieser Darstellung lassen sich z. B. sehr gut die Erzeugung der zweiten, dritten, vierten und höheren Harmonischen der eingestrahlten Lichtfrequenz, aber auch der nichtlineare Brechungsindex beschreiben. Für eine Umwandlung in Licht sagt die Lösung der zugehörigen

Wellengleichungen eine starke Abnahme der Konversionswahrscheinlichkeit zu höheren Ordnungen hin voraus. Für perturbative nichtlineare Prozesse ergibt sich immer ein Zusammenhang des erwarteten Signals mit der n -ten Potenz der Laserintensität, wobei n die Ordnung des nichtlinearen Prozesses ist. So skaliert für die Frequenzverdopplung, ein nichtlinearer Prozess zweiter Ordnung, das Oberwellensignal $I_{2\omega}$ mit I_ω^2 , wobei I_ω die Eingangslaserintensität ist. Diese Abhängigkeit ist experimentell sehr gut für nichtlineare Prozesse der zweiten bis etwa zur fünften Ordnung bestätigt worden.

Es dauerte einige weitere Jahre, bis – mit derselben Überraschung und Dynamik – Effekte höherer Ordnung, insbesondere resonante Streuprozesse wie die stimulierte Raman- oder Brillouin-Streuung, entdeckt wurden. Mitte der Sechzigerjahre waren die in vielen heutigen Anwendungen genutzten nichtlinearen optischen Effekte zweiter Ordnung bekannt und sehr gut theoretisch beschrieben (Tabelle). Bloembergen veröffentlichte 1965 sein Übersichtswerk „Nonlinear optics“, das seit 1992 wieder neu aufgelegt wird [12]. So schien es der wissenschaftlichen Öffentlichkeit zu der Zeit, als sei das neue Gebiet der nichtlinearen Optik weitestgehend abgeschlossen.

Dies war jedoch eine Fehleinschätzung. Denn mit der langsamen Etablierung nichtlinearer Frequenzkonversionen, also der Ausnutzung aller Effekte der zweiten Ordnung der nichtlinearen Taylor-Entwicklung, entstanden neue Rätsel. 1964 publizierte M. Harper einen Effekt, den er optische Zerstörung nannte, P. D. Maker entdeckte im selben Jahr Änderungen im Brechungsindex bei höherer Laserintensität. V. I. Talanov und V. I. Bespalov berichteten 1965 und 1966 von der Selbstfokussierung von Laserlicht im Material, die

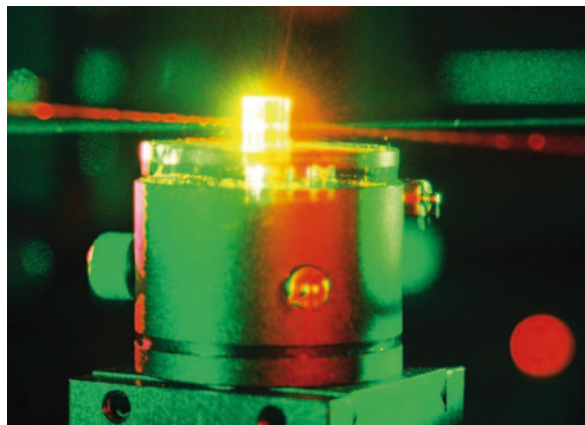


Abb. 4 Mithilfe des photorefraktiven Effekts erzeugt Laserlicht eine Brechungsindexänderung in einem nichtlinearen optischen Kristall. An dem entstandenen Hologramm werden Laserstrahlen gebeugt.

zu einer Filamentierung des Strahls führte. L. A. Ostrovskii entdeckte 1967, dass die Selbstfokussierung im räumlichen und zeitlichen Profil eines Laserstrahls im Medium stattfand. Diese Effekte wirken der Beugung und Dispersion eines Strahls entgegen.

Was hatten diese Effekte gemeinsam? Bei Einstrahlung von intensivem Laserlicht blieb die Frequenz gleich, stattdessen änderte sich der Brechungsindex. Dadurch konnte ein Gaußscher Laserstrahl den Brechungsindex in seiner Mitte – wo die Laserintensität sehr hoch ist – stärker beeinflussen. Das Resultat war eine gewölbte Brechungsindexänderung, die wie eine Linse wirkte und damit den Laserstrahl im Material immer weiter fokussierte. Es dauerte etliche Jahre, bis klar war, dass diese Phänomene auf die Taylor-Entwicklung dritter Ordnung zurückgehen, bei der der Brechungsindex von der Intensität abhängt.

Allgegenwärtig in Labor und Anwendung

Mit diesem Handwerkszeug folgte eine Ära der Anwendungen nichtlinearer Optik. Die dynamische Holographie entstand, die das Hologramm durch Brechungsindexänderung im nichtlinearen optischen Material mithilfe des photorefraktiven Effekts erzeugt (Abb. 4). Zudem ermöglicht sie die Verstärkung eines Strahls, wenn Hologramm und Brechungsindexänderung sich in der Phase unterscheiden.

Die faszinierendste Entdeckung dieser Zeit war sicher die Phasenkongjugation, bei der drei Wellen mischen und eine vierte Welle erzeugen, die entgegen der Richtung einer der wechselwirkenden Wellen propagiert. Diese Welle kompensiert alle Phasenaberrationen, welche die einfallende Welle auf dem Weg zum Material erfahren hat. Dieses Phänomen, das in der Grundlagenphysik einer Zeitumkehr entspricht [13], ließ sich 1977 experimentell nachweisen und versprach zahlreiche Anwendungen in der Bildverarbeitung und Objektverfolgung [14]. Mit den militärischen Verteidigungsstrategien der Reagan-Administration in den Achtzigerjahren erlangte die Phasenkongjugation

Entdeckungen der nichtlinearen Optik		
Jahr	Effekt	Autoren
1961	Frequenzverdopplung	P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, G. Weinreich
	Zweiphotonenanregung	W. Kaiser, C. G. B. Garrett,
1962	Summenfrequenzerzeugung	M. Bass, P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, G. Weinreich
	Winkelabhängigkeit der Frequenzmischung	J. A. Giordmaine
	Phasen Anpassung und Frequenzmischung	P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nisenhoff, C. M. Savage
	Theorie der nichtlinearen Optik	J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing, P. S. Pershan
	Optische Gleichrichtung	M. Bass, P. A. Franken, J. F. Ward, G. Weinreich
	Parametrische Verstärkung	R. H. Kingston
	Stimulierte Raman-Streuung	G. Eckhardt, R. W. Hellwarth, F. H. McClung, S. E. Schwarz, D. Weiner, E. Woodbury
1963	Theorie stimulierter Raman-Streuung	R. W. Hellwarth
1964	Stimulierte Brillouin-Streuung	R. Y. Chiao, C. H. Townes, B. P. Stoicheff
	Theorie stimulierter Streuprozesse	Y. R. Shen, N. Bloembergen
	Optische Zerstörung in Gläsern	D. W. Harper
	Intensitätsabhängiger Brechungsindex	P. D. Maker, R. W. Terhune, C. M. Savage
1964/1965	Selbstfokussierung von Licht	R. Y. Chiao, E. Garmire, C. H. Townes
1965	Parametrische Verstärkung	S. A. Akhmanov
	Durchstimmbare parametrischer Oszillator	J. A. Giordmaine, R. C. Miller
1966	Photorefraktiver Effekt	A. Ashkin, G. D. Boyd, J. M. Dziedzic, R. G. Smith, A. A. Ballman, A. A. Levinstein, K. Nassau
	Theorie parametrischer Oszillatoren	A. Yariv
	Instabilitäten bei Selbstfokussierung	V. I. Bespalov, V. I. Talanov
1972	Phasenkongjugation durch Brillouin-Streuung	B. Y. Zel'dovic
1977	Phasenkongjugation durch Wellenmischung	Y. Yariv, D. M. Pepper
	Phasenkongjugation als Zeitumkehr	R. W. Hellwarth
1983	Selbstphasenmodulation, zeitliche Solitonen	L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon, W. J. Tomlinson

weltweit Berühmtheit: Da Lichtstrahlen ohne Phasenaberrationen durch die Atmosphäre Informationen an Satelliten senden können, entstanden große militärische Projekte zur Umsetzung der Raketenverfolgung.

Auch in der optischen Datenübertragung erwies sich die nichtlineare Optik als nützlich: Mollenhauer stellte fest, dass die Selbsteffekte der nichtlinearen Brechungsindexänderung (z. B. der Kerr-Effekt) dazu führen können, dass ein ultrakurzer Puls in einer Faser nicht zerfließt. Ein solches Soliton ist ein teilchenähnlicher Zustand, der unverändert propagiert [15]. Dies legte den Grundstein für die dispersionsfreie optische Kommunikation.

Heute erscheint es uns selbstverständlich, dass das „Arbeitspferd“ im sichtbaren Spektralbereich, der Nd:YAG-Laser, seine Emissionsfrequenz von 532 nm durch Frequenzverdopplung der eigentlichen Laserlinie von 1064 nm erhält oder dass ultrakurze Laserpulse in zahlreichen Frequenzen durch Differenzfrequenzprozesse in optisch-parametrischen Oszillatoren entstehen. So ist die nichtlineare Optik inzwischen so selbstverständlich geworden, dass sie kaum noch als eigenständiges Gebiet der Optik wahrgenommen wird.

Viele hochaktuelle Forschungsgebiete sind jedoch fundamental mit der nichtlinearen Optik verbunden. Hohe harmonische Frequenzen lassen sich bis über die 100. Ordnung hinaus erzeugen. Der folgende Artikel von H. Zacharias und C. Spielmann widmet sich diesem hochaktuellen Thema. Geeignet strukturierte Materialien lassen sich beispielsweise periodisch polen, was ungeahnte Effizienzsteigerungen in der Frequenzkonversion ermöglicht. Faszinierend ist, dass strukturierte, diskrete Medien wiederum die Lichtpropagation nichtlinear beeinflussen, es entstehen nichtlineare optische Effekte, die aktuelle Anwendungen der optischen Datenübertragung ermöglichen. Dieses Themengebiet diskutieren A. Szameit und P. Rose.

Literatur

- [1] *M. Goepfert-Mayer*, *Ann. Physik* **9**, 273 (1931)
- [2] *Th. Neubauer*, *Act. Phys. Acad. Sci. Hung.* **10**, 221 (1959); *Zeitschrift für Physik* **155**, 380 (1959)
- [3] *P. A. Franken et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 118 (1966)
- [4] *W. Kaiser und C. G. B. Garrett*, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 229 (1961)
- [5] *M. Bass et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 18 (1962)
- [6] *J. A. Giordmaine*, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 19 (1962)
- [7] *P. D. Maker et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 21 (1962)
- [8] *J. A. Armstrong et al.*, *Phys. Rev.* **127**, 1918 (1962)
- [9] *R. Boyd*, *Nonlinear Optics*, Associated Press, 3. Auflage (2011); *G. New*, *Introduction to Nonlinear Optics*, Cambridge University Press (2011); *P. E. Powells*, *Fundamentals of Nonlinear Optics*, Taylor & Francis (2011)
- [10] *P. A. Franken und J. P. Ward*, *Rev. Mod. Phys.* **35**, 23 (1963)
- [11] *M. Bass et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 446 (1962)
- [12] *N. Bloembergen*, *Nonlinear Optics*, W. A. Benjamin, New York (1965)
- [13] *R. W. Hellwarth*, *J. Opt. Soc. Am.* **67**, 1 (1977)
- [14] *Y. Yariv und D. M. Pepper*, *Opt. Lett.* **1**, 16 (1977)
- [15] *L. F. Mollenauer et al.*, *Opt. Lett.* **8**, 289 (1983)

DIE AUTORIN

Cornelia Denz (FV Quantenoptik/Photonik sowie Dynamik und Statistische Physik) hat nach dem Physikstudium an der TU Darmstadt promoviert und während dieser Zeit auch am Institut d'Optique Théorique et Appliquée in Orsay, Frankreich, geforscht. In ihrer Habilitation (1999) beschäftigte sie sich mit raumzeitlicher Strukturbildung in der nichtlinearen Optik und deren Verbindung zu Anwendungen in der optischen Informationsverarbeitung. Seit 2001 ist sie Professorin an der Universität Münster und seit 2003 Lehrstuhlinhaberin im Institut für Angewandte Physik mit dem Schwerpunkt „Nichtlineare Photonik“.



Neugierig?



Sachbücher von WILEY-VCH



MICHAEL GROß
Der Kuss des Schnabeltiers
 und 60 weitere irrwitzige Geschichten
 aus Natur und Wissenschaft

ISBN: 978-3527-32490-3
 September 2009 278 S. mit 26 Abb.
 Gebunden € 24,90

Die verrücktesten Erfindungen der Natur, die heißesten wissenschaftlichen Entdeckungen und die hippesten Technologien stehen im Vordergrund von Michael Gross neuestem Sachbuch.



S060956CS

Wiley-VCH • Tel. +49 (0) 62 01-606-400
 Fax +49 (0) 62 01-606-184 • E-Mail: service@wiley-vch.de

www.wiley-vch.de/sachbuch