

Prof. Dr. Jürgen Nolting

How does it work?

Was ist eigentlich nichtlineare Optik?

Teil 9

In dem vorigen Artikel dieser Reihe wurde die Funktionsweise von Lasern erläutert. Wir haben gesehen, dass Laserstrahlung in der Technik viele Vorteile hat: Monochromasie, Kohärenz, geringe Divergenz, gute Fokussierbarkeit und hohe Leistungsdichte. Aber für einige Anwendungen gibt es nicht die geeigneten Lasermaterialien, um Laserlicht einer gewünschten Wellenlänge mit hinreichender Energie zu erzeugen. Oder die verfügbaren Laser für die gewünschte Wellenlänge sind zu teuer. Oder die Lebensdauer dieser Laser ist zu kurz ...

Hier kommt die nichtlineare Optik ins Spiel. Mit nichtlinearen optischen Kristallen kann man heutzutage die Wellenlänge eines Laserstrahls umwandeln, z. B. halbieren oder dritteln. Auch kann man mehrere Laserstrahlen miteinander mischen und dabei Strahlen der Summen- oder Differenzfrequenz erzeugen. Auf diese Weise ist es möglich, mit einem Nd:YAG-Laser grünes oder ultraviolettes Licht zu erzeugen. Oder Licht im sogenannten augensicheren Wellenlängengbereich bei $1.5 \mu\text{m}$. Auch abstimmbare Umwand-

lungsprozesse sind möglich, so dass z. B. aus dem Licht eines Nd:YAG-Lasers Licht auf einer beliebigen, verstellbaren Wellenlänge im sichtbaren Spektralbereich erzeugt werden kann.

■ 1 Nichtlinearität eines optischen Mediums

Alle optischen Erscheinungen, die man aus der alltäglichen Erfahrung kennt, sind linear. Wenn Licht auf Materie trifft, sind die Effekte normalerweise proportional zu den einwirkenden Feldstärken des elektrischen oder magnetischen Feldes der Lichtwelle. Diese linearen Effekte ändern das einfallende Licht in vielfältiger Weise: Es kommt zur Reflexion, Brechung, Absorption und Streuung. Was durch einen linearen Effekt aber niemals verändert werden kann, ist die Lichtwellenlänge. Es war 1961, kurz nach der ersten Realisierung des Lasers, als Franken und seine Mitarbeiter an der Universität Michigan einen merkwürdigen Effekt beobachteten: Sie fokussierten den roten Strahl eines Rubinlasers in einen Quarzkristall und stellten fest, dass das transmittierte Licht nicht nur aus Strahlung

der Laserwellenlänge 694 nm bestand, sondern dass auch noch UV-Licht der halben Wellenlänge 347 nm auftrat. Das war die erste Beobachtung eines nichtlinearen Effektes, der Frequenzverdopplung (doppelte Frequenz ist gleichbedeutend mit halber Wellenlänge).

Die Energie- und Leistungsdichte von Laserstrahlung kann offenbar so hoch werden, daß nichtlineare Effekte bei der Wechselwirkung der Laserstrahlung mit Materie auftreten können. Für ein anschauliches Verständnis des Zustandekommens dieser Effekte reicht in vielen Fällen das wellenoptische Modell.

Beim Durchgang des Lichtes durch ein dielektrisches Medium wie z. B. Glas erfolgt eine Wechselwirkung des oszillieren-



Abb. 1: Ein nichtlinearer KTP-Kristall wandelt das von rechts einfallende grüne Licht in rotes um [1].

den elektrischen Feldes der Lichtwelle mit den elektrischen Dipolmomenten der Atome. Man kann es sich vereinfachend so vorstellen, als ob die Atome im Takt der Lichtwelle zu schwingen beginnen. Bei konventionellen Feldstärken des elektrischen Feldes reagieren die atomaren Dipole linear, ihre Auslenkung ist proportional zur Feldstärke. Man kann es sich so vorstellen, dass die atomaren Dipole durch das elektrische Feld der Lichtwelle zu Schwingungen angeregt werden, die dazu führen, dass die Atome zu Quellen von Elementarwellen werden. Bei den sehr hohen Feldstärken, wie sie bei Laserstrahlung auftreten, reagieren die Dipole allerdings zunehmend nichtlinear. Dies wird in Abbildung 2 verdeutlicht: Die einfallende Sinuswelle führt zu einer Schwingung, die nicht mehr genau sinusförmig ist, sondern regelmäßige „Verzerrungen“ aufweist. Die Schwingungen der Dipole sind nun nicht mehr genau proportional zum elektrischen Feld der Lichtwelle, für größere Auslenkungen treten vielmehr Abweichungen auf.

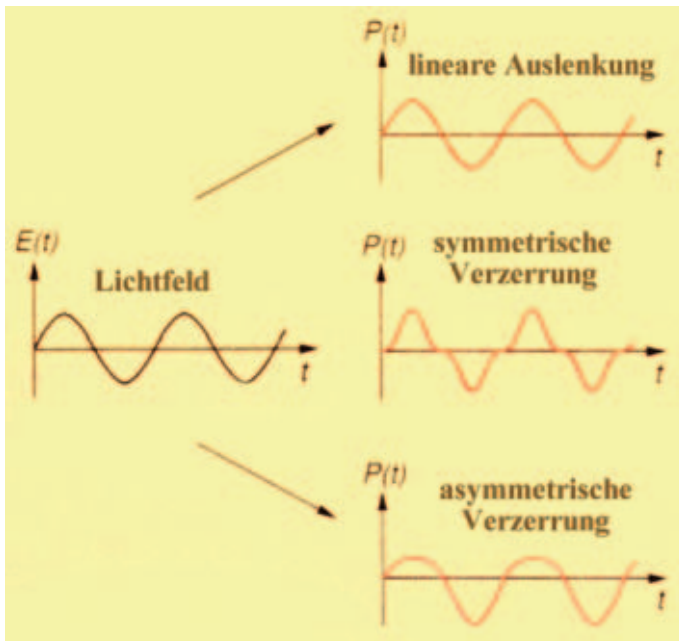


Abb. 2: In nichtlinearen Medien ist die Auslenkung der atomaren Dipole nicht mehr proportional zur anregenden Lichtwelle [3]

■ 2 Frequenzvervielfachung und Frequenzmischung

Nach Fourier kann diese nichtlineare Schwingung zerlegt werden in die Grundwelle, deren Frequenz der anregenden Frequenz der Lichtwelle entspricht, und in höhere Harmonische, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz entspricht. Es kommt somit zur Aussendung von Elementarwellen der doppelten, dreifachen, vierfachen... Frequenz. Welche Oberwellen besonders stark auftreten, hängt von der Form der Verzerrung der Schwingung der atomaren Dipole ab (siehe Abbildung 2). Bei symmetrischer Verzerrung können z.B. nur die ungeraden Harmonischen (dreifache, fünffache... Frequenz) auftreten.

Auf diese Weise kann also die Frequenz des Laserlichtes vervielfacht werden. Dieser Effekt hat eine wohlbekannte Analogie aus der Alltagswelt: Ein übersteuerter Lautsprecher klirrt: Die Übersteuerung zwingt die Lautsprechermembran zu einer

großen Auslenkung, die nicht länger proportional zur angelegten elektrischen Spannung ist. Das hörbare Klirren ist nichts anderes als der akustische Effekt, den die erzeugten Oberwellen hervorrufen.

Fallen in das dielektrische Medium zwei oder mehr Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz ein, so reagiert die Auslenkung der atomaren Dipole auf die Summe der elektrischen Feldstärken. Ist die Intensität hoch genug, so entstehen auf diese Weise Elementarwellen, deren Frequenz beliebigen Linearkombinationen (Summen und Differenzen) der Frequenzen der eingestrahnten Laserstrahlen entspricht. Dieser Vorgang wird als Frequenzmischung bezeichnet. Man unterscheidet Summen- und Differenzfrequenzmischung.

Man symbolisiert den Konversionsprozess oftmals in einem Energiediagramm, wie in Abbildung 3 gezeigt. In diesem Fall werden die Frequenzen ν_1 und ν_2 zweier Wellen summiert, dann wird die Frequenz ν_3 einer dritten Welle subtrahiert. Das Ergebnis ist eine Welle der Frequenz ν_4 .

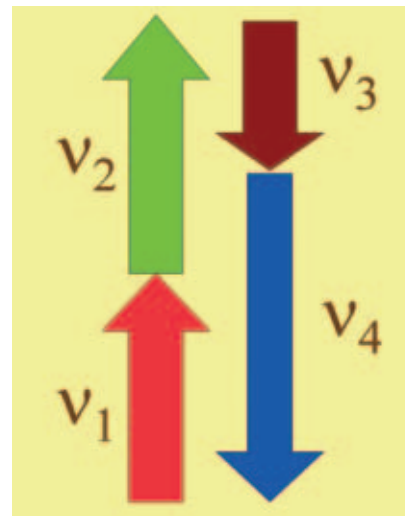


Abb. 3: Schematische Darstellung der Frequenzmischung $\nu_4 = \nu_1 + \nu_2 - \nu_3$



Abb. 4: Frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser erzeugen intensives grünes Licht der Wellenlänge 532 nm [4]

In der Praxis finden sich sehr häufig frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser, bei denen die Grundwelle 1.064 μm durch Frequenzverdopplung in grünes Laserlicht der Wellenlänge

532 nm umgewandelt wird. Auch Frequenzverdreifung und -vervielfachung kommt zum Einsatz, wenn ultraviolettes Licht der Wellenlängen 355 nm und 266 nm erzeugt werden

soll. Frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser lassen sich inzwischen so klein bauen, dass auf diese Weise sogar grüne Laserpointer gebaut werden können. Auch in Laser-Lightshows wird das grüne Licht oftmals mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser erzeugt.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht typischerweise erreichbarer Impulsenergien bei der Frequenzverdopplung, -verdreifachung, -vervierfachung und -verfünffachung von Nd:YAG-Laserlicht mit Hilfe von KD*P- und BBO-Kristallen [5]. Als Quelle diente hierbei ein Laser Spectra-Physics DCR-2.

Kristall	Grundwelle ν (mJ)	2ν (mJ)	3ν (mJ)	4ν (mJ)	5ν (mJ)
BBO	220	105	39	18.5	5
	600	350	140	70	20
KD*P	600	270	112.5	45	—

■ 3 Damit es funktioniert: Phasenanpassung

Ganz so einfach, wie es bisher den Anschein hat, ist die Erzeugung neuer Frequenzen allerdings nicht: Eine wichtige Bedingung für alle bisher beschriebenen nichtlinearen Prozesse ist, dass die entstehenden Elementarwellen konstruktiv miteinander interferieren, da es sonst nicht zum Aufbau einer Lichtwelle nennenswerter Intensität kommen kann. Dies ist nur dann der Fall, wenn die eingestrahlte Welle die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt, wie die Elementarwellen der neu erzeugten Frequenz. Diese Bedingung wird Phasenanpassung genannt. Sie ist nicht automatisch erfüllt, da normalerweise dielektrische Medien eine Dispersion, das heißt eine Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl, haben. So verwendet man z.B. zur Frequenzverdopplung oder für den Aufbau von OPOs doppelbrechende optisch anisotrope Kristalle, die zugleich eine hohe Nichtlinearität aufweisen müssen. Bei diesen Kristallen ist der Brechungsindex abhängig von der Polarisationsrichtung und von der Ausbreitungsrichtung.

In einem anisotropen doppelbrechenden Kristall unterscheidet man Licht der sog. ordentlichen und der außerordentlichen Polarisationsrichtung. Für ordentlich polarisiertes Licht ist der Brechungsindex in alle Richtungen gleich. Trägt man diesen ordentlichen Brechungsindex n_o für alle Ausbreitungsrichtungen räumlich auf, so ergibt sich das Bild einer Kugel. Für außerordentlich polarisiertes Licht ist der Brechungsindex n_e richtungsabhängig. Trägt man den Brechungsindex n_e für die außerordentliche Polarisationsrichtung räumlich auf, so ergibt sich das Bild eines Ellipsoids, das nach Fresnel benannt ist. Je nach Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung und den Kristallachsen wirkt ein anderer Brechungsindex.

Zusätzlich gibt es chromatische Dispersion, d.h. beide Brechungsindices sind wellenlängenabhängig. Dadurch kann es möglich werden, eine Kristallrichtung zu finden, bei der z.B. der Brechungsindex n_e der Grundwelle und der Brechungsindex n_o der senkrecht dazu polarisierten Harmonischen den gleichen Wert haben. Die Ausbreitungsrichtung, in der die Harmonische erzeugt werden kann, liegt genau in der Raum-

richtung in der sich das Fresnel-Ellipsoid der außerordentlich polarisierten Grundwelle und die Indexkugel der Harmonischen mit zur Grundwelle rechtwinkliger Polarisation schneiden, wie in Abbildung 5 gezeigt. Dann breiten sich beide Wellen, die erzeugende Grundwelle und die erzeugte Harmonische, mit der gleichen Geschwindigkeit aus, die entstehenden Elementarwellen der Harmonischen können konstruktiv interferieren und sich zu einer Lichtwelle merklicher Intensität aufsummieren. Die Phasenanpassungsbedingung ist erfüllt. Dieses Verfahren zur Phasenanpassung wird Winkel-Phasenanpassung genannt. Ein anderes Verfahren ist die Temperatur-Phasenanpassung, bei der die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der Brechungsindices für die Grundwelle und die Harmonische genutzt werden. In diesem Fall muss der Kristall auf einer Arbeitstemperatur stabilisiert werden.

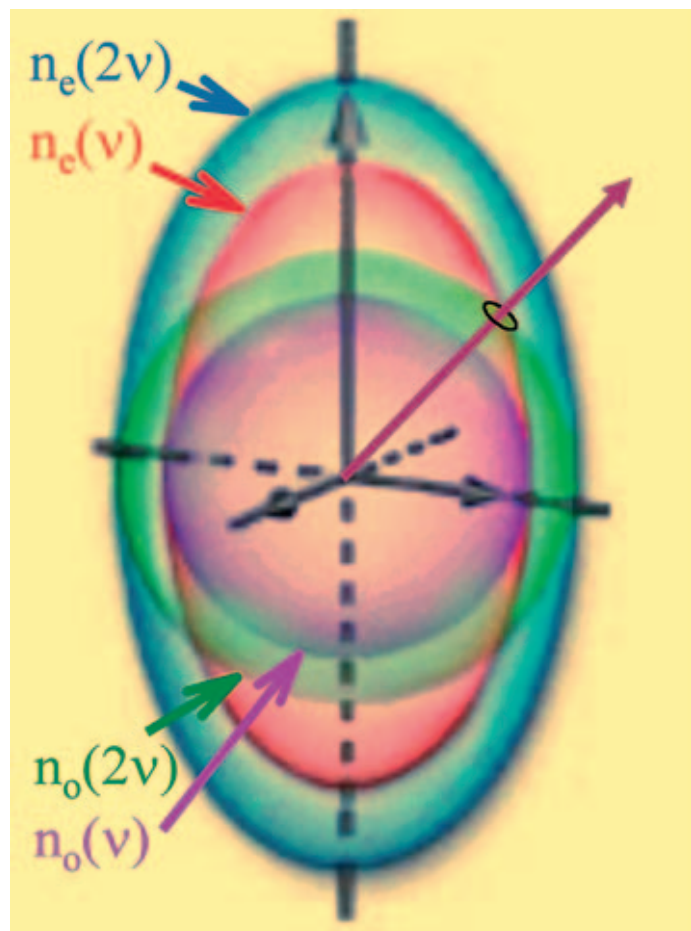


Abb. 5: Phasenanpassungsbedingung: Die zweite Harmonische kann nur in der Raumrichtung im Kristall erzeugt werden, in der der Brechungsindex der Grundwelle (mit der Frequenz ν) und der Brechungsindex der senkrecht dazu polarisierten Harmonischen (mit der Frequenz 2ν) übereinstimmen.

■ 4. Optisch-parametrische Oszillation

Ein Sonderfall der Differenzfrequenzmischung liegt vor, wenn eine der beteiligten Lichtwellen durch den nichtlinearen Prozess selbst erzeugt wird. Es wird also nur eine Laserwelle eingestrahlt. Durch Zusammenwirken eines Laserphotons der Frequenz ν_p mit einem z.B. durch spontane Emission entstandenen Photon der Frequenz ν_s kommt es u.a. zu einer

Differenzfrequenzmischung. Das entstandene Photon der Differenzfrequenz $\nu_i = \nu_p - \nu_s$ kann nun seinerseits mit einem weiteren Laserphoton ein Photon der Differenzfrequenz $\nu_p - \nu_i$ bilden. Dieses ist aber wieder die Frequenz ν_s . Auf diese Weise kommt es zum Aufbau von Wellen der Frequenzen ν_s und ν_i . Für diese Wellen wirkt das dielektrische Medium offenbar als Verstärker. Man bezeichnet diesen Prozeß als parametrische Verstärkung. Durch Rückkopplung mittels eines optischen Resonators ist es möglich, wie beim Laser eine effiziente Strahlungsquelle für beide Wellen gleichzeitig zu konstruieren. Diese Quelle wird als optisch parametrischer Oszillator (OPO) bezeichnet, die beiden Wellen der Frequenz ν_s und ν_i werden als Signal- und als Idlerwelle bezeichnet, die Signalwelle entspricht dabei der Nutzfrequenz des OPO. Je nachdem, ob entweder nur die Signal- oder Idlerwelle, oder ob beide im Resonator hin- und herreflektiert werden, unterscheidet man den einfach- oder doppelt-resonanten OPO.

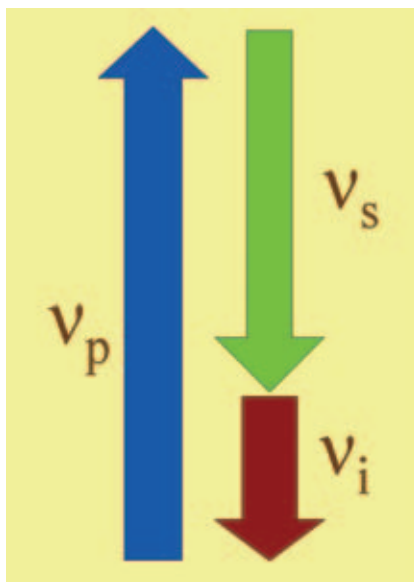


Abb. 6:
Schematische
Darstellung der Auf-
spaltung der Wellen der
Pumpfrequenz ν_p in
Wellen der Signal- und
Idlerfrequenz (ν_s und ν_i)

Photonen der Pumpwellenlänge werden im OPO im Endresultat aufgespalten in Photonen der Signal- und der Idlerwelle. Der Energieerhaltungssatz erfordert, dass die Summe der Signal- und Idlerfrequenzen genau wieder die Pumpfrequenz ergibt. Gleichzeitig müssen die Wellen der erzeugten Frequenzen und die Welle der Pumpfrequenz mit der gleichen Geschwindigkeit durch den Kristall laufen - die Phasenanpassungsbedingung muss erfüllt sein. Dies entspricht dem

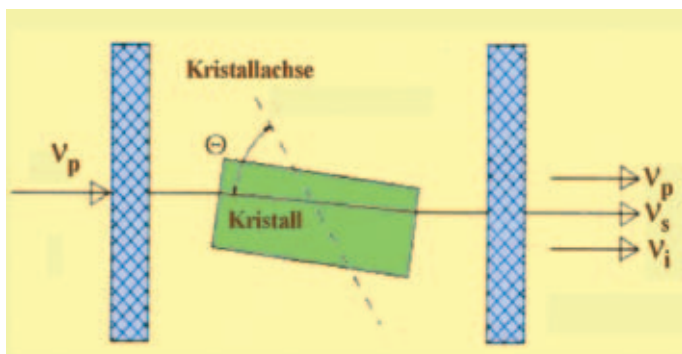


Abb. 7: Schematischer Aufbau eines OPO mit
Winkelphasenanpassung.

DOZ 9-2004

Erkenne deinen Kunden...



Sicherheit Lebensqualität Wohlbefinden Inspiration

... und seine Bedürfnisse.



Freundschaft Gesundheit Anerkennung Entspannung

Freiheit Erholung Genuss Zufriedenheit



Sehtesteinladungen für verschiedene Zielgruppen



Personalisierte Ansichtskarten für Sonnenbrillenangebote

Neue Aktionsideen für die Direktwerbeziele

- Imageverbesserung
- Verkürzung des Kaufintervalls
- Zusatzverkäufe

www.tameling-consulting.de

10
Jahre
Know-how und
Erfahrung

Tameling Consulting GmbH Augustinusstr. 9B 50226 Frechen T 022 34/690 330

Impulserhaltungssatz für die beteiligten Photonen. Sowohl Winkel- als auch Temperatur-Phasen Anpassung ist möglich. Abbildung 7 zeigt das Schema eines OPO mit Winkelanpassung.

OPOs wurden schon in den 60er Jahren realisiert, erlangten aber kaum kommerzielle Bedeutung, da es an geeigneten Kristallen fehlte. Die Kristalle müssen gleichzeitig die Bedingungen optische Reinheit, hinreichende Länge, hohe Zerstörschwelle und hohe Nichtlinearität erfüllen. Erst gegen Ende der 80er Jahre gelang es einem chinesischen Institut in Fuzhou einen neuartigen synthetischen Kristall herzustellen, der bezüglich der Zerstörschwelle und Nichtlinearität die bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten Kristalle um Faktoren übertraf: β -Ba₂BO₄, β -Beta-Barium-Borat, kurz BBO. BBO hat eine viermal höhere Nichtlinearität als das bis dahin bevorzugte Material KDP, auch die Zerstörschwelle liegt um mehr als einen Faktor 3 höher. BBO hat eine etwa zehnmal geringere Temperaturabhängigkeit der Brechungsindices als KDP und muss somit winkelangepasst werden.

Im Jahre 1988 gelang es einem Forscherteam (Nolting, Fan, Eckart, Byer, Wallenstein) an der Stanford University erstmals einen BBO-OPO im visuellen und infraroten Spektralbereich zu realisieren [6], in der Abbildung 8 ist das Gerät gezeigt. Dieser OPO wurde mit der dritten Harmonischen eines Nd:YAG-Lasers (355 nm) gepumpt und erzielte auf Anhieb eine Konversionseffizienz von 24 %. Durch Verstellen des Winkels des 14 mm langen Kristalls konnte ein Durchstimmbereich der Signalwelle von 412 – 710 nm bei gleichzeitiger Durchstimmung der Idlerwelle von 0.7 bis 2.4 μ m erreicht werden. Die Kommerzialisierung folgte unmittelbar: Seit 1990 können OPOs, die als direkte Abkömmlinge des Stanford-Experiments angesehen werden können, von der deutschen Firma GWU bezogen werden.

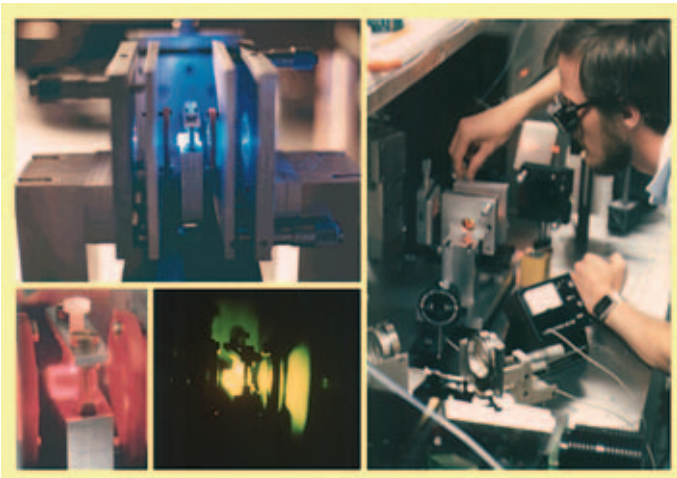


Abb. 8: Der erste optisch-parametrische Oszillator mit Beta-Barium-Borat

Unter Ausnutzung aller gängigen Kristallarten kann heutzutage mit OPOs abstimmbare Strahlung im Bereich von unter 400 nm bis 10 μ m erzeugt werden. Im militärischen Bereich finden OPOs zunehmend Verwendung als Strahlungsquelle für augensichere Entfernungsmesser (Wellenlänge 1.5 μ m) und als spektral schnell abstimmbare Blendquelle zur Störung der gegnerischen Sensorik.

■ 5 Stimulierte Raman-Streuung

Ein weiterer häufig verwendeter nichtlinearer Prozess ist die stimulierte Raman-Streuung. Bei diesem Prozess erzeugt ein Pumpphoton der Frequenz ν_p , welches in ein molekulares Gas eingestrahlt wird, ein Photon einer anderen, niedrigeren Frequenz ν_R , ähnlich wie beim optisch-parametrischen Oszillator. Die verbleibende Energie wird aber nicht als ein weiteres Photon abgestrahlt, sondern verursacht einen resonanten Übergang eines Moleküls des Gases in einen angeregten Zustand. Dies ist zumeist eine Vibrationsanregung. Bei diesem Prozess können sehr hohe Umwandlungseffizienzen erreicht werden. Praktische Anwendung findet dieser Prozess z.B. bei den augensicheren Laserentfernungsmessern, bei denen die Strahlung eines Nd:YAG-Lasers (Wellenlänge 1.064 μ m) durch stimulierte Raman-Streuung in Hochdruck-Methangas umgewandelt wird in Strahlung der Wellenlänge 1.54 μ m, die die Netzhaut nicht mehr erreichen kann.

Ein Beispiel aus dem deutschen Bereich ist der handgehaltene Laserentfernungsmesser HALEM 2 von Zeiss Optronik, der in Abbildung 9 gezeigt ist [7]. Dieses Gerät sendet 5 ns lange Impulse mit einer Energie von 10 mJ aus. Bei einem Durchmesser des austretenden Strahls von 15 mm wird eine Divergenz von weniger als 1 mrad erreicht. Die Messrate liegt bei 0.5 Hz, d.h. alle 2 Sekunden kann gemessen werden. Maximal sind 30 Messungen in 90 s möglich. Der Messbereich reicht von 50 m bis 39995 m bei einer Genauigkeit von ± 5 m. Bis zu sechs entfernungsgestaffelte Ziele können pro Messung erfasst werden. Bei Messung aus einer Abdeckung heraus oder zur Ausblendung weiter entfernter Hintergrundziele kann ein Entfernungstor in 10-m-Schritten im gesamten Messbereich definiert werden. Das Gerät wiegt 2.5 kg incl. Akku und misst 209 x 185 x 86 mm³. Die mittlere Lebensdauer wird mit 100000 Messungen angegeben. Durch die Wahl der



Abb. 9: Der handgehaltene Raman-Laser-Entfernungsmesser HALEM 2 von Zeiss Optronik

Wellenlänge kann die ausgesandte Strahlung nicht mehr bis zur Netzhaut gelangen, zur Schädigung vorderer Augenpartien reicht die abgestrahlte Strahlung nicht aus. Daher wird ein für das Gerät ein Sicherheitsabstand 0 m bei Betrachtung ohne optisch vergrößernde Hilfsmittel angegeben.

■ 6 Nichtlineare Kristalle

Damit die nichtlinearen Effekte besonders effizient werden, benötigt man Materialien mit einer möglichst hohen Nichtline-

arität. Die erzeugten Strahlungsleistungen sind proportional zur Eingangsleistung jeder beteiligten Wellenlänge. Bei der Frequenzverdopplung ergibt sich sogar eine Proportionalität zum Quadrat der Eingangsleistung. Der Wirkungsgrad der Frequenzkonversion steigt also mit steigender Eingangsleistung an. Wenn man nutzbare Strahlungsleistungen durch Frequenzkonversion erzeugen möchte, ist man darauf angewiesen, möglichst hohe Leistungsdichten der einfallenden Strahlung im nichtlinearen Medium zu erzeugen. Das geht nur mit Laserstrahlen - in vielen Fällen muss man sie sogar noch in das Medium fokussieren. Es ist klar, dass das nicht viele Materialien aushalten. Vielfach kommt es durch die Laserstrahlung zur Bildung von Farbzentren, die die weiter einfallende Strahlung dann absorbieren, so dass es zu einer starken lokalen Erwärmung des Materials kommt, die normalerweise zu einem Zerspringen führt.



Abb. 10: Nichtlineare Kristalle, roh und geschnitten [8]

Man muss also mehrere Dinge unter einen Hut bringen: Hohe Nichtlinearität, Doppelbrechung, äußerst hohe Zerstörungsschwelle, Freiheit von Schlieren und Einschlüssen. Einige wenige, kristalline Substanzen erfüllen alle diese Forderungen: Die bekanntesten sind Quarz, Lithium-Niobat (LiNbO_3), Ba-

rium-Titanat (BaTiO_3), Kaliumtitanyl-Phosphat KTP (KTiOPO_4), Kaliumdihydrogen-Phosphat KDP (KH_2PO_4), Lithium-Jodat (LiIO_3), deuteriertes KDP ($\text{KD}^*\text{P} = \text{KD}_2\text{PO}_4$), b-Beta-Barium-Borat BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$), Lithium-Borat (LiB_2O_5). Nur wenige Hersteller sind in der Lage, diese Kristalle in hinreichender Größe und Güte zu züchten.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Jürgen Nolting,
FH Aalen,
Studiengang Augenoptik,
Gartenstr. 135,
73430 Aalen

Literatur

- [1] W. Bosenberg, D. Guyer, D. Lowenthal, S. Moody: „Parametric Optical Generation: From Research to Reality“, Laser Focus World, vol. 28(5), pp. 165 - 170, Pennwell, Nashua (1992)
- [2] J. Nolting, Th. Goede: „Back to the Basics: Die Eigenschaften des Lichts Teil 2 - Licht als Welle: Die physikalische Optik“, DOZ 7/2002, pp. 24-31 (2002)
- [3] Th. Higgins: „Nonlinear Optical Effects are revolutionizing Electro-Optics“, Laser Focus World, vol. 28(8), pp. 67 - 74, Pennwell, Nashua (1994)
- [4] Firmeninformation Laser Innovations: „The Laser Innvotions Emerald 40 Watt Nd:YAG-Laser“, <http://www.laser-innovations.co.uk/products/emerald.htm> (2003)
- [5] Firmeninformation Castech: „CASTECH's BBO: Applications in Nd:YAG Lasers“, <http://www.castech-us.com/bboyag.htm> (1996)
- [6] Y.X. Fan, R.C. Eckardt, R.L. Byer, J. Nolting, R. Wallenstein: „Visible BaB2O4 optical parametric oscillator pumped at 355 nm by a single-axial-mode pulsed source“ Appl. Phys. Lett. 53, 2014-2016 (1988)
- [7] Firmeninformation Zeiss Optronik: „Laser-Entfernungsmessgerät HALEM 2“, Firmenschrift 53-0130-d, Oberkochen (1999)
- [8] Firmeninformation Beijing Gospel Optotech: „Crystals, Solid-State Lasers and Optical Components“, <http://www.bj-got.com/index2.html>, Beijing (2000)

Unentbehrlich!

Arnold Dambach

Formel-Sammlung

8,- €

überarbeitete 6. Auflage, 64 Seiten

inkl. ges. MwSt., zzgl. Porto u. Verpackung

ISBN 3-922269-13-3

DOZ
VERLAG

DOZ-Verlag

Postfach 12 02 01

69065 Heidelberg

Tel. (0 62 21) 90 51 70

Fax (0 62 21) 90 51 71