

Bernd Wilhelmi

Industrielle Anwendungen der Nichtlinearen Optik. Einige physikalische, technische und wirtschaftliche Aspekte

1. Wird die Optik zum Innovationstreiber des 21. Jahrhunderts?

Optik, eingeschlossen Optoelektronik und Laser, in deren Grundlagen und Anwendungen Nichtlinearitäten eine dominante Rolle spielen, werden gelegentlich als *die* Innovationstreiber des 21. Jahrhunderts bezeichnet. Ich halte eine solche Wertung zwar zu verfrüht und auch für übertrieben, aber sie kennzeichnet wesentliche Entwicklungen und Trends, die sich seit etwa einem Jahrzehnt abzeichnen und die für einen längeren Zeitraum im Zusammenspiel mit der Elektronik unser Leben maßgeblich, wenn auch nicht immer offenkundig, bestimmen werden. Im Blickpunkt stehen zu recht weder Optik, noch Elektronik, Mechanik, Mikro- oder Nanotechnik und auch nicht das innere Zusammenspiel zwischen Hardware und Software, sondern die Funktionalität von Systemen, ihre Anwender- und Wartungsfreundlichkeit sowie die Kosten für Investition und Betrieb. Dies erfordert entsprechende Systeme mit hoher Leistungsfähigkeit, geringem Platzbedarf und niedrigen Kosten für den Nutzer. Diesen Anforderungen ordnen sich die einzusetzenden Technologien unter, oft bleiben sie dabei dem Nutzer verborgen; sie sind nur die Grundlage für fleißige, funktionsbestimmende Subsysteme im „schwarzen Kasten“ des Produkts und werden dem gemäß häufig als „enabling technologies“ bezeichnet. Wer denkt schon beim Telefonieren oder beim Surfen im Internet ständig an Laser, Laser- oder Raman-Verstärker, nichtlineare Regeneratoren für Amplitude und Phase, Lichtleitfasern, Photodetektoren, die schnellen Modulatoren und Router, die die überwältigende Menge der Daten über lange Strecken transportieren und schnell verteilen, oder bei der Nutzung des CD- bzw. DVD-Players an den funktionsbestimmenden Laser mit miniaturisierter automatischer Autofokus- und Spurregelung oder gar an die inhärenten Nichtlinearitäten, die die Basis der physikalischen und technischen Beherrschung der Erzeugung, Verstärkung und Manipulation von geeignetem Licht sind. Auch in der Industrie ist der Kunde für Bearbeitungsanlagen primär nicht an Lasern

und Ihren Eigenschaften interessiert, sondern an der Fähigkeit, mit hoher Qualität schnell und kostengünstig Arbeitsschritte am Werkstück auszuführen. Als Endkunden und ebenso als industrielle Kunden fragen wir in erster Linie nach Leistungsfähigkeit und Preis, aber kaum nach inneren technischen Spezifikationen. Die Optik kommt nur dort aus dem schwarzen Kasten heraus, wo sie uns an der Schnittstelle zum menschlichen Auge Informationen präsentiert, einerseits in den „klassischen“ Versionen von Brille, Fernglas, Teleskop, Lupe, Mikroskop andererseits in Form von Displays am Ausgang von beliebigen Systemen. In den meisten modernen Anwendungen ist die Optik im Interesse der Systemleistung eine enge Symbiose mit Elektronik, Mechanik und Mikrotechnik eingegangen. Die Optik liefert – von der Entwicklungs- und Anwendungsseite her gesehen – eine wesentliche Grundlage für einen Ressourcenpool. Und in vielen Fällen sind die optischen Verfahren tatsächlich anderen Lösungsmöglichkeiten überlegen. Deshalb wurden in den letzten Jahrzehnten die Anstrengungen in der optischen Forschung und Entwicklung weltweit verstärkt und gleichzeitig wurden Öffentlichkeit und Regierungen in Publikationen auf die Bedeutung des Gebiets für die wirtschaftliche Zukunft hingewiesen, siehe bspw. [1], [2]. Der Weltmarkt allein für Optoelektronik (darunter werden Laser, Lichtleitfasern, optische Bauelemente der Informations- und Kommunikationstechnik und optische Displays zusammengefasst) hat zur Zeit ein Volumen von ca. 50 Mrd. € davon 8 Mrd. für Laserquellen, bei langfristig gemittelten jährlichen Wachstumsraten von 12%. Viel größer ist der Umsatz von Geräten, Systemen und Dienstleistungen, für die diese Bauelemente Voraussetzung sind. Dabei sind für weiteres Wachstum nicht nur neue, leistungsfähigere Funktionselemente und Wirkprinzipien Voraussetzung, sondern ebenso die Reduktion der Kosten für Herstellung und Betrieb kompletter Systeme.

2. Warum wurden Nichtlinearitäten in der Optik viel später erkundet und angewendet als in anderen Gebieten und warum spielen sie heute in der Optik eine so bedeutende Rolle?

Wenn denn die Optik so gewaltige Vorteile zu haben verspricht, warum kommen diese erst jetzt zu einer solchen Bedeutung als „enabling technology“ und nicht wenigstens seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts, als die Mikroelektronik ihren Siegeszug begann und ein Startzeichen für eine Epoche setzte, in der technische Systeme nicht nur die menschlichen Muskeln, sondern auch das menschliche Gehirn unterstützen oder ersetzen?

Die prinzipiellen Vorteile der Optik für zeitlich und räumlich hohe Auflösung, aus denen sich bspw. die Eignung für schnelle Verarbeitung von Signalen und hochdichte Speicherung ergeben, sind eine Folge von hoher Frequenz und kurzer Wellenlänge, was seit langem bekannt ist. Lange mangelte es aber an den Fähigkeiten, das Licht ebenso souverän zu beherrschen wie die (langwelligeren) elektromagnetischen Wellen bis zum Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich. In diesen Gebieten wurden bereits in den ersten Jahrzehnten nach den fundamentalen Experimenten von H. Hertz Oszillatoren und Verstärker für kohärente elektromagnetische Wellen mit stabiler und regelbarer Amplitude, Gleichrichter, Modulatoren und Demodulatoren, Frequenzvervielfacher und Frequenzmischer sowie Amplitudenbegrenzer konzipiert und gebaut. Grundlage waren die Beherrschung und Nutzung von Nichtlinearitäten. Sie kommen in die Maxwellgleichungen, die ganz allgemein die elektromagnetischen Erscheinungen – also auch die Optik – beschreiben, über nichtlineare Abhängigkeit der Polarisation sowie der Magnetisierung von den elektromagnetischen Feldstärken in Materialien.¹ Grundlage für die schnellen wissenschaftlichen und technischen Fortschritte war das Verständnis der Erzeugung von Schwingungen und Wellen durch Verstärkung des elektromagnetischen Rauschens und der Stabilisierung ihrer Amplituden über nichtlineare Prozesse, wobei unterschiedliche Ursachen für elektromagnetische Nichtlinearitäten im Radiowellenbereich gut bekannt waren. In verallgemeinerter Form wurden diese Erkenntnisse von B. van der Pol 1927 in einer Arbeit [3] zusammengefasst, die den Radiowellenoszillator mit stabiler Amplitude als rückgekoppelten nichtlinearen Rauschverstärker beschreibt.

Von diesem Zeitpunkt dauerte es noch drei Jahrzehnte, bis es gelang, diese Konzepte theoretisch und experimentell in die Optik zu übertragen, obwohl der Weg zur kohärenten Verstärkung von Licht aus dem Rauschen der spontanen atomaren Emissionsvorgänge theoretisch durch A. Einstein bereits 1916 gewiesen worden war, die genauen Bedingungen für optische Verstärkung durch V.A. Fabrikant 1940 formuliert wurden und die Möglichkeiten zur optischen Rückkopplung in Vielstrahlinterferometern seit dem Ende des 19. Jahrhunderts zur Verfügung standen. Im Unterschied zur Elektromagnetik bei niedrigen Frequenzen waren im optischen Bereich Nichtlinearitäten bis 1960 aber weder experimentell noch theoretisch erforscht. Einige frühe Ex-

1 Nur bei extrem hohen Feldern (und besonders bei hohen, also auch optischen Frequenzen) treten sogar im Vakuum nichtlineare Phänomene (bspw. Erzeugung von Harmonischen oder Frequenzmischungen) auf.

perimente von S. I. Vavilov [4] fanden kaum Beachtung. Vereinfacht gesagt bauten die Optiker und Spektroskopiker zwar auf Einsteins Erkenntnissen zur stimulierten Emission auf, taten sich aber schwer, Methoden der Radiophysik, etwa die Ergebnisse von Barkhausen und van der Pol zu übertragen. Es gab ein „Henne-Ei-Problem“, in dem zur Erzeugung substantieller Nichtlinearitäten starke optische Felder fehlten, zu deren Erzeugung man aber wiederum nichtlinear optische Oszillatoren benötigte. Deshalb wurde dann ab dem Ende der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts der Durchbruch zur Erzeugung von optischer Strahlung mit stabiler Amplitude und zur Beherrschung von Nichtlinearitäten zur Frequenzwandlung und Strahlungsmanipulation im wesentlichen von Wissenschaftlern bewirkt, die auf dem Radiofrequenzgebiet bei immer höheren Frequenzen gearbeitet und dabei auch die stimulierte Emission in atomaren Systemen eingesetzt hatten und diese Konzepte und Methoden erfolgreich auf Licht übertrugen. Zunächst wurde eine neuartige amplitudenstabile Lichtquelle, der Laser, als *nichtlinearer rückgekoppelter Verstärker* für spontane Emission in den Arbeiten von N. G. Basov, A. M. Prokhorov und Ch. Townes (die ebenfalls zuvor auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik gearbeitet hatten) am Ende der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts konzipiert und kurze Zeit später ab 1960 in vielen Varianten experimentell verwirklicht. Und zu Beginn der sechziger Jahre wurde die Nichtlineare Optik als neues Gebiet von Wissenschaft und Technik geschaffen. Vom Experimentellen her war dabei der Laser der Geburtshelfer, weil nur er die zur Entdeckung und Vermessung von nichtlinearen Phänomenen erforderlichen hohen elektromagnetischen Felder bei optischen Frequenzen liefern konnte. Der Laser spielt in diesem Zusammenhang also eine Doppelrolle: er beruht auf hochgradig nichtlinearen Erscheinungen und ist zugleich das notwendige Werkzeug zur Untersuchung nichtlinear optischer Erscheinungen. In den vier Jahrzehnten seit ihrer Geburt hat die nichtlineare Optik unser Verständnis von Lichtfeldern und ihrer Wechselwirkung mit Atomen, Molekülen und kondensierter Materie vertieft und einen gewaltigen Einfluss auf technische Entwicklungen auf dem Gesamtgebiet der Photonik und ihrer Anwendung erzielt. Hier seien besonders hervorgehoben (siehe bspw. [5]–[7]):

- *die Beherrschung von Nichtlinearitäten im Laser zur*
 - Amplitudenstabilisierung,
 - Frequenzstabilisierung und Bandbreitenbegrenzung,
 - Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse,
 - Frequenzkamm-Generation (die zugleich extreme Frequenzschärfe der einzelnen Moden und extrem kurze Impulse liefert, und sich damit so-

- wohl für spektral als auch zeitlich hoch auflösende Messungen eignet),
- Nichtlinear optische Phasenkonjugation;
- *die Frequenzwandlung und Frequenzabstimmung mittels Erzeugung von*
 - Harmonischen (bis zum weichen Röntgengebiet),
 - Summen- und Differenzfrequenzen,
 - Parametrischer Generation,
 - Stimulierter Raman- und Brillouinstreuung,
 - Mehrphotonenemission und Mehrphotonen-angeregte Einphotonenemission;
- *die gezielte Materialveränderung mittels nichtlinear optischer Wechselwirkung von starken optischen Feldern mit atomaren Systemen in allen Aggregatzuständen (Festkörper, Flüssigkeiten, Gase, Plasmen) mit Anwendungen, siehe auch [7], bei*
 - Materialbearbeitung zum Trennen und Fügen von Festkörpern,
 - Aufbau von Prototypen aus der flüssigen oder Gasphase (Rapid Prototyping),
 - Laserchirurgie,
 - Laser-gesteuerte Kernfusion,
 - Zellchirurgie und Zellmanipulation (u.a. Laserpinzette);
- *die Lasermesstechnik mit*
 - hoher spektraler Auflösung (bis zu Frequenzdifferenzen innerhalb der Doppler- aber auch der natürlichen Linienbreite),
 - hoher zeitlicher Auflösung (bis zu Zeiten im Attosekundenbereich, z.Z. einige 100 as [8]),
 - hoher räumlicher Auflösung (bis zu Strukturen unterhalb der Rayleigh- und Abbe-Grenze im Nah- aber auch im Fernfeld).

Bis zur breiten Nutzung der Nichtlinearen Optik und der Laser dauerte es dann aber noch mehr als zwei Jahrzehnte, in denen Baugruppen für Strahlerzeugung, -formung, -wandlung und -messung mit hinreichender Robustheit, Integrations-Bedienungsfreundlichkeit, sowie Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie akzeptablen Herstellkosten geschaffen werden mussten als Voraussetzung für Geräte wie auch Applikationen in Industrie und Dienstleistung. Als Beispiel nenne ich die optische Kommunikationstechnik, in der es mehrere Jahrzehnte dauerte, bis es Laser, Glasfasern, Laserverstärker, lineare und nichtlineare Bauelemente für Rekonstruktion von Amplituden- und Phasenverlauf der Signale für die Langstreckenübertragung sowie optische Lösungen (speziell Multiplexer und Demultiplexer) für Verzweiger auf der Sende- und Empfangsseite geschaffen wurden. Ebenso lange währte es, bis spezielle Hochleistungslaser, Frequenzwandler, Amplitudenstabilisierung und -rege-

lung sowie Sensorik sowie System- und Applikationsentwicklung für die Lasermaterialbearbeitung einen Stand erreichten, der den breiten industriellen Einsatz ermöglichte [9].

3. Industrietaugliche Quellen für kurze Lichtimpulse

Während es im Laboratorium seit langem eine außerordentliche Vielfalt von Lasern sowie Lasersysteme mit nichtlinear optischer Frequenzwandlung gibt, konnten sich bis vor wenigen Jahren aus den oben dargelegten Gründen nur wenige Laser in der Materialbearbeitung und in anderen industriellen Anwendungen durchsetzen. In der Breite hatten nur der CO₂-Laser und der Nd:YAG-Laser eine größere Bedeutung erlangt, für Spezialanwendungen im Mikrotechnikbereich kamen noch Excimerlaser mit ultravioletter Ausgangsstrahlung hinzu. Eine nichtlinear optische Frequenzwandlung wurde kaum eingesetzt. Laser für ultrakurze Lichtimpulse waren wegen der Komplexität der Systeme, ihres Wartungsbedarf und der hohen Kosten für Investition und Betrieb nicht einsetzbar.

Erst durch den Übergang zu kompakten reinen Festkörpersystemen konnten in den letzten Jahren industrietaugliche, robuste und wartungsarme Lichtquellen für ultrakurze Laserimpulse entwickelt werden.

Die Impulserzeugung und die Stabilisierung ihrer Parameter im kontinuierlichen Betrieb beruht – besonders bei den robusten passiven Verfahren, die zugleich die kürzesten Impulse liefern – maßgeblich auf der Wirkung von optischen Nichtlinearitäten, siehe bspw. [10]–[13]. Die Fortschritte, die heute beginnend und in naher Zukunft wachsend die Nutzung von Kurzzeitalasern in der Industrie ermöglichen, sollen kurz erläutert werden.

Ultrakurze Lichtimpulse können durch Phasenkopplung von möglichst vielen longitudinalen Moden (bestimmte Eigenschwingungen) eines Laserresonators innerhalb der Bandbreite der Emissionslinie des verstärkenden Materials erzeugt werden. Bei optimaler Kopplung überlagern sich die Felder dieser Moden zu bestimmten Zeitpunkten im Abstand von T_{Umlauf} konstruktiv, d.h. zu diesen Zeiten entsteht eine hohe resultierende Feldstärke, während sich zu allen anderen Zeiten die Feldstärken der Moden gegenseitig nahezu auslöschen. Damit entsteht ein Zug aus ultrakurzen Lichtimpulsen im zeitlichen Abstand $T_{Umlauf} = 2L_{opt}/c$, wobei $2L_{opt}$ der optische Weg für einen vollen Umlauf im Resonator ist. Die Phasenkopplung kann in einfacher Weise mittels passiver nichtlinear optischer Methoden auf dem Wege der Selbstorganisation erreicht werden. Wir betrachten den Umlauf eines Impulses auf einem vollen Umlauf im Resonator, siehe Abb. 1.

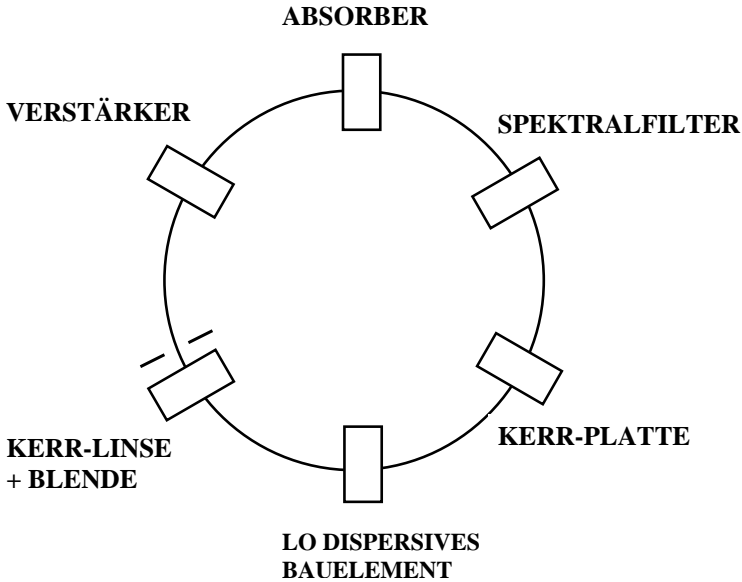


Abb. 1: Laserresonator mit linear optischen und nichtlinear optischen Bauelementen zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse

Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit stellen wir den Umlauf in einem Ringlaser dar, in dem angeordnet sind:

- ein Verstärker (mit breitem Spektrum und nichtlinearer Verstärkung, die sich während des Impulsdurchlaufs durch Abbau der Besetzungszahlinversion ändert und dadurch den hinteren Teil des Impulses benachteiligt),
- ein sättigbarer Absorber (ebenfalls mit breitem Spektrum und nichtlinearer Absorption, die sich während des Impulsdurchlaufs durch Umbesetzung der Absorberniveaus ändert),
- ein spektrales linear optisches Filter, sowie weiterhin
- eine nicht resonante und nicht dispersive nichtlinear optische Kerr-Platte, (die den zeitlichen Verlauf der Phase des Impulses beeinflusst, nicht aber dessen Amplitude),
- eine nicht resonante und nicht dispersive nichtlinear optische Kerr-Linse mit nachfolgender räumlicher Blende, (die durch nichtlinear optische Selbstfokussierung mehr oder weniger Licht durch die Blende hindurchlässt und dadurch die Transmission in Abhängigkeit von der Größe der momentanen Amplitude beeinflusst), und

- ein linear optisches dispersives Element (das nur die Phase des Impulses, nicht aber dessen Amplitude verändert).

In diesen Komponenten wird der Impuls in seinen zeitlichen, spektralen und räumlichen Eigenschaften verändert². Der Verstärker, ein Festkörpermaterial mit breitem Spektralübergang für die Laseremission, bspw. Ti:Saphir, werde von einem Einschaltvorgang an kontinuierlich mittels Laserdioden³ gepumpt, wodurch sich Besetzungszahlinversion und Verstärkung aufbauen. Zunächst entwickelt sich ein Anfangsimpuls aus dem Rauschen der spontanen Emission des Verstärkers. Ein solcher Impuls erfährt bei jedem Umlauf im Verstärker eine etwas höhere Verstärkung an der Vorderflanke als an der Rückflanke und im Absorber eine schwächere Absorption im Impulsmaximum als an beiden Flanken bei sehr kurzer Relaxationszeit des Absorbers bzw. eine abnehmende Absorption vom Impulsanfang bis zum Impulsende bei langer Relaxationszeit. Für robuste Laser haben sich besonders Halbleiterabsorber bewährt (vgl. [13]). Das Zusammenspiel von Verstärker und Absorber bewirkt bei jedem Umlauf eine Verkürzung des Impulses, während die linear optische spektrale Filterung eine Verlängerung des Impulses bewirkt. Nach vielen Umläufen bildet sich unter geeigneten Bedingungen bereits mit diesen Bauelementen ein Gleichgewicht heraus, bei dem sich die Impulsform nicht mehr von Umlauf zu Umlauf ändert. Man erreicht ein Regime, das der Solitonenausbreitung ähnelt (vgl. [14]).

Die übrigen Elemente, die in dem Ringlaser der Abb. 1 enthalten sind, beschreiben einerseits zusätzliche inhärente Eigenschaften von realem Verstärker und Absorber sowie von den Resonatorspiegeln, aber auch zusätzliche Bauelemente, die bestimmte ungünstige Eigenschaften der anderen Komponenten kompensieren oder die Möglichkeit einer zusätzlichen Impulsverkürz-

- 2 Wenn die Veränderungen bei einem einzelnen Durchgang durch die verschiedenen Bauelemente klein sind, spielt die relative Lage und Abfolge der Elemente im Resonator keine wesentliche Rolle, und deshalb können wir in jeweils einem der hier dargestellten Bauelemente die entsprechenden Eigenschaften von mehreren realen Komponenten zusammenfassen, bspw. kann man die linear optische spektrale Filterwirkung von realem Verstärker, Absorber, Resonatorspiegeln usw. mittels des einen Spektralfilters darstellen. Abweichungen von diesen vereinfachenden Annahmen werden bspw. in [11] diskutiert.
- 3 Laserdioden sind gerade im industriellen Einsatz Pumpampen überlegen durch hohe Effizienz und ideale Möglichkeiten zur Anpassung ihrer schmalen Emissionslinie an das Absorptionsspektrum des betreffenden Verstärkermaterials, was außer einer Energieeinsparung eine geringere thermische Belastung des Verstärkers und als Folge höhere optische Qualität bewirkt. Außerdem besitzen die Laserdioden wesentlich höhere Lebensdauern als Pumpampen (einige 10 000 h gegenüber einigen 100 h), was zur Reduzierung des Wartungsaufwands und zur Erhöhung der Verfügbarkeit der Anlagen beiträgt.

ung bieten. Erstens beschreibt die Kerr-Platte die nicht resonante instantane Abhängigkeit des optischen Weges aller Bauelemente im Resonator von der (zeitabhängigen) Amplitude der Impulsfeldstärke $E_a(t)$ über die nichtlineare Brechzahl $n = n_0 + n_2 E_a^2(t)$.⁴ Damit ändert sich auch die instantane Trägerfrequenz des Impulses, die sich als zeitliche Ableitung aus der Phase der Welle zu $\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\phi}{dt}$ ergibt (l Länge der Kerr-Platte). Diese Modulation der Trägerfrequenz ist mit einer spektralen Verbreiterung verbunden, die aber nicht unmittelbar eine Impulsverkürzung bewirkt, sondern eben nur eine zusätzliche Trägerfrequenzänderung während der Impulsdauer bedeutet, d.h., die verschiedenen Impulsteile sind durch unterschiedliche Wellenlängen bzw. Farben gekennzeichnet. In der Umgebung des Impulsmaximums ergibt sich eine monotone, nahezu lineare Änderung der Trägerfrequenz mit der Zeit, ein sogenannter Chirp des Impulses. Mit geeigneten linear optischen dispersiven Bauelementen (u.a. Prismen, Gitter, Interferometer, Pakete von dielektrischen Schichten) kann diese Phasenmodulation beseitigt werden, ohne die Bandbreite einzuengen, d.h. der Impuls kann zusätzlich verkürzt werden. (Genauere Untersuchungen dazu findet man in [11]–[13]). Auf diese Weise kann man immer erreichen, dass an der Auskoppelstelle des Resonators Bandbreitebegrenzte Impulse vorliegen, das sind Impulse ohne Phasenmodulation bzw. die kürzesten Impulse bei gegebener spektraler Bandbreite. Schließlich soll noch auf die Kombination von Kerr-Linse und räumlicher Blende eingegangen werden, weil diese bei Festkörpersystemen eine besondere Rolle spielen kann. Im vorigen Punkt hatten wir bei der nichtlinear optischen Brechzahl ausschließlich deren Zeitabhängigkeit betrachtet, was aber nur für ausgedehnte ebene Wellen gerechtfertigt ist. In der Kerr-Linse soll nun die bisher vernachlässigte Abhängigkeit der Brechzahl von den transversalen räumlichen Koordinaten (bei Zylindersymmetrie nur von der Radialkoordinate r) erfasst werden. Wenn wir in der obigen Formel für n die Abhängigkeit der Feldstärkeamplitude E_a von t und r berücksichtigen, also $E_a(t;r)$, so erhalten wir eine Brechzahl die sich vom Zentrum nach außen verändert, also je nach dem Vorzeichen von n_2 eine Sammell- oder Zerstreuungslinse darstellt, deren Brechkraft für das Impulsmaximum am größten ist. Wir nehmen an, dass eine

4 Die quadratische Abhängigkeit der Brechzahl von der Feldstärke entspricht einem nichtlinear optischen Effekt dritter Ordnung gemäß dem Beitrag zur Polarisation, der proportional zur dritten Potenz der Feldstärke ist. Damit tritt dieser Effekt wie alle nichtlinear optischen Effekte ungerader Ordnung auch in Medien mit Inversionssymmetrie auf, also bspw. auch in Gläsern, Flüssigkeiten oder Gasen.

Sammellinse vorliegt und dass die Brechkraft im Impulsmaximum so groß ist, dass die nachfolgende Blende in diesem Moment nahezu die volle Impulsleistung hindurchgehen lässt, während der Impuls an der Vorder- und Rückflanke stark geschwächt wird, was wiederum eine Verkürzung bedeutet. Bevor geeignete Halbleiterabsorber entwickelt wurden, war das Kerr-Linsen-Modelocking, wie dieses Verfahren auch bezeichnet wird, die einzige robuste Möglichkeit, mit Festkörpersystemen eine stabile passive Erzeugung ultrakurzer Impulse zu erreichen.

Insgesamt geben die beschriebenen Basisbauelemente mit ihren spezifischen linearen und nichtlinearen Eigenschaften die Möglichkeit, unterschiedliche Systeme zur Erfüllung von Anwenderforderungen zu konzipieren und herzustellen. Heute bieten bereits eine Reihe von Firmen (siehe bspw. Messekatalog LASERS' 2003, München) derartige Festkörpersysteme zur Erzeugung von ultrakurzen Lichtimpulsen im Piko- und Femtosekundenbereich in weiten Leistungsbereichen an. Die meisten sind allerdings für den Einsatz im Laboratorium gedacht, und nur wenige erfüllen die Anforderungen eines robusten Dauereinsatzes in Industrie oder Dienstleistung.

Industrietaugliche Kurzpulsquelle: Hier möchte ich beispielhaft auf ein Pikosekundensystem der Jenoptik eingehen, bei dem die Erzeugung von kurzen Impulsen mit hoher Folgefrequenz in erster Linie eine effektive Frequenzwandlung des Laserlichtes ermöglichen soll [15], [16]. Das Grundsystem besteht aus einem Nd:YVO₄ Laseroszillator und einem nachfolgenden Nd:YVO₄ Leistungsverstärker. Der Laseroszillator ist ähnlich wie oben beschrieben aufgebaut, jedoch aus konstruktiven Gründen nicht als Ringsystem und enthält als Hauptelemente das aktive Festkörpermateriale und einen Halbleiterabsorber (das linear optische Spektralfilter ergibt sich hier aus der spektralen Selektivität von Resonatorspiegeln sowie Verstärker und Absorber). Durch besondere konstruktive Maßnahmen wird ein Laserbündel beugungsbegrenzter Divergenz ($M^2 < 1.1$) abgestrahlt. Der Laser mit einer Mittenwellenlänge von 1064 nm ist für eine Impulslänge von 8 Pikosekunden und eine Folgefrequenz von 120 MHz ausgelegt. In einem nachfolgenden Leistungsverstärkersystem, das die volle Impulsfolge, d.h. 120 MHz, verstärkt, wird eine mittlere Ausgangsleistung von etwa 60 W ohne Veränderung von Impulsdauer und M^2 erreicht, was einer Impulsspitzenleistung von etwa 70 kW entspricht.

Nichtlinear optische Frequenzwandlung der verstärkten Impulse: Mit diesen Parametern ist das beschriebene System hervorragend für nichtlinear optische Frequenzwandlungen geeignet.

Zum Beispiel ist bei Verwendung von nichtlinear optischen Prozessen zweiter Ordnung zur Erzeugung der zweiten Harmonischen die Leistung der Harmonischen bei der Frequenz 2ω in weiten Bereichen proportional zur zweiten Potenz der Leistung der Fundamentalstrahlung⁵. Analoges gilt bei der Erzeugung von Summen- und Differenzfrequenzen. Dadurch kann hier mit den hohen Ausgangsleistungen der infraroten Grundwelle des beschriebenen Lasersystems die 2., 3. und 4. Harmonische (bei Wellenlängen von 532 nm, 355 nm bzw. 256 nm) bei hohen Wandlungsraten erzeugt werden⁶. Damit stehen in sehr unterschiedlichen Wellenlängenbereichen, besonders auch im ultravioletten Spektralbereich Lichtquellen hoher mittlerer Leistung von einigen 10 W sowie Spitzenleistungen einigen 10 kW zur Verfügung.⁷ Dies ist besonders für die Lasermaterialbearbeitung von Bedeutung, siehe folgenden Abschnitt.

Primäres Entwicklungsziel des oben beschriebenen Lasersystems war allerdings ein völlig anderes, nämlich die Erzeugung einer Hochleistungs-RGB-Strahlungsquelle für Display-Anwendungen. Dies ist ein Lasersystem, das balanciertes Weißlicht mit 25 W Leistung durch Mischung von Rot, Grün und Blau (hier mit Wellenlängen bei 628 nm, 532 nm und 446 nm und Leistungen von 9 W, 7 W, bzw. 9 W) emittiert [JO,Mü]. Das Bemerkenswerte an diesem System bezüglich der Anwendung von nichtlinear optischen Frequenzwandlungen besteht darin, dass hier neben den Generatoren für Harmonische und Frequenzmischungen ein optisch parametrischer Generator zum Einsatz kommt. Ein optisch parametrischer Generator besteht aus einem geeigneten Kristall mit einer optischen Nichtlinearität zweiter Ordnung, der mit hochfrequenter Laserstrahlung der Frequenz ω_p gepumpt wird. In Umkehrung der Frequenzmischung entsteht Strahlung bei zwei Frequenzen ω_1 und

- 5 Diese einfache Proportionalität gilt nur unter bestimmten Bedingungen, speziell nur bei Umwandlungsraten $\ll 1$ und für nicht zu große Spektralbreiten der Strahlung und nicht zu kurze Impulse. Außerdem sei hier anknüpfend an Fußnote 4 darauf hingewiesen, dass zur nichtlinear optischen Frequenzwandlung in zweiter Ordnung nur Materialien ohne Inversionssymmetrie, also nur Kristalle bestimmter Gruppen eingesetzt werden können. Zu genaueren Untersuchungen siehe [5].
- 6 Die dritte und vierte Harmonische werden durch zwei aufeinanderfolgende nichtlinear optische Prozesse zweiter Ordnung erzeugt (3ω aus $\omega + 2\omega$ bzw. 4ω aus $2\omega + 2\omega$), also einmal durch die Aufeinanderfolge der Erzeugung der 2. Harmonischer und einer anschließenden Summenfrequenzzeugung und einmal durch die Abfolge von zwei Erzeugungsprozessen der 2. Harmonischen.
- 7 Bei einer Fokussierung in den nichtlinear optischen Kristall mit einem Taillendurchmesser von etwa 0,05mm werden Spitzenintensitäten der Grundwelle von etwa $2,4 \text{ GW/cm}^2$ erreicht, was Feldstärken von 1,3 MV/cm entspricht.

ω_2 mit $\omega_p = \omega_1 + \omega_2$, den man als Energieerhaltungssatz der wechselwirkenden Photonen interpretieren kann. Neben dem Energieerhaltungssatz muss für die Photonen auch ein Erhaltungssatz für die Photonenimpulse bzw. die Propagationsvektoren der Strahlungsfelder $\vec{k}_p = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ gelten. Durch geeignete Orientierung der Kristallachsen relativ zur Pumpstrahlungsrichtung sowie Temperierung des Kristalls können die Energie- und Impulserhaltung für ein bestimmtes Verhältnis zwischen ω_1 und ω_2 gleichzeitig erfüllt werden. Durch Veränderung von Orientierung und Temperatur können dadurch diese beiden Frequenzen abgestimmt werden. Die parametrische Erzeugung von abstimmbarem Licht ist ebenso wie die Erzeugung von Harmonischen sowie Summen- und Differenzfrequenzen bereits seit den sechziger Jahren bekannt. Durch ihre hohe Komplexität waren optisch parametrische Generatoren aber bisher in robusten kommerziellen Anwendungen nicht einsetzbar. Nun liegt erstmals ein industriell einsetzbares System mit abstimmbaren Impulsen hoher Folgefrequenz und Leistung vor.

4. Nichtlinear optische Prozesse in der Laserbearbeitung von nichtmetallischen Werkstoffen

Die Lasermaterialbearbeitung setzt sich dank ihrer potentiellen Vorteile sowie der steigenden Qualitäts- und Produktivitätsanforderungen beim Trennen und Fügen von Werkstoffen in vielen Aufgabenbereichen durch. Am weitesten ist dies in der Metallbearbeitung erfolgt, wobei jedoch selbst in diesem Falle bisher nur ein kleiner Teil der lohnenden Anwendungen erschlossen ist, was zum Beispiel Analysen zum Schweißen im Automobilbau zeigen. Immer mehr verlangt aber auch der wachsende Einsatz von nichtmetallischen Werkstoffen – unter anderem Glas, Keramik, Polymere und Verbundmaterialien – geeignete Laserbearbeitungsverfahren. Noch ausgeprägter als in der Metallbearbeitung entscheiden hier die speziellen Materialeigenschaften und das Ziel der Bearbeitung über die optimalen Parameter der verwendeten Strahlung, dies gilt für Wellenlänge, Leistung, Strahlungsprofil, kontinuierliches oder gepulstes Regime, Impulsdauer und Polarisationszustand. Letztendlich bestimmen die Kundenprobleme, wie die Systeme zu konzipieren sind.

Die nichtlineare Optik spielt für die Lasermaterialbearbeitung aus zwei unterschiedlichen Gründen eine wichtige Rolle. Zum einen kann sie eingesetzt werden, um Strahlung geeigneter Wellenlänge (vom infraroten bis zum ultravioletten Spektralbereich) und Impulse gewünschter Dauer zu erzeugen, worauf im vorigen Abschnitt bereits eingegangen wurde. Zum anderen spie-

len in der Lasermaterialbearbeitung nichtlinear optische Prozesse eine wichtige Rolle bei der Wechselwirkung der intensiven Laserstrahlung mit dem zu bearbeitenden Material.

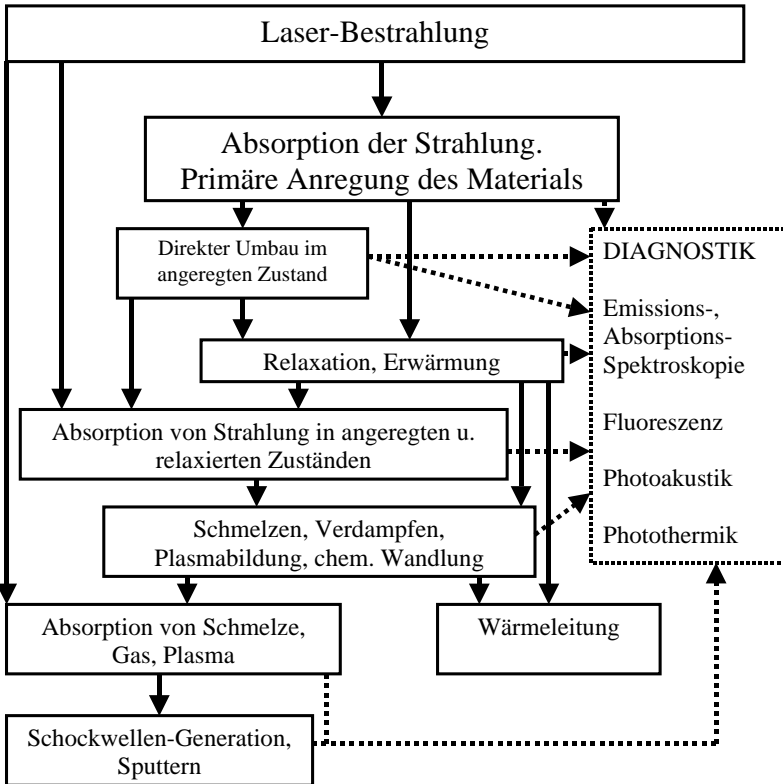


Abb. 2: Schema der Lasermaterialbearbeitung mit ablaufenden Prozessschritten und Diagnostikverfahren zu deren Verfolgung

Anregung durch Ein- und Mehrphotonenabsorption: In diesem Abschnitt soll auf diesen zweiten Aspekt eingegangen werden. Während im vorigen Abschnitt nur nichtlinear optische Prozesse beschrieben wurden, bei denen während der Wechselwirkung keine Energie aus dem Strahlungsfeld auf das Material übertragen wird (zumindest im angestrebten Idealfall), steht hier gerade diese Energieübertragung durch Ein- und Mehrphotonenabsorption im Vordergrund. Im Schema der Abb. 2 sind wichtige Prozesse angegeben, die im Verlauf und als Folge der Laserbestrahlung ablaufen. Zunächst wird das

Material durch Ein- oder Mehrphotonenabsorption oder durch nichtelastische Lichtstreuung angeregt, das heißt, Energie wird vom Strahlungsfeld auf das Werkstück übertragen. In Gebieten starker Einphotonenabsorption spielen die anderen genannten Prozesse zumeist keine wichtige Rolle und können außer Betracht bleiben. Die Multiphotonenabsorption (und als Spezialfall auch die Multiphotonenionisation) tritt substantiell in Erscheinung, wenn die Energie eines einzelnen Photons kleiner ist als der energetische Abstand zwischen dem Grundniveau eines Moleküls und seine höher liegenden Niveaus (bzw. die Bandlücke) nicht überwinden kann, aber diese Energielücke durch mehrere Photonen mit einer Frequenz oder mit unterschiedlichen Frequenzen überbrückt werden kann.⁸ Die Übergangswahrscheinlichkeit ist proportional zur n -ten Potenz der Intensität. Da die entsprechenden Mehrphotonenabsorptionsquerschnitte sehr klein sind, benötigt man hohe Leistungen, um während einer kurzen Bestrahlungszeit nennenswerte Umbesetzungen zu erhalten. Bei sehr kurzen Impulsen mit extrem hoher Intensität kann noch ein anderer Ionisationseffekt in Erscheinung treten, der nicht mit Mehrphotonenprozessen beschreibbar ist: die hohen elektrischen Lichtfeldstärken überlagern sich mit den innermolekularen Feldern und verbiegen so auch die Potentialflächen, die die Bewegung der Valenzelektronen bestimmen, im Takt der Lichtfrequenz; dabei kann die Potentialänderung in einer bestimmten Phase der Feldstärkeoszillation so erheblich sein, dass ein Elektron freigesetzt wird, also ebenfalls ein Ionisationsprozess auftritt, der nicht durch einen Mehrphotonenprozess einer bestimmten Ordnung beschreibbar ist, was nämlich voraussetzt, dass die äußeren Felder als Störung klein gegen (oder mindestens kleiner als) die inneren Felder sind. Dieser Effekt kann bei der Plasmaerzeugung und bei der Materialbearbeitung mit kurzen Impulsen eine wichtige Rolle spielen. Bspw. haben wir bei der Bearbeitung von Kristallen, deren Bandlücke sehr viel größer ist als die Photonenenergie der verwendeten Femtosekundenimpulse, festgestellt, dass – bei gleicher Impulsenergie – die Laserwellenlänge für eine

- 8 Dabei ist die Übergangswahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit $dW^{(n)}/dt$ (bzw. Übergangsrate $k^{(n)}$) eines Moleküls infolge der gleichzeitigen Absorption von n Photonen mit den Frequenzen $\omega_1, \dots, \omega_n$ gegeben durch

$$k_{mpa}^{(n)} = \frac{dW^{(n)}(\omega_1, \dots, \omega_n)}{dt} = \sigma^{(n)}(\omega_1, \dots, \omega_n) \left[\frac{I_1(\omega_1)}{\hbar \omega_1} \cdot \dots \cdot \frac{I_n(\omega_n)}{\hbar \omega_n} \right]$$

wobei $\sigma^{(n)}$ der Absorptionsquerschnitt für n -Photonenabsorption und $I_m(\omega_m)$ die Intensität (Leistung pro Flächeneinheit) der Strahlung bei der Frequenz ω_m am Ort der Wechselwirkung ist. Genauere Untersuchungen zum nichtstationären Regime und zum Einfluss des Abbaus der Anregungsstrahlung findet man in [5].

effektive Materialbearbeitung nur von untergeordneter Bedeutung ist, während die Effizienz und Qualität der Bearbeitung mit einer Verkürzung der Impulsdauer sehr stark zunimmt.⁹

Als Folge der primären Anregung von höheren Elektronen- oder Kernbewegungszuständen des Materials können eine Vielzahl von Prozessen ablaufen. Zunächst können in den primär elektronisch angeregten Zuständen molekulare Umlagerungen oder chemische Veränderungen ausgelöst werden, bevor die Anregungsenergie über Elektron-Elektron- und Elektron-Phonon-Wechselwirkung auf andere lokale Freiheitsgrade des atomaren Systems oder auch räumlich verteilt wird, wobei zur räumlichen Verteilung außer den direkt am Relaxationsprozess beteiligten Phononenmoden auch andere Phononen und die Wärmeleitung beitragen.

Absorptionsübergänge aus dem primär angeregten Zustand: Außerdem können während der Lebensdauer der primären Anregung weitere Absorptionsprozesse auftreten, sogenannte Stufenabsorptionen, in deren Folge sehr hoch angeregte molekulare Spezies oder sogar nach Ionen und freie Elektronen entstehen. Die Stufenprozesse führen insgesamt zur Vernichtung von mehreren Photonen während einer molekularen Anregungskette und ähneln in diesem Sinne der Mehrphotonenabsorption; deshalb bezeichnet man sie gelegentlich auch als Mehrphotonenprozesse mit realen resonanten Zwischenniveaus. Diese Stufenabsorptionsprozesse von dem ersten angeregten Zustand in einen noch höheren angeregten Zustand 2 sind bei Verwendung intensiver kurzer Lichtimpulse besonders wichtig, da die entsprechende Ratenkonstante $k_{\text{Stufenabs}} = \sigma_{12}^{(1)}(\omega) \left[\frac{I(\omega)}{\hbar\omega} \right]$ für die von der ersten Stufe ausgehende

9 Es sei hier angemerkt, dass dieser Feldstärkeeffekt in jüngster Zeit eine ganz andere Anwendung gefunden hat bei der Erzeugung von Attosekundenlichtimpulsen im Extremen Ultraviolettbereich (mit Wellenlängen von einigen Nanometern bis zu einigen zehn Nanometern auch als Weiches Röntgengebiet bezeichnet) bei Anregung von Atomen in der Gasphase mit Femtosekundenlichtimpulsen (Wellenlängen um 800 nm und Impulsdauern von etwa 5 fs). Der kurzweilige Attosekundenimpuls kommt durch die oben beschriebene kohärente Potentialveränderung zustande, infolge der ein Elektron pro Atom durch Tunnelleffekt freigesetzt wird. Diese Elektronen verbleiben unter Wirkung des (kohärenten) Lichtfeldes und kommen nach hoher Beschleunigung (innerhalb einer Zeit, die kürzer eine halbe Schwingungsperiode der Trägerwelle ist) in die Nähe des Atomrumpfes zurück, wo sie nun mit hoher Wahrscheinlichkeit unter Emission sehr kurzweiliger Photonen wieder in einem tiefen gebundenen Atomzustand eingefangen werden. Bei diesem Effekt hängt die notwendige Teilchenbeschleunigung sehr stark von der relativen Phasenlage zwischen Trägerwelle und Maximum des Anregungsimpulses an. Deshalb war die Kontrolle dieser Phasenlage, die kürzlich erreicht werden konnte, eine Voraussetzung für solche Experimente, siehe bspw. [8].

Einphotonenabsorption proportional zur Lichtintensität ist, im Unterschied zu den intensitätsunabhängigen Raten, die die Entleerung des ersten angeregten Zustands durch unterschiedliche Relaxationsprozesse beschreiben – chemische Reaktionen und Fluoreszenz eingeschlossen. Solche Absorptionsprozesse können eine besonders große Rolle spielen, wenn das Material im Grundzustand nahezu transparent ist, wobei die kleine Absorption durch eine sehr niedrige Einphotonenabsorption oder durch eine „echte“ Mehrphotonenabsorption bewirkt werden kann. Unter geeigneten Bedingungen können (infolge der zumeist sehr schnellen Relaxationsprozesse zwischen den höheren Zuständen und dem ersten angeregten Zustand) während der Lebensdauer des ersten angeregten Zustandes sehr viele Absorptionsprozesse stattfinden, die insgesamt Ursache für die nachfolgenden Materialveränderungen sind. In der Folge erfährt der Lichtimpuls eine viel stärkere Schwächung als aus dem üblichen (linear optischen) Absorptionsspektrum zu erwarten.

Absorptionsprozesse aus sekundär besetzten Zuständen: Wie bereits erwähnt, können aus dem primär angeregten Zustand andere Zustände auch ohne weitere Strahlungseinwirkung allein durch Relaxationsprozesse entstehen. Anschließende Absorptionsprozesse können nun auch von solchen sekundär entstandenen Zuständen ausgehen. Unter dem Aspekt der Lasermaterialbearbeitung ist es wichtig, dass es unter diesen Zuständen auch langlebige gibt (bspw. niedrigste Triplets mit Lebensdauern im Mikro- bis Millisekundenbereich) und sogar dauerhafte (zum Beispiel andere chemische Spezies im Grundzustand oder stabile Festkörperdefekte). Dies bedeutet, dass nun gegebenenfalls auch während einer längeren Strahlungseinwirkungszeit Absorptionen der sekundären Spezies auftreten können, während die primär angeregten molekularen Zustände zumeist nur kurze Lebensdauern im Piko- bis Nanosekundenbereich zeigen. Wenn man zum Beispiel optisches Quarzglas oder optische Kristalle wie Quarz oder Kalziumfluorid, deren Bandlücken größer als 5 eV sind, mit Photonen einer Energie von etwa 1 eV bestrahlt, so werden – selbst in defektfreien Gebieten – angeregte Zentren durch Mehrphotonenabsorption erzeugt. Aus diesen können sich sekundär relativ stabile Defekte, u.a. Farbzentren, bilden, die in der Folge für weitere Absorptionen zur Verfügung stehen. So bilden sich zum Beispiel bei der Bestrahlung von Kalziumfluoridkristallen mit Femtosekundenimpulsen schon bei niedrigen Impulsenergien pro Fläche deutlich sichtbare farbige Bearbeitungsspuren heraus. Werden diese Bereiche von weiterer Laserstrahlung getroffen, können diese vorbestrahlten Gebiete relativ leicht zerstört werden, weil die entstandenen Defekte starke Einphotonenabsorption zeigen, die zur

Erwärmung mit lokaler Aufschmelzung, Verdampfung und Plasmabildung führt. Dabei ist noch zu bemerken, dass verdampfendes Material und Plasma eine starke Lichtabsorption zeigen können, durch die im Extremfall keine Strahlung in tiefer gelegene Zonen des Werkstoffs eindringen kann. Dieser Effekt kann zur Beschränkung der Laserbearbeitung auf oberflächennahe Gebiete genutzt werden.¹⁰

Materialtrennung durch geführte Risserzeugung: Es soll hier noch auf andere mögliche Folgen der lokalen Materialerwärmung hingewiesen werden, die schon bei relativ schwacher Einwirkung von Laserstrahlung auf spröde Materialien von Bedeutung sein kann. Die lokale Erwärmung des Materials bewirkt mechanische Spannungen im Werkstück, die wiederum zu (reversiblen aber auch irreversiblen) Defekten im Gitter und speziell zu Mikrorissen führen können. Dies kann einerseits Bearbeitungsprozesse stören und andererseits zur gezielten Erzeugung von Materialbrüchen bzw. Sollbruchstellen ausgenutzt werden.

In der Jenoptik Automatisierungstechnik wurden verschiedene Systeme entwickelt, mit denen Glas, optische Kristalle und Halbleiterwafer bei niedrigem Aufwand an Laserenergie (je nach Wellenlänge für Ein- oder Mehrphotonenabsorption) durch genaue Führung der Rissausbreitung getrennt werden können. Vorteile gegenüber dem mechanischen Ritzen und Brechen, aber auch gegenüber anderen Laserverfahren, bestehen in der hohen Qualität der getrennten Teile (keine Risse und Spannungen in den getrennten Teilen, keine Nachbearbeitung!) und der Vermeidung von Debris (Erreichung von Reinraumtauglichkeit!), siehe [17],[18].

Mikrobearbeitung mit kurzen Impulsen bei „Abkopplung“ der Wärmeleitung: Bei kontinuierlicher Lichteinstrahlung sowie bei der Einwirkung langer Impulse setzt die Wärmeleitung Grenzen für die geometrische Genauigkeit der Bearbeitung. Die Lichtabsorption – und damit die primäre Energiedeposition – kann zwar auf sehr kleine Gebiete mit Lineardimensionen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge bzw. des reziproken Absorptionskoeffizienten beschränkt werden. Aber bereits während der Einstrahlung fließt die Wärme aus der bestrahlten Region in andere Bereiche, was auch dort zu Materialveränderungen führen kann. Bei Fokussierung sehr intensiver ultrakurzer Lichtimpulse in stark absorbierendes Material wird dieses im Depositionsbereich

10 Dieser Effekt wurde auch in der Laserophthalmologie angewandt, um mit Nd:YAG-Laserimpulsen, die gemäß den linear optischen Eigenschaften bis zur Netzhaut vordringen könnten, ausschließlich im vorderen Augenbereich Wirkungen zu erzeugen und das Eindringen von Licht in tiefere Bereiche zu vermeiden.

sofort zerstört, d.h. in Gas und gegebenenfalls viele kleine flüssige und/oder feste Cluster zerlegt, die mit hoher Geschwindigkeit wegfliegen. Während dieser kurzen Zeit kann kaum Wärme in die Umgebung abfließen, weshalb man auch von einer „kalten“ Bearbeitung spricht. Hierdurch kann man die optisch möglichen Strukturgenauigkeiten und damit die bestmögliche Qualität einer optischen Bearbeitung erreichen. Allerdings muss man sich in kleinen Schritten in die Tiefe vorarbeiten, wodurch Zeitaufwand und Kosten wachsen.

5. Schlussbemerkung

Die industrielle Nutzung von Nichtlinearer Optik und Lasern steht immer noch am Anfang. Die möglichen Bearbeitungsprozesse müssen genauer erfasst und verstanden werden, um auf dieser Grundlage optimierte Verfahren und die dafür erforderlichen Anlagen zu entwickeln. Zur Erreichung hoher Qualität und Arbeitsgeschwindigkeit müssen die Prozesse voll kontrolliert werden, was die sensorische online Erfassung von Anlagenparametern und Bearbeitungsergebnissen sowie die schnelle Nutzung der Messergebnisse für die Prozessregelung erfordert.

Der Kostenaspekt darf – wie bereits erwähnt – keinesfalls außer acht gelassen werden. Um dies zu verdeutlichen, fragen wir, wie viel zur Zeit ein Mol Photonen mit einer Quantenenergie von etwa 1 eV am Ausgang von verschiedenen Systemen kostet und unterstellen dabei, dass man mit einem Mol solcher Photonen etwa ein Mol eines Materials abtragen oder Aufbringen kann. Am günstigsten liegen Hochleistungslaserdioden mit etwa 0,20 €/Mol, Festkörperlaser mit guter Strahlqualität liegen bei etwa 1–2 €/Mol und Ultrakurzeitlaser bei etwa 50–100 €/Mol. Jede zusätzliche nichtlinear optische Frequenzwandlung erhöht die Kosten nochmals um einen Faktor 2–3. Die am Werkstück vorgenommene Bearbeitung muss also (auch im Vergleich zu anderen Verfahren) so stark werterhöhend wirken, dass dieser Aufwand im Endprodukt realisiert werden kann. Deshalb sind mikrotechnische Anwendungen bevorzugt. Daraus ist weiter zu schlussfolgern, dass gerade bei der Lasermaterialbearbeitung – und besonders beim Einsatz ultrakurzer Lichtimpulse und nichtlinear optischer Frequenzwandlungen – für eine Vergrößerung der Anwendungsbreite Kostensenkungen von substantieller Bedeutung sind. Und es sei hervorgehoben, dass sich auch solche entscheidenden Kostensenkungen nur mit neuen wissenschaftlichen Ansätzen und Ergebnissen für Prozess und Ausrüstung erreichen lassen, u.a. auch zur Miniaturisierung von Systemen und Subsystemen, siehe bspw. [19], [9].

Anmerkungen

- [1] National Research Council, *Harnessing Light. Optical Science and Engineering in the 21. Century*, National Academy Press, Washington 1998
- [2] Lenkungskreis, *Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert*, VDI, Düsseldorf 2000
- [3] B. van der Pol, *Phil. Mag.*, 3, 65, 1927
- [4] S. I. Vavilov et al., *Z. Phys.* 35, 920, 1926
- [5] M. Schubert, B. Wilhelmi, *Nonlinear Optics and Quantum Electronics*, Wiley, New York 1986
- [6] B. Wilhelmi, *Nonlinear Optics*, in „*Electrical Engineering*“, U. Magdeburg 1999, S. 285
- [7] CLEO Europe, München 2003, *Conference Digest on CD*
- [8] F. Krausz, CLEO Europe, München 2003, *Conference Digest on CD*, und *Physik Journal*, März 2003, S. 45
- [9] B. Wilhelmi, in “*Lasers in Research and Engineering*”, Springer, Berlin 1999, S. 739
- [10] J. Herrmann, B. Wilhelmi, *Lasers for Ultrashort Light Pulses*, 2. Aufl., Akademie, Berlin 1987 und North Holland, Amsterdam 1987
- [11] W. Rudolph, B. Wilhelmi, *Light Pulse Compression*, Harwood, Chur, 1989
- [12] J. Diels, W. Rudolph, *Ultrashort Laser Pulse Phenomena*, 2. Aufl., Academic, San Diego, 2003
- [13] U. Keller, *Semiconductors and Semimetals*, 59, 211, 1999
- [14] J. Diels et al., *J. Opt. Soc. Am.*, B2, 680, 1985
- [15] G. Hollemann et al., *SPIE*, 3954, p. 140, 2000
- [16] Braun et al., CLEO Europe, München 2003, *Conference Digest on CD*
- [17] B. Wilhelmi, 41. IWK, Ilmenau 1996, S. 21
- [18] S. Georgi, LPM 2003, München 2003, *Conference Digest*
- [19] B. Wilhelmi, *Microwave and Opt. Techn. Lett.*, 17, 111, 1998