

Lasertechnik

Mit neuen Strahlquellen und erweiterten Parametern zu innovativen Anwendungen

Andreas Ostendorf

„Den Rest meines Lebens möchte ich damit zubringen, darüber nachzudenken, was Licht ist.“ (Albert Einstein)

Als Arthur L. Schawlow, ein Wissenschaftler bei den Bell Labs, und Charles H. Townes, beratend für die Bell Labs tätig, 1958 den Laser erfanden und diesen auf der Grundlage von Einsteins Quantenmechanik von 1917 zur spontanen und stimulierten Emission berechneten, ahnten sie noch nicht, welchen dynamischen Verlauf diese Entwicklung jemals nehmen würde. Ihre Veröffentlichung „Infrared and Optical Masers“ in der Fachzeitschrift *Physical Review* hat nicht nur ein vollständig neues wissenschaftliches Feld eröffnet, sondern in der Retrospektive auch einen Multimilliarden-Dollar Markt hervorgebracht. Ihre wissenschaftlichen Arbeiten hatten keineswegs den Plan, ein Gerät zu entwickeln, das einmal zahlreiche Technologien von der Medizin bis zur Telekommunikation revolutionieren sollte. Ihre Absicht war es vielmehr, nach einer Lösung für ein konkretes Problem zu suchen. Mit Hilfe der Mikrowellen-Spektroskopie wollten sie molekulare Strukturen studieren und analysieren. Zwei Jahre später, 1960, realisierte Theodore H. Maiman bei Hughes Aircraft Company den ersten Laser mit einem Rubinstab, und ein Jahr darauf erfanden Ali Javan, William R. Bennett, Jr. und Donald Herriott, ebenfalls bei den Bell Labs, den ersten Helium-Neon-Laser. Im selben Jahr entwickelte Robert J. Collins das Prinzip der Güteschaltung zur Erzeugung kurzer Laserpulse bis in den Nanosekunden-Bereich. Bereits 1965 wurden durch Modenkopplung erste ultrakurze Pulse im Pikosekunden-Bereich (1 billionstel sek) erzeugt. So wurde in den letzten 40 Jahren aufgrund dieser ersten Pionierarbeiten das Feld der Anwendungen durch neue Laserparameter kontinuierlich erweitert. Für ihre Arbeiten erhielten Townes 1964 und Schawlow 1981 den Nobelpreis.

Laser haben sich heute ein breites Wissenschafts- und Anwendungsspektrum erobert. Dies reicht von der Produktions- und Fertigungstechnik über die Disziplinen Medizin, Biotechnologie, Meßtechnik, Kommunikationstechnik bis hin zur Unterhaltungselektronik. Nachdem die Grundlagen von Einstein bis Schawlow in den Jahren 1917 bis 1958 erarbeitet wurden, kamen in der Folgezeit immer neue Lasermaterialien hinzu. Das Wellenlängenspektrum für Laserstrahlung wurde vom fernen Infrarot-Bereich bis in den Ultraviolett-Bereich sukzessive erweitert. Daneben ist es mit Methoden der nichtlinearen Optik heute möglich, Frequenzen zu vervielfachen und damit noch vorhandene Lücken im Spektrum zu schließen. Die gegenwärtig verfügbare Breite des Spektrums von Laserwellenlängen erstreckt sich über nahezu 10 Oktaven von 10 Mikrometer bis 10 Nanometer. Die Lasertechniken wurden von der Güteschaltung bis zur Modenkopplung weiterentwickelt. Damit stehen gepulste Strahlungsquellen mit Pulsdauern

bis hinunter zu einigen Femtosekunden (10^{-15} s) zur Verfügung [1]. Die zugehörigen Pulsleistungen können dabei Größenordnungen von Terawatt erreichen. Bei kontinuierlich emittierenden Lasersystemen, d.h. ungepulsten Systemen, stehen heute mehrere Kilowatt Ausgangsleistung mit sehr guter Strahlqualität zur Verfügung. Derartige Strahlquellen lassen sich bei kleineren Leistungen stabilisieren und hinsichtlich der Bandbreite minimieren. Hierdurch eröffnen sich neue Anwendungen auch in der ultrapräzisen Meßtechnik. Im Folgenden wird anhand von vier Beispielen gezeigt, wie die Erschließung neuer Erkenntnisse zu immer neuen Anwendungen geführt hat.

Von Nanosekunden zu Femtosekunden-Laserpulsen

Bereits 1963 wurde das Prinzip der Güteschaltung des Laserresonators angewandt, um Nanosekunden (ns)-Laserpulse (10^{-9} s) zu erzeugen. Eine Ver-

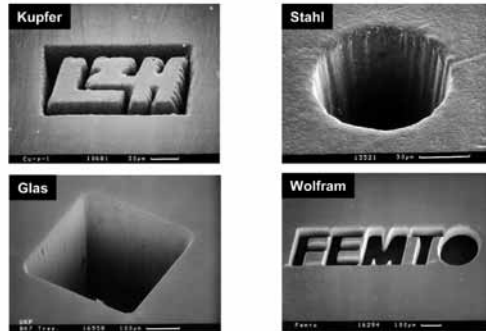
kürzung der Pulse bis in den Pikosekunden (ps)-Bereich (10^{-12} s) und darunter gelang 1965 durch die Modenkopplung. Das Grundprinzip der Modenkopplung beruht auf einem schnellen Verschluss, der jedes Mal, wenn der im Resonator umlaufende Puls auf den Verschluss trifft, geöffnet und anschließend wieder geschlossen wird. Dabei gelangen die einzelnen longitudinalen Resonatormoden, d.h. die angeschwungenen Wellenlängen, in eine feste Phasenbeziehung. Diese phasenbezogene Kopplung führt im Gegensatz zu einer statischen zu einer in den Pulsen sehr viel intensiveren Überlagerung der einzelnen Wellenlängen. Unterschieden wird dabei zwischen aktiver und passiver Modenkopplung. Bei der aktiven Modenkopplung wird der Verschluss extern gesteuert. Bei der heute überwiegend eingesetzten passiven Modenkopplung wird der Verschluss durch den Puls selbst aktiviert. Derartige Komponenten sind z.B. sättigbare Absorber, die auf dem Ausbleichen eines Farbstoffes bei genügend hohen Intensitäten basieren. Mit diesem Verfahren können Pulsdauern bis unter 20 Femtosekunden (fs) ($20 \cdot 10^{-15}$ s) erzeugt werden.

Die Anwendung von Femtosekundenpulsen hat große Vorteile in der zeitaufgelösten Untersuchung ultraschneller Prozesse z. B. in der chemische Reaktionskinetik. Bedeutsam ist die Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit unterschiedlichen Materialien. Bei der Absorption in Metallen [2] kommt es zunächst zur Energiekopplung der einfallenden Strahlung in das Elektronensystem. Die freien Elektronen werden beschleunigt, es folgt eine Stoßionisation. Der Absorption folgt die schnelle Energielaxation innerhalb des Elektronensystems (Größenordnung 10 fs) und der Wärmetransport in den Festkörper. Im Gegensatz zu längeren Laserpulsen verlaufen diese Prozesse bei Femtosekundenpulsen nicht im Gleichgewichtszustand, d.h. es kommt nicht zur Ausbildung einer Gleichgewichtstemperatur zwischen Elektronen und Festkörpergitter. Bei dielektrischen und halbleitenden Werkstoffen ist dieser Prozeß analog, da die mit den Femtosekundenpulsen verbundenen hohen Intensitäten eine Multiphotonenabsorption ermöglichen, d.h. es werden zunächst ausreichend freie Elektronen erzeugt, die den o.a. Prozeß wie bei Metallen anstoßen. Dies führt zu einer bedeutenden Eigenschaft von Fem-

tosekundenlasern, da bei ausreichender Intensität alle Werkstoffklassen mit nahezu gleicher Präzision bearbeitet werden können (Abb. 1). Das Ausbleiben einer stationären Gleichgewichtstemperatur führt dazu, daß das Material nahezu abrupft in

Mikromaterialbearbeitung

- Stoffe hoher Transmission (Glas)
- Stoffe hoher Wärmeleitung (Metalle)
- temperaturkritische (organische) Stoffe



Medizin(-technik)

- Koronar- Chirurgie
- Augenheilkunde
- Zahnmedizin

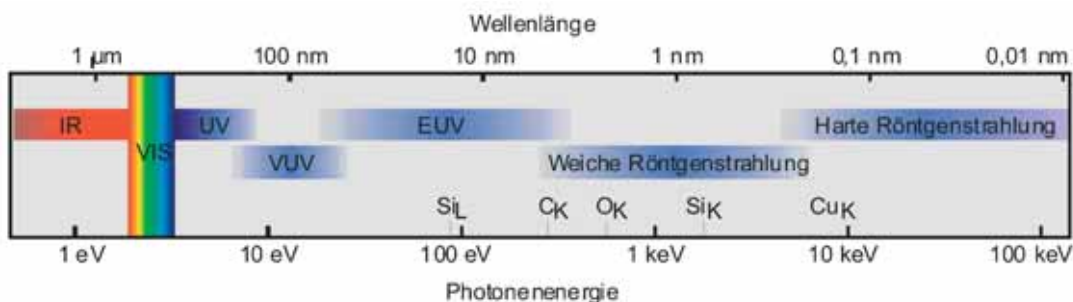
ein Mikroplasma transformiert wird, welches expandiert und infolgedessen zu einem Materialabtrag führt. Eine durch thermische Diffusion im Festkörpergitter verursachte schmelzflüssige Phase, welche die Reproduzierbarkeit der Abtragsgeometrie in der Regel einschränkt, wird bei diesem Verfahren nahezu unterdrückt. Die erreichbare Präzision beim Materialabtrag mit Femtosekunden-Laserpulsen reicht bis in den Nanometerbereich.

Von Ultraviolett-Lasern zu extremen Ultraviolett-Quellen

Im elektromagnetischen Spektrum findet sich zwischen dem Vakuum-Ultraviolett (VUV)-Bereich und den weichen Röntgenstrahlen eine bis vor kurzem wenig genutzte Region: Das extreme Ultraviolett (EUV) (Abb. 2). Während sich natürliche Strahlungsquellen für EUV-Strahlung nur im Weltraum finden, wurde dieser Spektralbereich auf der Erde erst in den 50er Jahren des vergangenen Jahrhunderts durch die Entdeckung der Synchrotronstrahlung zugänglich. Die kurze Wellenlänge ermöglicht die Fokussierung der Strahlung und die Bearbeitung von Strukturen im Nanome-

Abb. 1 Durch Wechselwirkung ultrakurzer Laserpulse mit Materie lassen sich nahezu alle Werkstoffe mit höchster Präzision strukturieren. Neben Metallen mit hoher Wärme- und Elektrotenleitfähigkeit (z.B. Kupfer) können Halbleiter und Materialien mit Bandlücke (Glas, Polymere, Keramik, etc.) bearbeitet werden

Abb. 2 Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Spektrum. Verfügbare Laserstrahlung reicht vom fernen Infrarotbereich (10,6 µm: CO₂-Laser) bis in den VUV-Bereich (157 nm: F₂-Laser). Für die Herstellung von Strukturen mit wenigen zehn Nanometern werden Belichtungsquellen im EUV-Spektralbereich benötigt



terbereich. Besondere Beachtung hat dieser Spektralbereich in den letzten Jahren durch die Mikrochiplithographie erhalten. Da die bisher genutzten UV-Wellenlängen der Excimer-Laser (308 nm, 248 nm, 193 nm und 157 nm) bis an die physikalischen Grenzen ausgereizt sind, wird auf der Suche nach geeigneten Wellenlängen zur Herstellung kleinster Strukturen die Nutzung von elektromagnetischer Strahlung bis hinunter zu einer Wellenlänge von 13,5 nm angestrebt.

Generell herrscht im EUV-Bereich noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Industrie und Universitäten suchen mit Hochdruck nach geeigneten Strahlquellenkonzepten für die jeweiligen Anwendungen. Das Spektrum der Anforderungen reicht dabei von schmalbandiger monochromatischer Strahlung für die Photoelektronenspektroskopie bis zu breitbandiger intensiver Strahlung für die Projektionslithographie im EUV-Bereich.

Neben Synchrotrons und Röntgenröhren sind dichte heiße Plasmen bis zu Temperaturen von 220.000 K (20 eV) Strahlungsquellen im EUV. Während Synchrotrons den Großforschungseinrichtungen vorbehalten bleiben, können EUV-Röhren und Plasmastrahlungsquellen durchaus kompakt aufgebaut werden.

Plasmastrahlungsquellen werden durch elektrische Gasentladungen oder durch die Beleuchtung von Materie mit Strahlung hoher Intensität realisiert [3]. Hier kommen besonders laserproduzierte Plasmen zum Einsatz: Gepulste Laserstrahlung mit Intensitäten größer als 10^{10} W/cm² wird auf eine Targetoberfläche eingestrahlt. Die Wechselwirkung der Strahlung mit dem Target führt zur Bildung eines Plasmas. Aus diesem Plasma werden Bremsstrahlung, Rekombinationsstrahlung und eine charakteristische Linienstrahlung entsprechend der elektronischen Übergänge emittiert. In die Charakteristik der Strahlung gehen sowohl die Eigenschaften des Targets als auch die der Laserstrahlung ein. Dieses Konzept wird besonders für die EUV-Lithographie verfolgt, da erwartet wird, daß es auf die benötigten hohen Leistungen skaliert werden kann. Geringere Leistungen, wie sie z.B. für die Entwicklung von Optiken benötigt werden, lassen sich in einem deutlich kompakteren Aufbau mittels Elektronenröhren mit Silizium-Targets erzeugen. Dem Mangel an Strahlungsquellen stand bis vor kurzem ein ebensolcher Mangel an Optiken entgegen. Da für Wellenlängen kürzer als 100 nm keine transparenten Materialien zur Verfügung stehen, können traditionelle Linsenoptiken nicht gefertigt werden. Auch die Effizienz reflektiver Optiken ist geringer als beispielsweise im sichtbaren Spektralbereich. Genutzt werden komplexe reflektive Optiken, die aus Mehrschichtsystemen bestehen. Die Anforderungen – besonders an die Oberflächenqualität – sind dabei enorm. Nach erheblichen Forschungsanstrengungen können heute in sehr aufwendigen Herstellungsprozessen Spie-

gel mit Reflektivitäten um 70% bei 13,5 nm hergestellt werden.

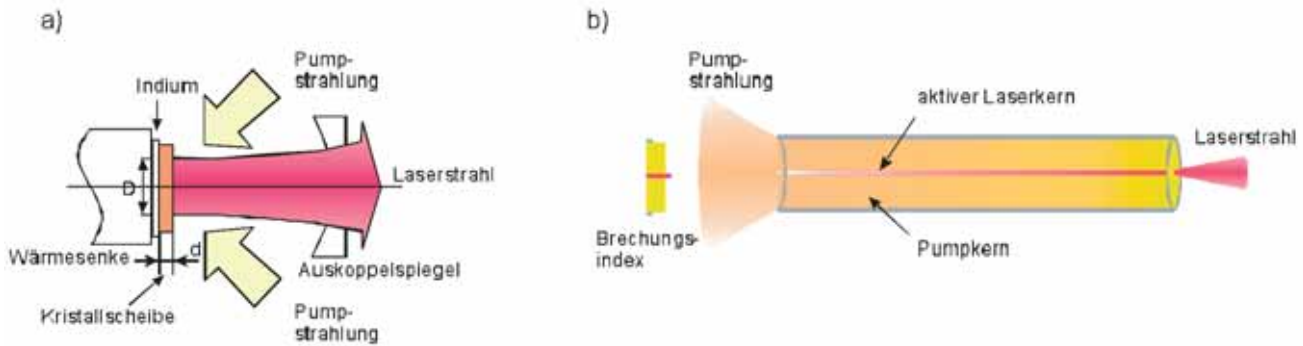
Eine große Zahl möglicher EUV-Anwendungen wartet im Labor auf breiten Einsatz. Dazu zählen beispielsweise die EUV-Mikroskopie, die Absorptionsspektroskopie, die direkte Strukturierung im Nanometerbereich und die Photoelektronenspektroskopie. In der Photoelektronenspektroskopie wechselwirkt monochromatische Strahlung mit Materie und löst durch den photoelektrischen Effekt gebundene Elektronen aus den inneren Schalen der Atome. Die ausgelösten Elektronen werden dann energiewahlweise nachgewiesen.

Bedingt durch das große kommerzielle Interesse liegt das Hauptaugenmerk derzeit im Bereich der Halbleiter-Lithographie. Im Jahr 2005 wird der erste Prototyp eines Wafer-Belichtungsautomaten mit einer EUV-Belichtungsquelle erwartet. Die Marktreife für Halbleiterstrukturen, die mit EUV-Strahlung erzeugt werden, wird nach den Plänen der Halbleiterhersteller bis 2009 angestrebt. Bis dahin sind noch viele technische Probleme zu lösen.

Hohe Laserleistungen mit verbesserter Strahlqualität

Die Entwicklung von Dauerstrichlasern, d.h. kontinuierlich emittierenden Lasern, mit hohen Ausgangsleistungen hat in der jüngsten Zeit große Fortschritte gemacht. Dabei lag der Fokus weniger auf einer Erzielung immer höherer Ausgangsleistungen über 6 kW, sondern mehr auf der Optimierung der Strahlqualität bei Leistungen von 2-6 kW. Insbesondere im Bereich der Festkörperlaser (FKL) wurden hier bestehende Limitierungen durch neue Laserkonzepte überwunden [4].

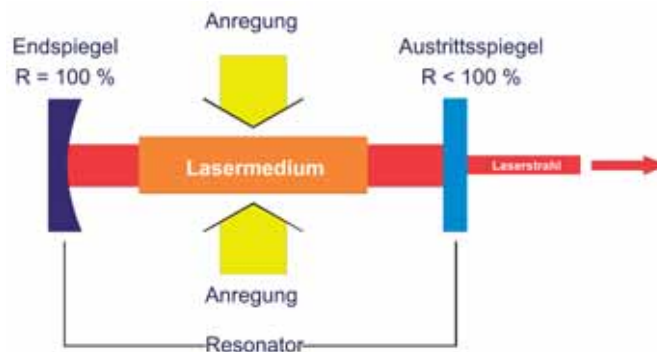
Die auch für die Zukunft Erfolg versprechenden Konzepte sind hierbei der Faserlaser und der Scheibenlaser. (Abb. 3) In beiden Fällen wurde die Entwicklung von immer leistungsfähigeren Laserdioden als Pumpquellen getrieben. Im Fall des Scheibenlasers wurde der bisher störende Effekt der thermischen Linsenwirkung im Laserkristall durch eine effiziente Kühlung des aktiven Mediums in Form einer dünnen Scheibe (typ. $d=100$ μ m) minimiert. Durch geeignete Anordnung der Pumpstrahlung werden bis zu sechzehn Durchläufe eines Pumpstrahls durch die Scheibe realisiert, die zu einer hohen Absorption der Pumpleistung trotz der geringen Dicke des Mediums führen. Ferner sind Pumpwellenlänge (940 nm) und Laserwellenlänge (1030 nm) im Spektrum näher zusammen gerückt, so daß die Verlustleistung im Medium reduziert wurde. So wird ein optischer Wirkungsgrad von über 60% erreicht. Bei Faserlasern wird der Kern einer Lichtleitfaser mit laseraktiven Materialien dotiert. Im Gegensatz zum Scheibenlaser wird der thermische Verlust beim Faserlaser nicht über die Stirnfläche, sondern über die Mantelfläche abgeführt. Eine Faser besitzt bei



Erklärungstafel

Laser: Abk. für engl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation „Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsemission“. Grundlage des Laserprinzips ist die Anregung einer stehenden Welle in einem Resonator zwischen einem reflektiven und einem teildurchlässigen Spiegel in einem homogenen Medium. Durch externe Energiezufuhr (z.B. Lichtstrahlung oder elektrische Energie) werden Elektronen im Medium auf ein höheres Energieniveau angehoben (Besetzungsinversion durch das sog. Pumpen). Kehren diese Elektronen in ein tieferes Energieniveau zurück, so entsteht durch das dabei ausgesandte Licht eine sich verstärkende zwischen den Spiegeln stehende Welle, die durch den teildurchlässigen Spiegel entweder kontinuierlich (Dauerstrichlaser) oder gepulst (Pulslaser) austreten kann. Je nach Lasermedium wird zwischen Festkörperlaser (z.B. Nd:YAG) und Gaslasern (z.B. CO₂) unterschieden. Laser erzeugen kohärente, monochromatische, sehr intensive und scharf gebündelte Lichtstrahlen.

Nichtlineare Optik: Die hohen Leistungsdichten, die mit heutigen Lasern erzeugt werden können, ermöglichen Effekte, die über die optischen Phänomene der klassischen Physik hinausgehen. Von besonderer Bedeutung ist die Intensitätsabhängigkeit des Brechungsindex, die z.B. den Kerr-Linsen-Effekt begründet. Dabei ruft eine intensitätsabhängige Modulation des Brechungsindex im Material eine Linsenwirkung hervor. Ein weiteres Beispiel für die Nutzung von nichtlinearen Effekten in der Lasertechnik ist die Frequenzkonversion, d.h. die Vervielfältigung der optischen Lichtfrequenz.



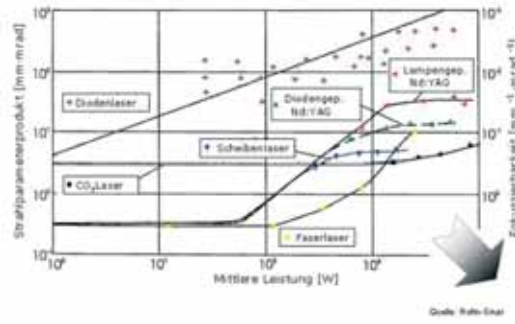
Güteschaltung: Bei der Güteschaltung wird über einen schnellen Schalter im Resonator ein Pulsbetrieb mit sehr hohen Pulsleistungen und kurzen Pulsdauern bewirkt. Der zunächst geschlossene Schalter bewirkt ein Anregen ohne Entladung durch den Laserbetrieb. Beim Öffnen wird die gespeicherte Energie schlagartig über den teildurchlässigen Spiegel in Form eines Laserpulses ausgekoppelt.

Modenkopplung: Das Prinzip der Modenkopplung basiert auf der phasengekoppelten Überlagerung möglichst vieler angeschwungener Laserwellenlängen innerhalb einer definierten Bandbreite. Modengekoppelte Laserpulse sind in der Regel extrem kurz und verfügen über sehr hohe Pulsleistungen. Die Erzeugung einer konstanten Phase zwischen den einzelnen Wellenlängen geschieht in der Regel aktiv oder passiv über nichtlineare optische Komponenten.

Projektions-Lithographie: Bei der Herstellung von mikroelektronischen Schaltkreisen auf Halbleitern wird das Schaltungsdesign in der Regel über eine Lichtprojektion verkleinert auf den Halbleiter übertragen. Die Integrationsdichte ist dabei mit abnehmender Belichtungswellenlänge zunehmend, d.h. je kleiner die verwendete Belichtungswellenlänge, desto geringer die theoretisch minimalen Strukturen.

Abb. 3
Prinzipische Skizze Scheibenlaser (a) und Faserlaser (b). Beim Scheibenlaser erfolgt eine Kühlung über die Stirnseite der dünnen aktiv dotierten Scheibe, so daß die Strahlqualität nicht durch thermische Effekte negativ beeinflusst wird. Beim Faserlaser wird die Strahlqualität durch den Faseraufbau vorgegeben. Die Wärmeabfuhr erfolgt über die Mantelfläche

Abb. 4
Leistung und Strahlqualität verschiedener Lasersysteme. Die Grafik zeigt die konkurrierenden Ansätze Scheiben- und Faserlaser. Für Anwendungen in der Ebene ist der CO₂-Laser aufgrund seines günstigen Preis/Leistungsverhältnisses häufig überlegen. Dreidimensionale Anwendungen wie im Fahrzeugbau erfordern jedoch in der Regel fasergeführte Systeme im Nahinfrarotbereich wie Scheiben- oder Faserlaser

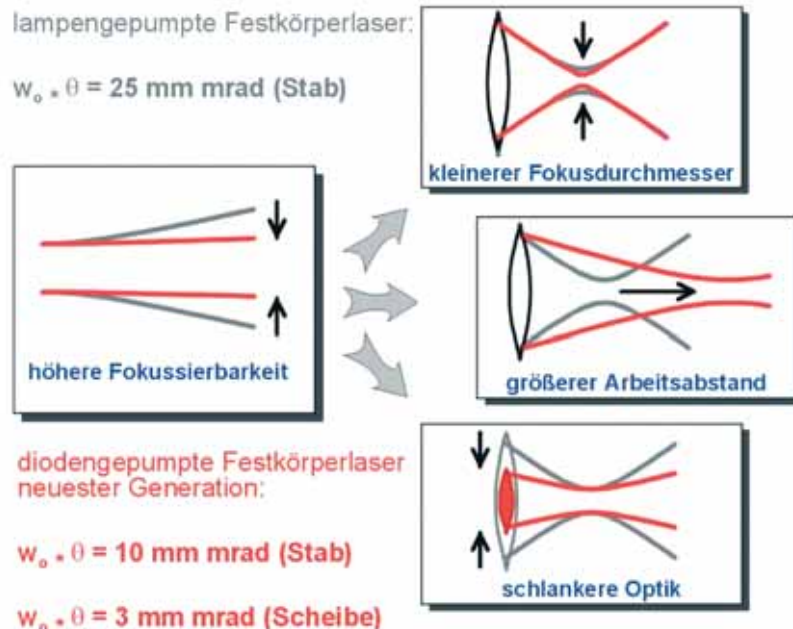


einer langen Wechselwirkungslänge für Pumpstrahlung ein außerordentlich günstiges Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Der Mechanismus des optischen Pumpens wird durch neuartige Technologien der Leistungseinspeisung und durch spezielle Geometrien des Faserkerns optimiert. Dabei wird die eingekoppelte Pumpleistung nicht mehr durch die Faserendflächen limitiert, sondern kann über einen als Pumpkern wirkenden Fasermantel zugeführt werden. Die damit erzielte Leistung beträgt gegenwärtig bis zu 500 W aus einer Faser mit einem Kerndurchmesser von 25 µm. Die erzielten Strahlqualitäten verschiedener Lasersysteme sind in Abb. 4 dargestellt.

Der Begriff Strahlqualität definiert die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung und wird quantitativ im Strahlparameterprodukt angegeben. Dieses Produkt setzt sich aus dem Divergenzwinkel und dem Durchmesser des Lichtstrahls beim Austritt aus dem Laser zusammen und ist eine für einen Laser charakteristische Größe. Eine hohe Leistungsdichte kann nur durch eine gute Fokussierbarkeit erreicht werden. Mit einer erhöhten Strahlqualität erschließen sich vielfältige neue Anwendungsfelder. Drei typische Nutzungsmöglichkeiten sind in Abb. 5 dargestellt.

Zunächst kann bei gleichbleibender Optik ein kleinerer Fokus und damit eine höhere Leistungsdichte erzielt werden. In der Automobilindustrie und im Flugzeugbau sind verzugminimierte Schweißnähte von großer Bedeutung. Durch die höhere Strahlqualität läßt sich die Laserstrahlung auf einen kleineren Spot fokussieren, was zu einer kleineren Wärmeeinflußzone führt und damit zu einem geringeren Verzug des Bauteils. Außerdem kann die Schweißgeschwindigkeit deutlich erhöht werden. Ein weiterer Nutzen verbesserter Strahlqualität ist die Vergrößerung des Arbeitsabstandes. Bei konstantem Fokusdurchmesser kann die Brennweite der Fokussierung erhöht werden (Abb. 5 Mitte). Diese Zielsetzung wird bei Scannersystemen verfolgt. Hier können die Positionier- und Nebenzeiten minimiert werden, indem der Laserstrahl nicht durch Roboter über das Werkstück geführt wird, sondern über Spiegelsysteme nahezu trägheitslos bewegt wird. Insbesondere bei Anwendungen wie dem Schweißen von kurzen Steppnähten werden die Produktionszeiten durch die Scannernutzung um ca. 50% reduziert. Die Größe des Arbeitsfelds wird in diesem Fall von der Brennweite der Optik begrenzt, so daß eine hohe Strahlqualität automatisch ein großes Arbeitsfeld z.B. für Schweißprozesse ermöglicht (Abb. 6). Ein dritter, weniger häufiger Vorteil liegt in der Verschlankung der Optik. Bei gleichen optischen Abständen und Fokusgrößen kann der Durchmesser der Strahlführung reduziert werden, was zu leichteren und handlicheren Optiksyste-men führt. Dies ist insbesondere bei der Miniaturisierung von Bearbeitungsstationen von Interesse. Aus diesen Anwendungsfeldern erklärt sich die gesteigerte Nachfrage nach Lasersystemen, die eine Laserleistung im Bereich mehrerer Kilowatt bei gleichzeitig sehr hoher Strahlqualität besitzen. Ein

Abb. 5
Vorteile von Lasern mit verbesserter Strahlqualität. Heute noch vorwiegend eingesetzte lampengepumpte Laser (in grau) sind für viele Anwendungen limitiert. Zukünftige diodengepumpte Laser (in rot) lassen sich durch ihre gute Strahlqualität besser fokussieren und öffnen damit neue Anwendungen



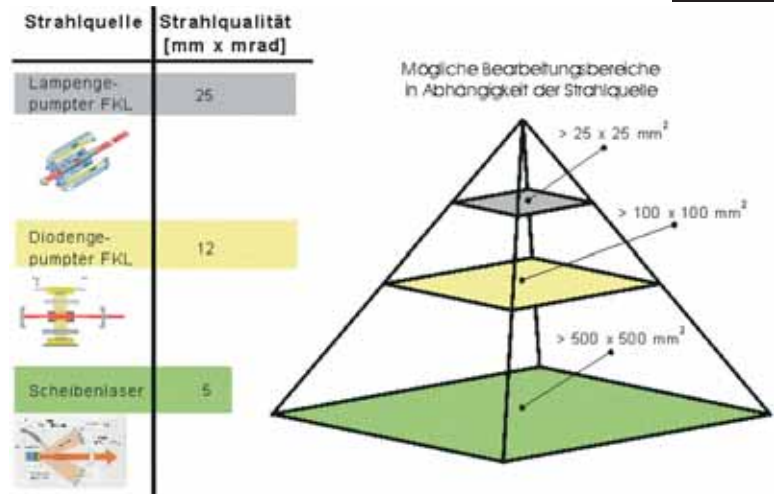
Quelle: Rofin-Sinar

zusätzliches Qualitätsmerkmal sowohl des Scheibenlasers als auch des Faserlasers ist die hohe Flexibilität, die beide Systeme durch einfache Strahlführung über Lichtwellenleiter haben.

Hochstabile Lasersysteme für die Gravitationswellenastronomie

Die allgemeine Relativitätstheorie ist Albert Einsteins Theorie der Schwerkraft von 1915. Sie beschreibt die Gravitation nicht als Kraft, sondern als Aspekt der Geometrie des Raum-Zeit-Kontinuums („Raumzeit“). Sterne und Galaxien rufen eine Krümmung dieser Raumzeit hervor; Licht und Materie sind gezwungen, durch den so verzerrten Raum zu laufen und der Krümmung zu folgen. Da sich alle Massen in Bewegung befinden, ändert sich die Geometrie der Raumzeit ständig. Die dabei auftretenden Änderungen des Gravitationsfeldes können sich nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Das führt zwangsläufig zu einer als Welle fortschreitenden Erscheinung. Sie äußert sich in der Verformung der Raumzeit, d.h. in einer periodischen Abstandsänderung zwischen benachbarten Probmassen – den Gravitationswellen. Unter den vielen bestandenen Tests der allgemeinen Relativitätstheorie ist es besonders die Voraussage von Gravitationswellen, die noch der Bestätigung durch einen direkten Nachweis harret. Der experimentelle Nachweis besteht aufgrund der periodischen Abstandsänderung „nur“ in einer einfachen Längenmessung. Beobachtbare Gravitationswellen werden jedoch nur von kompakten kosmischen Objekten und Vorgängen mit großen Beschleunigungen erzeugt, z.B. Sternexplosionen (Supernovae), superschwere Schwarze Löcher oder schnell umeinander kreisende Neutronensterne [5].

Selbst wenn diese Quellen in der Milchstraße oder einer Nachbargalaxis liegen, rufen sie auf der Erde relative Längenänderungen von bestenfalls nur 10^{-18} hervor, typischerweise sogar nur 10^{-21} , d.h. eine Strecke von 3 km Länge ändert sich nur um ein Tausendstel eines Protonendurchmessers. Zur Messung derart kleiner Signale sind Interferometer vom Michelson-Typ ideal geeignet. Sie messen die Verschiebung zwischen zwei Lichtwellen, die gleichzeitig die unter einem rechten Winkel stehenden Interferometerarme durchlaufen. Verändert eine Gravitationswelle die Länge der beiden Arme (Stauchung und Streckung), so ergibt sich



eine Phasenverschiebung. Die Verschiebung entspricht dem Längenunterschied δ_l beider Arme. Die Dehnung des Raumes h , kann somit beschrieben werden als

$$h = \frac{2 \cdot \delta_l}{l} \leq 10^{-21}$$

wobei Z der Länge der Interferometerarme entspricht (Abb. 7).

Mit Hilfe von Interferometern, die eine Armlänge von bis zu 4 km aufweisen, soll die benötigte Meßempfindlichkeit erzielt werden. Die zum Erreichen dieser Empfindlichkeit benötigte zirkulierende Laserleistung muß dabei einige 100 kW betragen. Eine solche Laserleistung läßt sich nur mit Hilfe von Interferometer internen speziellen Fabry-Perot Resonatoren und einer brillanten Hochleistungslaserstrahlquelle erreichen. Die Entwicklung derart hochspezifischer Laserstrahlquellen erfordert neue Wege auf dem Gebiet der Laserentwicklung. So muß das Lasersystem für den „advanced LIGO“ Detektor bei einer Ausgangsleistung von ca. 200 W einen nahezu beugungsbegrenzten Strahl aufweisen, d.h. der theoretisch optimalen Strahlqualität sehr nahe kommen. Weiterhin muß eine Amplituden- und Frequenzstabilität von $2 \cdot 10^{-9} \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ und $10 \text{ Hz} / \sqrt{\text{Hz}}$ jeweils bei 10 Hz erreicht werden.

Physiker und Ingenieure entwickeln derzeit in weltweiten Teams Lasersysteme, die den enormen meßtechnischen Anforderungen gewachsen sind.

Abb. 6 Erweiterung des Bearbeitungsraumes bei der Scannerbearbeitung mit variabler Strahlqualität. Für lampengepumpte Festkörperlaser sind bei einer schnellen Scannerbearbeitung nur kurze Brennweiten einsetzbar. Das Arbeitsfeld ist daher vergleichsweise klein. Mit besserer Strahlqualität können längere Brennweiten für die Fokussierlinse genutzt werden. Der Arbeitsraum ist damit größer

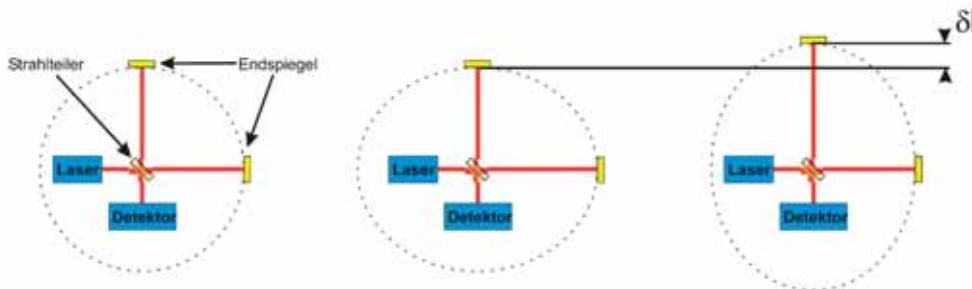


Abb. 7 a) Aufbau eines Gravitationswellendetektors in Form eines Michelson-Interferometers. b, c) Streckung bzw. Stauchung der Interferometerarme wie sie von einer Gravitationswelle ausgelöst würden

Herzstück dieser Systeme sind hochstabile Laser, die auf einem Miniatur-Einkristall-Laser (Miser) aufbauen. Der Miser verfügt über eine große Intensitäts- und Frequenzstabilität, ist jedoch in seiner Ausgangsleistung auf ca. 2 W begrenzt. Die Ausgangsleistung des Misers reicht daher nicht aus, um die erforderliche Detektorempfindlichkeit zu erreichen. So muß dessen Leistung durch weitere Lasersysteme erhöht werden. Für den deutsch-britischen GEO 600 Detektor wird der Miser-Laser genutzt, um seine Stabilitätseigenschaften mittels „injection-locking“ auf eine Leistungslaserstufe zu übertragen. Für den GEO 600 Detektor wurden so 12W, für den VIRGO Detektor mehr als 20 W erreicht. Für das Erreichen des 200 W Lasersystems wird eine weitere Hochleistungsstufe an die schon vorhandene 12 W Stufe gekoppelt [6].

Die Anwendung dieser hochspezifischen Strahlquellen könnte in Zukunft auch in anderen Bereichen der Grundlagenforschung wie z. B. der Spektroskopie liegen. Sicher ist jedoch, daß mit wissenschaftlichen Anwendungen wie dem Gravitationswellenexperiment neue Felder z.B. in der Astronomie eröffnet werden, die in den nächsten Jahrzehnten immer empfindlichere Meßinstrumente und somit Laserstrahlquellen höchster Stabilität benötigen.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Andreas Ostendorf
Laser Zentrum Hannover e.V.
Hollerithallee 8
30419 Hannover

Literatur

- [1] J. Meijer; K. Du, A. Gillner; D. Hoffmann, V.S. Kovalenko, T. Masuzawa, A. Ostendorf, R. Poprawe, W. Schulz: Laser Machining by Short and Ultrashort Pulses, State of the Art and New Opportunities in the Age of the Photons. In: Manufacturing Technology, Annals of the CIRP, 51 (2002), Nr. 2, 531 – 550
- [2] G. Kamlage, T. Bauer, A. Ostendorf, B.N. Chichkov: Deep Drilling of Metals by Femtosecond Laser Pulses. Appl. Phys. A, 77 (2003), Nr. 2, 307 – 310
- [3] U. Stamm, H. Schwoerer, R. Lebert: Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie, Physik Journal, 12 (2002), 33-39
- [4] Handbook of Laser Technology and Applications: Volume 2: Laser Design and Laser Systems, Part B, Ed. C.E. Webb, J.D.C. Jones, IOP Publishing, 2003
- [5] P. Aufmuth, K. Danzmann: Auftakt zum Konzert der Sterne, Physik Journal, 1 (2002), 33 – 38
- [6] I. Zawischa, M. Brendel, K. Danzmann, C. Fallnich, M. Heurs, S. Nagano, V. Quetschke, H. Welling, B. Willke: The GEO 600 laser system, Class. Quantum Grav. 19 (2002) 1775 – 1781

Wissenschaftsmanagement

ZEITSCHRIFT FÜR INNOVATION

Die Zeitschrift **Wissenschaftsmanagement** versachlicht die Diskussion um die Innovationsfähigkeit, Effektivität und Effizienz von Wissenschafts- und F&E-Einrichtungen und gibt den Praktikern eine anwendungsbezogene, betriebswirtschaftliche Orientierung für eine selbstverantwortliche, innerbetriebliche Steuerung ihrer Organisation.

Experten und Redakteure berichten über praxisorientierte Themen aus allen Bereichen des Wissenschafts- und Forschungsmanagements.

Wissenschaftsmanagement richtet sich an alle, die in ihren Einrichtungen und Unternehmen vor allem die Aufgabe haben, Managementprozesse in



ISSN 0947-9546
Jahresabonnement
6 Hefte pro Jahr, 107,00 €
Einzelheft 18,50 €

Wissenschafts- und Forschungskomplexen zu steuern und zu optimieren (Organisation), Forschungsbedingungen auszubauen (Investition) sowie Ergebnisse aus Wissenschaft und Forschung in Märkte zu transportieren (Transfer).

Fallbeispiele, Praxisberichte, nationale und internationale Trendmeldungen sowie Interviews ergänzen die Informationspalette über Managementfragen in Wissenschaft und Forschung. Fragen des nationalen und internationalen Rechts werden dabei

ebenso einbezogen wie politische und administrative Aspekte oder innovationsgerichtete Wirtschaftstrends.

Aus dem Inhalt:

- ◆ **news & facts**
Trends und Entwicklungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik
- ◆ **management**
Umfassende Fachbeiträge von Experten, best practice-Beispiele
- ◆ **weiterbildung**
Lexikalische Beiträge zu Schlüsselbegriffen im Wissenschaftsmanagement
- ◆ **buchbesprechung**
Vorstellung und Bewertung relevanter Neuerscheinungen
- ◆ **buchmarkt**
Tipps zu neuen Publikationen in den Themenfeldern Management, Innovation und Organisation

Lemmens



Kostenlose Probeexemplare erhalten Sie per E-Mail unter info@lemmens.de, telefonisch +49 (0)2 28/4 21 37-0 oder per Fax +49 (0)2 28/4 21 37-29, weitere Infos unter www.lemmens.de

