

50 JAHRE LASER

Von Scheiben und Fasern

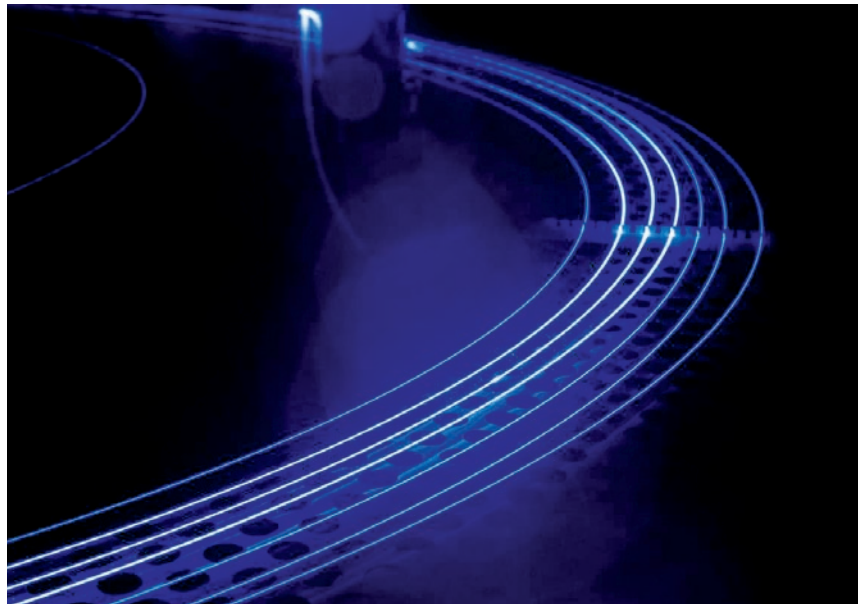
Ein halbes Jahrhundert nach dem ersten Festkörperlaser erobern Scheiben- und Faserlaser einen festen Platz in der Materialbearbeitung.

Adolf Giesen, Jens Limpert, Jochen Speiser und Andreas Tünnermann

Die Materialbearbeitung mit Lasern, z. B. das Schneiden von Blechen oder das Schweißen von Metallteilen, war lange die alleinige Domäne von CO₂-Lasern. Denn Festkörperlaser, deren Prinzip seit Maimans Rubinlaser zunächst über viele Jahre praktisch unverändert blieb, waren nicht in der Lage, die nötigen Strahlungsleistungen zu erreichen. Dies hat sich im letzten Jahrzehnt grundlegend geändert: Diodenlaser zum Pumpen sowie die Geometrien des Scheiben- und Faserlasers haben den Siegeszug des Festkörperlaser eingeläutet.

Theodore Maimans erster Laser war ein Festkörperlaser auf der Basis von Saphir (Al₂O₃), der mit Chrom dotiert war – einem Rubin [1]. Entladungslampen regten ihn optisch an, wobei Maiman spiralförmige Lampenkörper verwendete mit dem Rubinstab im Zentrum. Metallspiegel formten einen optischen Resonator, in dem die Lichtwellen vielfach hin- und herliefen. Mit einer Vielzahl von Dotierungen gelang es bereits kurze Zeit später, in schneller Abfolge weitere Festkörperlaser zu entwickeln [2]. Dabei blieb die grundsätzliche Bauform erhalten: eine stabförmige Geometrie des aktiven Mediums und eine Anregung über Entladungslampen. Allerdings setzten sich in Hinblick auf eine effizientere Anregung sehr schnell stabförmige Lampen durch, die in reflektierenden – meist elliptisch geformten – Pumpkammern den Laserstab beleuchteten.

Wie bei den meisten optisch angeregten Varianten ist auch bei den Festkörperlaser die Anregungswellenlänge kürzer als die Laserwellenlänge. Aufgrund der mit diesem Stokes-Shift verbundenen Energiedifferenz heizen sich die aktiven Medien auf. Immer höhere Ausgangsleistungen für Anwendungen bei der Materialbearbeitung verlangten daher nach neuen Konzepten wie den Slab-Laser [3]. Das aktive Medium hat dabei die Form einer Platte (engl. Slab), die der Laserstrahl infolge von Totalreflexion an den Grenzflächen im Zickzack durchläuft, bevor er an einer der Stirnseiten austritt. Vorteil dieser Anordnung im Vergleich zum Stab laser ist eine verbesserte Strahlqualität des Lasers bei höheren Ausgangsleistungen infolge des Zickzack-Strahlengangs sowie einer optimierten Kühlanordnung. Anfang der 90er-Jahre lösten Halbleiter-Lichtquellen die Entladungslampen als Pumplichtquellen ab. Dieser Schritt von der Röh-



Hochleistungsfaserlaser im Betrieb: Das zentrale Element eines Faserlasers ist eine Glasfaser, deren Kern dotiert ist. Zur

Anregung des Laserprozesses pumpt ein Diodenlaser die Faser, die hier in mehreren Windungen ausgelegt ist.

rentechnologie zur Halbleitertechnik – zum „all solid-state laser“ – war ein revolutionärer Wandel, der sich mit der Einführung der Mikroelektronik Mitte des vergangenen Jahrhunderts vergleichen lässt. Diodenlaser erlaubten es, die Anregungswellenlängen an die Energieschemata der laseraktiven Ionen anzupassen und damit den Stokes-Shift zu minimieren. In der Konsequenz gelang es, den Wirkungsgrad (elektrisch zu optisch) der Festkörperlaser um mehr als eine Größenordnung zu steigern.

KOMPAKT

- Die Erwärmung des laseraktiven Materials und damit verbundene thermo-optische Effekte verhindern es, gewöhnliche diodengepumpte Festkörperlaser zu großen Ausgangsleistungen zu skalieren.
- Einen Ausweg bieten Lasergeometrien, bei denen das Verhältnis zwischen gekühlter Oberfläche und aktivem Volumen sehr groß ist, sodass sich Dauerstrichleistungen von einigen Kilowatt erreichen lassen.
- Die wichtigsten Geometrien sind der Scheiben- und der Faserlaser, bei denen das aktive Medium eine sehr dünne Scheibe bzw. das Innere einer Glasfaser ist.
- Beide Konzepte eignen sich auch zur Erzeugung von ultrakurzen Laserpulsen.

Priv.-Doz. Dr. Adolf Giesen, Dipl.-Phys. Jochen Speiser, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Physik, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart; Dr. Jens Limpert, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Angewandte Physik, Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena; Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Universität Jena und Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Albert-Einstein-Str. 7, 07745 Jena

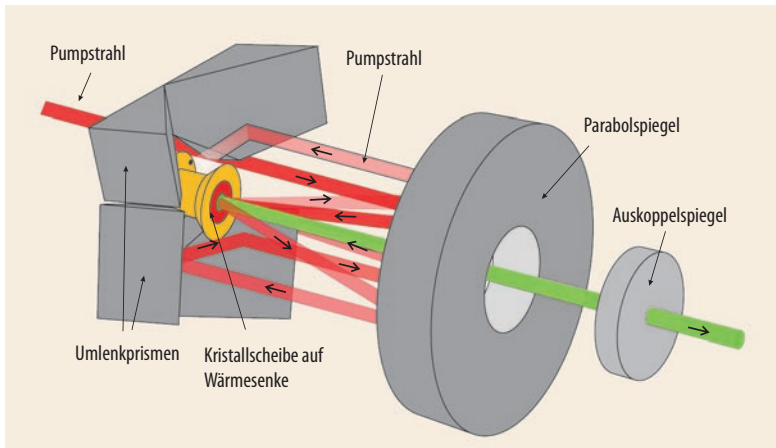


Abb. 1 Im Scheibenlaser dienen Parabolspiegel und Prismen dazu, die Pumpstrahlung mehrfach durch die Scheibe zu führen.

Obwohl der Festkörperlaser mittlerweile ein halbes Jahrhundert alt ist, gibt es doch überraschend neue Umsetzungen dieses Konzeptes. So gelang es erst vor wenigen Jahren mithilfe neuartiger Lasergeometrien, die eine optimierte Kühlung und damit minimale parasitäre sog. thermooptische Effekte aufweisen, fundamentale Grenzen der Leistungsskalierung zu durchbrechen und gleichzeitig die Strahlqualität beizubehalten. Die erfolgreichsten Geometrien, der Scheibenlaser und der Doppelkern-Faserlaser, gehen auf mehr als zehn Jahre alte Ideen zurück, kommen aber erst heute vollständig zum Tragen. Mit Hochleistungsgeräten dieser Geometrien ist die deutsche Industrie Marktführer bei der Lasermaterialbearbeitung, die weltweit ein Marktvolumen von derzeit mehr als 1,5 Milliarden Euro hat.

Leistung scheinchenweise

Ausgangspunkt für den Scheibenlaser war die Frage, wie man Materialien mit kleinem Stokes-Shift, insbesondere Ytterbium-YAG, effizient ohne kryogene Kühlung als Lasermaterial einsetzen kann. Der kleine Stokes-Shift (bei Yb:YAG lediglich 9 % bezogen auf die Energie der Pumpphotonen) reduziert zwar die Wärmeentwicklung und führt gleichzeitig zu einem höheren differentiellen Wirkungsgrad, allerdings haben diese Materialien notwendigerweise einen sehr kleinen Energieabstand sowohl zwischen dem oberen Pump- und dem Laserniveau als auch zwischen dem unteren Laserniveau und dem Grundzustand.¹⁾ Dadurch ist das untere Niveau bereits bei Raumtemperatur thermisch besetzt, sodass eine effiziente Kühlung unerlässlich ist [4].

Beim Scheibenlaser ist daher das aktive Medium eine wenige 100 μm dünne Scheibe (z. T. sogar unter 100 μm) mit einem Durchmesser von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern. Diese Scheibe wird an einer Stirnfläche gekühlt, somit ist das Verhältnis zwischen gekühlter Oberfläche und aktivem Volumen sehr groß. Durch eine hochreflektierende Beschichtung der gekühlten Fläche fungiert die Scheibe als „aktiver Spie-

gel“ im Resonator, und der Laserstrahl muss das Kühlmittel nicht durchqueren. Daher ist man in der Wahl des Kühlverfahrens sehr flexibel, insbesondere lassen sich Flüssigkeitskühlungen oder intransparente Wärmesenken einsetzen. Technisch durchgesetzt haben sich wassergekühlte Wärmesenken aus metallischen Werkstoffen oder aus Diamant. Diese lösen zugleich das Problem der geringen mechanischen Festigkeit und Steifigkeit der sehr dünnen Scheiben, wenn man für die Kontaktierung ein Verfahren wählt, das sowohl eine gute thermische als auch mechanische Anbindung gewährleistet, z. B. Löten.

Da die Scheibe so dünn ist, absorbiert sie die Pumpstrahlung allerdings nur schwach. Um dennoch einen effizienten Betrieb zu erreichen, muss die gekühlte Stirnfläche auch die Pumpstrahlung bestmöglich reflektieren. Der nach dem doppelten Durchgang durch die Scheibe noch nicht absorbierte Anteil lässt sich durch Strahlfaltungsoptiken erneut auf die Scheibe richten. Wenn die Pumpstrahlung nicht senkrecht, sondern unter einem leichten Winkel zur Normalen (typischerweise 20° bis 30°) einfällt, kann man mit einem Parabolspiegel und zwei Retroreflektoren die Pumpstrahlung in einfacher Weise mehrfach nutzen (Abb. 1). Derzeitige Aufbauten erreichen 16 bis 24 Durchgänge, prinzipiell setzt nur die Strahlqualität der verwendeten Pumpquelle dem Recycling eine Obergrenze.

In der Regel ist die transversale Ausdehnung des gepumpten Bereichs wesentlich größer als die Scheibendicke. Gelingt es, die Scheibe ausreichend homogen zu pumpen, so treten keine wesentlichen transversalen Temperaturgradienten auf. In Kombination mit der geringen Dicke führt dies nur zu einer sehr schwachen thermischen Linsenwirkung und einer nahezu verschwindenden thermisch induzierten Spannungsdoppelbrechung. Die Ausgangsleistung lässt sich nun idealerweise skalieren, indem man bei konstanter Leistungsdichte die aktive Fläche vergrößert. Dabei bleiben sowohl die axiale Temperaturverteilung in der Scheibe als auch die erforderliche Brillanz der Pumpquelle gleich.

Nach der Entwicklung des ersten Scheibenlasers Anfang der 90er-Jahre [5] zeigte sich schnell sein hohes Potenzial in der Leistungsskalierung. Bei einem Output von einem Kilowatt im Dauerstrichbetrieb wurde die Technologie auch für die kommerzielle Verwertung interessant [6]. Industriesysteme erreichen mittlerweile bis zu 16 kW Dauerstrichleistung. Die Strahlqualität, üblicherweise charakterisiert durch das Produkt aus dem Strahlradius im Fokus und dem halben Divergenzwinkel im Fernfeld (Strahlparameterprodukt), liegt bei 8 mm·mrad (Trumpf Laser). Alternativ ist auch die Beugungsmaßzahl M^2 ein Maß für die Strahlqualität. Diese gibt an, um welchen Faktor das reale Strahlparameterprodukt vom idealen, beugungsbegrenzten Wert ($M^2 = 1$) abweicht. Eine hohe Strahlqualität entspricht einem Wert von etwa 2,5, der z. B. mit zwei gekoppelten Yb:YAG-Scheiben in einem gemeinsamen Resonator bei einer Laserleistung von 1 kW

1) Der Stokes-Shift, d. h. die Energiedifferenz zwischen den Pump- und Laserphotonen, entspricht genau der Summe dieser Energieabstände; bei Yb:YAG ist der Energieabstand vom oberen Pump- zum oberen Laserniveau ca. 300 cm^{-1} , vom unteren Laserniveau zum Grundzustand ca. 600 cm^{-1} .

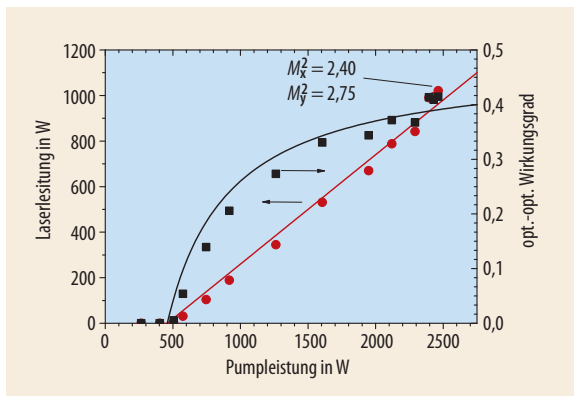


Abb. 2 Ab dem Schwellenwert wächst die Laserleistung linear mit der Pumpleistung (rote Kurve). Damit lässt sich mit zwei gekoppelten Yb:YAG-Scheiben in einem gemeinsamen Resonator ein sog. optisch-optischer Wirkungsgrad von rund 40 % bei 1 kW Laserleistung (schwarze Kurve) und hoher Strahlqualität erreichen.

erzielt wurde (Abb. 2). Im Labor gelang es, maximal 5,3 kW mit einer Scheibe bzw. 20 kW mit vier Scheiben in einem gemeinsamen Resonator zu erzielen.

Das Prinzip des Scheibenlasers eignet sich auch sehr gut für den gepulsten Betrieb. Das zurzeit leistungsfähigste kommerzielle System liefert Pulsenergien von bis zu 80 mJ bei einer mittleren Leistung von 750 W und Pulsdauern von 30 ns (Trumpf Laser). Neben der Skalierung zu hohen Energien bietet der Scheibenlaser auch Vorteile für ultrakurze Pulse: Dank der Skalierung über die Größe der aktiven Fläche lassen sich die Spitzenleistungsdichten klein halten. In Kombination mit dem kurzen Weg durch das aktive Medium minimiert dies nichtlineare Effekte deutlich. Beispiele für eine erfolgreiche kommerzielle Umsetzung sind Systeme, die 40 μ J Pulsenergie bei Pulsdauern unter 400 fs und Repetitionsraten von 100 kHz liefern (Jenoptik) oder modengekoppelte Oszillatoren („mode locked“) mit 800 fs Pulsdauer und mittleren Leistungen von 50 W (Time-Bandwidth products).

Beim Scheibenlaser lässt sich die Pulsenergie durch Vergrößern der aktiven Fläche bei konstant bleibender Spitzenleistungsdichte und Energiedichte erhöhen. Das bisher ambitionierteste Ziel verfolgen Forscher am Max-Born-Institut in Berlin: Ein mehrstufiges Verstärkersystem auf Scheibenlaserbasis soll einen ps-Puls auf mehr als ein Joule verstärken, die Pulswiederholrate soll bei 100 Hz liegen. Der Puls wird dafür zunächst auf eine Dauer von mehreren Nanosekunden gestreckt und nach der Verstärkung wieder komprimiert (sog. chirped-pulse amplification). Bisher gelang es, Pulse mit 188 mJ und 2 ps zu erzeugen [7]. Eine weitere Verstärkerstufe erhöht die Energie auf 500 mJ. Bei solchen Pulsenergien machen sich jedoch beim Scheibenlaser Probleme bemerkbar: Der Durchmesser der aktiven Zone beträgt mehr als einen Zentimeter, die Scheibendicke aber nur wenige 100 Mikrometer; zugleich soll die Verstärkung beim Durchqueren der Scheibe möglichst hoch sein, um die gespeicherte Energie effizient abzurufen. Damit ist aber auch die transversale Verstärkung in der Scheibe sehr hoch und die spontan

emittierte Fluoreszenz wird verstärkt – bei ungeeignetem Design kann dies zu transversaler Lasertätigkeit führen. Doch auch ohne diese fließt ein nicht unerheblicher Teil der Anregungsenergie in die spontane Emission. Um diesen Verlust zu minimieren, ist es nötig, das Scheibendesign sorgfältig auszuwählen, aber auch die Beschichtung und die Dauer des Pumpimpulses. Das kann nur mithilfe numerischer Modelle gelingen [8].

Für Dauerstrichlaser ergibt sich aus der Skalierung über die Fläche des aktiven Bereichs eine spezielle Herausforderung an das Design: Will man die Strahlqualität weiter verbessern, benötigt man Resonatoren mit einem sehr großen Modendurchmesser, die unvermeidlich höhere Stabilitätsanforderungen stellen. Bei Ausgangsleistungen von 100 W ist eine transversale Grundmode keine Schwierigkeit; solche Systeme wurden vielfach im Labor und auch kommerziell umgesetzt. Die höchste erzielte Grundmodenleistung liegt derzeit bei 500 W; verschiedene Forschungseinrichtungen, darunter das Institut für Technische Physik des DLR in Stuttgart, arbeiten an höheren Leistungen.

Fast alle Ergebnisse wurden bis jetzt mit Ytterbium-dotierten Lasermaterialien bei einer Wellenlänge von ca. 1 μ m erzielt. Für eine Fülle von Anwendungen wären allerdings skalierbare Quellen bei größeren Wellenlängen interessant. So gelang es, Scheibenlaser mit Ho:YAG bei 2,09 μ m und kleiner Leistung zu verwirklichen [9] sowie mit Cr:ZnSe, einem zwischen 2 μ m und 3 μ m breit abstimmbaren Material. Hier bietet sich noch ein weites Feld an möglichen Kombinationen aus Wirtskristall, laseraktiven Ionen und zusätzlicher Dotierung, um das Design zu optimieren.

Des Pumpens Kern

Faserlaser und Faserverstärker wurden vor über 40 Jahren als helixförmig gebogene Laserstäbe mit eingebetteter Wellenleiterstruktur erfunden [10]. Seither haben sie sich als hochentwickelte Systeme etabliert und eine Revolution in der Telekommunikation ausgelöst. Nun sind sie auf dem besten Weg, sich einen festen Platz unter den Hochleistungslasern für die Materialbearbeitung zu erobern. Geeignete Wirtsgläser und Dotierungen ermöglichten es, den Wellenlängenbereich vom Nahinfraroten sowohl in das Sichtbare als auch in das mittlere Infrarot auszudehnen.

Wie beim Scheibenlaser erlaubt auch hier die Geometrie des aktiven Mediums, die thermo-optischen Probleme zu umgehen. Im Gegensatz zum Scheibenlaser ist das aktive Medium allerdings lang und dünn als Faser ausgezogen. Damit verteilt sich der Wärmeinput über eine erhebliche Länge, und das große Verhältnis von Oberfläche zu aktivem Volumen erlaubt eine ausreichende Wärmeabfuhr. Hinzu kommt die Wellenleiterstruktur, welche unabhängig von der umgesetzten Leistung die Strahlqualität der emittierten Strahlung bestimmt. Führt der aktive, typischerweise mit Ionen der Seltenen Erden dotierte Kern nur eine transversale Mode (Singlemode-Kern), dann begrenzt

nur die Beugung die Qualität der im Faserlaser erzeugten Strahlung.

Das seit 1988 konsequent entwickelte Doppelkernkonzept ermöglicht hohe Leistungen aus Faserlasern bzw. -verstärkern [11]: Dabei umgibt der sog. Pumpkern den aktiven Kern der Faser, der die Strahlqualität des Faserlasers bzw. -verstärkers durch seine Wellenleiterstruktur bestimmt (Abb. 3a). Geometrische und optische Eigenschaften des Pumpkerns sind an die Hochleistungsdiodenlaser angepasst, die als Pumpquellen dienen. In Kernen mit rundem Querschnitt breitet sich das Pumplicht bevorzugt in Moden aus, die ein Intensitätsminimum in der Mitte der Faser haben. Der aktive Kern absorbiert daher das Licht nur mäßig, sodass verhältnismäßig lange Fasern nötig sind. Zahlreiche neuere Geometrien, wie ein D-förmiger Pumpkern, brechen die Zylindersymmetrie des Kerns und führen somit zu einer guten Absorption des Lichts.

Die beugungsunabhängige Führung von sowohl Pump- als auch Laserstrahlung in der Wellenleiterstruktur der Faser erlaubt extrem große Produkte von Wechselwirkungslänge und Intensität. Verglichen mit konventionellen Lasersystemen führt dies zu einer sehr hohen optischen Durchgangsverstärkung, die in der Größenordnung von 1000 liegen kann, auch für gesättigte Hochleistungsverstärker. Diese hohe Verstärkung ermöglicht zusammen mit Resonatorspiegeln oder Faser-Bragg-Gittern extrem einfache kontinuierlich emittierende Laser oder in linearer Verstärkeranordnung Kurzpulslaser mit hoher Pulsenergie und gleichzeitig hoher Wiederholrate. Die bei anderen Kurzpulsverstärkern üblichen optischen Schalter (regenerative

Konzepte), die gewöhnlich die Wiederholrate begrenzen, können entfallen.

Die Fasergeometrie, die zu den hervorragenden Eigenschaften dieser Laser führt, erschwert allerdings die Skalierung zu höheren Leistungen. Nichtlineare Effekte, insbesondere stimulierte Raman- und Brillouin-Streuung sowie die Selbstphasenmodulation verschlechtern die zeitliche und spektrale Charakteristik der Strahlung meist in untragbarer Weise. Neuartige Faserdesigns mit vergrößertem Modenfelddurchmesser (Large Mode Area, LMA) zeigen jedoch bei beugungsbegrenzter Strahlqualität hohe Schwellenwerte für nichtlineare Effekte und unterbinden zudem thermo-optische Effekte. Derartige Fasern haben nahezu beugungsbegrenzte Dauerstrichlaser mit Ausgangsleistungen von nahezu 10 kW ermöglicht – eine erheblich höhere Grundmodenleistung als bei jedem anderen Festkörperlasersystem [12].

Eine andere neue Klasse von Fasern, die photonischen Kristallfasern (PCF), erlauben ebenfalls eine signifikant höhere Pulsenergie bzw. Pulsspitzenleistung entsprechender Faserlasersysteme. Diese mikrostrukturierten Fasern bestehen aus einem reinen Quarzglaskern, den ein regelmäßiges Gitter von Luftlöchern umgibt (Abb. 3b). Die große Freiheit im Design erlaubt insbesondere Modenfelddurchmesser einmodiger Ytterbium-dotierter Fasern von bis zu 70 μm [13, 14]. Da dies deutlich mehr ist als die typischen 10 μm bei konventionellen Fasern mit stufenförmigem Brechungsindex, ist bei gleicher Leistung die Intensität der geführten Strahlung deutlich geringer bzw. das Skalierungspotenzial zu höheren Leistungen hin entsprechend größer.

Mit der Übertragung dieses Konzepts auf gepulste Systeme, die neben der Durchschnittsleistung eine hohe Pulsspitzenleistung erzeugen, stehen nun erstmals effiziente Laser zur Verfügung, um Mikromaterialien zu bearbeiten. Auch sind diese Systeme für die Grundlagenforschung sehr interessant. Mit den photonischen Fasern als Verstärkungsmedium gelang es, ultrakurzgepulste Faserlasersysteme mit Pulsenergien im Millijoulebereich und Pulsspitzenleistungen von über einem Gigawatt zu realisieren [14].

Den Rekord bei den Festkörperlasern hält seit 2009 ein faserbasiertes System, das mithilfe der „chirped pulse amplification“ 830 W Durchschnittsleistung erreicht [15]. Dieses Highlight der Laserentwicklung basiert auf einem modengekoppelten Femtosekundenoszillator, der 200-fs-Pulse bei einer Zentralwellenlänge von 1042 nm und einer Pulsfolgefrequenz von 78 MHz emittiert. Um die Intensität in den Verstärkern zu reduzieren und somit störende nichtlineare Effekte zu vermeiden, dehnt ein Gitterstrecker die Pulse zeitlich auf 800 ps. Nun bringen drei Faserverstärker das Signal effizient von wenigen Milliwatt auf 950 W, die entsprechende Pulsenergie beträgt 12,2 μJ . Schließlich quetscht ein auf hocheffizienten, dielektrischen Gittern basierender Kompressor die Pulse auf 640 fs Pulsdauer und 830 W Durchschnittsleistung. Die gemessene Strahlqualität beträgt $M^2 < 1,3$.

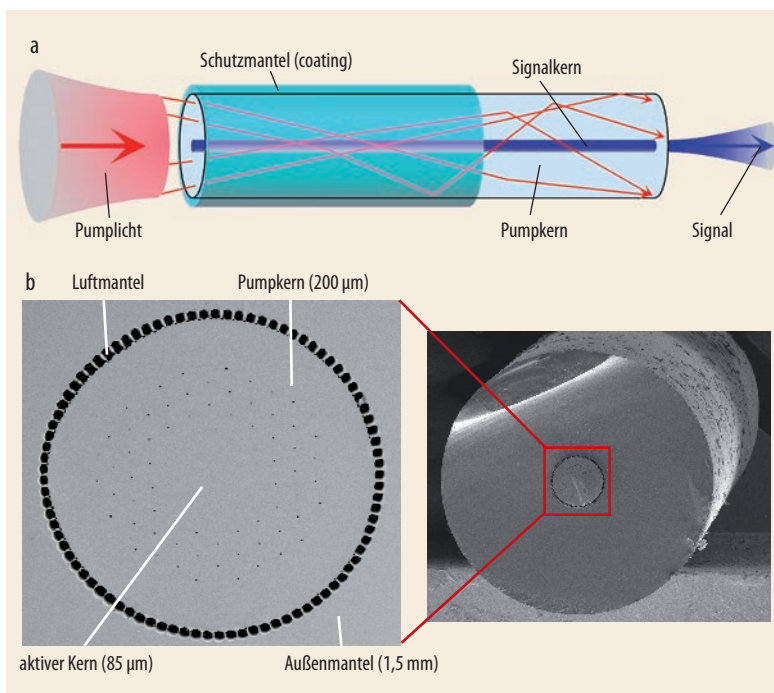


Abb. 3 Beim Doppelkernkonzept (a) umgibt ein Multimodekern für das Pumplicht den aktiven Singlemodekern der Faser. Das Pumplicht koppelt auf der gesamten Faserlänge vom Pumpkern in den Signalkern ein und regt dort den Laser-

prozess an. Bei einer photonischen Kristallfaser (b) ist der Signalkern dagegen lediglich von einem Gitter aus Luftlöchern umgeben. Dieser Bereich dient als Pumpkern, diesem schließen sich ein Luft- und der Außenmantel an.

Faserlaser bieten die einzigartige Möglichkeit, Lasersysteme mit den verschiedensten Ausgangsparametern in modularer Weise aufzubauen. Basis ist jeweils eine Einheit aus Verstärkerfaser und Pumpquelle, die verschiedene Signalquellen bis zur gewünschten Leistung bzw. Pulsenergie verstärkt. Aufgrund der großen Durchgangsverstärkung kommen solche MOFPA-Systeme (Master Oscillator Fiber Power Amplifier) mit relativ wenig Peripherie aus, insbesondere bei der Verstärkung von ultrakurzen Pulsen. Die erzielten Pulsenergien und mittleren Leistungen lassen erstmals den industriellen Einsatz von Kurzpulslasern in greifbare Nähe rücken.

„Mehr Power!“

Festkörperlaser haben sich in den vergangenen Jahrzehnten zu einem unverzichtbaren Werkzeug in Wissenschaft und Technik entwickelt. Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Scheiben- und Faserlaser belegen aber eindrucksvoll das Potenzial dieses „alten“ Laserkonzepts für neue Anwendungsfelder. So diskutiert man heute beispielsweise den Einsatz von Hochleistungsgeräten mit mittleren Ausgangsleistungen von ca. 100 kW, um Satelliten mit Energie zu versorgen, oder von Hochintensitätslasern mit Pulsspitzenleistungen im Petawattbereich, um Protonen für die medizinische Strahlentherapie zu beschleunigen. Die mit den Parametern verbundenen wissenschaftlich-technologischen Herausforderungen lassen die Autoren mit großem Interesse auf die kommenden 50 Jahre Lasertechnik blicken.

Literatur

- [1] T. H. Maiman, *Nature* **187**, 493 (1960)
- [2] W. Köchner, *Solid-State Laser Engineering* (6. Aufl.), Springer, Heidelberg (2006)
- [3] T. J. Kane, R. C. Eckardt und R. L. Byer, *IEEE J. Quantum Electron.* **19**, 1351 (1983)
- [4] A. Giesen und J. Speiser, *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **13**, 598 (2007)

- [5] A. Giesen et al., *Appl. Physics B* **58**, 365 (1994)
- [6] C. Stewen et al., *IEEE JSTQE* **6**, 650 (2000)
- [7] J. Tümmler et al., *CLEO Europe* (2009)
- [8] J. Speiser, *Laser Physics Journal* **19**, 274 (2009)
- [9] M. Schellhorn, *Appl. Physics B* **85**, 549 (2006)
- [10] E. Snitzer, in: *Proc. 3rd Int. Conf. Solid Lasers, Paris, France*, **999** (1963)
- [11] E. Snitzer et al., in: *Optical Fiber Sensors 2, OSA Technical Digest Series* (1988)
- [12] V. Gapontsev et al., *ASSP 2010 Conference, paper AWA1*
- [13] J. Limpert et al., *Opt. Express* **14**, 2715 (2006)
- [14] F. Röser et al., *Opt. Lett.* **32**, 3495 (2007)
- [15] T. Eidam et al., *Opt. Lett.* **35**, 94 (2010)

DIE AUTOREN

Adolf Giesen promovierte 1982 an der Universität Bonn und arbeitete danach beim DLR in Stuttgart an hochfrequenz-angeregten CO₂-Lasern, bevor er 1986 an das Institut für Strahlwerkzeuge bei der Universität Stuttgart wechselte. Für seine grundlegenden Arbeiten zum Scheibenlaser, die er seit 1992 durchgeführt hat, erhielt er 2002 den Berthold-Leibinger-Preis und 2004 den Rank-Preis. Seit 2007 leitet er das Institut für Technische Physik am DLR in Stuttgart.



Jens Limpert (FV Quantenoptik/ Photonik) hat an der Universität Jena studiert und 2003 promoviert. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der Université de Bordeaux kehrte er nach Jena zurück, wo er derzeit am Institut für Angewandte Physik die Arbeitsgruppe „Faser- und Wellenleiterlaser“ leitet. Seit Anfang 2010 ist er Juniorprofessor an der Uni Jena.

Jochen Speiser studierte Physik an der Universität Kaiserslautern. Seit 2001 arbeitet er an verschiedenen Aspekten der Modellierung des Scheibenlasers, zunächst am Institut für Strahlwerkzeuge der Uni Stuttgart und seit 2007 beim Institut für Technische Physik des DLR. Hier leitet er seit kurzem die Gruppe „Festkörperlaser und Nicht-lineare Optik“.



Andreas Tünnermann (FV Quantenoptik/ Photonik) wechselte nach seiner Promotion 1992 in Hannover als Leiter der Entwicklung an das Laserzentrum. Im Alter von nur 34 Jahren erhielt er 1997 einen Ruf auf eine C4-Professur nach Jena, wo er seit 2002 auch Direktor des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik ist. Für seine wegweisenden Arbeiten zu all-solid-state-Lasern wurde er mehrfach ausgezeichnet, unter anderem mit einem Leibniz-Preis.