

Hochleistungsscheibenlaser hoher Brillanz

Im Fokus

Der Scheibenlaser ist ein neuartiges Konzept für diodengepumpte Festkörperlaser, das erlaubt, gleichzeitig einen hohen Wirkungsgrad und eine gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlung zu realisieren. Seit der Demonstration des Prinzips 1993 konnte die Ausgangsleistung bis heute auf über 1 kW gesteigert werden, so dass der industrielle Einsatz des Scheibenlasers für das Schneiden und Schweißen von Metallen schon begonnen hat.

Die Erschließung des Multi-kW-Bereiches ist die Voraussetzung für eine industrielle Anwendung des Scheibenlaser-Konzeptes in der Materialbearbeitung. In diesem Anwendungsbereich werden vornehmlich die klassischen, lampengepumpten Festkörperlaser eingesetzt, die mit cw-Ausgangsleistungen bis 4 kW und einem Strahlparameterprodukt von 25 mm*mrad kommerziell verfügbar sind. Im Vergleich zu diesen Lasersystemen verfügt der Scheibenlaser über eine weitaus bessere Strahlqualität und einen wesentlich höheren Wirkungsgrad. Weitere Vorteile des Hochleistungsscheibenlasers sind in seiner Kompaktheit und Zuverlässigkeit zu sehen.

In den vergangenen Jahren konnte gezeigt werden, dass das Prinzip des Scheibenlasers völlig neue Möglichkeiten eröffnet, diodengepumpte Festkörperlaser mit hoher

Leistung, hohem Wirkungsgrad und guter Strahlqualität zu realisieren. Für den Scheibenlaser konnte durch die bisher durchgeführten Arbeiten an der Universität Stuttgart und die damit im Zusammenhang stehenden Forschungsarbeiten in verschiedenen Firmen der Durchbruch zur Markteinführung erreicht werden.

Erste Serienprodukte kleiner Leistung sind heute erhältlich, Hochleistungssysteme bis in den kW-Bereich werden noch im laufenden Jahr erhältlich sein. Vier solcher Laser im kW-Bereich werden bereits seit einiger Zeit am IFSW in der Materialbearbeitung eingesetzt.

Das Scheibenlaserkonzept bietet jedoch noch weiteres Potenzial zu höheren Leistungen bei gleichzeitig guter Strahlqualität. Simulationsrechnungen zeigen, dass bis zu 10 kW Laserleistung prinzipiell auf einfache Weise aus

einer einzigen Scheibe extrahiert werden kann. Durch das Erschließen neuer Leistungsklassen und Wellenlängen - durch die Übertragung des Prinzips auf andere Lasermaterialien - werden sich sehr schnell neue und zusätzliche Märkte für diese Laser öffnen.

Das Prinzip

Als laseraktives Medium wird eine dünne Scheibe verwendet mit typischen Dicken von einhundert bis zweihundert Mikrometern. Sie wird von einer Seite flächig gekühlt und von der anderen mit Diodenlasern quasi-endgepumpt. Dabei wird die Pumpstrahlung durch ein kompaktes Spiegelsystem mehrfach auf den Kristall abgebildet, so dass trotz der dünnen Scheibe eine hohe Absorption im Kristall erreicht wird. Die Rückseite der Kristallscheibe ist verspiegelt und dient so als Endspiegel oder Umlenkspiegel im Laserresonator (Abbildung 1).

Der Vorteil der Scheibengeometrie liegt zum einen darin, dass die Kühlung parallel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls im Resonator, also in axialer Richtung erfolgt (Abbildung 2). Infolgedessen bildet sich hier ein nur sehr geringer radialer Temperaturgradient aus, der im Gegensatz dazu in konventionellen Laserstäben zu einer starken asphärischen thermischen Linse und damit zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führt. Zum anderen wird durch das große Verhältnis von gekühlter Oberfläche zu laseraktivem Volumen eine sehr effiziente Abfuhr der erzeugten Verlustwärme erzielt, die trotz der hohen absorbierten Volumeneleistungsdichte nur eine geringe mittlere Kristalltemperatur bewirkt.

Ergebnisse

Das IFSW hat grundlegende Untersuchungen zum Prinzip des Scheibenlasers durchgeführt, sowohl für das bisher am besten untersuchte System Yb:YAG als auch schon für andere Systeme wie Nd:YAG und Nd:YVO₄. Es wurde theoretisch und experimentell nachgewiesen, dass bei axialer Kühlung über die Stirnseite der Kristallscheibe nur ein Temperaturgradient in Richtung der Strahlachse erzeugt wird, was die thermische Linse, die normalerweise zur Begrenzung der Leistung bei guter Strahlqualität führt, drastisch reduziert. Für den Fall der eindimensionalen Wärmeleitung (Pumpstrahldurchmesser groß gegen die Kristalldicke) wurde gezeigt, dass ein bei einer beliebigen (niedrigen) Ausgangsleistung erzieltetes Ergebnis bezüglich Strahlqualität und Wirkungsgrad prinzipiell bei jeder beliebigen (höheren) Ausgangsleistung reproduzierbar ist. Dieses grundlegende, außerordentlich wichtige Prinzip wurde zum Ausgangspunkt der Leistungsskalierung des Yb:YAG Systems als laseraktives Material über die Erhöhung der Pumpleistungsdichte bis in den erreichten Bereich von 1 kW mit einem Wirkungsgrad von über 50% (optisch-optisch) und einer Strahlqualität von $M^2 < 20$ bei Raumtemperatur des Kühlwassers. Dazu wurden Pumpkonfigurationen entwickelt, die bis zu 32 Pumpstrahlungsdurchgänge durch den Kristall erlauben. Darüber hinaus wurde die Skalierbarkeit durch die Verwendung mehrerer Scheiben in einem Resonator gezeigt. Die Skalierung über die Scheibenanzahl bietet den Vorteil, dass die Strahlqualität aufgrund des kleineren

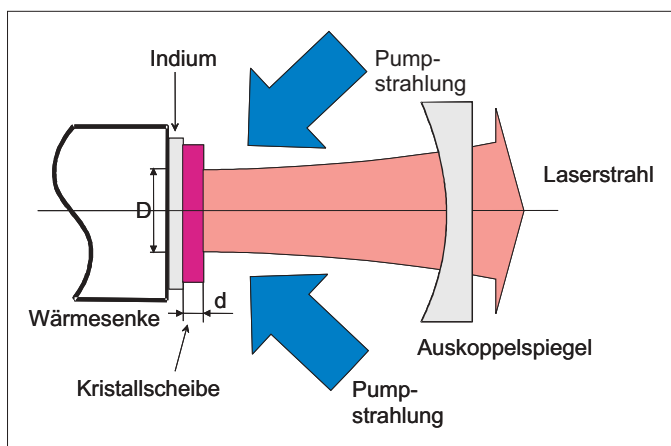


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau eines Scheibenlasers

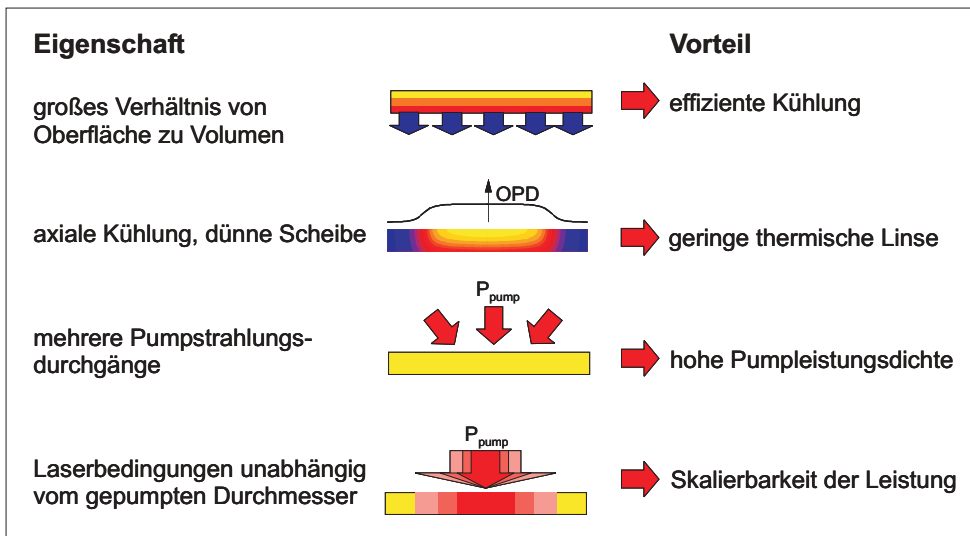


Abb.2: Vorteile des Scheibenlaser-Designs

gepumpten Durchmessers mit geringem Aufwand verbessert werden kann.

Die Strahlqualität wurde durch sorgfältige Auslegung des Resonators bis zum transversalen Grundmode gesteigert, sowohl bei Yb:YAG als auch bei ausgewählten anderen Systemen. Bei einer Laserleistung von 97 W wurde eine Beugungsmaßzahl von $M^2 = 1.22$ mit einem optischen Wirkungsgrad von 38% erreicht. Dabei entscheidende Parameter wie die Kristalldicke, die Dotierungskonzentration, die Beschichtung der Kristallscheiben sowie die restliche thermische Linse wurden eingehend untersucht. Ausgehend vom Grundmode-Betrieb mit einer Leistung von etwa 35 W wurde darüber hinaus ein stabiler Single-Frequency-Betrieb mit einer Leistung von 28 W erzielt. Single-Frequency-Betrieb hoher Leistung lässt sich mit dem Scheibenlaser durch Einfügen von frequenzselektierenden Elementen in den Resonator in sehr einfacher Weise erzielen. Die Erfahrungen beim Single-Frequency-Betrieb des Yb:YAG-Systems bilden die Basis für die Untersuchungen der effizienten Frequenzverdopplung mit dem Scheibenlaser im Dauerstrichbetrieb. Die vorteilhafte Anwendbar-

keit des Scheibenlaserkonzepts wurde auch für andere Materialien demonstriert. So wurde ein effizienter Nd:YVO₄ Scheibenlaser für die Wellenlängen 1064 nm und 914,5 nm realisiert. Hohe Effizienz und ausgezeichnete Strahlqualität wurden gleichzeitig erzielt.

Zukünftige Entwicklungen

Weiterführende grundlegende Untersuchungen zum Scheibenlaser werden zu neuen Konzepten zur Leistungs- und Energiesteigerung führen. Der Schwerpunkt liegt zum einen auf der Steigerung der Ausgangsleistung für verschiedene Scheibenlasersysteme bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad und guter Fokussierbarkeit unter Bedingungen, die dem industriellen Einsatz angepasst sind. Zum anderen wird die Eignung neuer Materialien für den Scheibenlaser untersucht werden, die einen Dauerstrich- oder gepulsten Betrieb bei neuen Wellenlängen mit hohem Wirkungsgrad und großen Leistungen im Grundmodebetrieb ermöglichen. Durch Untersuchungen der Frequenzkonversion an Neodym dotierten Quasi-Drei-Niveau-Systemen ähnlich dem Yb:YAG wird eine Ausweitung des Wellen-

längenspektrums in den blauen Spektralbereich mit speziell auf den Scheibenlaser angepassten Verfahren angestrebt.

Weiter sollen durch andere Wirtsmaterialien als YAG wie z.B. Wolframate und Sesquioxide die Systemeigenschaft weiter verbessert werden. Dazu gehören neben der weiteren Leistungs- und Wirkungsgradsteigerung auch die Nutzung einer größeren Emissionsbandbreite zur Erzeugung und Verstärkung ultrakurzer Pulse. Insgesamt sollen zukünftig die Vorteile des Scheibenlaser-Designs auf andere, bisher nicht erforschte, aber durchaus geeignete Materialien übertragen werden und neue Wellenlängenbereiche erschlossen werden. Vorteile sind dabei die Leistungsskalierbarkeit bei gleichzeitig hohem Wirkungsgrad und guter Fokussierbarkeit.

Durch die Übertragung des Scheibenlaserprinzips auf Halbleiterstrukturen (optisch gepumpter Halbleiter-Scheibenlaser) eröffnet sich die völlig neue Möglichkeit, die Wellenlänge des Lasers an den Erfordernissen von der Anwendungsseite anzupassen, da durch die verschiedenen Halbleitermaterialien und -strukturen ein ungewöhnlich großer

Wellenlängenbereich zur Verfügung steht. Je nach Material und Design kann die Wellenlänge zwischen ca. 600 nm und 2000 nm frei gewählt werden. Erste Teststrukturen bei 650 nm bzw. 980 - 1000nm Laserwellenlänge zeigen die Realisierbarkeit dieses Konzepts

Der Scheibenlaser ist ein innovatives Lasersystem, das sich in Forschung und Industrie etabliert hat. Deutschland besitzt dadurch zur Zeit eine hervorragende Ausgangsposition im Bereich diodengepumpter Festkörperlaser, die es zu halten und auszubauen gilt. Mit dem Konzept des Scheibenlasers hat das IFSW ein bahnbrechendes neues Konzept für diodengepumpte Festkörperlaser entwickelt, das zu einer völlig neuen Klasse von Lasern geführt hat mit bisher nicht erreichten Daten.

Erste deutsche Firmen bieten diese Laser seit etwa einem Jahr kommerziell an bzw. befinden sich heute an der Schwelle der Markteinführung.

Institutsadresse:
 Institut für Strahlwerkzeuge
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711-685 6840
 Fax: +49 (0)711-685 6842

Autorin:
 Dr. Christel Budzinski

Kontakt / Redaktion:
 Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner
 FGSW - Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge
 Nobelstr. 15
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711-687 4311
 Fax: +49 (0)711-6868 7281
 E-Mail:
 lichtner@fgsw.uni-stuttgart.de
<http://www.ifs.uni-stuttgart.de>