UNIVERSITÄT STUTTGART STUTTGART LASER TECHNOLOGIES

UNIVERSITÄT STUTTGART INSTITUT FÜR STRAHLWERKZEUGE



# Scheibenlaserentwicklung für Forschung und Industrie

Scheibenlaser haben sich im letzten Jahrzehnt zunehmend als hochbrillante, effiziente und zuverlässige Hochleistungs-Lasersysteme in der Industrie etabliert. Hervorgerufen wurde dies im Wesentlichen durch die geringen thermooptischen Effekte im verwendeten, dünnen Laserkristall, die gute Skalierbarkeit des Konzepts und die hohen Steckdosenwirkungsgrade dieses Lasertyps von mehr als 30 %, sowie die problemlose Übertragung ihrer Laserstrahlung bei 1030 nm mittels Lichtleitkabel zum Werkstück über Distanzen von bis zu 100 m. Weitere Vorteile liegen in der Unempfindlichkeit gegenüber Rückreflexen, was insbesondere für den Einsatz in der Materialbearbeitung ein ausschlaggebender Parameter ist. Gepulst lassen sich mit Scheibenlasern Wiederholraten bis in den MHz-Bereich erreichen und sehr effiziente Verstärkersysteme mit fs-, ps- oder ns-Pulsen realisieren.



Ausgangspunkt der Scheibenlaserentwicklung war dabei die Arbeitsgruppe um Dr. A. Giesen am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart, welche - seit der Erfindung zusammen mit dem Institut für Technische Physik der DLR im Jahre 1993 - dieses Laserkonzept innerhalb weniger Jahre bis zur Reife für industrielle Anwendungen Zahlreiche Firmen (z.B. TRUMPF, Jenoptik, RofinSinar, Prenovatec, Time-Bandwidth Products, Innovavent) erreichten in den letzten zehn Jahren den Durchbruch zur Markteinführung von verschiedensten Scheibenlasersystemen. Diverse Serienprodukte sind gegenwärtig sowohl bei kleinen Leistungen (z.B. Scheibenlasermodul in Abb. 1) als auch im Multi-kW-Bereich erhältlich (z.B. siehe Abb. 3). Die kommerziell verfügbaren Multi-kW-Scheibenlasersysteme arbeiten ausschließlich mit Yb:YAG als laseraktivem Material und werden mit Laserdioden bei einer Wellenlänge von 940 nm mit relativ niedrigen Leistungsdichten (unter 8 kW/cm<sup>2</sup>) gepumpt. Mit höchster Strahlqualität, d.h. im Grundmodebetrieb, sind Scheibenlaser bis heute jedoch nur bis 100 W Ausgangsleistung kommerziell verfügbar.

Im Multimodebetrieb sind Scheibenlasersysteme mit 16 kW Ausgangsleistung aus 4 Scheiben erhältlich. Mit nur einer Scheibe konnten bereits mehr als 6 kW demonstriert werden. Das Interesse der Industrie liegt momentan in der weiteren Verbesserung der Strahlqualität, um Laseranwendungen mit Strahlpropagationen über größere Distanzen wie das Remoteschneiden und -schweißen noch effizienter zu machen. Bei höherer Brillanz der Laserstrahlung lässt sich zudem die Einkopplung in kleinere Faserdurchmesser realisieren sowie das präzise Schneiden noch feinerer Strukturen bewerkstelligen.

Ein weiterer Trend ist in Richtung Ultrakurzpuls-Scheibenlasersysteme zu verzeichnen. Schwerpunkte der Anwendung liegen, neben dem Automobilbau, in der Solar- und Mikroelektronikindustrie. In diesen Bereichen hat die Bearbeitung von Halbleitermaterialien, sowie Glasund Keramikwerkstoffen eine große Bedeutung, bei denen – neben ihren Pulseigenschaften – auch die Wellenlänge eine wichtige Rolle spielt.

#### Der Scheibenlaser und dessen Grenzen

Scheibenlaser bieten die gewünschte Kombination von optischer Leistung im Kilowattbereich mit hoher Fokussierbarkeit der Strahlung, was durch um GröBenordnungen geringere thermisch induzierte Aberrationen im Vergleich zu konventionellen Stablasersystemen möglich ist. Neben der sehr geringen optischen Weglänge durch den Laserkristall spielt dabei die effiziente, eindimensionale Kühlung der laseraktiven Scheibe parallel zur Resonatorachse eine zentrale Rolle, die darauf basiert, dass der Abstand zwischen Wärmeguelle und Wärmesenke sehr gering ist. Dies ermöglicht auch die Skalierung zu höheren Leistungen über die Vergrößerung des Pumpstrahldurchmessers, wobei die Leistungsdichte konstant gehalten wird. Theoretische Berechnungen und experimentelle Untersuchungen des Scheibenlasers in den vergangenen Jahren haben gezeigt, dass Ausgangsleistungen von weit mehr als 10 kW aus einer Scheibe realisiert werden können. Im Hinblick auf die erzielbare Strahlqualität gibt es im Multi-kW-Bereich zwei limitierende Faktoren. Zum einen die nicht mehr vernachlässigbaren thermisch induzierten Phasenfrontstörun-



Abb. 1: Scheibenlasermodul vom IFSW in der Ausführung bis 200 W Pumpleistung

#### UNIVERSITÄT STUTTGART INSTITUT FÜR STRAHLWERKZEUGE -



gen am Übergang von gepumpten zum ungepumpten Bereich in der Laserscheibe, und zum anderen die Luftturbulenzen in der Pumpkavität. Durch Beherrschung dieser beiden Effekte kann die Strahlqualität und Effizienz von Multi-kW-Scheibenlasern weiter gesteigert werden.

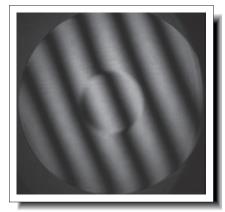


Abb. 2: Interferometerbild eines asphärischen Spiegels zur Phasenfrontkompensation

### Scheibenlaser im cw- und Femtosekunden-Betrieb

Im kontinuierlichen Betrieb liegt ein Fokus der Scheibenlaserentwicklung am IFSW bei der Verbesserung der Brillanz im Hochleistungsbereich durch statische (siehe Abb. 2), aktiv regelbare, sowie adaptive Kompensation der asphärischen Phasenfrontdeformation in der Scheibe. Hierbei gilt es, die Konzepte für Deformationen im 100 nm-Bereich und hinsichtlich hoher resonatorinterner Leistungen zu optimieren. Weitere gegenwärtige Arbeiten am IFSW konzentrieren sich auf die Entwicklung von Grundmodescheibenlasern im kW-Bereich. Dabei werden Pumpkonzepte auf der "Zero-Phonon-Line" angestrebt, sowie neue aktive Lasermaterialien wie z.B. Yb:Lu2O3 für den mittleren Leistungsbereich charakterisiert und optimiert. Die Auswahl der neuen aktiven Lasermaterialien für den Scheibenlaser wird neben den thermischen Eigenschaften anhand ihrer Parameter für den Einsatz in passiv modengekoppelten Femtosekunden-Systemen bestimmt. Der erste Schritt ist dabei immer die Leistungsoptimierung im Grundmodebetrieb.

### Scheibenlaser im Nano- und Pikosekunden-Pulsbetrieb

Gepulste Scheibenlasersysteme werden in der Mikromaterialbearbeitung für Beschriftungsanwendungen und auch zunehmend zur Bearbeitung von Photovoltaikelementen eingesetzt. Durch Frequenzvervielfachung stehen zur Bearbeitung Scheibenlaser mit Wellenlängen im spektralen Bereich von IR bis UV zur Verfügung. Beispielsweise wurde am IFSW ein Scheibenlaser zur hochproduktiven Materialbearbeitung mit einzelpulsgenauer Umschaltung zwischen ns- und ps- Pulsen entwickelt. Das System ist hierbei als regenerativer Scheibenlaserverstärker konzipiert und liefert 8 ns oder 5,5 ps lange Pulse im Bereich von



Abb. 3: Blick in ein vakuumtaugliches 2 kW IFSW Pumpmodul

0,3-2,3 mJ bei 1030 nm und Pulswiederholraten von 5 bis 206 kHz.

Ein wichtiges Ziel der Arbeiten zum ps-Pulsbetrieb besteht in der Erhöhung der mittleren Leistung der Lasersysteme von derzeit etwa 50 W in den kW-Bereich; diese Leistungen werden beispielsweise für das Schneiden von Verbundmaterialien und das großflächige Strukturieren von Druck- und Prägewalzen benötigt.

Der Fokus der Untersuchungen am IFSW für den ns-Pulsbetrieb liegt derzeit auf der Entwicklung eines Scheibenlasersystems bei 515 nm Wellenlänge zum Laserdotieren von Solarzellen. Dazu werden innovative Ansätze zur Leistungsskalierung von gütegeschalteten Scheibenlasern mit resonatorinterner Frequenzverdopplung untersucht. Für den Dotierungsprozess müssen insbesondere Pulsdauer und Pulsform optimiert werden.

## Technologieentwicklung und -transfer

Das IFSW bietet in allen Scheibenlaserbereichen Auftragsentwicklungen an, bei denen Scheibenlasersysteme speziell an

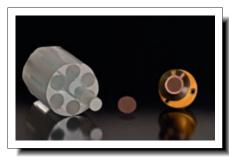


Abb. 4: Vom Kristall zur kontaktierten Scheibe

die Wünsche des Kunden angepasst werden. Es können Scheibenlasermodule für den kontinuierlichen Betrieb, gepulste Systeme (fs-ns), single-frequency oder auch frequenzverdoppelt realisiert werden. In Verbindung mit den Pumpmodulen (siehe Abb. 1 und 3) sind montierte Laserkristallscheiben verfügbar (siehe Abb. 4). Diese werden für jede spezifische Betriebsbedingung optimiert und einzeln qualifiziert. Für jede Anforderung können wir die optimierte Kombination aus Beschichtungen, Wärmesenken und Kontaktierungstechniken anbieten. Die fertig montierten Scheiben werin mehreren Schritten nach standardisierten Verfahren optisch und thermisch geprüft und für die spezifischen Betriebsbedingungen qualifiziert.

Institutsadresse:

Institut für Strahlwerkzeuge Pfaffenwaldring 43

70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685 66840 Fax: +49 (0)711 685 66842 http://www.ifsw.uni-stuttgart.de

Autor:

Dipl.-Ing. (FH) Birgit Weichelt

E-Mail: birgit.weichelt@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion: Dipl.-Bw. (FH) Susanne Kern

Tel.: +49 (0)711 685 66861 Fax: +49 (0)711 685 56861

E-Mail: susanne.kern@ifsw.uni-stuttgart.de