

# Scheibenlaserforschung am IFSW

## Vom Leistungsrekord im cw-Grundmode zu neuartigen UKP-Oszillatoren

Viele Prozesse in der Lasermaterialbearbeitung erfordern Strahlquellen mit hoher Ausgangsleistung bei gleichzeitig sehr hoher Brillanz. Ein wichtiger Schwerpunkt der aktuellen Forschung in der Laserentwicklung am IFSW sind daher Konzepte zur Leistungsskalierung von Scheibenlasern mit grundmodenaher Strahlqualität. Hier konnte durch verschiedene Ansätze, wie den Einsatz neuartiger Materialien, der Verwendung neuer Pumpkonzepte oder von adaptiven Optiken im Resonator, die Ausgangsleistung signifikant auf über 800 W gesteigert werden. Gleichzeitig sind hohe Leistungen im Grundmode Voraussetzung für die Realisierung von modengekoppelten Hochleistungs-Ultrakurzpuls-Resonatoren. Hier finden am IFSW ebenfalls neuartige Materialien Verwendung. Beispielsweise konnte mit dem Einsatz von Yb:SSO eine Ausgangsleistung von 27,8 W bei einer Pulsdauer von 298 fs und einer Repetitionsrate von 27 MHz realisiert werden.

In der Lasermaterialbearbeitung bieten grundmodennahe Hochleistungslaserquellen für viele Anwendungen große Vorteile, da diese beispielsweise größere Arbeitsabstände zum Werkstück und höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erlauben. Weiterhin ist die Erzeugung feinerer Strukturen möglich, da kleinere Fokusdurchmesser erreicht werden können.

Während allerdings im cw-Multimodebetrieb mit Scheibenlasern Leistungen im Multi-kW-Bereich erzielt werden können, lag im cw-Grundmodebetrieb der bisherige Leistungsrekord bei ca. 500 W mit einem Yb:YAG-Scheibenlaserkristall. Der Hauptgrund dafür sind thermische Effekte im gepumpten Bereich der Scheibe, welche zwar durch das Scheibenlaserkonzept vergleichsweise sehr gering sind, aber im Grundmodebetrieb durch Störungen der Phasenfront im Resonator zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führen.

Das IFSW arbeitet derzeit an der Entwicklung verschiedener Konzepte zur Minimierung der thermischen Einflüsse auf den Laserstrahl.

Ein Konzept beinhaltet resonatorinterne deformierbare Spiegel. Durch das in der Yb:YAG-Scheibe absorbierte Pumplicht entsteht Wärme, welche wiederum zu einer lokalen Ausdehnung und einer Brechungsindexänderung führt. Dadurch

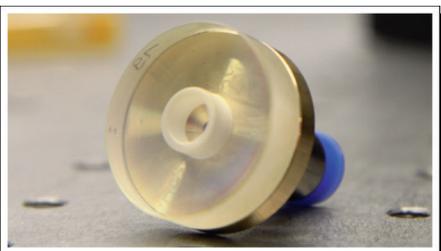


Abbildung 1: Deformierbarer pneumatischer Spiegel.

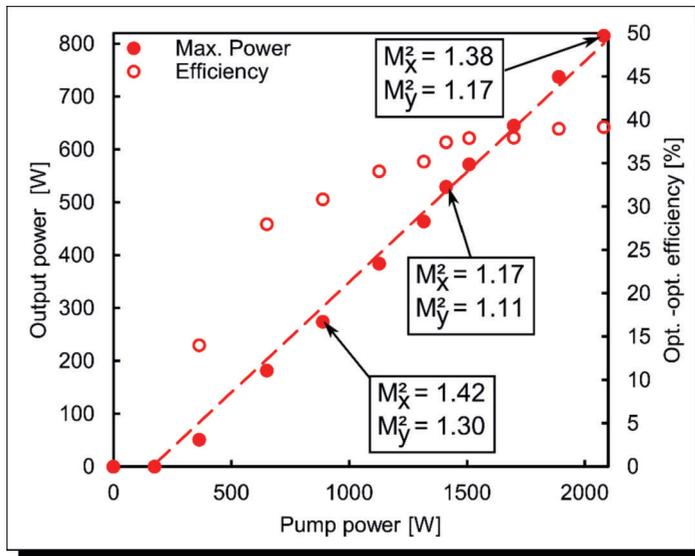


Abbildung 2: Leistungskurve des mit einem deformierbaren pneumatischen Spiegel realisierten Grundmode-Scheibenlasers.

erfährt der im Resonator umlaufende Laserstrahl eine stufenförmige Phasenstörung, die in ihrer Form der Intensitätsverteilung der Pumpstrahlung folgt. Da die Grundmode ein Gaußstrahl ist, welcher räumlich teilweise über den gepumpten Bereich hinausragt, bildet diese Phasenstufe somit eine weiche Apertur, welche die Phasenfront verformt und damit letztendlich die Grundmode in höhere Moden beugt. Zur Minderung dieser Beugungsverluste wurden am IFSW deformierbare Spiegel entwickelt, welche auch im Hochleistungsbetrieb als Resonatorendspiegel eingesetzt werden können (siehe Abb. 1). Diese für die Laserwellenlänge hochreflektiv beschichteten Quarzglasspiegel sind mit einer rückseitigen Struktur versehen, die bei Druckbeaufschlagung zu einer durch die lokale Strukturdicke definierten Verformung der Spiegelvorderseite führt. Die Verformung ist dabei so ausgelegt, dass die in der Scheibe thermisch induzierten Well-

lenfrontstörungen kompensiert werden. Da durch Regelung des Druckes die Höhe der Deformation sehr präzise eingestellt werden kann, eignet sich dieses Druckspiegelkonzept zur resonatorinternen dynamischen Kompensation bei unterschiedlichen Pumpleistungen. Mit diesem vergleichsweise sehr kostengünstigen Konzept wurden Ausgangsleistungen im Grundmode von bis zu 815 W cw erreicht (siehe Abbildung 2),

Material	Yb:YAG	Yb:LuAG
Quanten-defekt	8,7 %, 940 nm 5,9 %, 969 nm	8,9 %, 938 nm 5,9 %, 969 nm
Wärme-reduktion	32,2 %	33,7 %
Mögliche Leistungs-steigerung	47,5 %	50,8 %

Tabelle 1: Yb:YAG und Yb:LuAG als Lasermaterialien im Vergleich bezüglich der durch das "zero-phonon-pumping" möglichen Wärmereduktion und Leistungssteigerung.

was den aktuellen Rekord darstellt.

Ein weiteres Konzept zielt darauf ab, die thermischen Effekte selbst zu reduzieren. Hierzu kommen neuartige Lasermaterialien sowie neue Pumpkonzepte zum Einsatz. Das aktuell meist verbreitete Material für Scheibenlaserkristalle stellt Yb:YAG dar. Am IFSW werden derzeit alternative Materialien, wie zum Beispiel Yb:LuAG untersucht. Dieses Material ist dem Yb:YAG zwar sehr ähnlich, bietet aber insbesondere bei hohen Dotierungskonzentrationen eine größere Wärmeleitfähigkeit und damit weniger thermische Einflüsse. Weiterhin kann durch die Verwendung neuartiger Pumpdioden der Wärmeeintrag im Medium stark verringert werden. Konventionell wird Yb:YAG mit einer Wellenlänge von 940 nm gepumpt. Dort ist die Absorptionslinie des Materials sehr breit, was die Anforderungen an die Breite des Pumpspektrums reduziert. Der Quantendefekt zur Laserwellenlänge beträgt allerdings 8,7 %, was letztlich einen hohen Wärmeeintrag im Lasermedium bedeutet. Dies kann beträchtlich reduziert werden, indem mit einer Pumpwellenlänge von 969 nm die Ladungsträger direkt in das obere Laserniveau gepumpt werden ("zero-phonon-pumping"). Dies erfordert jedoch eine Pumpquelle mit einer sehr schmalen spektralen Bandbreite von ca. 1-2 nm FWHM. Durch den Einsatz von Volumen-Bragg-Gittern ist solch eine Stabilisierung nun möglich. Der Quantendefekt beträgt damit nur noch 5,9 %.

Dies entspricht einer Verringerung des Wärmeeintrags um 32,2 %. Demnach ist eine Steigerung der Pumpleistung um 47,5 % möglich bis die gleiche Wärmelast in das Material eingebracht wurde (vgl. Tabelle 1). Bei Yb:LuAG sind sogar bis zu 50,8 % erreichbar. Abbildung 3 zeigt eine gemessene Leistungskurve mit einer Yb:LuAG-Scheibe bei einer Strahlqualität von  $M^2 \approx 1,5$ . Es konnten somit Ausgangsleistungen von bis zu 742 W erreicht werden.

Die Entwicklung von cw-Grundmodellasern ist auch Voraussetzung für die Leistungsskalierung von modengekoppelten UKP-Laser-Resonatoren. Um hier in den Bereich von einigen hundert Watt Leistung zu gelangen sind meist Verstärkersysteme notwendig, welche vergleichsweise hohen Aufwand und Kosten verursachen. Demnach ist hier das Ziel Oszillatoren zu entwickeln, welche die benötigten Leistungen direkt erzeugen können. Der Fokus der Untersuchungen am IFSW liegt auf neuartigen Scheibenmaterialien. Hier bietet beispielsweise Yb:SSO ein im Vergleich zu Yb:YAG 5-fach breiteres Verstärkungsspektrum, was die erreichbare minimale Pulsdauer beträchtlich verringert. Weiterhin ist die Wärmeleitfähigkeit deutlich höher und das Material besitzt einen negativen Koeffizienten für die Brechungsindexänderung mit der Temperatur. Da dies der thermischen Ausdehnung der Scheibe entgegenwirkt, werden die störenden thermischen Effekte deutlich reduziert.

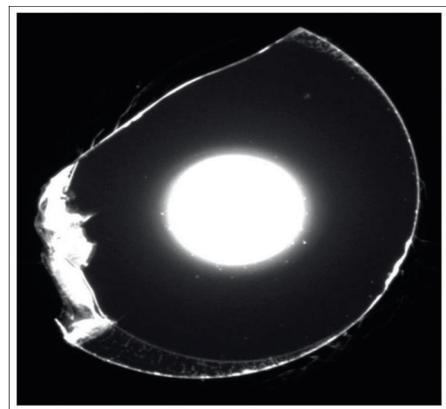


Abbildung 4: Yb:SSO-Scheibe für die Erzeugung von 27,8 W Ausgangsleistung bei einer Pulsdauer von 298 fs.

Hier wurden am IFSW Ausgangsleistungen von bis zu 27,8 W bei einer Pulsdauer von 298 fs und einer Repetitionsrate von 27 MHz demonstriert, was die erste Realisierung eines passiv modengekoppelten Yb:SSO-Scheibenlasers darstellt. Diese Ergebnisse wurden mit einer Scheibe erzielt, welche durch die Neuartigkeit des Materials noch nicht perfekt war und Ausbrüche zeigte (Abbildung 4). Mit verbesserter Herstellungstechnologie verspricht dieser Ansatz daher großes Potential, da sich dann beispielsweise der Pumpfleckdurchmesser zur weiteren Leistungsskalierung vergrößern lässt. Zukünftige Forschungsthemen im Bereich der UKP-Resonatoren und der cw-Grundmode-Scheibenlaser werden sein mit Qualitätsverbesserungen der Laserkristalle höhere Leistungen zu erzielen und verschiedene andere neuartige Lasermaterialien zu verwenden. Weiterhin sollen für die cw-Resonatoren die Konzepte der deformierbaren Spiegel und des "zero-phonon-pumpings" zusammengeführt werden um die Ausgangsleistung bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität noch weiter zu erhöhen.

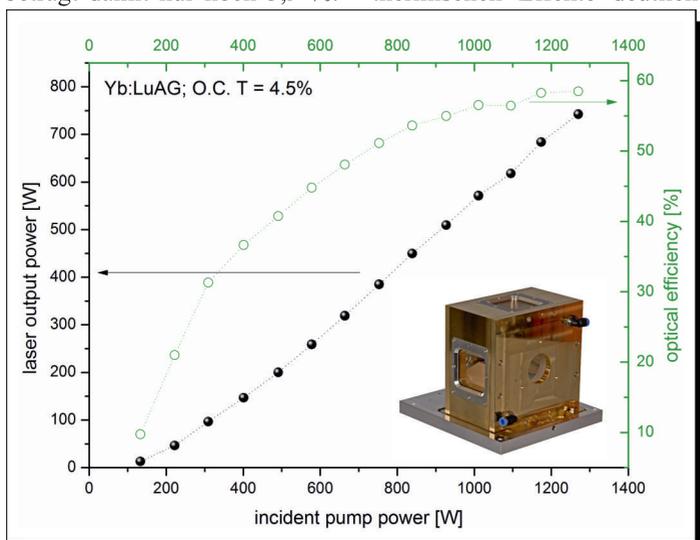


Abbildung 3: Leistungskurve eines Grundmode-Scheibenlasers ( $M^2$  1,5) mit einer Yb:LuAG-Scheibe, gepumpt bei 969 nm. Rechts unten ist die im Versuch verwendete und am IFSW entwickelte G1-Pumpkavität abgebildet.

#### Kontakt:

Dr. Marwan Abdou Ahmed  
Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 43  
70569 Stuttgart  
Tel.: +49 (0)711 685 69755  
Fax: +49 (0)711 685 66842  
E-Mail: [abdou-ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de](mailto:abdou-ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de)

#### Autor / Redaktion:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel  
Tel.: +49 (0)711 685 69721  
E-Mail: [jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de](mailto:jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de)