

Der Scheibenlaser - eine neue, vielseitige Strahlquelle

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 in greifbare Nähe gerückt ist. Gleichzeitig konnte gezeigt werden, daß sich der Scheibenlaser für verschiedene Lasermaterialien und Betriebsarten eignet.

Die Verfügbarkeit von Diodenlasern als Pumpstrahlungsquelle bietet völlig neue Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz, der Kompaktheit und der Zuverlässigkeit von Lasersystemen. Neben der spektralen Schmalbandigkeit nutzen neue Laserkonzepte wie der Scheibenlaser zusätzlich die - im Vergleich zu Blitz- und Bogenlampen - gute Fokussierbarkeit der Diodenstrahlquellen aus.

Das Prinzip

Als laseraktives Medium wird eine dünne Scheibe verwendet mit typischen Dicken von wenigen hundert 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.

Der Vorteil der Scheiben-geometrie liegt zum einen darin, daß die Kühlung parallel zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls im Resonator, also in axialer Richtung erfolgt. Infolgedessen bildet sich hier ein nur sehr geringer radialer Temperaturgradient aus, der im Gegensatz dazu in konventionellen Laserstäben zu einer asphärischen thermischen Linse und damit zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führt. Zum anderen wird durch das große Verhältnis von gekühlter

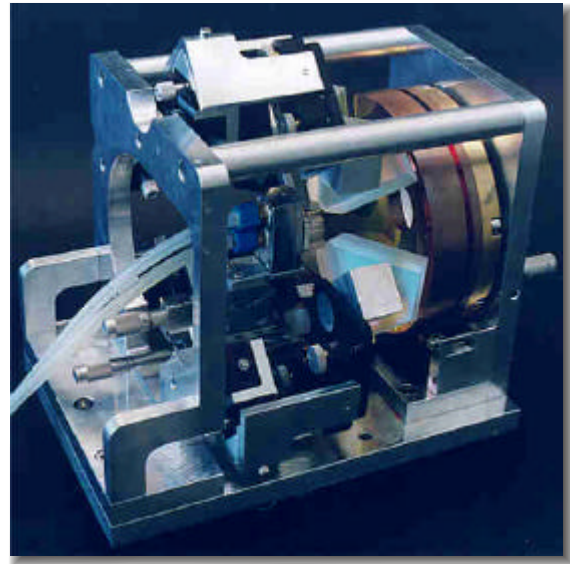


Abb. 2: Experimentelle Realisierung eines Yb:YAG-Scheibenlasers mit 500 W Ausgangsleistung

Oberfläche zu laseraktivem Volumen eine sehr effiziente Abfuhr der erzeugten Verlustwärme und damit trotz der hohen absorbierten Volumenleistungsdichte eine geringe mittlere Kristalltemperatur erzielt. Dadurch wird der Einsatz von laseraktiven Materialien wie z.B. Yb:YAG möglich, die auch als "Quasi-Drei-Niveau-Systeme" bezeichnet werden. Diese sind den konventionell verwendeten Vier-Niveau-Systemen wie Nd:YAG im Wirkungsgrad prinzipiell überlegen, ihre Effizienz nimmt jedoch mit steigender Temperatur ab.

Experimentelle Umsetzung

Der Wirkungsgrad des Yb:YAG-Scheibenlasers hängt stark von der Anzahl der Pumpstrahlungsdurchgänge durch den Kristall ab: je mehr Durchgänge, desto dünner kann der Kristall bei gleicher absorbierter Pumpleistung gewählt werden und desto höher wird der Wirkungsgrad. Numerische Modellierungen zeigen, daß bei Raumtemperatur der Wirkungsgrad bei Verwen-

dung von 16 Pumplichtdurchgängen auf über 50 % ansteigt (s. Abb. 1). Daher wurde eine entsprechende Pumpoptik konzipiert, die eine einfache Realisierung von 16 und mehr Durchgängen erlaubt.

Kernstück der Pumpoptik ist ein Parabolspiegel, der die Pumpstrahlungsquelle auf den Kristall abbildet. Strahlung, die nicht absorbiert wurde, wird von der verspiegelten Kristallrückseite reflektiert, trifft wieder auf den Parabolspiegel und wird dort kollimiert. Durch ein Dachkantprisma wird die kollimierte Strahlung seitlich versetzt auf den Parabolspiegel zurückreflektiert und wieder auf den Kristall abgebildet. Mit drei Prismen und einem Planspiegel, der nach 8 Durchgängen für ein nochmaliges Durchlaufen der Pumpoptik in umgekehrter Richtung sorgt, lassen sich so 16 Pumplichtdurchgänge realisieren.

Strahlqualität

Experimente zur Abhängigkeit des optischen Wirkungsgrades von der erzielbaren

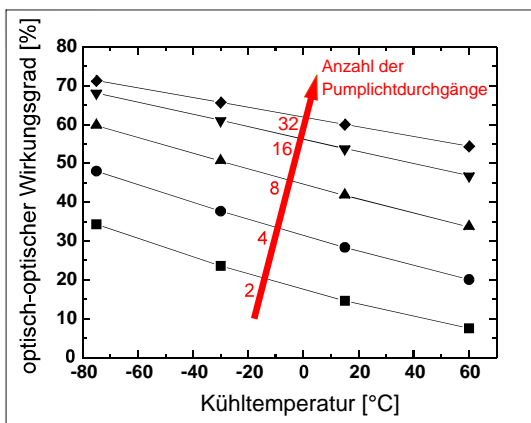


Abb. 1: Modellrechnungen zum Wirkungsgrad des Yb:YAG-Scheibenlasers



Strahlqualität wurden bei einer Pumpleistung von 65 W durchgeführt. Dabei wurde ein linearer Resonator mit der Kristallscheibe als Endspiegel verwendet. Durch die Wahl verschiedener Krümmungsradien des Resonatorspiegels und verschiedene Resonatorlängen wurde das Verhältnis von Grundmoderadius zum gepumpten Durchmesser auf dem Kristall variiert. Es zeigt sich, daß die Ausgangsleistung und damit der Wirkungsgrad nahezu unabhängig vom gewählten Resonator und damit von der erzielten Strahlqualität sind (s. Abb. 3). Aus diesen Ergebnissen läßt sich ablesen, daß die Beugungsverluste an der thermischen Linse der Kristallscheibe tatsächlich sehr gering sind und der Scheibenlaser gute Strahlqualität mit einem hohen Wirkungsgrad zu verbinden erlaubt.

Hohe Ausgangsleistungen

Unter Verwendung einer 230 µm dicken Kristallscheibe und einer Pumpleistung von 1050 W aus einem Diodenarray wur-

de bisher eine maximale Leistung von 500 W aus einer einzelnen Scheibe erzielt, wobei der optisch-optische Wirkungsgrad bei 47 % liegt (s. Abb. 4).

Noch höhere Leistungen lassen sich erreichen, wenn mehrere Kristallscheiben in einem Resonator optisch hintereinander gekoppelt werden. In Abb. 4 ist dargestellt, wie bei einer Pumpleistung von etwa 550 W pro Kristall die Ausgangsleistung in etwa proportional zur Anzahl der Kristalle ansteigt. Auf diese Weise wurde mit 4 Kristallen bei einem optisch-optischen Wirkungsgrad von 48 % eine Ausgangsleistung von 1070 W erreicht - die zur Zeit höchste publizierte Ausgangsleistung für Yb:YAG-Laser.

Alternative Wellenlängen und Betriebsarten

Infolge der prinzipiell geringen spannungsinduzierten Doppelbrechung in der Kristallscheibe läßt sich durch frequenzselektive Elemente im Resonator longitudinaler

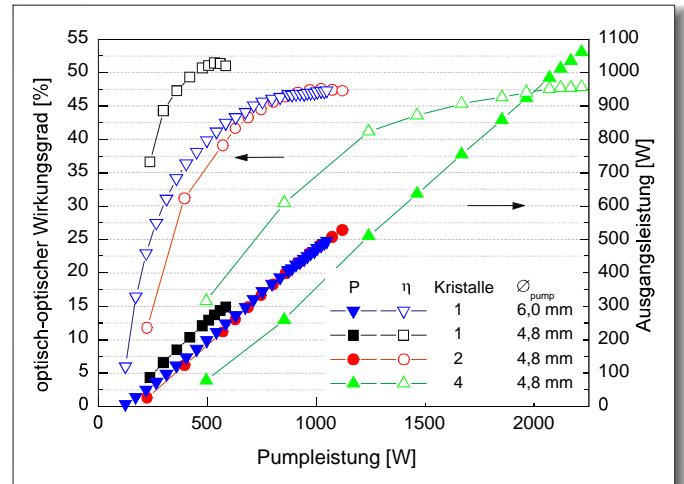


Abb. 4: Ausgangsleistung und Wirkungsgrad bei Verwendung von einem und mehreren Kristallen im Resonator

"Single-Frequency"-Betrieb mit hohem Wirkungsgrad erreichen. In früheren Experimenten mit acht Pumpstrahlungsdurchgängen konnten so Ausgangsleistungen von 28 W mit einem optischen Wirkungsgrad von 31 % erreicht werden.

"Single-Frequency"-Strahlung eignet sich besonders zur effizienten Frequenzkonversion. Durch resonatorinterne Frequenzverdopplung konnten so rund 7 W grüne Laserstrahlung mit "Single-Frequency"-Eigenschaften erzeugt werden.

Das Scheibenlaserdesign ist auch für bisher gebräuchliche Lasermaterialien geeignet. So wurden mit Nd:YAG 45 W Ausgangsleistung mit einem optisch-optischen Wirkungsgrad von 51 % erzeugt. Auch Nd:YVO₄ und Tm:YAG konnten bisher erfolgreich eingesetzt werden.

Pulsbetrieb ist mit dem Scheibenlaser ebenfalls möglich. Im Einsatz als regenerativer Verstärker sind modengekoppelte Pulse auf Pulsenergien von 190 µJ bei Pulsdauern von 2,3 ps verstärkt worden. Im Q-Switch-Betrieb mit Nd:YAG wurden bisher 20 W mittlere Leistung mit Pulsenergien von 2 mJ erzeugt.

Die Arbeiten zum Scheibenlaser wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Projekte 13N6364, 13N6365 und 13N7300 gefördert.

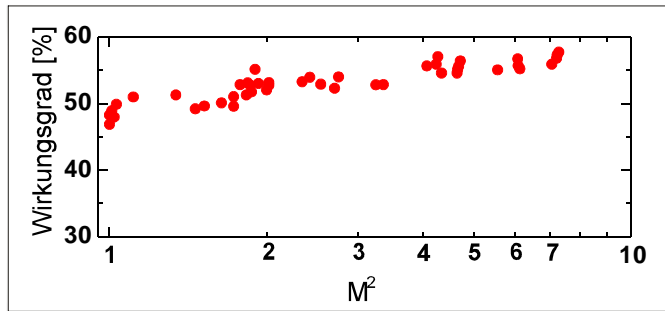


Abb. 3: Abhängigkeit des optisch-optischen Wirkungsgrades von der Strahlqualität bei Kühlung des Kristalls auf Raumtemperatur und 65 W Pumpleistung

Höchste Leistung	1070 W	η = 48 %	T = 15 °C	M _p = 16
Höchster Wirkungsgrad	29,7 W	η = 64 %	T = -74 °C	M _p = 8
Höchste TEM ₀₀ -Leistung	97 W	η = 39 %	T = -8 °C	M _p = 8
"Single-Frequency"	27,7 W	η = 31 %	T = -20 °C	M _p = 8
SF frequenzverdoppelt (515 nm)	6,9 W	η = 15,5 %	T = 15 °C	M _p = 16
Regenerativer Verstärker	190 µJ	2,3 ps	750 Hz	M _p = 8
Nd:YAG cw (1,06 µm)	45 W	η = 51 %	T = 15 °C	M _p = 16
Nd:YAG Q-Switch	2 mJ	145 ns	10 kHz	M _p = 16
Nd:YVO ₄ (1,06 µm)	13,5 W	η = 33 %	T = 15 °C	M _p = 8
Tm:YAG (2 µm)	4 W	η = 21 %	T = -17 °C	M _p = 8

Tab. 1: Bisher erzielte Ergebnisse mit dem Scheibenlaser bei unterschiedlicher Anzahl von Pumpstrahlungsdurchgängen M_p

Institutsadresse:

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

Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Ing. Matthias G. Müller
FGSW - Forschungsgesellschaft
für Strahlwerkzeuge
Nobelstr. 15
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711-687 4321
Fax: +49 (0)711-685 6842
E-Mail: matthias.mueller@fgsw.uni-stuttgart.de
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>