

Erzeugung von 3 kW radial polarisierter CO₂-Laserstrahlung mit Hilfe eines resonatorinternen polarisierenden Gitterspiegels

Axialsymmetrisch polarisierte Laserstrahlung hat sich in den letzten Jahrzehnten als zunehmend interessant für eine Vielzahl von Anwendungen erwiesen; hierzu gehört neben der Materialbearbeitung beispielsweise auch die Entwicklung von Stablaseren, bei denen durch den Einsatz spezieller polarisationsselektiver Komponenten der Einfluss der thermisch induzierten Doppelbrechung reduziert werden kann.

Für das Laserschneiden von Blechen wurde eine erhebliche Effizienzsteigerung aufgrund verbesserter Absorption im Vergleich zu linearer oder zirkularer Polarisation durch die Verwendung von radialer Polarisation vorhergesagt. Für das Laserbohren von Metallen wurde kürzlich gezeigt, dass – abhängig vom verwendeten Material und den Prozessparametern – der Einsatz von radialer oder azimuthaler Polarisation zu deutlich erhöhten Abtragsgeschwindigkeiten führt.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Verfahren zur Erzeugung radial und/oder azimuthal polarisierter Laserstrahlung mit Hilfe von resonatorinternen oder auch von resonatorexternen optischen Komponenten veröffentlicht. Allerdings sind die meisten dieser Verfahren stark verlustbehaftet und/oder extrem justagekritisch und daher nicht oder nur bedingt für den Einsatz in industriellen Hochleistungslasersystemen geeignet. Daher wurde am IFSW ein hochleistungstaugliches, hocheffizientes polarisationsselektives optisches Element entwickelt, das – wie in Abbildung 1 dargestellt – auf einer resonanten Gitterstruktur mit konzentrischen Gitter-

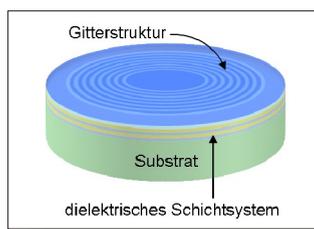


Abb. 1: Schematische 3D-Ansicht des polarisierenden Gitterspiegels mit konzentrischen Gitterlinien.

linien basiert, die in die oberste Lage der Beschichtung eines konventionellen dielektrischen Laserspiegels eingätzt wird, um radial polarisierte Laserstrahlung im Resonator eines CO₂-Lasers zu erzeugen. Die Funktion dieses polarisierenden Gitterspiegels, der anstelle des üblichen Endspiegels in den Resonator eingebaut wird, basiert auf der Kopplung der einfallenden frei propagierenden Strahlung in eine Leck-Mode des dielektrischen Schichtsystems des Spiegels mit Hilfe der darin eingebrachten Gitterstruktur. Die Anwendbarkeit dieses Funktionsprinzips auf Hochleistungs-Scheibenlaser wird gegenwärtig untersucht. Die durch das Gitter bedingte Kopplung der frei propagierenden Strahlung in Wellenleitermoden ist polarisationsselektiv, da – für einen gegebenen Einfallswinkel und eine gegebene Wellenlänge – die Phasen Anpassungsbedingung nur für jeweils eine Polarisationskomponente erfüllt werden kann. Im Fall von Leck-Moden ist die Kopplung von einem Verlust von Leistungsanteilen in das

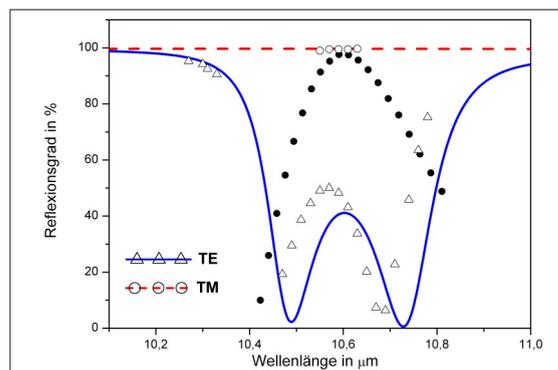


Abb. 2: Berechnete (gestrichelte und durchgezogene Linie) und gemessene (offene Dreiecke und Kreise) Reflexionsspektren für radiale und azimuthale Polarisation für das Gitter mit 6,5 µm Periode und 200 nm Furchentiefe bei senkrechtem Einfall. Die Punkte geben das Verstärkungsspektrum des CO₂-Lasers wieder.

Substrat hinein begleitet. Dieser Verlustmechanismus führt zu einer Reduzierung der Reflektivität für die unerwünschte Polarisationskomponente. Dieser monolithische Ansatz steht im Gegensatz zu dem – ebenfalls monolithischen – GIRO-Spiegelkonzept, bei dem die Moden innerhalb einer tief in das hochbrechende, resonatorinterne Substrat geätzten Gitterstruktur miteinander interferieren, um eine Reflektivität von nahezu 100 % für die gewünschte Polarisation zu erzeugen. Die dielektrische Vielschichtstruktur des Spiegels besteht aus Ge-, ZnSe- und ThF₄-Schichten, die von der Firma II-VI Inc. (USA) aufgebracht wurden. Die Gitterstruktur wurde mit einer Gitterperiode von 6,5 µm und einer Tiefe der Gitterfurchen von 200 nm ausgelegt, um die einfallende Strahlung in zwei benachbarte Leck-Moden einzukoppeln. Hierdurch wird die spektrale Bandbreite des polarisationsselektiven Effekts vergrößert und die Empfindlichkeit

gegenüber Fertigungstoleranzen, etwa bezüglich der Schichtdicken und der Brechzahlen der Schichten sowie bezüglich der Furchentiefe, dem Aspektverhältnis und der Periode der Gitterstruktur minimiert. Die durchgezogene und die gestrichelte Kurve in Abbildung 2 zeigen die berechneten Reflektivitäten des Gitterspiegeldesigns für die azimuthale und die radiale Polarisation. Die Punkte stellen das Verstärkungsspektrum des laseraktiven Mediums dar. Die berechneten Reflektivitäten für TE (entsprechend der azimuthalen Polarisation) und TM (entsprechend der radialen Polarisation) betragen 41 % und 99,6 %; die Reflektivität des unstrukturierten Spiegels liegt bei 99,8 %. Die Berechnungen wurden mit einem exakten Modellierungsprogramm, basierend auf der „modal method“, durchgeführt. Zunächst wurde ein lineares Gitter gefertigt, um den polarisationsselektiven Effekt wellenlängenabhängig unter-

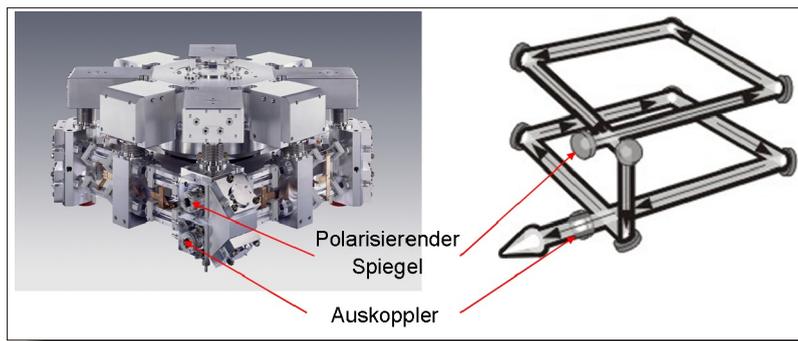


Abb. 3: Foto und schematische Darstellung des Resonators des für die Erzeugung der radial polarisierten Strahlung verwendeten CO_2 -Lasers.

suchen zu können. Die Struktur wurde mittels einer Kontaktkopie einer Chrom-Maske in eine $1 \mu\text{m}$ dicke Photoresistschicht eingebracht, wobei die Maske zur Erzielung eines gleichmäßigen Kontakts mit Hilfe von Vakuum auf das schwach gekrümmte Substrat gepresst wurde. Diese Struktur wurde durch einen reaktiven Trockenätzprozess in die oberste, hochbrechende Schicht des Spiegels übertragen. Die offenen Dreiecke und Kreise in Abbildung 2 zeigen die gemessene wellenlängenabhängige Reflektivität der azimutalen und der radialen Polarisation für dieses Element. Die beiden Minima des Reflexionsspektrums sind im Vergleich zum Design um ca. 50 nm zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben; dies könnte auf geringe Abweichungen zwischen den Parametern der realen Komponente und den Designwerten zurückzuführen sein. Beispielsweise kann die Ursache eine etwas zu geringe Dicke der Schichten sein; die hierfür benötigte Abweichung liegt deutlich unterhalb der Fertigungstoleranzen. Dank der

großen spektralen Breite des doppelten Reflexionsminimums wird die Funktion des Elements durch diese Verschiebung des Spektrums nicht beeinträchtigt. Bei der Laserwellenlänge des CO_2 -Lasers ($10,6 \mu\text{m}$) beträgt die Reflektivität für die unerwünschte (azimutale) TE-Polarisation $R_{\text{azim}} = 43,9 (\pm 0,3) \%$, während sie für die erwünschte (radiale) TM-Polarisation bei $R_{\text{rad}} = 99,5 (\pm 0,3) \%$ liegt. Die Messungen wurden gemäß DIN EN ISO 13697 mit leichten Anpassungen für den Einsatz bei senkrechtem Einfall durchgeführt. Nachdem das korrekte Verhalten dieses ersten Gitterspiegels verifiziert war, wurde im zweiten Schritt mit dem gleichen mikrolithographischen und Ätz-Prozess ein Gitterspiegel mit kreisförmigen Gitterlinien hergestellt.

Für die resonatorinternen Versuche wurde der polarisierende Spiegel mit dem konzentrischen Gitter in einen – in Abbildung 3 dargestellten – TRUMPF TruFlow CO_2 -Laser eingebaut. Abbildung 4 zeigt ein Foto des in einen Plexi-

glaswürfel eingebrannten, perfekt ringförmigen Strahlprofils. Der Polarisationszustand im Strahlprofil wurde mit Hilfe eines LASNIX 605-Polarisationsmessgeräts mit rotierendem Analysator überprüft. Die gemessene Polari-

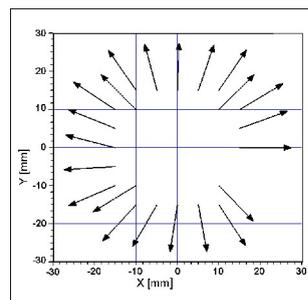


Abb. 5: Gemessene Polarisationsverteilung über den Strahlquerschnitt. Die Pfeile geben die mit dem LASNIX 605 gemessene Polarisationsrichtung an verschiedenen Stellen des Strahlprofils wieder.

sationsverteilung ist in Abbildung 5 dargestellt; sie zeigt, dass die Polarisation über den gesamten Strahlquerschnitt hinweg radial ausgerichtet ist. Durch Einfügen des Gitterspiegels in ein kommerzielles Lasersystem wurde eine maximale cw-Ausgangsleistung von 3 kW mit rein radial polarisierter Strahlung erzielt.

In einem Dauertest wurde der Laser bei einer Ausgangsleistung von $2,7 \text{ kW}$ mit gleichbleibender, radial polarisierter Strahlung für mehrere Stunden stabil betrieben. Dies ist unseres Wissens die höchste stabile, radial polarisierte

Strahlleistung die bisher gezeigt wurde. Der gemessene Wirkungsgrad des radial polarisierten Lasers lag um etwa 10% unter dem des gleichen Lasers mit konventionellem, nicht polarisierendem Endspiegel. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der räumliche Überlapp zwischen dem reinen, ringförmigen Mode und der homogenen Verstärkungsverteilung des Lasers deutlich geringer ist als der Überlapp in der Standardkonfiguration, ist dieses Ergebnis in guter Übereinstimmung mit den Erwartungen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit einem kommerziellen CO_2 -Laser durch Einbringung eines resonanten Gitters auf dem Resonatorendspiegel eine Ausgangsleistung von bis zu 3 kW mit einer stabilen radialen Polarisation erzielt wurde. Anwendungen der radial und azimutal polarisierter Hochleistungs-Laserstrahlung werden zurzeit untersucht; die Ergebnisse werden demnächst veröffentlicht.

Danksagung: Diese Arbeit wurde in Zusammenarbeit mit TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH und dem Hubert-Curien-Laboratorium (Saint-Etienne, Frankreich) im Rahmen eines BMBF-geförderten Projekts (FKZ: 13N8843) durchgeführt.

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:

Dr. Marwan Abdou-Ahmed
abdou.ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner
FGSW - Forschungsgesellschaft
für Strahlwerkzeuge mbH
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 351 451-28
Fax: +49 (0)711 351 451-29
E-Mail:
friedemann.lichtner@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>



Abb. 4: Plexiglas-Einbrand des ringförmigen CO_2 -Laserstrahls.