STUTTGART LASER TECHNOLOGIES

UNIVERSITÄT STUTTGART INSTITUT FÜR STRAHLWERKZEUGE ______...



Hocheffiziente Polarisationskonverter für die Erzeugung von radial und azimutal polarisierter Laserstrahlung im Multi-kW-Bereich

Während der letzten Jahre wurden am IFSW verschiedene Konzepte für die Erzeugung von radialer und/oder azimutaler Polarisation sowohl für Festkörperlaser (Yb:YAG-Scheibenlaser und Nd:YAG-Stablaser) als auch für CO,-Laser untersucht. Die Entwicklungen basierten entweder auf resonatorinternen oder resonatorexternen optischen Systemen. Beispielsweise wurde ein resonatorinterner Gitterspiegel verwendet, um mehr als 5 kW radialpolarisierter CO₂-Laserstrahlung mit hoher Effizienz zu erzeugen.

Laserstrahlung mit radialer oder azimutaler Polarisation ist wegen ihrer spezifischen Vorteile Gegenstand intensiver Forschung in verschiedenen Feldern der Physik, Optik und Laserentwicklung. Zu den möglichen Anwendungen zählen unter anderem Superauflösungs-Mikroskopie, Teilchen-Fallen und Beschleuniger sowie Optische Pinzetten. Bei sehr hohen Leistungen bieten sich insbesondere Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung, etwa das Schneiden, das Schweißen oder das Bohren, an. Weiterhin wurde theoretisch vorhergesagt und experimentell bestätigt, dass die Verwendung von Strahlung mit radialer oder azimutaler Polarisation, abhängig vom Material und den Prozessparametern, zu einer signifikanten Zunahme der Prozesseffizienz führt.

Hier berichten wir über einen hochleistungstauglichen Polarisationskonverter

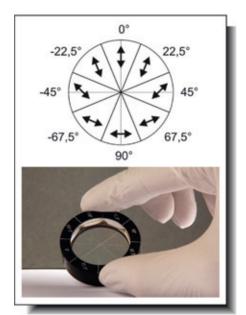


Abbildung 1: Schema und Foto des LRAC.

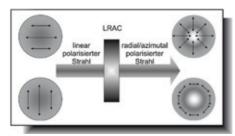


Abbildung 2: Darstellung des Wirkungsprinzips des LRAC. Eine 90°-Drehung der Hauptachse erlaubt ein Umschalten zwischen radialer und azimutaler Polari-

(LRAC), der linear polarisiertes Licht in radial oder azimutal polarisiertes umwandelt. Dieses optische Element besteht aus 8 Halbwellenplatten niedriger Ordnung in der Form eines Kreissegments, die nebeneinander angeordnet sind und jeweils eine spezifische Orientierung der schnellen Achse aufweisen.

Abbildung 1 zeigt ein Schema und ein Foto unseres LRACs. Ein einfallender linear polarisierter Strahl erfährt hierbei, abhängig von der Orientierung des Konverters relativ zur Polarisationsebene des einfallenden Lichts, eine lokale Drehung der Richtung seiner Polarisationsebene in eine radiale oder azimutale Orientierung. Eine 90°-Drehung der Hauptachse erlaubt ein Umschalten von radialer zu azimutaler Polarisation und umgekehrt. Ein Schema dieses Prinzips ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Halbwellenplatten wurden jeweils der Wellenlänge des zu polarisierenden Laserstrahls angepasst. Im Folgenden zeigen wir die Ergebnisse mit verschiedenen Lasersystemen, in denen die entwickelten Polarisationskonverter verwendet und getestet wurden. Hauptsächlich wurden die Strukturen für Yb:YAG-Scheibenlaser bei 1030 nm und 515 nm (durch Frequenzverdopplung

1030 nm erzeugt) entworfen. Die doppelbrechenden Kristallsegmente wurden zwischen zwei antireflexbeschichteten (Reflektivität kleiner als 0,2 Quarzglassubstraten platziert. Dies erlaubte einen Transmissionsgrad von mehr als 99 %.

In einem ersten Experiment wurde der Konverter mit Hilfe eines linear polarisierten Grundmode-Scheibenlasers (gemessene Beugungsmaßzahl M² ~ 1,04) mit einer Ausgangsleistung von einigen 10 Watt charakterisiert. Abbildung 3 zeigt eine aufgenommene Intensitätsver-

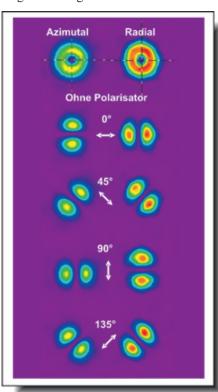


Abbildung 3: Intensitätsverteilung des radial und azimutal polarisierten Strahls nach einigen Zentimetern hinter dem LRAC bei verschiedenen Winkeleinstellungen des Polarisators.

UNIVERSITÄT STUTTGART INSTITUT FÜR STRAHLWERKZEUGE -



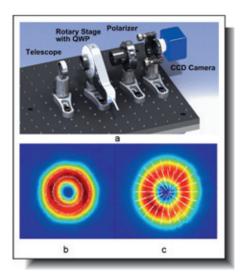


Abbildung 4: (a) Foto des 2D-Stokes-Polarimeters und eine Aufnahme bei (b) radialer und (c) azimutaler Polarisation.

teilung des Strahls nach einigen Zentimetern Propagation hinter dem LRAC. Es wird deutlich, dass nicht nur die Polarisation von linear zu radial bzw. azimutal transformiert wird, sondern zugleich die Intensitätsverteilung von einer Gaußin eine ringförmige (Laguerre-Gauß-ähnliche) Verteilung umgewandelt wird. Sie zeigt im Vergleich zu einer Gauß-Verteilung steilere Flanken. Dies kann ein sehr großer Vorteil für die Materialbearbeitung sein, da die steilen Flanken in der Intensitätsverteilung zu einer Annäherung an ein ideales Flat-Top-Profil führen, ohne jedoch die Einschränkung der schlechteren Fokussierbarkeit mit sich zu bringen. Weiterhin wurden eine Transmission von ca. 99 % und eine Konversionseffizienz von etwa 89 % mit unserem LRAC gemessen.

Um den Polarisationsgrad des umgewandelten Strahls zu messen, wurde ein drehbarer Polarisationsanalysator in den Strahlengang eingefügt. Abbildung 3 zeigt die gemessene Intensitätsverteilung ohne den Analysator und bei verschiedenen Winkeln (z.B. 0°, 45°, 90° und 135°) zur Transmissionsachse. Zusätzlich wurde die Polarisation über den gesamten Querschnitt quantitativ analysiert mit Hilfe eines selbstgebauten, kamerabasierten 2D-Stokes-Polarimeters, welches die Messung des lokalen Polarisationsgrads (also jedes einzelnen Pixels) erlaubt. Eine Aufnahme ist in Abbildung 4 gezeigt. Sowohl der Polarisationsgrad in radialer (DORP), als auch der in azimutaler Richtung (DOAP) betrugen mehr als 96 %.

Nachdem das korrekte Verhalten des Polarisationskonverters bei 1030 nm bestätigt werden konnte, wurde dieser in den Strahlengang von verschiedenen faserge-Scheibenlaser-Systemen (TRUDISK 5001, 10003 und 16003) der Firma TRUMPF mit jeweiligen Ausgangsleistungen von 5 kW, 10 kW und 16 kW eingefügt. Wie in Abbildung 5 zu sehen, wurden die Laserstrahlen zunächst mittels eines Dünnschicht-Polarisators zweigeteilt und linear polarisiert. Mit dem beschriebenen LRAC konnte radial und azimutal polarisierte Strahlung mit bis zu 7,9 kW Leistung demonstriert werden, woraus eine Transmission von 99 % durch das Bauteil folgt. Diese Experimente zeigten auch, dass die hier entwickelte Komponente in der Lage ist, einer Intensität von mehr als 2 kW/cm² ohne nennenswerte Degradation der Komponente oder der Polarisation des umgewandelten Strahls standzuhalten.

Die aufgenommenen Intensitätsverteilungen der durch den LRAC transmittierten Strahlen mit und ohne Polarisationsanalysator sind in Abbildung 6 gezeigt. Basierend auf dem gleichen Prinzip wurde ein LRAC entworfen, produziert und getestet, welcher für 515 nm Wellenlänge ausgelegt ist. Die Komponente wurde mit einem Laser-Prototypen von TRUMPF getestet, welcher im Grundmode ($M^2 \sim 1,1$) eine Ausgangsleistung von 200 W aufweist; dabei wurde ein hoher Transmissionsgrad von 96 bis 97 % durch den LRAC festgestellt. Die umge-

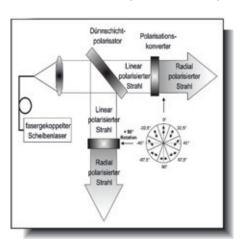


Abbildung 5: Versuchsaufbau zur Erzeugung von radialer und azimutaler Polarisation mit bis zu 7,9 kW Leistung.

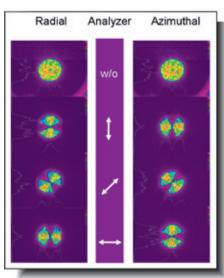


Abbildung 6: Intensitätsverteilung der durch den LRAC transmittierten Strahlen mit und ohne Polarisationsanalysator.

wandelte Laserstrahlung fand anschließend in einem Schweißversuch mit Kupfer Verwendung, um die Effekte der Polarisation auf diesen Prozess zu untersuchen. Die erhaltenen Resultate werden derzeit analysiert und werden später veröffentlicht.

Um die Konversionseffizienz solcher Bauteile weiter zu steigern, sollen in weiterführenden Untersuchungen Polarisationskonverter mit kontinuierlich variierender Orientierung der schnellen Achse auf der Basis von formdoppelbrechenden Sub-Wellenlängen-Strukturen entwickelt werden. Hierzu werden derzeit am IFSW Versuche durchgeführt.

Autor:

Dr. Marwan Abdou Ahmed

Leiter "Laserentwicklung und Laseroptik" Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 43 70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685 69755

E-Mail: abdou-ahmed@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel Tel.: +49 (0)711 685 69721 Fax: +49 (0)711 685 59721

E-Mail: jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de