

Projektplan

SubWell: Sub-Wellenlängenstrukturen für die Generierung von zylindrischen Polarisationszuständen (18728 N)

Forschungsziel

Das Ziel des Projekts ist die Erforschung einer Prozesskette für die kostengünstige Herstellung optischer Hochleistungslaserkomponenten zu Polarisationsstrahlformung. Hierbei handelt es sich um neuartige diffraktive sub-Wellenlängenstrukturen (Abbildung 1). Diese Elemente ermöglichen die Erzeugung nahezu beliebiger räumlich variabler (z.B. radialer) Polarisationszustände, welche für neue, effiziente Materialbearbeitungs- und Schweißprozesse in der Lasertechnik von hohem Interesse sind. Durch den Einsatz dieser Laserkomponenten ergeben sich reduzierte Bearbeitungszeiten (Prozesseffizienz), Energieeinsparungen sowie Qualitätsverbesserungen. Im Rahmen des Projekts sollen geeignete Herstellungstechnologien erforscht werden, um verlustarme und leistungstaugliche Laserkomponenten realisieren zu können. Diese werden dann hinsichtlich ihrer resonatorinternen und -externen Verwendungen im Laserbetrieb charakterisiert. Damit soll die Grundlage für einen breiten Einsatz dieser modernen Komponenten in der Lasertechnologie geschaffen werden, was wiederum den beteiligten Firmen die Möglichkeit zur Erschließung von neuen High-Tech Märkten gibt.

Stand der Technik

Radial bzw. azimutal polarisierte Laserstrahlung besitzt für eine große Anzahl an Anwendungen spezifische Vorteile. Für dieses Vorhaben relevant sind Hochleistungsanwendungen in der Materialbearbeitung. Beim Schneiden von Metallblechen konnte beispielsweise gezeigt werden, dass Prozesseffizienz und die Qualität der Schnittkante mit radialer Polarisation deutlich verbessert wurden [1]. Beim Laserstrahlschweißen konnte gezeigt werden dass mit azimutaler Polarisation die Generierung von Schmelzauswürfen (Spritzer) stark reduziert wird und damit Vorbehandlung bzw. Nacharbeiten an der Schweißstelle entfallen können [2]. Mit gepulsten Lasersystemen konnte beim Laserbohren in der Mikrobearbeitung mit azimutaler Polarisation die Prozesseffizienz durch eine erhöhte Bohrgeschwindigkeit gesteigert werden [3]. Zudem wurde demonstriert, dass dort auch radiale Polarisation ein hohes Potenzial zur Steigerung der Prozesseffizienz hat.

Allerdings ist die effiziente Erzeugung solcher Polarisationszustände in Hochleistungsscheibenlasern bisher noch nicht gelungen. Diese kann resonatorintern oder -extern (durch Polarisationskonversion) erfolgen. Die derzeit kommerziell erhältlichen Polarisationskonverter [4, 5] sind wegen ihrer geringe Transmissionswerte (50 - 90%) und Schadensschwelle [6] nicht hochleistungstauglich. Resonatorinterne Konzepte für den Hochleistungsscheibenlaser zur effizienten Generierung dieser Polarisationszustände sind noch nicht am Markt erhältlich.

Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Das Projektziel soll durch die Untersuchung zweier neuartiger Konzepte zur Polarisationsformung erreicht werden:

1. Breitbandgitterspiegel, die polarisationsselektiv und verlustarm sind. Diese Elemente sollen robust gegenüber den zu erwartenden Fertigungstoleranzen sein und eine hohe Leistungsfähigkeit im Sinne von thermischer Belastbarkeit und Schadensschwelle aufweisen. Diese Elemente sind sehr gut zur Anwendung im Laserresonator („intra-cavity“) geeignet.

2. Transmissive Polarisationskonverter die auf sub- λ -Gitterstrukturen basieren. Diese Nanostrukturen mit Gitterperioden, die deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts sind, erzeugen mit hoher Konversionseffizienz und Transmission die geforderten Polarisationszustände. Sie eignen sich für die Konversion von Polarisationszuständen außerhalb des Laserresonators („extra-cavity“).

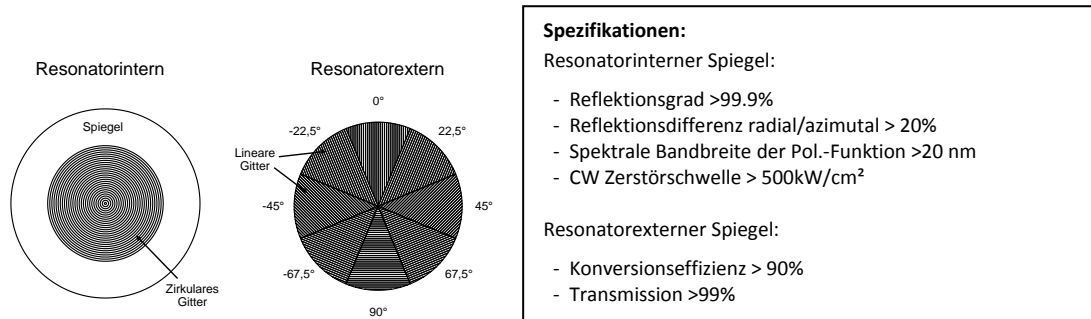


Abbildung 1: Schematische Zeichnung eines resonatorinternen polarisierenden Spiegels und eines resonatorexternen gitterbasierten Polarisationskonverters bestehend aus 8 Gittersegmenten.

- **Erster Ansatz: Resonatorinterne Polarisationsstrahlformung**

Durch die sub-Wellenlängenstruktur können sogenannte leaky-modes in die Spiegelschichten eingekoppelt werden [7], wenn die Einkoppelbedingung

$$n e_{\text{rad/azim}} = m \frac{\lambda}{\Lambda}$$

erfüllt ist. Hierbei ist m die Beugungsordnung, in welche die Strahlung gesendet wird. Die Einkoppelbedingung ist für radiale (TM) bzw. azimutale (TE) Polarisation wellenlängenabhängig. Damit können wie in Abbildung 2, links, schematisch angedeutet der ungewünschte Polarisationszustand (z.B. azimutal) in der $m = \pm 1$ sten Beugungsordnung bei einer bestimmten Wellenlänge abgeleitet werden, während der im Laser zu erzeugende Polarisationszustand (z.B. radial) die hohe Reflektion der Spiegelschichten erfährt und somit letztendlich als einziger Polarisationszustand im Laserresonator anschwingen kann. Prinzipiell kann mit diesen sub-Wellenlängenstrukturen zusätzlich zur polarisationsabhängigen Reflektionsdifferenz auch eine große axialsymmetrische Phasenverschiebung erzeugt werden. Damit könnten erstmalig die Phasenverschiebungen am Umlenkspiegeln oder im Laserkristall für radiale Polarisation ausgeglichen werden um optimale Eigenschaften (Polarisationsreinheit, Laserwirkungsgrad) des emittierten Laserstrahls zu erzielen.

Versuche am IFSW in Zusammenarbeit mit dem ITO [7, 8], sub-Wellenlängenstrukturen resonatorintern für diesen Zweck anzuwenden, verliefen bereits sehr erfolgreich. Es zeigte sich aber, dass der einfachste Strukturentwurf nicht ideal und die Zuverlässigkeit der Herstellung entscheidend sind, oder die möglichen erreichbaren Leistungsdichten mit einer resonanten Gitter-Wellenleiterstruktur bisher zu gering sind. Auch konnte theoretisch gezeigt werden [9], dass die Effizienz sowie die Reinheit des radialen Polarisationszustandes stark von der Anwesenheit von Faltungsspiegeln, welche eine Phasenverschiebung zwischen s- und p- Polarisation hervorrufen, beeinflusst werden. Um diesen störenden Einfluss zu kompensieren ist ein axialsymmetrischer Phasenschieber innerhalb der Kavität nötig. Die im Rahmen dieses Projektes zu entwerfenden sub-Wellenlängenstrukturen sollen auf diese technischen Probleme eingehen und Lösungen bieten.

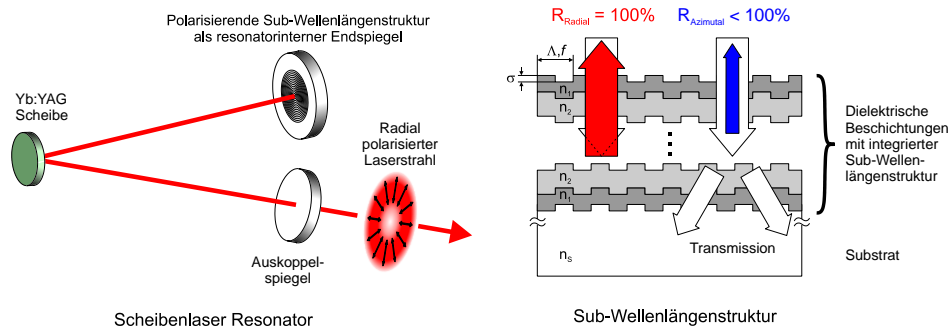


Abbildung 2: Links: Diffraktive leaky-mode sub-Wellenlängenstruktur für den resonatorinternen Einsatz im Scheibenlaser zur Generierung radialer Polarisation. Rechts: Funktionsprinzip der Polarisationsselektion. Λ : Gitterperiode, σ : Gittertiefe, f : Tastgrad (duty-cycle), n_1 , n_2 , n_s : Brechungsindex der Schichten bzw. Substrat.

Literatur

- [1] V. Onuseit et al., *Physics Procedia A*, 12, 584–590 (2011)
- [2] R. Weber et al., Invited talk, ALT'10, Egmond am Zee, Holland, 2010
- [3] M. Kraus et al., *Optics Express*, 18(21), 2305-22313 (2010)
- [4] M. Stalder et al., *Optics Letters*, 21(23), 1948-1950 (1996)
- [5] M. Beresna et al., *Applied Physics Letters*, 98(20), 201101 (2011)
- [6] T. Kämpfe et al., *IEEE Photonics Journal*, 3(6), 1142 – 1148 (2011)
- [7] M. Abdou Ahmed et al., *Optics Express* 19(6), 5093-5103 (2011)
- [8] M. Vogel et al., *Optics Express*, 20(4), 4024-4031 (2012)
- [9] A. Voss et al., *Optics Express*, 18(21), 21540-21550 (2010)

- **Zweiter Ansatz: Extra-cavity Polarisationskonversion**

Zur resonatorexternen Polarisationskonversion soll ein neuartiger Ansatz basierend auf formdoppelbrechenden Gitterstrukturen untersucht werden (Abbildung 3). Dabei handelt es sich um den Effekt, dass TE und TM Polarisation bei sub-Wellenlängenstrukturen einen unterschiedlichen effektiven Brechungsindex n_{TE} bzw. n_{TM} erfahren. Es besteht damit eine Phasenverschiebung ϕ zwischen TE- und TM Polarisation. Beträgt diese π , hat das Gitter die Funktion einer $\lambda/2$ -Phasenverschiebungsplatte. Formdoppelbrechende Strukturen dieser Art entsprechen damit dem Verhalten eines negativen uniaxialen Kristalls. Bei entsprechender Gitterform kann dann z.B. lineare- in radiale- oder azimutale Polarisation konvertiert werden.

Herstellungstechnologie

Es gibt verschiedene Strukturierungstechnologien für die Herstellung von diffraktiven Elementen. Die Dimensionen der angestrebten sub-Wellenlängenstrukturen werden im Bereich von mehreren hundert Nanometer liegen. Die Anforderungen an die Präzision der Gitterstrukturen liegen im niedrigen zweistelligen Nanometerbereich. Um später geringe Kosten für die Herstellung zu erreichen, ist ein kostengünstiges Verfahren erforderlich. In Vorarbeiten hat sich die sogenannte „Scanning Beam Interference-Lithography“ (SBIL) als sehr effizientes Direktbelichtungsverfahren bewährt und soll daher in diesem Vorhaben eingesetzt und weiterentwickelt werden. Dabei werden die Gitterstrukturen lokal flächig durch Interferenzlithografie erzeugt. Dieses Muster wird gescannt und damit die gewünschte Gesamtstruktur erzeugt. Der Vorteil dieses Ansatzes mit sub-Wellenlängenstrukturen im Vergleich zu den Stand der Technik verwendeten segmentierten

Verzögerungsplatten besteht darin, dass eine 100%ige Polarisationskonversion möglich ist und die Vorteile der SBIL Technologie voll ausgenutzt werden können. Die Gitterorientierung in den einzelnen Segmenten ist direkt durch den SBIL Prozess gesteuert und es entstehen keine Unstetigkeiten oder Verluste in der Gitterstruktur, welche bei einer segmentierten Verzögerungsplatte an den einzelnen Fügstellen immer vorhanden sind. Es können auf einfache Weise viele Segmente erzeugt werden und damit eine hohe Polarisationskonversion erreicht werden.

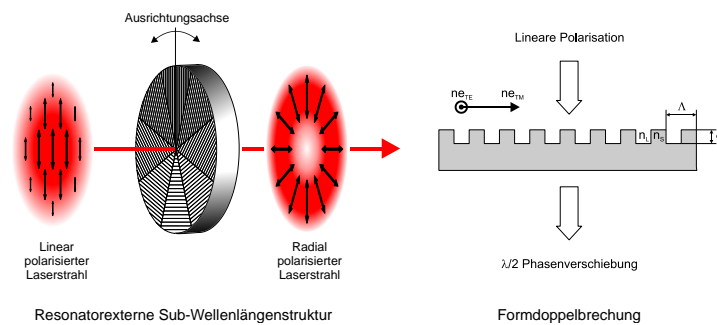


Abbildung 3: Links: Resonatorexterne Subwellenlängenstruktur zur Konvertierung linearer Polarisation in radiale Polarisation. **Rechts:** Funktionsprinzip der Formdoppelbrechung. Durch die diffraktive sub-Wellenlängenstruktur wird ein unterschiedlicher effektiver Brechungsindex für TE und TM Polarisation erzeugt. Λ : Gitterperiode, σ : Gittertiefe, n_L , n_S : Brechungsindex der das Gitter bildenden Medien, $n_{TE/TM}$: Effektiver Brechungsindex für TE und TM Polarisation.

Die Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf das Design und die Modellierung der Komponenten, die Technologie zur großflächigen, preiswerten Herstellung nanostrukturierter Spiegeloberflächen mittels SBIL und der Erzeugung hochqualitativer dielektrischer Schichtsysteme, sowie deren Test in resonatorinternen und resonatorexternen Anwendungen.

Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsthemas

Das Vorhaben adressiert verschiedene Technologiebereiche und Märkte. Zum Einen betrifft dies die Herstellung der Komponenten selbst. Die Untersuchungen im Vorhaben etablieren neuartige Herstellungsmethoden im Bereich der effizienten und damit kostengünstigen Generierung von anspruchsvollen Gitterstrukturen mit Dimensionen im Bereich weniger hundert Nanometer. Dies kann, zusammen mit den Ergebnissen zu einer darauf optimierten Beschichtungstechnologie, von Komponentenherstellern direkt für die Herstellung der neuartigen Polarisationsstrahlformern genutzt werden.

Der zweite Bereich ist die Anwendung dieser Elemente. Erklärtes Ziel ist die Verfügbarmachung von hochleistungstauglichen polarisationsstrahlformenden Elementen. Hierdurch wird die effiziente Materialbearbeitung mit angepassten Polarisationszuständen befördert. Im Ergebnis des Vorhabens werden sowohl eine intra-cavity Lösung für den Hersteller von maßgeschneiderten Lasersystemen zur Verfügung stehen als auch eine sehr universell einsetzbare externe Lösung (extra-cavity), die für Hersteller und Anwender von Lasermaterialbearbeitungssystemen interessant sein wird. Hierdurch wird der Einsatz von vielversprechenden, bisher jedoch noch unüblichen Polarisationszuständen vorangetrieben, wodurch neue Prozesse, Energieeinsparungen und optimierte Bearbeitungsprozesse erwartet werden.

Projektbegleitender Ausschuss

Unternehmen
AMPHOS GmbH
Amplitude Systems S.A.
Coherent Kaiserslautern GmbH
GFH GmbH
High Q Laser GmbH (Spectra-Physics Rankweil)
HOLOEYE AG
Ingenieurbüro Heidenreich
Institut für Mikroelektronik Stuttgart
TOPAG Lasertechnik GmbH

Tab. 1: Zusammensetzung des projektbegleitenden Ausschusses.