

DESIGN VON KOMPONENTEN FÜR HOCHLEISTUNGSLASER HOHER STRAHLQUALITÄT

DESIGN OF OPTICAL COMPONENTS FOR SINGLE-MODE HIGH-POWER LASERS

Hochleistungsfaserlaser hoher Strahlqualität haben das Potenzial, ressourcenschonende Fertigungstechnologien zu etablieren. Moderne Faserlaser [1–3] erzeugen beugungsbegrenzte Strahlung mit Ausgangsleistungen im Kilowattbereich. Bei typischen Durchmessern der Faserkerne von 20–30 μm erreicht die Flussdichte an der Faserendfläche einige 10 MW/mm^2 [2]. Ausgehend von Defekten kann diese Leistung zur Zerstörung der Endfläche führen. Durch das Anspießen von Endkappen (Abb. 1) [3] wird die Leistungsdichte an der Glas-Luft-Grenzfläche und damit die Gefahr der Zerstörung reduziert. Gleichzeitig können die Endkappen zusätzliche Aufgaben übernehmen: Aufgebrachte Anti-Reflexschichten reduzieren die Fresnel-Verluste. Durch die Formgebung der Endkappe können optische Funktionen integriert werden.

Im Falle sehr hoher mittlerer Ausgangsleistungen stellt die durch den temperaturabhängigen Brechungsindex und thermisch induzierte Deformation verursachte thermische Linse eine Begrenzung der erreichbaren Brillanz dar. Deren Stärke wird durch die Restabsorption im Grundmaterial der optischen Komponenten und in den Beschichtungen bestimmt. Die typische Absorption von 50 ppm in AR-Schichten ist vergleichbar mit der in Kieselglas bei Dicken im Zentimeterbereich.

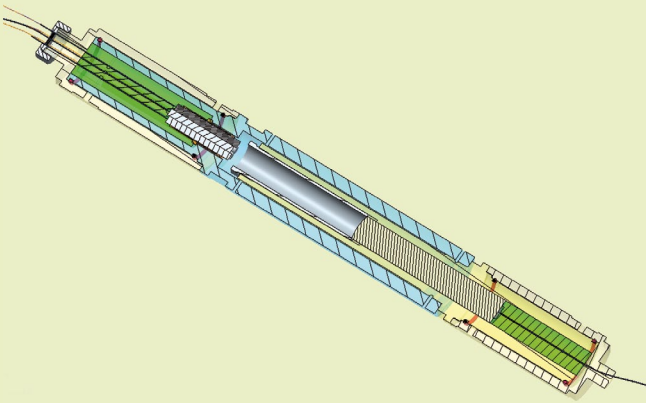
1 Mit CO_2 -Laser geformte kollimierende Endkappe.

High power fiber laser offer the potential for the development of resource-efficient manufacturing technologies. Current fiber lasers [1–3] generate diffraction-limited beams in the kilowatt range. With a typical fiber core diameter of 20–30 μm , the fluence rate at the fiber end face can easily reach several 10 MW/mm^2 [2]. Due to defects, this power density may be sufficient to destroy the fiber end face.

By splicing end caps to the fiber (Fig. 1) [3], the power density at the glass-air interface and, hence, the risk of fiber damage is reduced. Additionally, the end caps may have further functionalities: anti-reflex coatings may be applied here to reduce Fresnel losses. The form of the end face may be used for beam shaping or similar optical functionality.

For high-power lasers, the achievable brightness is also limited by the so-called "thermal lens", due to temperature-dependent change of the refractive index as well as thermally induced strain. The magnitude of the thermal lens is determined primarily by the remaining absorption of the component's base material and the coating. Typical absorption of an AR coating in the range of 50 ppm compares to a thickness of several centimeters of fused silica.

1 Collimating fibre end-cap formed by a CO_2 -laser.



2

Die Ausbildung thermischer Linsen in Komponenten für Hochleistungslaser kann durch das Befolgen einiger Designregeln verringert werden:

- Materialien mit geringer Restabsorption, hoher Wärmeleitfähigkeit und niedriger thermischer Ausdehnung wählen,
- einen monolithischen Aufbau mit minimaler Anzahl freier Flächen anstreben,
- viele Funktionen in ein Bauelement integrieren.

Im Folgenden soll das Design optischer Komponenten für Hochleistungslaser an zwei Beispielen dargestellt werden.

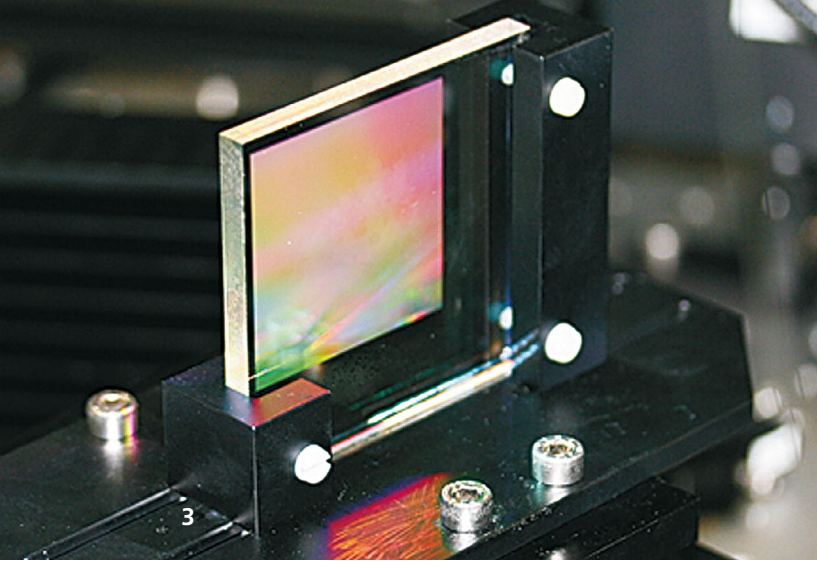
Inkohärente Koppler dienen zur Vereinigung von Laserstrahlung aus mehreren Quellen. Mit zunehmender Quellenzahl steigt die Gesamtleistung. Allerdings wird diese Steigerung auf Kosten der Brillanz erzielt, die aber für die Materialbearbeitung in vielen Fällen ausreicht. Der Aufbau eines solchen Kopplers ist in Abb. 2 dargestellt. Die optischen Elemente bestehen aus Kieselglas mit geringer Absorption bei Wellenlängen um $1\ \mu\text{m}$. Die beugungsbegrenzte Strahlung der einzelnen Quellen wird jeweils über eine Faser zugeführt. Durch eine mit der Faser verspleißte Endkappe wird der Strahl kollimiert. Die Endkappen liegen möglichst dicht nebeneinander, da die erreichbare Brillanz vor allem durch den Füllfaktor der kollimierten Bündel in der Aperturebene bestimmt wird. Die Einkopplung aller Bündel in eine Multimode-Transportfaser erfolgt über eine ebenfalls verspleißte Fokussierlinse.

The formation of thermal lenses in optical components for high-power lasers can be reduced by taking into account the following design rules:

- Choose materials with a low residual absorption, a high thermal conductivity and a low thermal expansion.
- Use a monolithic setup with a minimum of free optical surfaces.
- Integrate several functions in one component.

Two examples may be used to illustrate the design of optical components for high-power lasers:

Laser radiation from different sources may be combined by incoherent couplers. The total power rises with the number of sources but brightness is sacrificed. However, the brightness is sufficient for many applications, in particular in material processing. The design of such a combiner is shown in Fig. 2. The optical elements are made of fused silica with a low absorption at a wavelength of $1\ \mu\text{m}$. A diffraction-limited beam from each source is fed into the device via a fiber. To collimate the beam, an end cap with a spherical front surface is spliced to each fiber. A dense package of the collimators is necessary, since the fill factor of the collimated beams in the aperture plane is crucial for the achievable brightness. The array of beams is then coupled into a multimode output fiber by means of a spliced focussing lens.



Die spektrale Kombination verschiedener Quellen kann eingesetzt werden, wenn eine hohe Brillanz der Strahlung, aber nur geringe spektrale Reinheit benötigt wird. Die Strahlung mehrerer Quellen mit verschiedenen Wellenlängen wird mittels eines Beugungsgitters zu einem gemeinsamen Ausgangsstrahl zusammengeführt [4, 5].

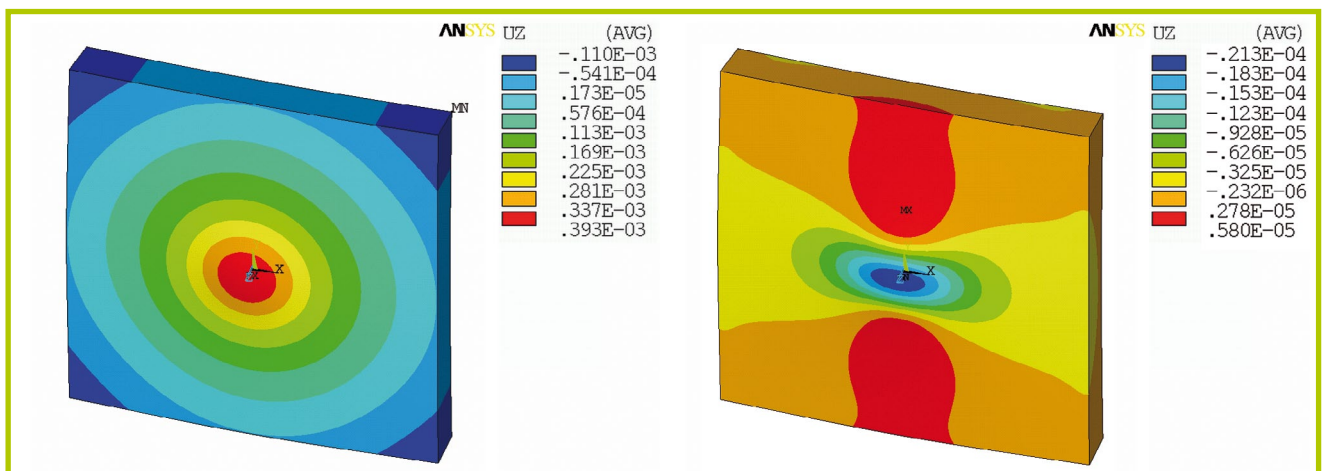
Spectral combination of different sources may be another option if a high brightness of the combined radiation is needed, but spectral purity is of minor importance. Laser beams from multiple sources with different wavelengths are combined into a single output beam by a diffraction grating [4, 5].

Die erreichbare Brillanz ist in erster Linie durch die thermische Linse aufgrund der Restabsorption am Gitter limitiert. Bei einem Reflexionsgitter (Abb. 3) lassen sich die Verluste auf die einer einzelnen HR-Beschichtung reduzieren. Im Unterschied zu Transmissionsgittern spielt die Temperatur im Inneren keine Rolle.

The achievable brightness of the output beam is limited primarily by the thermal lens, due to residual absorption of the grating. If a reflective grating (Fig. 3) is used, the relevant losses will be those of a single high-reflection coating. In contrast to a transmission grating, the temperature distribution inside the optical element is not relevant.

Limitierende thermo-optische Effekte sind die Aufwölbung der Gitteroberfläche und die Ausdehnung in Richtung des Gittervektors (Abb. 4), die zu einer Änderung der Gitterperiode und damit zu einer Strahlablenkung führen.

The limiting thermo-optical effects are the bowing of the grating surface as well as a straining in direction of the grating (Fig. 4) vector which results in a change of the grating period and, hence, a tilt of the output beam.



4 Thermische Linse am Gitter bei 2,5 W absorbiert Leistung und 10 mm Strahldurchmesser. Links: Oberflächenverformung in mm, rechts: Dehnung in Richtung des Gittervektors. | Thermal lens of a reflecting grating at an absorbed power of 2.5 W and a beam diameter of 10 mm. Left: out-of plane distortion of the surface [mm], right: strain in direction of the grating vector.

Die vorgestellten Arbeiten werden vom BMBF im Rahmen des Projekts »Faserlaser höchster Brillanz« (FKZ 13N9099) und durch die Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen der MAVO »Highoptics« gefördert.

The work presented here is supported by the German federal ministry of education and research (BMBF) "Fibre lasers with high brightness" (FKZ 13N9099) and by the Fraunhofer-Gesellschaft in the framework of the project "Highoptics".

Literatur/References

- |1| Schreiber, T.; et al.: Hochleistungskomponenten für Faserlaser, Fraunhofer IOF Jahresbericht 2009.
- |2| Gapontsev, D.: 6 kW CW Single Mode Ytterbium Fiber Laser in All-Fiber Format, Solid State and Diode Laser Technology Review (2008).
- |3| Boehme, S.; et al.: Laser splicing of end caps: process requirements in high power laser applications, Proc. SPIE 7202, 720205 (2009).
- |4| Schmidt, O.; et al.: 1.1 kW nanosecond fiber amplifier based on spectral beam combination, CLEO/Europe and EQEC (2009).
- |5| Wirth, C.; et al.: 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers, Opt. Express 17, 1178–1183 (2009).

- 3 *Dielektrisch beschichtetes Reflexionsgitter auf Kieselglas.*
- 3 *Dielectric reflection grating on a fused-silica substrate.*

AUTHORS

*Thomas Peschel
Christian Wirth
Miroslaw Rekas
Steffen Böhme
Thomas Schreiber
Ernst-Bernhard Kley¹
Ramona Eberhardt*

*¹ Institut für Angewandte Physik,
Friedrich-Schiller-Universität Jena;
Fraunhofer IOF*

CONTACT

*Dr. Thomas Peschel
Phone +49 3641 807-335
thomas.peschel@iof.fraunhofer.de*