

Opto- und thermo-mechanisches Design von Hochleistungsfaserlasern



Thomas Peschel



Jens Limpert ¹



Ulrich Streppel



Christian Wirth



Christoph Damm



Ramona Eberhardt



Andreas Tünnermann

Das Konzept des Faserlasers stellt eine der aussichtsreichsten Möglichkeiten dar, optische Leistungen bis in den Bereich einiger Kilowatt bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität für Anwendungen in Forschung und Produktion bereitzustellen.

Im Rahmen eines internen Forschungsprogramms der FhG* sollen die notwendigen Technologien für ein Kilowatt-cw-Lasersystem entwickelt und ein Prototyp aufgebaut werden. Zentrale Optik- und Mechanikkomponenten wurden konzipiert und deren Betriebsverhalten mittels FEM simuliert. Um die erforderliche Pumpleistung möglichst effizient in die aktive Faser einkoppeln zu können, wurde eine an die Parameter der Faser angepasste Freistrahloptik entworfen und realisiert. Im Vorfeld der Konstruktion wurde das thermo-optische Verhalten der Kieselglaslinsen in Abhängigkeit von der Laserleistung simuliert, um die Auslegung der Linsen zu optimieren und deren Einfluss auf die erreichbare Strahlqualität und -stabilität abschätzen zu können (Abb. 1). Bei einer Laserleistung von 5 kW kommt es, vor allem durch Absorption in den Antireflexschichten, zur Ausbildung einer thermischen Linse mit einer optischen Wegdifferenz von ca. $\lambda/6$.

Von großer Bedeutung ist weiterhin das Temperaturmanagement der Faser, die durch den Quantendefekt eine vom aktiven Laserkern ausgehende Erwärmung erfährt. Diese belastet die Faser sowohl thermisch als auch mechanisch /1/ und kann im ungünstigsten Fall zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führen. Deshalb kommt angepassten Aufbaukonzepten eine enorme Bedeutung zu /2-4/.

Die Faser wird auf ihrer gesamten Länge von mehreren Metern über ihre Mantelfläche an eine Wärmesenke angebunden, die gleichzeitig die stabile Einbettung der Faser erlaubt und sie so auch vor mechanischer Beanspruchung und Umgebungseinflüssen schützt. Die Einbettung der Faser innerhalb der Wärmesenke erfolgt in mehreren Windungen, so dass die gesamte Faser in einem kompakten (geschlossenen), robusten Gehäuse (Abb. 3) untergebracht wird, welches durch die integrierte Wasserkühlung für den Abtransport der entstehenden Wärme sorgt. Die Anbindung an die Wärmesenke wurde mittels FEM für verschiedene Materialien modelliert und die Temperaturverteilung innerhalb und außerhalb der Faser im Betrieb simuliert (Abb. 2). Durch die Einbettung kann auch bei einer Verlustleistung von bis zu 100 W/m der Faserkern auf Temperaturen unter 120 °C gehalten werden.

Literatur:

- /1/ Limpert, J. u.a.: Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation, *Optics Express*, Vol. 11, No. 22 (2003), 2982.
- /2/ Liem, A. u.a.: Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: power scaling concepts up to the multi-kW range, *SPIE Proceedings Vol. 5335* (2004), 158-169.
- /3/ Beckert, E.: Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /4/ Deutsches Patent DE 10347450 A1, Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen, 2005.

¹ Friedrich-Schiller-Universität, Jena

* Gefördert durch die Fraunhofer-Gesellschaft, MAVO 814970

Opto- and thermo-mechanical design of high power fiber lasers

The fiber laser represents one of the most promising concepts for providing optical power in the range of several kilowatts with diffraction limited quality for applications in research and production. In the framework of an internal research program of the Fraunhofer-Gesellschaft* essential technologies for a kilowatt cw fiber laser system are to be developed and a prototype built. Optical and mechanical key components have been designed. Their behavior under operational conditions has been simulated with the finite element method (FEM). To reach a high pumping efficiency, a specially adapted free space optical system has been designed. To optimize the layout of the system and to estimate the impact on the beam quality and stability the thermo-optical response of the silica lenses has been modeled as a function of the emitted laser power (see Fig. 1). Primarily due to residual absorption in the anti-reflection coatings a thermal lens with an OPD of appr. $\lambda/6$ evolves at a laser power of 5 kW. The thermal management of the fiber itself is another important challenge. Due to the quantum defect of the laser process the fiber core is heated, resulting in both thermal and mechanical loads on the fiber material /1/. In the worst case the thermal gradient inside the fiber can compromise the beam quality. For this reason, well-adapted packaging concepts for the fiber are necessary /2-4/.

* Supported by the Fraunhofer-Gesellschaft under MAVO 814970

To provide optimum cooling the outer surface of the fiber is connected to a water-cooled heat sink along its whole length of several meters. This also allows for a stable embedding of the fiber and protects it against environmental influences. The fiber is wound up in a spiral shape, so that its whole length is covered by a robust housing that also carries away the generated heat. The connection between fiber and heat sink has been modeled by FEM to simulate the temperature distribution under operating conditions (see Fig. 2). Even at a power level of 100 W/m the fiber core can be kept at temperatures below 120 °C.

References:

- /1/ Limpert, J. u.a.: Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation, Optics Express, Vol. 11, No. 22 (2003), 2982.
- /2/ Liem, A. u.a.: Air-clad large-mode-area photonic crystal fibers: power scaling concepts up to the multi-kW range, SPIE Proceedings Vol. 5335 (2004), 158-169.
- /3/ Beckert, E.: „Ebene Keramiksubstrate und neue Montagetechnologien zum Aufbau hybrid-optischer Systeme“, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2005.
- /4/ Deutsches Patent DE000010347450A1, „Keramiksubstrate mit integrierten mechanischen Strukturen zum direkten Fassen von optischen Bauelementen“, 2005.

Abb. 2: Querschnitt durch Faser und Wärmesenke mit Temperaturverteilung bei einer Wärmelast von 100 W/m.

Fig. 2: Cross section of the temperature distribution in fiber and heat sink under a thermal load of 100 W/m.

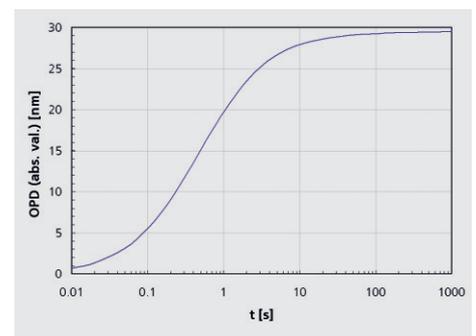
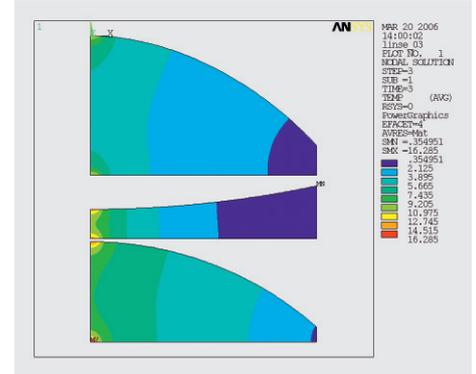
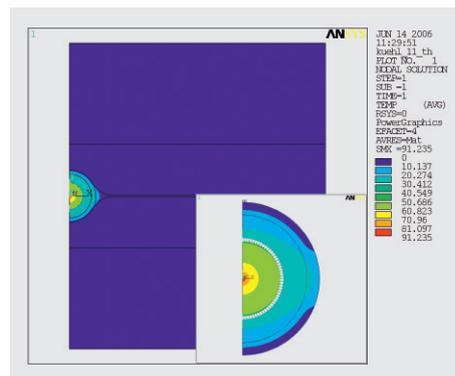


Abb. 1: FEM-Simulation der Temperaturverteilung in der Einkoppeloptik (oben) und der zeitlichen Entwicklung des Wellenfrontfehlers in einer einzelnen Linse (unten) bei einer Strahlleistung von 5 kW.

Fig. 1: FEM-simulation of the temperature distribution in the coupling optics (top) and of the evolution of the corresponding wavefront error in a single lens (bottom) at a laser beam power of 5 kW.

Abb. 3: Laboraufbau zur Kühlung eines kW-Faserlasers.

Fig. 3: Laboratory setup for cooling a kW class fiber laser.

