

# 2 kW inkohärente Strahlkombination von vier schmalbandigen photonischen Kristallfaserverstärkern



Christian Wirth<sup>1</sup>



Oliver Schmidt<sup>2</sup>



Igor Tsybin<sup>1</sup>



Thomas Schreiber<sup>1</sup>



Thomas Peschel<sup>1</sup>



Frank Brückner<sup>2</sup>



Tina Clausnitzer<sup>2</sup>



Jens Limpert<sup>2</sup>



Ramona Eberhardt<sup>1</sup>



Andreas Tünnermann<sup>1,2</sup>

## Motivation

Hochleistungsfaserlaser mit mehreren Kilowatt Ausgangsleistung und beugungsbegrenzter Strahlqualität sind heutzutage kommerziell verfügbar und adressieren immer mehr Anwendungen speziell in der Materialbearbeitung /1/. Die Skalierung dieser Quellen zu höheren Leistungen, die in neuen Anwendungsfeldern benötigt werden, ist durch nichtlineare optische Effekte begrenzt, die durch hohe Intensitäten und große Wechselwirkungslängen der im Kern der Faser erzeugten Strahlung hervorgerufen werden /2/. Eine weitere Limitierung stellen thermo-optische Effekte durch die hohe Leistungsextraktion pro Faserlänge und die damit erzeugte hohe Wärmeleistung aufgrund des Quantendefekts des Laserprozesses dar.

## Strahlkombinationstechniken

Eine Leistungsskalierung über diese Grenzen hinweg ist nur durch Strahlkombinationstechniken möglich. Die Kombination von mehreren Strahlen (Kanälen) zu einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl ist Forschungsgegenstand weltweit. Verschiedene Ansätze, die sich formal in kohärente und inkohärente Techniken unterteilen lassen, werden dabei verfolgt.

Bei kohärenter Strahlkombination wird eine sehr präzise Kontrolle der Phasenlage jedes einfrequenz emittierenden Kanals gefordert.

Demgegenüber ist die inkohärente und damit nur geometrische Überlagerung mehrerer Strahlen verschiedener Wellenlängen in Nah- und Fernfeld durch ein wellenlängenselektives Element unkomplizierter und kann ohne Phasenkontrolle erfolgen /3/. Diese Methode hat einzig den Nachteil, dass die spektrale Reinheit der Einzelkanäle aufgegeben werden muss. Für viele Anwendungen stellt dies aber kein Problem dar.

## Experimenteller Aufbau

Das hier entwickelte Lasersystem basiert auf inkohärenter spektraler Strahlkombination von vier Ytterbium-Faserverstärkerketten für schmalbandige Strahlung. Jede einzelne Verstärkerkette verstärkt einen Laser bei einer anderen Wellenlänge. Diese werden über ein Beugungsgitter als wellenlängenselektives Element zu einem Strahl kombiniert. Der schematische Aufbau ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Wellenlänge jedes Kanals wird dabei unabhängig von den anderen Kanälen durch einen schmalbandigen Diodenlaser vorgegeben. Die Emissionswellenlänge des Diodenlasers reicht von 1025 nm bis 1075 nm.

<sup>1</sup> Fraunhofer IOF

<sup>2</sup> Institut für Angewandte Physik, Friedrich-Schiller-Universität Jena

# 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers



## Motivation

High power fiber lasers with several kilowatts average output power and diffraction limited beam quality are commercially available today and find applications especially in material processing /1/. However, the scaling of these sources to much higher output powers to address new applications is limited due to nonlinear optical effects resulting from the high intensity and long interaction length of the generated light within the fiber /2/. A further limitation arises as a result of thermo-optical issues due to the high power extraction per fiber length and considerable heat build-up due to the quantum defect of the laser process /2/.

## Beam combining techniques

Further power scaling beyond these given limits appears only to be feasible by the technique of beam combination. The combination of multiple beams (channels) to one single beam with near diffraction limited beam quality is the subject of extensive research worldwide. Different approaches are being investigated and can be classified into coherent and incoherent techniques.

Coherent combining requires a highly precise control of the phase of each channel emitting single-frequency radiation.

In contrast, incoherent beam combining is a more straightforward way to combine multiple beams of different wavelength in near-field and far-field by wavelength selective elements without any phase control, but suffers from the loss of spectral purity of the output beam /3/. For most applications, however, this is not a requirement.

## Experimental setup

The laser system developed here is based on an incoherent spectral beam combining consisting of four narrow-linewidth ytterbium-doped fiber amplifier chains. Each chain amplifies a seed laser at a slightly different wavelength and the beam combination is achieved using a diffraction grating as the wavelength selective element. The experimental setup is schematically shown in Fig. 1.

The wavelength of each channel is defined by a narrowband diode laser emitting at a specific wavelength. The emission wavelength of these diode lasers can be tuned from 1025 nm to 1075 nm.

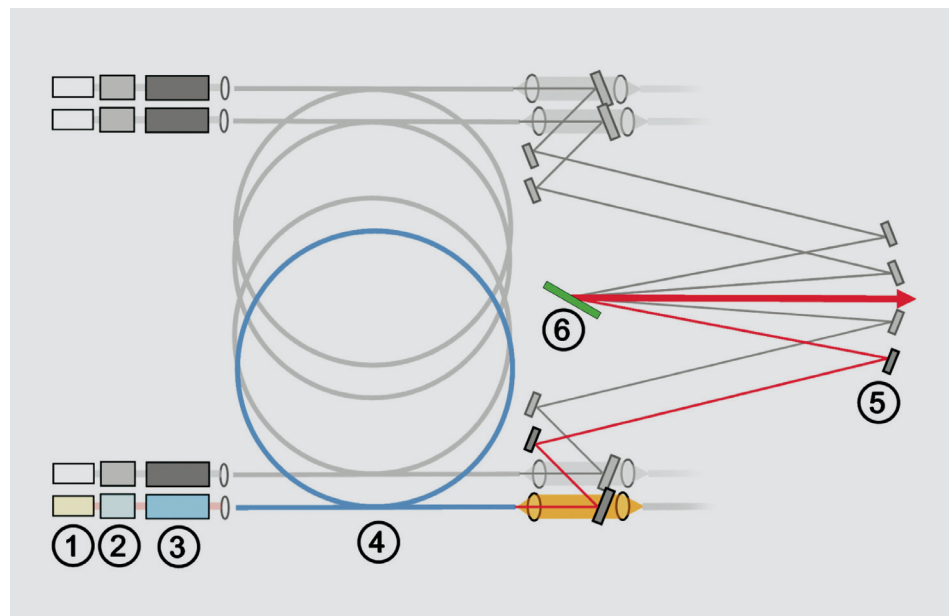


Abb. 1: Experimenteller Aufbau für das spektrale Kombinieren von vier photonischen Kristallfaserverstärkerkanälen. Ein einzelner Kanal ist farbig hervorgehoben und besteht aus einer Laserquelle (1), einem ersten (2) und zweiten Vorverstärker (3), dem Hauptverstärker (4), den Faltungsspiegeln (5) und dem Gitter (6).

Fig. 1: Experimental setup for spectral beam combining of four photonic crystal fiber amplifier channels. A single channel is highlighted and consists of a seed source (1), a first (2) and second pre-amplifier (3), the main amplifier (4), the folding mirrors (5) and the grating (6).

Diese wird in einem zweistufigen Faserverstärker und einem Hauptverstärker auf die benötigten Leistungen verstärkt. Um die Schwelle für stimulierte Brillouinstreuung, welche der erste zu erwartende nichtlineare Effekt ist, zu erhöhen, wurde das Diodenlasersignal spektral verbreitert. Diese Verbreiterung erfolgt durch eine zusätzliche Modulation des Diodenstroms mittels Rauschgenerator (nicht dargestellt in Abb. 1).

Durch die Vorverstärker wird eine Ausgangsleistung von 20 W in linear polarisierter, beugungsbegrenzter Strahlung erzeugt und als Eingangssignal für den Hauptverstärker genutzt. Dieser besteht aus einer 15 m langen Ytterbium-dotierten photonischen Kristallfaser. Der aktive Kern der Faser hat einen gemessenen Modenfelddurchmesser der Grundmode von 25  $\mu\text{m}$ . Der Pumpkern hat einen Durchmesser von 550  $\mu\text{m}$  und eine numerische Apertur von 0,5. Der Verstärker wird bei 976 nm durch eine Endfläche der Faser entgegen der Verstärkungsrichtung mit einer fasergekoppelten Hochleistungsdiode gepumpt.

Für das Kombinationsexperiment wurden die Einzelkanäle auf Wellenlängen zwischen 1050 nm und 1065 nm in 5 nm Abständen fixiert. Dieser spektrale Abstand resultierte in einer ausreichenden Winkeldispersion um auf der Strecke von 3,2 m zwischen Faltungsspiegel und Gitter (Abb. 1) die Strahlen benachbarter Kanäle räumlich zu trennen.

### Kombinationselement

Das Gitter, welches als Strahlkombinationselement eingesetzt wurde, ist ein hocheffizientes Beugungsgitter optimiert für beide Polarisierungen und dementsprechend für unpolarisiertes Licht (Abb. 2).

Daher ist keine Polarisationskontrolle im Hauptverstärker nötig. Die Gitterperiode entspricht 960 Linien/mm. Nach der Fertigung des Gitters wurde es bei einer Wellenlänge von 1064 nm unter Littrow-Bedingung vermessen. Der Einfallswinkel war in diesem Fall 30,7° und die Effizienz wurde indirekt über die gemessene Leistung in der

nullten Beugungsordnung ermittelt. Die gemessene Beugungseffizienz ist größer als 99 % für TE-Polarisation und größer als 98 % für TM-Polarisation. Die gleichmäßige Beugungseffizienz über das Gitter ist in Abb. 3 durch Messung der Effizienz an verschiedenen Positionen dargestellt.

### Hochleistungsstrahlkombination

Abbildung 4 zeigt den gemessenen Leistungsverlauf, wobei in Abb. 5 das zugehörige Spektrum bei der höchsten Leistung dargestellt ist. Es konnte eine Leistung von 2065 W bei einer Gesamtpumpleistung von 3395 W erreicht werden.

Der differentielle Wirkungsgrad inklusive Beugungseffizienz beträgt 61 %. Experimentell wurde die Beugungseffizienz des Gitters durch das Leistungsverhältnis von nullter und erster Beugungsordnung für alle vier Kanäle zu 99 % bestimmt.

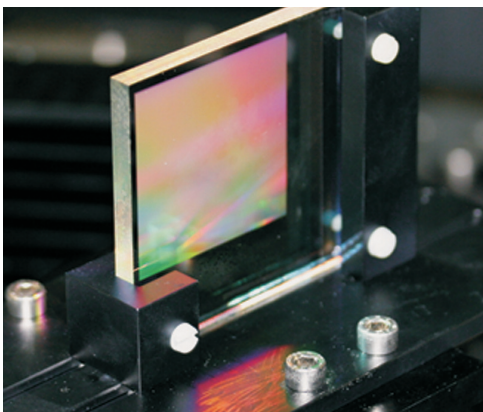


Abb. 2:  
Reflexionsgitter.

Fig. 2:  
Reflective diffraction grating.

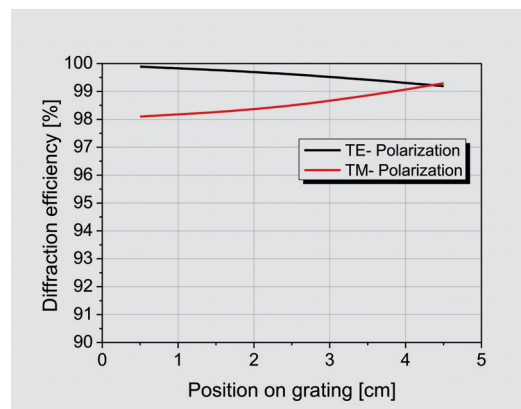


Abb. 3:  
Gemessene Beugungseffizienz des Gitters bei einer Wellenlänge von 1064 nm.

Fig. 3:  
Measured diffraction efficiency of the grating at 1064 nm.



It is amplified by a two-stage pre-amplifier and a power amplification stage. To enhance the threshold for stimulated Brillouin scattering, the first nonlinear effect that is expected, a line-width control was applied to broaden the signal spectrally. This is done by employing a modulation of the diode lasers driver current with a noise generator (not shown in Fig. 1), resulting in an increased seed-signal bandwidth.

An output power of 20 W in a linearly polarized and diffraction-limited beam is obtained via the pre-amplifiers and is used as the seed for the main amplification stage. The main amplifier stage consists of a 15 m long ytterbium-doped photonic crystal fiber. The active core of the fiber has a measured mode field diameter for the fundamental mode of 25  $\mu\text{m}$ . The pump core has a diameter of 550  $\mu\text{m}$  and a numerical aperture of 0.5. The stage is pumped at 976 nm through one fiber facet in a counter propagating configuration by a fiber coupled diode laser.

For the combining experiment the seed lasers are fixed in wavelength from 1050 nm to 1065 nm with 5 nm spectral separation between adjacent channels. This separation results in an angular dispersion that provides enough spatial separation between adjacent beams, at a distance of 3.2 m between the final folding mirrors and the dispersive element (Fig. 1).

### Combining element

The grating, which is used as combining element, is a highly efficient reflective diffraction grating, optimized for both TE- and TM-polarization, and thus for non-polarized light (Fig. 2).

For this reason, no polarization control of the main amplifier is required. The line density of the grating is 960 lines/mm. The grating was characterized after fabrication at a wavelength of 1064 nm in 1<sup>st</sup>-order Littrow-configuration at an angle of

30.7 degree by measurement of the power in the 0th order. The measured diffraction efficiency at 1064 nm is > 99 % for TE-polarization and > 98 % for TM-polarization uniformly across the grating as shown for different positions on the gratings in Fig. 3.

### High power beam combining

Figure 4 shows the slope efficiency and Fig. 5 the output spectrum of the combined output beam. An optical power of 2065 W is reached at a total launched pump power of 3395 W.

The total slope efficiency including the diffraction efficiency is as high as 61 %. The combining efficiency, determined experimentally by the ratio of optical power of the combined beam and the power diffracted in the zeroth order, was measured commonly for all four channels to 99 %.

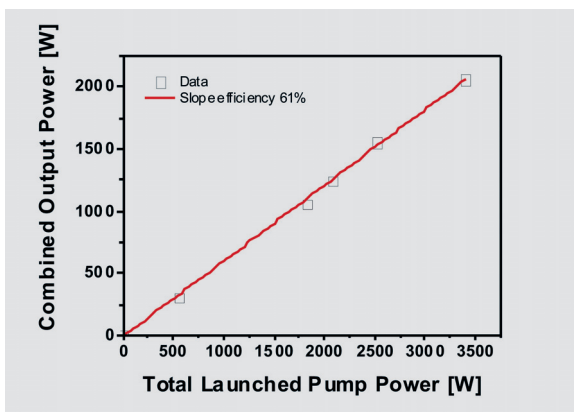


Abb. 4: Leistungscharakteristik und differentieller Wirkungsgrad der kombinierten Leistung bezogen auf die eingekoppelte Pumpleistung.

Fig. 4: Output characteristics and slope efficiency of the combined power in relation to launched power.

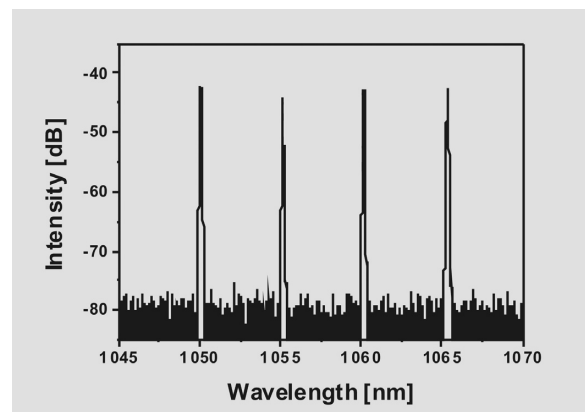


Abb. 5: Optisches Spektrum des kombinierten Strahls.

Fig. 5: Emitted optical spectrum of the combined output beam.

Diese Messung beweist die hohe Effizienz des Gitters auch für die Wellenlängen der Kanäle von 1050 nm bis 1065 nm und die leicht außerhalb der Littrow-Bedingung einfallenden Strahlen.

Abbildung 6 zeigt die Strahlqualitätsmessung bei der höchsten erreichten Leistung von 2 kW. Die Beugungsmaßzahl  $M^2$  jedes einzelnen Kanals bei einer Leistung von  $\sim 500$  W nach dem Gitter wurde mit  $M_x^2 \sim 1,6$  und  $M_y^2 \sim 1,4$  bestimmt. Der erhöhte Wert in horizontaler (x-)Richtung wird durch die zusätzliche Divergenz des Strahl aufgrund seiner spektralen Bandbreite von  $\sim 60$  pm hervorgerufen.

Der kombinierte Strahl zeigt eine Strahlqualität von  $M_x^2 = 2,0$  und  $M_y^2 = 1,8$  bei einer Leistung von 2 kW (Abb. 6). Aufgrund der Reflexionseigenschaften des Gitters sind thermo-optische Effekte an dieser Stelle bei der erreichten Leistung nicht zu erwarten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde die inkohärente spektrale Kombination von vier schmalbandigen Verstärkern auf Basis von photonischen Kristallfasern bei einer Leistung von  $\sim 500$  W pro Kanal demonstriert. Die vier Ausgangsstrahlen wurden mit Hilfe eines hocheffizienten dielektrischen polarisationsunabhängigen

Gitters mit einer Effizienz von 99 % zu einem nahezu beugungsbegrenzten Strahl mit 2 kW Leistung kombiniert. Thermo-optische Limitierungen sind bei dieser Leistung auf dem Gitter nicht zu erwarten.

Der gewählte Ansatz weist ein signifikantes Skalierungspotenzial auf. Der spektrale Abstand der Kanäle kann durch ein Neudesign der Kombinationseinheit, d. h. den Einsatz eines Gitters mit kleinerer Periode, verringert und die Kanalanzahl somit erhöht werden. Die nutzbare Verstärkerbandbreite einer Ytterbium-dotierten Faser lässt Verstärkungen in einem Bereich von mindestens 50 nm um 1060 nm zu, wobei die Beugungseffizienz des Gitters über einen vergleichbaren Spektralbereich maximierbar ist.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden von Rheinmetall Waffe Munition GmbH und im Rahmen der internen FhG Programme (MAVO 814970) gefördert. Die dielektrischen Gitter wurden in der Gruppe von Dr. E.-B. Kley »Microstructure Technology/Microoptics« des Instituts für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena entworfen und hergestellt.

### Literatur:

- /1/ Gapontsev, D.; IPG Photonics: 6kW CW Single Mode Ytterbium Fiber Laser in All-Fiber Format, in Solid State and Diode Laser Technology Review (Albuquerque, 2008).
- /2/ Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S. and Limpert, J.: The renaissance and bright future of fibre lasers, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681–693 (2005).
- /3/ Augst, S. J.; Ranka, J. K.; Fan, T. Y. and Sanchez, A.: Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited), J. Opt. Soc. Am. B 24, 1707–1715 (2007).



This proves the high efficiency of the grating for the individual wavelengths of the channels ranging from 1050 nm to 1065 nm and for angles of incidence slightly off-Littrow given by the distinct wavelength of the channels.

Figure 6 shows the beam quality characterization of the combined output beam at 2 kW optical power. The beam quality factor  $M^2$  of each individual channel at  $\sim 500$  W after the grating is characterized to  $M_x^2 \sim 1.6$  and  $M_y^2 \sim 1.4$ . The larger value in horizontal (x-) direction can be attributed to additional divergence imposed by the diffraction grating on the  $\sim 60$  pm bandwidth optical beam. The combined beam shows a beam quality of  $M_x^2 = 2.0$  and  $M_y^2 = 1.8$  at the power of 2 kW (Fig. 6). Due to the all reflective nature of the combining element, thermo-optical issues are not expected at this power level.

## Conclusion and Outlook

A spectral beam combining scheme of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifier chains at a power level of  $\sim 500$  W per channel has been demonstrated. The four output beams were combined via a highly-efficient dielectric polarization-independent diffraction grating with 99 % efficiency to a near diffraction-limited output beam of 2 kW optical power. No thermo-optical effects on the grating are anticipated at this power level.

The approach possesses significant scaling potential. The channel spacing can be reduced by revising the combining stage, i. e. employing a grating with a smaller grating period, at the same time increasing the number of individual channels. The useful Yb-gain bandwidth covers more than 50 nm around 1060 nm and the diffraction efficiency of the reflective dielectric grating is maximizable over a comparable wavelength range.

## Acknowledgements

This work was supported by Rheinmetall Waffe Munition GmbH and by the FHG Internal Programs under Grant No. MAVO 814970. The dielectric reflection grating was designed and manufactured by the group of Dr. E. B. Kley, "Microstructure Technology / Microoptics" at the Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller-University Jena.

### References:

- /1/ Gapontsev, D.; IPG Photonics: 6kW CW Single Mode Ytterbium Fiber Laser in All-Fiber Format, in Solid State and Diode Laser Technology Review (Albuquerque, 2008).
- /2/ Tünnermann, A.; Schreiber, T.; Röser, F.; Liem, A.; Höfer, S.; Zellmer, H.; Nolte, S. and Limpert, J.: The renaissance and bright future of fibre lasers, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 38, 681–693 (2005).
- /3/ Augst, S. J.; Ranka, J. K.; Fan, T. Y. and Sanchez, A.: Beam combining of ytterbium fiber amplifiers (Invited), J. Opt. Soc. Am. B 24, 1707–1715 (2007).

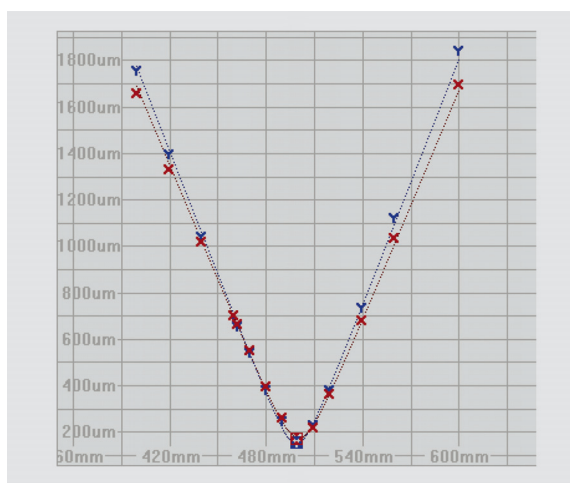
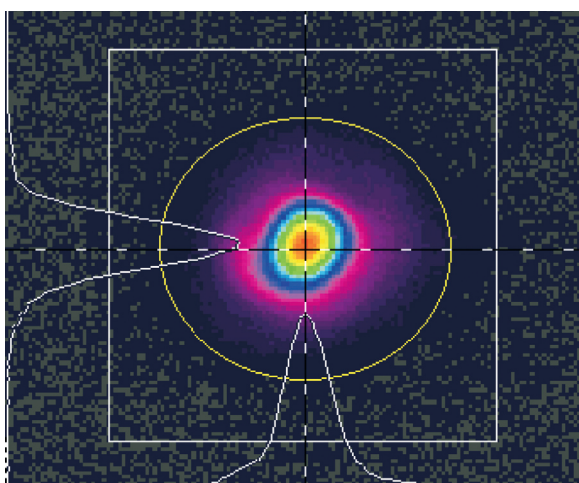


Abb. 6: Nahfeldprofil und Strahlqualitätsmessung des kombinierten Strahls bei einer Ausgangsleistung von 2 kW (Spiricon® 90/10 Knife Edge).

Fig. 6: Near-field beam profile and beam quality measurement of the combined output beam at optical power of 2 kW (Spiricon® 90/10 Knife Edge).