

Singlemode-Transportfasern für Multi-Kilowatt-Festkörperlaser: Konzepte und erste Ergebnisse am IFSW

Heute gilt es als nahezu selbstverständlich, dass die Strahlung von industriellen Festkörperlaser (FKL) mit Ausgangsleistungen im Multi-Kilowattbereich über 50 oder sogar 100 m flexibel und verlustarm mit Hilfe von Lichtwellenleitern auf der Basis von Quarzglas (kurz „Glasfasern“) übertragen werden kann. Weit weniger bekannt ist, dass die maximale Strecke, über die einige kommerziell erhältliche Hochleistungs-(HL)-FKL mit Emissionswellenlänge um 1 μm mittels Glasfasern übertragen werden können, auf wenige 10 m und teilweise auf unter 10 m begrenzt ist.

Die Ursache für diese Begrenzung liegt in nichtlinearen Effekten, die bei sehr hohen Leistungsdichten in den Glasfasern auftreten und die entweder die am Ausgang der Faser verfügbare Leistung deutlich reduzieren oder sogar zur Beschädigung der Faser beziehungsweise der Laserquelle führen können. Die wichtigsten begrenzenden Effekte sind die Stimulierte Brillouin-Streuung (SBS) und die Stimulierte Raman-Streuung (SRS). Die Leistungsdichte, ab der diese Effekte in Quarzglas auftreten, nimmt mit der Länge des durchstrahlten Glases ab. Die Bedeutung dieser Effekte nimmt mit steigender Strahlqualität der Strahlquellen zu; beispielsweise wird ein beugungsbegrenzter Faserlaser der Fa. IPG mit einer maximalen Transportfaserlänge von 5 m ausgeliefert. Die Ursache hierfür liegt im kleinen Kerndurchmesser der für die Übertragung von Grundmodestrahlung geeigneten Glasfasern, der eine extrem hohe Leistungsdichte in der Faser bedingt. Während für einen kommerziell verfügbaren 8 kW-Scheibenlaser mit einer Strahlparameterprodukt von 8 mm-mrad eine Stufenindexfaser mit einem Kerndurchmesser von 200 μm zum Einsatz kommt, beträgt der Kern-

durchmesser von üblichen HL-Singlemode-(SM)-Fasern für Wellenlängen um 1 μm etwa 14 μm . Die Leistungsdichte im Faserkern des genannten Scheibenlasers beträgt 0,25 $\text{W}/\mu\text{m}^2$; bei einem 1 kW-Grundmodellaser mit einer typischen HL-SM-Faser liegt dieser Wert bei 10 $\text{W}/\mu\text{m}^2$. Bei dieser Leistungsdichte wirkt sich der SRS-Effekt ab einer Faserlänge von etwa 20 m begrenzend aus.

Da Leistung und Strahlqualität der verfügbaren Strahlquellen stetig steigen, werden sich die Limitierungen in der Übertragungslänge schon in wenigen Jahren sehr nachteilig auf die Ausnutzung der hohen Brillanz der dann kommerziell verfügbaren HL-FKL auswirken. Daher wurde am IFSW beschlossen, diesem voraussichtlichen Engpass durch die Entwicklung von speziell für die Übertragung von Multi-Kilowatt-Laserstrahlung mit beugungsbegrenzter Strahlqualität über Entfernungen von etwa 100 m geeignete Hochleistungsfasern zu begegnen.

Konventionelle Hochleistungsfasern für SM-Übertragung

Ein naheliegender Ansatz zur Reduzierung der Leistungsdichte im Kern von SM-Glas-

fasern ist die Vergrößerung des Kern- und damit des Modendurchmessers; dies bedingt zugleich eine Reduzierung der Numerischen Apertur (N.A.) des Kerns. Diese Möglichkeit wird bereits bei verschiedenen, kommerziell erhältlichen SM-Glasfasern für Hochleistungsanwendungen genutzt; leider sind hierfür recht enge Grenzen gesetzt. Bei konventionell hergestellten Fasern kann die N.A. nicht reproduzierbar auf Werte unter etwa 0,06 abgesenkt werden. Daher führen solche Fasern mit sehr großem Kern (sogenannte „large mode area“- (LMA)-Fasern) mehrere Moden im Kern, sind also nicht mehr „einmodig“; dennoch ist prinzipiell die Übertragung eines einzelnen Modes über solche Fasern möglich. Allerdings ist zum einen das Einkoppeln ausschließlich in den gewünschten Mode schwierig, zum anderen neigen diese Fasern zum Übersprechen zwischen den verschiedenen im Kern geführten Moden. Dieses Übersprechen wird durch Unvollkommenheiten

der Faser und insbesondere durch das – für eine flexible Strahlführung unvermeidliche – Biegen derselben gefördert. Aus Simulationsrechnungen, die am IFSW durchgeführt wurden, ergibt sich, dass eine konventionelle Stufenindex-LMA-Faser mit einem Kerndurchmesser von 25 μm bei einem Biegeradius von 200 mm bereits etwa 4 % der Gesamtleistung in höhere Transversalmoden mischt. Dieser Modenmischungseffekt führt zu einer Oszillation der Leistung zwischen den beteiligten Moden mit Perioden im Millimeterbereich. Die über eine Periode gemittelte Leistungsverteilung ist alleine durch den Biegeradius des gebogenen Faserteilstücks bedingt und nicht durch dessen Länge. Der Leistungsanteil in den höheren Moden hängt vom Biegeradius näherungsweise gemäß einem Potenzgesetz mit dem Exponenten -1,8 ab. Demnach führt bereits eine leichte Verringerung des Biegeradius zu einem unakzeptabel hohen Leistungsverlust im transversalen Grundmode.

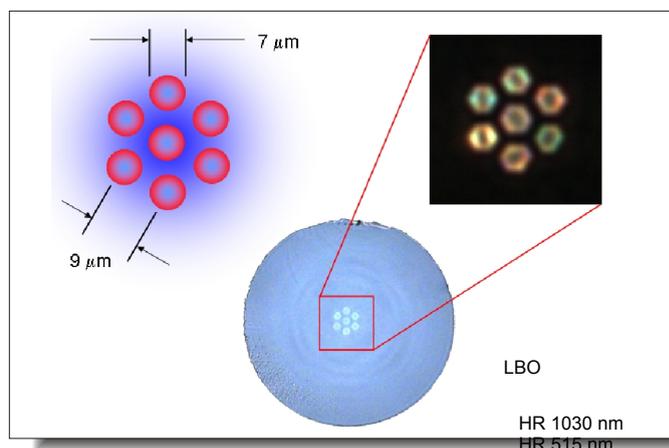


Abb. 1: Struktur der 7-Kern-Faser: Design (links), Mikrofotografie (Mitte) und Detaildarstellung (rechts).

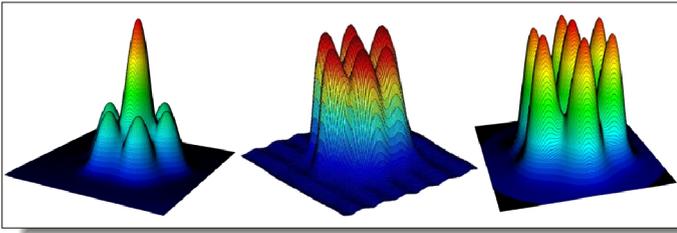


Abb. 2: Nahfeld-Intensitätsverteilung: berechnet (links), gemessen (Mitte), Anpassung an Messung durch Modengemisch (rechts).

Ein neues Konzept: Multi-kernfasern mit evaneszenter Kopplung

Um dieses Biegeverhalten zu verbessern, wurde am IFSW eine Faser mit sieben evaneszent gekoppelten Kernen entworfen, die vom IPHT in Jena hergestellt und wiederum am IFSW getestet wurde. Die jeweils einen Durchmesser von $7\ \mu\text{m}$ aufweisenden Kerne sind, wie in Abbildung 1 dargestellt, in einer hexagonalen Form angeordnet und weisen einen Mittenabstand von lediglich $9\ \mu\text{m}$ zueinander auf, so dass die elektrischen Felder der Kerne, die einige Mikrometer weit in den Mantel reichen, sich gegenseitig überlappen und zu einer kohärenten Kopplung des gesamten Feldes führen. Die effektive Modenquerschnittsfläche dieser 7-Kern-Faser – und damit das Verhalten bezüglich SRS – entspricht der der zuvor diskutierten LMA-Faser mit $25\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser. Das berechnete qualitative Verhalten der 7-Kern-Faser hinsichtlich Modenmischung durch Biegen stimmt mit dem der vergleichbaren LMA-Faser überein. Quantitativ ergibt sich eine Verbesserung auf $2,5\ \%$

Leistungsanteil in den höheren Moden bei $200\ \text{mm}$ Biegeradius.

Abbildung 2 zeigt die berechnete und die gemessene Nahfeld-Intensitätsverteilung des Grundmodes für die 7-Kern-Faser. Die Messung wurde mit Hilfe eines in Abbildung 3 schematisch dargestellten Nahfeldscanners durchgeführt. Hierbei wird das Faserende mit Hilfe eines hochgenauen 3-Achsen-Piezoverstellers abgerastert. Es wird ein beugungsbegrenzter Punkt auf der Faserendfläche mit Hilfe eines hochauflösenden Mikroskopobjektivs auf eine Lochblende abgebildet und die transmittierte Leistung mit einer Fotodiode und einem schnellen $6\frac{1}{2}$ -stelligen Digitalmultimeter registriert. Im Vergleich zu einer kamera-basierten Messung kann so insbesondere eine weitaus höhere Dynamik der Grauwerte erzielt werden. Im Gegensatz zur Modellrechnung (links), bei der der zentrale Kern eine starke Leistungsüberhöhung aufweist, ergeben die mit einer breitbandigen Lichtquelle durchgeführten Messungen (Mitte) eine nahezu gleiche Intensität

in allen Kernen. Dies weist darauf hin, dass – etwa durch eine nicht optimale Einkopplung – eine Mischung von mehreren Transversalmoden in der Faser angeregt wurde. Durch eine inkohärente Mischung von $50\ \%$ Grundmode (LP_{01}) und $50\ \%$ ringförmigem TE_{01} -Mode, kann – wie in Abbildung 2 rechts dargestellt – eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Messung erzielt werden.

Der in Abbildung 4 gezeigte Vergleich der mit Hilfe einer Kamera gemessenen Fernfelder der aus LMA- und 7-Kern-Faser austretenden Strahlung für verschiedene Biegeradien zeigt, dass das Fernfeld der 7-Kern-Faser deutlich weniger stark durch Biegung beeinflusst wird. Insbesondere bleibt das Fernfeld der 7-Kern-Faser unter Biegung nahezu rotationssymmetrisch, während das der LMA-Faser teilweise elliptisch verformt wird. Dieses vorläufige Ergebnis soll demnächst durch weitere Untersuchungen – etwa eine vergleichende Messung der Strahlqualität – ergänzt werden.

Ausblicke

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Konzepts der evaneszent gekoppelten Mehrkernfasern die Leistungstauglichkeit von flexiblen Transportfasern für SM-Laserstrahlung erhöht werden kann. Allerdings ist das Potential dieses Konzepts begrenzt; daher werden am IFSW parallel hierzu auch andere Faserstrukturen untersucht.

Die am IFSW neu aufgebaute Arbeitsgruppe „Strahlführung und Strahlformung“ beschäftigt sich auch mit der Polarisationsformung durch resonatorinterne Gitter-Wellenleiterpiegel und der Entwicklung von hochleistungstauglichen faserintegrierten optischen Komponenten, wie beispielsweise optischen Isolatoren. Ab Mitte 2007 wird am IFSW ein Faserziehturm zur Verfügung stehen, mit dem neuartige Faserstrukturen für Hochleistungsanwendungen produziert werden sollen. Ab 2008 kommt eine MCVD-Anlage zur Herstellung von Faservorformen hinzu.

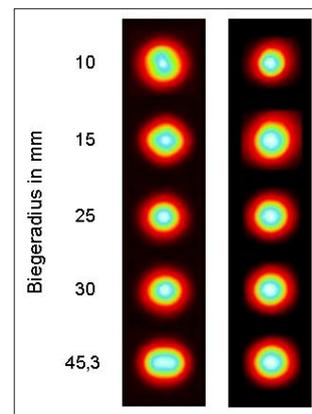


Abb. 4: Gemessene Fernfeldverteilungen von LMA-Faser (links) und 7-Kern-Faser (rechts) für verschiedene Biegeradien (1 Windung); Details s. Text.

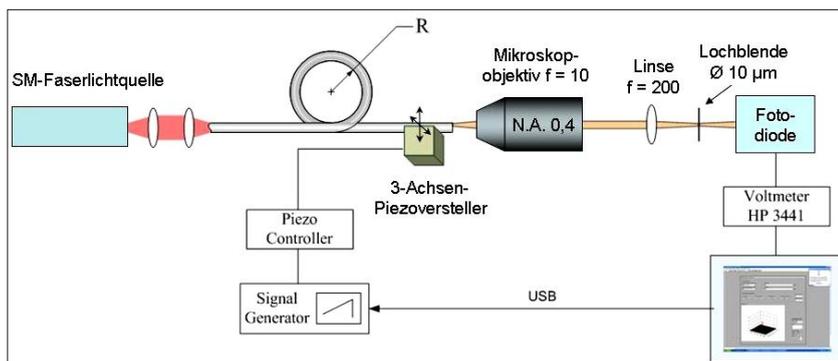


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Nahfeld-Scanners.

Institutsadresse:
 Institut für Strahlwerkzeuge
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711 685 66840
 Fax: +49 (0)711 685 66842
<http://www.ifsw.uni-stuttgart.de>

Autor:
 Dr. Andreas Voß
voss@ifsw.uni-stuttgart.de

Kontakt / Redaktion:
 Dipl.-Ing. Friedemann Lichtner
 FGSW - Forschungsgesellschaft
 für Strahlwerkzeuge mbH
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart
 Tel.: +49 (0)711 351 451-28
 Fax: +49 (0)711 351 451-29
 E-Mail:
friedemann.lichtner@fgsw.de
<http://www.fgsw.de>