

Multimodefaser für den Transport von hohen Leistungen und grundmodenaher Strahlqualität

In den letzten Jahren wurden Strahlquellen mit immer höherer Strahlqualität und mittlerer Leistung entwickelt. Für den Einsatz in der Lasermaterialbearbeitung profitieren insbesondere Laser bei 1 μm Wellenlänge davon, dass das Licht flexibel durch passive Transportfasern zum Werkstück geleitet werden kann. Allerdings ist für grundmodenahere Strahlung mit hoher mittlerer Leistung die Faserlänge, hauptsächlich durch nichtlineare Effekte, typischerweise auf einige Meter begrenzt. Am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart wurde nun eine Übertragung von 800 W grundmodenahere Strahlung in einer 100 m langen multimodigen Transportfaser demonstriert.

Typischerweise werden zur Übertragung von Strahlung hoher Brillanz Monomodefaser eingesetzt. Deren Kern besitzt für Wellenlängen um 1 μm in der Regel einen Durchmesser von einigen μm . Höhere Moden werden durch diese Fasern nicht geführt, wodurch nur die Fundamentalmode durch diese Fasern übertragen wird. Der Nachteil dieses Konzepts ist, dass durch Führung von Strahlung mit sehr hoher Leistung in einem kleinen Kern die Intensität dort sehr groß wird und nichtlineare Effekte auftreten können. Darunter fällt insbesondere das Einsetzen der stimulierten Ramanstreuung, welche mit der Intensität und der Faserlänge skaliert und zu einer Wellenlängenverschiebung führt. Neben Fokallängenverschiebungen in der Optik des Materialbearbeitungsprozesses, entstehen dadurch Leistungsverluste in der Faser und damit einhergehend eine Wärmeentwicklung, welche zu einer Zerstörung der Transportfaser führen kann und damit letztlich deren Länge begrenzt.

Das Ziel der Untersuchungen am IFSW war daher den Kerndurchmesser in einem Stufenindexprofil zu vergrößern, also Multimodefasern einzusetzen. Durch eine größere Fläche verringert sich die Intensität und damit erhöht sich die Ramanschwelle. Gleichzeitig soll aber die Erhaltung der grundmodenaheren

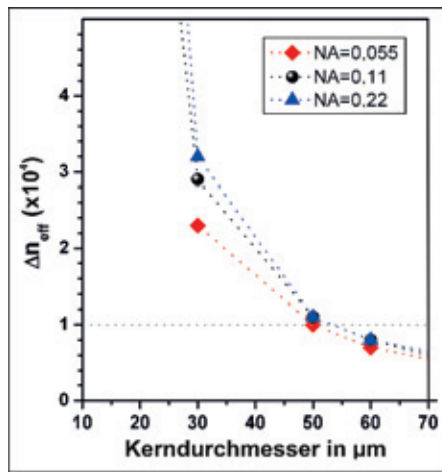


Abbildung 2. Differenz der effektiven Brechungsindizes für die Fundamentalmode (LP01) und die nächst höhere Mode (LP11) simuliert für verschiedene Kerndurchmesser einer Stufenindexfaser und für verschiedene nominelle numerische Aperturen der Faser. Bei Differenzen größer als 1×10^{-4} findet keine Kopplung zwischen den Moden statt.

Strahlqualität ermöglicht werden.

Der Schlüssel hierfür liegt in der Betrachtung der effektiven Brechungsindizes der einzelnen in der Faser geführten Moden. Diese sind bedingt durch die verschiedenen Modenfelddurchmesser unterschiedlicher Moden. Die Moden überlappen dadurch bei Stufenindexfasern verschieden stark mit dem Mantelbereich und erfahren so einen unterschiedlichen effektiven Brechungsindex. Nun ist zum Beispiel im Fall von polarisationserhaltenden Fasern allgemein bekannt, dass falls die Differenz in den effektiven Brechungsindizes zwischen zwei Moden (in diesem Fall zwischen den Polarisationszuständen) größer als 1×10^{-4} ist, keine Kopplung zwischen diesen auftritt. Somit kann ein Polarisationszustand effizient geführt werden. Dieses Modell wird nun auf eine Multimode-Stufenindexfaser und die Funda-

mentalmode (LP01), sowie die nächst höhere Mode (LP11), übertragen (vgl. Abb. 1). Eine effiziente Führung von nahezu beugungsbegrenzter Strahlung sollte demnach möglich sein, wenn die Faser so gewählt wird, dass die Differenz der effektiven Brechungsindizes zwischen der LP01- und der LP11-Mode größer ist als 1×10^{-4} . Abbildung 2 zeigt eine Simulation dieses Unterschieds in Abhängigkeit des Kerndurchmessers und für verschiedene nominelle numerische Aperturen der Faser. Dies zeigt, dass es möglich ist in Fasern mit Kerndurchmessern bis zu 50 μm grundmodenahere Strahlung effektiv zu führen und damit die effektive Modenfläche zu erhöhen, wodurch die stimulierte Ramanstreuung erst bei höheren Leistungen einsetzt und die Länge der Transportfaser drastisch vergrößert werden kann.

Die experimentell untersuchte Faser wurde mit dem Faserziehturm am IFSW

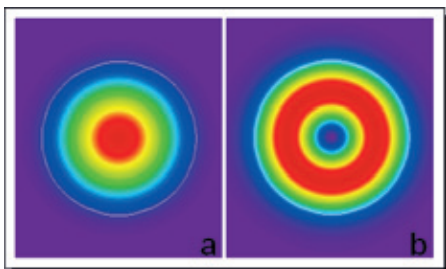


Abbildung 1. Simulation des Intensitätsprofils (a) einer LP01- und (b) einer LP11-Mode in einer Stufenindexfaser.

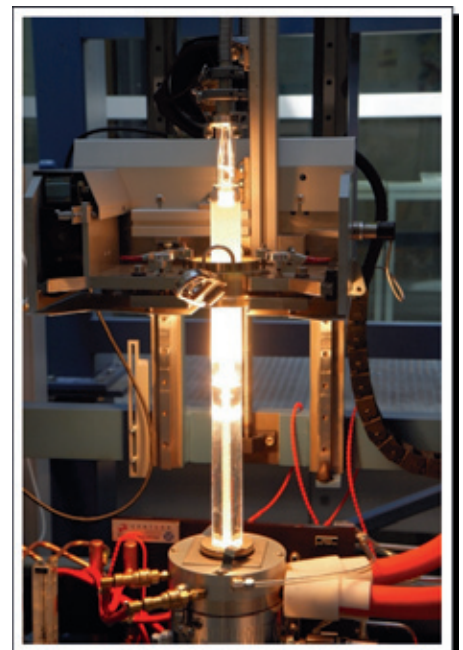


Abbildung 3. Foto einer aufheizten Preform im Faserziehturm des IFSW.

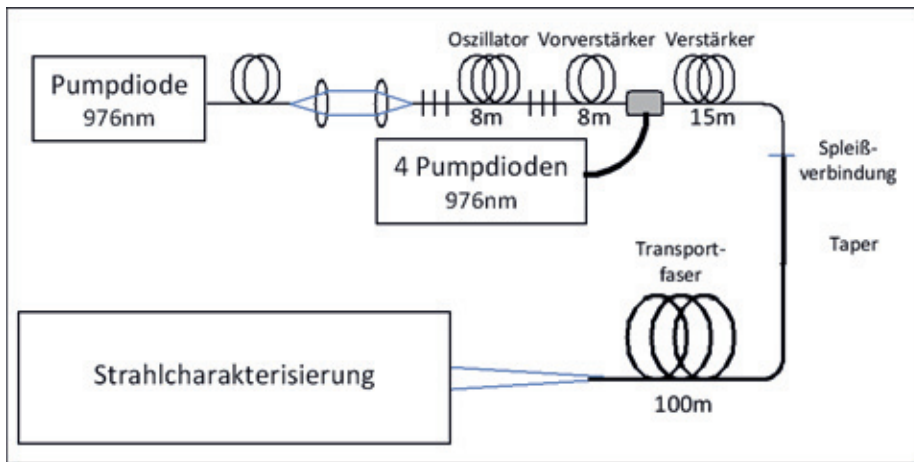


Abbildung 4. Schema der Messanordnung. Der Oszillator wird durch eine Laserdioden gepumpt. Restliches Pumplicht wird durch einen Vorverstärker genutzt. Über einen Faserkoppler wird eine zweite Verstärkerfaser gepumpt. Das Lasersystem wird über eine Spleißverbindung mit dem direkt in die zu untersuchende Faser hineingezogenen Taper verbunden. Die 100 m lange Transportfaser ist aufgespult und die von ihr emittierte Strahlung wird hinsichtlich Leistung, Strahlqualität und Spektrum untersucht.

hergestellt (Abb. 3). Dazu wurde eine Stufenindex-Preform mit einem Mantelzu-Kern-Verhältnis von 20 und einer numerischen Apertur von 0,056 verwendet. Diese wurde zu einer Faser mit einem Kerndurchmesser von 30 μm , einem Manteldurchmesser von 600 μm und einer Länge von 100 m ausgezogen. Auf einer Länge von 500 mm wurde die Faser während des Ziehprozesses bis auf 400 μm verjüngt (Taper) um eine Spleißverbindung mit dem Lasersystem, welches den zu übertragenden grundmodenahen Hochleistungsstrahl zur Verfügung stellt, zu ermöglichen. Die beschichtete Faser wurde dann auf ein Rad mit einem Durchmesser von 96 cm aufgerollt.

Das Lasersystem wurde am IFSW ent-

wickelt (Abb. 4). Es ist ein monolithischer MOPA-Faserlaser. Alle signalführenden Fasern dieses Systems haben einen Kerndurchmesser von 20 μm und einen Manteldurchmesser von 400 μm . Die 8 m lange aktive Faser des Oszillators wird mit einer Wellenlänge von 976 nm und einer Leistung von 860 W gepumpt und emittiert ca. 500 W bei einer Wellenlänge von 1085 nm. Nicht im Oszillator absorbiertes Pumplicht wird mit einer weiteren 8 m langen aktiven Faser zur zusätzlichen Verstärkung eingesetzt. Daraufhin werden über einen Pumplichtkoppler weitere 574 W Pumplicht eingekoppelt und eine 15 m lange Verstärkerfaser verwendet. Die zu testende Transportfaser ist mittels eines Faserspleißes und den in die Faser eingebrachten Taper mit dem Lasersystem verbunden und die emittierte Strahlung wird anschließend bezüglich Leistung, Strahlqualität und Spektrum untersucht. Gemessen wurden 800 W Ausgangsleistung bei nahezu beugungsbegrenzter Strahlqualität (Beugungsmaßzahl $M^2=1,35$), welche im Vergleich zu der durch das Lasersystem vorgegebenen Strahlqualität kaum Veränderung erfahren hat. Weiterhin zeigten Vergleichsmessungen der mittleren Leistung nach dem Lasersystem und der Transportfaser, dass die Übertragungsverluste in verschiedenen Leistungsbereichen weniger als 5% betragen. Abbildung 5 zeigt ein aufgenommenes Spektrum bei 715 W

und 805 W Ausgangsleistung. Erst ab einer mittleren Leistung von ca. 780 W konnte hier ein geringer Anteil bei einer Wellenlänge von 1140 nm beobachtet werden, was auf ein Einsetzen der stimulierten Ramanstreuung hindeutet. Unsere Abschätzungen ergaben, dass der ramanverschobene Anteil bei 805 W weniger als 5% ausmacht.

Damit zeigen unsere Experimente, dass es möglich ist mit einer einfachen Stufenindexfaser hohe mittlere Leistungen und nahezu beugungsbegrenzte Strahlqualität über große Längen zu übertragen. Hierzu sind große Kerndurchmesser vorteilhaft um die nichtlinearen Effekte zu begrenzen. Die Faser ist dabei so zu wählen, dass die Fundamentalmode nicht mit der nächst höheren Mode koppelt. Dies ist gewährleistet, wenn der Unterschied in den effektiven Brechungsindizes dieser Moden größer als 1×10^{-4} ist. Dieses Konzept kann für die Verwendung von Faserlasern in der industriellen Lasermaterialbearbeitung eine bedeutende Verbesserung bringen.

Weitere Forschungsarbeiten am IFSW beziehen sich darauf, mit diesem Konzept die Leistungsgrenze weiter zu erhöhen. Dazu kann beispielsweise der Kerndurchmesser weiter gesteigert werden. Da damit eine Verringerung des Brechungsindexunterschieds einhergeht (vgl. Abb. 1) werden derzeit theoretische Untersuchungen und Simulationen durchgeführt um das minimal benötigte Δn_{eff} zu ermitteln bei dem gleichzeitig die in der Anwendung wichtige Biegeunempfindlichkeit der Faser bewahrt bleibt. Daneben werden auch andere vielversprechende Faserkonzepte, wie 19-Kern-Fasern oder leakage channel fibers (LCFs), untersucht.

Autor:

Dipl.-Phys. Jan-Philipp Negel
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 69721
E-Mail: jan-philipp.negel@ifsw.uni-stuttgart.de

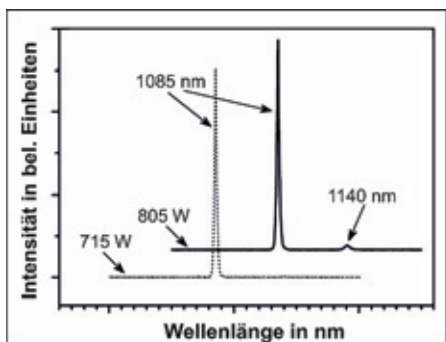


Abbildung 5. Gemessenes Spektrum nach 100 m Transportfaser mit mittleren Leistungen von 715 W und 805 W. Ein Einsetzen der stimulierten Ramanstreuung ist bei Leistungen ab 780 W erkennbar gewesen.

GEFÖRDET VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung