

Design von Hochleistungstransportfasern mit wenigen Moden

Adrian Lorenz, Alexander Hartung, Siegmund Schröter, Hartmut Bartelt

Institut für Photonische Technologien e.V., Albert-Einstein-Straße 9, 07747 Jena

[mailto: adrian.lorenz@ipht-jena.de](mailto:adrian.lorenz@ipht-jena.de)

Die mit Glasfasern übertragbare optische Leistung ist begrenzt durch Materialschädigungen und das Auftreten nichtlinearer optischer Effekte bei zu hoher Spitzenintensität, deren Reduzierung durch eine Vergrößerung des Faserkerns erreicht werden kann. Die daraus resultierenden Veränderungen des Modenprofils und des Einflusses von Krümmungen auf die Fasereigenschaften werden anhand von drei ausgewählten Brechzahlprofilen vergleichend diskutiert.

1 Einführung

Wichtige Eigenschaften von Hochleistungstransportfasern sind insbesondere hohe übertragbare Leistungen und eine geringe Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie zum Beispiel Faserbiegung. Darüber hinaus wird ein monomodiger Betrieb angestrebt, um eine hohe Strahlqualität zu gewährleisten. Die kleine Fläche in normalen Monomodefasern führt bei hohen transportierten Leistungen schnell zu hohen Spitzenintensitäten welche durch nichtlineare optische Effekte deren Übertragungseigenschaften verschlechtern oder durch thermische Effekte sogar zu einer Materialzerstörung führen. Durch eine Vergrößerung des Kerns erhöht sich die lichtführende Fläche und die Spitzenintensität wird gesenkt. Gleichzeitig ergeben sich Einflüsse auf die Feldverteilung und die Ausbreitungsverluste. So führen die Fasern z.B. mehr Moden und die Biegeempfindlichkeit ändert sich.

Um nun einen effektiv monomodigen Betrieb der „oligo-modigen“ Großkernfasern mit geringer Indexdifferenz im Kern (im Vergleich zu Standard-Monomodefasern) zu ermöglichen, ist es notwendig, höhere Moden durch zusätzliche Verlustmechanismen zu unterdrücken und zwar möglichst ohne die Grundmode, mit der die Leistung übertragen werden soll, zu beeinflussen. Man erreicht dies durch spezielle Brechzahlprofile oder gezielte Krümmungen welche die höheren Moden stärker schwächen als die Grundmode.

Im Folgenden werden zunächst Grundlagen zur Behandlung von gekrümmten Fasern vorgestellt, und anschließend drei Profile hinsichtlich der angesprochenen Problematik verglichen.

2 Grundlagen

Die Beschreibung von Glasfasern erfolgt häufig durch Betrachtung der geführten Moden und für translationssymmetrische Geometrien - also ungekrümmte Fasern. Abweichungen von der geraden Form durch eine Biegung mit dem Radius R können mithilfe einer Koordinatentransformation

beschrieben werden, wodurch die Translations-symmetrie mathematisch wieder hergestellt und die Verwendung von herkömmlichen 2D-Modensolvern ermöglicht wird. Dies erfolgt durch Einführung eines modifizierten Brechzahlprofils [1], des sogenannten äquivalenten Index:

$$n_{eq} = n_0(x,y) \cdot (1 + x/R_{eff}) \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet x den Abstand vom Faserzentrum in der Krümmungsebene. Neben dieser rein mathematischen Transformation ist es zudem notwendig, auftretende spannungsoptische Effekte, welche ihrerseits die Brechzahl verändern, zu berücksichtigen. Die Einführung des effektiven Krümmungsradius $R_{eff} \approx 1,3 \cdot R$ in (1) realisiert dies. Die Berechnungen mit dem transformierten Brechzahlprofil ergeben neue Feldverteilungen welche gegenüber denen der geraden Faser verschoben und deformiert sind (Abb. 2).

3 Vergleich verschiedener Fasertypen

Es werden drei spezielle Brechzahlprofile (Abb. 1) hinsichtlich Biegeempfindlichkeit der Feldverteilung, Verlusten und Separation der Moden untersucht. Dies sind neben dem Stufenindexprofil das Gradientenindex-Profil (quadratischer Brechzahlverlauf, bekannt für Biegeunempfindlichkeit der Feldverteilung) und das U-Profil (bekannt für abgeflachtes Modenprofil im ungekrümmten Zustand).

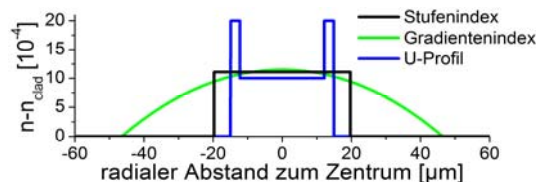


Abb. 1 Brechzahlprofile äquivalent bzgl. Modenfeld-durchmesser und effektivem Index der Grundmode

Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden die Profile so dimensioniert, dass die Eigenschaften der Grundmode für die ungekrümmten Fasern

hinsichtlich Modenfelddurchmesser und effektivem Brechungsindex gleich sind.

3.1 Modenfelder und Spitzenintensität

Aufgrund der Biegung (beschrieben nach Formel (1)) kommt es zu einer Veränderung der Modenfelder (Abb. 2). Insbesondere bei U-Profil und Stufenindex-Profil werden die Moden stark deformiert und deren Fläche verkleinert. Beim Gradientenindex-Profil findet lediglich eine Verschiebung des Modenfeldes vom Zentrum Richtung Außenseite der Krümmung statt. Die Modenform bleibt erhalten.

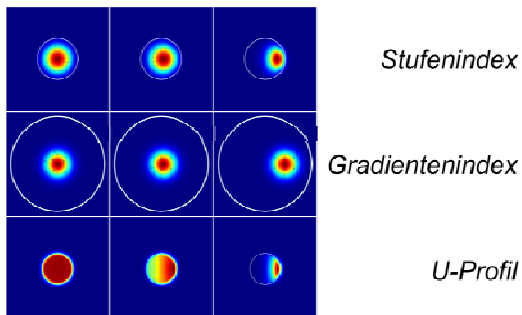


Abb. 2 Feldverteilungen der Grundmoden der unterschiedlichen Profile für verschiedene Krümmungsradien (von links): ungekrümmt, $R = 50$ cm, $R = 5$ cm. Die Breite jedes Bildes entspricht $100 \mu\text{m}$.

Betrachtet man die Spitzenintensität in Abhängigkeit vom Krümmungsradius (Abb. 3), dann erkennt man den bekannten Vorteil einer geringen Spitzenintensität des U-Profiles durch ein abgeflachtes Modenprofil im ungekrümmten Fall. Schon bei moderaten Krümmungsradien geht dieser Vorteil jedoch durch die Verringerung der lichtführenden Fläche verloren.

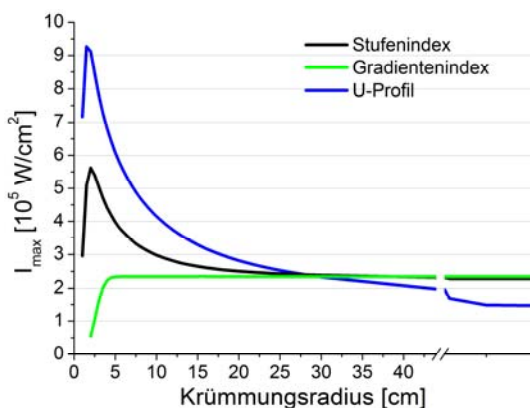


Abb. 3 Spitzenintensität bei auf 1 Watt normierter Leistung der Grundmode

3.2 Verluste und Modenseparation

Die geringsten Krümmungsverluste (Abb. 4) bei gleichem Modenfelddurchmesser und effektivem Brechungsindex der Grundmode hat die Faser mit dem U-Profil. Der höher brechende Ring wirkt hier

stärker begrenzend als z.B. das zum Rand abgeflachte Profil der Gradientenindexfaser.

Es bleibt jedoch die Frage, wie gut sich höhere Moden abtrennen lassen, ohne die Grundmode zu beeinflussen. Hierzu ist die Betrachtung des Verhältnisses der Verluste von höheren Moden zu den Verlusten der Grundmode sinnvoll. Es ergibt sich, dass die LP11 Moden im Fall der Stufenindexfaser am besten separiert werden können. Für das U-Profil ist dies in ähnlicher Weise möglich. Bei Gradientenindex ist die Separation schwieriger.

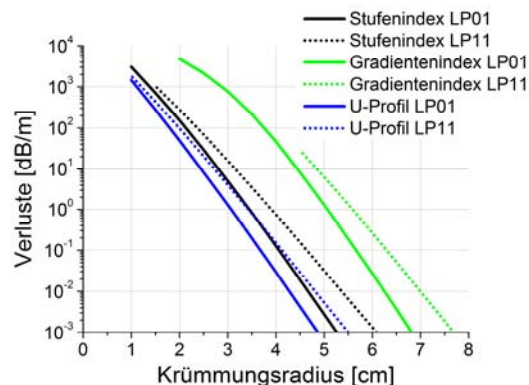


Abb. 4 Krümmungsverluste der Grundmode LP01 (--) und nächst höherer Mode LP11 (....)

4 Fazit

Die hinsichtlich Modenfelddurchmesser und effektivem Index der Grundmode äquivalenten Fasern zeigen im Vergleich mit einer Stufenindexfaser folgende Besonderheiten.

Die Gradientenindexfaser führt mehr Moden, welche sich durch Biegung auch noch schlechter diskriminieren lassen. Die Biegeverluste sind insgesamt sehr hoch. Diesen negativen Aspekten steht positiv gegenüber, dass der Einfluss der Biegung auf die Feldverteilung sehr gering ist und keine krümmungsinduzierten Feldüberhöhungen auftreten.

Beim U-Profil zeigt sich ein entgegengesetztes Bild. Die Anzahl der geführten Moden ist kleiner. Die Biegeverluste sind durch die Erhöhung des Brechungsindexprofils am Rand geringer. Dafür liegt eine starke Anfälligkeit der Feldverteilung gegenüber Biegungseinflüssen vor, sodass schnell hohe Spitzenintensitäten erreicht werden.

Es zeigt sich, dass keines der betrachteten Profile in allen Punkten optimales Verhalten zeigt. Je nach Einsatzzweck gilt es die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen.

Literatur

- [1] Schermer, R. T., Cole, J. H.. *Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment.* (IEEE Journal of Quantum Electronics, 43(10), 2007)