

# Mikrostrukturierte Multimode-Polymerfasern

Karl-Friedrich Klein, Christian Bunge\*, Alexander Bachmann\*, Stefan Feistner\*, Geoff Barton°,  
Martijn A van Eijkelenborg\*\*, Maryanne Large\*\*, Leon Poladian \*\*

Fachhochschule Giessen-Friedberg, W.-Leuschner-Str. 13, 61169 D-Friedberg, Germany;  
email: Karl-Friedrich.Klein@iem.fh-friedberg.de

\* POFAC an der Fachhochschule Nürnberg, Wassertorstr. 10, D-90489 Nürnberg  
e-mail: christian-alexander.bunge@pofac.fh-nuernberg.de

° Department of Chemical Engineering, The University of Sydney, NSW 2006 Australia

\*\* Optical Fibre Technology Centre, Australian Photonics Coop. Research Centre, University of Sydney,  
206 National Innovation Centre, Australian Technology Park, Eveleigh NSW 1430, Sydney, Australia

## 1. Einleitung

Wie bei allen optischen Fasern sind das spektrale Dämpfungsmass und die Bandbreite von besonderer Bedeutung. Jedoch unterschieden sich die mikrostrukturierten Polymerfasern deutlich von konventionellen Fasern /1/. Während vor allem mikrostrukturierte Singlemode-Faser aus Quarzglas oder anderen Gläsern für die optische Übertragungstechnik entwickelt und optimiert werden, bieten Polymerfasern noch weitere neuartige Möglichkeiten /2,3,4/: durch die einfachere Herstellung von nicht-rotationssymmetrischen Strukturen und von unterschiedlichen Lochdurchmessern können auch mikrostrukturierte Fasern mit grösserem Faserdurchmesser realisiert werden.

Im Folgenden werden deshalb nur diese Multimode-Fasern beschrieben. Neben experimentellen Ergebnissen hinsichtlich der Dämpfung werden auch die verschiedenen Mechanismen (siehe Kap. 2) diskutiert, die unterschiedliche Einflüsse auf die Wellenlänge und die radiale (und Azimutale) Leistungsverteilung haben. Obwohl die Verluste in traditionellen Polymerfasern schon lange bekannt sind /5,6,7/, sind leider bislang die zusätzlichen Effekte durch die neuartige Struktur und durch deren Herstellung nur unzureichend untersucht. Jedoch ist es für die Kommerzialisierung dieser Fasern notwendig, die einzelnen Verlustmechanismen detaillierter zu verstehen und zu reduzieren.

## 2. Aufbau einer Multimode-Polymerfaser

Abb. 1 zeigt ein theoretisches Brechzahlprofil dieser mikrostrukturierten Polymerfasern mit gradientenförmigem Brechzahlprofil (GIMPOF); dabei ist zu beachten, dass die Brechzahl in radialer und azimuthaler Richtung nur zwei Werte einnehmen kann. Neben der Brechzahl von PMMA ist nur die Brechzahl der Löcher vorhanden, die je nach Medium von 1.0 (Luft) bis ca. 1.52 (2. Polymer) variieren /8/.

In diesem Beitrag werden nur die GIMPOF mit luft-gefüllten Löchern vorgestellt. Ein typisches Beispiel der ersten Fasermustern ist in Abb.2 dargestellt; dabei zeigt sich, dass die Endflächenpräparation sehr wichtig ist (siehe auch /9/), um die Polymerbrücken zwischen den grösseren Löchern nicht zu zerstören.

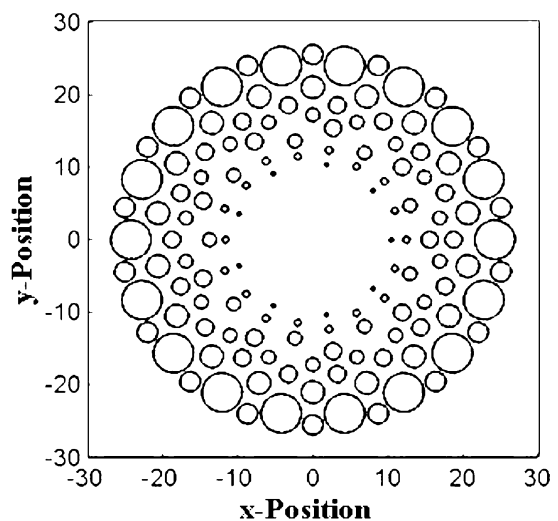
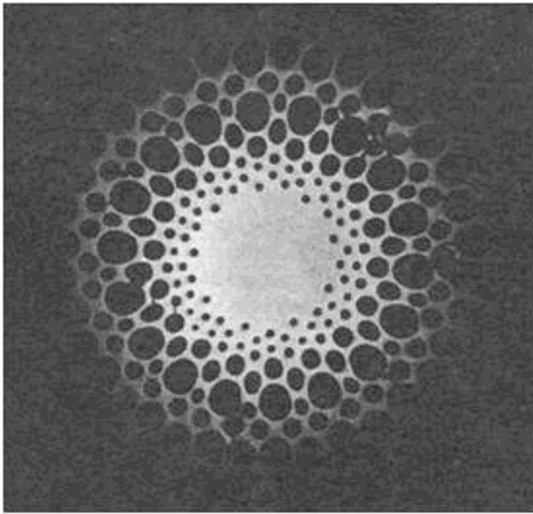


Abb. 1: Design einer GIMPOF



**Abb. 2:** Faserendfläche einer GIMPOF

### 3. Verlustmechanismen

In den mikrostrukturierten Multimode-Polymerfasern sind folgende Verluste zu beachten:

- Materialabsorption des Basismaterials
- Streuung an Materialstörungen (z.B. Variation physikalischer Eigenschaften)
- Streuung durch Oberflächenrauigkeit
- Radiale und axiale Änderungen der Lochstruktur
- Mikrokrümmungen
- Sog. Confinement-Verlust /10/.

Während das Basismaterial (v.a. PMMA /5,6,7/; aber das dämpfungsärmere CYTOP-Material /11/ ist einsetzbar) für die beiden ersten Verlustmechanismen verantwortlich ist, hängen die nächsten drei vor allem von dem Herstellverfahren ab: die Lochstrukturen werden in den Polymer-Preforms durch Bohren mit einer CNC-Maschine erzielt. Es ist klar, dass neben der dabei induzierten Oberflächenrauigkeiten auch Feinstpartikel in die Oberfläche eingebracht werden können. Neben der Erhöhung der spektralen Dämpfung muss aber auch berücksichtigt werden, dass Modenkopplung bzw. -konversion besonders stark auftreten. Dadurch können zusätzliche Verluste entstehen, da in den dargestellten Multimode-Fasern aufgrund der „höheren“ Brechzahl im äusseren Mantel (siehe Abb. 1) alle Moden Leckwellen sind, mit einer höheren Modendämpfung; Licht kann zwischen den Polymer-

brücken hindurchtunneln. Mit neuen Berechnungsmethoden können diese Verluste quantitativ bestimmt werden, auch für Multimode-Fasern /10,12/; dabei zeigte sich, dass die Dämpfungsmass verschiedener Moden um mehrere Größenordnungen variieren können.

### 3. Messergebnisse

Um den Einfluss der Streuung genauer zu beschreiben, wurden neben verschiedenen Methoden zur Bestimmung der spektralen Dämpfung auch die Oberflächenrauigkeit der Löcher in der Preform und in der Ziehzwiebel untersucht.

Die spektralen Dämpfungsmessungen nach der Cutback-Methode zeigten, dass eine wellenlängenabhängige Dämpfung durch zusätzliche Streuung auftritt. Durch diese Streuung ist in den ersten Fasermustern eine so hohe Modenkonzersion, dass die differentiellen Methoden bzgl. Dämpfung (DMA /13,14/) noch nicht angewendet werden können. Bei der Messung der längenabhängigen Abstrahlcharakteristik, mit der die numerische Apertur bestimmt werden kann, wurde eine relativ kurze Koppellänge von  $< 2,0$  m bestimmt.

Da deutliche Verbesserungen hinsichtlich der spektralen Dämpfung innerhalb des letzten Halbjahres erzielt werden konnten, wurde in diesem Beitrag auf Dämpfungsspektren verzichtet. Aktuelle Dämpfungsspektren werden aber bei der Tagung gezeigt. Mit diesen neuen Faserproben sind dann die weiteren Verlustmechanismen zu untersuchen. Vor allem der Confinement-Verlust aufgrund der Leckwellen-Eigenschaften ist experimentell zu bestimmen; damit erscheint es möglich, dass ein Vergleich von experimentellen und theoretischen Daten die theoretischen Modelle für mikrostrukturierte Multimodefaser (siehe oben) überprüfen kann.

Aufgrund der kurzen Koppellänge waren auch aussagekräftige Bandbreitemessungen noch nicht möglich: Die sehr empfindliche Methode zur Bestimmung differentieller Modenlaufzeiten (DMD /15/) kann nur angewendet werden, wenn die Messlänge kürzer als die Koppellänge ist. Mit den verbesserten Fasern ist jedoch zu erwarten, dass die Koppellänge vergrößert wird.

Es ist anzumerken, dass die Anregung von Moden bzw. Modengruppen durch achsenparallele Licht-einkopplung mit radialem Versatz bei diesen Fasern problematisch ist: In den äusseren, relativ großen Löchern der GIMPOF konnte Lichtführung in den Löchern festgestellt werden, der aufgrund der wellenlängenabhängigen Reflexion an der Grenzfläche zum Polymer mit einem Wert von nahezu 1.00 auftritt (Anti-guiding /16/), wie beim sog. Hohlwellenleiter mit einer hochreflektierenden Innenbeschichtung /17/. Deshalb sollen die geplanten differentiellen Messungen mit einer winkelabhängigen Anregung im Faserzentrum wie bei den Stufenindex-POF /18/ durchgeführt werden.

Weiterhin beeinflusst die Endflächenqualität die selektive Anregung. Es ist noch zu prüfen, ob das Polieren der Endflächen störend ist. Aus heutiger Sicht erscheint nur die Mikrotom-Methode /9/ geeignet, eine plane Oberfläche mit geringer Oberflächenrauigkeit herzustellen.

Das Hauptaugenmerk lag bei den bisherigen Optimierungen auf der Oberflächenrauigkeit der Löcher, die aufgrund der grossen Oberfläche einen gewaltigen Einfluss auf die spektrale Dämpfung haben. An gezogenen Quarzglasfasern kommt nur der Einsatz eines Atomkraft-(„Atomic-Force“) Mikroskops in Frage; diese Methode ist aber für die Charakterisierung von Innenoberflächen der MPOF weniger geeignet; neben der schwierigen Präparation hat der Messfühler keine ausreichende Bewegungsfreiheit aufgrund der konkaven Krümmung der Löcher. Deshalb wurden Messungen an der Preform und der Zeihzwiebel durchgeführt und die Oberflächenrauigkeit abgeschätzt, da die Oberflächengüte beim Ziehen durch den notwendigen Heissprozess nicht verschlechtert werden sollte, so dass eine lineare Skalierung erlaubt ist. Die Tiefenprofile wurden mit Hilfe eines optischen Mikroskops (Nikon mit einer Schrittmotor-Steuerung in vertikaler Richtung). Eine Serie von Bildern, die bei unterschiedlichen Höhen-Einstellungen aufgenommen wurden, kann mit einer Bildauswertungs-Software („Auto-Montage“) analysiert werden. Mit diesen Höhenprofilen kann die Korrelationslänge durch die Verwendung der 2-dimensionalen Fourier-Transformation bestimmt werden, die für die theoretischen Berechnungen der Modenkonzersion notwendig ist.

#### 4. Zusammenfassung

Der Beitrag zeigte den aktuellen Stand und die zukünftigen Schwerpunkte der Entwicklung und Charakterisierung von mikrostrukturierten Polymerfasern. Im Vergleich zu den entsprechenden Quarzglasfasern sind aufgrund der einfachen Bearbeitung einerseits und der Vielfalt von Materialien andererseits neue interessante Faserdesigns möglich, wie mit der GIMPOF gezeigt wurde.

Jedoch sind auch noch einige technische Probleme zu lösen: Die Fragen nach der minimalen Dämpfung unter Berücksichtigung aller Verlust-Mechanismen und der maximalen Impulsverbreiterung unter Berücksichtigung der Modenkonzersion/-kopplung sind detailliert zu beantworten. Weiterhin sind neben der Charakterisierung der bisherigen Fasermuster, die durch das Bohren von Löchern in Polymer-Stäbe und anschliessendes Ziehen hergestellt wurden, neue kostengünstigere Preform-Herstellverfahren zu entwickeln.

Trotz des bisher noch zu hohen Dämpfungsbelags - zum jetzigen Zeitpunkt sind Dämpfungen von ca. 1 dB/m erzielt worden - erscheint das technische und kommerzielle Potential von mikrostrukturierten Polymerfasern sehr groß, vor allem für neue Anwendungen auch außerhalb der Telekommunikation.

#### 5. Literatur

- /1/ M. A. van Eijkelenborg, M. C. J. Large, A. Argyros, J. Zagari, S. Manos, N. A. Issa, I. Bassett, S. Fleming, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke and N. A. P. Nicorovici: "Microstructured polymer optical fibre". *Optics Express*, Vol. 9, No. 7, pp. 319-327 (2001)
- /2/ M. C. J. Large, M. A. van Eijkelenborg, A. Argyros, J. Zagari, S. Manos, N. A. Issa, I. Bassett, S. Fleming, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, N. A. P. Nicorovici: "Microstructured Polymer Optical Fibres: Progress and Promise". *SPIE-Proc. Vol. 4616*, pp. 105-116 (San Jose, Jan. 2002)
- /3/ M. A. van Eijkelenborg, A. Argyros, G. Barton, I. Bassett, F. Cox, M. Fellow, S. Fleming, N. A. Issa, M. C. J. Large, S. Manos, L. Poladian, J. Zagari: "New possibilities with microstructured polymer optical fibres". *Proc. of 11<sup>th</sup> POF Conference*, pp. 49-52 (Tokyo, Oct. 2002)

- /4/ F. Cox, A. Mitchie, A. Argyros, G. Henry, M. C. J. Large, S. Ponrathnam: "Poling and doping of microstructured polymer optical fibres". Proc. of 12<sup>th</sup> POF Conference, pp. 89-92 (Seattle, Sept. 2003)
- /5/ W. Groh, J. E. Kuder, J. Theis: "Prospects for the development and applications of Plastic Optical Fibers". Proc. SPIE, Vol. 1592, pp. 20-30 (Boston, Sept. 1991)
- /6/ Y. Koike: "Status of POF in Japan". Proc. of 5<sup>th</sup> POF-conference, pp. 1-7 (Paris, Oct. 1996)
- /7/ W. Daum, J. Krauser, P. E. Zamzow, O. Ziemann: "Polymer Optical Fibers for data communications". Springer-Verlag (Berlin, Heidelberg, NewYork 2002)
- /8/ M. A van Eijkelenborg, A. Argyros, G. Henry, N. A. Issa, S. Manos and J. Zagari, J. Xie: "PMOF for high bandwidth transmission". Proc. of 12<sup>th</sup> POF Conference, pp. 26-29 (Seattle, Sept. 2003)
- /9/ S. Feistner, H. Poisel: „POF endface analysis“. Proc. of 9<sup>th</sup> POF-conference, pp. 331-335 (Amsterdam, Sept. 2001)
- /10/ T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, L. C. Botten and M. J. Steel, "Confinement losses in microstructured optical fibres," Opt. Lett. 26, pp.1660-1662 (2001)
- /11/ K. Koganezawa, T. Onishi, "Progress in per-fluorinated GI-POF, Lucina™", Proc. of 9<sup>th</sup> POF-conference, pp. 19-21 (Boston, Sept. 2000)
- /12/ L. Poladian, N. A. Issa, and T. M. Monro, "Fourier decomposition algorithm for leaky modes of fibres with arbitrary geometry," Optics Express, Vol. 10, No. 10, pp.449-454 (2002)
- /13/ R. Olshansky and S. M. Oaks, "Differential mode attenuation measurements in graded-index fibers", Appl .Opt., Vol. 15, 1830-1835 (1978)
- /14/ K.-F. Klein, S. Doris, D. Zevgolts, H. Poisel, O. Ziemann and M. Loch, "Attenuation measurements on graded index POF", Proceedings 11<sup>th</sup> POF Conference, post-deadline paper, (Sept. 2001, Amsterdam)
- /15/ A. Bachmann, K.-F. Klein, H. Poisel, O. Ziemann and J. Niewisch, "Differential mode delay (DMD) measurements on graded index POF", Proc. of 11<sup>th</sup> POF Conference, 57-61 (Sept. 2001, Amsterdam)
- /16/ N. A. Nader, A. Argyros, M. A. van Eijkelenborg and J. Zagari, "Identifying hollow waveguide guidance in air-cored microstructured optical fibres", Opt. Express, Vol. 11, 996-1000 (2003)
- /17/ J. A. Harrington: „Infrared Fiber Optics“. will be published in OSA Handbook, Vol. III, McGrawHill, New York, and, "A review of IR-transmitting, hollwo waveguides". Fiber and Integ.Opt., Vol.19, pp.211-217 (2000)

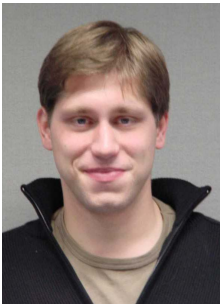
Autoren:



**Prof. Dr. Karl-Friedrich Klein**  
**Fachhochschule Gießen/Friedberg**

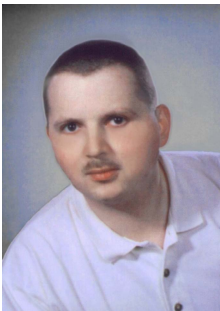
Studium der Physik und Promotion 1983 an der Universität Kaiserslautern  
Promotionsthema: "Charakterisierung von Vielwellen- und Einwellenfaser im optischen Langwellenbereich oberhalb von 1,0  $\mu\text{m}$  mit einem Ramanfaser-Laser"  
(Prof. W. Heinlein im Fachbereich Elektrotechnik)

Von 1983 bis 1990 Fa. Heraeus Quarzglas GmbH in Hanau  
Entwicklung von synthetischem Quarzglas für Lichtwellenleiter-Anwendungen  
Optimierung von Verfahrensprozessen für höchstreines und Fluor-dotiertes Material  
ab 1990 FH Giessen-Friedberg, Untersuchungen von Spezialfasern und deren  
Anwendungen in neuen Feldern (All-Silica-Fasern, HardClad-Silica-Fasern, optische  
Polymerfasern, Hohlwellenleiter, UV-beständige Quarzglasfasern)



**Dr. Christian-Alexander Bunge**  
**Polymerfaser-Anwendungszentrum der FH Nürnberg**

Studium und Promotion an der TU Berlin (Prof. Petermann)  
Im POF-AC seit 2002, verantwortlich für die theoretische Modellierung von  
Lichtausbreitung in optischen Fasern;  
Koordinator für Europäische Projekte



**Dipl.-Ing. Alexander Bachmann**  
**Polymerfaser-Anwendungszentrum der FH Nürnberg**

Im POF-AC seit 2000  
Studium an der FH Nürnberg  
Verantwortlicher für Gerätebau  
Spezialist für Bandbreitemessungen an Multimodefasern



**Dipl. Stefan Feistner**  
**Polymerfaser-Anwendungszentrum der FH Nürnberg**

Studium an der FH Nürnberg  
Spezialist für POF-Endflächen-Analyse und -Präparation  
Im POF-AC seit 2000

**Geoff Barton**  
**Martijn A van Eijkelenborg**  
**Leon Poladian**  
**Maryanne Large**