

Spektroskopische Untersuchungen an Photonischen Kristallfasern unter sensorischen Anwendungsaspekten

Kay Schuster, Jens Kobelke, Claudia Aichele, Klaus Mörl, Hartmut Lehmann, Johannes Kirchhof, Hartmut Bartelt

Institut für Physikalische Hochtechnologie Jena e.V.

<mailto:kay.schuster@ipht-jena.de>

Mikrostrukturierte Optische Fasern (MOF) wurden hinsichtlich ihrer optischen und mechanischen Eigenschaften untersucht. Die Festigkeitswerte dieser Fasern sind mit denen von Hohlfasern vergleichbar. Wesentliches Kriterium für die Faserfestigkeit ist neben der Lochpackung die Dicke des Claddingbereiches. Es werden ein Temperatur- und ein pH-Sensor auf Basis MOF vorgestellt.

1 Einführung

Photonische Kristallfasern (PCF) bzw. Mikrostrukturierte Optische Fasern (MOF) stellen eine neue Klasse optischer Fasern in Bezug auf ihre optischen Übertragungseigenschaften und sensorische Funktionalität dar.

Im Gegensatz zu klassischen optischen Fasern, bei denen grundlegende optische Eigenschaften stark sowohl auf dem Basismaterial als auch auf unterschiedlichen Dotierungen beruhen, werden diese Eigenschaften bei PCF bzw. MOF im Wesentlichen durch die Mikrostruktur (Lochgrößen, Lochabstände, Kerndurchmesser etc.) beeinflusst [1].

2 Experimenteller Teil

Die Herstellung mikrostrukturierter optischer Fasern (MOF) erfolgt nach dem klassischen „Stack and Draw“ Verfahren. Hierzu werden Kapillaren entsprechender Ausgangsgeometrie hexagonal gepackt, mit einem Mantelrohr versehen und zur Faser verzogen. Im Falle der Herstellung indexgeführter MOF wird die zentrale Kapillare gegen einen Stab aus dem entsprechenden Kernmaterial (z.B. seltenerd-dotiert für Laseranwendungen, undotiert für passive oder sensorische Anwendungen) getauscht. Die Einstellung der Lochgröße in der resultierenden Faser und somit auch z.B. der Numerischen Apertur (NA) erfolgt über eine separate Druckzuführung.

Über eine Messung des Nahfeldes- der MOF wurde die Strahlgüte ermittelt. Die Untersuchung des Fernfeldes ergab die Numerische Apertur der Faser. Die sensorischen Eigenschaften der MOF als „Evanescent Field Absorption Sensors“ (EFAS) wurden nach einem in Abb. 1 dargestellten Schema ermittelt. Das Spektrometersystem erlaubt Messungen in einem Bereich zwischen ca. 220 nm und 720 nm Wellenlänge mit einer spektralen Auflösung von etwa 3 nm.

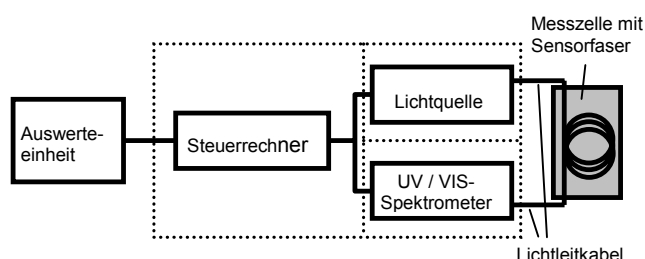


Abb. 1 Schema eines Messaufbaus für EFAS-Fasern

3 Ergebnisse und Diskussion

Das Lichtpropagationsverhalten von MOF kann über einen weiten Bereich durch die Variation des d/Λ -Verhältnisses (d = Lochdurchmesser, Λ = Lochmittenabstand) eingestellt werden. So ist es möglich, Numerische Aperturen $> 0,7$ zu erreichen. In Abhängigkeit von der Numerischen Apertur und dem Durchmesser des Faserkerns konnten sowohl Single Mode als auch Multimode-Fasern mit Dämpfungswerten $< 3 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ ($\lambda = 1,1 \mu\text{m}$) hergestellt werden.

Die mechanische Stabilität mikrostrukturierter Fasern hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verwendbarkeit unter intensiven Umwelteinflüssen (Feuchtigkeit, erhöhte Temperaturen, aggressive Medien). Es ist zu erwarten, dass die vergrößerte Innenoberfläche der Fasern zu verstärkten Korrosionseffekten im Vergleich zu Standardfasern führt. Unsere Untersuchungen zeigten, dass die Zugfestigkeit mikrooptischer Fasern mit steigender Anzahl der Lochringe abnimmt, jedoch im Wesentlichen durch die Dicke des Außenmantels bestimmt wird (Abb. 2).

Um die erwarteten Korrosionseffekte zu minimieren sind an MOF erfolgreich sowohl Spleiß- als auch Endverschmelzungsversuche durchgeführt worden.

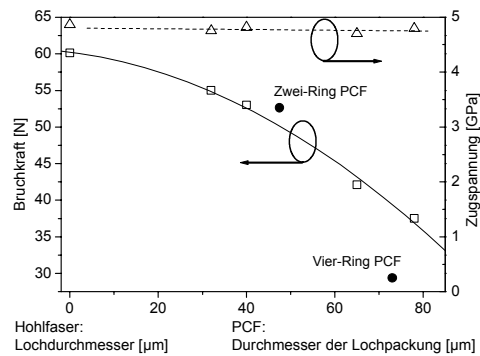
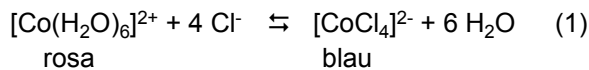


Abb. 2 Bruchkraft und Zugspannung von Hohlfasern (Δ und O) sowie von MOF (\bullet) in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser bzw. vom Durchmesser der Lochpackung

Abb. 3 zeigt die Kennlinie eines Temperatursensors unter Ausnutzung des temperaturabhängigen Gleichgewichtes von der Wasseraufnahme bzw. -abspaltung von Cobalt(II)-chlorid (Gl. 1). Hierzu wurde in einer stark wasserhaltigen Sol-Gel-Matrix Cobalt(II)-chlorid in die Kapillarstruktur einer MOF eingebracht und teilentwässert.



Eine Temperaturerhöhung verschiebt das Gleichgewicht der H_2O -Abspaltung nach rechts und kann über eine veränderte Extinktion bzw. Absorption des evaneszenten Feldes von im Faserkern geführtem Licht detektiert werden.

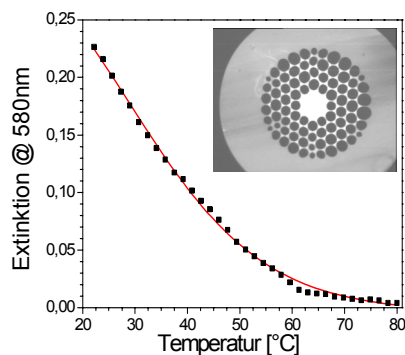


Abb. 3 Temperatur-Extinktions-Kennlinie einer mit Cobalt(II)-chlorid gefüllten MOF

Bei Verwendung einer MOF als Durchflusszelle erweist sich der Kapillardurchmesser als kritische Größe [2]. Abschätzungen nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille zeigen, dass beispielsweise bei einem Kapillar-Durchmesser von $20 \mu\text{m}$ und einem Druck von 9 bar wässrige Lösungen eine Strömungsgeschwindigkeit von $60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ nicht überschreiten (Abb. 4).

Durch Verwendung eines Multikapillarstabes ($\varnothing_{\text{au\ss en}} \approx 3 \text{ mm}$) konnte dennoch eine pH-Messung an einer „MOF“ demonstriert werden.

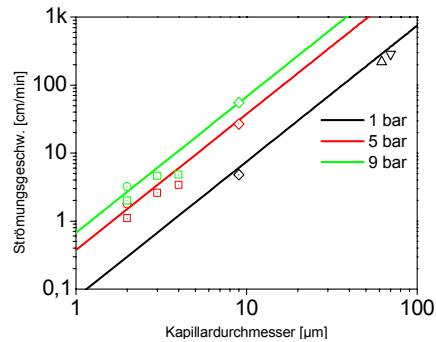


Abb. 4 Abschätzung von Strömungsgeschwindigkeiten für verschiedene mikrostrukturierte Fasern nach dem Hagen-Poiseuille'schen Gesetz

Dazu wurde ein mit Phenolrot als Indikatorfarbstoff versetzter schwach saurer Puffer mit NaOH titriert und durch die MOF geleitet. (Abb. 5).

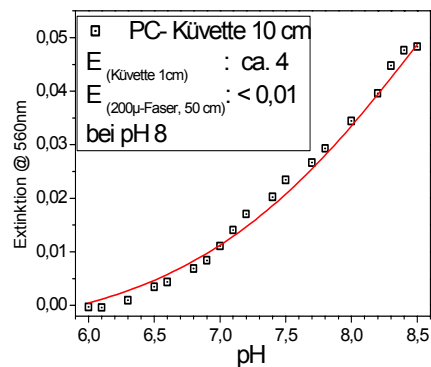


Abb. 5 pH-Wert-Messung mittels einer Multikapillar-Durchflusszelle. Zum Vergleich sind die Zahlenwerte der Extinktion für eine Standard-EFAS-Faser sowie einer Transmissionsküvette bei $\text{pH} = 8$ angegeben.

4 Zusammenfassung

Photonische Kristallfasern zeigen deutliche Vorteile gegenüber Standardsensorfasern hinsichtlich ihrer evaneszenten Wechselwirkung und ihres günstigen optisch wirksamen Volumen-Oberflächenverhältnisses. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit sind Mehrkernstrukturen denkbar. Als problematisch erweisen sich gegenwärtig die geringen Strömungsgeschwindigkeiten innerhalb der Kapillaren und hieraus resultierend die Analytzuführung. Ziel ist die Entwicklung analyt-penetrabler Strukturen sowie „schalenloser“ Grapefruitfasern.

5 Literatur

- [1] J. C. Knight, "Photonic crystal fibres" *nature* **424**: 847-851 (2003)
- [2] Y.L. Hoo, W. Jin, C. Shi, H.L. Ho, D.N. Wang, S.C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor" *Applied Optics* **42** (8): 3509-3515 (2003)