

Einfluss auf die Bandbreite

Eine Schwierigkeit bei polymeren optischen Fasern (POF) ist ihre hohe Modendispersion. Dies bedeutet, dass sich ein optischer Impuls, der in eine solche Faser eingekoppelt wird, auf alle (oder fast alle) Moden der Faser verteilt. Jeder dieser Moden durchläuft die POF mit einer leicht unterschiedlichen Geschwindigkeit. Die Folge ist, dass die Moden eines optischen Pulses das Faser-Ende zu leicht unterschiedlichen Zeiten erreichen und so eine zeitliche Impulsverbreiterung verursachen; zusätzlich verändern sich die Anstiegs- und Abfallzeiten, wenn der Impuls die Faser durchläuft. Dieser Effekt reduziert die übertragbare Datenrate, d.h., er vermindert die Übertragungsbandbreite.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Hochfrequenzeigenschaften der POF und folglich die Informationsübertragungskapazität nicht nur von ihren eigenen Parametern wie der numerischen Apertur und ihrer Länge abhängen, stellt sich die wesentliche Frage, welche anderen Betriebsgrößen und Umgebungsfaktoren die Bandbreite beeinflussen und in welchem Ausmaß. Zusätzlich gilt, dass für den Systementwurf ein bestimmter Bandbreitenwert nur dann vollständig verwertbar ist, wenn die zugrunde liegende Übertragungsfunktion bekannt ist.

Der Begriff Bandbreite hat je nach Anwendung im optischen oder elektrischen Bereich eine unterschiedliche Bedeutung. Normalerweise definiert man die optische Bandbreite anhand der -3 -dB-Frequenz. Dies ist die Modulationsfrequenz, bei welcher die optische Leistung auf die Hälfte des DC-Wertes (0-Hz-Modulation) abgefallen ist. Also bedeutet „ -3 dB optisch“ eine Reduktion der optische Leistung um 50 Prozent. Die elektrische Bandbreite jedoch bezieht sich auf diejenige Frequenz, bei der die empfangene elektrische Leistung auf die Hälfte ihres DC-Wertes gefallen ist.

Einflussgrößen auf die Bandbreite von polymer-optischen Fasern für MOST-Systeme

Der vorliegende Artikel zeigt, dass die Bandbreite einer polymer-optischen Faser (POF) nicht als ein autonomer Parameter betrachtet werden kann, um die Hochfrequenzeigenschaften der POF zu quantifizieren. Es wird die Frage beantwortet, welche zusätzlichen Angaben zu einem Bandbreitenwert notwendig sind und wie diese die Bandbreite beeinflussen.

Von Prof. Dr. Jürgen Krapp

Unter der Annahme, dass die Charakteristik der Übertragungsfunktion bestimmt ist, kann der Zusammenhang zwischen elektrischer und optischer Bandbreite berechnet werden. Im Fall einer Gauß-Übertragungsfunktion ver-

Offensichtlich gibt es zwischen Impulsweite, Anstiegszeit und Bandbreite eine Beziehung. Mathematisch erhält man die Sprungantwort eines linearen Systems aus der Integration der Impulsantwort. Symmetrische Impulsantworten ohne Ausläufer oder Überschinger lassen sich durch eine Gauß-Form annähern. Folglich können sie als Antwort eines Gauß-Tiefpassfilters betrachtet werden. Die Anstiegszeit t_{10-90} (10 – 90 %) der Sprungantwort eines Gauß-Systems ist nur zehn Prozent länger als die volle Breite bei halbem

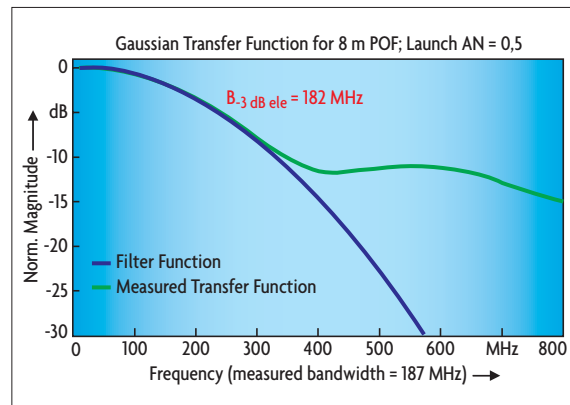


Bild 1. Gemessene Übertragungsfunktion der Mitsubishi-Rayon-POF und ihre Gauß-Approximation.

hält sich die elektrische Bandbreite $B_{3dB\ ele}$ und die optische Bandbreite $B_{3dB\ opt}$ gemäß

$$B_{3dB\ opt} = \sqrt{2} \cdot B_{3dB\ ele} \quad (1)$$

Das Zeitverhalten eines Systems wird oft entweder durch die Dauer der Impulsantwort oder die Anstiegszeit spezifiziert. Welcher dieser Parameter geeignet ist, hängt von der Anwendung ab.

Maximum (FWHM) und die Anstiegszeit t_{20-80} (20 – 80 %) beträgt ungefähr 71 Prozent dieses FWHM-Wertes. In diesem Fall gilt überdies folgende Beziehung zur elektrischen Bandbreite.

$$t_{20-80} = 0.222 / B_{3dB\ ele} \quad (2)$$

Im Wesentlichen bedeutet dies, dass außer der Klärung des Typs der Bandbreite (optisch oder elektrisch) die Art

der Übertragungsfunktion bekannt sein muss, um den Bandbreitewert in den geeigneten Zeitparameter umzurechnen.

Ermittlung der POF-Übertragungscharakteristik

Frequenzbereichsmessungen liefern den Amplituden- und Phasengang. Diese Angaben sind normalerweise für den Systementwurf nützlicher als Zeitbereichsmessungen, insbesondere wenn das am Empfänger detektierte Signal entzerrt werden soll. Das Basisband-Frequenzverhalten wird aus dem Verhältnis der Sinuswelle am Aus- und Eingang der Faser bestimmt. Es gibt drei wesentliche Vorteile für die Messung im Frequenzbereich:

- ▶ Man erhält die Übertragungsfunktion der Faser direkt und kann diese benutzen, um mittels Fourier-Transformation die Antwort auf jedes beliebige Eingangssignal zu berechnen.
- ▶ Aufgrund der Kleinsignalmodulation mit einem konstanten mittleren Lichtpegel ist eine Linearität des Photodetektors über einen weiten Bereich nicht verlangt wie bei Zeitbereichsmessungen.
- ▶ Das Ausgangssignal kann mit extrem kleiner Messbandbreite empfangen werden, wodurch der Einfluss des Empfängerrauschens deutlich reduziert und die Detektion kleiner optischer Leistungen ermöglicht wird, z.B. am Ende langer Fasern.

Für jedes lineare System kann die Übertragungsfunktion durch die Zentralmomente M_m seiner Impulsantwort beschrieben werden gemäß folgender Gleichung:

$$H(\omega) = A \cdot \exp \left[-j\omega t_C - \frac{\omega^2}{2} \sigma^2 + j \frac{\omega^3}{6} M_3 + \frac{\omega^4}{24} (M_4 - 3\sigma^4) \pm \dots \right] \quad (3)$$

Dabei gilt: A = Fläche; $t_C = M_1$ = zeitlicher Schwerpunkt, d.h. t_C entspricht der Laufzeit des Impulses; $\sigma^2 = M_2$ = Varianz der Impulsantwort.

Bild 1 zeigt die gemessene Übertragungsfunktion der „Mitsubishi Rayon Heat Resistant“-POF für eine Länge von 8 m bei einer Einkoppel-Apertur von AN = 0,5. Das Bild lässt erkennen, dass die Übertragungsfunktion der POF mindestens bis zur Band-

breite durch eine Gauß-Funktion angenähert werden kann. Dies gilt auch für andere Faserlängen und andere Einkoppel-Aperturen.

Bei einer Gauß-Übertragungsfunktion sind alle ungeraden zentralen Momente (M_3, M_5, \dots) der Gauß-Impulsantwort aus Symmetriegründen gleich Null. Die geraden zentralen Momente eines Gauß-Impulses sind gegeben durch:

$$M_m = \sigma^m \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (m-3) \cdot (m-1) \quad (4)$$

Wegen

$$M_4 = 3\sigma^4 \quad (5)$$

usw. sind für eine Gauß-Übertragungsfunktion alle Größen 3. Ordnung und höher im Exponenten von Gl. (3) gleich Null.

Wenn man folglich die Faserdämpfung und die Grundlaufzeit außer Acht lässt (d.h. $A = 1, t_C = 0$), dann ist die Gauß-Übertragungsfunktion

$$H(f) = \exp \left[- \left(\frac{f}{1.7 \cdot B_{-3dB}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

eine geeignete Näherung für die Übertragungsfunktion der POF. In Gl. (6) ist die elektrische -3-dB-Bandbreite B_{-3dB} anstelle der Standardabweichung σ der Impulsantwort benutzt. B_{-3dB} kann entweder gemessen oder mit Gl. (7) des folgenden Abschnittes approximiert werden.

Einfluss von Faserlänge und Einkoppel-Apertur

Bei polymer-optischen Fasern verursacht die Modendispersion die Verschlechterung der Bandbreite. Die Auswirkung der Materialdispersion kann man vernachlässigen. Die Analyse zeigt, dass die Bandbreite nicht nur eine Funktion der Faserlänge ist, sondern auch von der verwendeten Lichtquelle abhängt. Aufgrund von Modenkopplung und differentieller Modendämpfung wird sich die Bandbreite in realen Systemen nach einer bestimmten Anfangslänge weniger vermindern. Die Kopplung der Energie von einem Mode zum anderen

in der Faser entsteht durch strukturelle Fehler, Schwankungen von Faserdurchmesser und Brechzahl und durch Mikrokrümmungen aufgrund der Verkabelung.

Die Modenkopplung erzeugt einen Ausgleich der unterschiedlichen, den Moden zugeordneten Laufzeiten und reduziert so die Modendispersion. Das

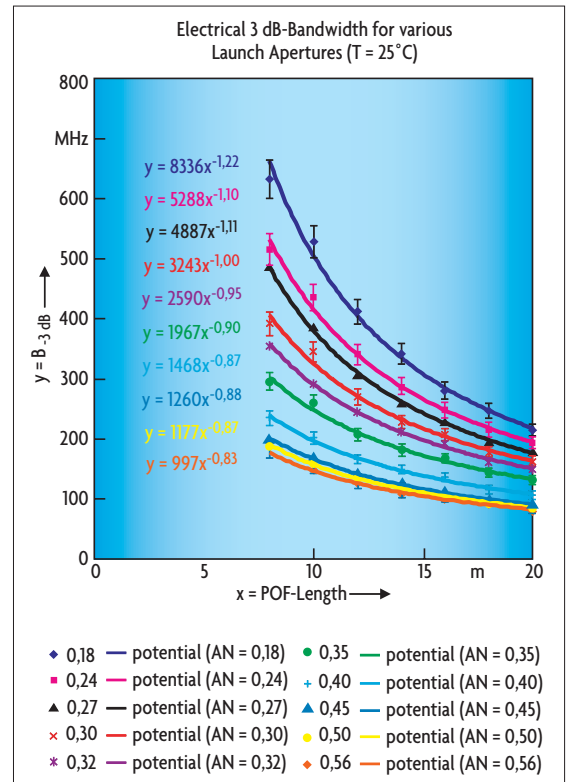


Bild 2. Abhängigkeit der Bandbreite von der POF-Länge, verschiedene Einkoppel-Aperturen (Mitsubishi Rayon).

Ergebnis dieses Phänomens ist, dass nach einer bestimmten Koppellänge L_C die Bandbreite von einer L^{-1} -Abhängigkeit zu einer $L^{-0.5}$ -Abhängigkeit wechselt. Da der Übergang von der einen Abhängigkeit zur anderen mit wachsender Faserlänge L sehr langsam geschieht, kann die Bandbreite in Abhängigkeit der Länge empirisch beschrieben werden gemäß

$$B_{-3dB} = B_0 \cdot L^{-q} \quad (7)$$

Der Parameter q gibt das Maß der Modenmischung in der Faser an und schwankt zwischen $q = 0,5$ für maximale Modenmischung (wenn nach der Koppellänge L_C der Faser das dynamische Modengleichgewicht erreicht ist) und $q = 1$ für den Fall ohne Modenkopplung.

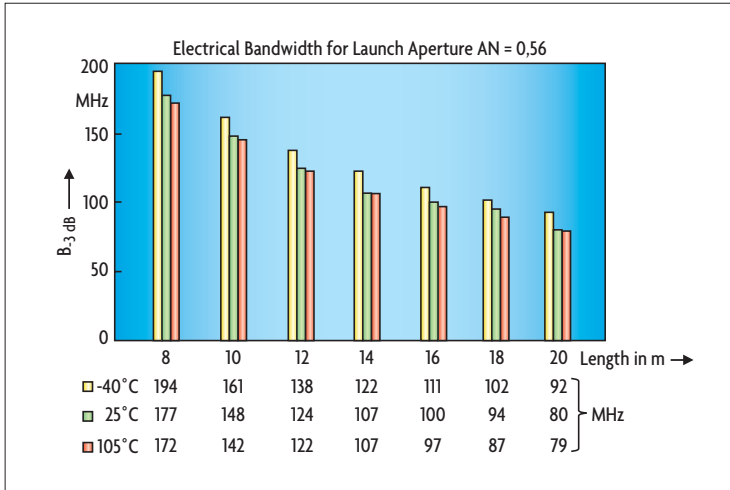


Bild 3. Temperaturabhängigkeit der Bandbreite (Mitsubishi-Rayon-POF).

Bild 2 zeigt die gemessene Bandbreite über der Faserlänge für Einkoppel-Aperturen zwischen 0,18 und 0,56. Die Bandbreiten-Längen-Abhängigkeit ist für jede Einkoppel-Apertur durch eine potentielle Regressionskurve entsprechend Gl. (7) approximiert. Alle Regressionskurven nähern die ge-

Koppellänge der Faser, wenn q nahe bei 1 ist.

Einfluss der Temperatur

Alle Ergebnisse diese Abschnitts beziehen sich auf die „Mitsubishi Rayon Heat Resistant“-POF. Bild 3 stellt den Einfluss der Temperatur auf die Bandbreite dar bei einer Einkoppel-Apertur von 0,56.

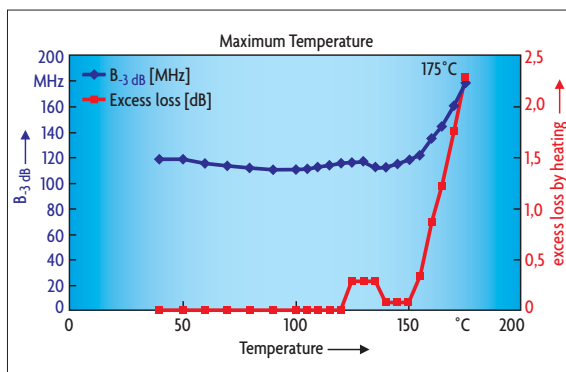


Bild 4. Elektrische Bandbreite und Zusatzdämpfung über der Temperatur (Mitsubishi-Rayon-POF: L = 15 m, Einkoppelapertur AN = 0,50).

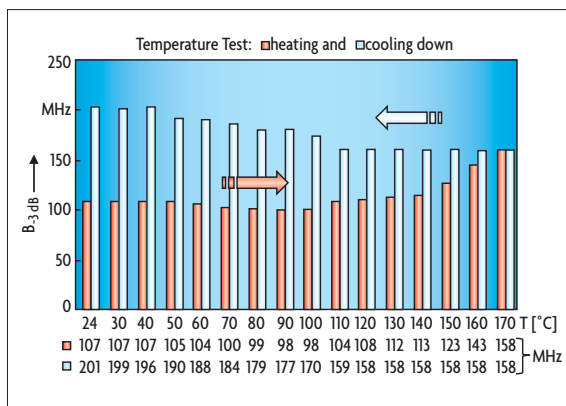


Bild 5. Dauerhafte Änderung durch hohe Temperatur; elektrische Bandbreite abhängig von der Temperatur (Mitsubishi-Rayon-POF: L = 15 m, Einkoppel-AN = 0,56).

messenen Daten mit einer Genauigkeit von $\pm 5\%$. Die Messungen zeigen, dass auch die Koppellänge L_C von der Einkoppelbedingung abhängt, da der Wert q im Exponenten für abnehmende Einkoppel-Aperturen AN ansteigt. Im Rückschluss zeigt sich außerdem, dass die Mehrzahl der Messungen sich auf Längen beziehen, die kürzer sind als die

Bild 5 dokumentiert einen Temperaturversuch mit einer 15 m langen Faser, die bis 170 °C erwärmt wird (rote Balken) und nachfolgend wieder auf 24 °C abkühlt (blaue Balken). Eine Erwärmung der Faser über die Grenze von 105 °C hinaus bis 170 °C bewirkt eine Bandbreitenerhöhung, die nach dem Abkühlen der Faser auf Zimmertemperatur irreversibel bleibt. Hierbei entsteht ein Zusatzverlust von etwa 3,4 dB über der normalen Faserdämpfung. Die grundsätzliche Gauß-Charakteristik zur Approximation der Übertragungsfunktion bleibt erhalten.

Die Gauß-Charakteristik ist eine leicht handhabbare Näherung für die Übertragungsfunktion einer Polymerfaser. Ihre Bandbreite kann für jede Faserlänge mittels einer potentiellen Funktion $B_0 \times L^{-q}$ bestimmt werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass ihre Parameter B_0 und q von der Einkoppel-Apertur der Lichtquelle abhängen. Hinsichtlich der „Mitsubishi Rayon Heat Resistant“-POF hat eine Umgebungstemperatur zwischen -40 und +105 °C nur einen geringen Einfluss auf die Übertragungsbandbreite. Oberhalb von 105 °C kommt es zu irreversibler Erhöhung der Bandbreite aber auch der Zusatzdämpfung.

Im Wesentlichen bewirkt die Erwärmung dieser POF bis zu 105 °C keine deutliche Einschränkung der Übertragungsbandbreite. Die Folge einer Temperaturerhöhung auf 105 °C ist nicht einschneidend und ein Abkühlen der Faser wieder auf -40 °C erhöht sogar die Bandbreite leicht.

Bild 4 zeigt die Grenztemperatur von 175 °C, oberhalb derer die Signalübertragung unterbrochen wird. Die Erwärmung der Faser auf 175 °C geht mit einem Zusatzverlust von etwa 2,5 dB über der normalen Faserdämpfung einher.



Prof. Dr. Jürgen Krapp
 promovierte 1986 an der Universität des Saarlandes zum Doktor der Naturwissenschaften. Seit 1994 lehrt er an der Hochschule Aalen im Studiengang Optoelektronik und im Masterstudiengang Photonics mit Schwerpunkt auf dem Gebiet der optischen Kommunikationstechnik.
juergen.krapp@htw-aalen.de