

j-BendAble – Die kompatiblen biegeunempfindlichen OM2/OM3/OM4-Fasern von j-fiber

Historie

Multimode-Fasern mit Gradienten-Indexprofil werden seit Jahrzehnten erfolgreich für die Datenübertragung eingesetzt, wobei Typen mit einem Kerndurchmesser von $62,5\ \mu\text{m}$ und $50\ \mu\text{m}$ am häufigsten zum Einsatz kamen.

Standardfasern mit einem Kerndurchmesser von $62,5\ \mu\text{m}$ sind in erster Linie für den Betrieb bei $1300\ \text{nm}$ optimiert worden. Sie ermöglichen Datenraten von $10\ \text{Mb/s}$ bis $100\ \text{Mb/s}$ (üblicherweise bezeichnet als OM1-Fasern) bei Anregung mit einer LED. Die Faser mit $50\ \mu\text{m}$ -Kern (üblicherweise bezeichnet als OM2-Faser) wurde für die Anregung mit einem deutlich schmalbandigeren Laser optimiert und erreicht deshalb Datenraten von $1000\ \text{Mb/s}$ über Verbindungslängen von bis zu $2000\ \text{m}$.

Paradigmenwechsel

Etwa im Jahr 2002 erfolgte ein unerwarteter Paradigmenwechsel. Durch Einsatz der schnellen, schmalbandigen und vor allem extrem preiswerten Laser aus der Unterhaltungsindustrie stand der Datenübertragung eine alternative Lichtquelle für deutlich höhere Datenraten zur Verfügung.

Ein deutlicher Fortschritt! Aber: die neuen Laser des Typs VCSEL arbeiten bei $850\ \text{nm}$ und die bis dato existierenden Fasern waren vorzugsweise optimiert für $1300\ \text{nm}$. Als Reaktion auf diese neuen Anforderungen wurden Fasern entwickelt, die ihr Bandbreiten-Maximum bei $850\ \text{nm}$ aufweisen. Die besondere Abstrahlcharakteristik der VCSELs machte es notwendig, das Brechzahlprofil der Fasern speziell zu optimieren sowie eine andere Art der Bandbreitenmessung einzuführen: die DMD-Messung (*Details dazu im Abschnitt „Kompatibilität – Übertragungseigenschaften“*).

Als Ergebnis entstand ein eigenständiger Fasertyp: die OM3-Faser, die bei $850\ \text{nm}$ eine Datenrate von $10\ \text{Gb/s}$ über eine Streckenlänge von bis zu $300\ \text{m}$ erlaubt, bzw. als OM4-Faser, die bei gleicher Datenrate eine Linklänge von $550\ \text{m}$ aufweist.

Diese Fasertypen haben aufgrund ihrer Abwärtskompatibilität speziell bei der Anwendung in Rechenzentren die problemlose Migration von $100\ \text{Mb/s}$ auf $10\ \text{Gb/s}$ ermöglicht und sind heute die dominierende Fasertechnologie in diesem Anwendungsbereich.

Evolution

Obwohl diese OM3/OM4-Fasern jetzt und in naher Zukunft die an sie gestellten Anforderungen problemlos erfüllen, bleibt die Entwicklung natürlich nicht stehen.

Die Entwicklung der Technologien für die Rechenzentren geht erwartungsgemäß in Richtung höherer Geschwindigkeiten und Datendurchsätzen.

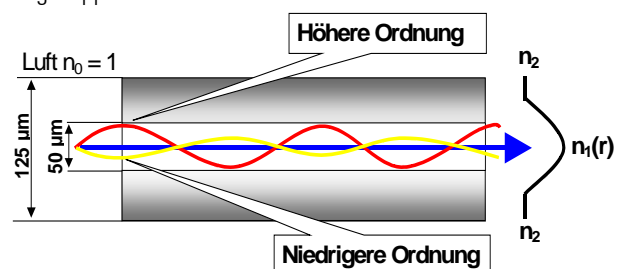
Neue Konzepte diskutieren nicht nur höhere Übertragungsraten von $25\ \text{Gb/s}$ und mehr pro Faser und Datenraten von 40 bzw. $100\ \text{Gb/s}$ durch Übertragung auf parallelen Fasern, sondern auch eine deutliche Verkleinerung der IT-Komponenten ($50\ \%$).

Das bedeutet, dass sich auch in der Anschluss- und Verbindungstechnik („Patchfelder“) immer mehr Faserkabel („Patchcords“) einen immer kleineren Platz teilen müssen – was unter anderem zwangsläufig zu kleineren Biegeradien für die Fasern führt.

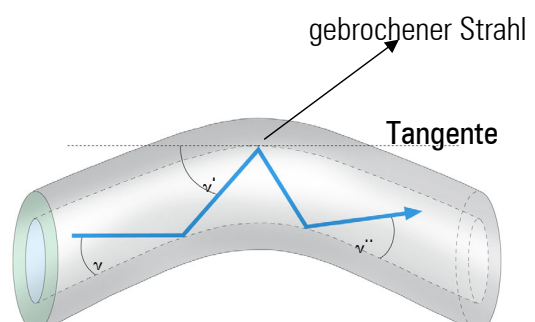
Da für ein gegebenes System die Parameter „Bandbreite“ und „Leistungsbudget“ zusammenhängen, spielt die Gesamtdämpfung der Verbindung eine Rolle. Es gibt Abschätzungen, nach denen die Zusatzdämpfung durch eine Anzahl Faserbiegungen mit kleinen Radien die Bitfehlerrate („BER“) unter ungünstigen Umständen erhöhen kann.

Faserbiegung

Das Prinzip eines Lichtwellenleiters besteht darin, dass der Licht führende Kern eine höhere Brechzahl aufweist als der umgebende Mantel. Aus dieser Brechzahldifferenz ergibt sich wiederum der sogenannte Akzeptanzwinkel, unter dem sich das Licht im Wellenleiter gerade noch einkoppeln und führen lässt. Eine Multimode-Faser führt bei der Betriebswellenlänge ca. 100 Moden ($50\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser), die sich unter anderem aus den verschiedenen Winkeln ergeben unter denen das Licht eingekoppelt wurde.



Was passiert, wenn eine Faser gebogen wird? Sehr vereinfacht dargestellt: Die Faser verliert Energie, die Dämpfung nimmt zu.



Der Grund liegt darin, dass die höheren Moden nicht parallel zur Faserachse geführt werden, sondern unter einem bestimmten Winkel. Wird die Faserachse selbst einem Krümmungswinkel unterworfen, können diese Moden nicht mehr geführt werden und gehen verloren.

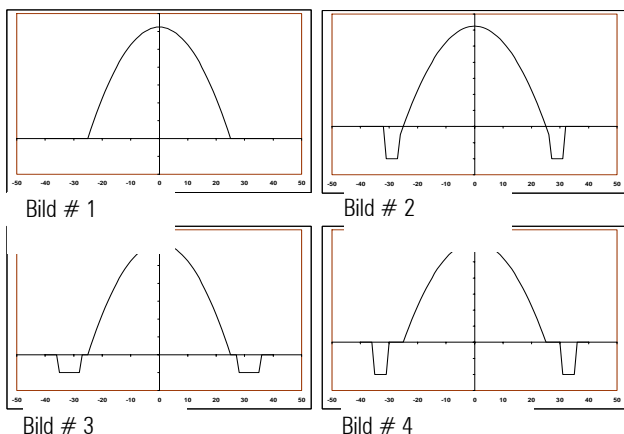
Um diesen Verlust in Grenzen zu halten muss eine „Barriere“ eingebaut werden. Das geschieht, indem man eine Struktur mit verringerter Brechzahl einbaut, damit ein Teil der Moden, die den Kernbereich verlassen haben, die Faser nicht verlassen können.

Üblicher Weise geschieht das durch eine zusätzliche Struktur, einen sogenannten „Graben“ („Trench“), der durch eine Dotierung mit Fluor realisiert wird.

Biege-unempfindliche Fasern (BIMMF)

Diese Überlegungen führten zur Entwicklung der „Bend Insensitive Multimode Fiber“, der biege-unempfindlichen Multimode-Fasern.

Wir haben die zur Zeit am Markt kommerziell verfügbaren Fasern untersucht und verschiedene Design-Variationen zur Umsetzung des beschriebenen Grabenkonzeptes gefunden.



Die erste Abbildung zeigt ein Standard-Gradientenindexprofil, wie es bei allen aktuellen Multimode-Fasern zur Anwendung kommt. Die anderen Abbildungen zeigen die verschiedenen Ausprägungen des implementierten Graben-Designs bei BlmMF.

Bei dieser Auswahl stellt sich natürlich die Frage, wie das jeweilige Faserdesign die Biegeeigenschaften beeinflusst.

Biege-Eigenschaften

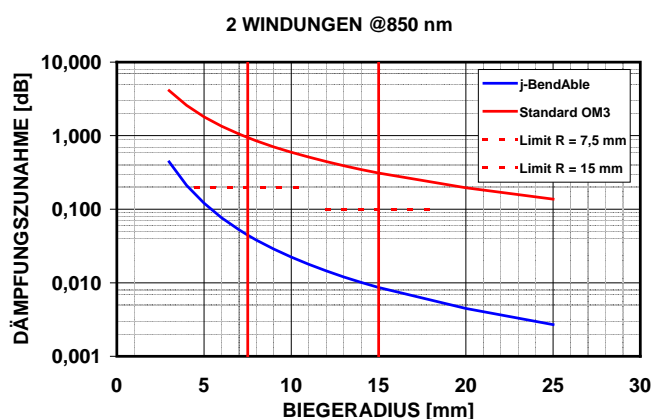
Alle Konzepte verfolgen das Ziel, die Dämpfungsverluste bei Faserbiegungen zu reduzieren.

Um das Verhalten in der Praxis bei Einsatz einer VCSEL als Lichtquelle korrekt wiederzugeben, wird für die Ermittlung der Makrobiegungsdämpfung nicht mehr die überstrahlte Anregung sondern die sogenannte EF – Anregung („Encircled Flux“) eingesetzt, weil sich sonst höhere ergeben.

Die zur Zeit für den Multimode-Standard IEC 60793-2-10 diskutierten Vorgaben sind:

Maximale Makrobiege-Verluste [dB]					
Biegeradius [mm]	Anzahl Windungen	Standard MMF 50 μm		BI-MMF 50 μm	
		850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm
37.5	100	0.5	0.5	nicht definiert	nicht definiert
15	2	1	1	0.1	0.3
7.5	2	nicht definiert	nicht definiert	0.2	0.5

Wir haben für unsere j-BendAble OMx die Funktion „Biegeradius“ vs. „Dämpfungszunahme“ aufgenommen, siehe Abbildung:

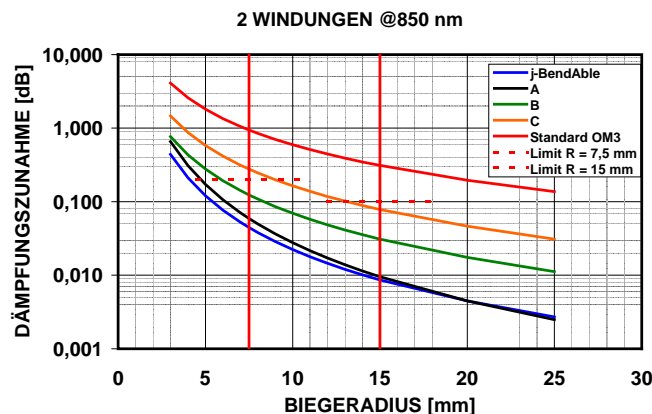


Diese – typische – Grafik zeigt zwei Effekte sehr deutlich:

- j-BendAble OM2/OM3/OM4 zeigt eine um den Faktor 20 geringere Biegedämpfung bei Biegeradien von 7,5 und 15 mm im Vergleich zu einer Standard-Multimode-Faser
- j-BendAble OM2/OM3/OM4 unterschreitet die Vorgaben des Standards um einen Faktor 5 bis 10.

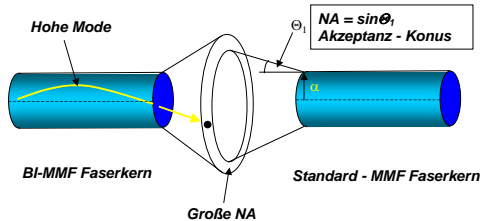
Eine vergleichende Untersuchung wurde mit den zur Zeit am Markt kommerziell erhältlichen BIMMF mit einem recht interessanten Ergebnis durchgeführt:

Die Spanne der Dämpfungszunahmen zwischen den Fasern beträgt durchaus einen Faktor von 10, wobei j-BendAble OM2/OM3/OM4 im Bereich der Klassenbesten ist.

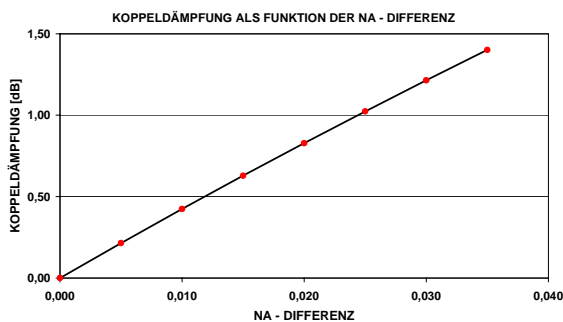


Kompatibilität - Spleißdämpfung

Wenn zwei verschiedene Fasern miteinander durch thermisches Spleißen oder über einen Stecker verbunden werden, sollten die lokalen Kerndurchmesser und Akzeptanzwinkel (Stichwort: Numerische Apertur, *NA*) möglichst ähnlich sein. Ist dies nicht der Fall kann es zu unerwünscht großen Koppeldämpfungen kommen.

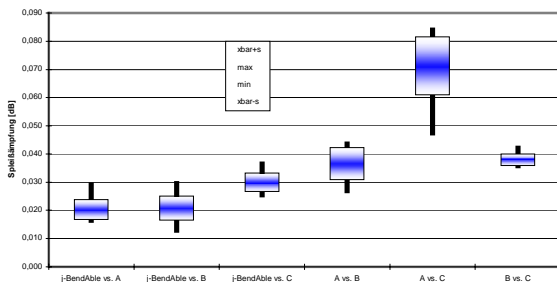
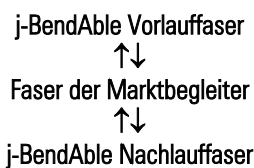


Beim Design der Fasern ist es eine der Vorgaben, den Werten



für den Kerndurchmesser und der *NA* möglichst nahe zu kommen. Dies bedeutet z.B. auch die richtige Wahl der für den Trench geeigneten Position und das geeignete Design im Profil. Die Auswahl dieses Designparameters wirkt sich sehr deutlich auf die Spleißdämpfung aus.

Wir haben entsprechende Messungen zur Spleißdämpfung mit einem OTDR für die folgende Faser-Anordnung durchgeführt.



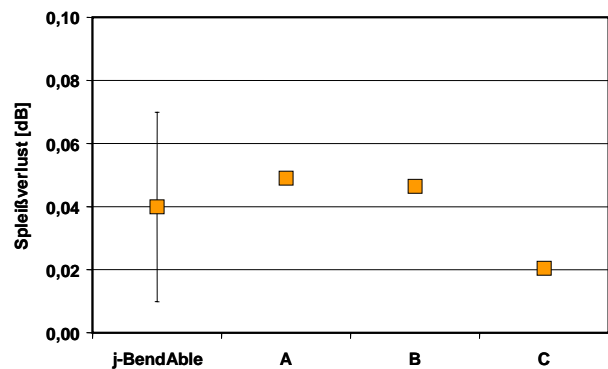
Die Spleißdämpfungen wurde beidseitig gemessen und gemittelt.

Die Versuche wurden mit einem kommerziellen Spleißgerät unter Einsatz des normalen Multimode-Programms durchgeführt.

Dieses Ergebnis liefert zwei Erkenntnisse:

- j-BendAble OM2/OM3/OM4 liefert beim Spleißen mit den Produkten der Marktbegleiter zuverlässig die geringsten Koppeldämpfungen.
- Obwohl die erzielten Dämpfungswerte noch im Toleranzbereich sind, gibt es offensichtlich ungünstige Kombinationen unter den Marktbegleitern.

Ein weiterer Versuch wurde durchgeführt, bei dem die Vor- und Nachlaufänge mit einer j-fiber OptiGrade OM3-Faser (Standard OM3) dargestellt wurde.



Dieser Vergleich zeigt:

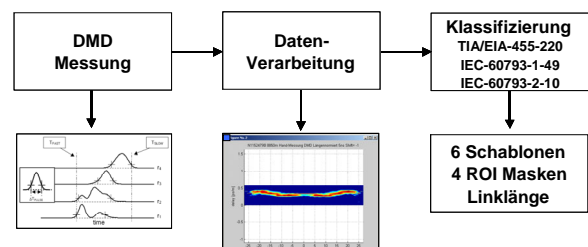
- Innerhalb der Standardabweichung (als Beispiel im ersten Punkt dargestellt) sind die Spleißverluste identisch.

Kompatibilität – Übertragungseigenschaften

Für die Übertragungseigenschaften wesentlich ist die Frage, ob die 10 Gb/s – Linklänge gewährleistet werden kann. Die „klassische“ Bandbreitenmessung wird überwiegend aus Gründen der Rückwärtskompatibilität durchgeführt.

Maßgebend ist aber die sogenannte DMD-Messung („Differential Mode Delay“) und die darauf basierende Bestimmung der OM3-Tauglichkeit mit der Masken-Methode und der berechneten minimalen effektiven Modalen Bandbreite (*minEMBc*).

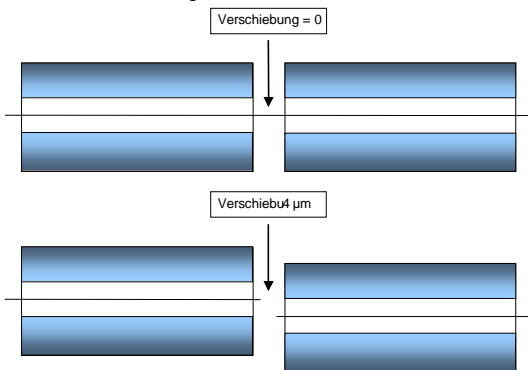
Bei der DMD – Messung wird ein 5 µm großer Lichtfleck in kleinen Schritten über den Kern der Faser geführt und an jeder Position eine Laufzeitmessung durchgeführt. Bewertet werden die Laufzeitunterschiede in bestimmten Bereichen des Kerns.



Wir haben drei Aspekte genauer untersucht:

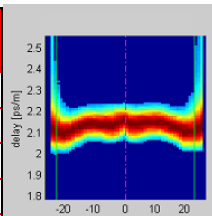
- Wie verhält sich die Übertragungseigenschaft, wenn die Kernmittelpunkte der beteiligten Fasern eine Verschiebung von 0, 2 oder sogar 4 μm aufweisen?
- Wie gut ist die Übertragungseigenschaft bei der Kopplung von j-BendAble OMx mit den BIMMF-Produkten der aktuellen Marktbegleiter unter Berücksichtigung der radialen Verschiebung?
- Was passiert, wenn man eine Strecke von 300 m aus Teilstücken der verschiedenen BIMMF aufbaut?

Radiale Verschiebung:

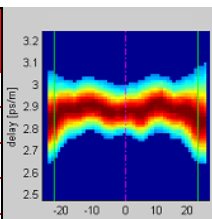


Kopplungstest mit anderen Faser-Marken bei unterschiedlicher radialer Verschiebung

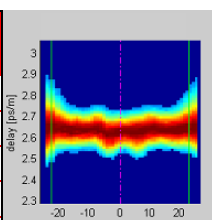
Faser	10Gb/s Linklänge [m]	EMBC [MHz·km]
j-BendAble 1	597	3936
j-BendAble 2	713	5609
Verschiebung 0 μm	689	6281
Verschiebung 2 μm	638	6605
Verschiebung 4 μm	671	6831



Faser	10Gb/s Linklänge [m]	EMBC [MHz·km]
j-BendAble 1	597	3936
Hersteller A	528	4534
Verschiebung 0 μm	669	4561
Verschiebung 2 μm	691	4607
Verschiebung 4 μm	668	4277

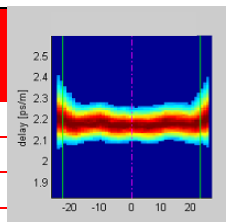


Faser	10Gb/s Linklänge [m]	EMBC [MHz·km]
j-BendAble 1	597	3936
Hersteller B	713	4534
Verschiebung 0 μm	686	5628
Verschiebung 2 μm	675	5102
Verschiebung 4 μm	686	4726



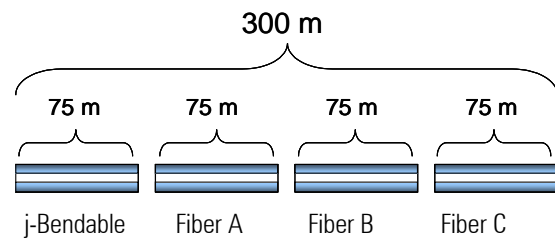
Kernradius [µm]

Faser	10Gb/s Linklänge [m]	EMBC [MHz·km]
j-BendAble 1	597	3936
Hersteller C	705	8185
Verschiebung 0 μm	713	8164
Verschiebung 2 μm	713	9046
Verschiebung 4 μm	713	8422

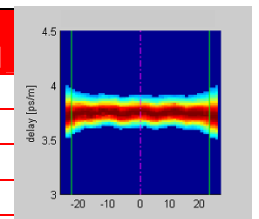


Kernradius [µm]

300 m – Link aus 4 x 75 m Teilstücken von vier Anbietern



Faser	10Gb/s Linklänge [m]	EMBC [MHz·km]
j-BendAble 1	597	3936
Hersteller A	528	4534
Hersteller B	713	8160
Hersteller C	705	8185
Links gesamt	713	8359



Schlussfolgerung aus den Messungen:

- j-BendAble OM3-Faser ist zu allen anderen Fasern kompatibel.
- In allen Fällen ist die Linklänge der kombinierten Fasern gleich oder größer als der kleinste Einzelwert (Stichwort: „Modenmischung“).
- Ähnlich, aber nicht ganz so konsistent verhält es sich mit den EMBC – Werten.
- Selbst bei einer radialen Verschiebung der jeweils gekoppelten Faser werden die Übertragungseigenschaften eingehalten.
- Die Tabelle und die DMD – Grafik zeigen recht deutlich, dass j-BendAble OMx sehr gut mit den anderen Fasern harmoniert. Insgesamt zeigt sich, dass eine zusammengesetzte Verbindung hinsichtlich der OM3-Fähigkeit keine Auffälligkeiten zeigt.

Das im wahrsten Sinne „spannendste“ Thema zum Schluss:

Lebensdauer

Für den potentieller Anwender von BIMMF's ist es natürlich eine essentielle Frage, ob mit von der Optik her möglichen und erlaubten Verringerung der Biegeradien ein neues Risiko auftaucht: **FASERBRÜCHE!**

Die Erfahrungen aus der gar nicht so kurzen Anwendungsdauer von LWL haben gezeigt, dass sich die „Daumenregel“, nach der

man die Faser in der Weiterverarbeitung und Anwendung mit nicht mehr als ca. 1/3 der Niveaus des Durchlauftests („Screenen“) belastet, eigentlich ganz gut bewährt hat.

Tatsache ist, dass seit Einsatz von LWL nur eine sehr geringe Zahl von Faserbrüchen aufgetreten ist, für die keine plausible Erklärung (Überlastung, Handhabung etc.) gefunden werden konnte.

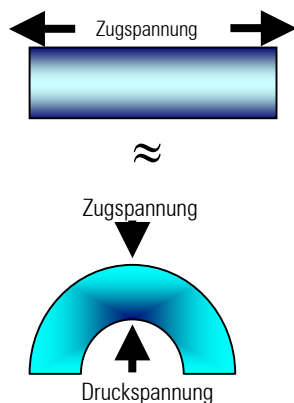
Tatsache ist auch, dass die Fasertension bei dem bisher üblichen Biegeradius von 30 mm noch komfortable 0,15 GPa und somit ca. 20 % der Prüfspannung beträgt. Wenn die Faser einem Biegeradius von 7,5 mm unterworfen ist, steigt die mechanische Spannung aber bereits auf einen Wert von 0,6 GPa, was ca. 85 % der Prüfspannung bedeutet.

Was bedeutet das für die Daumenregel, die sich bisher als guter Anhaltspunkt für die Minimierung des Faserbruchrisikos bewährt hat?

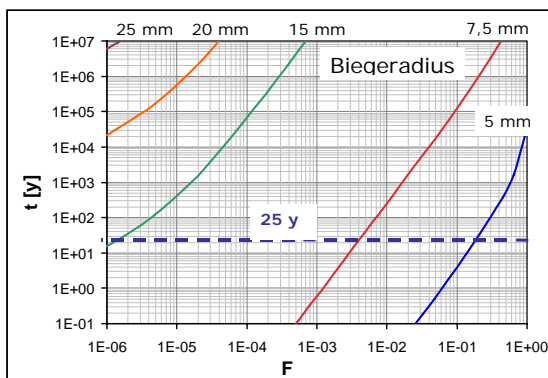
Daumenregel verletzt – was bedeutet das?

Für die Alterung einer Faser unter Spannung gilt die Analogie, dass zwischen Spannung durch Zug und Spannung durch Biegung kein Unterschied besteht.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Faserlänge unter Biegespannung nicht identisch ist mit der Bogenlänge, da über den Faserquerschnitt gesehen ein kleinerer Bereich tatsächlich der Zugspannung ausgesetzt ist. So ist z.B. bei Biegung um 90° mit einem Radius von 7,5 mm die Bogenlänge zwar ca. 12 mm, die äquivalente Länge unter Spannung aber nur ca. 0,5 mm.



Wenn man mit diesen Überlegungen eine Abschätzung der Lebensdauer vornimmt erhält man folgendes Bild:



Die Grafik kann folgendermaßen interpretiert werden:

- Bei einem Biegeradius von 25 mm und größer und einer Faserlänge unter Biegespannung von 1 m ist das Risiko eines Faserbruchs innerhalb von 25 Jahren zu vernachlässigen.
- Bei einem Biegeradius von 7,5 mm und einer Faserlänge unter Biegespannung von 1 m ist das Risiko eines Faserbruchs innerhalb von 25 Jahren in der Größenordnung von 1 Promille.
- Aber: im Fall der unbeabsichtigten Biegung mit einem Radius von 5 mm und bei gleichen Bedingungen wie oben, steigt das Risiko des Faserbruchs innerhalb von 25 Jahren auf nahezu 1%.

Konsequenz: Die Wahrscheinlichkeit eines Faserbruchs in der Anwendung ist nicht mehr „fast Null“, bleibt aber kalkulierbar.

Als Konsequenz dieser Abschätzungen haben wir die Prüfspannung für unser j-BendAble OMx-Datenblatt von 100 auf 200 kpsi (0,69 GPa auf 1,38 GPa) verdoppelt und den n_0 -Wert von ≥ 18 auf ≥ 23 erhöht. Dieser Wert beschreibt die Alterung von Fasern unter Spannung und geht als Exponent in die Berechnungen ein.

Zusammenfassung

Wir haben die wichtigsten Aspekte für die Anwendung von biege-unempfindlichen Multimode-Fasern in der zukunftssicheren Verkabelung untersucht und diskutiert.

j-BendAble OMx setzt diese Aspekte in den folgenden Leistungseigenschaften überzeugend um:

- Geringste Biegedämpfungen, 20 mal besser als Standardfasern, Spitzenplatz innerhalb der Marktbegleiter
- Geringste Spleißdämpfungen, beste Kompatibilität gegenüber BIMMF der Marktbegleiter
- Geringe Spleißdämpfungen, beste Kompatibilität gegenüber Standard – MMF
- Unempfindlich gegenüber radialer Kernverschiebung – wesentlich für Kabelkonfektion
- Volle Kompatibilität für 10 Gb/s – Übertragung gegenüber BIMMF der Marktbegleiter
- Kalkulierbares Ausfallrisiko durch angepassten Prozess mit höherem n_0 Wert und optimiertem Coating-System

Fazit

Es gibt sicherlich eine Reihe guter Gründe, j-BendAble OMx Fasern anderen verfügbaren BIMMF Produkten vorzuziehen.

ⁱ Wolfgang Bludau, Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik, Springer Verlag

ⁱ Intermateability of Bend Insensitive Multimode Fiber with Standard Multimode Fiber

R. Pimpinella, B. Lane, Panduit Laboratories, Panduit Corporation Proceedings of the 59th IWCS, 444 – 450

ⁱ IEC 62048 TR Ed.2

WP-NB-001D-00-1111 Herausgegeben November 2011
Copyright 2011 © j-fiber GmbH nach DIN ISO 16016

Offiziell registrierte Fertigungsstätte nach EWG No. 1221/2009

j-fiber GmbH
Im Semmicht 1
D-07751 Jena, Germany
Tel.: +493641-352100
Fax: +403641-352101
Email: info@j-fiber.com
Internet: www.j-fiber.com