

Fasertypen, Parameter, Anwendungen

Überblick über den aktuellen Stand und Trends bei LWL



(Foto: Leoni Fiber Optics)

Dieter Eberlein

Lichtwellenleiter (LWL) sind aus vielen Anwendungen und Bereichen unseres Lebens nicht mehr wegzudenken. Eine der heutigen großen Herausforderungen hierbei ist der derzeitige Aufbau eines flächendeckenden Glasfasernetzes in Deutschland. Doch welcher Lichtwellenleiter aus der Vielzahl der vorhandenen Fasertypen ist für welche Aufgabe der Richtige?

Der Lichtwellenleiter erschließt immer neue Aufgaben und Lebensbereiche. Das führte zwangsläufig zur Entwicklung neuer bzw. zur Weiterentwicklung vorhandener Fasertypen. Im Folgenden wird ein aktueller Überblick gegeben.

Kunststoff-LWL

Der Kunststoff-LWL (POF – Polymer Optical Fiber, DIN EN 60793-2-40) hat einen Kunststoffkern und -mantel. Der Kern kann ein Stufen-, Multistufen- oder Gradientenindexprofil aufweisen. Die verschiedenen Klassen A4a bis A4h unterscheiden sich dabei bez. ihrer Kerndurchmesser, numerischen Aperturen, Brechzahlprofilen und Wellenlängenbereichen [1].

Die größte Bedeutung hat der Kunststoff-LWL der Kategorie A4a (OP1). Er hat ein Stufenindexprofil, einen Kern-Mantel-Durchmesser von 980/1.000 μm und besteht aus Polymethylmethacrylat. Sein Dämpfungskoeffizient ist mit $\leq 180 \text{ dB/km}$ bei einer Wellenlänge von 650 nm sehr groß, das Bandbreite-Längen-Produkt sehr gering ($\text{BLP} \approx 1 \text{ MHz km}$) – und damit auch die überbrückbare Streckenlänge (ca. 50 m).

Der Kunststoff-LWL wird seit Jahren millionenfach in Pkws eingesetzt. Derzeit werden Möglichkeiten untersucht, ihn in Heimnetzen anzuwenden [2].

Polymer Cladded Fiber (PCF)

Die herkömmliche PCF-Faser (DIN EN 60793-2-30) hat einen Kern aus reinem Quarzglas und einen harten polymeren Mantel. Der besondere Vorteil dieses LWL-Typs ist, dass eine einfache Steckerkonfektionierung im

Feld per Crimp & Cleave möglich ist. Der Kern-Mantel-Durchmesser liegt typisch bei 200/230 μm (Glas/Polymer) und entspricht der Klasse A3c bzw. A3d (OH1).

Der Dämpfungskoeffizient bei den Wellenlängen 650 nm bzw. 850 nm ist $< 10 \text{ dB/km}$. Wegen der großen Dämpfung des polymeren Mantels bei 1.300 nm ist die herkömmliche PCF für diesen Wellenlängenbereich nicht geeignet.

Das Bandbreite-Längen-Produkt beträgt $\approx 20 \text{ MHz km}$. Im Vergleich zum Kunststoff-LWL sind deutlich größere Streckenlängen überbrückbar.

Eine Weiterentwicklung sind PCF-LWL mit kleinerem Kerndurchmesser. Sie wurden allerdings noch nicht bei der IEC standardisiert:

- Durchmesser 62,5/200/230 μm (Glas/Glas/Polymer);
- Durchmesser 50/200/230 μm (Glas/Glas/Polymer).

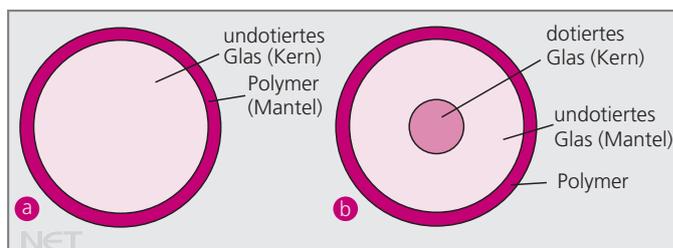


Bild 1: PCF-Lichtwellenleiter: 200- μm - (a) und 62,5- μm -Durchmesser (b)

Bei diesem Aufbau wirkt das Polymer nicht mehr als optischer Mantel, sondern hat nur noch die Funktion, den LWL mechanisch zu schützen. Das ermöglicht eine Übertragung auch bei 1.300 nm. Der Kerndurchmesser ist dotiert (Parabelprofil), der Manteldurchmesser undotiert (reines Quarzglas mit Durchmesser 200 μm). Bild 1 zeigt die Unterschiede zwischen den verschiedenen PCF-Typen.

PCF-LWL werden von Laser Components vertrieben. Die Fasern entsprechend Bild 1b haben die gleichen optischen Eigenschaften wie herkömmliche Gradientenprofil-LWL, die in der

Dr. Dieter Eberlein ist als Referent, Berater und Gutachter auf dem Gebiet der Lichtwellenleitertechnik tätig

Telekommunikation zum Einsatz kommen (Tabelle 1). Der einzige Unterschied ist der Durchmesser des Glasmantels (200 µm bzw. 125 µm). Die überbrückbaren Streckenlängen können bei Verwendung geeigneter aktiver Technik und in Abhängigkeit von der Datenrate einige tausend Meter betragen.

Telekommunikations-LWL

Zu den Telekommunikations-LWL zählen die Multimode-LWL mit 50 µm oder 62,5 µm Kerndurchmesser sowie die Singlemode-LWL. Sie haben einen Glaskern mit unterschiedlichen Durchmessern und Brechzahlprofilen sowie einen Glasmantel mit einem Durchmesser von 125 µm. Das Glas wird mechanisch durch ein Kunststoffmaterial (Coating) mit einem Durchmesser von ≈ 250 µm geschützt.

Gradientenindexprofil-LWL

Der Gradientenindexprofil-LWL (DIN EN 60793-2-10) ist für den Einsatz in lokalen Netzen geeignet. Er hat ein parabelförmiges Brechzahlprofil im Bereich des Kernes. Die größte praktische Bedeutung haben LWL mit einem Kerndurchmesser von 50 µm (Einsatz bevorzugt in Europa) bzw. 62,5 µm (Einsatz bevorzugt in den USA) erlangt. Für hochbitratige Anwendungen wie 1-, 10-, 40- und 100-Gigabit-Ethernet (GE) wurden das

Brechzahlprofil optimiert sowie das Bandbreite-Längen-Produkt erhöht. Herkömmliche Parabelprofil-LWL werden mit einer Lumineszenzdiode angeregt (OFL – Overfilled Launch). Das Ergebnis ist das herkömmliche Bandbreite-Längen-Produkt oder die sogenannte OFL-Bandbreite.

Kategorien (OM – Optical Mode) unter dem Gesichtspunkt der Bandbreite im ersten optischen Fenster (Tabelle 2). Für höhere Datenraten sind nur noch die 50-µm-Parabelindexprofil-LWL geeignet.

Zum Erzielen einer großen modalen Bandbreite wird die Modendispersion

Wellenlänge	62,5-µm-LWL		50-µm-LWL	
	850 nm	1300 nm	850 nm	1300 nm
Dämpfungskoeffizient	≈ 3 dB/km	≈ 1 dB/km	≈ 2,4 dB/km	≈ 0,8 dB/km
Bandbreite-Längen-Produkt	≥ 200 MHz·km	≥ 500 MHz·km	≥ 500 MHz·km	≥ 500 MHz·km

Tabelle 1: Typische Parameter des 62,5- und des 50-µm-Lichtwellenleiters

Kategorie	Kerndurchmesser	modale Bandbreite in MHz·km			Streckenlänge bei	
		Vollanregung		Laseranregung	10 GE	40 GE/100 GE
		850 nm	1.300 nm	850 nm	850 nm	850 nm
OM1	50 oder 62,5 µm	≥ 200	≥ 500	nicht festgelegt	32 m	-
OM2	50 oder 62,5 µm	≥ 500	≥ 500	nicht festgelegt	82 m	-
OM3	50 µm	≥ 1.500	≥ 500	≥ 2.000	300 m	100 m
OM4	50 µm	≥ 3.500	≥ 500	≥ 4.700	550 m	150 m

Tabelle 2: Definition der OM-Kategorien

Datenraten ab 1 Gbit/s können mit Lumineszenzdiode nicht mehr moduliert werden. Hierfür sind Laserdioden erforderlich, die bei der Einkopplung von Licht nicht mehr den Kern überstrahlen, sondern nur eine kleine Fläche sowie einen kleinen Winkelbereich beleuchten. Diese begrenzte Laseranregung äußert sich in der effektiven modalen Bandbreite (EMB). Bei brechzahloptimierten Multimode-LWL unterscheidet man zwischen Voll- (LED) und Laseranregung. Die Norm EN 50173-1 definiert unterschiedliche

minimiert. In Abhängigkeit von der spektralen Halbwertsbreite des Senders verursacht aber auch die Materialdispersion eine Impulsverbreiterung. Diese ergibt sich aus den verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten der einzelnen Wellenlängenanteile.

Die guten modalen Bandbreite-Längen-Produkte der OM3- und OM4-Fasern kommen nur zum Tragen, wenn der LWL mit einer spektral schmalbandigen Quelle angeregt wird. Zum Einsatz kommen VCSEL (Vertical

Cavity Surface Emitting Laser), die wenige schmalbandige Moden im Wellenlängenbereich um die 850 nm emittieren. Für diesen Wellenlängenbereich wurde die modale Bandbreite der Faser optimiert.

Unter Berücksichtigung der spektralen Eigenschaften der VCSEL-Sender hat die Prysmian Group die Brechzahlprofile der Fasern weiter optimiert, wobei die Materialdispersion kompensiert wird (MaxCap-BB-OM4-Plus). Für diese Fasern wurde mit der effektiven Bandbreite (EB) bei Laseranregung ein neuer Parameter definiert [3]. Er beinhaltet sowohl die Eigenschaften der Faser (modale Bandbreite) als auch die des Senders. Folgende Werte wurden erzielt:

- effektive Bandbreite bei Laseranregung: 5.000 MHz km;
- Streckenlänge bei 10GE: 600 m.

Die 40/100-GE-Übertragung über Multimode-LWL erfolgt mit Raummultiplex: Jeweils 10 Gbit/s werden über vier bzw. zehn Fasern parallel übertragen und im Empfänger wieder zusammengefügt. Begrenzend wirken hier mögliche Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Fasern. Die Streckenlängen sind begrenzt auf 100 m (OM3) bzw. 150 m (OM4).

Biegeunempfindliche Multimode-LWL
Multimode-LWL sind wie Singlemode-LWL biegeempfindlich, können aber sehr engen Biegungen ausgesetzt sein. Bei hohen Datenraten sind kleinste Verluste durch zu enge Biegungen zu vermeiden, da das verfügbare Dämpfungsbudget sehr gering ist. OM2-, OM3- und OM4-Fasern gibt es auch als „biegeunempfindliche“ Versionen. Diese Eigenschaft kann man beispielsweise durch einen „Brechzahlgraben“ im inneren Bereich des

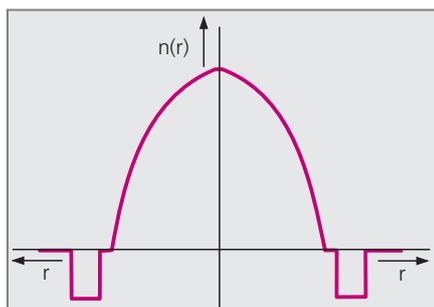


Bild 2: Absenkung der Brechzahl im inneren Bereich des Mantels

Mantels per Dotierung mit Fluor erreichen (Bild 2).

Entsprechende Produkte bieten die Prysmian Group und j-Faser unter dem Namen MaxCap-BB bzw. j-Bend-Able an [4]. Sie sind mit der herkömmlichen Multimode-Faser in Bezug auf Spleißdämpfungen und Übertragungseigenschaften kompatibel. Tabelle 3 zeigt die Dämpfungen bei Biegungen.

Tabelle 3: Dämpfung bei Biegung der BI-MMF

Biegeradius	Anzahl der Windungen	850 nm	1.300 nm
15,0 mm	2	0,1 dB	0,3 dB
7,5 mm	2	0,2 dB	0,3 dB

Singlemode-LWL

Bei höheren Anforderungen kommen Singlemode-LWL zum Einsatz. Sie weisen einen geringeren Dämpfungskoeffizienten als Multimode-Fasern auf und bewirken eine wesentlich geringere

Bild 3: Fasern mit ColorLock-XS-Einfärbung



(Foto: Prysmian Group)

ere Dispersion. So können hohe Datenraten über große Strecken übertragen werden.

Im Lauf der Jahre wurden verschiedene Singlemode-Fasertypen spezifiziert:

- ITU-T G.652: Standard-Singlemode-LWL;
- ITU-T G.653: dispersionsverschobener Singlemode-LWL;
- ITU-T G.654: LWL mit verschobener Grenzwellenlänge;
- ITU-T G.655: dispersionsverschobener LWL mit nicht verschwindender Dispersion;
- ITU-T G.656: dispersionsverschobener LWL mit nicht verschwindender Dispersion im erweiterten Wellenlängenbereich;
- ITU-T G.657: krümmungsunempfindlicher LWL.

Um die verschiedenen Fasern im Röhrchen zu unterscheiden, werden sie eingefärbt. Die meisten Faserher-

steller bringen dazu nach dem Faserziehprozess eine dünne Farbschicht (wenige Mikrometer) auf das Coating auf.

Die Prysmian Group beansprucht für sich die besonderen Vorteile des ColorLock-XS-Coatings. Dieses besteht aus zwei Schichten mit unterschiedlichen Elastizitätsmodulen, die während des Ziehprozesses aufgebracht werden. Die innere Beschichtung mit

niedrigem Elastizitätsmodul bietet einen Schutz der Faser ohne Beeinflussung der Mikrobiegeempfindlichkeit bei gleichzeitig guten Abisoliereigenschaften.

Die äußere Beschichtung mit höherem Elastizitätsmodul ist eingefärbt und

schützt die Faser vor mechanischen Beschädigungen. Die Farben des Zwei-Schicht-Coating sind kräftig und langzeitstabil. Die farblich gekennzeichneten Fasern können auch bei schlechten Lichtverhältnissen gut unterschieden werden (Bild 3).

Standard-Singlemode-LWL

Der Standard-Singlemode-LWL (ITU-T G.652) ist seit 1979 im Einsatz und hat die größte Verbreitung gefunden. Mittlerweile unterscheidet man die vier Unterklassen A, B, C und D.

Die beste Qualität hat die Klasse D:

- minimierter Wasser-Peak: Der Dämpfungskoeffizient zwischen dem zweiten und dritten optischen Fenster wird so stark reduziert, dass dieser Wellenlängenbereich auch genutzt werden kann. Das ermöglicht eine Erhöhung der Übertragungskapazität des LWL durch

gleichzeitige Übertragung vieler Wellenlängen in einem großen Wellenlängenbereich.

- minimierter PMD-Koeffizient: Dieser Parameter beschreibt, wie groß die Polarisationsmodendispersion (PMD) des LWL ist. Das ist eine Art der Dispersion, die im Singlemode-LWL bei hohen Datenraten eine Rolle spielen kann. Bei kleinem PMD-Koeffizienten können hohe Datenraten über große Strecken übertragen werden.

Der Lichtwellenleiter ist eine sehr langfristige Investition. Bei ordnungsgemäßer Installation und Handhabung kann er mindestens 30 Jahre genutzt werden. Während seiner Lebensdauer erfolgen mehrere System-Upgrades. Zudem muss der LWL auch für zukünftige Bedürfnisse ausgelegt sein.

Entscheidet man sich für einen Standard-Singlemode-LWL, ist unbedingt ein Lichtwellenleiter der G.652.D-Klasse zu wählen. Er ermöglicht in Verbindung mit geeigneter aktiver Technik die größtmögliche Übertragungskapazität.

Bei der Bestellung des Kabels ist es aber nicht ausreichend, eine Faser entsprechend G.652.D zu fordern, da die Norm die Parameter relativ großzügig spezifiziert. Statt dessen sind Parameter entsprechend der Datenblätter geeigneter Firmen zu fordern. Namhafte Anbieter fertigen Fasern mit Parametern, die deutlich besser als die der Norm sind. Ein etwas erhöhter Faserpreis sollte in Kauf genommen werden. In Bezug auf den Kabelpreis wirkt sich eine höherwertige Faser nur minimal aus.

Als Beispiel sei die Faser SMF-28e+ LL von Corning genannt. Sie übertrifft deutlich die Norm G.652.D hinsichtlich des Dämpfungskoeffizienten und des PMD-Konstruktionswertes (PMD-Koeffizient bezogen auf eine lange Strecke), *Tabelle 4*.

Die in *Tabelle 5* angegebenen Längen beziehen sich auf die herkömmliche NRZ-Modulation (NRZ – Non Return to Zero). Es ist ersichtlich, dass mit der SMF-28e+LL-Faser auch bei Datenübertragungsraten von 100 Gbit/s noch sehr große Strecken überbrückt werden können.

Dämpfungskoeffizient bei	G.652.D	SMF-28e+ LL
1.310 nm	≤ 0,4 dB/km	≤ 0,32 dB/km
1.383 nm ± 3 nm	≤ 0,4 dB/km	≤ 0,32 dB/km
1.490 nm	-	≤ 0,21 dB/km
1.550 nm	≤ 0,3 dB/km	≤ 0,18 dB/km
1.625 nm	≤ 0,4 dB/km	≤ 0,20 dB/km

Tabelle 4: Vergleich der Dämpfungskoeffizienten

Längenbegrenzung bei	PMD-Konstruktionswert	
	G.652.D: $PMD_Q \leq 0,20 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$	SMF-28e+ LL: $PMD_Q \leq 0,04 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
10 Gbit/s	2.500 km	62.500 km
40 Gbit/s	156 km	3.906 km
100 Gbit/s	25 km	625 km

Tabelle 5: Längenbegrenzungen durch Polarisationsmodendispersion

Dispersionsverschobener Singlemode-LWL

Bei diesem Lichtwellenleiter (ITU-T G.653) wurde der Dispersionsnulldurchgang vom zweiten in das dritte optische Fenster verschoben. Die chromatische Dispersion im dritten optischen Fenster ist deutlich geringer als im Standard-Singlemode-LWL. Aufgrund der Gefahr der Vierwellenmischung bei der Übertragung von DWDM-Signalen hat dieser LWL heute keine große Bedeutung mehr.

LWL mit verschobener Grenzwellenlänge

Diese Faser (ITU-T G.654) wurde für die Langstreckenübertragung entwickelt, zum Beispiel für Unterwasseranwendungen. Der LWL-Kern besteht aus reinem Quarzglas und ermöglicht so besonders geringe Dämpfungskoeffizienten.

Dispersionsverschobener LWL mit nicht verschwindender Dispersion

Dieser Lichtwellenleiter (ITU-T G.655 und ITU-T.G.656) wurde für die DWDM-Übertragung mit dem Ziel entwickelt, die Vierwellenmischung zu unterdrücken. Der G.655-LWL wurde für das C-Band, der G.656-LWL für das S-, C- und L-Band optimiert.

Biegeunempfindlicher Singlemode-LWL

Dieser Lichtwellenleiter (ITU-T G.657) hat in den letzten Jahren in Verbindung mit FTTx-Projekten eine große Bedeutung erlangt. Zur Verringerung des Platzbedarfs müssen Fasern bzw. Kabel in engen Biegeradien geführt werden. So können die Abmessungen beispielsweise der Anschlussboxen reduziert und Kosten gespart werden. Wegen der kleinen Biegeradien können die Fasern/Kabel im Haus bzw. in der Wohnung unauffällig verlegt werden. Die Biegeempfindlichkeit wird durch Modifikation des Brechzahlprofils reduziert. Damit wird erreicht, dass das Licht im LWL-Kern gefangen bleibt.

Man unterscheidet zwei Klassen:

- Klasse A: erfüllt die G.652.D-Norm;
- Klasse B: erfüllt nicht notwendigerweise die G.652.D-Norm.

Bei Fasermischungen z.B. am Haus- oder Wohnungsübergabepunkt treten minimale Dämpfungen und nur kleine Stufen im Rückstreuendiagramm auf, wenn man den G.657.A-LWL verwendet. Darüber hinaus gibt es im Allgemeinen keine Spleißprobleme. Daher ist der G.657.A-LWL unbedingt dem G.657.B-LWL vorzuziehen.

Folgende Unterklassen werden unterschieden:

- Klasse A1: spezifiziert für minimale Biegeradien 10 mm;
- Klassen A2 und B2: spezifiziert für minimale Biegeradien 7,5 mm;
- Klasse B3: spezifiziert für minimale Biegeradien 5 mm.

Man beachte, dass sich diese Spezifikationen nur auf die Eigenschaft „minimale Dämpfung“ beziehen. Im Allgemeinen ist die mechanische Festigkeit nicht größer als die von Standard-Singlemode-LWL (100 KPSI = 0,69 GPa).

Zu geringe Biegeradien führen zur übermäßigen mechanischen Beanspruchung der Faser, beeinträchtigen deren Lebensdauer und sind zu vermeiden. Eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10^{-6} in 20 Jahren (typische Anforderung im Weitverkehr) ist gewährleistet, wenn Krümmungsradien von 15 mm nicht unterschritten werden. Diese Forderung wird auch in [5] formuliert.

Im Zugangsbereich werden meist höhere Ausfallraten zugelassen. Dann kann man auch kleinere Krümmungsradien akzeptieren.

Bild 4 zeigt eine kaum sichtbare Leitung, die an der Stuckleiste angeklebt ist. Sie enthält die EZ-Bend-InvisiLight-Faser, die um eine Ecke geführt wird.



Bild 4: Leitung mit biegeunempfindlichem Lichtwellenleiter (Foto: OFS)



Bild 5: G.657-Lichtwellenleiter im Einsatz (Foto: Telegärtner)

Damit kontrollierte Biegeradien vorliegen, die 5 mm nicht unterschreiten, werden sogenannte Biegebegrenzer eingesetzt. Die Faser entspricht hinsichtlich Biegeempfindlichkeit der Klasse G.657.B3 (Bild 5). Darüber hinaus erfüllt sie die Anforderungen der G.652.D, außer in Bezug auf die Dispersion. EZ-Bend InvisiLight kann problemlos mit der G.652.D-Faser verspleißt werden.

Zusammenfassung

Obwohl erste Lichtwellenleiter mit guten Eigenschaften bereits vor über 40 Jahren auf den Markt kamen, ist ihre Entwicklung noch nicht abgeschlossen. Neue Forderungen des Marktes führen zu neuen Produkten:

- Die Minimierung des Wasser-Peak führte zum Low-Water-Peak-LWL (G.652.C bzw. D).

- Die Minimierung der Biegeempfindlichkeit führte zum biegeunempfindlichen Multi- bzw. Singlemode-LWL (G.657).
- Zur Erhöhung der Packungsdichte der Fasern im Kabel wird der Durchmesser des Coating von 250 µm auf 200 µm reduziert. Neben OFS wurden derartige Fasern bereits 2010 von der Prysmian Group (Draka) als G.657.A2-Fasern mit dem Markennamen BendBright-XS-200 eingeführt.

Darüber hinaus werden bei der Übertragung über einen Singlemode-LWL immer neue Wellenlängenbereiche erschlossen, für die die Faser gute optische Eigenschaften haben muss:

- grobes Wellenlängenmultiplex (CWDM): 1.271 nm – 1.611 nm;
- dichtes Wellenlängenmultiplex (DWDM): C-Band (1.530 nm – 1.565 nm); L-Band (1.565 nm – 1.610 nm);
- Nennwellenlänge zweites optisches Fenster: 1.310 nm;
- Nennwellenlänge drittes optisches Fenster: 1.550 nm;
- Wellenlänge für Faserüberwachung: 1.625 nm – 1.675 nm;
- Wellenlänge des Wasser-Peak: 1.383 nm;
- weitere Wellenlängenbereiche in Verbindung mit FTTx: 1.260 nm – 1.280 nm, 1.575 nm – 1.580 nm, 1.600 nm – 1.620 nm.

Trotz der großen Vielfalt an Lichtwellenleiter-Typen hat der Standard-Singlemode-LWL (G.652) nach wie vor die größte Bedeutung. (bk)

Literatur

- [1] Ziemann, O.; Krauser, J.; Zamzow, P.E., W.: POF-Handbuch – Optische Kurzstrecken-Übertragungssysteme. 2. Auflage, Springer-Verlag 2007
- [2] Bluschke, A.; Kragl, H.; Matthews, M.; Rietzsch, P.: PON für Heimnetze auf der Basis von POF. 19. ITG-Fachtagung Kommunikationsskabelnetze; 11.-12.12.2012; VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, Seite 165-169
- [3] Molin, M.; Bigot-Astruc, M.; Sillard, P.: Chromatic Dispersion Compensated Multimode Fibers for Data Communications Prysmian/Draka Communications 2012
- [4] WP-NB-001D-00-1111: j-BendAble – Die kompatiblen biegeunempfindlichen OM2/OM3/OM4-Fasern. j-fiber GmbH, November 2011
- [5] FTTH Handbook, Edition 5, D&O Committee, 06/02/2012