

Whitepaper



Die Wahrheit über biegeunempfindliche Multimode-Fasern



Convincing cabling solutions

Die Wahrheit über biegeunempfindliche Multimode-Fasern

Inhalt

Management-Zusammenfassung.....	3
Einführung.....	4
Kritikpunkt 1: Der Kern einer BIMM-Glasfaser besitzt einen abweichenden Aufbau.....	5
Kritikpunkt 2: BIMMF führen zu NA Verlusten.....	7
Kritikpunkt 3: Zwischen BIMMF und MMF kommt es zu Kompatibilitätsproblemen.....	9
Kritikpunkt 4: BIMMF beeinträchtigen die Systemperformance.....	10
Referenzen.....	15

© Copyright 2011 Reichle & De-Massari AG (R&M). Alle Rechte vorbehalten.

Die Weitergabe oder Reproduktion dieses Dokuments – auch auszugsweise und egal, aus welchem Grund – ist nur nach ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung durch Reichle & De Massari AG gestattet. Die in dieser Publikation enthaltenen Informationen können sich ohne vorherige Ankündigung ändern. Dieses Dokument wurde mit grösstmöglicher Sorgfalt zusammengestellt und entspricht dem zum Zeitpunkt der Erstellung geltenden Stand der Technik.

Management-Zusammenfassung

Kritikpunkt 1: Der Kern einer BIMM-Glasfaser besitzt ein abweichendes Design.

Die Wahrheit: Die von R&M angebotenen BIMMF besitzen einen Kern mit dem gleichen Gradientenindexprofil wie MM-Fasern (also die gleiche Differenz Δ des nominalen Brechungsindex und den gleichen Kerndurchmesser). Der einzige Unterschied besteht in einem Ring um den Kern mit kleinem Brechungsindex, der engere Biegungen ohne eine Vergrößerung der Verluste ermöglicht.

Kritikpunkt 2: BIMMF führen zu NA Verlusten.

Die Wahrheit: An Verbindungsstellen von MM- und BIMM-Fasern sind keine grösseren Verbindungsverluste zu erwarten als bei homogenen Faserverbindungen, da die Kerne beider Glasfaserarten das gleiche Indexprofil besitzen.

Kritikpunkt 3: Zwischen BIMMF und MMF kommt es zu Kompatibilitätsproblemen.

Die Wahrheit: Zunächst einmal hat das Verbinden unterschiedlicher Glasfasertypen keinen entscheidenden Einfluss auf die zu erwartenden Verbindungsverluste. BIMMF und MMF können daher innerhalb eines optischen Kanals einfach gemischt werden, ohne die Abschätzung der Dämpfung zu verkomplizieren. Zweitens können bei BIMMF grössere Toleranzen durch mögliche Fehlausrichtungen bei geschlossener Verbindung zulässig sein. Dies bedeutet in 40- und 100-Gigabit-Anwendungen einen zusätzlichen Vorteil, da die Auswirkungen auf das Leistungsbudget hier zu einem wichtigen Thema werden.

Kritikpunkt 4: BIMMF beeinträchtigen die Systemperformance.

Die Wahrheit: BIMMF beeinträchtigen die Systemperformance nicht. Sie führen nicht zu höherer Modendispersion. Es gibt also weder höhere Power Penalties im Vergleich zu MMF noch eine „Schulter“ im Verlauf der Bitfehlerrate. Dies wird durch die Messergebnisse der Bitfehlerrate bei 40 Gb/s sehr deutlich.

Schlussfolgerung

Es gibt viele Arten, wie Kabel in einem Data Center zusammengepresst oder eingeklemmt werden können. Die Doppelböden und Kabelkanäle in Data Center können schnell mit neuen Kabeln überfüllt werden, wenn Links zum Netzwerk hinzugefügt werden. Ausserdem können die Kabel im Rack auch bei gutem Kabelmanagement mit engeren Biegungen verlegt werden als für MMF vorgeschrieben. Biegeunempfindliche Multimode-Fasern bieten hier zusätzliche Sicherheit, da sie die radiusabhängige Dämpfung minimieren.

Unsere eigenen Tests wie auch die Erfahrungen unserer Kunden zeigen, dass es bei gemeinsamer Verwendung von R&M-Verkabelungen mit biegeunempfindlichen Multimode-Fasern und normalen, normgerechten Multimode-Fasern beliebiger Hersteller zu keinerlei Problemen kommt. BIMMF können daher dazu beitragen, typische Probleme in Data Centern, wie zusammengepresste Kabel, zu entschärfen. Sie sind dabei mindestens so leistungsfähig wie klassische OM3- und OM4-Glasfasern.

Einführung

Optische Kommunikationssysteme auf Basis von Multimode-Glasfasern (MMF) sind eine gut etablierte Technologie für die Verkabelung von Data Centern. Die bereits heute erheblichen Umsätze werden in den kommenden Jahren voraussichtlich weiter wachsen. Obwohl sie teurer sind als Singlemode-Fasern, sind MMF-Verkabelungen wegen der erheblich geringeren Transceiver-Kosten und der wegen des grösseren Kerndurchmessers geringeren Anschlussstoleranzen sehr attraktiv.

Die Entwicklung schneller optischer Komponenten für Local und Storage Area Networks wird insbesondere durch den ständig wachsenden Bedarf an höheren Übertragungsraten in Data Centern vorangetrieben. Die entsprechenden, räumlich begrenzten Netzwerke basieren traditionell auf MMF, 850-nm-VCSELs und GaAs-PIN-Fotodioden. Sie werden derzeit mit 10 Gb/s oder mehr betrieben. Zu den wichtigsten Fortschritten der Netzwerktechnik gehörte im vergangenen Jahr die Fertigstellung des Standards IEEE 802.3ba für 40- und 100-Gigabit-Ethernet (GbE) [1]. Diese Norm spezifiziert Anwendungen für 40GBASE-SR4 und 100GBASE-SR10 im Raummultiplexverfahren mit Datenraten von 40 Gb/s und 100 Gb/s auf Grundlage paralleler optischer Übertragung mit 10 Gb/s pro Faser. Der neue IEEE-Zusatz spezifiziert je nach eingesetztem Fasertyp Übertragungen bis 100 m über OM3-Glasfaser und bis 150 m über OM4-Faser. Die IEEE arbeitet darüber hinaus an der Standardisierung von 100 GbE über vier parallele Glasfasern mit Datenraten von 25 Gb/s pro Faser [2].

Seit einigen Monaten erregen biegeunempfindliche Multimode-Glasfasern (BIMMF) wegen angeblicher Verbindungsprobleme aufgrund ihres den Faserkern umgebenden „Grabens“ mit geringem Brechungsindex (Trench) erhebliches Interesse in der Verkabelungsbranche. Bei Anschluss an MMF soll es zu einer Diskrepanz der Numerischen Apertur (NA) und des Kerndurchmessers (CD) kommen. Es gibt Berichte, laut denen BIMMF die Einfügedämpfung in optischen Anschlüssen bei Verbindungen mit um einen Mandrel gewundener MMF erhöhen [3]. Andere Hersteller äussern Bedenken hinsichtlich einer Verschlechterung der Systemperformance bei Einsatz von BIMMF [4]. Und sogar im Normungsgremium wird über BIMM-Glasfasern gestritten. Im Grunde geht es bei dieser Debatte jedoch darum, die optischen Eigenschaften getestet werden können und in welchem Zusammenhang die Ergebnisse mit dem tatsächlichen Systemverhalten stehen.

Es kommt darauf an, die Komplexität des Problems korrekter Messungen zu erkennen und das Verhalten von Verbindungen zwischen MMF und BIMMF sowie deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einer Übertragungsstrecke und die entsprechende Bitfehlerrate (BER) sorgfältig zu untersuchen. Das vorliegende Dokument liefert experimentelle Daten und eine detaillierte Analyse der physischen Probleme in einer Verkabelungs-Infrastruktur mit Übertragungsstrecken, in denen sowohl MMF- als auch BIMMF-Kabel eingesetzt werden. Die Studie untersucht das Verhalten parallel-optischer Systeme mit 40 Gb/s. Dabei wird die BER bei Verwendung handelsüblicher Transceiver-Module sowie von R&M-Steckverbindern und -Glasfasern gemessen.

Anwendung:	Verkabelung für Data Center, 10- und 40-/100-Gigabit-Ethernet
Technologie:	Multimode-Glasfaserverkabelung
Format:	Whitepaper
Themen:	biegeunempfindliche Multimode-Faser, Multimode-Faser, Bitfehlerrate
Ziel:	Orientierung der Leser betreffend die Technologie biegeunempfindlicher Multimode-Fasern und Informieren über Qualitäts- und Leistungskriterien
Zielpublikum:	Netzwerkmanager und Installateure von Data Centern
Verfasser:	Dr. Thomas Wellinger
Veröffentlicht:	Dezember 2011

Kritikpunkt 1: Der Kern einer BIMM-Glasfaser besitzt einen abweichenden Aufbau.

Multimode-Glasfasern besitzen eine im Vergleich zu Singlemode-Fasern sehr eingeschränkte Bandbreite. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass sich das Licht auf verschiedenen Wegen ausbreitet und in allen erregten Moden unterschiedliche Gruppenlaufzeiten auftreten. Die elektromagnetischen Eigenschaften des Wellenleiters werden einzig und allein durch das Brechungsindexprofil des Faserkerns bestimmt. Um die unterschiedlichen Gruppenlaufzeiten der verschiedenen Moden zu kompensieren, besitzen Multimode-Fasern einen Kern mit Gradientenindexprofil, wie in Abbildung 1 gezeigt.

Die Wellenleitung in Glasfasern beruht auf der internen Totalreflexion. Dies ist ein optischer Effekt, der auftritt, wenn ein Lichtstrahl in einem grösseren als dem kritischen Winkel zur Senkrechten auf eine Grenzfläche zwischen zwei optischen Medien trifft. Ist der Brechungsindex auf der anderen Seite der Grenzfläche geringer und trifft das Licht in einem grösseren an dem kritischen Winkel auf, wird es reflektiert. Dabei ist wichtig zu wissen, dass der kritische Winkel selbst auf den unterschiedlichen Brechungsindizes der beiden Materialien beruht. Je grösser dieser Unterschied, desto kleiner der kritische Winkel.

Diese interne Totalreflexion tritt nur auf, wenn sich das Licht aus einem Medium mit höherem Brechungsindex in Richtung eines Mediums mit geringerem Brechungsindex bewegt. Ist dies nicht der Fall, wird ein Teil des Lichts gebrochen und tritt in das Medium auf der gegenüberliegenden Seite der Grenzfläche ein. Die optische Struktur einer Glasfaser basiert auf einem Material mit hohem Brechungsindex, das von Material mit kleinerem Brechungsindex umgeben ist. Das Licht wird also unter Ausnutzung der internen Totalreflexion im optisch dichteren Kern eingeschlossen und die Faser entlang geführt.

Multimode-Glasfasern sind in ISO/IEC 11801 [5] und IEC 60793-2-10 [6] spezifiziert. In Gradientenindex-Multimode-Fasern folgt der Verlauf des Brechungsindex einer Exponentialfunktion, die für minimale Modendispersion optimiert ist. Der Brechungsindex des Mantels ist jedoch wie in Abbildung 1 gezeigt konstant.

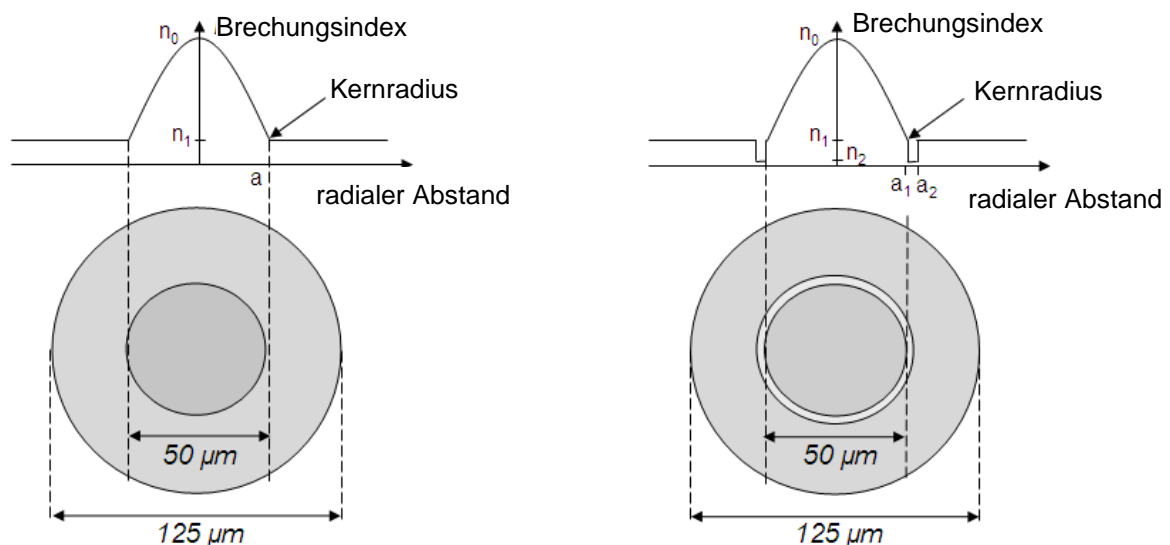


Abbildung 1 – (links) Parabolisches Brechungsindexprofil und Querschnitt durch eine „normale“ Gradientenindex-Multimode-Glasfaser. Der Brechungsindex im Kern ist für minimale

Modendispersion optimiert. Der Mantelindex bleibt konstant. (rechts) Brechungsindexprofil und Querschnitt durch eine biegeunempfindliche Multimode-Glasfaser. Neben einem identischen Indexprofil des Kerns besitzt die Faser einen den Kern umgebenden, einige Mikrometer breiten „Graben“ (Trench) mit geringerem Brechungsindex. Auch hier ist der Brechungsindex im Mantel konstant.

Der Brechungsindex einer normalen Multimode-Glasfaser als Funktion des Abstands von der Fasermitte lässt sich mathematisch wie folgt beschreiben:

$$n_{MMF}(r) = \begin{cases} n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & , r < a \\ n_1 & , r \geq a \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{n_0^2 - n_1^2}{n_0^2} \quad (2)$$

wobei n_0 , n_1 , a , r und α der Brechungsindex in Kernmitte, der Brechungsindex des Mantels, der Kernradius (typischerweise 25 μm), der radiale Mittenabstand und ein Exponent (in der Regel etwa 2) sind.

Bei BIMM-Fasern kommt eine weitere Grösse ins Spiel. Die Zusammenhänge sind aber sehr ähnlich:

$$n_{BIMMF}(r) = \begin{cases} n_0 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a_1}\right)^\alpha} & , r < a_1 \\ n_2 & , a_1 \leq r < a_2 \\ n_1 & , r \geq a_2 \end{cases} \quad (3)$$

wobei a_1 , a_2 , n_2 der Kernradius (typischerweise 25 μm), der Radius des Indexgrabens und der Brechungsindex des Grabens sind. Sehr wichtig ist hier der Zusammenhang $n_2 < n_1$. Typischerweise liegt a_2 sehr dicht an a_1 .

Durch den zusätzlichen Graben mit geringem Index um den Kern vergrössert sich die Differenz zwischen den benachbarten Brechungsindizes. Wie bereits ausgeführt, ist der kritische Winkel umso kleiner, je grösser diese Differenz ist. Daher werden auch Strahlen (Moden) mit kleinerem Einfallswinkel reflektiert. Diese Tatsache macht die grundlegende Idee hinter BIMMF leicht verständlich: Es soll insbesondere verhindert werden, dass Moden an Stellen mit kleinen Biegeradien in den Mantel ausgekoppelt werden.

Erwiderung 1

Die von R&M angebotenen BIMMF besitzen wie in Abbildung 1 gezeigt einen Kern mit dem gleichen Gradientenindexprofil wie MM-Fasern (also die gleiche Differenz Δ des nominalen Brechungsindex und den gleichen Kerndurchmesser). Der einzige Unterschied besteht in einem Graben mit kleinem Brechungsindex (Trench), der engere Biegungen ohne eine Vergrösserung der Verluste ermöglicht.

Kritikpunkt 2: BIMMF führen zu NA Verlusten.

Numerische Apertur (*NA*) und Kerndurchmesser (*CD*) sind wichtige optische Parameter für die Beschreibung der Lichtführung in Glasfasern. Mit diesen Grössen lassen sich Einkoppelwirkungsgrad, Einfügedämpfung an Spleissen und Kopplungsstellen von Fasern sowie das Verhalten an Biegestellen beschreiben. Typischerweise liegt die *NA* von OM3- und OM4-Glasfasern bei $0,200 \pm 0,015$. Sie wird wie folgt berechnet:

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_1^2} = 0.200 \pm 0.015 \quad (4)$$

Die NA ergibt sich also aus der Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Brechungsindex im Kern, wie in Gleichung (4) definiert. Der CD ist der Durchmesser des Gradientenindexkerns. Bei OM3- und OM4-Fasern beträgt der CD $50\text{ }\mu\text{m} \pm 2,5\text{ }\mu\text{m}$.

Bei NA-Messungen mit standardisierten Methoden (IEC 60793-1-43) [7] werden Eingangsoptiken verwendet, die einen Lichtfleck erzeugen, der grösser als die Schnittfläche der Glasfaser und damit weit grösser als der Kerndurchmesser ist. Diese Anregungsbedingung ist jedoch nachgewiesenermassen nicht geeignet, um die VCSEL-basierte Performance zu messen, da Lichtpulse hier auf einen sehr viel kleineren Bereich innerhalb des Faserkerns konzentriert werden. Im BIMMF-Kontext führt diese Messmethode zu einer Überbewertung des Brechungsindex-Kontrasts zwischen Kern und dem benachbarten Graben und Mantel. Im Vergleich zu MMF ergibt sich eine um etwa 0,008 grössere NA. Aus ähnlichen Gründen liefern die CD-Messmethoden gemäss IEC 60793-1-20 einen um etwa 1,0 μm zu grossen CD-Wert.

Es ist eine Tatsache, dass ein grösserer Kontrast der Brechungsindizes direkt zu einer grösseren NA führt, da die Lichtstrahlen innerhalb der Faser bei Einhaltung der internen Totalreflexion mit grösseren Winkeln geführt werden können. Abbildung 2 zeigt diesen Zusammenhang. Moden höherer Ordnung werden daher in BIMM-Fasern enger geführt. Die Dämpfungsdifferenz bleibt bei MMF ausreichend hoch. Diese Annahme hat jedoch nur Bestand, solange alle betreffenden Moden tatsächlich Energie transportieren. Bei Verwendung eines VCSEL werden jedoch nur einige dieser Moden angeregt. Die NA Überbewertung wird daher irrelevant.

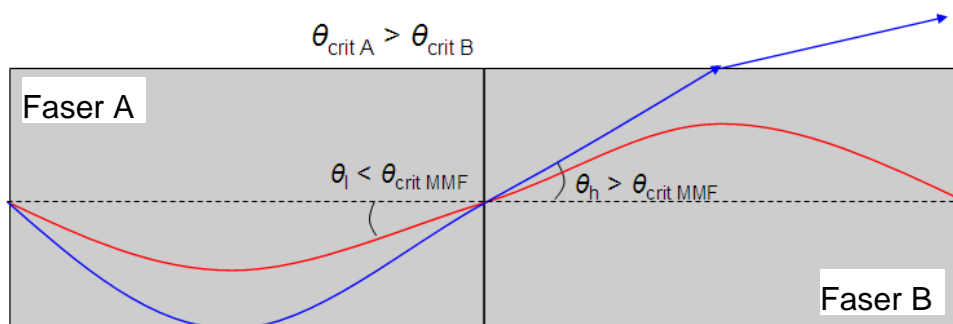


Abbildung 2 – Schematische Darstellung einer NA Diskrepanz bei Verbindung einer Glasfaser mit grosser NA (Glasfaser A) mit einer Faser mit kleiner NA (Glasfaser B). Da Faser B eine kleinere NA und damit einen kleineren kritischen Winkel θ_{crit} für die interne Totalreflexion aufweist, werden einige Moden höherer Ordnung nicht eingekoppelt und gehen verloren. Diese Art des Energieverlusts kann auch als NA-Dämpfung bezeichnet werden. Bei Moden niedriger Ordnung tritt diese NA-Dämpfung nicht auf.

Abbildung 3 zeigt die *NA*-Histogramme für zwei unterschiedliche Messmethoden. Die rechten Histogramme stammen von Brechungsindexprofilen, die an Faser-Vorformen, also vor dem Ziehen der Fasern, gemessen wurden. Beide Verteilungen weisen eine angemessene Überlappung auf. Dies zeigt, dass beide Multimode-Produkte – MMF und BIMMF – die gleiche Indexdifferenz (wie oben erklärt) im Kern besitzen. Die linken Histogramme zeigen die an 2 m langen Faserproben gemessenen *NA*-Verteilungen bei MMF und BIMMF. Hier ist eine signifikante Abweichung zwischen beiden Verteilungen zu beobachten. Es besteht eine offensichtliche Verschiebung um 0,008. Diese Verschiebung ist auf so genannte Leckwellen zurückzuführen [8]. Leckwellen sind Moden, die während des Transports durch die Faser langsam aus dem Faserkern „entweichen“, also auch bei in jeder Hinsicht perfektem Wellenleiter stark gedämpft werden.

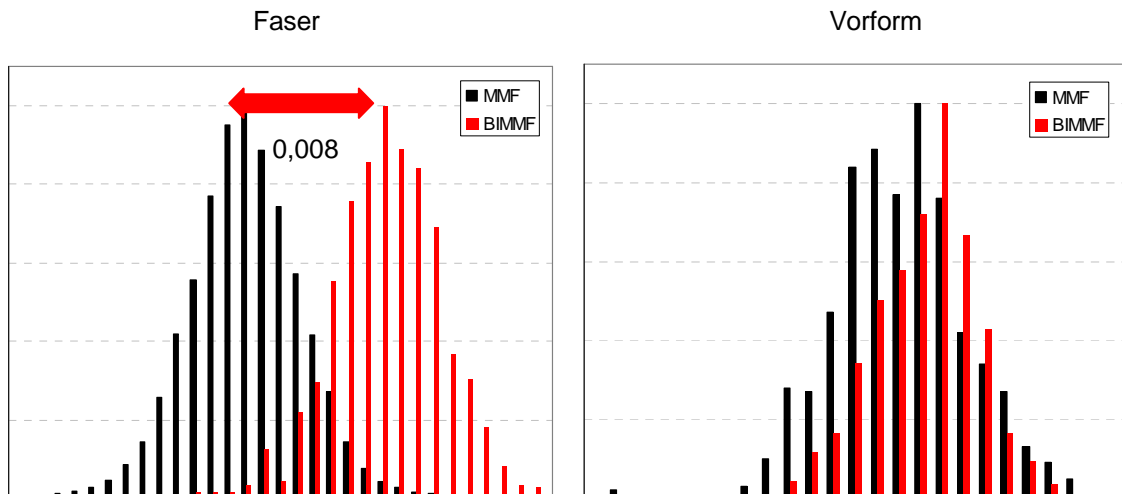


Abbildung 3 – Normalisierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen für konventionelle und biegeunempfindliche Multimode-Fasern bei Messung an den Fasern (links) und an den Vorformen (rechts). Obwohl bei überfüllter Anregungsbedingung eine durchschnittliche *NA*-Differenz von 0,008 zwischen MMF und BIMMF zu beobachten ist, zeigen sich bei Messungen an den Vorformen keine signifikanten Unterschiede.

Die an Verbindungsstellen von einer Faser in die andere übertragene optische Leistung wird durch das Überlappungsintegral der optischen Modenfelder der beiden Fasern bestimmt. Eine entsprechende Quantifizierung dieser Überlappungsfunktion ist kompliziert und abhängig vom Aufbau des Wellenleiters, insbesondere des Kerns, dem lateralen und longitudinalen Versatz der Fasern und dem Winkel, in dem die Fasern aufeinander treffen. Es sollte nun klar sein, dass es zwischen beiden Faserarten keine Unterschiede in der Form des Modenfelds gibt, da der Kern in beiden Fällen gleich aufgebaut ist.

Erwiderung 2

Es ist daher nicht zu erwarten, dass an Verbindungsstellen zwischen MMF und BIMMF im Vergleich zu homogenen Verbindungsstellen höhere Anschlussdämpfungen aufgrund einer *NA*-Fehlanpassung auftreten.

Kritikpunkt 3: Zwischen BIMMF und MMF kommt es zu Kompatibilitätsproblemen.

Die gesamte Kritik an BIMMF beruht auf der falschen Annahme, dass diese Fasern im Vergleich zu konventionellen MMF eine grössere *NA* und einen grösseren *CD* besitzen. Daraus ergäbe sich dann logischerweise, dass eine BIMMF bei der Signalübernahme von einer MMF eine grössere Fehlausrichtung toleriert und die Einfügedämpfung geringer ist. Andererseits könnte eine MMF keine Moden höherer Ordnung übernehmen, die Einfügedämpfung wäre hier also höher. Bei abwechselnder Verkettung von MIMMF und MMF könnte man also ein „oszillierendes“ Dämpfungsmuster erwarten [9].

Zur Untersuchung des Anschlussverhaltens wurden Kompatibilitätstests mit einer LED-Quelle mit 850 nm Wellenlänge und nachgeschaltetem Mode Conditioner durchgeführt. Alle Faserproben wurden entsprechend 35 Meter langen MPO-Patchkabeln von R&M mit Steckverbindern versehen und in zufälliger Reihenfolge verbunden und gemessen. Abbildung 4 zeigt die durchschnittlich gemessenen Dämpfungen. Ein „oszillierendes“ Verhalten ist nicht erkennbar. Die Einfügedämpfung scheint vielmehr hauptsächlich von der Qualität der Steckverbinder abhängig zu sein.

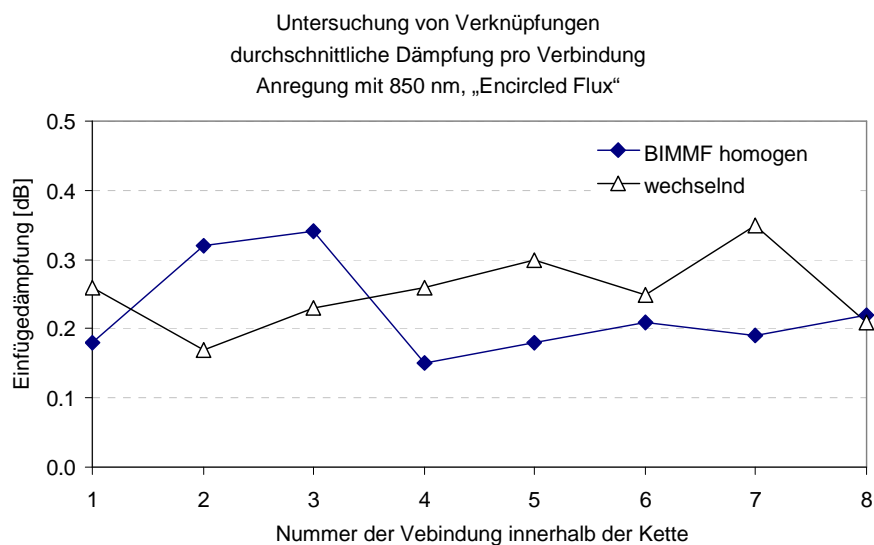


Abbildung 4 – Individuelle Anschlussdämpfung bei abwechselnder Verkettung von BIMMF- und MMF Kabeln mit 35 m Länge. Die schwankende Einfügedämpfung folgt keinem „oszillierenden“ Muster.

Erwiderung 3

Die Daten verdeutlichen zwei interessante Sachverhalte. Zunächst einmal hat das Verbinden unterschiedlicher Glasfasertypen keinen entscheidenden Einfluss auf die zu erwartende Anschlussdämpfung. Das in [9] beobachtete, „oszillierende“ Verhalten ist höchstwahrscheinlich auf nicht BIMMF-spezifische *NA*- und *CD*-Diskrepanzen im Link zurückzuführen. BIMMF und MMF können daher innerhalb eines optischen Kanals einfach gemischt werden, ohne die Abschätzung der Verluste zu verkomplizieren. Zweitens können bei BIMMF grössere Toleranzen durch mögliche Fehlausrichtungen bei geschlossener Verbindung zulässig sein. Dies bedeutet in 40- und 100-Gigabit-Anwendungen einen zusätzlichen Vorteil, da die Auswirkungen auf das Leistungsbudget hier zu einem wichtigen Thema werden.

Kritikpunkt 4: BIMMF beeinträchtigen die Systemperformance.

Aktuelle parallel-optische MMF-Übertragungsstrecken mit 100 Gb/s und 40 Gb/s basieren auf dem kürzlich veröffentlichten 100GBASE-SR10 und 40GBASE-SR4 Standard bei 850 nm. Die Spezifikationen betreffen bei OM4-Glasfasern Übertragungslängen von 150 m [1]. Die Untersuchung des BER-Verhaltens von BIMMF und MMF in 40GBASE-SR4-Systemen wurde mit dem in Abbildung 5 gezeigten Experimentieraufbau durchgeführt. Dabei werden handelsübliche 40GBASE-SR4-Transceiver über einen Testkanal (Channel under Test, CUT) verbunden. Der grundlegende Messaufbau enthält ausserdem ein variables optisches Dämpfungsglied, das über zwei drei Meter lange Fanouts vor dem Empfänger eingesetzt wird, um die BER abhängig von der empfangenen Leistung messen zu können. Die aus den gemessenen Daten erstellten Kurven werden oft „Wasserfallkurven“ genannt. Bei grosser Dämpfung bzw. kleiner Empfangsleistung ist die Öffnung des Augendiagramms klein und die BER ist gross. Bei steigender Empfangsleistung hängt die Verbesserung der BER von der Form des Augenmusters ab, die wiederum von den Glasfasereigenschaften wie chromatischer und Modendispersion abhängt. Diese beiden Effekte sind die wichtigsten Ursachen für die Intersymbol-Interferenz (ISI). Bei einer BER ab 10^{-12} und kleiner können aber auch andere Störeinflüsse wie Modenrauschen, RIN, MPN oder Reflexionsrauschen das Übertragungsverhalten beeinträchtigen. Horizontale Verschiebungen der Wasserfallkurven zeigen unterschiedlich starke ISI an. Je weiter eine Kurve beispielsweise nach rechts verschoben ist, desto stärker ist das Signal durch ISI beeinträchtigt.

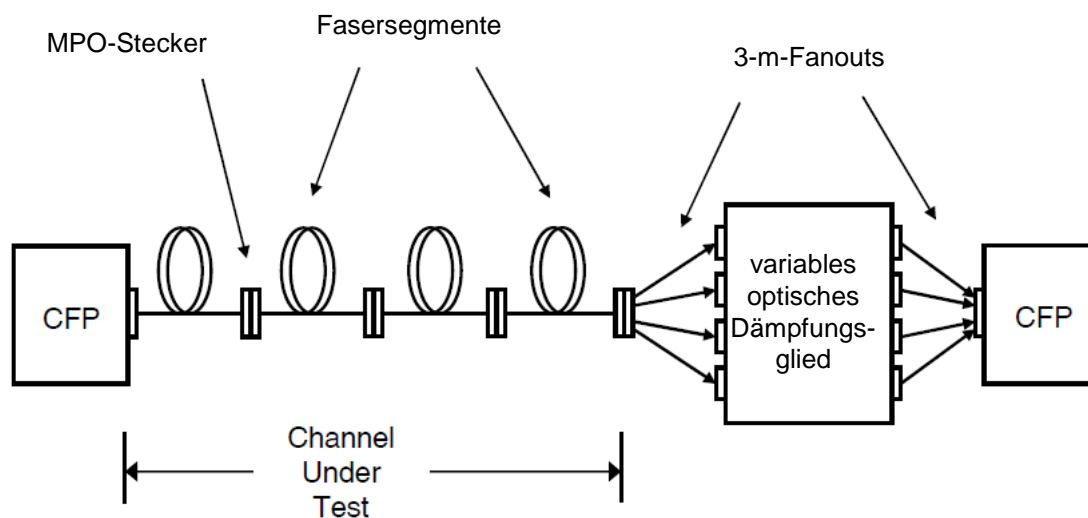


Abbildung 5 – Experimentalaufbau für die Bewertung des optischen Kanals. Beachten Sie, dass der Kanal entweder ausschliesslich aus BIMMF, ausschliesslich aus MMF oder gemischt aus MMF- und BIMMF-Segmenten bestehen kann. Die Biegungen innerhalb des CUT sind optional.

Für die IEEE 40GBASE-SR4-Anwendung darf die Einfügedämpfung des Kanals bei OM3-Fasern maximal 1,9 dB und bei OM4-Fasern maximal 1,5 dB betragen[1]. Im Rahmen der Studie wird das optische Signal mit CFP-Modulen in den aus mehreren OM4-Kabeln unterschiedlicher Länge bestehenden Kanal eingespeist. Die einzelnen Kabel können aus MM- oder BIMM-Fasern bestehen. Untersucht werden verschiedene inhomogene und homogene Verbindungskonfigurationen aus MMF- und BIMMF-Strecken.

Zurzeit gibt es zwei standardisierte Methoden, um das Verhalten von Multimode-Glasfasern zu charakterisieren. Dies sind die Messung der Multimoden-Gruppenlaufzeiten (Differential Mode Delay, DMD) und die Bestimmung der berechneten effektiven modalen Bandbreite (Effective Modal Bandwidth, EMBc). Mit beiden Testmethoden soll die modale Bandbreite bestimmt werden. Eine andere Möglichkeit, das Verhalten einer Glasfaser zu testen, ist eine BER-Messung. Bei dieser Methode wird zudem die tatsächliche Verwendung der Glasfaser-Übertragungsstrecke weitaus stärker berücksichtigt. In Versuchen konnte eine sehr gute Korrelation zwischen DMD-Messung, EMBc-Ergebnissen und BER-Messung nachgewiesen werden [10]. Die BER ist das Verhältnis der gemessenen Anzahl Fehlerbits und der Gesamtzahl der innerhalb einer bestimmten Zeit übertragenen Bits.

Die modale Bandbreite einer Multimode-Faser ist im Grunde ein Mass für die Resistenz der Glasfaser gegenüber Intersymbol-Interferenz (ISI). ISI entsteht durch die Dispersion der Lichtimpulse, die sich durch die Glasfaser bewegen. Die kurzen, separaten Lichtimpulse, die die einzelnen Bits darstellen, verlängern sich im Lauf der Zeit und beginnen, mit den Lichtimpulsen benachbarter Bits zu überlappen. Dieser Effekt kann so stark werden, dass der Empfänger eine 0 nicht mehr von einer 1 unterscheiden kann. Abbildung 6 zeigt dies schematisch. Um eine ausreichend kleine Bitfehlerrate (BER) beizubehalten, muss die Signalleistung erhöht werden. Die zusätzlich erforderliche Leistung wird als ISI Power Penalty bezeichnet [11].

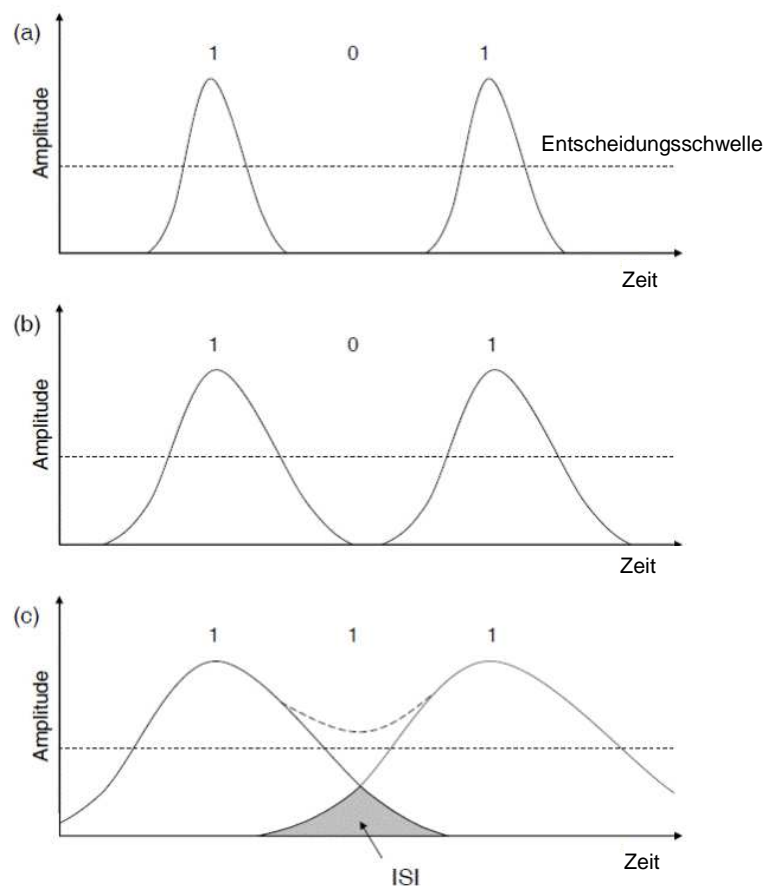


Abbildung 6 – Impulsausbreitung einer digitalen Bitfolge (101) während des Transports in einer Multimode-Glasfaser, (a) bei Einkopplung in die Faser, (b) nach der Strecke l_1 , (c) nach der Strecke $l_2 > l_1$. Im letzten Fall entstehen Bitfehler durch zu starke ISI.

Höhere Bandbreiten führen zu einem kleineren ISI Penalties. Anders als an anderer Stelle beschrieben [4,9] zeigen alle unsere Messungen, dass die entsprechende Korrelation bei BIMMF identisch ist. Unsere Übertragungsversuche bei 40 Gb/s zeigen, dass BIMMF-Fasern, die den gleichen DMD-Mustern wie MMF entsprechen, vergleichbar kleine Bitfehlerraten aufweisen. Wir haben unsere Versuche mit CFP-Transceivern verschiedener Hersteller wiederholt und konnten dabei keine einsetzende BER-Schulter bei unseren BIMMF-Glasfasern entdecken. Was wir gesehen haben, waren im Gegenteil sehr gute Übertragungsverhalten der optischen Kanäle mit den in Abbildung 7 gezeigten, in der Praxis positiven Leistungsreserven. Der grüne Bereich steht für gute OM3- und OM4-Ergebnisse. Bei geringer werdender optischer Leistung (von rechts nach links) steigt die BER an.

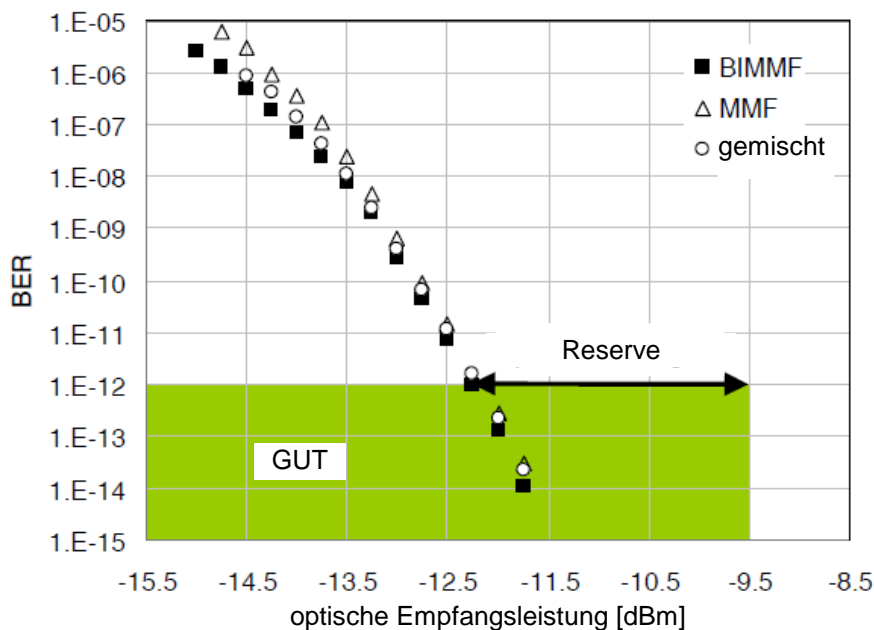


Abbildung 7 – BER-Wasserfallkurven einer 40GBASE-SR4-Übertragung über verkettete OM4-Kabel in unterschiedlicher Konfiguration, Gesamtlänge 150 m. Die Kurve zeigt Ergebnisse für Kanäle aus vier BIMMF-Kabeln, vier MMF-Kabeln und einem aus miteinander verbundenen BIMMF- und MMF-Kabeln bestehenden Kanal.

Die Analyse der Daten zeigt, dass alle diese Kanäle, also reine BIMMF-, reine MMF- und gemischte BIMMF-/MMF-Kanäle in verschiedenen Konfigurationen Datenraten von 40 Gb/s über 150 m oder sogar längere Strecken unterstützen [12]. Abbildung 7 zeigt bei einer 150 Meter langen Strecke eine gemessene Bitfehlerrate von 10^{-12} bei einer Empfangsleistung von -12,25 dBm. Laut Vorgabe darf die Empfangsleistung die minimal spezifizierte Leistung -9,5 dBm nicht überschreiten. Daraus folgt, dass alle gemessenen Konfigurationen die Anforderungen an den PMD-Sublayer (Physical Medium Dependent) [1] gemäß IEEE 802.3ba einhalten, sofern sowohl Sender als auch Empfänger des Systems spezifikationskonform sind.

Darüber hinaus wurde behauptet, dass der den Faserkern umgebende Graben mit niedrigem Brechungsindex zur Ausbreitung von Moden höchster Ordnung und damit zu einer Verschlechterung der Bandbreite sowie zu einem grösseren ISI Penalties führen würden [4,9]. Um dies zu testen, wurden BIMMF- und MMF-Kanäle mit drei Verbindungsstellen und Gesamtlängen von 550 m untersucht. Auch dieser Test wurde mit handelsüblichen Transceivern durchgeführt. Die in Abbildung 8 gezeigten BER-Wasserfallkurven verdeutlichen das Testergebnis. Es ist offensichtlich, dass BIMMF-Kabel ebenso gute Ergebnisse liefern wie konventionelle MMF-Kabel. Beide Kurven zeigen die gleichen Abzüge und sind praktisch deckungsgleich.

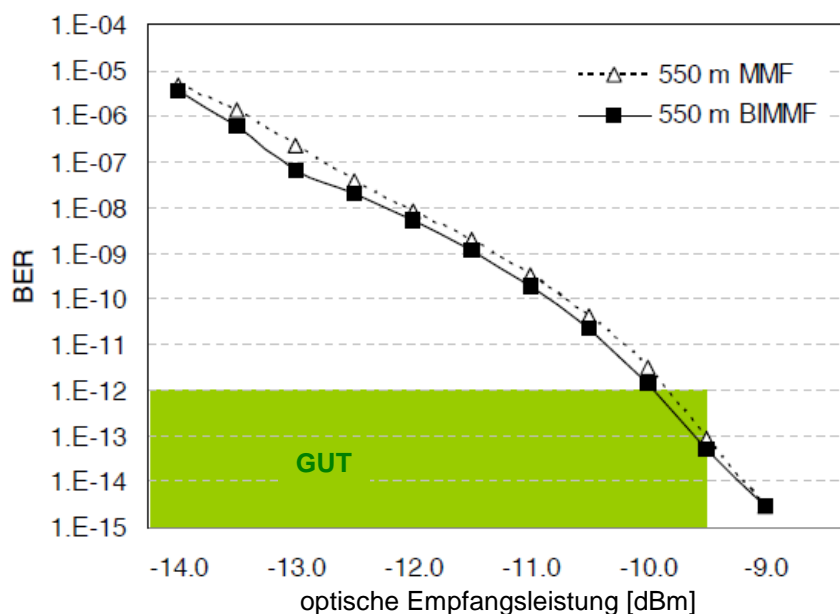


Abbildung 8 – BER-Wasserfallkurven einer 40GBASE-SR4-Übertragung über verkettete OM4-Kabel, Gesamtlänge 550 m. Die Kurve zeigt die Ergebnisse für ausschliesslich aus BIMMF- bzw. MMF-Kabeln bestehende Kanäle.

Um das Übertragungsverhalten von BIMMF im Vergleich zu MMF zu bewerten, wurden Augendigramme für verschiedene Übertragungsentfernungen untersucht. Abbildung 9 zeigt die gemessenen Augendigramme für beide Fasertypen und Strecken von 150 und 550 Metern. In allen Fällen konnten klar geöffnete Augen gemessen werden, ein Beleg für die grossen Bandbreiten von sowohl BIMMF- als auch MMF-OM4-Glasfasern.

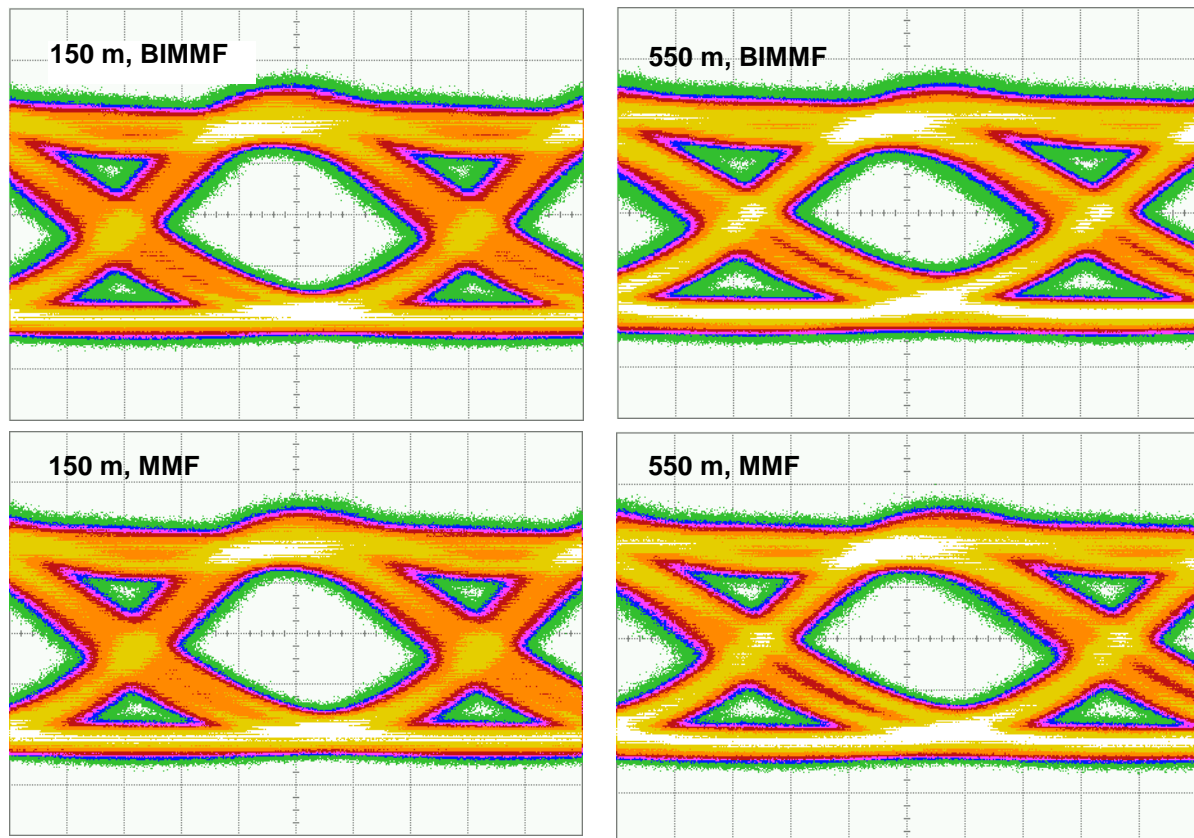


Abbildung 9 – Augendigramme handelsüblicher CFP-Transceiver mit BIMMF- und MMF-Konfigurationen und zwei Kanallängen. Alle Diagramme wurden mit -9,5 dBm Empfangsleistung gemessen.

Erwiderung 4

Nach allen Messungen, die wir im Rahmen unserer Untersuchungen durchgeführt haben, können wir feststellen, dass BIMMF keinerlei negativen Einfluss auf das Systemverhalten haben, sofern ein normgerechter Transceiver eingesetzt wird. Sie führen nicht zu höherer Modendispersion. Es entstehen also weder höhere Leistungsabzüge im Vergleich zu MMF noch eine „Schulter“ im Verlauf der Bitfehlerrate.

Referenzen

- [1] IEEE-Standard 802.3ba, „IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications, Amendment 4: Media Access Control Parameter, Physical Layers and Management Parameters for 40 Gb/s and 100 Gb/s Operation“, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York (Juni 2010).
- [2] IEEE 802.3 Next Generation 100 Gb/s Optical Ethernet Study Group
URL: <http://www.ieee802.org/3/100GNGOPTX/index.html>
- [3] R. Pimpinella und B. Lane, „Intermateability of Bend Insensitive Multimode Fiber with Standard Multimode Fiber“, *Protokoll des 59. IWCS* (November 2010).
- [4] CommScope, „Bend Insensitive Multimode Fiber – Is the reward worth the risk?“, Whitepaper (November 2010).
- [5] Internationaler Standard ISO/IEC 11801: „Information technology — Generic cabling for customer premises“, Genf (2002).
- [6] IEC 60793-2-10 ed4.0 Optical fibres - Part 2-10: „Product specifications - Sectional specification for category A1 multimode fibres“, International Electrotechnical Commission, Genf (März 2011).
- [7] IEC 60793-1-43 Optical fibres - Part 1-43: „Measurement methods and test procedures - Numerical aperture“, International Electrotechnical Commission, Genf (Juli 2001).
- [8] L. Provost, D. Molin, H. Maerten, L. Galkovsky, F. Achten, G. Kuyt und P. Sillard, „Connectivity and compatibility performance of Bend-Insensitive Multimode Fibers“, *Protokoll des 60. IWCS* (November 2011).
- [9] P.F. Kolesar, E. Leichter, A. Sengupta, „The Straight Story on Bend-Insensitive Multimode Fibers“, *Protokoll des 60. IWCS* (November 2011).
- [10] R. Pimpinella, B. Lane, A. Brunsting, „Correlation of BER Performance to EMBc and DMD Measurements for Laser Optimized Multimode Fiber“, *Protokoll des 56. IWCS* (November 2007).
- [11] IEEE P802.3ae 10Gb/s Ethernet Task Force Link Budget Spreadsheet (Version 3.1.16a), URL: grouper.ieee.org/groups/802/3/ae/public/adhoc/serial_pmd/documents/10GEPBud3_1_16a.xls
- [12] „R&M sets new standard for 40 Gigabit Ethernet“, R&M-Medienmitteilung (September 2011).