

Heimnetze müssen normgerecht, sehr schnell und zuverlässig arbeiten

Olaf Ziemann und Mitarbeiter des DKE-AK 412.7.1

Rund zwei Drittel der deutschen Haushalte sind inzwischen an Breitbandnetze angeschlossen. Den größten Anteil haben dabei immer noch ADSL-Anschlüsse mit Geschwindigkeiten von wenigen Mbit/s. Bereits in wenigen Jahren werden aber VDSL und Glasfasern Bandbreiten von 100 Mbit/s und mehr ermöglichen.

Für die Vernetzung in Gebäuden und Wohnungen stehen bislang nur die Funktechniken WLAN und PLC (Power Line Communication) zur Verfügung. Optische Polymerfasern (POF) können von jedem Laien selbst installiert werden und ermöglichen zuverlässige, störresistente und schnelle Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Ethernet-Medienkonverter mit 100 Mbit/s Geschwindigkeit und bis zu 120 m Übertragungsreichweite sind schon von diversen Herstellern verfügbar.

Derzeit läuft bereits die Entwicklung von POF-Systemen für Datenraten von 1 Gbit/s. Um eine große Akzeptanz zu erzielen, müssen dafür neue Standards zwischen den Herstellern erarbeitet und viele technische Fragen im Vorfeld beantwortet werden.

Im neu gegründeten DKE-Arbeitskreis 412.7.1 (www.dke.de/ak412-7-1) haben sich Hersteller und Forschungsinstitute zusammengefunden, um Vorschläge für solche Standards zu erarbeiten. Der aktuelle Stand der Diskussion soll hier vorgestellt werden. Dabei wird im Einzel-

nen auf die Wahl der Faser, des Übertragungsformats und der optischen Sen- der eingegangen.

Als Ziel hat sich die Gruppe gestellt, ein robustes Übertragungssystem mit möglichst einfacher Installation für eine Geschwindigkeit bis 1 Gbit/s und eine Reichweite bis 50 m zu beschreiben. Diese Entfernung ist für Installationen in Wohnungen und den meisten Mehrfamilienhäusern ausreichend.

Polymerfasertypen und die wichtigsten Indexprofile

Optische Polymerfasern (POF), oft auch als Kunststofffasern bezeichnet, bestehen aus einem PMMA-Kern (üblicherweise 1 mm dick) und einem dünnen optischen Mantel aus Fluorpolymer (10 µm). Nach Bedarf wird darauf ein Schutz- mantel aus verschiedenen Polymeren aufgebracht (1,5 mm bis 2,3 mm dick), Bild 1.

Die wichtigsten Unterschiede zwischen den verschiedenen verfügbaren Polymerfasern liegen in den verwendeten Materialien (die vor allem die Dämpfung und den Temperaturbereich bestimmen) und in den Indexprofilen (die für die Bandbreite wesentlich sind). Mit Abstand an häufigsten werden heute POF aus PMMA benutzt.

Bei allen optischen Fasern wird die Bandbreite durch das Brechungsindexprofil bestimmt. Die einfachste Variante ist das Stufenindexprofil (SI), links im Bild 2 gezeigt. Ein homogener Kern mit dem Index n_K ist von einem Mantel mit kleinerem Brechungsindex n_M umge-

ben. Die Differenz bestimmt die Nume- rische Apertur NA und damit den ma- ximalen Ausbreitungswinkel α_{\max} :

$$NA = \sqrt{n_K^2 - n_M^2};$$

$$\alpha_{\max} = \arccos(n_M/n_K).$$

In Glasfasern beträgt die Brechungs- indexdifferenz nur etwa 1 %. Hybride Glas/Polymerfasern erreichen etwa 4 % Differenz, woraus maximale Ausbrei- tungswinkel von 16° folgen. Bei der Stan- dard-POF ist die Brechungsindexdiffe- renz rund 5 %, entsprechend einem maximalen Ausbreitungswinkel von 20° gegenüber der Faserachse.

Ein größerer maximaler Ausbreitungs- winkel äußert sich durch geringere Biege- empfindlichkeit, allerdings verringert sich auch gleichzeitig die erreichbare Band- breite der Faser.

Auf einen Blick

Optische Polymerfasern (POF) sollen zur Multimedia-Verkabelung in Wohnungen und Häusern dienen. Mit entsprechenden Komponenten ausgerüstet, werden die leicht zu verlegenden Kabel in der Lage sein, Daten mit 1 Gbit/s zu übertragen und damit auch zukünftige Anforderungen zu erfüllen.

Die SI-POF ist einfach herzustellen (auch kontinuierlich), preiswert und mitt- lerweile in sehr stabiler Qualität verfü- gbar. Es gibt eine Vielzahl von Kompo- nenten, Messgeräten und experimentellen Daten, z. B. zur Lebensdauer. Aufgrund der großen möglichen Ausbreitungswin- kel der Lichtstrahlen im Kern gibt es aber auch große Laufzeitunterschiede, und die Bandbreite beträgt lediglich rd. 40 MHz · 100 m.

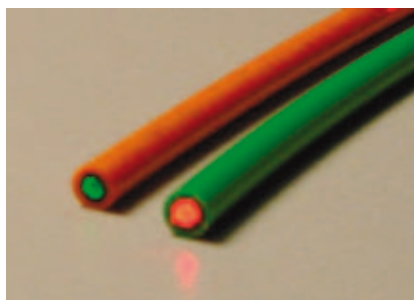


Bild 1. 1-mm-Standard-Polymerfaser



Bild 2. Stufenindex-, Vielstufenindex- und Vielkern-Polymerfasern

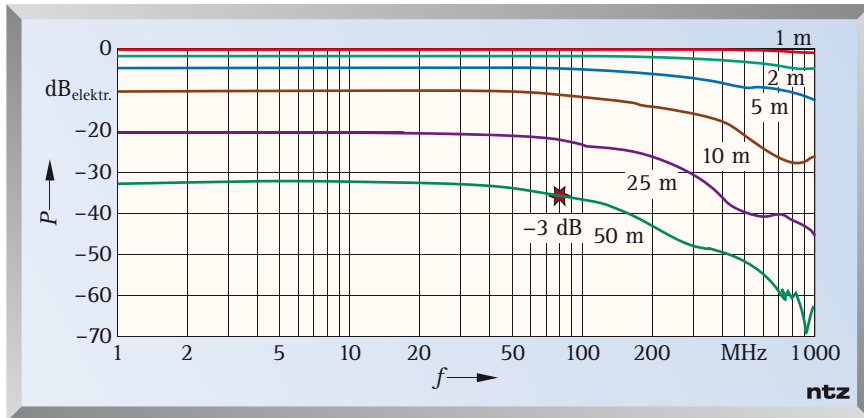


Bild 3. Übertragungsfunktion der MC-POF

Stellt man den Kern einer optischen Faser nicht mit konstantem Brechungsindex her, sondern mit einem sogenannten Gradientenindexprofil (GI-POF) kompensieren sich die unterschiedlichen Ausbreitungswege und die verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten fast komplett. Erreicht man ein annähernd parabolisches Profil, kann die Bandbreite etwa 100-mal so groß wie bei SI-POF sein. Anstelle eines kontinuierlichen Verlaufs kann auch ein vielstufiges Indexprofil (multi step index, MSI-POF) verwendet werden. Die Optimedia-MSI-POF ist beispielsweise aus rund zehn Schichten aufgebaut und hat eine Bandbreite von etwa 1500 MHz · km (Bild 2, Mitte).

Einen anderen Ansatz verfolgt die Vielkern-POF (multi core; MC-POF). Die Unterteilung des Kerns in viele einzelne lichtführende Bereiche ermöglicht viel

kleinere Biegeradien, wodurch die Verlegung der Faser erheblich vereinfacht wird. Numerische Apertur und Bandbreite entsprechen etwa der SI-POF.

Bandbreite und Übertragungskapazität

Allgemein haben SI-POF, GI- bzw. MSI-POF und MC-POF gemeinsam, dass sie als Mehrmodenfasern eine große Modendispersion aufweisen, und damit ist die Übertragungsbandbreite stark eingeschränkt (mit noch deutlich kleineren Werten als für Glas-Mehrmodenfasern). Insofern sind bandbreiteneffiziente Übertragungsverfahren sehr interessant. In Bild 3 wird die Übertragungsfunktion einer typischen MC-POF gezeigt (NA der Lichtquelle: 0,27).

Wie im Bild zu sehen ist, liegt die Bandbreite einer 50 m langen POF-Strecke unter 100 MHz. Für die Über-

tragung von 100 Mbit/s ist dies völlig ausreichend. Will man allerdings 1 Gbit/s übertragen, erscheint diese Bandbreite viel zu gering zu sein. Das gilt allerdings auch für alle anderen typischen Medien, die innerhalb von Gebäuden benutzt werden (Funk, Kupferdatenkabel oder Stromleitungen). Kommt heute verfügbare Signalverarbeitung ins Spiel, wird die Übertragungskapazität einer Strecke nicht durch die reine 3-dB-Bandbreite, sondern durch das verfügbare Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), integriert über den nutzbaren Frequenzbereich, bestimmt.

Modulationsformate für Gbit/s-Übertragung

Nachfolgend werden die wichtigsten Verfahren vorgestellt, mit denen auch bei POF-Systemen die verfügbare Übertragungskapazität ausgenutzt werden kann.

- **NRZ direkt:** NRZ (Non Return to Zero) bedeutet, dass der Sender zwischen Maximalpegel und Null im Bittakt geschaltet wird. Der Vorteil liegt in einem sehr einfachen Systemaufbau, der Nachteil in der großen notwendigen Bandbreite. Im Allgemeinen fordert man eine Bandbreite, die der Hälfte der zu übertragenden Bitrate entspricht (also beispielsweise 500 MHz für eine Bitrate von 1 Gbit/s).

Eine fehlerfreie Übertragung ist aber auch bei niedrigen Bandbreiten noch möglich. Allerdings ist dann das Augendiagramm schon deutlich geschlossen. Um dies zu kompensieren, muss ein größeres Signal-Rausch-Verhältnis realisiert werden, weil die beiden Signalpegel durch das Schließen des Auges dichter zusammenrücken. Diese Änderung wird als Penalty (Strafe) bezeichnet. In Bild 4 wird gezeigt, dass selbst bei einem System mit nur 10 % Band-

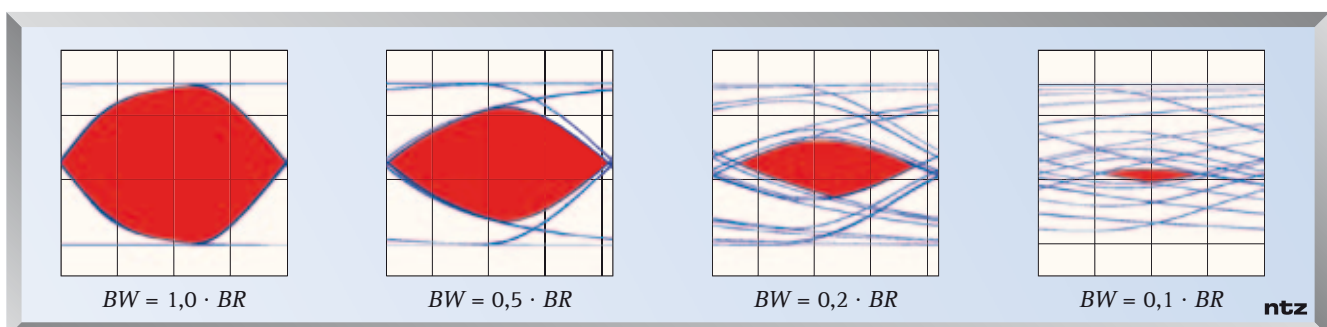


Bild 4. Augendiagramme für verschiedene Verhältnisse von Bandbreite (BW) zur übertragenen Bitrate (BR), simuliert ohne Rauschen

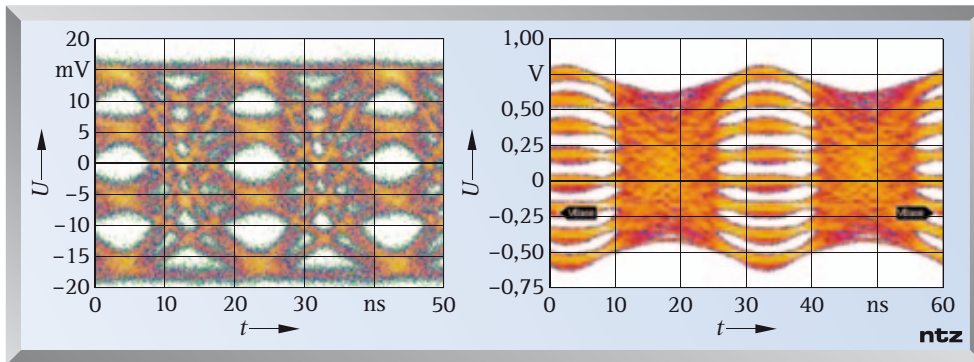


Bild 5. 4- und 8-stufig modulierte Signal; 100 Mbit/s über 100 m SI-POF (links) und 275 m (rechts) (ISMB Turin, [1] und 2009)

breite (in Relation zur Bitrate) theoretisch noch fehlerfrei übertragen werden kann (dann muss aber das Signal-Rausch-Verhältnis um über 20 dB erhöht werden).

- **PAM:** Bei der Puls-Amplituden-Modulation gibt es nicht nur zwei Pegel, sondern mehrere mögliche. In der Regel werden 2^n Pegel verwendet, also z.B. vier oder acht. In Bild 5 werden typische Signale mit PAM-Modulation gezeigt.

Da jetzt jedes Symbol n bit überträgt, sinken die Symbolrate und damit auch der Bandbreitebedarf und entsprechend auch das Rauschen auf $1/n$. Gleichzeitig liegen die vielen Signalpegel dichter beieinander, so dass auch weniger Rauschen erlaubt werden kann. Der Vorteil von PAM liegt in seiner Flexibilität und Anpassbarkeit an das vorliegende Signal-Rausch-Verhältnis. Je besser es ist, desto mehr bit kann man pro Symbol übertragen und damit die Übertragungskapazität erhöhen.

- **DMT:** Bei der Mehrträgermodulation (DMT, Discrete Multi Tone) wird das verfügbare Spektrum in viele Kanäle (Träger) unterteilt. Jeder Träger kann nun einzeln, entsprechend dem verfügbaren Signal-Rausch-Verhältnis, mehrstufig moduliert werden (optimal mit QAM, Quadrature Amplitude Modulation, wobei sowohl Phasenlage als auch Amplitude des Trägers verwendet werden). In Bild 6 wird ein Beispiel gezeigt: Hier wurden über 100 m POF rd. 2 Gbit/s übertragen. Die benutzte Band-

breite beträgt 700 MHz. Während bei kleinen Frequenzen QAM64 verwendet wird (6 bit pro Symbol), erlauben die oberen Träger nur noch QAM4 (2 bit pro Symbol).

Ein großer Nachteil von DMT liegt in dem beträchtlichen Aufwand an Signalverarbeitung. Es ist immer ein schneller Analog-Digital-Konverter nötig. DMT bedingt auch praktisch immer eine Fehlerkorrektur (FEC, Forward Error Correction).

Heute verwenden sehr viele Kommunikationssysteme im Endkundenbereich DMT oder das verwandte Verfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), wie z. B. DSL, PLC, LTE, WiMAX oder auch WLAN, weil man mit diesem Verfahren die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität sehr effizient ausnutzen kann.

- **NRZ mit Filterung:** Überträgt man NRZ-Signale auf einem Kanal, dessen Bandbreite weit unter der halben Datenrate liegt, wird irgendwann das Auge komplett geschlossen sein (siehe ansatzweise Bild 4), und es lassen sich keine Daten mehr empfangen. Wird nun hinter den Empfänger ein Hochpassfilter

geschaltet, dessen Übertragungsfunktion (in Amplitude und Phase) dem inversen Kanal entspricht, kann das Auge wieder komplett geöffnet werden.

Dieses Filter kann rein analog realisiert werden (1,39 Gbit/s über 100 m SI-POF, POF AC 2007, [2]). Mit variablen Komponenten kann solch ein Filter auch adaptiv sein. Wesentlich effizienter arbeitet aber ein adaptives digitales Filter (FFE, DFE; Feed Forward Equalizer, Decision Feedback Equalizer). Mit solchen Verfahren konnten schon 2 Gbit/s über 100 m POF übertragen werden (TU München 2008 [2], POF-AC 2009), Bild 7.

Der Hauptvorteil des digitalen Filters ist, dass er in einem IC integriert werden kann und keine voluminösen diskreten Bauteile braucht. Nachteilig ist der beträchtliche Aufwand für Signalverarbeitung (ADC, Taktrückgewinnung usw.).

Allen Entzerrerverfahren gemeinsam ist, dass die hohen Frequenzen stärker gewichtet werden. Hier wird nicht nur das Signal, sondern auch das Rauschen angehoben. Wenn durch die geringe Bandbreite Signalanteile schon so stark gedämpft wurden, dass sie im Bereich des Rauschuntergrunds liegen, kann man diese Anteile nicht mehr zurückgewinnen. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird gegenüber einem nicht bandbegrenzten Kanal verschlechtert (Penalty).

Vergleich der Bandbreiteausnutzung

Zunächst sollen die beschriebenen Verfahren bezüglich der Nutzung der Kanalkapazität verglichen werden. Dies ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Es werden jeweils der Rauschpegel und das Signal hinter dem Empfänger ge-

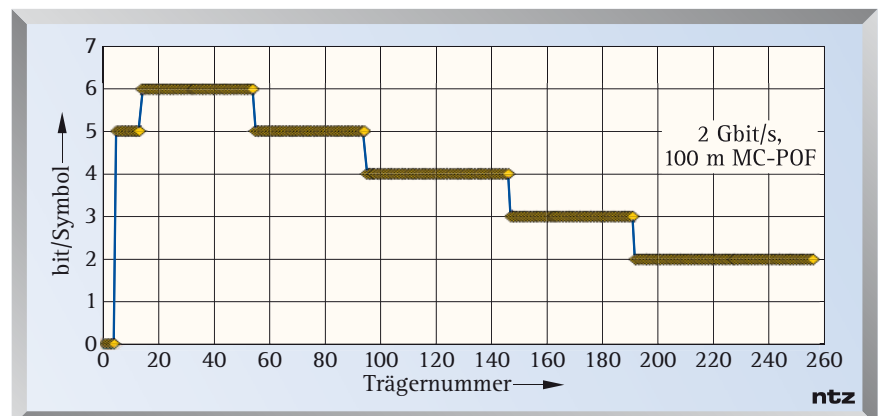


Bild 6. Beispiel für DMT-Übertragung auf 100 m MC-SI-POF (POF-AC 2009)

Prof. Dr.-Ing. Olaf Ziemann ist Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Polymer Optical Fiber Application Center (POF-AC) der FH Nürnberg und Sprecher des ITG-Fachausschusses 5.4 Kommunikationskabelnetze.

Der Beitrag entstand unter Mitwirkung der Mitarbeiter des DKE-Arbeitskreises 412.7.1.

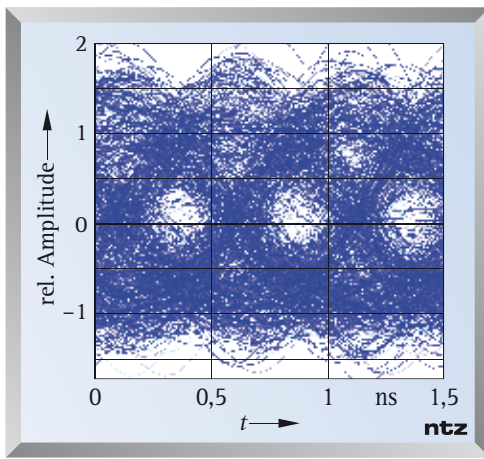


Bild 7. Übertragung von 2 Gbit/s über 100 m POF mit FFE/DFE-Entzerrer

zeigt. Im einzelnen bedeuten die markierten grünen Flächen:

- NRZ: Unabhängig vom SNR werden nur zwei Signalpegel genutzt und dadurch zur Verfügung stehende Kapazität vergeudet.
- NRZ mit Penalty: Nutzt eine höhere Bandbreite bei größerem SNR aus, allerdings wird auch hier das höhere SNR bei kleinen Frequenzen nicht genutzt.
- PAM: Nutzt nur die 3-dB-Bandbreite, aber dafür das verfügbare SNR aus.
- DMT: Nutzt die gesamte Bandbreite mit dem jeweiligen SNR aus.
- NRZ mit Filter: Nutzt die gesamte Bandbreite aus, aber auch hier wird nur das SNR für zwei Signalpegel genutzt.

Man sieht sofort, dass DMT und NRZ mit Entzerrung die beste Nutzung der Kapazität für den typischen POF-Kanal bieten. In der Theorie ist dabei das DMT optimal, weil das Signal-Rausch-Verhältnis des Kanals in allen Frequenzbereichen optimal ausgenutzt werden kann (deswegen wird es in bandbreitebegrenzten Kanälen heute am häufigsten verwendet). Allerdings erreicht auch DFE in Kombination mit PAM unter idealen Bedingungen eine identische Kanalausnutzung. Zudem funktioniert NRZ mit Entzerrung nur so lange, wie bei der

halben Bitrate (also z. B. bei 500 MHz für 1 Gbit/s) wenigstens noch etwas Signal vorhanden ist, während beim DMT der Bandbreitebedarf nur ein Bruchteil der Bitrate ist (abhängig vom Modulationsgrad, z. B. 100 MHz für 1 Gbit/s bei QAM1024). Allerdings sind die genannten Verfahren auch am aufwendigsten, da sie AD-Wandlung und digitale Signalverarbeitung benötigen.

Vergleich hinsichtlich Leistung und Signal

Für alle optischen Systeme mit Amplitudenmodulation gibt es noch eine Besonderheit, die vor allem bei der POF zu berücksichtigen ist. Optische Sender (LED, Laser) sind in ihrer Leistung begrenzt. Diese Grenze wird im Heimbereich zumeist durch die Augensicherheitsbestimmungen vorgegeben. Typisch sind nur wenige Milliwatt erlaubt.

Bei NRZ-Modulation schaltet man die Quelle komplett zwischen maximaler Leistung und (fast) Null im Bittakt um. Die mittlere Leistung ist dann etwa die

Hälfte der maximalen Leistung. Alle Energie steckt auch in der Information. Beim DMT hingegen ist die Amplitude des Signals etwa gaußförmig verteilt. Da es kein negatives Licht gibt, wird um einen Wert herum moduliert, der etwa auch die mittlere optische Leistung ergibt. Nur ein kleiner Teil der optischen Leistung steckt in der Information (das ist bei Funk und Kupfer anders, da hier das modulierte elektrische Feld „Plus“ und „Minus“ hat). Um bei DMT überhaupt einen sinnvollen Anteil der Energie nutzen zu können, schneidet man die Signalspitzen ab (Clipping). Die dabei entstehenden Fehler müssen hinterher durch FEC wieder korrigiert werden. Die Verhältnisse zeigt Bild 9.

Vergleich der Modulationsverfahren

Wie man sieht, werden die Vorteile der bandbreiteneffizienten Modulationsverfahren durch die spezifischen Nachteile der optischen Übertragung (mit Intensitätsmodulation) wieder relativiert.

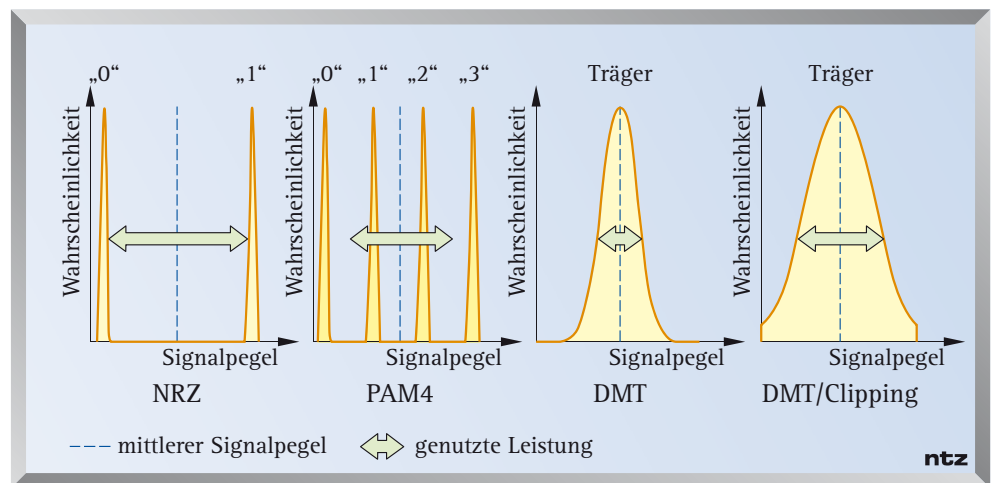


Bild 9. Verhältnis von mittlerer und genutzter optischer Leistung

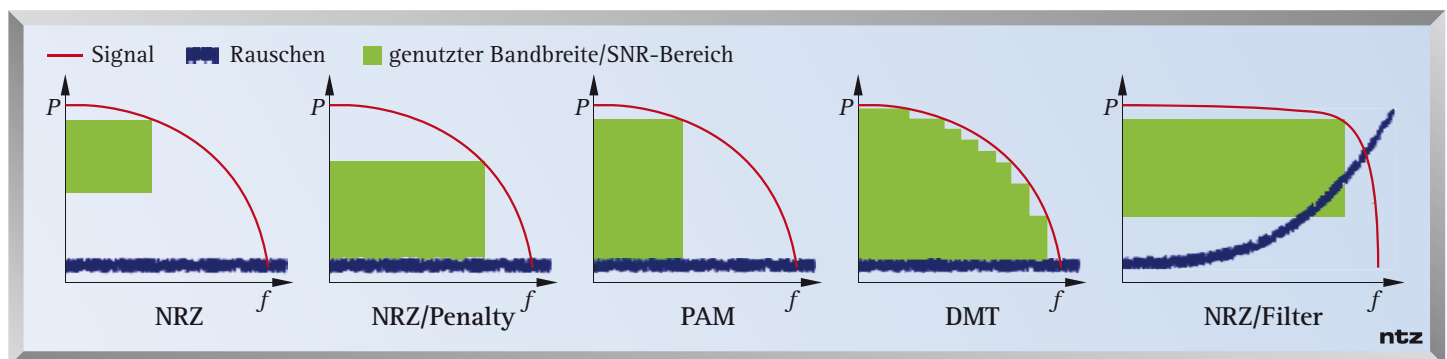


Bild 8. Ausnutzung der Kanalkapazität der POF (typische POF-Übertragungsfunktion)

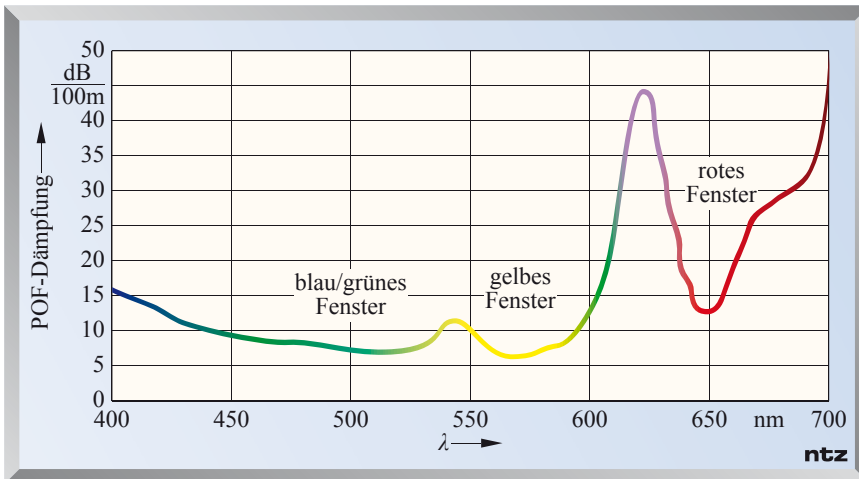


Bild 10. Dämpfung der PMMA-POF

Tatsächlich wurden bisher im Experiment auch mit entzerrten NRZ-Systemen die höchsten Bitraten von 2 Gbit/s über 100 m SI-POF erzielt. Mit PAM und DMT werden aber kaum schlechtere Ergebnisse erreicht.

Speziell für PAM sind aktuell schon neue Ideen in Entwicklung. Auch mit Vorverzerrung kann der POF-Kanal besser ausgenutzt werden (dazu sind eine Kanalvermessung und eine Rückübertragung der Kanaldaten nötig). Die verwendete optische Leistung kann durch die (nichtlineare) Tomlinson-Harashimavorkodierung [3] viel besser als bei den

herkömmlichen Verfahren ausgenutzt werden.

Weitere wichtige Fragen in Zusammenhang mit PAM-Modulation sind die Kanalschätzung und Kanalkodierung. Schnelle und zuverlässige Kanalschätzungen, die kontinuierlich die Übertragungsfunktion und das Rauschen messen, ermöglichen die Anpassung der Entzerrer, Vorverzerrer und der Datenrate an jede beliebige installierte POF. Die Kombination von PAM mit effizienten Fehlerkorrekturmechanismen erlaubt es, die Lücke zur theoretischen Shannon-Grenze zu verringern. Das verbessert Ge-

schwindigkeit und Qualität der Übertragung auf POF unter sonst gleichen Bedingungen gegenüber anderen Verfahren. Auch dieses Verfahren wird im Arbeitskreis aktuell intensiv diskutiert.

Laser oder LED als POF-Lichtquellen

Neben der Frage der optimalen Faser und des bestmöglichen Modulationsverfahrens ist natürlich auch die verwendete Quelle wichtig. POF arbeiten im sichtbaren Bereich (zumindest die aus PMMA), wie Bild 10 zeigt.

Die geringsten Verluste hätte eine POF um 570 nm herum. Leider gibt es hier nur sehr ineffektive und langsame LED. Die zweitbeste Option sind Wellenlängen von 450 nm bis 530 nm. Hier sind LED schon extrem effizient und relativ schnell, leider gibt es aber keine (bezahlbare) Laserdioden. Das Minimum im roten Spektralbereich ist ziemlich schmal (Änderungen der Sendewellenlänge mit der Temperatur führen schnell zu hoher Zusatzdämpfung) und nicht so niedrig wie die anderen beiden. Bei 650 nm sind aber sowohl effiziente LED und RC-LED (Resonant Cavity LED) als auch Laser und VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) verfügbar.

Nachfolgend ist der aktuelle Stand der verfügbaren Sender für POF-Systeme zusammengestellt, Tabelle 1. Als LED werden dabei alle herkömmlichen Flächenemitter ohne resonante Strukturen bezeichnet. Resonant-Cavity-(RC-)LED sind LED mit Bragg-Spiegeln unter und über der aktiven Schicht, die schon teilweise zur Lichtverstärkung beitragen, ohne dass es zum Laserbetrieb kommt. Als Laserdioden (LD) werden hier herkömmliche Kantenemitter verstanden, VCSEL sind Oberflächenemitter mit integrierten Braggspiegeln.

Schnell sieht man, dass aktuell eigentlich nur Laserdioden für die NRZ-Übertragung von 1 Gbit/s in Frage kommen. VCSEL wären ideal, können aber nicht bis 70 °C verwendet werden. LED und RC-LED sind nicht schnell genug, würden aber u.U. ausreichend Bandbreite für PAM oder DMT bieten. Viele Anwender schrecken vor kantenemittierenden Lasern zurück. Gründe dafür sind die schwierige Montage und der hohe und zudem stark temperaturabhängige Schwellenstrom. Also verbleibt die LED (vor allem die RC-LED) mit einer bandbreiteneffizienten Modulation?

	Bemerkungen	typische Parameter
LED	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenstrahler • sehr billig • einfache Montage • hohe Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> • bei 650 nm verfügbar • von UV bis etwa 530 nm • typ. 50 MHz Bandbreite • bis 85°C verwendbar • breites Spektrum
RC-LED	<ul style="list-style-type: none"> • Sonderform der LED mit zusätzlichen Spiegeln • wird schon für POF verwendet 	<ul style="list-style-type: none"> • bei 650 nm verfügbar • typ. 150 MHz Bandbreite • bis 85°C verwendbar • schmales Spektrum
Laserdiode	<ul style="list-style-type: none"> • Kantenemitter • sehr effizient • sehr schnell (> 1 Gbit/s) • relativ teuer (1 US\$) • schwierige Montage • stark temperaturabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • nur bei 650 nm • sehr schmales Spektrum • typisch 2 GHz Bandbreite • 10 mW bei 40 mA Strom • typ. 25 mA Schwellenstrom
VCSEL	<ul style="list-style-type: none"> • oberflächenemittierender Laser • extrem schnell (10 Gbit/s) • effizient • einfache Montage • (noch) relativ teuer 	<ul style="list-style-type: none"> • typ. 665 nm Wellenlänge • 1 mW Leistung • typ. 5 GHz Bandbreite • niedriger Schwellenstrom (2 mA) • bis + 40°C verwendbar

Tabelle 1. Heute verfügbare Sender für POF



	bisheriger Nachteil	Lösungsansatz
rote VCSEL	nicht bei hohen Temperaturen verwendbar	durch eine Verbesserung der Wärmeableitung von der aktiven Schicht könnte der Einsatztemperaturbereich beträchtlich ausgedehnt werden (z. B. [4])
blaue/grüne LED	nicht schnell genug	blaue und grüne LED aus GaN sind inhärent schnell; durch eine Verkleinerung der aktiven Zone und ein HF-Design könnten sie Gigabit mit NRZ-Modulation ermöglichen
blaue LD	viel zu teuer	mit dem Masseneinsatz blauer Laser für Laufwerke dürften die Preise auch hier schnell fallen

Tabelle 2. Zukünftig mögliche Sender für POF

Dieses Bild könnte falsch sein. Bislang haben die großen Halbleiterhersteller noch gar nicht versucht, optimale Sender für schnelle POF-Systeme zu entwickeln. Wie Tabelle 2 zeigt, könnten schon in naher Zukunft viel bessere Sender zur Verfügung stehen.

Noch steht das beste Verfahren nicht fest

Leider ist die Antwort auf die Frage nach dem optimalen Verfahren nicht sofort klar. Vom Standpunkt der optimalen Ausnutzung des Kanals gewinnt derzeit DMT. Auf der anderen Seite ist NRZ das einfachste Verfahren und nutzt die optische Leistung optimal. Experimentell liegen zwischen den erreichten Ergebnissen nur mäßige Differenzen, zumal die verschiedenen Experimente nicht immer mit den gleichen Komponenten erreicht wurden. Auch PAM könnte mit den (für POF-Systeme) neuesten effizienten Verfahren noch einmal ins Spiel kommen. In Tabelle 3 werden einige der Vor- und Nachteile der beschriebenen Verfahren zusammengestellt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Endgültigkeit).

Neben den Forderungen nach optimaler Nutzung von Bandbreite und Signal-Rausch-Verhältnis müssen auch noch andere technische Punkte berücksichtigt werden:

- Ist das Verfahren kompatibel zu älteren Systemen?
- Lässt sich ein Ruhemodus einfach implementieren (kurze Aktivierungszeiten)?
- Wie groß ist der Leistungsverbrauch?
- Wie aufwendig ist das IC-Design und wie groß wird der Chip?
- Kann sich das Verfahren auf einen schlechter werdenden Kanal adaptieren (z. B. mit einer verringerten Bitrate)?

Der Arbeitskreis 412.7.1 des DKE hat sich zum Ziel gesetzt, noch in diesem Jahr alle diese Fragestellungen zu untersuchen und als Ergebnis eine Anwendungsregel zu erarbeiten. Ein gemeinsames Vorgehen der beteiligten Hersteller soll garantieren, dass zukünftige POF-Produkte untereinander kompatibel bleiben. Endziel soll eine standardisierte POF-Schnittstelle sein.

Nach dem aktuellen Stand der Diskussion kommen verschiedene Modulationsformate in Frage. Beispielsweise ist NRZ-Modulation mit adaptiver digitaler Filterung erstaunlich leistungsfähig. Dieses Verfahren hat im Experiment und in der Simulation bewiesen, dass es durchaus so leistungsfähig ist, wie die anderen Verfahren, dabei ist es aber weniger komplex und weniger anfällig für Nichtlinearitäten in den Komponenten.

	Vorteile	Nachteile
NRZ + Filter	<ul style="list-style-type: none"> • sehr einfaches System • optimale Nutzung der optischen Leistung 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Bandbreite für Sender und Empfänger
DMT mit Clipping	<ul style="list-style-type: none"> • optimale Nutzung der Kanalkapazität • adaptiv • niedrige Bandbreite 	<ul style="list-style-type: none"> • nicht optimale Nutzung der optischen Leistung • erfordert immer FEC • komplexe Signalverarbeitung
PAM 2 ⁿ	<ul style="list-style-type: none"> • relativ einfach • kleine Bandbreiten für Sender und Empfänger 	<ul style="list-style-type: none"> • beeinträchtigt durch Sender-Nichtlinearitäten

Tabelle 3. Vor- und Nachteile der verschiedenen Modulationsverfahren

Im Labor wurden bislang 2 Gbit/s über 100 m realisiert. Als Parameter für ein Endprodukt streben wir 1 Gbit/s über 50 m an. Diese Entfernung ist in praktisch allen Wohngebäuden ausreichend und Gigabit-Ethernet dürfte mittelfristig die wichtigste Verbindung in privaten LAN sein. Mit diesen reduzierten Anforderungen sinkt das benötigte Signal-Rausch-Verhältnis um etwa 15 dB. Das sollte ausreichen, um alle Anforderungen an Biegungen, zusätzliche Kupplungen, Alterungen und Exemplarstreuung zu erfüllen und dennoch extrem robuste Systeme zu realisieren.

Eine weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit und eine Reduktion der Kosten sind zu erwarten, wenn komplett integrierte Empfänger verfügbar werden, wie sie derzeit in Entwicklung sind ([5–7]).

Die wichtigste Frage, die noch zu beantworten ist, besteht in den Erwartungen an die Senderentwicklung. Beschränkt man sich auf die heute verfügbaren LED, schränkt man sich vielleicht zu stark ein und wählt das falsche Verfahren.

Die hier vorgestellten (vorläufigen) Ergebnisse werden in den nächsten Monaten weiter im DKE-Arbeitskreis 412.7.1 diskutiert werden. Das nächste Ziel wird es sein, die Ergebnisse dann auch in internationale Standards zu integrieren. Alle Interessenten aus Forschung und Industrie sind herzlich eingeladen, sich an dieser Gruppe aktiv zu beteiligen, um am Ende einen möglichst breiten und tragfähigen Konsens zu erzielen.

Literatur

- [1] Gaudio, R. u. a.: Advanced modulation format for high speed transmission over standard SI-POF using DSP/FPGA platforms. Proc. POF '2004, Nürnberg, 27. – 30.9.2004, S. 98 – 105
- [2] Ziemann, O. u. a.: The Development of Gbps over SI-POF Systems in the POF-ALL Project. POF '2008, Santa Clara, 26. – 28.8.2008
- [3] Fischer, R.; Huber, J.: Signalformung zur Begrenzung der Dynamik bei der Tomlinson-Harashima-Vorcodierung. Proc. ITG-Fachtagung „Kodierung für Quelle und Kanal“, München 1994, S. 457 – 466
- [4] Wiesner, M. u. a.: Red VCSEL (655 nm) for POF applications. Kölner Kabeltagung, 15. – 16. 12.2009
- [5] Leeb, J.: Low-cost high-performance silicon OEICs for mass market POF receiver applications. 22. Fachgruppen-Tagung der ITG-FG 5.4.1, München, 25. 10.2009
- [6] www.kdpof.com
- [7] Silicon Line pushes its world-record 10 mW ultra-low power PHY-Layer IC set to 3 Gbps. Pressemitt. Silicon Line, München, 28. 10. 2009