

Gbit/s-Übertragung auf SI-POF

H. Steinberg¹⁾, P. E. Zamzow²⁾, O. Ziemann³⁾, L. Giehmann³⁾:

¹⁾ Alcatel autoelectric, Vohenstraußer Str. 20, D-92685 Floss/Germany
Tel./Fax.: +49 9603 20 137/-233, e-mail: hsteinberg@autoelectric.de

²⁾ Alcatel Kabel AG & Co, Kabelkamp 20, D-30179 Hannover/Germany
Tel./Fax.: +49 511 676 2382/-2383, e-mail: peter.zamzow@wha.acab.aclatel.de

³⁾ T-Nova GmbH, Technologiezentrum, Goslarer Ufer 35, D-10589 Berlin/Germany
Tel./Fax.: +49 30 3497-4442/-4443, e-mail: olaf.ziemann@telekom.de

1. Vorbetrachtung:

Im Automobilbereich werden zunehmend digitale Übertragungssysteme für eine Vielzahl von Aufgaben eingesetzt. Dazu gehören sowohl Meß- und Steuersysteme, als auch Audio- und Videosysteme. Die steigenden Datenraten werden sich in zunehmendem Maße nur noch kostengünstig mit optischen Systemen bewältigen lassen. Bereits heute sind Serienfahrzeuge mit dem optischen D²B-Bus (Digital Domestic Bus) ausgestattet. Vor der Serienreife befindet sich der MOST-Bus mit Datenraten bis 50 Mbit/s. Auch die mittelfristige Verwendung des IEEE1394-Standards im Fahrzeug mit Datenraten bis 400 Mbit/s erscheint möglich.

Als Kabel werden in diesem System Optische Polymerfasern (POF) mit 1 mm Durchmesser verwendet. Der große Querschnitt der Faser und die große Flexibilität ermöglicht sehr preiswerte Montage- und Anschlußtechnik.

Im Rahmen dieses Beitrags soll gezeigt werden, daß auf derartigen Fasern über die im Fahrzeug typischen Entfernungen unter 10 m auch Datenraten im Gbit/s-Bereich übertragen werden können. Damit ist die Kompatibilität der eingesetzten Technologie für die folgenden Entwicklungsstufen der digitalen Systeme sichergestellt. Steigende Bitratenanforderungen, beispielsweise durch elektronische Spiegel, komplexere Navigationssysteme usw. könnten ohne Wechsel des Übertragungsmediums realisiert werden.

Von den Verfassern wurde eine Punk-zu-Punkt-Übertragung mit preiswerten 650 nm Laserdioden und Si-pin-Dioden-Empfängern realisiert. Es wurden Standard-NA-POF mit NA = 0,48 verwendet. Bitfehlerwahrscheinlichkeiten von kleiner 10^{-13} konnten dabei für folgende Bitraten-Längen-Kombinationen erzielt werden.

- 1.200 Mbit/s über 10 m Standard-POF (1 mm Kern, NA = 0,48)
- 800 Mbit/s über 20 m Standard-POF (1 mm Kern, NA = 0,48)

Zur Kompensation der Bandbreitebegrenzung insbesondere im Empfänger wurde ein passives Peaking-Filter vor dem Laser verwendet. Ein- und Auskopplung erfolgten ohne abbildende optische Elemente. Damit konnte grundsätzlich gezeigt werden, daß die angestrebten Leistungsparameter mit einfachen Komponenten erreichbar sind.

2. Systemkonzept für POF

Sender:

Typischerweise werden für Polymerfasern Quellen bei 650 nm verwendet. Für Übertragungen über Entfernungen von 100 m und mehr können Quellen bei 520 nm oder 570 nm eingesetzt werden. Bei sehr viel kürzeren Strecken kommen auch die Fenster bei 780 nm oder 830 nm in Frage. Bild 1 zeigt das Dämpfungsspektrum einer typischen PMMA-POF ([1]) und mögliche Wellenlängen für Sender mit Angabe der Dämpfung für eine 10 m-Strecke.

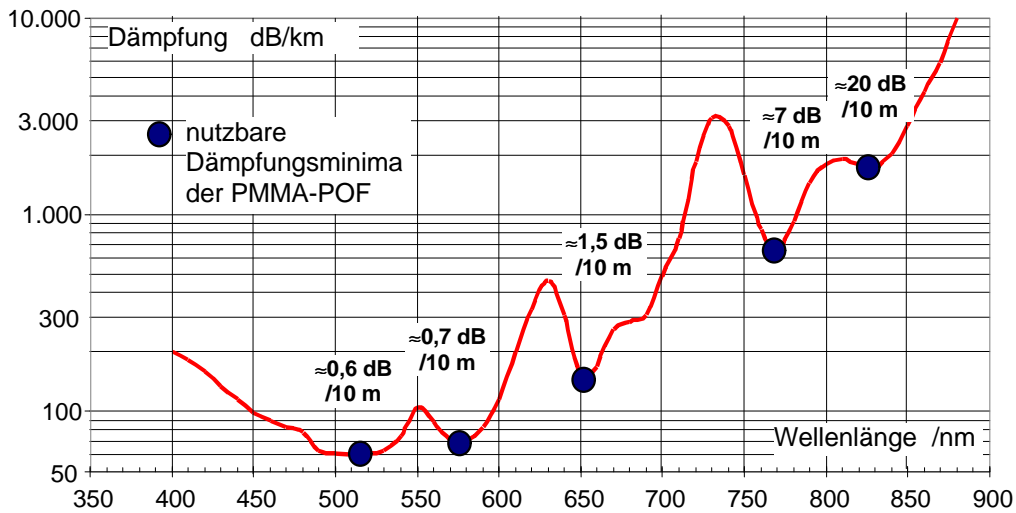


Bild 1: Mögliche Anwendungsfenster der PMMA-POF

Im Rahmen der bisherigen Systeme wurden vorrangig 650 nm-Quellen verwendet. Für die in diesem Beitrag vorgestellten Experimente wurde eine 650 nm Laserdiode mit einer Bandbreite von über 1.000 MHz ([2]) verwendet. Das gestattet bei NRZ-Kodierung bis 2 Gbit/s Übertragungsrate. Typische SI-POF mit einer Numerischen Apertur (NA) um 0,50 besitzen eine Bandbreite von 40 MHz·100 m. Durch Einstrahlung mit niedrigerer NA und Kompensation der Dispersion konnte über 100 m bereits die Übertragung von 500 Mbit/s im Labor realisiert werden ([3], [4]). Über Entfernungen unter 10 m sollte eine Bitrate über 1 Gbit/s damit trotz der hohen Dispersion möglich sein. In Bild 2 werden die theoretischen Reichweiten (leistungsbegrenzt) mit verschiedenen bekannten Quellen gezeigt.

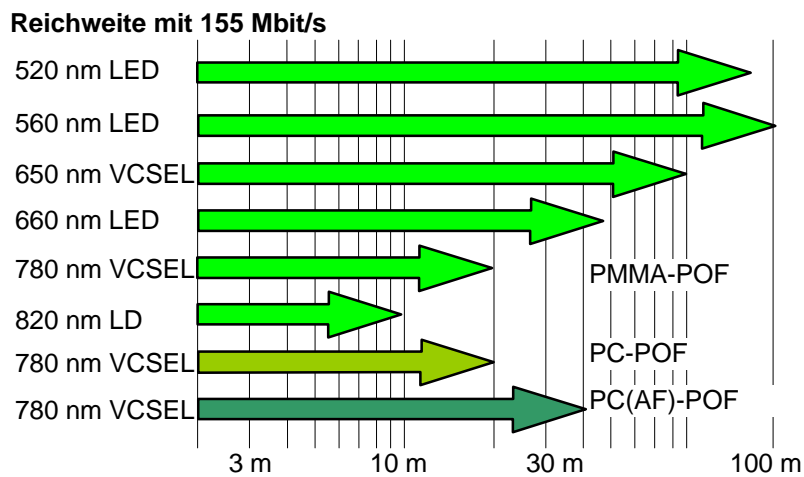


Bild 2: Theoretische Reichweiten mit verschiedenen Quellen

3. Bisherige Systeme mit 1 mm Stufenindex-POF

Heute verfügbare kommerzielle Systeme für den Telekommunikationsbereich arbeiten mit 650 nm SLED (z.B. HFBR 5527 von Hewlett Packard, NL 2100 von NEC). Damit werden für Datenraten von 125 Mbit/s (Ethernet) und 155 Mbit/s (ATM) Reichweiten von 50 m realisiert. In verschiedenen Versuchsaufbauten können diese Komponenten auch für Entfernungen bis zu 100 m eingesetzt werden. Für IEEE 1394 wird eine Kapazität von 250 Mbit/s (S200) über eine Entfernung von 70 m angestrebt (NL 2110 von NEC in Mustern verfügbar). Alle diese Systeme arbeiten mit Doppelstufenindexfasern (DSI-POF) gemäß der Spezifikation des ATM-Forums ([5]).

Herkömmliche Standard-POF mit Numerischen Aperturen um 0,50 eignen sich grundsätzlich für Datenraten bis 50 Mbit/s über Entfernungen von 100 m. Schon vor mehreren Jahren konnte gezeigt werden, daß auch mit der Standard-POF beträchtliche Bitraten übertragen werden können. Kaiser zeigte 1992 die Übertragbarkeit von 140 Mbit/s über 120 m (in [3]). Bates und Yaseen zeigten 1992 und 1993 in [3] und [4] die Übertragbarkeit von 265 Mbit/s bzw. 531 Mbit/s über jeweils 100 m Standard-POF (Mitsubishi ESKA Extra EH001 mit $NA = 0,47$ und 139 dB/km Dämpfung bei 652 nm). Als Quelle wurde jeweils ein Laser Philips CQL 82 mit 652 nm Wellenlänge und einer Ausgangsleistung von 2,7 mW verwendet. Als Empfänger diente eine Photodiode BPW 89 (4,9 pF Kapazität bei 20 V Sperrspannung) mit folgendem GaAs-HEMT-Verstärker. Die große Bandbreite konnte durch verschiedene Maßnahmen realisiert werden:

- Einstrahlung mit kleiner $NA = 0,11$, dadurch werden nur wenige Moden mit geringen Laufzeitunterschieden angeregt.
- Vorverzerrung des LD-Ansteuersignals (Peaking) mit Hochpaß ($33 \text{ pF} \parallel 51 \Omega$).
- Auskopplung mit geringerer NA (Moden mit großen Laufzeitdifferenzen werden ausgeblendet)
- Dispersionskompensation hinter dem Empfänger mit Hochpaß ($8 \text{ pF} \parallel 200 \Omega$).

Bild 3 zeigt schematisch die Summe der Maßnahmen.

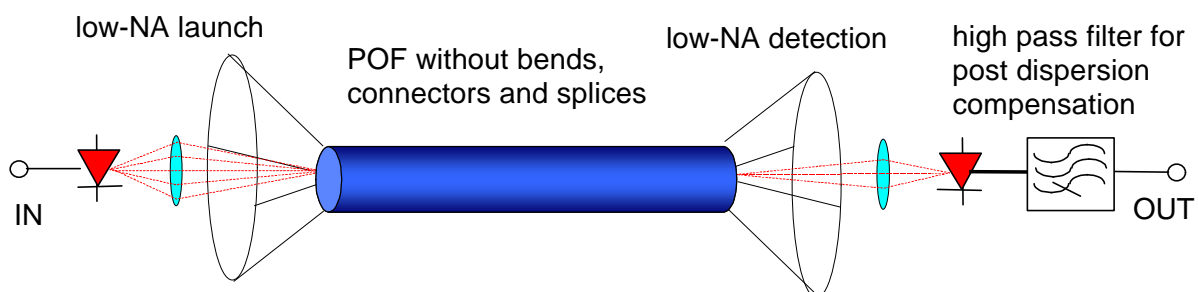


Bild 3: Maßnahmen zur Bandbreitevergrößerung

Nach Wissen der Verfasser stellt dieses System bisher den Bestwert bzgl. des Bitraten-Längen-Produktes für Standard-POF dar. Alle späteren Experimente im Gbit/s-Bereich wurden mit Gradientenindex-POF durchgeführt.

An der UNI Ulm wurden Experimente mit höheren Datenraten über kürzerer Entfernungen mit Standard-POF durchgeführt ([6]). Dabei wurden als Quellen VCSEL mit 780 nm Wellenlänge verwendet. Über 15 m Standard-POF wurden 900 Mbit/s fehlerfrei übertragen (Höchst EP 51 mit $NA = 0,46$ und 90 MHz·100 m Bandbreite). Bei Verwendung einer DSI-POF konnte 1 Gbit/s übertragen werden (Mitsubishi MH 4001 mit $NA = 0,32$ und 150 MHz·100 m Bandbreite).

Die folgende Tabelle faßt die beschriebenen Systeme zusammen:

Quelle	Faser	Länge	Bitrate	Kapazität	Sender
Kaiser 1992	SI-POF	100 m	140 Mbit/s	14,0 Mbit/s·km	650 nm LD
Bates 1992	SI-POF	100 m	265 Mbit/s	26,5 Mbit/s·km	652 nm LD
Yaseen 1993	SI-POF	100 m	531 Mbit/s	53,1 Mbit/s·km	652 nm LD
UNI Ulm 1999	SI-POF	15 m	900 Mbit/s	13,5 Mbit/s·km	780 nm VCSEL
T-Nova 2000	SI-POF	10 m	1.200 Mbit/s	12,0 Mbit/s·km	650 nm LD
T-Nova 2000	SI-POF	20 m	800 Mbit/s	16,0 Mbit/s·km	650 nm LD
HP, Ethernet	DSI-POF	50 m	125 Mbit/s	6,2 Mbit/s·km	650 nm SLED
NEC, ATM155	DSI-POF	50 m	155 Mbit/s	7,8 Mbit/s·km	650 nm SLED
NEC, IEEE1394	DSI-POF	70 m	250 Mbit/s	17,5 Mbit/s·km	650 nm SLED
Sony, 1998	MC-POF	50 m	500 Mbit/s	25,0 Mbit/s·km	650 nm LD
Matsushita, 1998	MSI-POF	50 m	500 Mbit/s	25,0 Mbit/s·km	650 nm RC-LED

In Bild 5 werden die oben beschriebenen Systeme hinsichtlich ihrer Bitrate und Reichweite zusammengestellt. Mit Vielkern- und Vielstufenindex-POF konnten bereits 500 Mbit/s über 50 m realisiert werden.

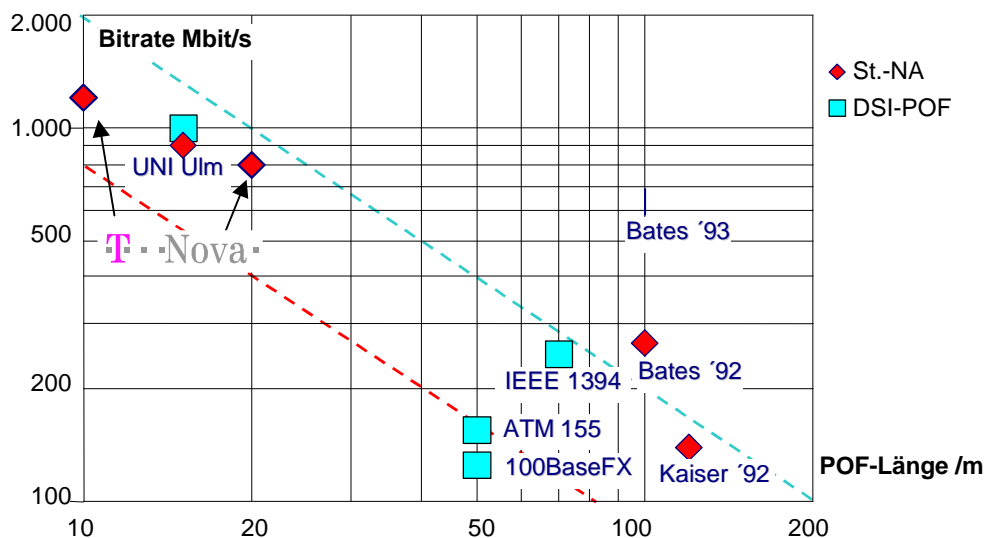


Bild 5: Zusammenstellung bisheriger SI-POF-Systeme (1 mm Durchmesser)

Im Bild sind neben den eigentlichen Experimenten die theoretischen Limits der Fasern bei Anregung im Modengleichgewicht eingezeichnet (ideale NRZ-Kodierung mit 3 dB-Bandbreite der Faser = $\frac{1}{2}$ Bitrate):

- SI-POF: $40 \text{ MHz} \cdot 100 \text{ m} \cong 80 \text{ Mbit/s} \cdot 100 \text{ m}$
- DSI-POF: $100 \text{ MHz} \cdot 100 \text{ m} \cong 200 \text{ Mbit/s} \cdot 100 \text{ m}$

4. Wellenlängen-Multiplex für Asymmetrische Datenverbindungen

Falls in den nächsten Jahren die hier betrachteten sehr großen Übertragungsraten auftreten, ist mit stark asymmetrischem Bedarf zu rechnen. Das bedeutet, daß in Rückrichtung nur kleinere Datenraten anfallen. Die Übertragung verschiedener Datenströme über nur eine Faser (im Gegensatz zur Duplexfaserlösung) ist besonders effektiv mit WDM zu lösen (siehe auch [7]).

Dazu kommen zwei unterschiedliche Konzepte in Frage:

Asymmetrische Koppler:

Durch Verwendung asymmetrischer Koppler erfährt der niederratige Kanal eine größere Dämpfung. Aufgrund der besseren Empfindlichkeit des Empfängers (kleinere Rauschbandbreite) kann dennoch eine gleich gute Übertragungsqualität gesichert werden. Denkbar ist hier ein 520 nm/650 nm Multiplex (Bild 6).

Symmetrischer Koppler:

Bei Verwendung symmetrischer Koppler nutzt man für den höherratigen Kanal die Wellenlänge, die die geringste Faserdämpfung ergibt. Für den niederratigeren Kanal kann die höhere Dämpfung bei einer anderen Wellenlänge aufgrund der besseren Empfindlichkeit akzeptiert werden (Bild 7).

In Tabelle 2 sind Eigenschaften verfügbarer Quellen zusammengestellt:

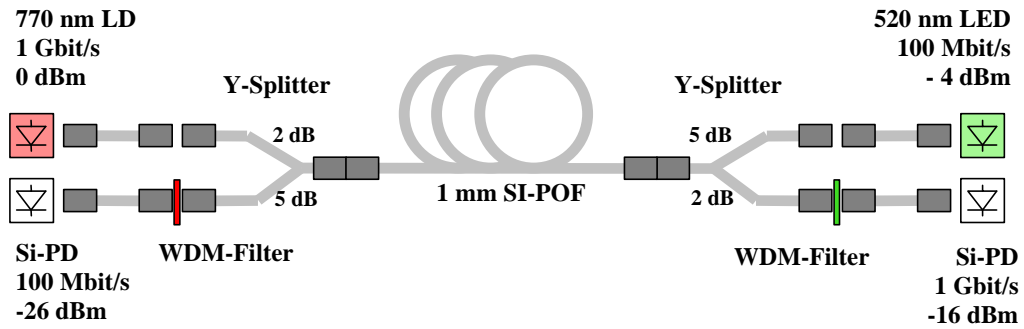


Bild 6: Konzept für WDM mit asymmetrischen Kopplern

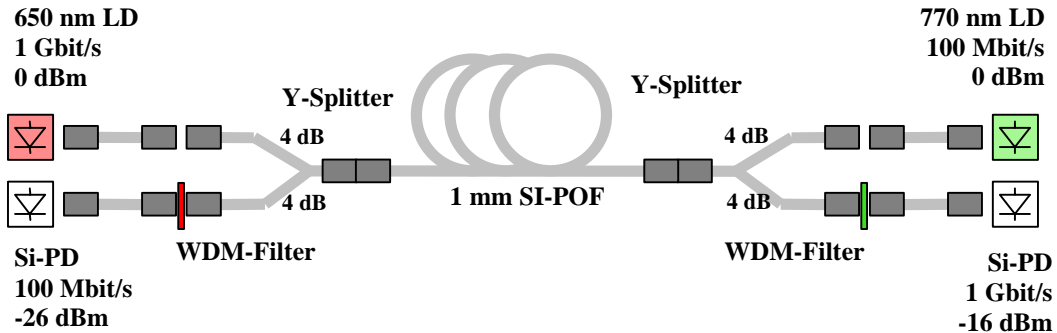


Bild 7: Konzept für WDM mit symmetrischen Kopplern

Quelle	P _{opt} (typ.)	Dämpfung (PMMA-POF)	max. Bitrate	Bemerkung
520 nm LED	2 mW	90 dB/km	200 Mbit/s	verfügbar
560 nm LED	1 mW	70 dB/km	100 Mbit/s	Muster
650 nm SLED	2 mW	250 dB/km	250 Mbit/s	verfügbar
650 nm LD	5 mW	150 dB/km	2.500 Mbit/s	verfügbar
650 nm RC-LED	3 mW	180 dB/km	500 Mbit/s	Muster
650 nm VCSEL	0,5 mW	180 dB/km	2.500 Mbit/s	Muster
780 nm VCSEL	3 mW	700 dB/km	10.000 Mbit/s	verfügbar

Tab. 2: Eigenschaften von möglichen Quellen für POF-WDM

Unter Beachtung der notwendigen Datenraten und der zur Verfügung stehenden Leistungsreserven können damit unterschiedliche WDM-Systeme kombiniert werden.

5. Experimenteller Aufbau Gbit/s-Übertragung über POF

Die hier beschriebenen Versuche wurden mit einem 650 nm Laser SLD 1133 VL des Herstellers Sony durchgeführt. Die Parameter des Lasers sind:

- Sony SLD 1133VL (für DVD, Laserpointer und Barcodeleser), Indexgeführt
- Materialsystem: AlGaInP, SQW-Struktur
- longitudinal einmodig
- $\lambda = 657,5 \text{ nm}$ (bei 20°C)
- max. 7 mW Ausgangsleistung
- Abstrahlwinkel (FWHM): $\theta_{\perp} = 30^{\circ}, \theta_{\parallel} = 8^{\circ}$
- Bitrate mit Vorverzerrungs-Filter > 1.200 Mbit/s
- $I_{th} = 50 \text{ mA}$ (bei 20°C)

Die Ankopplung der Faser an den Laser erfolgte mit Hilfe eines V-pin-Steckers (HFBR 4501), der in die Bohrung des Kühlkörpers gesteckt wird. Dank des relativ kleinen Abstrahlwinkels ergibt sich ein zufriedenstellender Koppelwirkungsgrad. Die POF (Akzeptanzwinkel $\pm 29^\circ$) wird unterangeregt. Für den Empfänger wurden verschiedene Si-pin-Photodioden untersucht. Als einzig verwendbare wurde daraus die Hamamatsu S5052 ausgewählt:

- Si-pin-Photodiode Hamamatsu S5052
- 3 mm Durchmesser (Linse), 630 μm Chipdurchmesser
- Responsivität: 0,46 A/W bei 800 nm (71% QWG)
- Kapazität: 4 pF bei 5 V Sperrspannung, 3,6 pF bei 20 V Sperrspannung
- bis 200 MHz spezifiziert (an 50 Ω)

Um eine ausreichend große Bandbreite trotz der relativ großen Diodenkapazität erreichen zu können wurde ein sehr niederohmiger Empfänger (ca. 10 Ω) verwendet. Bild 8 zeigt den Aufbau des Empfängers:

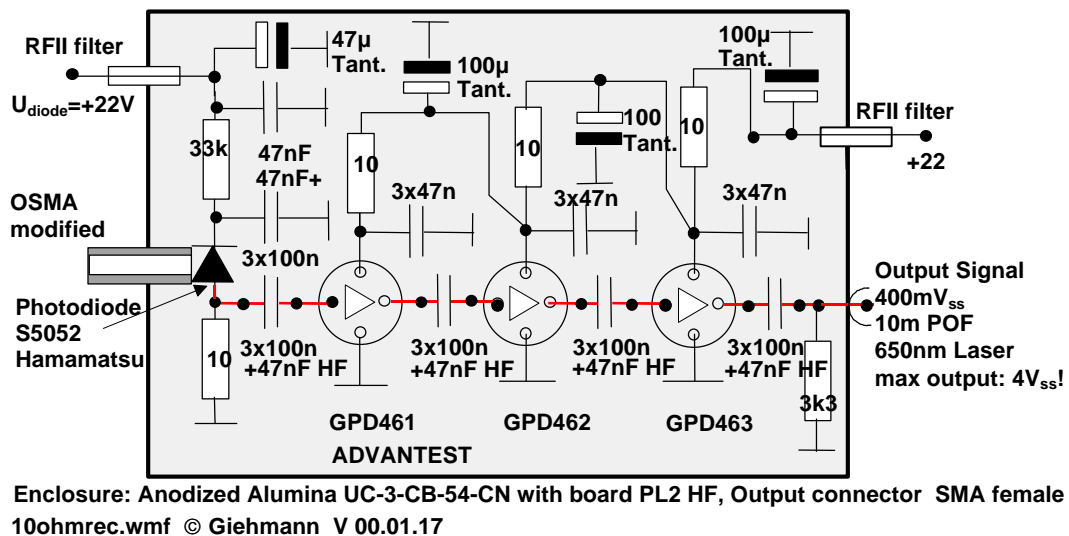


Bild 8: Niederohmiger Breitbandempfänger

Die POF wurde über einen optischen SMA-Stecker an die Photodiode angekoppelt. Aufgrund der verwendeten Koppel-Kondensatoren können bei Rahmenlängen von 127 Bit (2^7-1) Datenraten von 50 Mbit/s bis zu 1,2 Gbit/s verarbeitet werden. Bandbreitebegrenzend wirkt im wesentlichen die Kapazität der Photodiode.

Für die Bitratenmessungen stand ein BER-Analysemeßplatz Anritsu 522A zur Verfügung. Dieser arbeitet bis 700 Mbit/s. Mit Hilfe des zusätzlichen Multiplexers/Demultiplexers kann die Datenrate verdoppelt werden. Somit konnten die geforderten 1 Gbit/s untersucht werden.

Es wurde eine 1 mm-Standard-NA-POF verwendet. Die PFU-CD-1000E-22-E von Toray besitzt eine $NA = 0,46$ und ist im Temperaturbereich von -40°C bis $+85^\circ\text{C}$ einsetzbar. Der Mantel ist aus PE. Für die Messungen war die POF in einem Ring mit ca. 20 cm Durchmesser aufgewickelt. Alle Stecker wurden poliert (3 μm Körnung).

Die Bandbreite der POF kann mit ca. 40 MHz·100 m bei Anregung im Modengleichgewicht abgeschätzt werden. Dies gestattet normalerweise keine Übertragung von 1 Gbit/s über 10 m. Es ist aber bekannt, daß zur Einstellung des Modengleichgewichts in der POF einige 10 m Faserlänge notwendig sind. Strahlt man in die Faser mit einem Winkel deutlich unterhalb des Akzeptanzwinkels ein, erhöht sich die Bandbreite gegenüber Anregung im Modengleichgewicht beträchtlich. Erst bei Übertragungslängen deutlich über 100 m verschwindet dieser Effekt.

Zusätzlich zum Effekt der Bandbreitenvergrößerung durch Unteranregung wurde zwischen Laserdiode und Sender ein zweistufiges Vorverzerrungsfiler (abstimmbar) eingesetzt. Damit wurde im wesentlichen die Bandbegrenzung des Empfängers kompensiert. Bild 9 zeigt die Laser-Ansteuersignale ohne und mit Peaking. Bild 10 zeigt die Spektren der beiden Signale im Vergleich.

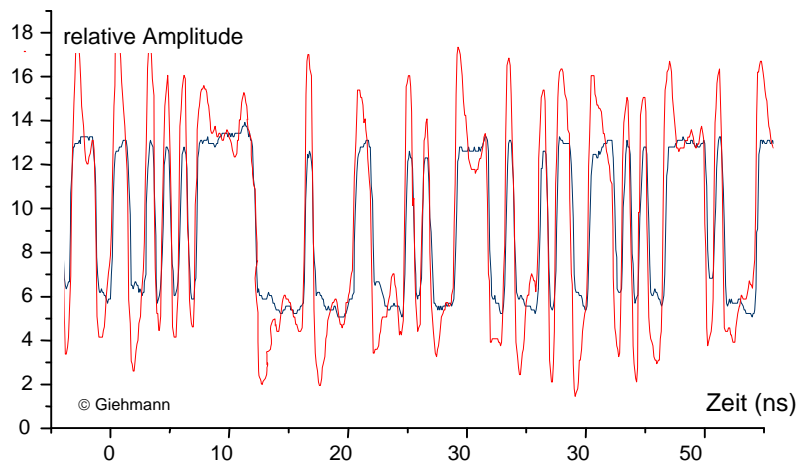


Bild 9: LD-Ansteuersignal mit und ohne Peaking (1,2 Gbit/s)

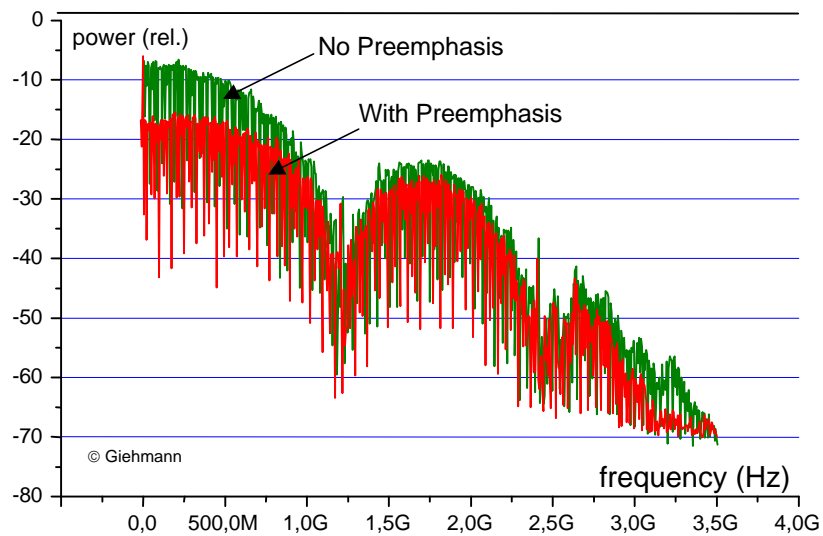


Bild 10: Signalspektrum Laseransteuerung mit und ohne Peaking

Die Signalabsenkung bei niedrigen Frequenzen um ca. 10 dB ist gut zu erkennen. Mit dieser Maßnahme wurde in einem Dauerversuch über 88 h eine fehlerfreie Datenübertragung von 1,2 Gbit/s über 10 m POF realisiert. Die Bilder 11 zeigt das Signal hinter dem optischen Empfänger.

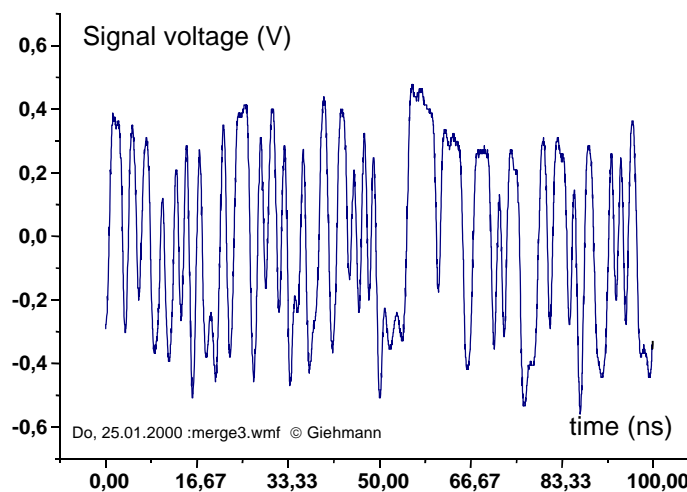


Bild 11: Signal hinter dem optischen Empfänger

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt, daß Datenraten von 1 Gbit/s über Entfernungen von bis zu 10 m, wie sie im Automobilbereich typisch sind, mit relativ einfachen Mitteln und preiswerten Komponenten übertragen werden können. Dabei ist die Verwendung heute breit verfügbarer PMMA basierender Stufenindexfasern mit einer Numerischen Apertur um 0,50 vorausgesetzt. Der Umstieg von Kupferkabeln auf optische Systeme mit Polymerfasern zum jetzigen Zeitpunkt bei notwendigen Datenraten im Bereich von 5 bis 50 Mbit/s bietet also genügend Kapazitätsreserven für weitere Systemgenerationen. Diese könnten beispielsweise auf IEEE 1394 (S400 oder S800) basieren.

Um die Sicherheit der Systeme zu erhöhen und den Aufwand weiter zu senken sind mittelfristig bidirektionale Einfaserlösungen möglich. Speziell für den typischen Einsatzfall stark asymmetrischer Datenraten bieten sich eine Vielzahl von Möglichkeiten auf Basis von Wellenlängenmultiplex an.

Literatur:

- [1] Laser Components Katalog, 1996, S. 55
- [2] Ulli Braun: "Untersuchung von 650 nm VCSEL als POF-Sender" Diplomthema D21, Diplomarbeit am TZD, Febr. – Juni 1999
- [3] R. J. S. Bates, S. D. Walker, M. Yaseen: „A 265 Mbit/s, 100 m Plastic Optical Fibre data Link using a 652 nm Laser Transmitter for Customer Premises Network Applications“, ECOC'92, Vol.1, pp 297-300
- [4] M. Yaseen, S. D. Walker, R. J. S. Bates: „531 Mbit/s, 100-m all-plastic optical-fiber data link for customer-premises network application“, OFC/IOOC'93, pp. 171-172
- [5] ATMF SWG: Physical Layer, RBB: „Proposal of 155Mbps Plastic Optical Fiber PMD Sublayer for Very Low Cost Private UNI“, 11. Dec. 1995, in Graded Index POF, Information Gatekeepers Inc. 1996, pp. 210-234
- [6] Max Kicherer: „Dynamisches Verhalten und Rauschen von Vertikallaserdioden zur Datenübertragung in Glas- und polymeroptischen Fasern“, Diplomarbeit im Studiengang Physik an der Universität Ulm, durchgeführt am Lehrstuhl für Organisation und Management von Informationssystemen in Zusammenarbeit mit der Abteilung Optoelektronik, Hauptberichter: Prof. Dr. H. P. Großmann, Mai 1999
- [7] O. Ziemann: „Bi-Directional Transmission over Plastic Optical Fibers“, POF'97, Kauai, 22.-25.Sept.97 pp. 48-49

Abkürzungen

ATM	Asynchronous Transfer Mode	PD	Photodiode
BER	Bit Error Ratio, Bitfehlerwahrscheinlichkeit	pin-PD	PD mit p-i-n-Schichtstruktur
D ² B	Digital Domestic Bus	PMMA	Polymethylmethacrylat
DSI	Doppelstufenindex	POF	Polymer Optical Fiber, Optische Polymerfaser
FWHM	Full Width at Half Maximum	PRBS	Pseudo Random Bit Sequenz, Quasizufallsfolge
GI	Gradientenindex	RC-LED	Resonant Cavity LED
LD	Laserdiode	SI	Stufenindex
LED	Lumineszenzdiode	SLED	Superlumineszenzdiode
MC	Multi Core (Vielkern)	VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laserdiode
MSI	Multistufenindex	WDM	Wavelength Division Multiplexing, Wellenlängenmultiplex
NA	Numerische Apertur		
NRZ	Non Return to Zero		
PC	Polycarbonat		