

Wellenlängenmultiplexing im sichtbaren Spektralbereich für den Einsatz in Lehrsystemen an Hochschulen und berufsbildenden Einrichtungen

U. H. P. Fischer (member IEEE), C.Reinboth, J.-U. Just
Hochschule Harz, Friedrichstr. 57, 38855 Wernigerode, Germany,
Tel. : +49-(0)3943-659340 Fax : +49-(0)3943-659399
Email : ufischerhirschert@hs-harz.de

1. Einführung

Die Ansprüche an die digitale High-Speed-Übertragung von Daten sind in ständigem Wachstum begriffen. Mit ihnen wachsen auch die Anforderungen an den Datendurchsatz optischer Komponenten in Kommunikationssystemen¹. Die Basis solcher Systeme bilden schnelle Sender und Empfänger, die in der Lage sind, Informationen mit Übertragungsgeschwindigkeiten im Bereich von Tbit/s über einen Lichtwellenleiter zu transportieren, basierend auf fortgeschrittenen opto-elektronischen Technologien, wie sie beispielsweise in optischen Multiplex-Systemen enthalten sind. Time Division Multiplex (TDM) und Wavelength Division Multiplex^{2,3} (WDM) haben sich hier mittlerweile als die zukunftssträchigsten Übertragungstechniken herauskristallisiert. Zu den zukünftigen Aufgaben von Universitäten, Fachhochschulen, berufsbildenden Schulen und anderen Bildungseinrichtungen mit Schwerpunkten in optischer Nachrichten- und Übertragungstechnik, wird daher die Vermittlung von entsprechenden Lehrinhalten, insbesondere im Bereich der WDM-Technologie, gehören. Bereits heute zeichnet sich ab, dass der Einsatz von Polymeroptischen Fasern (POFs) zum Quasi-Standard in der Automobilindustrie⁴ und im Inhouse-Bereich erwachsen wird. Die Kombination von WDM-Technologie mit POF-Lichtwellenleitern wird den Horizont zukünftiger, preiswerter Lösungen für Anwendernetzwerke⁵ in den nächsten Jahren erheblich erweitern.

In diesem Paper wird ein WDM-System dargestellt, welches mit Polymeroptischen Fasern im sichtbarem Spektralbereich arbeitet. Das System, im folgenden als OPTOTEACH-Lehrsystem bezeichnet, ist speziell auf die Bedürfnisse höherer und weiterführender Bildungseinrichtungen zugeschnitten und eignet sich zur anschaulichen Demonstration der Datenkommunikation mit optischen Fasern. Es eröffnet Universitäten und anderen Bildungseinrichtungen umfassende Perspektiven für die Gestaltung von Lehrveranstaltungen, unter anderem durch eine plattformunabhängige Software. Die Software beinhaltet neben einer grundlegenden Einführung in die Thematik auch interaktive Module, Animationen und kurze Videofilme.

2. Didaktisches Konzept und technologisches Design

Für das OPTOTEACH-Lehrsystem sind zwei Varianten mit unterschiedlicher Komplexität geplant, ausgerichtet auf die jeweilige Zielgruppe (Studenten oder Techniker und Berufsschüler). Das *Basic-System* ist für den Einsatz an Berufsschulen und anderen berufsbildenden Einrichtungen ausgerichtet, das *Advanced-System* für den Einsatz an höheren Bildungseinrichtungen, wie beispielsweise

¹T. Naito, "One Terabit /s Transmission over 10.000km using C-Band and L-Band", Networks and Optical Communications I, IOS Press, pp 2-9, (2000)

²U. Krüger, K. Krüger, R. Batchelor, U. H. P. Fischer, C. v. Helmolt, and U. Nagengast, "Wavelength manager covering the EDFA band and capable of controlling hundreds of transmitters", Proc. ECOC, Vol. 1, pp 483-486 (1994)

³U.H.P. Fischer, "Optoelectronic Packaging", VDE-Verlag, ISBN 380072572X (2002)

⁴MOST, "Media orientated system transport", <http://www.mostcooperation.com/>

⁵N. Weber, "Low cost optical transmission solutions for short distances", <http://www.iis.fraunhofer.de/ec/oc/index.html>

Fachhochschulen und Universitäten. Beide Systeme werden mit einer *interaktiven Software* ausgeliefert, welche die Lernenden mit technischen Detailinformationen versorgt, die Anfertigung standardisierter Versuchsprotokolle ermöglicht und mit interaktiven und multimedialen Elementen den Lernprozess unterstützt. So werden beispielsweise zu Beginn jedes experimentellen Lernabschnitts die Grundkenntnisse der Lehrenden anhand eines interaktiven Multiple-Choice-Testsystems überprüft. Die Software gestattet außerdem die Erstellung von Diagrammen zur erweiterten Visualisierung der Versuchsergebnisse, sowie die automatische Kontrolle der Messergebnisse. So bekommen die Lernenden einen Überblick über die Thematik und haben, abhängig von der jeweiligen Ausführungsvariante des Lehrsystems, weiterführende Einblicke in die optische Datenübertragung und die WDM-Technologie.

Basic-System

Im Basic-System wird eine WDM-Struktur mit äußerst preiswertem Equipment realisiert. Als Sender dienen LEDs im sichtbaren Bereich des Lichts (zwischen 450nm und 700nm), deren Einsatz die preiswerte Fertigung der Systeme erlaubt und das intuitive Verständnis der WDM-Technologie fördert, da die Lernenden die Bewegungen des Lichts im System visuell unmittelbar nachvollziehen können. Die Modulation der LEDs erfolgt durch die Aufprägung des zu übertragenden Signals auf den Diodenstrom, die sog. Direkt- oder Amplitudenmodulation (AM). Für das Basic-System sind lediglich drei Kanäle zur Signalübertragung vorgesehen (rot/660nm, grün/550nm, blau/470nm) sowie ein vierter Sender als Interferenzquelle. Der grundlegende Entwurf des Lehrsystems (Basic und Advanced) ist in Abbildung 1 dargestellt.

Das Videosignal mit einer ungefähren Bandbreite von 10MHz moduliert direkt den BIAS-Strom der LEDs. Der BIAS-Offset und die Signalverstärkung sind Parameter, die durch die elektrische Treiberschaltung der LEDs eingestellt werden können, das optische Signal wird über Sternkoppler zusammengeführt. Für eine WDM-Übertragung müssen die einzelnen Sender eine annähernd gleiche Leistung haben, die im Bereich von 1dB liegt, was mit einem optischen Powermeter gemessen werden kann. Die drei Videosignale werden von einer geeigneten Kamera aufgenommen und über einen herkömmlichen Monitor dargestellt. Für den Empfänger werden Si-Fotodioden mit einer Bandbreite von 10 MHz in Kombination mit einem Transimpedanzverstärker verwendet. Die elektrischen Signale können in Offset und Verstärkung variiert werden. Der Einfluss der Faserlänge (1-100m) auf das SNR (Signal-Rausch-Verhältnis) lässt sich mit Hilfe eines Oszilloskops darstellen. Durch den Einsatz eines μ -Verschiebetisches können zusätzlich Koppelverluste (an Steckverbindungen, an geschnittenen und polierten Faserendflächen), sowie longitudinale, laterale und Winkelversätze simuliert und vermessen werden.

Lehr-/Lerninhalte für das Basic-System:

- PI-Kurven verschiedener Sendeelemente
- Dämpfung bei unterschiedlichen Faserlängen und Wellenlängen
- Bandbreite und S-Parameter
- Einflüsse elektro-magnetischer Felder (EM-Felder)
- Einfluss von Fehlansichtungen mit Hilfe eines μ -Verschiebetisches
- WDM-Spektrum
- WDM-Übertragung von Videosignalen
- Signalqualität von Videoübertragungen bei unterschiedlichen Faserlängen und die Einflüsse von Offset und Verstärkung
- WDM-Übertragung mit Videosignalen

Advanced-System

Dieses System bietet zusätzlich zur analogen Signalübertragung, die Übertragung digitaler Signale. Auf Grund der eingeschränkten Bandbreite der LEDs kommen für dieses System Fabry-Perot-Diodenlaser (LD) zum Einsatz. Die optischen Signale der Laserdioden werden über Sternkoppler zusammengefasst und direkt über den BIAS-Strom eines Bitfehlerraten-Messplatz (BERT) mit 155Mbit/s moduliert, digitale Amplitudenmodulation (NRZ, ASK/PCM). Mit diesem Aufbau können alle Laborübungen einer

optischen WDM-Übertragung ausgeführt werden, wie Einflüsse von Dämpfung, Dispersion, optischer Bandbreite und Wellenlängenverschiebung für alle Arten von Signalen. In Kombination mit einem BERT ist es möglich, Augendiagramm-Messungen sowie Bitfehlerraten-Messungen durchzuführen. Bei POFs ist die Modendispersion der ausschlaggebende Dispersionstyp, welcher die Übertragungslänge einschränkt. Die Einflüsse der Dispersion müssen experimentell und per Simulation mit der Standardsoftware PHOTOSS⁶ analysiert werden. Spektroskopische Untersuchungen des von der LD emittierten Lichts, ihrer thermischen Drift, sowie die Filtercharakteristik des MUX/DEMUX können mit Hilfe eines einfachen Spektrometers mit einer Auflösung von 1nm vermessen werden (z.B. Newport Model OSM-400).

Lehr-/Lerninhalte für das Basic-System:

- PI-Kurven verschiedener Sendeelemente (LEDs + Laser)
- Dämpfung bei unterschiedlichen Faserlängen und Wellenlängen
- Bandbreite und S-Parameter
- Modulationscharakteristik (AM, ASK, PCM, ...)
- Einflüsse elektro-magnetischer Felder (EM-Felder)
- Einfluss von Fehlausrichtungen mit Hilfe eines µm-Verschiebetisches
- WDM-Spektrum
- WDM-Übertragung analoger Videosignale *und* digitaler Signale
- Übertragung digitaler Signale:
 - Bitfehlerrate in Abhängigkeit zur Faserlänge, verschiedener Sender, ...
 - Test der Signalqualität mittels Oszilloskop (Augendiagramm)

Abbildung 1: WDM-Lehrsystem mit Polymeroptischen Fasern als Lichtwellenleiter

⁶ Simulation software package PHOTOSS: http://www.lenge.de/english/PHOTOSS_overview.php

3. Der Sender

Um die elektrischen Signale in die für die Übertragung notwendigen optischen Signale zu wandeln, kommen drei LEDs zum Einsatz (blau@470nm, grün@530nm, rot@660nm). Da LEDs in diesem Wellenlängenbereich von der optischen Industrie in großen Mengen hergestellt werden, stellt deren Verwendung eine preiswerte Lösung für den Senderaufbau dar. Für die Übertragung analoger Videosignale werden hochlineare Sendeelemente benötigt, um nichtlineare Verzerrungen zu vermeiden.

Das Eingangssignal wird durch eine hochohmige Operationsverstärkerschaltung angepasst. Diese Spannungsverstärkung ist einstellbar, um eine Anpassung der verschiedenen Eingangssignale an die nachfolgende Schaltung zu gewährleisten. Dadurch wird es den Schülern/Studenten ermöglicht, die Auswirkungen auf die Übertragung zu testen. Anschließend wird dem Signal ein Gleichspannungsoffset aufgeprägt, welches ebenfalls mit einem hochauflösenden Potentiometer einstellbar ist. Ein anderer Teil der Treiberschaltung des Senders ist der Spannungs-Strom-Wandler, der für die Modulation des LED-Stroms benötigt wird. Auch dieser Parameter ist mittels eines Potentiometers einstellbar. Eine detaillierte Darstellung des Funktionsprinzips findet sich in Abbildung 2.

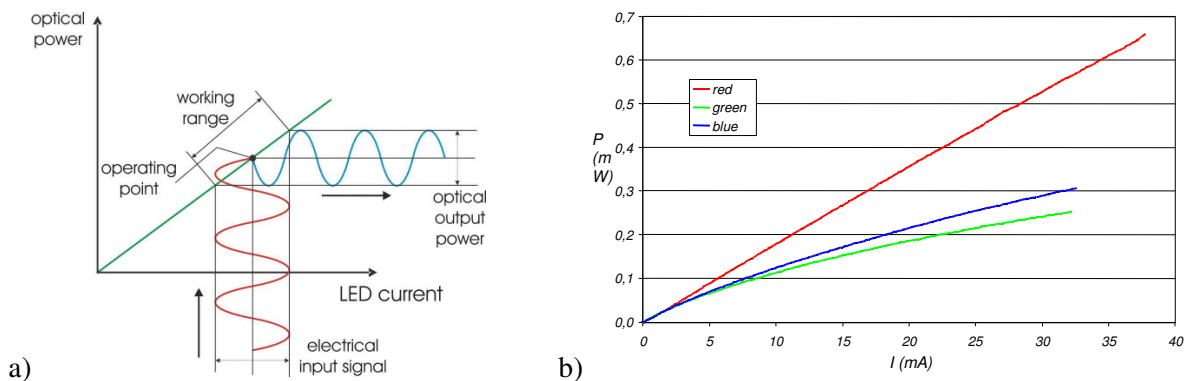


Abbildung 2: a) Direktmodulation der LEDs b) PI-Kennlinie der verwendeten LEDs

Die Treiberschaltung wurde speziell für die Übertragung von Videosignalen konzipiert. Um entsprechende Eingangssignale zu erzeugen bestehen hier mehrere Möglichkeiten, z.B. können eine Videokamera oder ein Testbildgenerator verwendet werden. Die übertragenen Signale können mit einem Monitor angezeigt und qualitativ beurteilt werden. Andere Signale können natürlich auch übertragen werden. So ist z.B. möglich einen Funktionsgenerator anzuschließen und ein Sinussignal zu übertragen, welches dann am Empfänger auf einem Oszilloskop dargestellt werden kann. Die Bandbreite der Sender liegt bei über 40MHz über eine Strecke von 20m, bei einer Übertragungslänge von 50m wurden 35MHz gemessen. Diese Ergebnisse stimmen weitgehend mit den Ergebnissen der Simulation überein. Die Begrenzung der Bandbreite resultiert aus der Bandbreite der verwendeten Operationsverstärker.

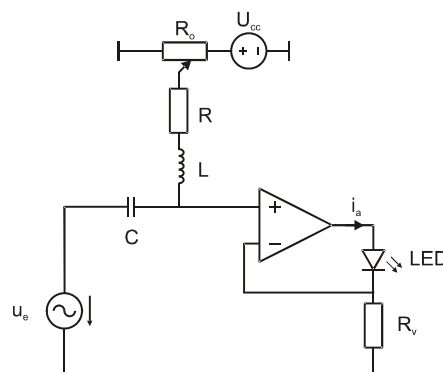


Abbildung 3: LED-Treiberschaltung

Entsprechende digitale Sender befinden sich zur Zeit in der Entwicklung, nach deren Abschluss sie ebenfalls in das Lehrsystem integriert werden.

Die Sender haben verschiedenste Einstellmöglichkeiten. Durch das Arbeiten mit unterschiedlichen Parametern werden den Schülern/Studenten die Einflüsse anschaulich verdeutlicht.

4. Der Empfänger

Im Lehrsystem sind die Empfänger für die Wandlung der zu demultiplexenden optischen Signale in individuelle elektrische Signale verantwortlich. Die Aufspaltung in die Originalsignale rot, grün und blau erfolgt mittels eines Demultiplexers (DEMUX). Der DEMUX besteht aus Splittern und Farbfiltern. Mit Hilfe einer Kaskadierung von zwei 1-zu-2 TOSLINK⁷-Splittern wird das Licht aufgeteilt. Die Zerlegung in die einzelnen Kanäle erfolgt durch drei Farbfilter, die direkt vor den Fotodioden angebracht sind. Im sichtbaren Wellenlängenbereich des Lichts kommen Si-PIN-Fotodioden zum Einsatz. Diese Art der Fotodiode besteht aus einer p-dotierten, einer n-dotierten und einer intrinsischen Schicht. Die Fotodiode wandelt die optische Leistung in einen elektrischen Strom um. Dieser Strom bewegt sich im Bereich von einigen Milliampere und wird durch die nachfolgende Schaltung in eine Spannung umgewandelt, bei der es sich um eine zweistufige Verstärkerschaltung handelt. Die erste Stufe ist ein Transimpedanzverstärker, der den von der Fotodiode emittierten Strom in eine Spannung umwandelt, die zweite Stufe ein invertierender Verstärker, mit dessen Hilfe Offset und Verstärkung modifiziert werden können, was es den Lernenden ermöglicht, die Ausgangssignale in bestimmten Bereichen zu verändern. Die Verstärkung kann bis zu einer Grenze von 13dB verändert werden, wobei der Offset negative oder positive Spannungswerte annehmen kann. Durch die Änderung der verschiedenen Systemparameter sind die Lernenden in der Lage, die pädagogischen Ziele selbstständig zu erreichen.

Der Empfänger wurde für analoge und digitale Signale entwickelt. Die Auswertung der übertragenen Signale kann beispielsweise mit einem Netzwerkanalysator, einem Oszilloskop oder einem Fernseher bzw. Monitor erfolgen.

5. Der Bitfehlerratenestester

Mit einem Fehlerratenestester können zufällige oder selbst programmierte wiederholende Bitmuster verwendet werden. Im nächsten Schritt werden die Bitmuster über den Sender und die Steckdose übertragen und können dann am Empfänger ausgewertet werden. Während dieser Auswertung werden die gesendeten und empfangenen Muster verglichen und die aufgetretenen Bitfehler werden gezählt. Mit diesen Daten kann die Fehlerhäufigkeit nach Formel (1) berechnet werden.

$$\text{Bitfehlerrate (BER)} = \frac{(\text{Anzahl der Bitfehler})}{(\text{Anzahl der empfangenen Bits})} \quad (1)$$

Eine wichtige Vorbedingung für eine sinnvolle Messung ist die Synchronisation des Ausgangs- und Eingangstores. Am Ende jeder Messung werden die Resultate mit dem entsprechenden Bitmuster, der Häufigkeit der aufgetretenen Fehler und die Bitfehlerrate (BER, siehe Formel (1)) auf dem Display dargestellt.

6. Das Lehrsystem

Der Prototyp des OPTOTEACH-Lehrsystems besteht aus drei Sendern und drei Empfängern. Dieses System (Abbildung 1) ist in der Lage drei analoge FBAS⁸-Videosignale oder digitale Signale mit einer

⁷<http://www.toslink.de>

⁸Krisch, L.: „Fernsehtechnik: Grundlagen, Verfahren, Systeme“, Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1993

maximalen Übertragungsrate von 10Mbit/s zu übertragen. Das Licht der drei Sender wird über konventionelle Y-Koppler der Firma DieMount⁹ zusammen gefasst.

Um einen Verbinder oder einen Spleiß zu simulieren, wird das System mit einem μ m-Tisch ausgeliefert. Dadurch sind die Schüler/Studenten in der Lage, die Einflüsse verschiedener Versatzarten zu testen (longitudinal, lateral, Winkel).

Die übertragenen Signale werden dann über handelsübliche TOSLINK-Koppler zusammen geführt, wobei diese Koppler eine sehr hohe Dämpfung aufweisen.

Die Auftrennung in die einzelnen Kanäle erfolgt mittels roter, grüner und blauer Farbfilter. Die Dämpfung durch diese Filter ist relativ hoch, Abbildung 5 zeigt die Dämpfung des roten, bzw. des grünen Farbfilters. Die zugehörigen Werte finden sich in Tabelle 1.

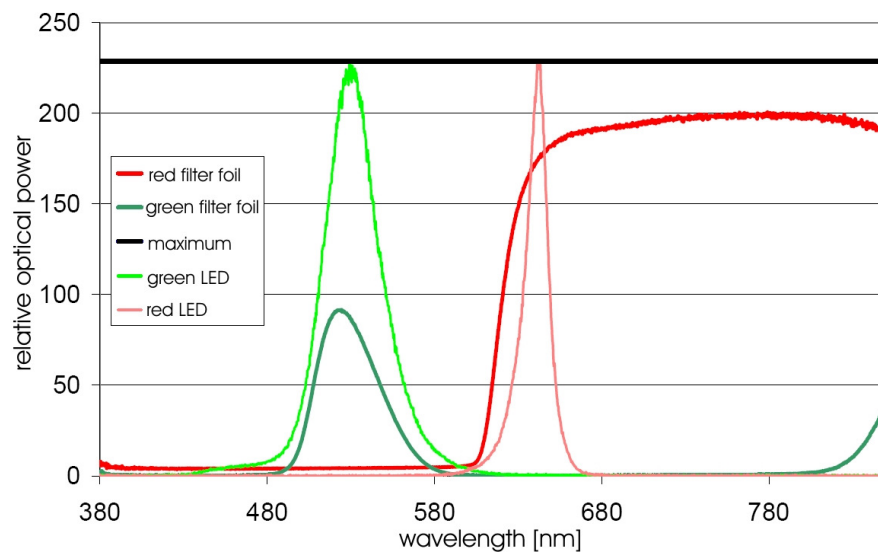


Abbildung 5: Absorptionsspektrum der grünen und roten Filterfolien im Vergleich mit der emittierten Lichtleistung der LEDs

Filter foil /insertion loss(dB)	green LED	red LED
red filter	25,4	0,7
green filter	3,5	26,8

Tabelle 1: Dämpfung des grünen und roten Farbfilters

Der Prototyp des Lehrsystems wurde zum „Sachsen-Anhalt-Tag“ im Juli diesen Jahres in Magdeburg¹⁰ (Abbildung 6) und auf der TransferX¹¹ im November in Dresden öffentlich präsentiert.

Der Prototyp besteht aus den folgenden Komponenten:

1. Video Eingang (BNC)
2. Regler für Verstärkung, Offset und Modulation
3. optische Ausgänge (TOSLINK connectors)
4. 1mm SI-POF, teilweise ohne Ummantelung, um die Farben sichtbar zu machen
5. DieMount Stern-Koppler
6. μ m-Tisch (x, z und Winkel)
7. TOSLINK Stern-Koppler

⁹<http://www.diemount.de>

¹⁰<http://www.sat.2005.magdeburg.de>

¹¹<http://www.messe-transferx.de>

- 8. 1mm SI-POF
- 9. optische Eingänge (TOSLINK connectors) mit Farbfiltern
- 10. Regler für Verstärkung und Offset
- 11. elektrische Ausgänge (BNC)

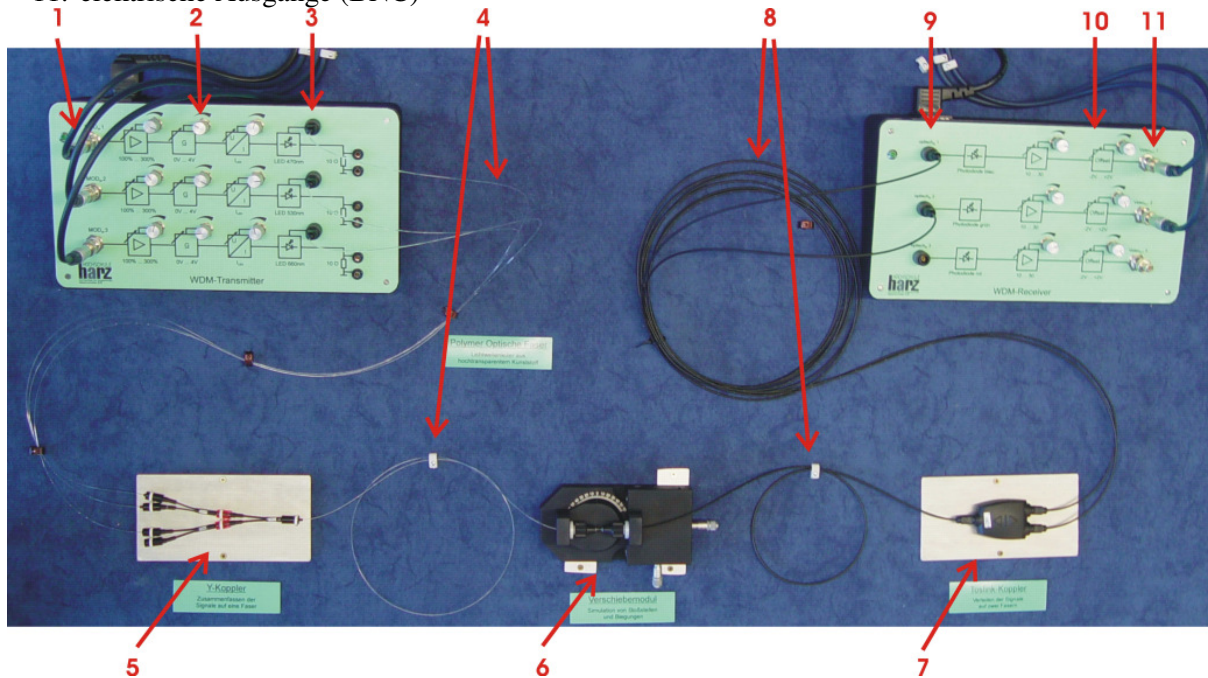


Abbildung 6: Foto des Prototypen

Die Bandbreite des kompletten Systems (Sender, Übertragungsstrecke 20m POF und Empfänger) beträgt 8MHz, siehe Abbildung 7. Dieses Limit ist durch den zur Anwendung kommenden Empfänger vorgegeben.

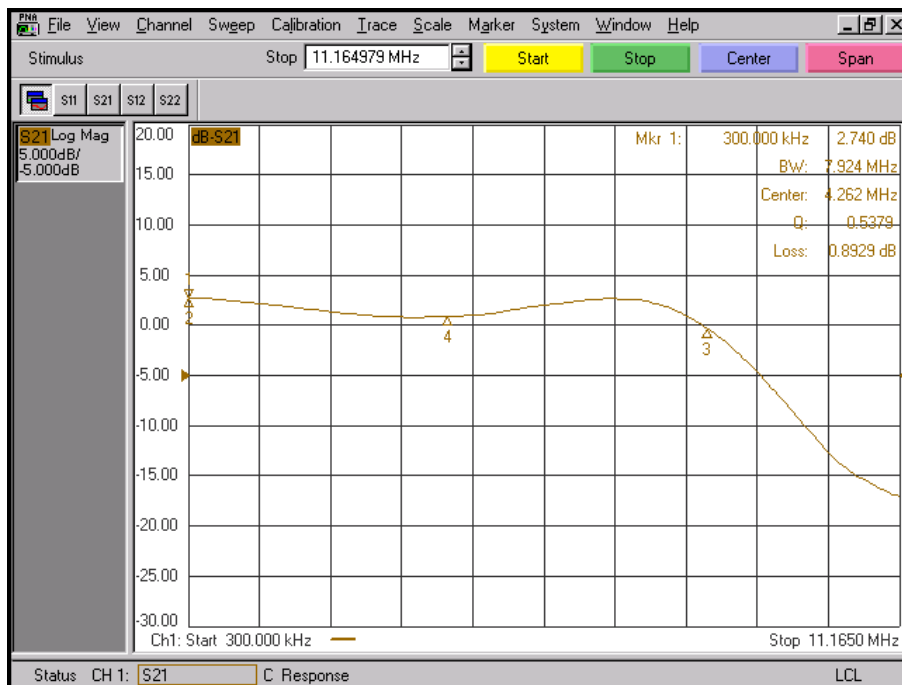


Abbildung 7: S21 über 20m POF

In Abbildung 8 werden die neu entwickelten Einzelmodule gezeigt, die für eine höhere Frequenzen bzw. Bitraten ausgelegt sind. Die elektrischen Schaltungen und deren Layout wurde dafür optimiert. Durch diesen modularen Aufbau ist es möglich ein auf individuelle Erfordernisse optimiertes Gesamtsystem

herzustellen. Das Basic-System wird ebenfalls aus drei Sendern und Empfängern für rote, grüne und blaue WDM-Signale bestehen.

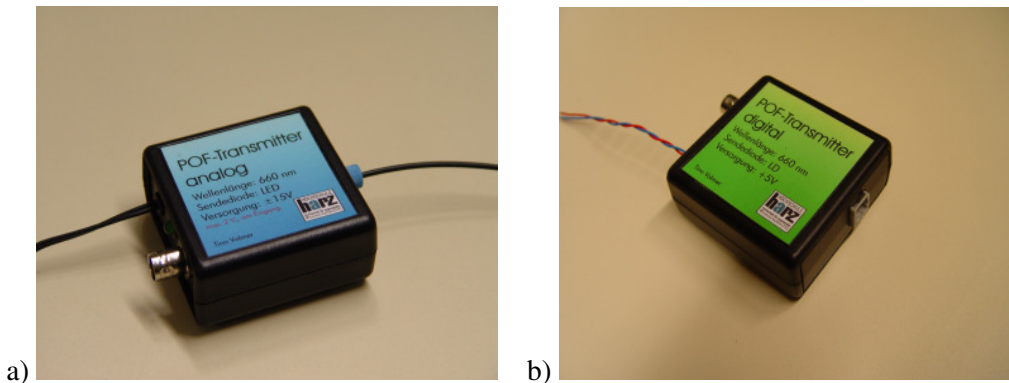


Abbildung 8: Neue Sendermodule a) analog, b) digital

Momentan werden einige neue Sender entwickelt und getestet, darunter ein analoger Sender mit einer Bandbreite von 65MHz, wobei diese von der zur Anwendung kommenden LED abhängig ist. Mit höher modulierbaren LEDs oder bei Einsatz eines Lasers ließe sich mit diesem Modul eine Bandbreite von 300MHz erreichen. Eine weitere Entwicklung auf diesem Gebiet stellt ein neuer digitaler Sender dar, mit dem Übertragungsraten von 155Mbit/s problemlos realisiert werden können.

Um der hohen Dämpfung des Gesamtsystems entgegen zu wirken, werden die nächsten Schritte die Entwicklung integrierter optischer Komponenten sein, so z.B. Multiplexer und Demultiplexer für die Kombination bzw. Separation der einzelnen WDM-Kanäle. Mit diesen Komponenten wird es möglich sein acht WDM-Kanäle simultan zu übertragen, zur Zeit befinden sich diese in der Patentierung.

7. Zusammenfassung

Das Paper stellt ein neuartiges WDM-Lehrsystem für Studenten und (Berufs-)Schüler vor, welches für den Einsatz an Universitäten und anderen weiterführenden Bildungseinrichtungen konzipiert wurde. Das System besteht aus drei Sendern, die mit einer blauen, einer grünen und einer roten LED arbeiten. Es ermöglicht die Übertragung analoger oder digitaler Signale, die mit AM oder ASK sowie mit PCM moduliert sind, und die Durchführung diverser Tests und Messungen. Das System gestattet es den Lernenden, alle wesentlichen Versuche durchzuführen, für die sich ein optisches WDM-System eignet. So können u.a. die Einflüsse von Dämpfung, Dispersion, optischer Bandbreite und Wavelength Shift von verschiedensten Sendern getestet und gemessen werden. Unter Verwendung eines einfachen Spektrometers sind zudem spektroskopische Untersuchungen des emittierten Lichts der LEDs und der Filtercharakteristik des MUX/DEMUX möglich. Zusätzlich können Dämpfungsmessungen an den Polymeroptischen Fasern (geschnitten, poliert, Steckverbindungen) in Kombination mit longitudinalen, lateralen und Winkelversätzen untersucht und ausgewertet werden.

Das OPTOTEACH-Lehrsystem versetzt den Lehrenden in die Lage, optische Datenübertragungen, speziell die Übertragung unter Verwendung der WDM-Technologie, anschaulich und leicht verständlich zu vermitteln. So kann der Zusammenhang zwischen emittierter Leistung, Dämpfung usw. demonstriert werden. Dazu trägt zu einem großen Teil die Eigenschaft bei, dass die Übertragungen mit sichtbarem Licht erfolgen. Zusammen mit der zugehörigen Software stellt OPTOTEACH ein anschauliches und interessantes Mittel zur Vermittlung der für heutige Anforderungen notwendigen Kenntnisse und Lehrinhalte dar.

8. Danksagung

Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und der Sachsen-Anhaltinischen Landesregierung, die diese Arbeiten ermöglichen und fördern. Dank gebührt auch Herrn Dr. Kragl, dem Geschäftsführer der Firma DieMount GmbH, für die Lieferung der Koppler und diverser anderer technischer Komponenten.