

# Mode Group Diversity Multiplexing als kostengünstige Alternative zum Coarse WDM über MMF

Stefan Schöllmann und Werner Rosenkranz

Lehrstuhl für Nachrichten und Übertragungstechnik, Technische Fakultät der Christian Albrechts Universität zu Kiel,  
Kaiserstr. 2, D-24143 Kiel  
[sts@tf.uni-kiel.de](mailto:sts@tf.uni-kiel.de)

## Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die Mode Group Diversity Multiplexing (MGDM)-Technik als eine neuartige Alternative zum Coarse WDM (CWDM) auf der Multi Mode Faser (MMF) für Local Area Networks mit einer maximalen Übertragungsreichweite von 300 m vorgestellt und verglichen. Bei der MGDM-Technik werden unterschiedliche Signale durch verschiedene Modengruppen übertragen (z.B. Signal 1 durch Moden niedriger Ordnung und Signal 2 durch Moden höherer Ordnung). Die Anregung der unterschiedlichen Modengruppen mittels der verschiedenen Signale wird durch unterschiedliche Einkopplungspositionen an der Stirnseite der MMF realisiert. Während der Übertragung bleiben die Signale respektive die Moden höherer und niedriger Ordnung aufgrund ihrer Verteilungscharakteristik in der MMF räumlich voneinander getrennt. Auf der Empfängerseite werden die verschiedenen Moden in unterschiedlichen Detektionsregionen getrennt empfangen.

Es wird anhand von Augendiagrammen eine fehlerfreie Übertragung über 300 m bei einer Gesamtdatenrate von 10 Gb/s ohne Entzerrung auf der Empfängerseite mit der MGDM-Technik experimentell gezeigt. Des Weiteren werden Überlegungen zur Kosteneffizienz der MGDM-Technik im Vergleich zu CWDM-Technik angestellt.

## 1 Einleitung

Aufgrund des ständig steigenden Bedarfs an Übertragungskapazität gepaart mit kosteneffizienten und einfachen Realisierungsmöglichkeiten hat die optische Nachrichtentechnik besonders im Bereich des Local Area Networks (LAN) sowie beim Endnutzer (Fibre to the Home (FTTH)) deutlich an Bedeutung gewonnen [1]. Diese Entwicklung basiert hauptsächlich auf der Tatsache, dass optische Fasern im Vergleich zu anderen Übertragungsmedien wie z.B. Kupferkabeln oder Koaxialkabeln sehr hohe Übertragungsraten ermöglichen. Zusätzlich sind sie resistent gegen jegliche elektromagnetischen Einflüsse sind.

Für Anwendungen im Bereich des LANs hat sich die Multi-Mode-Faser (MMF) aufgrund von höheren Einkoppeltoleranzen und Robustheit bei Installation kombiniert mit einem hohen Datendurchsatz (10 Gb/s Ethernet) als eine Alternative zur Single Mode Faser, etabliert. Zusätzlich wird die Plastikfaser (POF) als kostengünstige Form der MMF speziell im Bereich der Endverbraucher auch für hohe Datenraten immer mehr an Bedeutung gewinnen. Andererseits ist die Übertragungreichweite bei der MMF durch die Modendispersion begrenzt, die aufgrund der Laufzeitunterschiede zwischen den unterschiedlichen angeregten Moden entsteht.

Im IEEE Standard 802 wird für das LAN eine fehlerfreie Übertragung über eine Distanz von 300 m gefordert. Bei Datenraten von 10 Gb/s wird dabei der Effekt der Modendispersion auf der MMF so dominant, dass keine fehlerfreie Übertragung mehr möglich ist. Neben der Entzerrung [2] als mögliche Kompensationstechnik der

Modendispersion wird in vielen Netzen heute die Coarse Wavelength Division Multiplexing CWDM Technik angewendet [3]. Dabei werden unterschiedliche Wellenlängen mit niedrigen Datenraten benutzt, so dass der Effekt der Modendispersion vermindert wird.

Eine mögliche neuartige Alternative zum CWDM stellt die Mode Group Diversity Multiplexing (MGDM) Technik dar [4], bei der verschiedene Moden zur Übertragung von unterschiedlichen Signalen ausgenutzt werden. Dadurch werden die die Ressourcen der MMF (präzise die unterschiedlich angeregten Moden) deutlich besser ausnutzt.

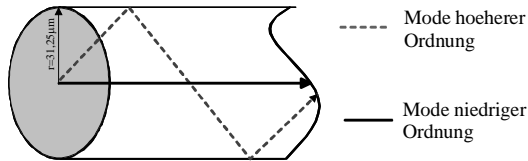
Der Beitrag ist wie folgt gegliedert: In Abschnitt 2 werden die Grundlagen der MMF, des CWDM und des MGDM vorgestellt. In Abschnitt 3 werden anschließend mögliche experimentelle Realisierungen für die MGDM und die WDM Technik vorgestellt. In Abschnitt 4 wird die Übertragungsqualität bei Verwendung des CWDM und des MGDM basierend auf Experimenten bei einer Gesamtdatenrate von 10 Gb/s verglichen. Im letzten Abschnitt werden die beiden Ansätze hinsichtlich Kosteneffizienz verglichen.

## 2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der CWDM-Technik und der der MGD-Technik sowie die MMF als Übertragungsmedium vorgestellt.

### 2.1 Übertragungseigenschaften der MMF

Die Übertragungseigenschaften der MMF werden anhand von Abb. 1 verdeutlicht, wo ausschließlich der Kern der Faser dargestellt ist.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der MMF mit unterschiedlichen Moden (Mode niedrigster Ordnung → durchgezogene Linie; Moden höherer Ordnung → gestrichelte Linie)

Verglichen mit der SMF, ist der Kerndurchmesser der MMF mit 62,5 µm deutlich größer. Einerseits liegen darin die oben erwähnten höheren Einkopplungstoleranzen begründet. Auf der anderen Seite ermöglicht der grössere Kerndurchmesser die Ausbreitung unterschiedlicher Moden (Abb. 1). Dabei repräsentiert die schwarze durchgezogene Linie die niedrigste angeregte Mode und die gepunktete Linie deutet den Verlauf der Moden höherer Ordnung an. Dabei ist jede Mode durch unterschiedlichen Laufzeiten charakterisiert. Diese Laufzeitunterschiede zwischen den angeregten Moden sind der Grund für die Modendispersion als primärem Degradationseffekt auf der MMF. Des Weiteren lässt sich aus Abb. 1 entnehmen, dass die Moden höherer Ordnung im Vergleich zu Moden niedrigerer Ordnung ebenfalls in den Randbereichen des Kerns der MMF auftreten.

Die unterschiedlichen Übertragungseigenschaften der Moden werden mit Hilfe der folgenden Impulsantwort mathematisch beschrieben

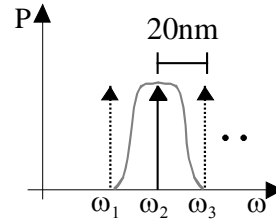
$$h(t) = \sum_{m=0}^M P_m \delta(t - \tau_m) \quad (2.1)$$

Dabei steht  $m$  für die jeweils betrachtete Mode,  $\tau_m$  für die zeitliche Verzögerung und  $P_m$  für die Amplitude der betrachteten Mode.

### 2.2 Coarse (C)-WDM

Beim WDM Ansatz werden die unterschiedlichen Signale durch unterschiedliche Trägerwellenlängen übertragen. Das Prinzip des CWDM wird anhand

der Abb. 2 erläutert, indem ein gewöhnliches WDM Spektrum gezeigt wird.



**Abb. 2:** Darstellung eines Coarse (C)WDM Spektrums mit Filterfunktion zum Demultiplexen

Im Gegensatz zu einem Weitverkehrsnetz, bei dem Dense WDM verwendet wird, werden beim CWDM Signale gemultiplext, deren Wellenlängen sehr weit auseinander liegen (ca. 20 nm). Dies beinhaltet eine höhere Toleranz bezüglich der Laserbandbreite, Filterbandbreite zum Demultiplexen etc., was sich hinsichtlich der Kosteneffizienz positiv auswirkt. Das Demultiplexen beim CWDM Ansatz wird durch ein Bandpassfilter realisiert. Dies ist mittels der Übertragungsfunktion in Abb. 2 angedeutet worden (graue Linie).

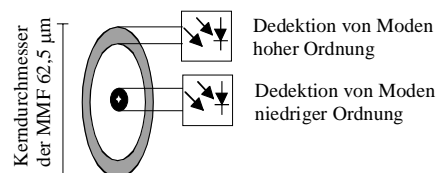
### 2.3 Mode Group Diversity Multiplexing

Beim Mode Group Diversity Multiplexing-Ansatz werden die Signale mittels unterschiedlicher Modengruppen übertragen. So wird z.B. Signal 1 mit Moden niedriger Ordnung übertragen, während Signal 2 über die gleiche Faser mit Moden höherer Ordnung übertragen wird (siehe z.B. Abb. 1). Um dieses Verfahren anwenden zu können, müssen auf der Sendeseite die unterschiedlichen Moden angeregt werden, über der Faser separiert bleiben und am Empfänger getrennt voneinander empfangen werden.

In [5,6] wurde experimentell und simulativ gezeigt, dass durch unterschiedliche Einstrahlungspunkte auf der Sendeseite Moden hoher und niedriger Ordnung angeregt werden können.

Des Weiteren wurde in [6] gezeigt, dass die Moden niedriger Ordnung eher zentral im Kern der MMF geführt werden, während die Moden höherer Ordnung eher im äußeren Bereich des Kerns der MMF geführt werden.

Nach Übertragung auf der MMF wird das Demultiplexen durch zwei unterschiedliche Detektionsbereiche realisiert (Abb. 3).



**Abb. 3:** Detektionsbereiche beim MGD gezeigt am Querschnitt der MMF (grauer äußerer Ring)

Detektion von Moden höherer Ordnung; schwarzer Kreis: Detektion von Moden niedriger Ordnung)

Ein äußerer Ringbereich empfängt dabei die Moden höherer Ordnung und ein Detektionsbereich im Zentrum des Kerns die Moden niedriger Ordnung. Das Hauptproblem in der Realisierung der MGDM-Technik besteht darin, mit Hilfe der zwei Signale unterschiedliche Modengruppen exakt anzuregen, da der Durchmesser der MMF immer noch sehr gering ist [7].

### 3 Experimentelle Realisierung

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Realisierungen der zwei Multiplexing Techniken für eine Datenrate von 10 Gb/s vorgestellt.

#### 3.1 (C)WDM-Realisierung

Der experimentelle Aufbau für die WDM-Technik ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei stellen dünne Striche Einmodenfasern und dicke Striche Multimodenfasern dar.

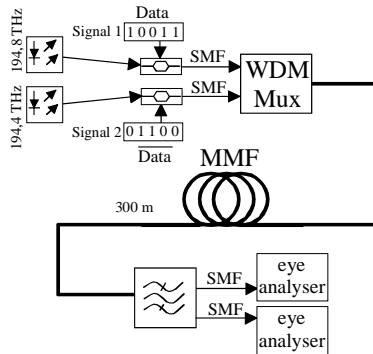


Abb. 4: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung des Coarse (C)WDM

Es wurden zwei ECL Laser mit Trägerfrequenzen von 194,4 THz und 194,8 THz benutzt (Kanalabstand 400 GHz), die mit Mach Zehnder Modulatoren (MZM) verbunden waren. Um eine Gesamtbite rate von 10 Gb/s zu erreichen, wurden die beiden MZM jeweils mit einem 5 Gb/s (PRBS Länge  $2^{31}-1$ ) Datensignal angesteuert (Signal 2 unterschied sich von Signal 1 durch die Invertierung der Bits). Danach wurden die Ausgänge der Modulatoren mit einer Ausgangsleistung von jeweils -1 dBm mit Hilfe eines Kopplers gemultiplext und zentral auf die MMF eingekoppelt. Dabei wurde die SMF direkt mit der MMF gekoppelt. Nach der Übertragung über 300 m Gradienten Index MMF wurden die Signale mit Hilfe eines Bandpassfilters gedemultiplext. Die Übertragungsqualität wurde anhand von Augendiagrammen analysiert.

#### 3.2 Mode Group Diversity Multiplexing

Die experimentelle Realisierung der Mode Group Diversity-Technik wird in Abbildung 5 verdeutlicht. Wie in Abbildung 4 stellen die dünnen Striche SMF und die dicken Striche MMF dar.

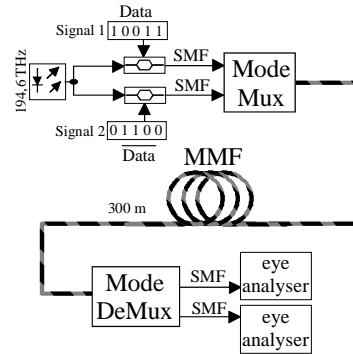


Abb. 5: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung der Mode Group Diversity Multiplexing-Technik (MGDM)

Im Gegensatz zum WDM-Ansatz wird im MGDM Ansatz nur ein Laser verwendet. Die Modulatoren werden wie im vorigen Ansatz angesteuert. Danach werden die beiden Signale mit Hilfe eines Moden Multiplexers zusammen geführt und über 300 m GI-MMF übertragen. Die Verwendung von zwei unterschiedlichen Moden wird durch zwei unterschiedliche Farben auf der MMF angedeutet. Nach dem Mode Demultiplexing wird die Übertragungsqualität mit Hilfe von Augendiagrammen beurteilt. Die genaue Realisierung des Mode Multiplexings wird in den Abb. 6a und 6b dargestellt. Das Mode Demultiplexing wird in den Abb. 6c und 6d verdeutlicht.

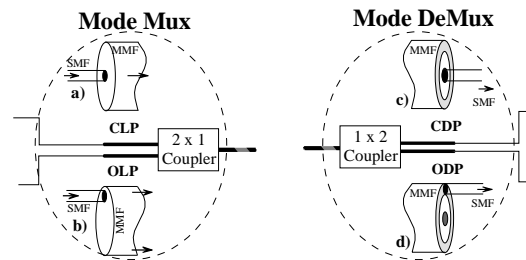
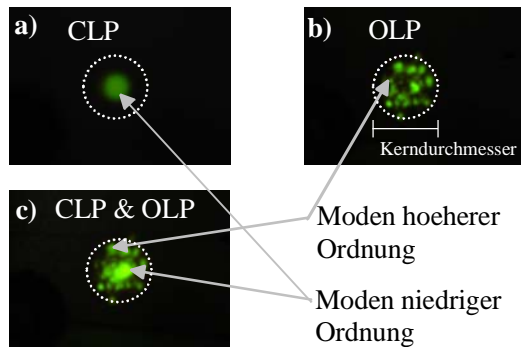


Abb. 6: Vergrößerte Darstellung des Mode Multiplexings und des Mode Demultiplexings

Die Moden niedriger Ordnung und hoher Ordnung werden beim Multiplexen mit Hilfe von zwei unterschiedlichen räumlich begrenzten Einkopplungspositionen, der Center Launch Position (CLP) und der Offset Launch Position (OLP) angeregt. Dabei wird die CLP (Anregung der Moden niedriger Ordnung) mit einer direkten Verbindung zwischen SMF und MMF realisiert. Die OLP (Anregung der hohen

Moden) wird durch einen Patch Cord realisiert, der die SMF mit einem Versatz von 20  $\mu\text{m}$  auf die MMF einkoppelt (siehe Abb. 6b). Diese Signale werden mit Hilfe eines modenerhaltenen Kopplers gemultiplext, dessen Ausgang mit der Übertragungsstrecke von 300 m verbunden ist. Die Intensitätsverteilung bei unterschiedlichen Anregungspositionen wird in den Abbildungen 7a-7c verdeutlicht.

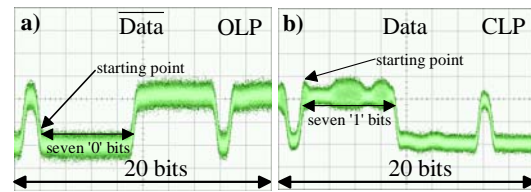


**Abb. 7:** Intensitätsverteilungen für die Anregung bei CLP, OLP und gleichzeitiger Anregung

Es ist zu erkennen, dass bei Anregung mit der CLP (Moden niedriger Ordnung) die Lichtleistung hauptsächlich im Zentrum des Kerns geführt wird (Abb.7a), während bei der Anregung mit der OLP (Moden höherer Ordnung) die Intensität am Rand des Kerns vorzufinden ist (Abb.7b). Nach der Kopplung sind Leistungsanteile sowohl im Zentrum als auch am Rand des Kerns vorhanden (Abb.7c).

Das Mode Demultiplexing wird mit Hilfe der gleichen Komponenten, wie beim Multiplexen verwirklicht. Zuerst wird das übertragene Signal mittels eines modenerhaltenden Kopplers in zwei Arme aufgeteilt. Danach werden in einem Arm die Moden niedriger Ordnung (bewegen sich größten Teils im Zentrum des Kerns der MMF) mittels einer direkten Verbindung zwischen MMF und SMF detektiert (Center Detection Position [CDP]). Die Moden höherer Ordnung werden mit Hilfe der Offset Detection Position (ODP) empfangen. Dabei detektiert die SMF den äußeren Bereich der MMF, indem ein Versatz von 20  $\mu\text{m}$  durch einen Patch Cord realisiert wird. Es wird in Abb. 6d verdeutlicht, dass nur eine sehr geringe Fläche der MMF mit Hilfe des Patch Cords durch die SMF und (verbunden mit Photodiode) detektiert wird. Um einen vergleichbaren Leistungspegel zur CLP am Empfänger zu gewährleisten musste daher bei den Experimenten deutlich mehr Leistung (ca.11 dB) in die OLP eingestrahlt werden.

Der erfolgreiche Empfang der unterschiedlichen Modengruppen wird anhand von Abbildung 8 verdeutlicht, wo der Beginn einer kurzen ( $2^7-1$ ) PRBS Folge (gekennzeichnet ist der Beginn dieser Folge durch sieben ,1' Bits gefolgt von sechs ,0' Bits) für die OLP und für die CLP gezeigt.



**Abb. 8:** Empfangene Datensequenzen für die OLP und die CLP

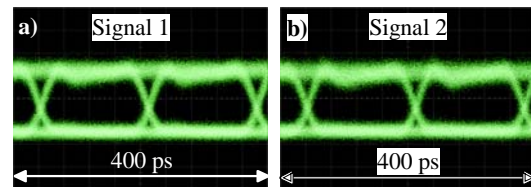
Anhand der beiden Bitsequenzen wird bestätigt, dass in der ODP und in der CDP wirklich die unterschiedlichen Datensequenzen empfangen wurden, die auf der Sendeseite eingespeist wurden (siehe Abbildung 5).

## 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Übertragungseigenschaften der beiden vorgestellten Multiplexing Ansätze miteinander anhand von Augendiagrammen verglichen. Daran anschließend werden die beiden Verfahren hinsichtlich ihrer Kosteneffizienz untersucht.

### 4.1 Übertragungseigenschaften für den WDM und den MGDM Ansatz

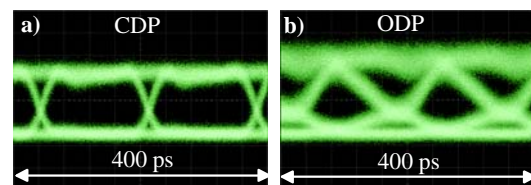
In den Abb. 9a und 9b werden die Augendiagramme für die zwei Kanäle beim WDM Ansatz (jeweils 5 Gb/s) nach 300 m MMF Übertragung gezeigt.



**Abb. 9:** Augendiagramme für den WDM Ansatz nach 300 m MMF Übertragung bei einer Gesamtdatenrate von 10Gb/s

Es sind weit geöffnete Augen zu erkennen, die nur sehr gering durch Modendispersion gestört werden (leichte Unebenheiten im ,1' Level im rechten Augendiagramm). Ein Kanalübersprechen ist bei diesem Kanalabstand nicht zu erkennen

Zum Vergleich sind in Abb. 10a und 10b die Augendiagramme für die zwei empfangenen unterschiedlichen Modengruppen gezeigt.



**Abb. 10:** Augendiagramme für den MGDM Ansatz nach 300 m MMF Übertragung bei einer Gesamtdatenrate von 10 Gb/s

In Abb. 10a ist das weit geöffnete Auge für die CDP zu sehen, welches vergleichbar zu Abb. 9a ist. Dagegen ist für ODP zwar eine deutliche Augenöffnung zu erkennen, jedoch ist das Auge signifikant stärker durch Modendispersion gestört. Der deutlich höhere Einfluss der Modendispersion bei der OLP ist mit der Anregung einer höheren Anzahl von Moden zu erklären. Dies ist detailliert in [6] beschrieben worden.

Es wird somit zusammengefasst, dass es sowohl mit der WDM-Technik als auch mit der MGDM-Technik möglich ist, eine fehlerfreie Übertragung bei einer Gesamtdatenrate von 10 Gb/s über 300 m GI-MMF zu erzielen. Die Übertragungsqualität wird hingegen bei der MGDM-Technik deutlich mehr durch Modendispersion beeinflusst.

## 4.2 Vergleich von WDM und MGDM hinsichtlich Kosteneffizienz

Zu Beginn wird der Vergleich der beiden Multiplexing Techniken auf die vorgestellten Realisierungen (Abb. 4,5,6) beschränkt, die auf der Annahme beruhen, dass die Signale mit Hilfe von MZM moduliert werden. Es ist den Abbildungen zu entnehmen, dass die MGDM-Technik einen Einsparungsvorteil hinsichtlich der Anzahl der Laser besitzt, da nur eine Trägerwellenlänge benötigt wird. Zusätzlich wird das Bandpassfilter zum Demultiplexen gegenüber der WDM-Technik eingespart. Diese Vorteile werden jedoch mit einem erhöhten Aufwand im Bereich des Mode Multiplexings und des Mode Demultiplexings erkauft (siehe Abb. 6). Besonders sind hierbei die modenerhaltenen Koppler zu erwähnen, die deutlich teurer sind, als die herkömmlichen Schmelzkoppler.

Jedoch bestehen für zukünftige Anwendungen mit der MGDM-Technik besonders im Bereich des Mode Multiplexings und des Mode Demultiplexings Optimierungsmöglichkeiten. So in Zukunft bei Verwendung von MMF oder Plastikfasern mit noch größeren Durchmessern (bis zu 1 mm) wo die CLP und die OLP direkt ohne Moden erhaltenden Koppler realisiert werden können (d.h. die zwei SMF von den MZM könnten auf die MMF z.B. gesplited werden). Der gesamte Mode Demultiplexing Prozess könnte durch die Verwendung einer Photodiode optimiert werden, die aus zwei Detektionsbereichen besteht. Ein äußerer Ringbereich würde somit die Moden höherer Ordnung dedektieren und ein Bereich im Zentrum des Kerns würde die Moden niedriger Ordnung detektieren (siehe exemplarisch Abb. 3). Diese Realisierung würde eine deutliche Kostenreduktion gegenüber der vorgestellten Realisation bedeuten.

Abschließend werden ebenfalls noch Systeme betrachtet, bei denen direkt modulierte Laser verwendet werden, da diese im Low Cost Bereich häufig Anwendung finden. Bei Verwendung von direkt modulierten Lasern fällt die Einsparung von einem Laser bei der MGDM-Technik weg, da zwei unab-

hängige Signale (in unserem Fall mit einer Datenrate von 5 Gb/s) benötigt würden. Somit würde sich die Einsparung auf das Bandpassfilter auf der Empfängerseite in einem solchen System beschränken.

Es wird daher abschließend zusammengefasst, dass die MGDM-Technik eine mögliche kosteneffiziente Alternative zum bekannten WDM-Technik über die MMF darstellt, die die Ressourcen der Faser besser ausnutzt. Diese bessere Ausnutzung wird jedoch mit einem erhöhten Einfluss der Modendispersion als limitierenden Faktor erkauft.

## 5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde die Mode Group Diversity Multiplexing (MGDM)-Technik mit der bekannten WDM-Technik über eine Graded Index MMF anhand von Experimenten verglichen. Es konnte an Augendiagrammen gezeigt werden, dass eine fehlerfreie Übertragung über 300 m MMF sowohl beim MGDM und beim WDM Ansatz möglich ist, wobei die MGDM-Technik stärker durch die Modendispersion negativ beeinflusst wird.

Abschließend wurde gezeigt, dass die MGDM-Technik eine Alternative zur WDM-Technik hinsichtlich der Kosteneffizienz in zukünftigen optischen Netzen darstellt.

## Referenzen

- [1] A.M.J. Koonen, H. v.d.Boom, I.T. Monroy, G.-K. Khoe; OFC 2004; FG 4
- [2] C.Xia, W.Rosenkranz; OFC 2005, OFO5
- [3] L.B. Aronson, B.E. Lemoff, L.A. Buckham, D.W. Dolfi; OFC 1997; PD 13
- [4] H.R. Stuart; OFC 2000, ThV2-1
- [5] L. Raddatz, I.H. White, D.G. Cunningham, M.C. Nowell; IEEE Journal of Lightw. Techn., Mar. 1998, pp. 324-331
- [6] S.Schöllmann, C.Xia, W.Rosenkranz; OFC 2006; OWR 3
- [7] C.P. Tsekrekos, A. Martinez, F.M. Huijskens, A.M.J. Koonen; ECOC 2005; We4.P.113