Leistungsuntersuchung photonischer Vermittlungsstufen

Jan Späth

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. P. Kühn
Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart

Tel.: 0711/121-2488; Fax: 0711/121-2477; E-Mail: spaeth@ind.uni-stuttgart.de

1 Einführung

Durch die hohe Übertragungskapazität optischer Faserstrecken und die Fortschritte in der optischen Vermittlungstechnik sind photonische Netze als künftige Transportnetze hervorragend geeignet. Diese Weitverkehrsnetze werden dabei hierarchisch aus optischen und elektronischen Schichten aufgebaut sein. Entscheidende Voraussetzung für einen Erfolg neuer photonischer Technologien ist dabei eine Netzplanung, die zu effizienten und sehr leistungsfähigen Netzen unter Einhaltung der QoS-Anforderungen (*Quality of Service*) führt [2]. Eine wichtige Neuerung stellt dabei das WDM-Verfahren (*Wavelength Division Multiplexing*) dar, bei dem mehrere unterschiedliche Wellenlängen gleichzeitig auf einer Faser geführt werden.

Für mögliche Netzkonzepte ergeben sich zwei grundsätzliche Alternativen: (1) das WP-Verfahren (*Wavelength Path*), bei dem von der Quelle bis zur Senke eine durchgehende Wellenlänge verwendet werden muß, und (2) das VWP-Verfahren (*Virtual Wavelength Path*), bei dem die Wellenlängen den Verbindungen abschnittsweise zugeordnet werden und deshalb für jede Wellenlänge ein Umsetzer (Konverter) erforderlich ist (Bild 1). Diese Konzepte beeinflussen die Architektur der zentralen Elemente künftiger Weitverkehrsnetze, der Vermittlungsknoten mit optischer Cross-Connect-Funktionalität. In dieser Arbeit werden deshalb mögliche Architekturen solcher *Cross-Connects* (CCs) unter besonderer Beachtung der Wellenlängenkonverter vorgestellt und verglichen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einem Analyseverfahren zur Bestimmung der Verlustwahrscheinlichkeit von CCs auf Verbindungsebene.

2 Anforderungen an die Architektur photonischer Vermittlungsknoten

Erste Ideen zur Realisierung photonischer Vermittlungsknoten basierten auf einer opto-elektronischen Wandlung der Signale und anschließender Vermittlung im elektrischen Bereich. Da ein Großteil der Nachrichten vom Knoten meist nur weitergereicht wird, wurden dann Konzepte vorgeschlagen, bei denen ein Teil der Kanäle (d.h. Wellenlängen) rein optisch durchgeschaltet wird. Anfang dieses Jahrzehnts entstanden dann Architekturen, welche optische Vermittlung - allerdings noch ohne Wellenlängenumsetzung - erlaubten. Die Anforderungen an künftige Vermittlungsknoten umfassen u.a.:

- hohe Durchsatzraten durch rein optische Vermittlung einzelner Wellenlängen
- Vermittlung aller im WDM-Verfahren auf einer Faser transportierten Wellenlängen
- Einspeisung bzw. Auskopplung lokalen Verkehrs
- Umwandlung von Signalen in den elektrischen Bereich zur weiteren Signalverarbeitung

Das Ziel ist es, eine wirtschaftliche Alternative zu elektrischen Netzknoten bei vergleichbarem Durchsatz und unter Einhaltung der QoS-Anforderungen zu erhalten. Eine wichtige QoS-Anforderung ist das Erreichen einer geringen Verlustwahrscheinlichkeit. In optischen WDM-Netzen kann es zur Blockierung von Verbindungen kommen, wenn die gleiche Wellenlänge von verschiedenen Eingangsfasern eines Knotens auf dieselbe Ausgangsfaser vermittelt wird, was zu einem sogenannten *Wellenlängenkonflikt* führt. Dies kann durch Wellenlängenkonverter verhindert werden. Sie erlauben die Umsetzung einer ankommenden Wellenlänge auf eine (beliebige) abgehende Wellenlänge. Solche Konverter stellen ein wichtiges Element künftiger optischer (CCs) dar. Da ihre Realisierung sehr aufwendig ist, wurden verschiedene Architekturen für CCs vorgeschlagen, die im folgenden kurz vorgestellt werden.

3 Architekturen photonischer Cross-Connects

Das zentrale Element eines optischen CCs ist die Vermittlungsstufe, die aus zwei Teilen besteht: einer Raumstufe und einer Wellenlängenstufe (Bild 2). λ_1 bis λ_N bezeichnen dabei die *N* Wellenlängen, die auf einer Faser transportiert und am Eingang der Vermittlungsstufe durch Demultiplexer getrennt werden. Die Architektur kann prinzipiell noch durch eine Zeitstufe als dritte Vermittlungsstufe erweitert werden. Da augenblicklich noch keine überzeugenden Realisierungen einer rein optischen Zeitvermittlung vorliegen, soll diese im folgenden nicht weiter betrachtet werden.

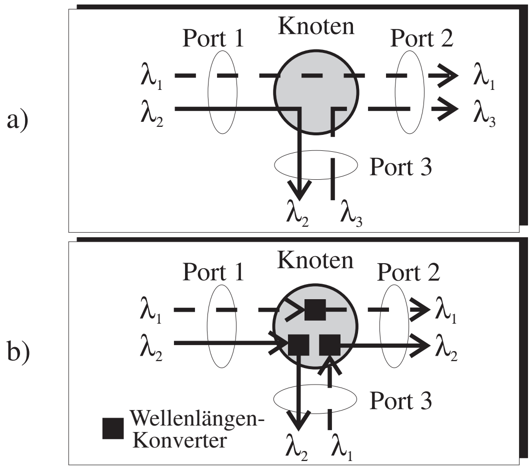

Bild 1: a) WP-Konzept (keine Konverter)
b) VWP-Konzept

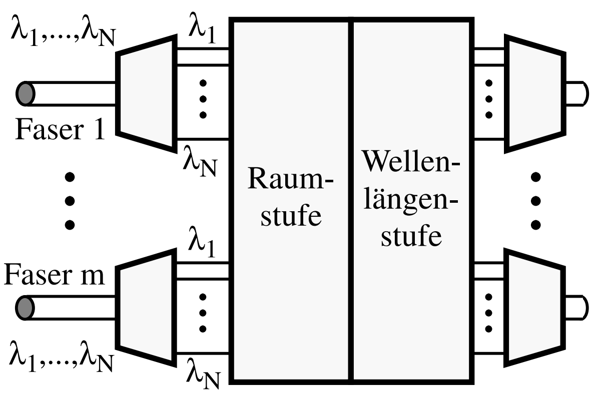

Bild 2: Grundarchitektur eines Cross-Connects

Eine Möglichkeit zur Klassifizierung von CCs stellt der Grad der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen dar. Da nämlich meist nicht für alle Kanäle gleichzeitig eine Wellenlängenumsetzung in allen Knoten erforderlich ist, können die teuren Konverter durch Konzentration in sogenannten *Pools* gemeinsam genutzt werden. Es lassen sich die folgenden fünf Gruppen unterscheiden (diese Unterteilung ist prinzipiell auch für andere Ressourcen wie z.B. Regeneratoren denkbar):

- CCs mit einem Konverter pro *Kanal* bzw. *Wellenlänge* (VWP-CC)
- CCs mit einem Konverter-Pool für jede *Faser* („Share-per-Fibre"-CC)
- CCs mit einem Pool für jede *Knotenverbindung* (Link), die evtl. mehrere Fasern umfaßt
- CCs mit einem gemeinsamen Pool für *alle Kanäle* („Share-per-Node"-CC)
- Ein Konverter-Pool für *mehrere CCs* oder sogar das ganze Netz

Die Ressourcen könnten bei einer netzweiten, gemeinsamen Nutzung am effizientesten verwendet werden. Allerdings erfordert dieses Konzept nicht nur einen sehr hohen Aufwand für das Netzmanagement, es müssen auch zahlreiche physikalische Randbedingungen wie z.B.

maximale Laufzeiten berücksichtigt werden. Dieser Ansatz scheint daher nur in relativ kleinen Netzen sinnvoll zu sein und wird im folgenden nicht weiter betrachtet.

Bei einem qualitativen Vergleich der unterschiedlichen Architekturen läßt sich feststellen, daß mit steigender Anzahl der Konverter sowohl die Leistungsfähigkeit des Netzes als auch die Kosten zur Realisierung der Knoten steigen. Außerdem wird der Aufwand für das Netzmanagement mit zunehmender Zentralisierung (d.h. gemeinsamer Nutzung) größer. Intern blockierungsfreie CCs können nur dann erreicht werden, wenn für jede Wellenlänge in jedem Knoten ein Konverter zur Verfügung steht. Ein ausführlicherer Vergleich findet sich in [1].

4 Modellierung

Dieser Abschnitt enthält eine kurze Beschreibung der Modellbildung für die Leistungsuntersuchung eines einzelnen CCs mit einer prinzipiellen Architektur gemäß Bild 2. Jeweils m Fasern sind am Ein- und Ausgang des CCs angeschlossen. Ein Demultiplexer trennt die N Wellenlängen, die im WDM-Modus auf jeder Faser transportiert werden. Diese Wellenlängen durchlaufen eine blockierungsfreie Raumvermittlungsstufe. Daran schließt sich eine Stufe mit Wellenlängenvermittlung gemäß dem jeweiligen Pool-Konzept an, ehe Multiplexer die Wellenlängen auf den abgehenden Fasern wieder zusammenfassen. Für die technische Realisierung gibt es jeweils mehrere Möglichkeiten ([1]).

Um die Verlustwahrscheinlichkeit des CCs zu berechnen, ist es ausreichend, die abgehenden Fasern zu betrachten, da nur dort Verluste auftreten können. Es gibt zwei Ursachen für Verluste. Zum einen kann eine abgehende Faser voll belegt sein, so daß die neu ankommende Verbindung abgelehnt werden muß. Zum andern kann ein Wellenlängenkonflikt auftreten, der mangels verfügbarer Konverter nicht aufgelöst werden kann. In beiden Fällen der Blockierung wird die Verbindung abgelehnt, d.h., es wird ein reines Verlustsystem betrachtet.

Für die Modellierung des Verkehrs wird eine unendliche Zahl von Quellen angenommen, die Verbindungswünsche zufällig zu einem beliebigen Knoten des Netzes erzeugen. Dabei wird eine gleichförmige Verteilung des Verkehrs angesetzt, d.h., jeder Knoten wird mit der gleichen Wahrscheinlichkeit als Ziel ausgewählt. Da keine spezielle Routingstrategie vorausgesetzt wird, führen diese Annahmen zu gleichen Wahrscheinlichkeiten für die Verwendung der Ausgangsfasern. Damit sind die m Ausgangsfasern eines Knotens mit Ausnahme der eventuellen gemeinsamen Benutzung von Konvertern unabhängig voneinander.

Darüber hinaus wird angenommen, daß jede der verfügbaren w Wellenlängen mit gleicher Wahrscheinlichkeit benutzt wird. Dies ist durch die Voraussetzung gerechtfertigt, daß jeder Sender bei einer neuen Verbindung und ebenso jeder Konverter beim Umsetzen einer Verbindung eine zufällige aus den verfügbaren Wellenlängen auswählt.

Diese Annahmen führen zu einem Poisson-verteilten Ankunftsprozeß mit Rate μ von Verbindungswünschen für jede Ausgangsfaser eines CCs. Außerdem werden die Verbindungsdauern als negativ-exponentiell verteilt mit Mittelwert ε angesetzt. In realen Netzen werden aufwendigere Routingstrategien als die angenommene zufällige Auswahl angewandt werden. Da dies zu höheren Durchsätzen führen wird, stellt die gemäß obigen Annahmen berechnete Verlustwahrscheinlichkeit eine Obergrenze für die zu erwartenden realen Verlustwahrscheinlichkeiten dar.

5 Analyseverfahren

Im folgenden wird beispielhaft die exakte Analyse eines „Share-per-Fibre“-CCs mit Hilfe einer zweidimensionalen Markoff-Kette gezeigt. Außerdem wird eine Näherungslösung für „Share-per-Link“-und „Share-per-Node“-CCs vorgestellt.

Die Anzahl der verfügbaren Wellenlängen w wird als Variable berücksichtigt, da eine Senkung der Verlustwahrscheinlichkeiten möglich ist, falls mehr Wellenlängen zur Verfügung gestellt werden als gleichzeitig auf einer Faser transportiert werden können $(w > N)$. Mit k werde die Anzahl der Konverter des Faser-Pools bezeichnet. Zu jedem Zeitpunkt gibt es eine Anzahl von Kanälen, die keine Konverter verwenden (i, $i \in 0, 1, \ldots, N$), und eine Anzahl von Kanälen mit Konvertern (j, $j \in 0, 1, \ldots, k$). Somit läßt sich der Zustandsraum durch (i, j) mit der Randbedingung $i + j \leq N$ beschreiben. Die Verkehrsannahmen aus Abschnitt 4 ergeben ein Angebot $A = \mu / \varepsilon$ pro Faser.

Bild 3 zeigt die resultierende Markoff-Kette mit Übergangsraten. Zustände, in denen neue Verbindungswünsche aufgrund voll belegter Fasern verlorengehen, sind dick umrandet. In den grau unterlegten Zuständen tritt ein Verlust nur dann auf, wenn die Wellenlänge der Verbindung bereits belegt ist, da keine Konverter mehr verfügbar sind.

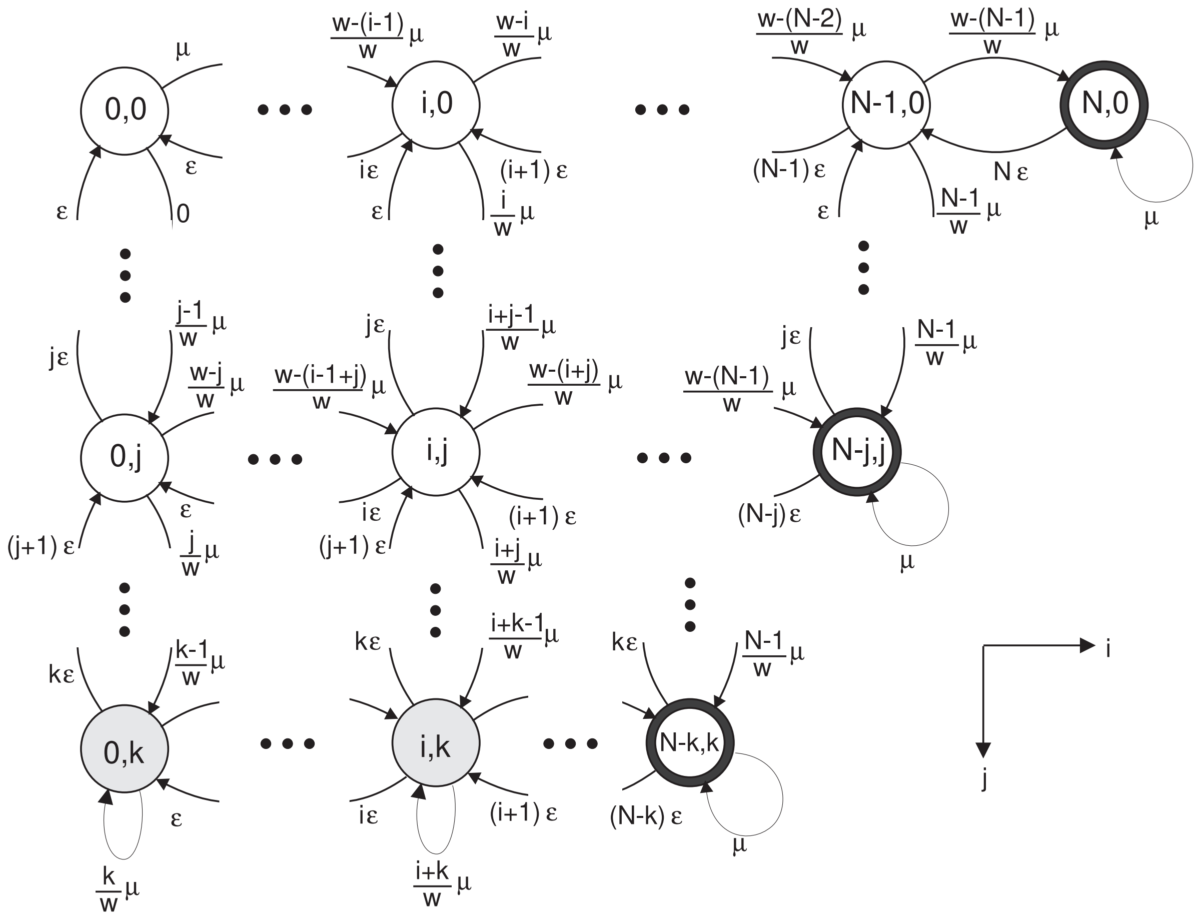

Bild 3: Zustands-Übergangs-Diagramm für eine „Share-per-Fibre"-Architektur

Die Analyse dieses Modells führt auf ein System linearer Gleichungen. Die Gleichgewichtswahrscheinlichkeit $p_{i,j}$ des Zustands (i, j) kann durch diese Gleichungen und die Normierungsbedingung $\sum_{i=0}^{N} \sum_{\substack{j=0 \\ j \leq k}}^{N-i} p_{i,j} = 1$ bestimmt werden. Aus den Werten $p_{i,j}$ ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten für Verluste durch Wellenlängenkonflikte zu

$B_{konv,\,faser} = \sum_{i=0}^{N-k-1} p_{i,\,k} \cdot \frac{i+k}{w}$ und zu $B_{voll} = \sum_{j=0}^{k} p_{N-j,\,j}$ für Verluste durch vollständig gefüllte Fasern. Die Gesamtverlustwahrscheinlichkeit resultiert somit zu $B = B_{konv,\,faser} + B_{voll}$.

Prinzipiell ist es möglich, für alle Architekturen von CCs die Verlustwahrscheinlichkeiten mittels mehrdimensionaler Markoff-Ketten exakt zu berechnen. Da sich aber bereits für einfache Strukturen sehr komplexe und große Zustandsräume ergeben, können exakte Ergebnisse nur für relativ kleine CCs gewonnen werden. Für größere CCs und insbesondere für CCs mit einer beliebigen Anzahl von Fasern und einem Pool pro Link bzw. pro Knoten wurde deshalb ein Näherungsverfahren entwickelt.

Eine Näherung für die Verlustwahrscheinlichkeit aufgrund Konvertermangel (B_{konv}) bei „Share-per-Link"- oder „Share-per-Node"-CCs kann wie folgt gewonnen werden. Zuerst wird eine unbegrenzte Anzahl von Konvertern angenommen (Wellenlängenkonflikte können nicht auftreten) und die sich ergebende Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl belegter Konverter einer Einzelfaser bestimmt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Gesamtzahl belegter Konverter ergibt sich durch eine Faltung der einzelnen Wahrscheinlichkeitsverteilungen. $B_{konv,\,l}$ bezeichne die Wahrscheinlichkeit, daß insgesamt genau l Konverter durch alle Fasern belegt sind. Dann kann B_{konv} durch die Summe der Wahrscheinlichkeiten aller Zustände, in denen mehr als die k verfügbaren Konverter belegt sind, angenähert werden: $B_{konv} = \sum_{l \geq k} B_{konv,\,l}$.

Diese Approximation liefert eine Obergrenze der Verlustwahrscheinlichkeiten durch Überschätzung der exakten Ergebnisse. Sie wurde durch einen Vergleich mit der exakten Analyse eines „Share-per-Node"-CCs mit zwei angeschlossenen Fasern mittels einer vierdimensionalen Markoff-Kette überprüft.

6 Ergebnisse

Im folgenden werden einige Ergebnisse vorgestellt, die den Einfluß der Konverterzahl auf die Verlustwahrscheinlichkeit eines CCs zeigen. Diese und weitere Ergebnisse finden sich in [1].

Die Anzahl N der Wellenlängen auf einer Faser wird mit 8 in einer zur Zeit realistischen Größenordnung gewählt, obwohl in einigen Veröffentlichungen auch von wesentlich größeren Werten ausgegangen wird. Außerdem wird die Anzahl der verfügbaren Wellenlängen w gleich N gewählt. Werte für $w > N$ sind zwar möglich, spielen in zur Zeit diskutierten Systemen aber keine wesentliche Rolle.

Bild 4 zeigt die exakt gewonnenen Verlustwahrscheinlichkeiten für einen CC mit „Share-per-Fibre"-Architektur. Die Fälle $k = 0$ bzw. $k = 8$ stellen einen CC für das WP- bzw. VWP-Verfahren dar. Die Ergebnisse zeigen, daß sich die Verlustwahrscheinlichkeiten für die angenommenen dynamischen Verkehrsverhältnisse, ausgehend von einer Faser ohne Konverter, durch Bereitstellung zusätzlicher Konverter deutlich senken läßt. Es zeigt sich aber auch, daß eine Erhöhung der Konverterzahl von z.B. 6 auf 8 kaum mehr eine Verbesserung bringt.

Dies kann durch die Tatsache erklärt werden, daß die Verlustwahrscheinlichkeit aus zwei Komponenten besteht: (1) alle Kanäle einer Faser sind belegt und (2) ein Wellenlängenkonflikt kann nicht aufgelöst werden, da keine Konverter mehr verfügbar sind. Der Einfluß dieser beiden Anteile hängt wesentlich vom Verkehrsangebot und der Architektur des CCs ab.

Bild 5 zeigt die Verlustwahrscheinlichkeit eines „Share-per-Node“-CCs mit $m = 8$ Fasern, wovon jede $N = 8$ Wellenlängen gleichzeitig tragen kann, was insgesamt 64 Kanäle ergibt. CCs in dieser Größenordnung sind mit momentan verfügbaren Technologien realistisch. Die Kurven für $k = 0$ bzw. k = 64 ergeben sich für einen WP- bzw. VWP-CC. Diese Werte, die durch eine exakte Analyse gewonnen wurden, begrenzen den möglichen Bereich für Verlustwahrscheinlichkeiten bei beliebigen Pool-Konzepten.

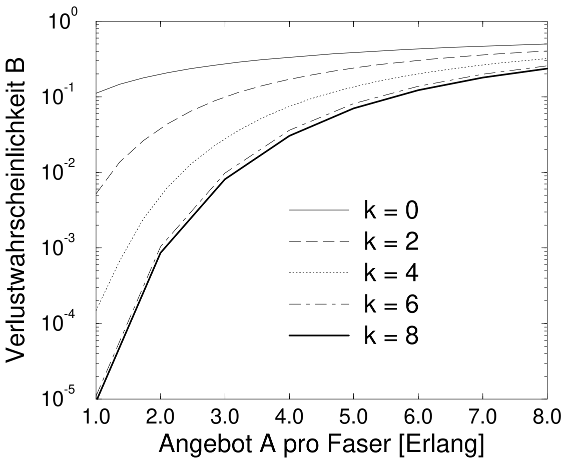

Bild 4: Verlustwahrscheinlichkeit B für „Share-per-Fibre“-CC ($N = 8$, $w = 8$)

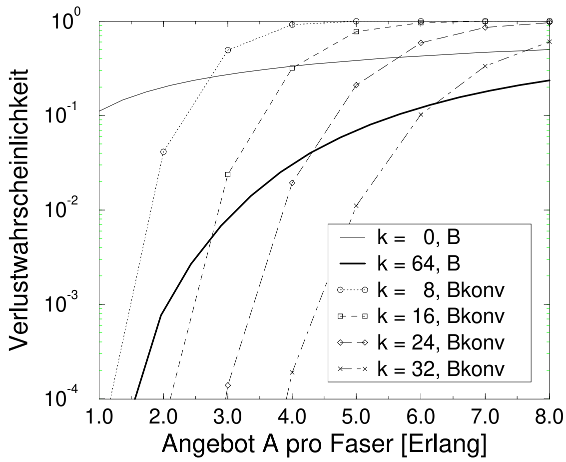

Bild 5: Gesamtverlustwahrscheinlichkeit B und Näherungen für Verluste durch Wellenlängenkonflikte B_{konv} ($m = 8$, $N = 8$, $w = 8$)

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, überschätzt die gewählte Approximation (gestrichelte Linien in Bild 5) den exakten Verlauf von B_{konv}. Damit können Bereiche bestimmt werden, in denen die Anzahl von Konvertern bei gegebenem Verkehrsangebot nur noch eine vernachlässigbare Auswirkung auf die Verlustwahrscheinlichkeit hat. Minimale Gesamtverluste werden dann erreicht, wenn für jeden Kanal ein Konverter zur Verfügung steht (im Bild 5 die Kurve für B bei $k = 64$). Die Verringerung der Gesamtverluste durch Hinzufügen weiterer teurer Konverter ist vernachlässigbar, solange B_{konv} unterhalb dieser Untergrenze liegt.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein kurzer Vergleich optischer Cross-Connects mit unterschiedlichen Pool-Konzepten für Wellenlängenkonverter vorgestellt. Für die verschiedenen Architekturen wurden exakte und approximative Verfahren zur Bestimmung der Verlustwahrscheinlichkeiten erarbeitet. Die Näherungsverfahren dienen zur Reduzierung des Rechenaufwandes, der bereits bei relativ einfachen Knotenstrukturen stark ansteigt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Verluste bei dynamischen Verkehrsverhältnissen durch Einsatz von Konvertern stark verringert werden können. Ab einem bestimmten Ausstattungsgrad führen zusätzliche Konverter allerdings nur noch zu vernachlässigbar kleinen Verbesserungen. Somit können die Ergebnisse zur Dimensionierung von CCs mit Wellenlängenkonvertern unter Einhaltung einer bestimmten Verlustwahrscheinlichkeit dienen.

Literatur

[1] J. SPÄTH, U. GREMMELMAIER, U. BRIEM, M.N. HUBER, „Architecture and Performance Evaluation of Future Photonic Networks“, *Proceedings of the 12th ICCC Conference*, Seoul 1995, Bd. 2, S. 661 - 666

[2] J. SPÄTH, U. GREMMELMAIER, M.N. HUBER, U. BRIEM, „Design and Planning Aspects of Future Photonic Transport Networks“, *Proceedings of the 13th EFOC&N Conference*, Brighton 1995, Bd. 2, S. 60 - 63