Vergleich von Architekturen für das zukünftige optische Internet

Klaus Dolzer ◆, Thomas Fischer ✝, Christoph Gauger ◆, Monika Jäger ★, Martin Maier ✠, Erwin Patzak *, Michael Schlosser *, Dominic Schupke ✝, F.-Joachim Westphal ★, Hagen Woesner ✠

* Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik Berlin GmbH
✝ Lehrstuhl für Kommunikationsnetze, Technische Universität München
★ T-Systems Nova GmbH, Technologiezentrum Berlin
✠Institut für Nachrichtentechnik und Theoretische Elektrotechnik, Technische Universität Berlin
◆ Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart

Kurzfassung

Im Beitrag des BMBF Verbundvorhabens TransiNet werden mögliche, auf optische Vermittlung basierende Architekturen für den IP-Transport in zukünftigen Weitverkehrsnetzen identifiziert und Bewertungskriterien für diese Architekturen aufgestellt. Dabei gilt es den zukünftigen Anforderungen, wie wachsende Anzahl von Nutzern, stetig steigendes Datenaufkommen, neue (Multimedia-) Dienste, Dienstgütedifferenzierung (QoS) und eine erhöhte Ausfallsicherheit zu berücksichtigen.
In einem ersten Ansatz werden die Architekturen hinsichtlich notwendiger und breitgefächerter Kriterien aus den Bereichen Netzbetreiberanforderungen, Routing und Resilience, Hardwarekomplexität und Dienstgüteunterstützung bewertet.

1 Einleitung

Das Projekt TransiNet (Innovative Transportnetze für das Breitband-Internet) konzentriert sich auf die Untersuchung von neuen Ansätzen und Systemkonzepten für den IP-Transport über optische und über drahtlose Netze. An diesem vom BMBF über 3 Jahre geförderten Vorhaben sind die fünf oben genannten Institutionen beteiligt. Die Arbeitsschwerpunkte von TransiNet bilden Network Operations, Routing & Resilience Aspekte, Knoten und Netzarchitekturen, sowie Wireless [1].

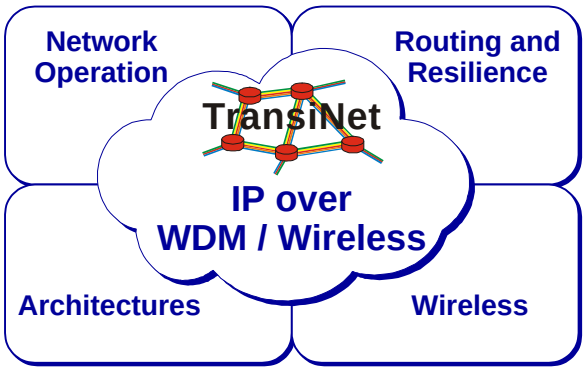

Bild 1 Arbeitsschwerpunkte TransiNet

Im Zentrum dieses Beitrages werden die ersten Schritte eines Architekturvergleiches für Weitverkehrsnetze stehen, der mögliche, auf optischer Vermittlung basierende Architekturen für das Internet der nächsten Generation einführt, beschreibt und bewertet.

Die Architekturvarianten umfassen schnelle IP-Router, die Kombination von IP-Routern und optischen Cross-Connects, die sowohl in Overlay- als auch in Peer-to-Peer-Konfigurationen eingesetzt werden können, sowie verschiedene Varianten von Optical Burst Switching-Architekturen und Optical Packet Switching-Architekturen. Ergänzend werden AWG-basierte (Arrayed Waveguide Grating) Architekturen betrachtet, die für Metro-Netze geeignet sein könnten. Die zentralen Fragestellungen bei diesem Vergleich sind, welche Architekturen prinzipiell für einen zukünftigen Einsatz in Weitverkehrsnetzen in Frage kommen und was die Implikationen einer Entscheidung für solche Architekturen sind. Hierzu werden die Architekturen hinsichtlich einer Vielzahl breitgefächerter Kriterien unter den Aspekten der Netzbetreiberanforderungen, des Routings und der Ausfallsicherheit (Resilience), der Hardwarekomplexität und der Dienstgüteunterstützung verglichen.

2 Anforderungen an zukünftige Transportnetze

Die wachsende Anzahl von Nutzern des Internet erzeugt ein stetig ansteigendes Datenaufkommen, das die Netzanbieter zum Ausbau ihrer Netze veranlasst. So hat das Verkehrsaufkommen aus meist Internet basierten Datenverbindungen, das Verkehrsaufkommen, der Sprachdienste bereits in vielen Netzen überschritten. Dabei beginnt sich die Schere zwischen den schnell wachsenden Kosten zur Bereitstellung der

notwendigen Übertragungskapazität und den langsamer wachsenden Gewinnen weiter zu öffnen, da die Gebühren für die Nutzer nicht im gleichen Maße erhöht werden können, wie die Bereitstellungskosten für die Dienste steigen.
Eine Vielzahl neuer (Multimedia-) Dienste, wie z. B. Voice-over-IP, Videokonferenzen oder auch Online-Spiele, stellen zusätzliche technische Anforderungen, da sie nicht nur große Datenmengen erzeugen, sondern darüber hinaus auch noch eine erhöhte Dienstgütedifferenzierung (QoS) und Ausfallsicherheit im Netz fordern. Als Konsequenz dieser Entwicklung wird die Notwendigkeit für neue, effiziente und kosteneffektive Transportnetzarchitekturen, Vermittlungstechniken und Protokollen für die kommenden Generationen des Internets immer größer.

Versucht man die Anforderungen an zukünftige Netze aus Betreibersicht zusammenzufassen, so lassen sich drei Schwerpunkte identifizieren:

- Kostenreduzierung,
- neue und erweiterte Funktionalitäten für zukunftssichere Dienste,
- Interoperabilität und Betriebssicherheit.

Die Forderung nach einem möglichst großen Potential zur weiteren Kostenreduzierung dominiert alle anderen Anforderungen. Wobei die Kostenreduzierung sowohl die Investitionskosten für den weiteren Ausbau der Netze, als auch die laufenden Betriebskosten betrifft.

Neben dem Aspekt der Kostenreduzierung sind neue, bzw. erweiterte Funktionalitäten für einen Netzbetreiber immer dann von übergeordnetem Interesse, wenn sie dazu eingesetzt werden können, sich von den am Markt agierenden Wettbewerbern positiv abzuheben und Dienste anzubieten, die am Markt noch nicht oder noch nicht in einer bestimmten Qualität verfügbar sind. Beispiele dafür sind die schnelle Bereitstellung von neuen Verbindungen in einem Weitverkehrsnetz oder die Verbesserung der Verfügbarkeit einer Verbindung durch optimierte Schutzmechanismen. Bei der Bewertung von Schutzmechanismen ist aus Netzbetreibersicht neben der Geschwindigkeit des Schutzes im Fehlerfall auch der Umfang der zusätzlichen notwendigen Kapazitätsressourcen ein wesentlicher Parameter.

Stehen verschiedene Schutzmechanismen zur Verfügung, so können über die Art des Schutzes z.B. auch eine weitere Differenzierung eines Dienstes stattfinden und für die verschiedenen Schutzklassen, wie „Best Effort“, hochverfügbar und höchstverfügbar jeweils angepasste Preismodelle aufgestellt werden.

Hinsichtlich der Interoperabilität der Netzarchitekturen gibt es nicht nur Anforderungen an das reibungslose Zusammenspiel der Teilnetze eines Netzbetreibers untereinander, sondern natürlich auch an das Zusammenspiel der Netze von unterschiedlichen Netzbetreibern sowohl auf nationaler-, als auch auf internationaler Ebene.

Eine nicht zu vernachlässigende Forderung ist auch die Interoperabilität des Equipments verschiedener Hersteller. Dabei zeigen die Erfahrungen, dass diese selbst dann nicht vollständig gegeben sein muss, wenn eine Technologie schon in hohem Maße standardisiert ist, wie dies beispielsweise bei SDH/ SONET der Fall ist.

Mit der seit einigen Jahren großflächig stattfindenden Nutzung der WDM-Punkt-zu-Punkt Übertragungssysteme wurde die erste Phase des „Optical Networking“ eingeleitet. Vor allem durch den Einsatz von optischen Faserverstärkern wurde dies ein überragender wirtschaftlicher Erfolg, da die Übertragungskapazitäten der ständig wachsenden Nachfrage angepasst werden konnten ohne notwendigerweise neue Fasern verlegen zu müssen. Die zweite Phase des „Optical Networking“ wird zur Zeit in die kommerzielle Nutzung überführt, indem Cross-Connects in die Übertragungsnetze integriert werden, die opak oder transparent in der Lage sind Wellenlängenpfade zu schalten und damit optische Netze flexible zu konfigurieren. Während die potentiellen Vorteile der optisch transparenten Netze noch immer sehr kontrovers diskutiert werden, besteht weitgehender Konsens darüber, dass dynamische Konfigurationsmöglichkeiten auf der Basis des Circuit Switching dazu dienen werden, zumindest einige Anforderungen an zukünftige optische Netze kurzfristig zu erfüllen. Betrachtet man die Konvergenz zwischen traditionellen Telekommunikationsnetzen und Datennetzen, dann können Varianten des Optical Packet Switching als potentielle dritte Phase des „Optical Networking“ angesehen werden.

	1	2	3	4a	4b	4c	4d	5d	5b	5a	5c	6a	6b
Name	Fat IP Router	IP/OXC overlay (ASON)	IP/OXC peer (GMPLS vs. MPλS)	OBS (Qiao, Xiong, Turner, IND)	OBS (Bayvel, Düser)	OBS (Wei)	OFS (Modiano)	OPS peer/ overlay	OPS/OXC	OPS	OPS (O-MPLS)	AWG singlehop	AWG multihop
Summary	IP packets over static wavelength links	IP packets (optionally groomed in SDH) over (virtual) wavelength paths	IP packets (optionally groomed in SDH) over (virtual) wavelength paths	IP aggregates (µsec) Over (virtual) wavelength paths (one-pass reservation, close-ended)	IP aggregates (tens of msec.) over (virtual) wavelength paths (end-to-end reservation, close-ended)	IP aggregates (hundreds of msec.) over (virtual) wavelength paths (one-pass reservation, open-ended)	IP aggregates (longer than RTT) over (virtual) wavelength paths (end-to-end reservation, open-ended)	IP aggregates (tens of µsec) over optical label-switched paths or static wavelength links	IP aggregates (few µs) over (virtual) wavelength paths, optical label-switched paths or static wavelength links	IP aggregates (few µsec) over optical label-switched paths or static wavelength links	IP packets over optical label-switched paths or static wavel. links, IP/MPLS functionality	IP packets groomed in slots over static (virtual) wavelength paths	IP aggregates (tens of ns hundreds of msec) over static wavelength links
Nodes	WDM statisch	Overlay	Peer	B	B	B	B	P	B	P	P	AWG	AWG

Bild 2 Übersicht der betrachteten Architekturen

3 Vorstellung der Architekturen

Als Referenzarchitektur ist die Verknüpfung von großen, sehr leistungsfähigen IP/MPLS Routern über WDM Links zu verstehen. Hier findet die Paketvermittlung auf der IP-, bzw. auf der MPLS-Ebene über Label Switched Paths (LSPs) statt. Auch die Schutzmechanismen sind auf diesen Layer beschränkt, d.h. IP-Rerouting oder MPLS-Restoration kann implementiert werden. Die WDM-Links sind statisch konfiguriert und (teil-)vermaschen die IP-Knoten.
Neben der festen „Verdrahtung“ der IP-Knoten gibt es die Möglichkeit diese über optische Cross Connects (OXCs) opak oder transparent miteinander zu verbinden, so dass ein Routing im optischen Layer stattfinden kann. Je nach Ausprägung kann ein statisches oder dynamisches User-Network-Interface (UNI) zwischen IP-Routern und OXCs implementiert werden, über die nach Anforderung des IP-Clients optische Verbindungen durch die OXCs auf- oder abgebaut werden können. Schutzmechanismen können bei diesen Architekturen auch auf der optischen Schicht realisiert werden. Abhängig von der Art der Control Plane lassen sich diese Architekturen in die, in der jüngsten Vergangenheit viel diskutierten, Overlay- und Peer-Ansätze unterteilen. Beim Overlay-Ansatz, er entspricht dem Automatic Switched Optical Network (ASON) Ansatz der ITU-T, wird das Routing und die Signalisierung auf IP-Ebene und zwischen den OXCs in vollkommen getrennten und unabhängigen Instanzen durchgeführt. Diese Architektur ist dadurch u.A. auch als Transportnetzplattform für Nicht-IP-Dienste geeignet. Im Peer-Ansatz, er entspricht dem MPλS/ GMPLS Ansatz wie er im IETF diskutiert wird, gibt es eine vereinheitlichte Control Plane, die mit einer Routing-, Signalisierungs-Instanz und einem Adressraum, sowohl für die IP-Schicht, als auch für die optischen Schicht zuständig ist. D.h. die IP-Topologie ist identisch mit der Topologie der OXCs. In beiden Ansätzen kann aus IP-Sicht die Topologie dynamisch konfiguriert werden. Gegenüber der Referenzarchitektur kann damit die Größe der IP-Router reduziert werden, da nicht mehr der gesamte Verkehr an jedem Knoten terminiert werden muß, sondern von den optischen Knoten transparent (oder opak) durchgeleitet werden kann.

Unter „Optical Burst Switching“ sind in der Literatur verschiedene Architekturen für hochdynamische optische Netze beschrieben, deren Definition von „Burst“ sich z.T. deutlich unterscheiden. All diese Architekturen haben allerdings eine strenge Trennung von Bursts und Steuerinformation gemeinsam. Dabei wird die Steuerinformation zur Verarbeitung und Einrichtung des Datenkanals in den Kernnetz-Knoten stets opto-elektronisch gewandelt, während die Daten im optischen Bereich bleiben.

Bild 3 zeigt eine Klassifizierung für OBS Architekturen, wobei der markierte Block in TransiNet bereits intensiver untersucht wurde [2,3,4]:

- Ein grundsätzliches Unterscheidungskriterium ist, ob die Einrichtung des Datenkanals Ende-zu-Ende erfolgt und abgeschlossen ist, bevor die Übertragung des Bursts beginnt oder ob die Übertragung unbestätigt erfolgt (one-pass reservation). Der letzte Ansatz legt eine vollständig dezentrale Steuerung nahe, während der erste sowohl durch zentrale als auch dezentrale Steuerung realisiert werden kann. Das Ziel der OBS Ansätze mit „one-pass reservation“ ist, die für das Einrichten einer Verbindung notwendige Zeit im Hinblick auf relativ kurze Daten Bursts zu optimieren.
- Ein weiteres Kriterium besteht darin, ob die genaue Übertragungsdauer eines Bursts zuvor bekannt ist und in die Reservierung des Datenkanals einbezogen wird oder ob nicht.

Eine zentrale Rolle im Kontext von IP und WDM spielen die OBS-Randknoten, die IP-Pakete im Elek-

trischen zu Bursts assembliert und schließlich in das eigentliche OBS Netz senden. Da die Ressource-Reservierung von OBS-Architekturen ohne Bestätigung auf statistischem Multiplex beruhen, treten Blokkierungssituationen auf, die im Wellenlängenbereich durch Konversion, im Zeitbereich durch Faserverzögerungsleitungen oder im Raumbereich durch das sog. „deflection routing“ aufgelöst werden können.

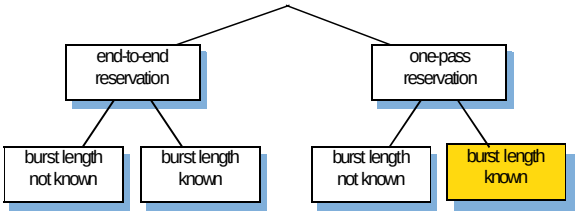

Bild 3 Klassifizierung von OBS-Architekturen

Auch hinsichtlich optischer Paketvermittlung (OPS) gibt es einige unterschiedliche Ansätze, die jedoch nicht so klar differenzierbar sind wie im Falle der optischen Burstvermittlung.
Bei allen OPS Konzepten treten zwei grundsätzliche Probleme auf. Zum einen existieren keine optische RAM-Speicher. Speicher können nur in Form von optischen Verzögerungsleitungen realisiert werden. Zum zweiten müssen optische Schaltmatrizen realisiert werden, die hinreichend groß (z.B. 32x32 Fasern mit jeweils 32 Wellenlängen) und genügend schnell (im Submikrosekunden-Bereich) sind. Letzteres stellt mit den derzeitigen Technologien ein Problem dar, zu dessen Lösung noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden muss. Für die Dauer des Umschaltens der Schaltknoten müssen Gardzeiten eingehalten werden. Das Verhältnis zwischen den Gardzeiten und den Längen der Pakete muss klein sein, um Kapazitätsverluste zu vermeiden. Erreicht werden kann dies durch schnelle Schalter oder durch Aggregieren von IP-Paketen zu längeren optischen Paketen (einige bis mehrere 10 Mikrosekunden). Wegen der Einhaltung von Gardzeiten und der Speicherung durch Verzögerungsleitungen reduziert ein auf Paketebene synchroner (geslotteter) Betrieb mit festen Paketlängen den Architekturaufwand beträchtlich erfordert aber zusätzlichen Aufwand zur Synchronisation der Pakete.

Der so aggregierte Verkehr könnte dann über einfache Wellenlängenlinks oder (virtuelle) Wellenlängenpfade durch das Netz geführt werden. Hierbei handelt es sich um eine single-hop Übertragung, da die optischen Pakete erst am Ziel wieder auf der elektronischen OPS-Ebene verarbeitet werden. Sie ist besonders vorteilhaft, wenn Wellenlängen durch einzelne, hochbitratige Verkehrsströme ausgelastet werden.
Das schließt jedoch nicht aus, optisch labelvermittelte Pfade bereitzustellen, die mehrere OPS-Zwischenknoten aufweisen. Aufgrund wiederholter elektronischer Verarbeitung wird dies als multi-hop Übertragung bezeichnet. Ihre Stärke ist es, viele feingranulare Verkehrsströme zur Auslastung von Wellenlängen heranzuziehen.
Im Rahmen des TransiNet-Vorhabens werden folgende vier OPS-basierte Architekturansätze für optische Netzknoten betrachtet:

a) IP/MPLS Router durch optisch labelvermittelnde Router (OLS Router) verbunden, keinerlei Aggregation von IP-Verkehr auf optischer Ebene (Architektur 5c)
b) wie a), jedoch geringfügige Aggregation von IP Verkehr: weniger als 10 IP Pakete, d.h. Paketdauer im Mikrosekunden-Bereich (Architektur 5c)
c) wie a), aber mit burstähnlicher Aggregation: mehr als 10 IP Pakete, d.h. zehn bis einige zehn Mikrosekunden Paketdauer (Architektur 5d)
d) wie b), jedoch optional auch durch photonische OXCs verbunden (Architektur 5b)

Da sich viele Überschneidungen zeigen, wird auf eine gemeinsame Diskussion der Ansätze in den nachfolgenden Abschnitten verwiesen und lediglich Abweichungen gesondert hervorgehoben.

Wie bereits erwähnt wird auch die verallgemeinerte Form des Multiprotocol Label Switching (GMPLS) als ein Kandidat gesehen, die Effizienz und Skalierbarkeit von Transportnetzen zu verbessern, und Eigenschaften wie Traffic Engineering und Dienstgütedifferenzierung zu realisieren. Im MPLS wird jedes Paket mit einem Label versehen, welches anschließend zur Vermittlung innerhalb jedes Label Switch Routers (LSR) entlang des Label Switched Path (LSP) benutzt wird. Beim GMPLS wird der Begriff Label allgemeiner interpretiert in der Hinsicht, daß ein Label nicht notwendigerweise eine feste Anzahl von Bits vor dem IP Paket sein muß, sondern auch durch einen Zeitschlitz, einen Port oder eine Wellenlängen gegeben sein kann. Die Verwendung von Zeitschlitzen als Label ist offensichtlich gut geeignet für Zeitmultiplexsysteme, welche für ungleichförmigen Datenverkehr aber ungünstig sind. Hingegen scheint es sinnvoll, die beiden Dimensionen Raum und Wellenlänge für GMPLS Metronetze zu nutzen. Dabei werden Pakete z.B. weitergeleitet in Abhängigkeit davon an welchem Port und auf welcher Wellenlänge sie in einen Knoten eintreten. Bild 4 zeigt das Prinzip des Verteilnetzwerkes eines GMPLS Router (GMPLSR).
Das skizzierte Verteilnetzwerk des GMPLSR hat 8 Eingangs- und 8 Ausgangsports. An jedem Eingang kommen 8 optische Frequenzen oder Wellenlängen (f_1 bis f_8) an. Diese Wellenlängen geben dem GMPLSR Routinginformationen unabhängig von dem jeweiligen Eingangsport.

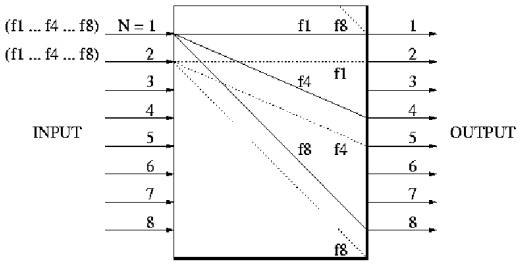

Bild 4 Prinzip eines GMPLSR Verteilnetzwerkes, bzw. Wellenlängenrouting eines AWG

Demnach enthält Wellenlänge *k* die Routinginformation, daß das dazugehörige Packet den GMPLSR am um (*k-1*) Ports verschobenen Ausgang wieder verlassen muß. D.h. durch die Wellenlänge des Eingangssignales wird der Ausgangsport festgelegt. Die Wellenlängen fungiert als Label, wie dies auch beim MPλS Ansatz der Fall ist, um Lichtpfade durch optische WDM Weitverkehrsnetze dynamisch zu schalten. Bild 4 stellt auch exakt das Wellenlängenroutingverhalten eines 8x8 AWGs dar. Demzufolge können AWGs nicht nur als Multiplexer u.ä. verwendet werden, sondern stellen auch eine Realisierungsmöglichkeit eines, allerdings statischen GMPLSR dar. Aufgrund des statischen Wellenlängenroutings eines AWGs, muß der Vermittlungsprozess durch Wahl der geeigneten Wellenlänge in den benachbarten Sendern stattfinden. Dieses Ansteuerung wird dazu verwendet, die vom AWG wellenlängenselektiv verteilten Lichtpfade effizient und kollisionsfrei zu nutzen. So erlaubt diese Architektur eine optische Paketvermittlung, indem jeder Sender Pakete statistisch auf der entsprechenden Wellenlänge multiplext, die anschließend vom AWG an den richtigen Ausgangsport weitergeleitet werden. Diese Fähigkeit Pakete in ihrer ursprünglichen Form, d.h. ohne Aggregierung und Labelzuweisung zu transportieren, könnte für Metronetze eine interessante Lösung darstellen. Darauf aufbauend wurden verteilte Kanalzugriffsverfahren sowohl für AWG basierte Single-hop als auch Multihop WDM Metronetze entwickelt, die in [5,6] detailliert beschrieben sind.

4 Bewertungskriterien

Für die Evaluierung der Architekturen sind geeignete Kriterien zu erstellen. Diese Kriterien und die Motivation für ihre Auswahl werden im folgenden erläutert. Die aufgeführten Architekturen sollen möglichst das gesamte Spektrum (der realisierbar erscheinenden Architekturen) abdecken. Die im Papier dargelegten Überlegungen konzentrieren sich im wesentlichen auf technische Gesichtspunkte. Die Kosten der verschiedenen Architekturen werden nicht detailliert behandelt, da sich Vorhersagen über die Investitionskosten der einzelnen Komponenten nur schwer treffen lassen. Es haben sich fünf Kriteriengruppen herausgebildet, die im folgenden erläutert werden:

- Die Funktionalität der Architektur
- Die Leistungsfähigkeit beim Betrieb der Architektur
- Die unterstützten Dienste
- Die Flexibilität bei Änderung der Netzwerkanforderungen oder Dimension
- Die Möglichkeiten der Einführung der Architektur

Die *Funktionalität der Architektur* wird durch den prinzipiellen Aufbau eines Architekturvorschlags bestimmt. Es wird dabei die grundsätzliche Struktur und die Beziehung zwischen den Kern- und Randknoten des Netzes dargestellt. Es werden die Routing- und Switching-Mechanismen sowie die Art des Multiplexings und die eventuelle Aggregierung von Verkehrsströmen festgelegt. Außerdem werden Schutz- und Restaurationsmechanismen bewertet. Die Möglichkeit der Einbettung von Dienstgütemerkmalen (QoS) in das jeweilige Konzept wird betrachtet. Die Nutzungsmöglichkeiten von Traffic Engineering Funktionen zur Optimierung des Dienstes IP wird ebenso bewertet, wie die implementierbaren Schutzmechanismen (Protection, sowie auch Restoration). Schließlich gilt es zu bewerten ob Funktionen oder Funktionsgruppen in mehreren Ebenen der jeweiligen Architektur vorhanden sind und somit eine in den meisten Fällen unnötige Redundanz vorhanden ist.
Der Punkt *Leistungsfähigkeit beim Betrieb der Architektur* geht in erster Linie auf den erreichbaren Datendurchsatz ein. Außerdem werden die Möglichkeiten zur Reduzierung des Overheads durch Verschlankung des Protokollstacks und der Verringerung von Setup-Zeiten diskutiert. Als weiteres Kriterium kann hier die Möglichkeit des Paketverlustes ausserhalb des in allen Architekturen vorhandenen IP Layers gesehen werden, wie dies beispielsweise bei OPS Verfahren vorstellbar ist.
Der dritte Kriterienkomplex *Unterstützte Dienste* ist eng mit der allgemeinen Funktionalität der Architektur verknüpft. Dennoch wird dieser Aspekt gesondert behandelt, da die Fragestellung, inwieweit Multicast-Verkehr, virtuelle private Netze und verschiedene Dienstgüteklassen bereits direkt auf den unteren Schichten der Hardware unterstützt werden, eine große Bedeutung für zukünftige optische Transportnetze hat. Eine herausragende Stellung nimmt dabei die Betrachtung der Dienstgüte und Dienstgüteklassen ein.
Ein weiterer Punkt ist die *Flexibilität bei Änderung der Netzwerkanforderungen*. Er spielt eine wichtige Rolle bei der späteren Anwendung und geht auf Fragestellungen der Möglichkeit für eine dynamische Konfiguration der Komponenten, sowie auf die Skalierbarkeit des Netzes ein. Dabei reicht das Spektrum von der dynamischen Zuschaltbarkeit von mehr Übertragungskapazität bis hin zum Aufwand, der beim

Hinzufügen eines kompletten neuen Knotens erforderlich ist.
Unter *Möglichkeiten der Einführung der Architektur* sollen die Vor- und Nachteile einer praktischen Realisierung des entsprechenden Architekturkonzepts diskutieren. Dabei werden Fragen wie – welche technischen Voraussetzungen müssen bei einer Einführung des entsprechenden Konzepts erfüllt sein wie ausgereift sind die notwendigen Technologien, wie komplex ist der Aufbau, die Konfiguration und das Management des Systems, wie kompatibel ist man zu anderen Architekturen, wie kann man von bestehenden Architekturen eine Migration durchführen und welche Interoperabilitäts-Ansätze zu anderen Architekturen sind erkennbar – diskutiert. Schließlich ist im Rahmen dieser Kriteriengruppe zu betrachten welche unterstützenden Standardisierungstendenzen bereits abzusehen sind.

5 Diskussion und erste Bewertungsansätze

Die im folgenden beschriebenen Bewertungsansätze der einzelnen Architekturen können zum jetzigen Zeitpunkt keineswegs als umfassend angesehen werden, sie spiegeln vielmehr die Schwerpunkte der bisherigen Arbeiten der Partner wieder und sind als unvollständiger erster Schritt auf dem Weg zu einer vereinheitlichten Bewertung zu verstehen.

Circuit Switching Architekturen

Die auf dem „traditionellen“ Circuit-Switching Ansatz beruhenden Architekturen, die Verknüpfung von IP-Routern über fest konfigurierte WDM-Verbindungen sei hier mit eingeschlossen, basieren auf einem vermaschten Netz. Je nach Ausprägung der Architektur kann die Konfiguration der Verbindungen im optischen Netzes über das Netzmanagement oder getriggert durch den IP-Client (direkt im Peer Ansatz, indirekt über ein UNI im Overlay-Ansatz) stattfinden. Neben dem Initiieren neuer Verbindungen durch einen Client sind die Möglichkeiten zu Protection und Restoration im optischen Layer und in Kombination mit dem IP/MPLS-Layer von herausragender Bedeutung und bieten die Möglichkeit die Resourcen der Transportnetze wesentlich besser auszunutzen, als dies mit bisherigen Ansätzen, z.B. im Rahmen der SDH-Technik möglich war. Dazu können beispielsweise Restoration Verfahren angewendet werden die aus Methoden abgeleitet sind, wie sie in reinen MPLS-Netzen genutzt werden [14].
Die Beurteilung der Dienstgüteunterstützung für die verschiedene IP über WDM-Architekturen hängt stark von der Gewichtung der einzelnen Netzebenen ab. Die existierenden statischen WDM-Netze bieten durch SDH in der optischen Ebene eine garantierte Dienstgüte, d. h. es treten keine Verluste auf und es wird eine feste und geringe Verzögerung erreicht. Allerdings können diese Netze Überlastsituationen in der IP-Schicht nicht vermindern, z.B. durch zusätzliche optische Verbindungen. Optische Netze mit dynamisch aufgebauten Wellenlängenpfaden (z. B. ASON) bieten dieselbe Dienstgüte in der optischen Schicht, könnten allerdings zusätzlich die Dienstgüte der IP-Schicht verbessern. Dafür muss für eine Gesamtbetrachtung die Möglichkeit einer Blockierung beim Pfadaufbau berücksichtigt werden. Aufgrund der Dominanz von TCP als Transportprotokoll und dessen Einfluss sowohl auf die vom Endnutzer erfahrbare Dienstgüte als auch die Netzlast selbst, sollte eine qualitative Beurteilung der Dienstgüte einer IP über WDM-Architektur entweder alle Schichten inkl. TCP einschließen oder diese unter Annahme der Unabhängigkeit der Schichten getrennt betrachten. Für beide Ansätze ist aber schon die Frage fundamental, wie in der optischen und der IP-Schicht überhaupt eine Dienstedifferenzierung erreicht werden kann.

Im Vergleich mit dem übrigen betrachteten Architekturen stehen die Circuit Switching Architekturen bereits relativ kurz vor der kommerziellen Einführung, bwz. entsprechen im Fall der Verknüpfung von IP-Routern über fest konfigurierte WDM-Verbindungen dem momentanen Stand der Technik. Zu allen Varianten gibt es bereits umfangreiche Standardisierungsdiskussionen in der ITU-T, des IETF und des OIF. Die Darstellung der konkreten Standardisierungstendenzen würde den Rahmen des Beitrages sprengen.

OBS-Architekturen

Alle OBS-Ansätze gehen von einem vermaschten Netz aus, wobei Kernknoten das rein optische Durchschalten von Bursts übernehmen und Randknoten IP-Verkehre basierend auf Label Switching-Konzepten zu Bursts aggregieren.
Obwohl die für die unterschiedlichen Burst Switching-Architekturen angenommenen Burstdauern von wenigen Mikrosekunden bis zu einigen hundert Millisekunden variieren, handelt es sich zusätzlich zu WDM stets um asynchrones Zeitmultiplex in der optischen Ebene.
Während die in [2,3,4,7] behandelten Architekturen eine erhöhte Blockierung im Netz durch eine minimale Transferzeit aufwiegen, wird in [15] der entgegengesetzte Ansatz verfolgt, indem große elektronische Speicher am Rand und eine Ende-zu-Ende-Reservierung angewendet werden.
Aufgrund der kurzen zum Kanalaufbau zur Verfügung stehenden Zeit, werden für OBS-Architekturen verbindungsorientierte Konzepte Anwendung finden, wie sie z. B. in GMPLS realisiert sind. Da die Verarbeitung der Steuerinformation in allen Knoten elektronisch erfolgt, können alle Labeloperationen durchgeführt und somit die gesamte GMPLS-Funktionalität genutzt werden, z. B. für Ersatzschalteverfahren.

Die Leistungsfähigkeit der angeführten OBS-Ansätze wird entscheidend von der zur Verfügung stehenden Anzahl von Wellenlängen und Konvertern bestimmt und kann verkehrstheoretisch meist durch ein Verlustsystem beschrieben werden [3]. Werden Faserverzögerungsleitungen eingesetzt, kann die Blockierung je nach Last und Pufferarchitektur deutlich verringert werden. Durch direkte Abbildung von IP/MPLS-Verkehr in optische Bursts, entfällt der Overhead einer zusätzlichen Anpassungsschicht.
Gemeinsame Leistungsuntersuchungen sowie Architektur- und Technologie-Studien für OBS-Ansätze ohne Ende-zu-Ende-Reservierung haben ergeben, dass günstige Werte für die Burstdauer im Bereich einiger Mikrosekunden liegen. Da sowohl die maximale Speicherdauer in aufwändigen FDL-Puffern als auch eine zusätzliche Wartezeit für eine frühzeitige Reservierung hochpriorer Bursts im Bereich weniger Burstdauern liegen, wird die Transferzeit eines Bursts von der Laufzeit durch ein Weitverkehrsnetz dominiert.

Für OBS existieren Ansätze, QoS direkt in der Burst-Ebene bereitzustellen. Dazu wird entweder ein Übertragungskanal für hochpriore Bursts zu einem früheren Zeitpunkt reserviert [7] oder durch ein gezieltes Verwerfen von Bursts ein angestrebtes Verlustverhältnis eingestellt [8]. Prinzipiell kommen für die hochdynamischen OBS-Netze, die auch in der optischen Schicht auf statistischem Multiplex basieren, zusätzlich zu Verlusten, variablen Verzögerungen und Verzögerungsschwankungen aus der IP-Schicht jene aus der optischen Schicht.

Im Vergleich zu Architekturen, die Wellenlängenkanäle für eine längere Zeit durchschalten, stellen OBS-Ansätze sehr dynamische und flexible Transportdienste bereit. Da OBS-Ansätze von vermaschten Netzen ausgehen, skalieren sie prinzipiell besser als jene, deren Knotenanzahl entweder durch die Größe eines zentralen Vermittlungsknotens (Sternnetze) oder die Anzahl Wellenlängen begrenzt ist (einige Ringnetzarchitekturen).

Zu den physikalischen Voraussetzungen für die Realisierung von OBS-Architekturen werden optische Schalter, die genügend schnell (im Submikrosekundenbereich) schalten, benötigt. Wir gehen dabei davon aus, dass die Schaltgeschwindigkeit mindestens eine Größenordnung kleiner als die minimale Burstlänge (etwa 10 Mikrosekunden) sein muß. Solche Schalter lassen sich mit als Schalter betriebenen optischen Halbleiterverstärkern (SOA-Gattern) und integriert optisch auf Basis von $LiNbO_3$ und InP realisieren. MEMS, die eine Schaltzeit im Bereich von 10 Millisekunden haben, sind deshalb nicht geeignet. Das Übersprechen durch nicht perfektes Umschalten und die Dämpfung stellen bei den integriert optischen Schaltern ein großes Problem dar, was die Realisierung von hinreichend großen Schaltmatrizen erschwert – wenn nicht unmöglich macht. Dieses Problem tritt bei aus SOA-Gattern aufgebauten Schaltmatrizen nicht in diesem Maße auf. Hier ist die Größe der Schaltmatrizen im wesentlichen durch das Rauschen (spontane Emission der SOAs) begrenzt. Schaltmatrizen in der Größe von 32 X 32 Fasern sind nach ersten Abschätzungen mit dieser Technologie möglich [9].
Die Realisierung der Randknoten, welche das Zusammenfassen der einzelnen Pakete zu Bursts und das spätere Aufteilen übernehmen, stellt an die elektronischen Komponenten hohe Anforderungen. Insgesamt erscheint die technischen Problemstellungen beim Aufbau von Knoten für OBS-Architekturen jedoch lösbar.
Nimmt man eine Netzinfrastruktur an, die burstartige optische Signale transportieren kann, könnten OBS-Knoten in Netze für optische Durchschaltevermittlung in einem Mischbetrieb eingeführt werden.

OPS Architekturen

Im Falle der optischen Paketvermittlung wird von einer vermaschten Netzsicht ausgegangen, wobei die Netzkanten durch (virtuelle) Wellenlängenpfade oder einfache Wellenlängenlinks gebildet werden. In diese Topologie werden optisch labelvermittelte Pfade mit Sub-Wellenlängen-Granularität eingebettet. Der hybride Ansatz aus Wellenlängen- und Paketvermittlung ermöglicht sowohl den Transport hochbitratiger Verkehre als auch die einfache, flexible und effiziente Bündelung und Übertragung niederbitratiger Verkehrsströme.
Alle betrachteten Ansätze aggregieren den Verkehr in gewissem Maße, um die endlichen Schaltzeiten optischer Schalter in der Paketdauer zu berücksichtigen, wenngleich dies bei einer der vorgestellten Architekturen nicht auf optischer Ebene stattfindet: vielmehr werden hier MPLS-Aggregate in das vorausgesetzte, bitratentransparente Paketformat eingepaßt. Dies erhöht die Effektivität, mit der die Wellenlängenkanäle genutzt werden.
Da auf der OPS-Schicht labelvermittelte Pfade konfiguriert werden, können durch die Ähnlichkeit zu MPLS auch nahezu dieselben Fehlertoleranz- und Traffic Engineering Verfahren Anwendung finden.
Beispielsweise könnte auf OPS-Ebene ein Pfadschutz mittels Pfadumlenkung oder auch Vorkonfiguration eines Ersatzpfades durchgeführt werden. Alle heute üblichen Maßnahmen des Kanten- und Knotenschutzes in optischen Transportnetzen sind einsetzbar; sie sollten jedoch einem Vergleich mit neueren Verfahren standhalten (z.B. p-cycles [10, 11]).
Auch die Optimierung der Verkehrsflüsse (Traffic Engineering) kann auf der OPS-Schicht stattfinden; ein GMPLS-fähiges Netz wäre in der Lage, MPLS- und OPS-Knoten nahezu gleichartig zu steuern.
Durch die Koexistenz gleichartiger Fehlertoleranz- und Traffic-Engineering-Funktionalität in den ver-

schiedenen Schichten ergibt sich jedoch eine ausgeprägte Redundanz.
Im Gegensatz zu leitungsvermittelten Architekturen bieten die vorgestellten Ansätze nur Best-Effort Dienstgüte. Signallaufzeiten stellen das geringste Problem dar, da diese als Randbedingung beim Routing eingebracht werden können. Was jedoch Laufzeitunterschiede (Jitter) und insbesondere Paketverlustraten betrifft, so ist Paketvermittlung per se nicht fähig, Garantien zu bieten. Hier ist entweder eine Überdimensionierung des Netzes oder eine Differenzierung in Serviceklassen notwendig. Letztere Maßnahme verkompliziert allerdings das Paketformat sowie die Verarbeitung in den Netzknoten.

Der erreichbare Datendurchsatz eines OPS-Netzes unterliegt – bei gleichbleibender Netztopologie und Last – im wesentlichen zwei Einflußfaktoren: dem Paketformat und den Mechanismen zur Kollisionsauflösung (räumlich, spektral, zeitlich) in den Knoten. Der Unterschied zwischen angebotener und durchgesetzter Last kommt hierbei durch topologie- und/oder routingbedingte Paketverluste an sog. Hot Spots zustande. Bezüglich Knoten-/Netzdurchsatz und Verlusten sind weitere simulative Untersuchungen notwendig.
Im Gegensatz dazu kann der Overhead an Kontrollinformation über die Gesamt- und Headerlängen der Pakete direkt bestimmt werden. Ausgehend von einer durchschnittlichen IP-Paketlänge im Bereich von 1000-2000 Bits [12] ist schon das Internet Protokoll für 10-20% Overhead verantwortlich. Der durch MPLS eingefügte Overhead ist zu vernachlässigen, während OPS bei Nutzlasten von 1-100 µs Dauer maximal weitere 9% beiträgt (Annahmen: Synchronisationsmuster und Sicherheitsabstände je 10ns, MPLS-artige Label mit 622 Mbit/s (~50ns), Paketformat ähnlich dem des ACTS Projekts KEOPS [13]).
Da OPS-Architekturen auf den Ersatz der SDH-Infrastruktur drängen, ist der Protokollstack bereits relativ schlank, und mit ihm die Möglichkeiten zur Reduzierung des Overheads ausgeschöpft. Von der Verringerung von Setup-Zeiten beim Aufbau von labelvermittelten Pfaden wird weiter kein Beitrag erwartet, da Umlaufzeiten des Ende-zu-Ende-Pfadaufbau nicht unterschritten werden können.

Neben dem bekannten Unicasting ermöglichen es die OPS-Architekturen in einfacher Weise, Mehrpunktverkehr zu versenden. Nur geringer zusätzlicher Hardwareaufwand in Form optischer Splitter wäre hierzu notwendig. Diese beiden Übertragungsarten bieten sich auch für virtuelle private Netze mit nahezu beliebiger Granularität an: entweder über Vermittlungsknoten (Unicasting) oder über Hubs (Multicasting). Schwieriger – wenngleich technisch durchaus machbar – stellt sich die Unterstützung verschiedener Dienstklassen auf OPS-Ebene dar.

Da von einer flachen OPS-Topologie ausgegangen wird, müssen bei inkrementellem Netzausbau die neuen Kanten OPS-netzweit bekannt (gemacht) werden. Hier könnte eine Partitionierung wie bei Autonomen Systemen (AS) stattfinden, um die Skalierbarkeit zu verbessern. Das Routing der labelvermittelten Pfade selbst skalierbar zu machen ist eine übergeordnete, algorithmische Fragestellung aller Netzarchitekturen.
Den betrachteten OPS-Architekturen wird Labelvermittlung mit -austausch (Label Swapping) zugrundegelegt. Die optischen Label haben nur lokale Bedeutung; Vermittlung, Labelverteilung und -tabellen skalieren also.
Die dynamische Zuschaltbarkeit zusätzlicher Übertragungskapazität unterliegt wiederum der erwähnten algorithmischen Fragestellung. Generell sind labelaustauschende Übertragungssysteme sehr flexibel – und auch dynamisch, abhängig von der Komplexität des Routings.

Der Aufbau der Schaltknoten ist dem der OBS-Architekturen sehr ähnlich. Die Schaltzeiten müssen zumindest gleich schnell wie bei den OBS-Architekturen sein. Allerdings müssen zusätzlich optische Speicher realisiert werden. Hierbei stehen nur Faserverzögerungsleitungen zur Verfügung. Dies zieht eine Reihe von Problemstellungen nach sich. Einerseits scheint ein zeitlich geslotteter Betrieb notwendig, der einen großen Synchronisationsaufwand erfordert. Andererseits führt jedes Zwischenspeichern eines Pakets zu einer zusätzlichen Signalverschlechterung. Es können Verfahrensweisen aus MPLS-Bereich adaptiert werden.
Dies bezieht sich u.a. auf die Pfadkonfiguration und auf ein einheitliches Management des Netzes. Beides wird im Rahmen von GMPLS standardisiert und automatisiert.
OPS wurde bereits in einigen Labor-Testbeds erfolgreich demonstriert. Der Stand der Technik erfordert jedoch noch einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, und die tatsächliche produktfähige Realisierbarkeit ist fraglich. Demzufolge finden noch keinerlei Standardisierungsaktivitäten statt
Paketvermittlung kann, wie in einer der Architekturen dargestellt, z.T. sehr gut mit anderen Übertragungsarten koexistieren, aber stellt natürlich einen fundamental anderen Ansatz als Leitungsvermittlung dar. Diese Inkompatibilität könnte auch der größte Hemmschuh für die kommerzielle Einführung von optischer Paketvermittlung werden, da die heutige Netzinfrastruktur zum größten Teil aus SDH-basierten Netzen besteht. Eine Vorgehensweise zur Migration könnte durch eine schrittweise Umwidmung von Fasern bzw. Wellenlängen gegeben sein.

AWG Architekturen

Die Varianten der AWG Architektur reihen sich nicht direkt in den Vergleich mit den übrigen betrachteten

Architekturen ein, da sie u.a. aufgrund der eingeschränkten Skalierbarkeit eher im Metro- als im Backbonebereich zum Einsatz kommen könnten. Da das AWG wellenlängenselektiv ist, können sämtliche Wellenlängen an allen AWG Eingangsports gleichzeitig verwendet werden ohne Kollisionen an dessen Ausgangsports zu verursachen. Die dadurch erhöhte Anzahl gleichzeitig möglicher Übertragungen verbessert die Effizienz und das Durchsatz-Verzögerungsverhalten des Netzes. Die im Single-hop Netz vorhandenen optischen Splitter bieten die Möglichkeit, Multicasting auf optischer Ebene kostengünstig und effizient zu realisieren. AWG basierte Netze bieten einen einfachen Weg, zusätzliche Übertragungskapazitäten zur Verfügung zu stellen, indem mehrere sog. Free Spectral Ranges (FSRs) eines AWG's zur Datenübertragung genutzt werden. Im Single-Hop Netz müssen alle dynamischen Vorgänge in den dem AWG vorgelagerten Sendeknoten durchgeführt werden. In diesen hybriden Knoten, wird versucht die Vorteile der Optik und Elektronik zu verbinden. Während die Datenübertragung und das Switching im Optischen gemacht wird, wird die elektronische Domäne für das Speichern und die Verarbeitung der Pakete genutzt. Der Ansatz zielt also nicht darauf ab, alle Netzfunktionalitäten ins Optische zu übersetzen, sondern eine Kombination beider Domänen zu erreichen, so daß Stärken zur Geltung kommen und Schwächen vermieden werden. Im Multihop-Ansatz hingegen wird ein tatsächliches OPS mit den zuvor erwähnten Schwächen und Stärken realisiert. Hierbei werden die Eigenschaften des AWG ausgenutzt, um virtuelle Ringe auf jeder Wellenlänge zu erzeugen. Diese Ringe ermöglichen nun Zugriffsprotokolle, die garantierte Zugriffszeiten, eine Trennung von Prioritätsklassen und einen maximalen Durchsatz aufweisen, ohne die Nutzlast der transportierten Datenpakete in die elektronische Domäne wandeln zu müssen.

Die für die AWG Architekturen entwickelten Kanalzugriffsverfahren sind in der Lage, Pakete unterschiedlicher Länge, wie z.B. ATM Zellen oder IP Pakete, mittels statistischen Multiplexens effizient zu übertragen. Außerdem gewährleisten sie einen fairen und dynamischen Zugriff auf die Wellenlängenkanäle und sind somit auch flexibel gegenüber variierenden Verkehrsaufkommen. Die im Kanalzugriffsverfahren vorhandene Möglichkeit der Reservierung erlaubt zwischen jedem beliebigen Knotenpaar nicht nur garantierte Dienstqualität für Echtzeitverkehr und interaktiven Anwendungen sondern auch Transparenz hinsichtlich Datenraten, Modulationsverfahren und Protokollen, welche zur Multiservice Unterstützung genutzt werden kann.

6 Zusammenfassung/ Schlußfolgerungen

In dem vorliegenden Beitrag wurden verschiedene Netzarchitekturen diskutiert, die Internetverkehr über optische Netze transportieren. Bei dem Einsatz neuer Technologien müssen die Anforderungen bezüglich Kostenreduzierung, neuer und erweiterter Dienstefunktionalitäten (auch die Bereitstellung von QoS) und Interoparabililität berücksichtigt werden.

Neben einem Ansatz der rein elektronischen Vermittlung (Fat IP Router) wurden die folgenden Knotenmodelle vorgestellt, die eine optische Vermittlung durchführen: IP-Router verbunden an OXCs mit Overlay- und Peer-Steuerungsalternativen, Optical Burst Switching (OBS) mit verschiedenen Reservierungs- und Aggregationsverfahren, Optical Packet Switching (OPS) mit verschiedenen Rahmungs- und Aggregationsverfahren und eine AWG-Architektur mit den Alternativen singlehop (mit Slots) und multihop (mit Aggregierung).

Um eine Bewertung der Architekturen durchführen zu können wurden die Kriterien Funktionalität, Leistungsfähigkeit beim Betrieb, die unterstützten Dienste, Flexibilität bei Änderung der Netzanforderungen bzw. der Dimension und Möglichkeiten der Einführung aufgestellt. Darauf basierend wurden in diesem Beitrag bereits erste Bewertungsansätze gemacht.

Aufbauend auf den Bewertungskriterien können nun vereinheitlichte und vergleichende Bewertungen vorgenommen werden. Ebenso wird in weiteren Untersuchungen angestrebt, Evolutionsszenarien unter Migrations- und Technologieaspekten aufzuzeigen.

7 Literatur

[1] Hao Feng, et al: TransiNet – Inovative Transport Networks for the Broadband Internet, ITG Fachtagung Optische Netze, März 2001, Dresden.

[2] K. Dolzer, C. Gauger: "On burst assembly in optical burst switching networks – a performance evaluation of Just-Enough-Time." Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC 17), Salvador, November 2001.

[3] K. Dolzer, C. Gauger, J. Späth, S. Bodamer: "Evaluation of reservation mechanisms for optical burst switching." AEÜ International Journal of Electronics and Communications, Vol. 55, No. 1, January 2001.

[4] C. Gauger, "Dimensioning of FDL Buffers for OBS Nodes", Proceedings of Optical Network Design and Modelling Conference (ONDM 2002), Turin, February 2002.

[5] M. Maier, M. Scheutzow, M. Reisslein, A. Wolisz, „Wavelength Reuse for Efficient Transport of Variable-Size Packets in a Metro WDM Network", IEEE INFOCOM, New York, NY, June 2002

[6] H. Woesner, "Primenet – A Concept for a WDM-based Fiber Backbone", Optical Network Design and Modelling, pp. 98-106, Kluwer, April 1998

[7] M. Yoo, C. Qiao, S. Dixit: Optical burst switching for service differentiation in the next-generation optical internet, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 2, pp. 98-104, February 2001.

[8] Y. Chen, M. Hamdi, D.H.K. Tsang: "Proportional QoS over OBS Networks.", Proceedings of IEEE GLOBECOM 2001, San Antonio, December 2001.

[9] H. Feng, E. Patzak, J. Saniter: „Physikalische Grenzen von „Broadcast and Select“-Schaltknoten für „Optical Burst Switching“, 3. ITG-Fachtagung, Leipzig, April 2002.

[10] D. Stamatelakis, W.D. Grover, “Rapid Restoration of Internet Protocol Networks using Preconfigured Protection Cycles," Proc. 3rd Can. Conf. On Broadband Research (CCBR'99), November 7-9, Ottawa, 1999.

[11] Schupke, D.A.; Gruber, C.G.; Autenrieth, A., "Optimal Configuration of p-Cycles in WDM Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC), New York City, NY, USA, April 28 - May 2, 2002.

[12] C. Partridge et al, „A Fifty Gigabit Per Second IP Router“, IEEE-ACM Transactions on Networking, vol.6, no.3, Juni 1998.

[13] D.K. Hunter, I. Andonovic, „Approaches to Optical Internet Packet Switching“, IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 9, pp. 116-122, September 2000.

[14] R. Huelsermann, M. Jaeger, “ Simulation of Automatic Switched Optical Transport Networks”, 3. ITG-Fachtagung, Leipzig, April 2002.

[15] M. Dueser, P. Bayvel: Bandwidth Utilisation and Wavelength Re-Use in WDM Optical Burst-Switched Packet Networks, Proceedings of the IFIP TC6 5th International Working Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 2001), Vienna, February 2001.