

Netzstrukturen für Weitverkehrsnetze

Andreas Hanemann¹

Abstract: Sobald eine neue Generation eines Weitverkehrsnetzes entworfen wird, sind grundlegende Entscheidungen über den Netzaufbau zu treffen. Dabei sind Kriterien wie die Bereitstellung von Dienstangeboten entsprechend dem Anwenderbedarf, hohe Ausfallsicherheit, kurze Verzögerungen und geringe Kosten zu beachten. In diesem Beitrag werden daher die verschiedenen Möglichkeiten für den Aufbau der Netzknoten und die Rollen der unterschiedlichen Netzebenen betrachtet.

Keywords: Weitverkehrsnetz; Ausfallsicherheit

1 Einleitung

Weitverkehrsnetze stellen eine wichtige Infrastruktur dar, an die hohe Anforderungen hinsichtlich der Betriebsstabilität und den Eigenschaften der Dienstangebote gestellt werden. Manche Ziele wie eine hohe Ausfallsicherheit bei technischen Störungen oder geringe Anschaffungs- und Betriebskosten sind dabei schon lange bekannt. In den letzten Jahren deutlich relevanter geworden ist die Sicherstellung der Betriebsstabilität bei Distributed Denial of Service (DDoS)-Angriffen. Diese Problematik hat sich insofern verschärft, dass Angreifer mit Methoden wie Amplification-Angriffen in der Lage sind, sehr hohe Datenraten von mehreren hundert Gigabit/s zu erzeugen (siehe [Ak]). Diese Angriffe betreffen dann deutlich mehr als nur das primäre Angriffsziel.

Um die genannten Ziele zu erreichen, müssen beim Aufbau einer neuen Netzgeneration grundsätzliche Entscheidungen getroffen werden. Es muss festgelegt werden, wie die Standorte (Points of Presence, PoPs) intern aufgebaut werden und ob es unterschiedliche Standorttypen gibt, die sich im Aufbau und in der Leistungsfähigkeit unterscheiden. Für die Ausfallsicherheit spielen Redundanzkonzepte eine wichtige Rolle, wobei man an dieser Stelle Schutzmechanismen auf unterschiedlichen Ebenen betrachten muss.

Der vorliegende Beitrag zielt darauf ab, die Vor- und Nachteile der Möglichkeiten zu beleuchten und somit hilfreich für eine Entscheidungsfindung unter Beachtung der Randbedingungen eines gegebenen Netzes und seiner Kunden zu sein. Die Überlegungen treffen dabei auf Forschungsnetze zu, aber gelten ebenso für kommerzielle Netze. Durch die Konvergenz der Netze mit dem Internet Protocol bzw. Ethernet-Schnittstellen als Basis

¹ FH Lübeck, Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck, andreas.hanemann@fh-luebeck.de

aller Dienste sind Unterschiede zwischen diesen Netztypen nicht mehr so groß wie in der Vergangenheit.

In diesem Papier wird davon ausgegangen, dass man klar zwischen verschiedenen Netzgenerationen unterscheidet. Das heißt, man schreibt das Netzwerk nach einigen Jahren komplett neu aus und vergibt dann die Ausstattung der optischen Technik an einen Anbieter, die Router an einen weiteren Anbieter und nimmt ggf. noch Switches von einem dritten Anbieter hinzu. Andere Vorgehensweisen wie die Beauftragung von zwei DWDM-Techniklieferanten sind (zumindest im Wissenschaftsumfeld) unüblich und führen an den Übergabepunkten zu zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Konfiguration.

2 Angebotene Netzzugänge

Bei der Betrachtung der Weitverkehrsnetze kann man die Anschlussmöglichkeiten für die Kunden als Ausgangspunkt nehmen. Dabei sind mit Kunden nicht Einzelpersonen gemeint, sondern angeschlossene Einrichtungen.

OPN: Mit Optical Private Network wird ein Szenario bezeichnet, bei dem ein Kunde einen derart hohen Bitratenbedarf hat, dass für ihn eine dedizierte Wellenlänge geschaltet wird, z.B. mit 10 Gbit/s. Dieses ist insbesondere dann sinnvoll, wenn über Monate und Jahre hinweg sehr viel Datenverkehr zwischen festen Partnereinrichtungen ausgetauscht wird. In diesem Fall erhält der Kunde einen direkten Anschluss an den *ROADM* (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer), d.h. die optische Technik, des PoP. Im Wissenschaftsumfeld sind dedizierte Wellenlängen für die Auswertung der LHC-Versuche am CERN ein bekanntes Beispiel.

Switching: Bei Kunden mit einem mittleren Bitratenbedarf von z.B. 2 Gbit/s wäre es ungünstig, exklusiv eine Wellenlänge mit der Kapazität von 10 Gbit/s zu reservieren, weil einige Kapazität dann nicht genutzt würde. Stattdessen ist es sinnvoll zu versuchen, die Datenverkehre von mehreren Kunden dieser Art zu bündeln, um eine Wellenlänge so gut wie möglich auszulasten. Als Nebeneffekt kann man folglich den Kunden auch attraktiver Preise anbieten, als wenn man ihnen eine exklusive Wellenlänge in Rechnung stellen müsste. Auch wenn eine solche Aggregation hier als Switching bezeichnet wird (alternativ wird auch von *Grooming* gesprochen), muss dieses nicht unbedingt über separate Geräte (Switches) realisiert werden. Oftmals bietet auch der *ROADM* über seine Interface Cards schon entsprechende Möglichkeiten.

Routing: Kunden mit kleinerem Bitratenbedarf werden üblicherweise an Router am PoP angebunden. Durch die Anbindung an Router sind auch Layer-3-VPNs möglich, die mit MPLS (Multiprotocol Label Switching) realisiert werden.

3 Möglichkeiten für die Points of Presence

Eine zentrale Frage bei der Konzeption von Weitverkehrsnetzen ist, wie man die PoPs aufbaut. Hierbei gibt es konkurrierende Konzepte, bei denen man sich üblicherweise für eines entscheiden muss.

3.1 All Optical PoPs

Das Konzept der meisten DWDM-Technikerhersteller soll als *All Optical PoP* bezeichnet werden (siehe Abb. 1). Die Grundidee ist es dabei, die Umwandlungen von optischen in elektrische Signale und zurück (*optisch-elektrisch-optisch, OEO*) möglichst zu vermeiden.

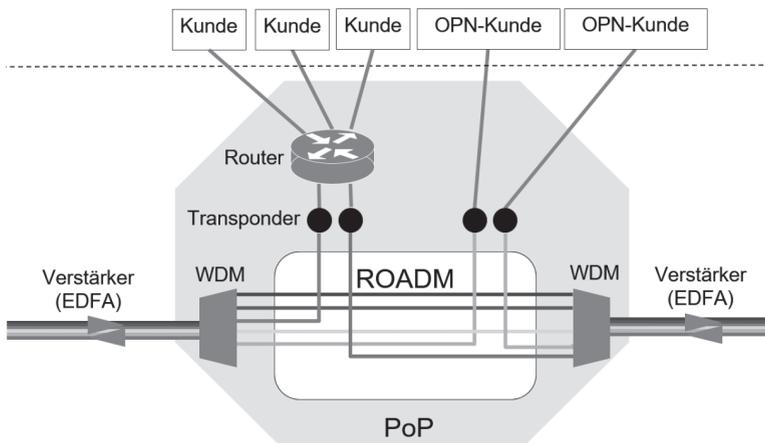


Abb. 1: Aufbau eines PoP nach All-Optical-Prinzip

Nehmen wir an, es gebe einen Standort, der mit zwei anderen Standorten verbunden ist². Dieses ist in der Zeichnung mit den Verbindungen nach links und rechts angedeutet, wobei die Regenbogenfarben die Verwendung unterschiedlicher Wellenlängen darstellen sollen. Während die Wellenlängen nach links und nach rechts über je eine Glasfaser übertragen werden, ermöglichen die DWDM-Systeme es innerhalb des PoP auf einzelne Wellenlängen zuzugreifen, was als Auffächerung der Regenbogenfarben dargestellt ist.

DWDM-Systeme im Praxiseinsatz können beispielsweise wie die vom DFN verwendete Technik des Anbieters ECI Telecom 88 verschiedene Wellenlängen auf einer Glasfaser zu anderen PoPs übertragen, wobei gängige Bitraten pro Wellenlänge aktuell 10 oder 100 Gbit/s sind. Um die anderen PoPs zu erreichen, ist es notwendig alle 80 km optische Verstärker aufzubauen, wobei EDFAs (Erbium Doped Fiber Amplifier) der übliche Verstärkertyp sind.

² Auf Standorte mit mehr als zwei Glasfaserverbindungen zu anderen Standorten und mit unterschiedlichen Fähigkeiten von ROADMs zum Schalten von Verbindungen in diese verschiedenen Richtungen wird in diesem Papier nicht eingegangen, siehe dazu z.B. [AGN12].

Bei den Wellenlängen muss man nun unterscheiden, dass es Wellenlängen gibt, die Daten für den betrachteten PoP übertragen, und andere, die für Transitdatenverkehr genutzt werden. Der Transitdatenverkehr hat also nichts mit dem PoP zu tun und man möchte ihn daher auf der optischen Ebene belassen. Das heißt, die Signale können zwar auf optischer Ebene verstärkt werden, aber sie sollen nicht mit Hilfe von Transpondern auf die elektrische Ebene gewandelt werden. Hiermit möchte man die Kosten für die Transponder einsparen.

In grau dargestellt sieht man die Verwendung einer Standardwellenlänge. Diese kommt vor, wenn man Datenverkehr zum lokalen Router hat. Dieser muss mit Hilfe von Transpondern von einer farbigen (d.h. nicht-Standard) Wellenlänge in die Standardwellenlänge gewandelt werden. Genauso ist eine Umwandlung in die Standardwellenlänge erforderlich, wenn man dedizierte Wellenlängen für Kunden mit hohem Bitratenbedarf anbietet. Diese Kunden werden hier als OPN-Kunden bezeichnet.

3.2 All Optical PoPs mit farbigen Routerinterfaces

Eine Abwandlung des All Optical PoPs stellt die Variante mit farbigen Routerinterfaces dar, die in Abb. 2 dargestellt ist. Hierbei ist ein Detail anders, nämlich dass die Interfaces des Routers hinsichtlich der Wellenlänge konfigurierbar und damit keine Transponder notwendig sind. Der Router sendet also gleich auf farbigen Wellenlängen.

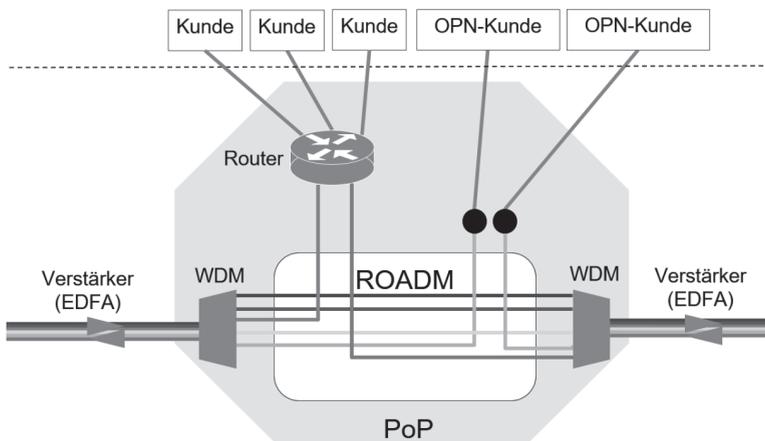


Abb. 2: Aufbau eines PoP nach All-Optical-Prinzip mit farbigen Routerinterfaces

Dieser Unterschied hat jedoch weitreichende betriebliche Auswirkungen, da nun vom Router aus optische Signale direkt zum DWDM-System geschickt werden. Hierbei müssen dann entweder die optischen Systeme unterschiedlicher Hersteller zusammenarbeiten, was noch nicht als etablierte Lösung anzusehen ist (siehe Abschnitt 5.1 im Ausblick) oder man muss sowohl die Router- als auch die DWDM-Technik von einem Anbieter beziehen. Bei der zweiten Möglichkeit schränkt man die Auswahlmöglichkeiten zwischen

den möglichen Anbietern stark ein (vgl. Cisco IPoDWDM-Konzept [Ci]), wobei diese mit besseren Möglichkeiten für ein integriertes Management der Netzebenen werben.

3.3 Digital ROADMs

Das Konzept des *Digital ROADMs* unterscheidet sich deutlich vom All Optical-Konzept. Der Digital ROADM wandelt, wie in der Abb. 3 dargestellt, sämtliche Wellenlängen in die elektrische Ebene um. Dieses wird mit einem sog. *Photonic Integrated Circuit (PIC)* erreicht, der optische Bauteile, die sonst einzeln verwendet werden, in einem speziellen Chip auf kleiner Fläche enthält. Die ersten 2005 erhältlichen PICs integrierten dabei beispielsweise die Komponenten für 10 Wellenlängen, wobei jede Wellenlänge 10 Gbit/s übertragen kann. Nachdem die Datenrate pro PIC anfangs also 100 Gbit/s war, sind inzwischen 2,4 Tbit/s möglich [Gi]. Durch dieses Konzept muss nicht mehr zwischen lokal terminierenden Wellenlängen und solchen für den Transitverkehr unterschieden werden, was die Konfiguration erleichtert.

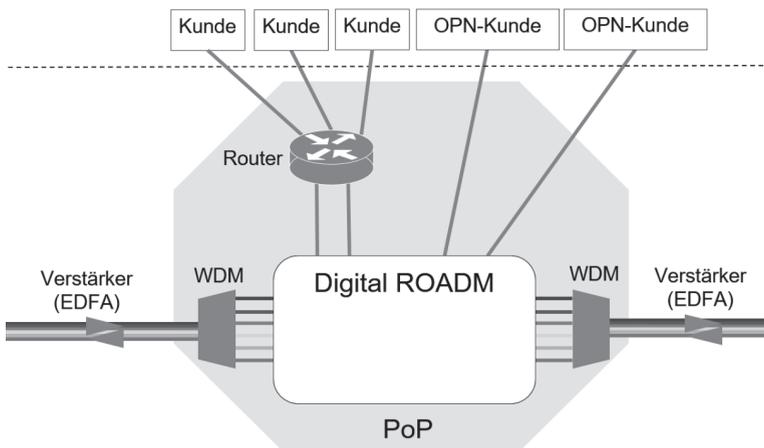


Abb. 3: Aufbau eines PoP mit Digital ROADM

Bei der Abwägung, welches Konzept für das eigene Netz besser geeignet ist, muss man sich ansehen, was man für Standorte hat. Wenn der übliche Standort viel lokal terminierenden Datenverkehr aufweist, dann ist dieses günstiger für das Digital ROADM-Konzept. An dieser Stelle hat man nur geringe Zusatzkosten für eigentlich nicht benötigte OEO-Umwandlungen, die indirekt auch zu den Kosten des PICs beitragen. Dagegen ist das All Optical-Konzept dann vorteilhaft, wenn man viele Standorte mit wenig lokal terminierendem Verkehr hat. In diesem Szenario hat man nur relativ geringe Kosten für die Transponder. Wenn man sich die Strukturen und Standorte verschiedener Netze ansieht, dann ist aus dieser Überlegung heraus verständlich, warum sich GEANT und Internet2/ESnet für ein Digital ROADM-Konzept entschieden haben, viele nationale Netze (neben DFN z.B. SWITCH,

GARR, SURFnet, PIONIER) dagegen für All Optical-Lösungen. In kommerziellen Netzen sind ebenfalls beide Konzepte im Einsatz, z.B. bei einem bekannten Provider ein Digital ROADM-Konzept für die Verbindung zwischen den europäischen Ländern, aber ein Netz gemäß All Optical-Konzept innerhalb von dessen Heimatland.

Es sei ergänzend noch erwähnt, dass auch eine Mischform möglich ist. Wenn man beispielsweise dreißig Wellenlängen verwendet und fünf von den Wellenlängen sollen an einem Standort lokal terminieren, dann kann man für diese fünf und weitere fünf eine OEO-Umwandlung mit dem PIC gemäß Digital ROADM-Konzept vorsehen. Für die anderen zwanzig Wellenlängen kann man eine optische Durchschaltung (*Optical Bypass*) konfigurieren, so dass man für diese keine PICs benötigt und entsprechende Kosten einspart. An dieser Stelle verliert man jedoch auch ein Stück an Flexibilität, wenn zukünftig Wellenlängen von diesen lokal terminieren sollen.

3.4 Routerless PoPs

Bei den bisherigen Szenarien war es so, dass in jedem Fall neben der DWDM-Technik ein Router vorhanden war. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, Standorte ohne Router zu betreiben, sog. *Routerless PoPs* (siehe Abb. 4). Das bedeutet, dass der Datenverkehr von Kunden an diesen PoPs entweder aus dedizierten Wellenlängen besteht oder mit Hilfe einer Aggregationsplattform zusammengeführt und an einen anderen Standort weitergeleitet wird. Dieses ist in der Abbildung als separater Switch dargestellt, aber ist üblicherweise auch als Teil der DWDM-Plattform realisierbar. Damit wird der Datenverkehr von solchen Kunden in jedem Fall zunächst zu einem vordefinierten Standort mit Router weitergeleitet. Das führt ggf. zu höheren Latenzen, abhängig davon, welches Ziel die einzelnen Pakete haben.

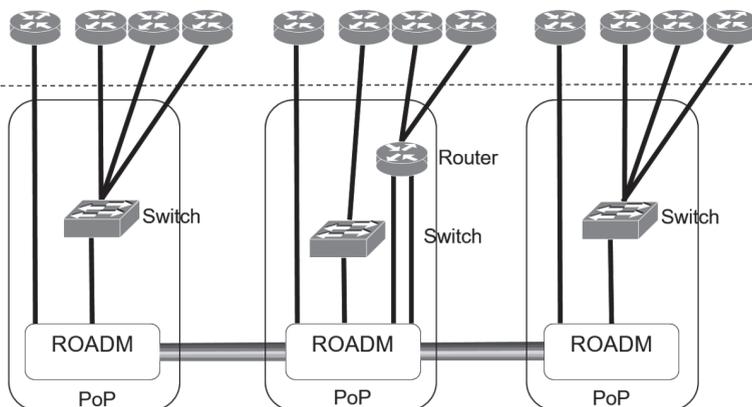


Abb. 4: Aufbau eines Routerless PoP

Wie von Piger [Pi17] dargestellt, bietet dieses Konzept jedoch auch wichtige Vorteile. Zum einen ist in den letzten Jahren ein kontinuierliches Wachstum der globalen IPv4-

Routingtabelle [Hub] zu beobachten, so dass nur noch leistungsfähige Routermodelle die komplette Routingtabelle vorhalten können. Es würde jedoch zu hohen Kosten führen, solche Routermodelle an allen Standorten zu verwenden.

Ein wichtiger Punkt ist auch der Schutz vor DDoS-Angriffen, die hohe Datenraten erzeugen. Durch diese hohen Datenraten wird nicht nur der Zielkunde des Angriffs betroffen, sondern auch viele weitere Kunden. Daher dürfen die Betreiber von Weitverkehrsnetzen die Abwehr von solchen Angriffen nicht ihren Kunden überlassen, sondern müssen in Zusammenarbeit mit den Kunden dafür sorgen, dass solche Angriffe an zentralen, sehr leistungsfähigen Standorten im Weitverkehrsnetz herausgefiltert werden.

4 Redundanzkonzepte

Beim Aufbau eines Weitverkehrsnetzes muss auch entschieden werden, welche Redundanzen man im Netz vorsieht, um für Fehlerfälle vorbereitet zu sein. Die Betrachtung soll hier von unten her, d.h. von der optischen Ebene zur Routerebene erfolgen.

Zunächst einmal ist dafür zu sorgen, dass für jeden PoP mindestens ein zweiter Weg existiert, um diesen zu erreichen. Dabei ist es wichtig, von den Anbietern von Glasfaserstrecken genaue geographische Angaben bis zu den einzelnen Straßen hinab zu verlangen. Ansonsten können sich Situationen ergeben, dass Wege durch die gleichen Straßen führen, obwohl in einer abstrahierten logischen Darstellung keine fehlenden Redundanzen zu erkennen sind.

Wenn man den Kunden dedizierte Wellenlängen anbietet, dann hat man nur eine Möglichkeit zum Schutz, nämlich die *Optical 1+1 Protection*. Das heißt neben der eigentlichen Wellenlänge wird eine zweite Wellenlänge fest geschaltet, die als Backup dient. Die Umschaltung kann im Fall einer Störung automatisch in weniger als 50 ms erfolgen.

Wenn es um die Verbindungen zwischen Routern geht, dann hat man mehr Möglichkeiten. Auch hier kann man eine *Optical 1+1 Protection* schalten, was aber mit einem hohen Aufwand einhergeht. Stattdessen kann man sich auf die Möglichkeiten des Routings verlassen, d.h. dass der Routing-Algorithmus ggf. einen neuen Weg auswählt. Dieses geht jedoch mit 1 bis 2 s nicht ganz so schnell wie das Umschalten auf optischer Ebene.

Eine weitere Option, die man je nach den Möglichkeiten der DWDM-Plattform noch hat, ist die *Optical Restoration*. In diesem Fall würden bei Störungen dynamisch neue Pfade auf der optischen Ebene gefunden. Dieses dauert jedoch bis zu 30 s und hängt auch davon ab, ob in der konkreten Situation noch alternative Wege existieren, die für dynamisch geschaltete optische Pfade verwendet werden können.

5 Fazit und Ausblick

Wenn man sich die Entwicklung in den letzten Jahren ansieht, dann kann man feststellen, dass viele grundsätzliche Abwägungen auch schon bei früheren Netzgenerationen zu beachten waren. Deutlich verschärft hat sich jedoch die Relevanz von DDoS-Angriffen, wobei man gerade durch viele schlecht gewartete Internet of Things-Geräte in Zukunft eher noch mit einer weiteren Zunahme solcher Angriffe rechnen muss. Dieses muss im Netzdesign berücksichtigt werden, so dass es sinnvoll erscheint, gerade Standorte mit Anbindung nach außen so leistungsfähig auszustatten, dass dort eine wirksame DDoS-Abwehr erreicht werden kann. Definierte Prozesse für die Zusammenarbeit von Netzbetreibern mit betroffenen Kunden sind dabei sehr wichtig.

Abschließend sollen einige aktuelle Entwicklungen betrachtet werden.

5.1 Alien Wavelength

Wenn mit dem DWDM-System eines Herstellers zusätzlich Wellenlängen übertragen werden, die von der optischen Technik eines anderen Herstellers erzeugt werden, dann spricht man von *Alien Wavelength*. Nachdem diese Technik einige Jahre lang in größeren Versuchen untersucht wurde, befindet sich diese nun auch in manchen Szenarien im Produktiveinsatz. Das ist der Fall beim schwedischen Forschungsnetz SUNET, wobei die Hersteller Adva (DWDM-Technik) und Juniper (Router) eng miteinander kooperieren, aber auch beim italienischen Forschungsnetz GARR. GARR setzt Technik von zwei unterschiedlichen DWDM-Hersteller in Nord- und Süditalien ein und verbindet die Systeme über Alien Wavelength. Das tschechische Forschungsnetz CESNET ist in diesem Bereich sehr aktiv und verwendet im eigenen Netz die DWDM-Technik von unterschiedlichen Herstellern und entwickelt auch eigene DWDM-Systeme (siehe Berichte beim CEF-Workshop [Cu] sowie Erfahrungsberichte bei der TNC [TN]).

Auch wenn die Beispiele zeigen, dass die Verwendung von Alien Wavelength möglich ist, stellt sich aber dennoch die Frage, ob diese einen Zusatznutzen bieten. Bei einem klaren Generationenkonzept der DWDM-Technik sind diese eigentlich nicht notwendig. Eventuell könnten sie beim Übergang zwischen Netzgenerationen nützlich sein oder bei der Verbindung zu anderen Netzen.

5.2 Software Defined Networking

Eine andere Frage ist die zukünftige Relevanz von Software Defined Networking für Weitverkehrsnetze. SDN würde in diesem Kontext bedeuten, dass die Hersteller der DWDM- und Router-Technik nur noch Geräte mit einer Grundfunktionalität liefern, während die komplexen Funktionen separat davon in Software programmiert werden. Diese komplexen

Funktionen würden es insbesondere erlauben, die Ebenen (optische Ebene, Switching, Routing) in intelligenter Weise miteinander zu kombinieren, wie man das bisher durch die relativ getrennten Herstellerwelten nicht kann (siehe White Paper von ECI Telecom [Hua]). Der Vorteil besteht also darin, dass man das Management deutlich mehr nach eigenen Vorstellungen und betrieblichen Notwendigkeiten gestalten kann und bei Änderungswünschen nicht mehr auf die Kooperationsbereitschaft des Herstellers angewiesen ist. Bislang waren die Hersteller jedoch nicht bereit davon abzugehen, geschlossene DWDM-Systeme bestehend aus Hardware und Software zu liefern. Allerdings versucht das 2016 gestartete Telecom Infra Project [Te] die Situation aufzubrechen und die Entwicklung offener Systeme zu fördern. Obwohl auch mehr als 500 andere Firmen mitwirken, nehmen gerade Facebook und die Deutsche Telekom eine wesentliche Rolle dabei ein. Sie erhoffen sich dadurch die Eintrittsbarrieren in den DWDM-Markt zu senken, der durch etablierte Anbieter gekennzeichnet ist. Außerdem sollen so Innovationen von Start-Up-Firmen gefördert werden. Im Bereich der Router wird der Einsatz von kleineren Geräten („Pizzabox“) favorisiert, die aber flexibel zu einem großen Router für Kernnetzstandorte kombiniert werden können. Damit erwartet man auch in diesem Bereich von etablierten Großgeräten führender Hersteller unabhängiger zu werden.

Eine wesentliche Frage ist aber wie man die sehr hohen Anforderungen an die Betriebsstabilität des Netzes erfüllt, wenn die komplexen Netzwerkfunktionen von Dritten programmiert werden. Es ist dabei noch nicht absehbar, ob man auf eine Art von Open Source Betriebssoftware setzen kann oder eventuell spezielle Dienstleister braucht, die solche Software liefern.

5.3 Entwicklung des Datenvolumens

Eine längerfristige Herausforderung wird auf Weitverkehrsnetze zukommen, wenn die Bitraten im Access Bereich sehr stark zunehmen. Seit der Einführung der DWDM-Technik um die Jahrtausendwende stellen die Weitverkehrsnetze so gut wie nie den Flaschenhals dar, weil sie durch die Installation von weiteren Wellenlängen auf schon existierenden Glasfaserverbindungen relativ kurzfristig ausgebaut werden können. Würde es aber so sein, dass jedem Endnutzer Datenraten im Gigabit/s-Bereich zur Verfügung stehen würden (z.B. für 4K Videos, Cloud-Nutzung, etc), dann würden sich große Datenvolumina im Weitverkehrsnetz aggregieren, so dass auch die Terabit/s-Kapazitäten der heutigen DWDM-Systeme voll ausgenutzt würden. Dann könnten Kapazitätssteigerungen im Weitverkehrsbereich eventuell tatsächlich weitere Glasfasern erforderlich machen, was deutlich aufwändiger und kostenintensiver ist.

Im Zusammenhang dem Anstieg des Datenvolumens ist auch die Entwicklung des Energieverbrauchs zu betrachten. Hierbei ist festzustellen, dass der Energieverbrauch der optischen Technik im wesentlichen unabhängig davon ist, wie viele Daten tatsächlich übertragen werden. Beim Routing dagegen steigt der Energieverbrauch mit dem Datenvolumen an [Hi11]. Hiermit steigen dann auch die Anforderungen an die Klimatisierung sowie USVs. Es ist

daher aus Sicht von Netzbetreibern sinnvoll, Datenverkehr zwischen zwei Kundenzugängen, der dauerhaft und mit hohem Datenvolumen beobachtet wird, möglichst als dedizierte Wellenlänge oder über eine Aggregationsplattform zu realisieren, um die Routing-Plattform zu entlasten. An dieser Stelle wäre es interessant geeignete Kriterien zu entwickeln, wann ein solcher Offload durchgeführt werden sollte.

Längerfristig wären dann auch Bandwidth-On-Demand-Realisierungen interessant, bei denen Wellenlängen automatisch je nach Bedarf geschaltet werden. An dieser Stelle ist es jedoch wichtig zu erkennen, dass man erst eine kritische Masse an möglichen relevanten Kunden und Infrastruktur braucht. Ansonsten würde mit diesem Konzept oftmals zuviel an Kapazität ungenutzt bleiben.

Literaturverzeichnis

- [AGN12] Autenrieth, A.; Gunkel, M.; Neugirg, M.: Cost Savings and Robustness Improvements in IP-over-DWDM Core Networks by Employment of CD-ROADMS and Advanced Multilayer Survivability Schemes. In: ITG-Fachbericht 233: Photonische Netze. VDE, Mai 2012.
- [Ak] Akamai Technologies, Q3 2016 State of the Internet Report - Security Report, Nov 2016. <https://content.akamai.com/pg7407-soti-security-report-q3-en.html>.
- [Ci] Cisco: Packet Optical Convergence. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/service-provider/ipodwdm/index.html>.
- [Cu] Customer Empowered Fibre Networks Workshop, Prague, Sep. 2017. <https://www.cesnet.cz/events/cef2017/>.
- [Gi] Gill, Jay: ICE5: Innovation on Fast Forward, Mar. 2018. <https://www.infinera.com/ice5-innovation/>.
- [Hi11] Hinton, Kerry; Baliga, Jayant; Feng, Michael Z.; Ayre, Robert; Tucker, Rodney S.: Power consumption and energy efficiency in the internet. *IEEE Network*, 25(2):6–12, 2011.
- [Hua] Huma, Jonathan: Trains, planes and multi-layered software defined networks, Spring 2017. <http://www.ecitele.com/media/2012/trains-planes-and-more-fibre-systems-spring-2017.pdf>.
- [Hub] Huston, Geoff: BGP in 2017, Jan. 2018. <http://www.potaroo.net/ispcol/2018-01/bgp2017.html>.
- [Pi17] Piger, S.: Der Erneuerung letzter Akt: Eine neue Aggregationsplattform für das X-WiN. In: DFN-Mitteilungen, Heft 91. DFN, Mai 2017.
- [Te] Telecom Infra Project: Open Optical Packet Transport. <https://telecominfraproject.com/project-groups-2/backhaul-projects/open-optical-packet-transport/>.
- [TN] TNC 16, Session, 4D - Alien Wavelengths – from field trials to profitable services, Prague, June, 2016. <https://tnc16.geant.org/core/session/73>.