

Testen von 100G-Transportnetzen und -Diensten

Obgleich die Tests von 10G- und 100G-Diensten viele Ähnlichkeiten aufweisen, sind doch wichtige Unterschiede zu beachten.

Von Guylain Barlow

Die steigende Nachfrage nach immer mehr Bandbreite fördert die Entwicklung von 100G-Netzwerken. Dabei handelt es sich insbesondere um Netzwerke mit Schnittstellen, die in der Lage sind, Datenraten von knapp über 100 Gbit/s zu übertragen. Die ersten Experimente und Erprobungen konzentrierten sich auf den Transport der Daten über relativ große Entfernungen mit Hilfe spezieller Modulationsverfahren, um den Anschluss an das Backbone zu gewährleisten. Heute sind 100G-Netzwerke weit verbreitet und auf der ganzen Welt anzutreffen. Jetzt beginnen Anwendungen über das Backbone-Transportnetz hinauszugehen, so dass 100G-Ports in großem Maßstab verfügbar sind und gebündelt werden. Allerdings steckt die Nutzung von 100G-Diensten durch Geschäftskunden, wie Banken, noch in den Kinderschuhen. Doch auch sie wird sich in den kommenden Jahren verstärken. Gleichzeitig wird 100G für den Einsatz in Rechenzentren weiterentwickelt, um Server direkt anzuschließen. Dieses Whitepaper erläutert die grundlegende Architektur von 100G-Transportnetzen, beschreibt die Anwendungen zum Aktivieren von Diensten zum Testen der Optik sowie von 100 Gigabit Ethernet (100GE) und geht auf die Entwicklung von OTN-Netzen ein.

Netzwerk-Topologie

Die beiden Haupttypen von 100G-Schnittstellen werden häufig allgemein nach der „Kundenseite“ (Zubringer) und der „Leitungsseite“ unterschieden. Allgemein bezieht sich die Leitungsseite auf Schnittstellen, die dazu genutzt werden, Daten über größere Entfernungen von einigen Hundert bis zu mehreren Tausend Kilometern zu transportieren. Hierfür werden mehrere Signale mit dem Wellenlängenmultiplex-Verfahren (WDM) über die gleiche Glasfaser übertragen. Diese Anwendung erfordert moderne Modulationsverfahren, die komplex und zumeist anbieterspezifisch sind. Demgegenüber nutzen die Zubringerschnittstellen mit dem On-Off-Keying (OOK) eine einfache Amplitudenmodulation sowie gut definierte anbieterneutrale Standardschnittstellen, die aber nur kürzere Entfernungen überbrücken können. Es werden zwei Typen von Zubringerschnittstellen angeboten:

- 100GE für 103,125 Gbit/s, wie in der Norm IEEE 802.3ba definiert. Dieser Typ wird am häufigsten eingesetzt.
- OTU4 für 111,8 Gbit/s, definiert in der Norm ITU-T G.709.

Leitungsseitige 100G-Schnittstellen nutzen keine standardisierten Modulationsformate zur Übertragung. Allerdings verwendet die Mehrzahl die Quadratur-Phasenumtastung mit Polarisations-Multiplex (PM-QPSK), die auch als QPSK mit doppelter Polarisation (DP-QPSK) bezeichnet wird. Dieses Modulationsverfahren wird zumeist in Verbindung mit der kohärenten Erkennung durch den Empfänger am fernen Ende verwendet. Das bedeutet, dass der Empfänger mit einem Laser mit Lokaloszillator (LO) und Frequenzregelschleife (FLL) ausgestattet sein muss, und die Phase und Amplitude des Signals durch digitale Signalverarbeitung zurückgewonnen werden. Diese kohärenten Empfänger bieten unter anderem den Vorteil, dass sie die Dispersion in der Glasfaser elektronisch kompensieren können. Das erhöht die Robustheit der übertragenen Signale gegen die chromatische Dispersion (CD) und die Polarisationsmodendispersion (PMD). Abbildung 1 stellt die DP-QPSK-Modulation schematisch dar. Der Sender generiert zwei voneinander unabhängige optische QPSK-Signale mit jeweils vier verschiedenen optischen Phasen, die zu zwei orthogonalen Polarisationszuständen kombiniert werden. Dadurch entsteht ein Signal, dessen Baudrate ein Viertel der Bitrate beträgt.

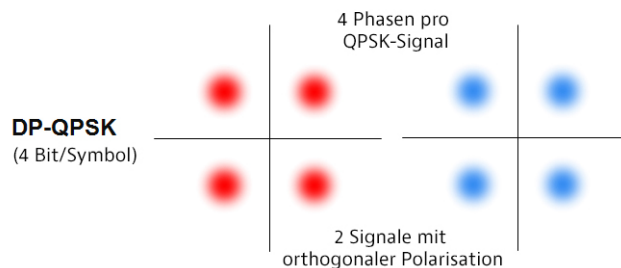


Abbildung 1: Signal beim DP-QPSK-Modulationsverfahren

Zubringerschnittstellen sind anbieterneutral und ermöglichen die Anbindung an das Netzwerk. Bei 100GE-Transportnetzen wird am häufigsten die Schnittstelle 100GBase-LR4 eingesetzt, die mit vier Multiplex-Wellenlängen eine maximale Entfernung von 10 km überbrücken kann. Jede Wellenlänge überträgt eine Bandbreite von etwa 25 Gbit/s, damit insgesamt 103,125 Gbit/s zur Verfügung stehen. Daneben gibt es weitere 100GE-Schnittstellen, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die meisten Schnittstellen sind in der Norm IEEE 802.3ba definiert, während die Spezifikation 10x10-MSA eine 10G-Schnittstelle beschreibt. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von Optiken mit einer Reichweite von 40 km steckt die Nutzung der 100GBase-ER4 noch in den Kinderschuhen. Die relativ beliebte Schnittstelle 100GBase-SR10 kommt vor allem in Rechenzentren zum Einsatz, während die 100GBase-CR10 für Kupferkabel vorgesehen ist.

Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Beziehungen zwischen 100G-Zubringer- und Leitungsschnittstellen in einem typischen 100G-Transportnetz.

Tabelle 1: 100GE-Schnittstellen

Schnittstelle	Reichweite	Medium	Anzahl Wellenlängen/Fasern	Vorteil
100GBase-LR4	10 km	SMF	4 λ /Richtung	IEEE 802.3ba
100GBase-ER4	40 km	SMF	4 λ /Richtung	IEEE 802.3ba
100GBase-SR10	100 m 125 m	OM3 MMF OM4 MMF	10 Fasern/Richtung	IEEE 802.3ba
100GBase-CR10	7 m	Twinaxial elektrisch	10 Kabel/Richtung	IEEE 802.3ba
10x10 MSA	2 km 10 km 40 km	SMF	10 λ /Richtung	Techn. Spezifikation 10x10 MSA

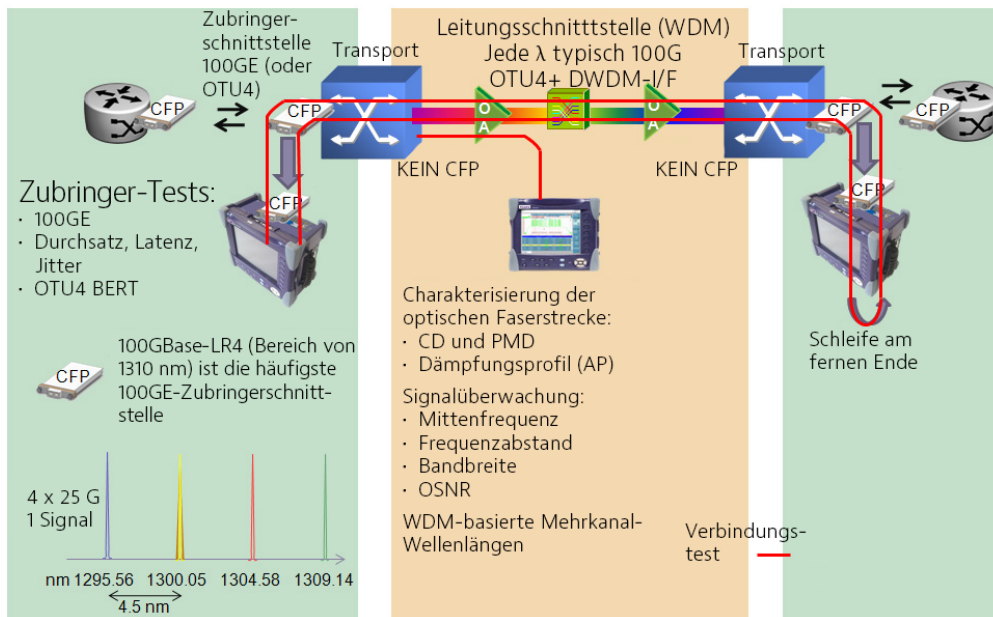


Abbildung 2: Leitungs- und Zubringerschnittstellen

Die Konfiguration in Abbildung 2, in der die Transporttechnik auf der Zubringenseite mit einem optischen 100G-CFP-Steckmodul ausgestattet ist, wird im Allgemeinen als Transponder-Anwendung bezeichnet. In diesem Fall wird ein Dienst, wie 100GE, über die WDM-Verbindungen (Link) des Kernnetzes übertragen. Im Unterschied dazu werden bei einer Muxponder-Anwendung mehrere Links geringerer Datenrate, zumeist mehrere 10G-Links, beispielsweise 10GE-Schnittstellen, an ein Kern-Backbone angeschlossen, wo sie durch Aggregation zu einer 100G-Wellenlänge zusammengefasst werden. Der Kundenverkehr durchläuft eine Multiplex-Stufe, um von der größeren Effizienz zu profitieren, die diese höherbitratigen Backbone-Links im Kernnetz zur Verfügung stellen. Für Anwendungstests zur Aktivierung derartiger Muxponder-basierter Dienste muss der Verkehr von einer oder mehrerer 10G-Quellen im Netzwerk und nicht von einer 100G-Quelle generiert und analysiert werden. Es gibt noch weitere 100G-Transportanwendungen. Die Transponder- und Muxponder-Konfigurationen sind nur die zurzeit häufigsten Anwendungen. Abbildung 3 erläutert beispielhaft die Verbindungen in einer Muxponder-Anwendung.

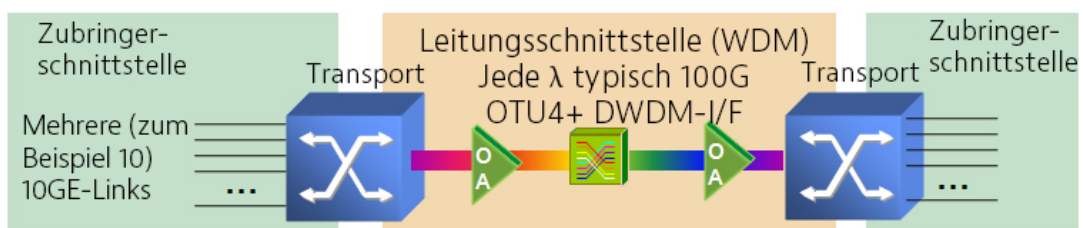


Abbildung 3: Muxponder-Anwendung

Tests auf der Leitungsseite

Zum Testen von Online-Schnittstellen müssen die optischen Parameter des Signals und des Übertragungsmediums, in diesem Fall der Glasfaser, analysiert werden. Bei höheren Datenraten wie 100G ist bei Dispersionsmessungen mit einer höheren Empfindlichkeit am Empfänger zu rechnen. Bei der chromatischen Dispersion (CD) erhöht sich die Empfindlichkeit proportional zum Quadrat der Leitungsrate, also erheblich, während sich die Polarisationsmodendispersion (PMD) linear mit der Leitungsrate vergrößert. Da 100G-Systeme jedoch eine kohärente Erkennung in Verbindung mit einer sehr schnellen elektronischen Signalverarbeitung im Empfänger nutzen, werden die durch CD und PMD verursachten Signalverzerrungen recht gut kompensiert. Diese Systeme tolerieren typischerweise eine akkumulierte CD von mehr als 30.000 ps/nm sowie eine PMD von über 30 ps und damit deutlich mehr als konventionell erkannte 10G- oder 40G-Signale. Allerdings werden die Charakterisierung und Dokumentation der Glasfaserinfrastruktur bei der Systemeinrichtung dringend empfohlen. Das gilt umso mehr für WDM-Anwendungen mit gemischten Signalen, in denen 10G- und 40G-Signale gemeinsam mit 100G-Signalen über die gleiche Glasfaser übertragen werden.

Bei der Inbetriebnahme von 100G-Links auf der Leitungsseite ist der optische Signal-Rausch-Abstand (OSNR) des Signals entlang der Faserstrecke und insbesondere an deren Ende ein wichtiger Parameter. Um den sicheren Betrieb des Netzwerks mit einer kleinstmöglichen Fehlerrate zu gewährleisten, muss der OSNR eines 100G-Signals unbedingt innerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Allerdings lässt sich der OSNR an den übertragenen 100G-Signalen nur schwer direkt messen, da sich das Signalspektrum über die gesamte Breite des WDM-Kanals erstreckt. Zudem können polarisationsdiskriminierende Verfahren, wie die Polarisationsnullung, die zur Messung des OSNR an Signalen mit Einfach-Polarisation wie der OOK-NRZ bei 10G oder 40G zum Einsatz kommen, in diesem Fall nicht angewendet werden, da die DP-QPSK-Signale keinen eindeutigen Polarisationszustand aufweisen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, den OSNR von PM-QPSK-Signalen bei 100G zu messen, wenn sich das Netzwerk in Betrieb befindet (In-Service-Messung). In einigen Fällen kann es angebracht sein, den optischen Rauschpegel in einem ausgewählten WDM-Kanal zu messen, indem man das 100G-Signal abschaltet. Dazu muss das Netzwerk aber außer Betrieb genommen werden. Das ist in ROADM-Netzwerken mit ihren optischen Kanalmonitoren (OCM), die die Kanalübertragung beim Ausfall von Signalen blockieren, aber nicht praktikabel. In der Industrie sind Forschungen im Gange, um eine Methode zur OSNR-Imband-Messung für PM-QPSK-Signale zu entwickeln.

Tests an der 100GE-Zubringerschnittstelle

Aktivierungstests an der 100GE-Zubringerschnittstelle umfassen mindestens die Generierung und Analyse des Verkehrs bei gleichzeitiger Überwachung von Alarmen und Fehlern. Für Netzwerk-Tests wird zumeist eine Testfolge gestartet, die die Ausführung vereinfacht und automatisiert. Die IETF RFC 2544 und ITU-T Y.1564 definieren die am weitesten verbreiteten Testfolgen zur Aktivierung von Verkehrsdiensten. Am häufigsten werden diese Testfolgen mit einer Schleife am fernen Ende des Netzwerks (siehe Abbildung 2) durchgeführt. Diese Schleife kann bei reinen Layer-1-Übertragungsnetzen physisch in Form eines Patchkabels ausgeführt sein. Bei Vorhandensein von Funktionen der Layer 2 oder 3, wie Ethernet-Switching oder -Routing, muss die Schleife am fernen Ende aber eine logische Funktion darstellen. Zu diesem Zweck wird ein aktives Gerät, wie ein Tester, benötigt, das die Quell- und Zieladressen der Layer 2 und bei Bedarf der Layer 3 vertauscht.

Die Entscheidung für RFC 2544 oder Y.1564 hängt von der Art des Aktivierungstests oder einfach von den Verfahren ab, die bereits für das Inbetriebnahme- oder Fehlerdiagnose-Team eingerichtet wurden. RFC 2544 ist eine etablierte Methode, um unter anderem den Durchsatz, die Latenz, die Rahmenfehlerrate und die Burstfähigkeit zu überprüfen. Sie ist allgemein akzeptiert, obgleich über die Empfehlung hinaus noch eine Jittermessung ausgeführt wird. Die Hauptaufgabe von RFC 2544 besteht darin, einen neuen Link als einzelnen Dienst zu aktivieren. Die Dauer der RFC 2544-Testfolge ist von der spezifischen Implementierung abhängig. Optimierungen sind möglich, um die Geschwindigkeit und Effizienz des Tests zu erhöhen.

Dagegen konzentriert sich die Testfolge nach ITU-T Y.1564 auf die Aktivierung von Diensten. Die daraus resultierende Testfolge bietet insbesondere den Vorteil, dass sie es erlaubt, mehrere Dienste gleichzeitig automatisch zu überprüfen. Im Rahmen einer solchen Testfolge werden die Dienste als Verkehrsströme simuliert, die beispielsweise genutzt werden, um zwischen Dienstverkehr unterschiedlicher Dienstklassen (CoS) oder sogar zwischen regelmäßigem Dienstverkehr und einsatzkritischem Verkehr auf der Steuerebene (Control Plane) zu unterscheiden. Y.1564 legt den Schwerpunkt auf die drei kritischen Leistungsparameter (KPI) der Rahmenfehlerrate (FLR), der Rahmenlaufzeit (FD) oder Latenz und der Rahmenlaufzeit-Schwankung (FDV) oder Paket-Jitter. Die Leistungstests nach Y.1564 sind gut geeignet, um Dienstgütevereinbarungen (SLA) zu kontrollieren, da jeder einzelne Dienst mit seinem Bandbreitenprofil verglichen wird. Für diese Profile wird immer die garantierte Datenrate (CIR) ermittelt, wobei die garantierte Burstgröße (CBS) zunehmend auf Interesse stößt. Die erweiterte Datenrate (EIR) gehört zwar zu Y.1564, wird aber nicht immer getestet, während die erweiterte Burstgröße (EBS) weniger verbreitet ist. Die von VIAVI Solutions zur Verfügung gestellte Y.1564-Testfolge wird als SAMComplete bezeichnet. Wie RFC 2544 kann auch Y.1564 genutzt werden, um bidirektionalen Verkehr (mit Schleife) und sogar unidirektionalen und asymmetrischen Verkehr zu testen. Tabelle 2 vergleicht die grundlegenden Kennwerte der beiden Verfahren RFC 2544 und Y.1564. Wenn während der Testausführung Störungen erkannt werden, kann ein Schritt zur Fehlerdiagnose darin bestehen, die CFP-Optik auf der Kundenseite zu überprüfen. Diese Überprüfung kann über den gesamten Takt-Offset-Bereich, der bei Ethernet ± 100 ppm beträgt, mit einfachen Testmustern ausgeführt werden.

Tabelle 2: Anwendungen für RFC 2544 und Y.1564

	RFC 2544	Y.1564
100GE-Hauptanwendung	Einrichtung neuer Backbone-Links oder einzelner Ende-zu-Ende-Verbindungen	Einrichtung von Ethernet-Verbindungen oder -Diensten im Kernnetz
Gemessene/validierte Parameter	Durchsatz Latenz Rahmenverlustrate (FLR) Burstfähigkeit (Extra: CBS) Extra: Paket-Jitter	FLR Latenz: FD Paket-Jitter: FDV CIR EIR Traffic-Policing CBS
Schwerpunkt	Testen eines einzelnen Verkehrsstroms (Adressenpaar), Ermittlung der maximalen Leistung	Testen eines oder mehrerer Dienste, Validierung der Rahmenübertragungsleistung, auch gegen SLA-Parameter

Bei Tests nach RFC 2544 und Y.1564 ist es auch wichtig, die Genauigkeit und Auflösung der Latenzmessungen zu beachten. Die Genauigkeit gibt an, wie nahe das Messergebnis mit einer gewissen Fehlertoleranz an den tatsächlichen Wert herankommt, während die Auflösung die Größenordnung des Ergebnisses definiert, beispielsweise eine Auflösung von 100 ns bzw. 0,01 μ s. Um die Faserlänge exakt zur Latenz in Beziehung setzen zu können, sind sowohl eine hohe Auflösung als auch eine große Genauigkeit erforderlich. Diese Korrelation ist vor allem dann wichtig, wenn Endkunden betroffen sind, die im Finanzsektor im Hochfrequenzhandel (HFH) und in ähnlichen Anwendungen tätig sind oder zeitkritische Mobilfunkdienste nutzen. Bei 103,125 Gbit/s, also der tatsächlichen 100GE-Datenrate, dauert es 100 ns, um einen 1289-Byte-Rahmen zu senden. Die aktuellen Technologien erlauben also, die benötigte Latenzgenauigkeit auf Rahmenebene zu gewährleisten.

Für die Aktivierung von Diensten wird als zusätzliches Verfahren ein Transparenz-Test auf Layer 2 empfohlen. In Ethernet-Netzen, in denen Switching- oder sogar Routing-Elemente vorhanden sind, ist dieser Test wichtig, da er lange und mühselige Fehlerdiagnosen vermeiden kann. Switcher und Router, einschließlich Ethernet/MAC-Module von Transporttechnik, erzeugen ein relativ kleines, aber unverzichtbares Verkehrsvolumen, das über die Control Plane (Steuerebene) übertragen wird. Diese Control-Plane-Rahmen sind vorrangig für andere Switcher und Router bestimmt. Bei der Bereitstellung von Bandbreitendiensten in einem Netzwerk sollten alle Protokolle der Control Plane ordnungsgemäß behandelt, also nach MEF 6.1. getunnelt, per Peering übertragen oder verworfen werden. Die Control-Plane-Protokolle der Layer 2 sind durch ihren Protokolltyp, der in den Feldern Ethertype und Subtype angegeben ist, bzw. den Logical Link Control (LLC) Code gekennzeichnet. Beispiele für diese Protokolle sind das Spanning Tree Protocol (STP) und das Link Layer Discovery Protocol (LLDP). Eine effektive Methode zur Ausführung dieses Tests besteht darin, die Control-Plane-Protokolle im Netzwerk zu emulieren und gleichzeitig dafür zu sorgen, dass die entsprechenden Rahmen nicht falsch abgefangen oder verändert werden. Ein Transparenz-Test auf Layer 2 ist auch dann zu empfehlen, wenn ein Netzbetreiber Bandbreitendienste zur Verfügung stellt, die ein Drittnetz passieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Tester, der an die Zubringerschnittstelle angeschlossen ist, den Vorteil bietet, dass der gesamte Datenpfad im Netzwerk überprüft wird. Eine derartige Prüf- und Messtechnik erlaubt, die Leistungsparameter objektiv zu ermitteln und stellt zudem umfassende Berichtsfunktionen zur Verfügung.

Fehlerdiagnose in Netzwerken

Neben Tests zur Aktivierung von Diensten wird noch eine effiziente Fehlerdiagnose benötigt. Auf Ethernet-Ebene mit Funktionen auf Layer 2 und Layer 3 ähneln die Testmethoden denen von 10GE, wie RFC 2544, Y1564 und dem Layer-2-Transparenz-Test. Allerdings unterscheidet sich die Implementierung der Layer 1 bei 100G-Modulen und -Systemen grundlegend von den Implementierungen bei niedrigeren Datenraten. Diese Unterschiede betreffen die kundenseitige Optik bei mehreren Wellenlängen. Daher sind bei der Vor-Ort-Fehlerdiagnose die Daten auf Ebene der elektrischen Lanes mit zu berücksichtigen. Diese befinden sich am Ende der optischen Module, wie CFPs. Die Kennwerte, wie Fehler pro Lane und Alarme, wie Synchronisationsverlust, können beispielsweise helfen, eine Störung in der Hardware zu erkennen, die nur eine bestimmte physische Lane betrifft. Auf jeden Fall müssen detailliertere Tests, wie des Bitversatzes (Skew), nicht im Feldeinsatz sondern stattdessen im Labor durchgeführt werden. Sollten auf der physikalischen Layer ernsthafte Fehler auftreten, werden diese mit Hilfe von Verkehrstests erkannt.

Eine Fehlerdiagnose-Funktion, die bisher noch nicht für den Feldeinsatz gefordert ist, betrifft die Vor-Ort-Paketaufzeichnung. Derartige Messungen verlangen Spiegel-Ports, die für 100GE noch nicht ohne Weiteres erhältlich sind. Außerdem wird diese Art der Fehlerdiagnose an der Leitung von Endkunden, wie eines Geschäftskunden, durchgeführt, von denen es aktuell nur sehr wenige für 100GE gibt.

Die Zukunft der optischen Transportnetze (OTN) beginnt heute

Die Entwicklung von 100G-Netzen fördert die Bereitstellung einer größeren Anzahl von OTN-Ports. Das optische Transportnetz (OTN) wurde vor mehr als einem Jahrzehnt vor allem mit dem Ziel geschaffen, SONET/SDH-Signale über große Entfernungen zu übertragen. Es verwendet für jeden OTN-Rahmen Algorithmen zur Vorwärtsfehler-Korrektur (FEC), die helfen, die Entfernung zwischen den Endknoten zu vergrößern. Der Hauptstandard ITU-T G.709 wurde weiterentwickelt und unterstützt verschiedene Payload-Clients, wie Ethernet, Fibre-Channel und das Common Public Radio Interface (CPRI). Hier wird auch die 100G-OTU4-Schnittstelle definiert.

Daher besteht die größte Veränderung aus Sicht der Testausführung darin, dass mehr OTN-Ports als Zubringerschnittstelle genutzt werden. Das wiederum ermöglicht Testanwendungen, da Zubringerschnittstellen vollständig standardisiert sind und mit der Prüf- und Messtechnik zusammenwirken. Die meisten älteren OTN-Anwendungen, insbesondere digitale Wrapper, in denen ein Kundensignal in OTN „umhüllt“ wird, betrafen Ports auf der Leitungsseite, an denen es aufgrund von Kompatibilitätsproblemen häufig nicht möglich ist, Test-Verkehr zu generieren. Diese Probleme werden vor allem durch anbieterspezifisch erweiterte Modulationsverfahren sowie durch proprietäre FEC-Algorithmen verursacht. Alle OTU4-Client-Ports unterstützen die generische FEC nach G.709 RS(255,239), wie sie in G.709 gefordert ist. Dadurch stehen gemeinsame Schnittstellen zur Verfügung, die als Testzugangspunkte (TAP) verwendet werden können.

Zukünftige OTN-Client-Anwendungen beinhalten OTN-Übergaben direkt am Router-Port, wo Ethernet über eine Wrapper-Funktion in OTN übertragen wird, oder einfach zwischen zwei Netzbetreibern. Einer der Gründe für die Nutzung der OTN-Technologie sind die fortgeschrittenen OAM-Funktionen für Betrieb, Verwaltung und Wartung, die eine robuste Alarm- und Fehlerüberwachung ermöglichen. Zu erwähnen ist auch, dass es für 100G keinen SONET/SDH-Standard gibt. In naher Zukunft werden jedoch OTN-Feldanwendungen, wie OTN-Switching auf Layer 1 mit Hilfe der ODU-Multiplex-Technologie implementiert werden. Bei diesem Entwicklungstrend können Signale geringerer Bitrate über Switching und Aggregation zu schnelleren OTN-Links bis OTU4 zusammengefasst werden. Das wichtigste Ziel bleibt jedoch die Übertragung von Ethernet-Signalen hoher Datenrate.

Fazit

Auf der ganzen Welt werden immer mehr 100G-Netze installiert. Im Vergleich zur Datenübertragung bei 10 und 40 Gbit/s sind hier einige anspruchsvollere Technologien, wie neue Modulationsformate, sowie neue physische Übertragungsschichten, zu beachten. Die wesentlichen Testparameter, wie Dispersion und OSNR an den Leitungsschnittstellen und Rahmenverlustrate (FLR), Latenz, Paket-Jitter und die Protokolltransparenz an den Zubringerschnittstellen, sind gleich. Da die Menge der Daten aber stark ansteigt und 100G-Dienste zudem einsatzkritisch sind, spielt die Testausführung eine wichtige Rolle bei der Bereitstellung dieser Netze. Aufgrund des weltweiten Übergangs zu OTN-Zubringerschnittstellen wird die Einführung strenger Testverfahren unverzichtbar.

Diese Elemente fördern die Weiterentwicklung der Telekommunikationsindustrie und leiten den nächsten Innovationszyklus auf Grundlage von Backbones mit noch größerer Kapazität ein.

