

Engpässe im Access-Netz beheben

## Coherent PON – Pimp my Fiber

Auch Glasfaserkabel kommen durch immer schneller wachsende Datenraten an ihre Grenzen. Das Verlegen zusätzlicher Fasern ist aufwendig und teuer. Daher arbeiten die CableLabs an der Standardisierung des CPON-Verfahrens, das die symmetrische Übertragung von bis zu 100 Gbit/s über eine Wellenlänge auf einer Faser ermöglicht. Von Dr. Alexander Adams

Die internationale Breitbandindustrie hat mit Distributed-Access-Architecture-Technologien eine digitale optische Infrastruktur geschaffen, die hohe Datenraten an die Optical Nodes übertragen kann. Zudem stehen mit DOCSIS 3.1 und DOCSIS 4.0 Technologien zur Verfügung, die hohe Bitraten zwischen den Optical Nodes und den Kunden transportieren können. In bisherigen analogen Systemen wurden die Optical Nodes mit etwa 10 Gbit/s versorgt. Die Größe der Cluster kann hier bei 500 bis 1.000 Teilnehmern liegen, die sich diese analogen 10 Gbit/s teilen. Mit DOCSIS 3.1 in Kombination mit Distributed Access Architecture (DAA) und vor allem mit DOCSIS 4.0 wird das – nunmehr digitale – optische Signal näher zum Kunden gebracht. Die Clustergröße der Zukunft liegt bei rund 50 oder sogar nur 25 Kunden, die sich die an einem optischen Node anliegenden 10 Gbit/s Ethernet teilen. Daraus folgt, dass mittelfristig sehr viel mehr Optical

Nodes tiefer im Netz in Betrieb genommen werden müssen, die alle 10 Gbit/s zur Verfügung stellen sollen.

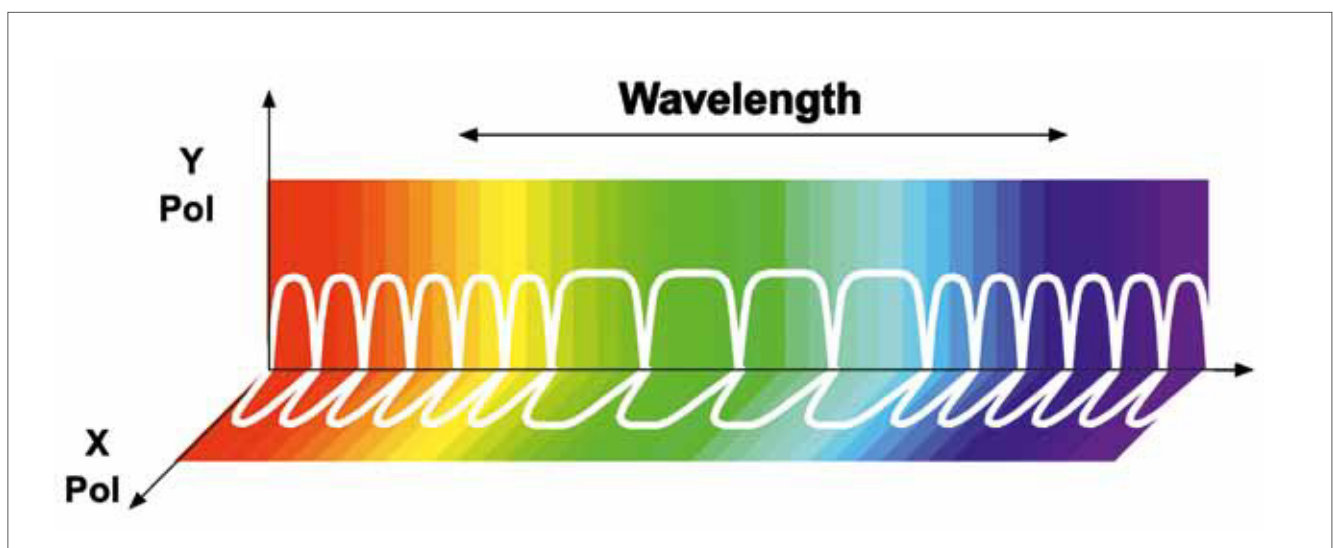
### Herausforderung fürs Access-Netz

Diese Problemstellung lenkt den Blick in Richtung Access-Netz, denn die Signalisierung der Nodes muss darüber gewährleistet werden. Das Access-Netz sieht sich mit dem immer drängender werdenden Problem konfrontiert, in nicht allzu ferner Zukunft sehr viel größere Datenmengen transportieren zu müssen als bisher. Die Lichtwellenleiter, die um die Jahrtausendwende im Zuge der Umrüstungsmaßnahmen im Access-Netz gelegt wurden, enthalten oftmals nur sechs oder acht Fasern. Hiervon werden normalerweise je eine für den Primary Upstream und eine für den Primary Downstream verwendet. Seinerzeit glaubte man sich mit vier oder sechs Fasern auf Jahrzehnte hinaus

gewappnet, den Ansprüchen der Zukunft gerecht werden zu können. Jedoch sind diese Reserven inzwischen oftmals für z. B. Node Splits, Mobile Backhaul oder andere Maßnahmen verwendet worden. Daher stellt man sich in der Breitbandindustrie die Frage, wie ein erhöhter Datendurchsatz im Access-Netz ohne dessen massiven Ausbau mit zusätzlichen Lichtwellenleitern ermöglicht werden kann. Die Antwort der CableLabs ist CPON – Coherent Passive Optical Networks, womit 100 Gbit/s über eine einzelne Wellenlänge und über eine Entfernung von bis zu 80 Kilometern übertragen werden können.

### Das „Full-Duplex Coherent Optics“-Verfahren

CPON basiert auf dem bewährten Ansatz der Breitbandindustrie: Neues ist zu teuer, daher muss Bestehendes mehr leisten und das länger als geplant ... wieder schlägt die Stunde der Ingenieure.



© A. Adams

Abbildung 1: Polarisierte Schwingungen: Die Ebenen sind um 90 Grad zueinander verschoben, die Signale stören sich gegenseitig nicht

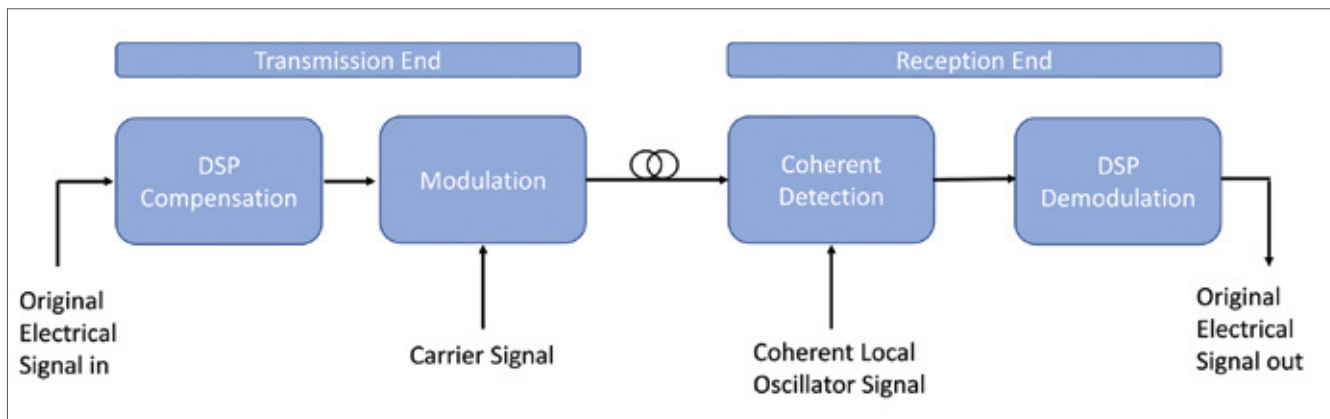


Abbildung 2: Kohärentes Optisches System

Diese bedienen sich gerne bewährter Ansätze, um eine Lösung zu entwickeln. In den vergangenen Jahren haben sich die CableLabs in Denver, CO, mit dem Thema wachsender Kapazitätsansprüche an das Access-Netz beschäftigt und arbeiten an der Anpassung des sogenannten „Full-Duplex Coherent Optics“-Verfahrens für die Breitbandindustrie. Dieses basiert auf kohärenten optischen Übertragungsverfahren, mit denen auf verschiedenen Wellenlängen und Polarisationen nunmehr Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) im optischen Bereich angewendet werden kann.

### In den USA in optischer Überland-Übertragung im Einsatz

Dieses kohärente Verfahren findet in den USA bereits seit vielen Jahren in der optischen Überland-Übertragung (Long-Haul Transmission) Anwendung. Dabei werden optische Signale mehrere Tausend Kilometer weit zwischen Ost- und Westküste übertragen. Ein Lichtwellenleiter weist zwar eine sehr viel geringere Dämpfung pro Meter Kabel auf, als es sein koaxialer Verwandter tut, aber sie ist eben auch nicht gleich Null. Folglich müssen auch optische Signale im Long-Haul ungefähr alle ca. 80 Kilometer verstärkt und „geswitched“ werden. Jeder Verstärker verstärkt das eingehende Signal – aber leider ebenso die dem Signal innewohnenden Störungen, so wie er dem Signal auch noch zusätzliches Rauschen hinzufügt. So verschlechtert sich der Signal-Rauschabstand des Signals mit jeder zusätzlichen Verstärkung. Zudem ist ein Verstärker ein aktives Element mit

unvermeidbar nichtlinearen Kennlinienanteilen und produziert daher zusätzlich nichtlineare Verzerrungen, die die Qualität des Signals weiter beeinträchtigen. In der Überland-Übertragung mit kohärenten optischen Verfahren kann das Prinzip der QAM auf infrarotes Licht angewandt werden. Nicht zuletzt wegen der beschriebenen Störungsproblematik werden Modulationsordnungen oberhalb von QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying, Quadraturphasenumtastung) hierbei jedoch nicht verwendet.

Da bei der Überland-Übertragung sehr robust moduliert werden muss, verwendet man zusätzlich eine zweite Polarisationsebene für Lichtsignale der gleichen Wellenlänge. Die Ebenen sind um 90 Grad zueinander verschoben, wie in Abbildung 1 dargestellt. In dieser Anordnung können die beiden Signale unabhängig voneinander Information übertragen, ohne sich gegenseitig zu stören. Im Falle des Überland-Szenarios können somit zwei verschiedene QPSK-Signale gleichzeitig auf derselben Wellenlänge übertragen werden, was einer Verdoppelung des Datendurchsatzes entspricht. Bei nicht-kohärenten Systemen wird eine Leistungsgröße durch die Modulation verändert. Bei kohärenten Systemen kommt es auf die Feldgrößen – die sogenannten Leistungswurzelgrößen – selbst an, nämlich die elektrische und die magnetische Feldstärke. Wie in der Hochfrequenztechnik werden sie einzeln betrachtet und variiert. Es ergibt sich dadurch die Möglichkeit der Anwendung von Modulationsverfahren, die den HF-Verfahren sehr ähnlich sind, wie z. B. Phase-Shift-Keying und QAM.

### Funktionsprinzip kohärenter Systeme

Abbildung 2 stellt ein Beispiel für ein kohärentes Übertragungssystem dar. Die zu übertragende Nachricht wird als elektrisches Eingangssignal in einem digitalen Signalprozessor für die Modulation aufbereitet und dann mit einem optischen Träger moduliert, was grundsätzlich einer Multiplikation entspricht. Nach der Übertragung über den Lichtwellenleiter wird das ankommende modulierte optische Signal mit einem weiteren optischen Referenzträger verglichen, der dem Träger des ankommenden Signals in Amplitude, Frequenz und Phasenlage entsprechen soll. Anschließend wird das Signal durch den weiteren Demodulationsprozess geschickt und die Nachricht zurückgewonnen. Nachfolgend wird das Ergebnis über ein Additionsverfahren erreicht. Dies stellt ein besonders einfaches und anschauliches Beispiel dar.

### Kohärente Optik = QAM mit Infrarotlicht

Der Vorteil eines kohärenten Systems liegt in der zusätzlichen Sensitivität im Empfang der Signale. Es erlaubt die gleichzeitige Verwendung vieler im Frequenzband relativ nahe beieinander liegender Träger unter leistungstechnisch guten Bedingungen. Zudem können in kohärenten optischen Systemen nicht nur BPSK-Signale (1 Bit pro Symbol) verwendet werden. Phasenlagen und Amplituden können sehr genau kontrolliert und zur Kodierung von längeren Bitfolgen verwendet werden, was dem

Prinzip der QAM entspricht, wie wir es seit vielen Jahren aus der Anwendung der verschiedenen DOCSIS-Standards in unseren HFC-Netzen kennen. Bei DOCSIS-Systemen verwenden wir die QAM mit elektromagnetischen Schwingungen im Megahertz- oder Gigahertz-Bereich, bei kohärenten optischen Systemen wird sie auf elektromagnetische Schwingungen im Terahertz-Bereich angewandt. Aus der DOCSIS-Welt ist bekannt, dass mit höheren QAM-Modulationsordnungen Symbole mit höherer Bitanzahl moduliert werden können und somit in einer gegebenen Bandbreite der Datendurchsatz des Systems gesteigert wird. Kohärente Optik ist QAM mit Infrarotlicht. Zudem kommen bei kohärenten optischen Systemen verschiedene unabhängige Polarisationssebenen zum Einsatz, wobei jede zusätzlich eingesetzte Polarisationssebene den Datendurchsatz des Systems verdoppelt.

Die CableLabs haben im Rahmen der „Coherent-PON Initiative“ (CPON) aus dem Jahr 2021 diesen technologischen Ansatz für HFC-Netze übernommen, der sich momentan in der Erforschung befindet und ab 2024 in einen CPON-Standard einfließen soll.

### Steigerung der Datenraten durch kohärente Optik

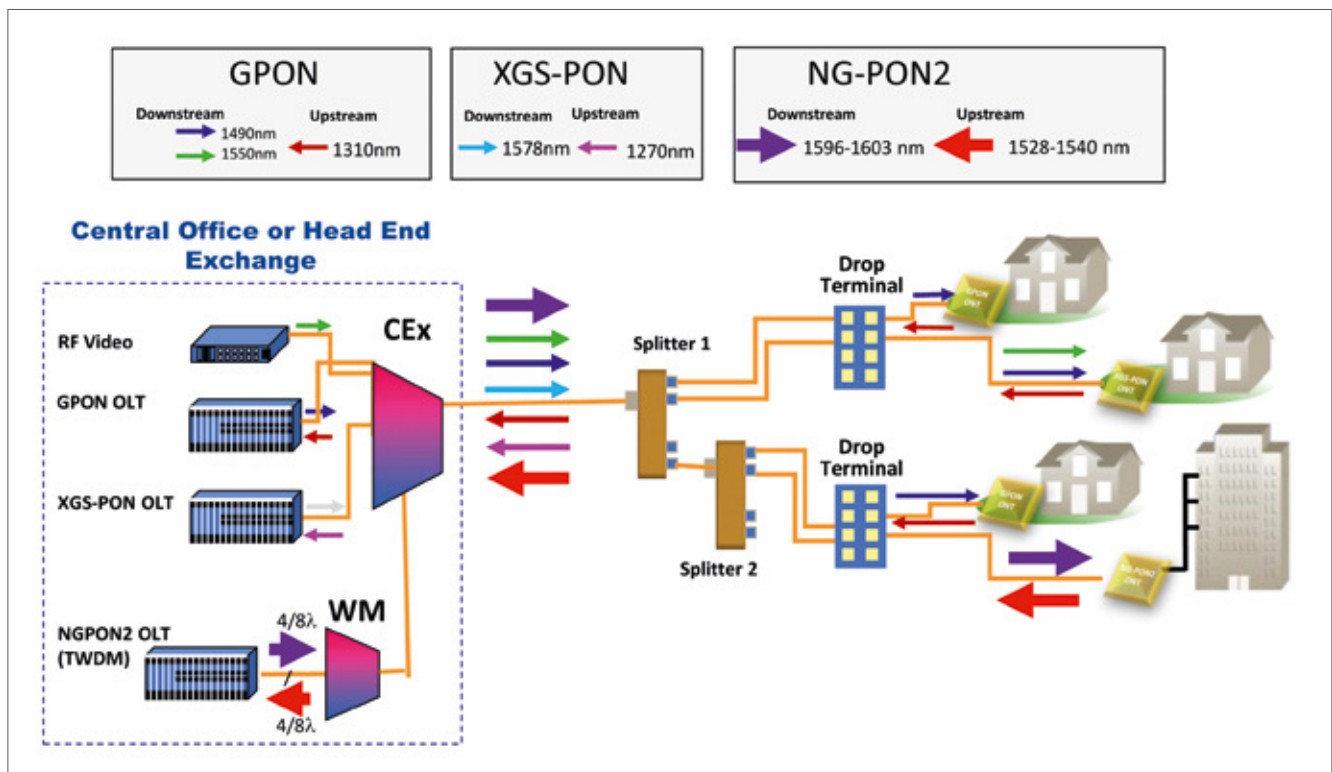
Der Access-Anteil eines HFC-Netzes ist sehr viel kleiner dimensioniert als die Entfernung zwischen der Ost- und Westküste der USA beträgt. Er ist sogar zumeist kürzer als die ca. 80 Kilometer, die zwischen optischen Verstärkungen in der Überland-Übertragung liegen und die, wie weiter vorne beschrieben, maßgeblich zur schlechten Signalqualität an der Ankunfts-küste beitragen. Somit lässt sich ein kohärenter optischer Ansatz nicht nur optimal auf das Access-Netz übertragen. Er lässt sich außerdem zur Steigerung der Datenraten nutzen, da aufgrund der kurzen Entfernungen im HFC-Netz keine Verstärkungen des optischen Signals notwendig sind und folglich die Signalqualität während der Übertragung weitaus weniger beeinträchtigt wird. Wenn ein optisches Signal innerhalb des Netzes nicht verstärkt wird, spricht man von einem passiven optischen Netz, einem PON.

### Engpässe im Access-Netz durch CPON beseitigen

Der Einsatz von CPON-Technologie wird mittelfristig den in den letzten Jahren entstandenen Engpass im Access-Netz beheben. Mit CPON können bis zu 100 Gbit/s auf einer einzelnen Wellenlänge bis zu 80 km weit übertragen werden. Die typische Struktur eines gegenwärtigen passiven optischen Netzes ist ein Point-to-Multipoint-System (P2MP), bei dem ein OLT (Optical Line Termination) in einem zentralen Hub des Netzbetreibers Video- und Datensignale an 16 bis 128 Kunden pro Faser verteilen kann. Mit einer Split-Ratio von 1:512 werden CPON-Systeme dementsprechend sogar leistungsfähiger sein.

### Höhere Split-Ratio möglich

Das OLT bildet in einem PON die übertragungstechnische Schnittstelle zwischen dem kundenseitigen Access-Netz und dem Backbone-Netz, ähnlich der Funktion einer CCAP in einem HFC-Netz. Es konvertiert die Signale aus den übergeordneten Netzen, versieht sie mit der für das PON-Netz verwendeten Fra-



Quelle: Aredis/BTV Multimedia Group

Abbildung 3: Allgemeine Struktur eines PON

ming-Struktur und überträgt sie auf das PON-Netz. Weiterhin koordiniert es das Multiplexing der von den Kunden kommenden Signale im Upstream. Die Glasfasern werden im Zuge der Übertragungsstrecke zu den in einer Schaltstelle oder einer Muffe befindlichen passiven optischen Splittern geführt. Ein optischer Splitter teilt ein einzelnes Signal in mehrere Signale jeweils gleicher Leistung auf. Die Leistung als Teilleistung an einem einzelnen Splitterausgang ist abhängig von der Gesamtzahl der Ausgänge (z. B. 1:32, 1:64) – je mehr davon, desto weniger Leistung ist an jedem dieser Ausgänge abgebar. CPON-Systeme verfügen über eine verbesserte optische Leistungsverteilung und unterstützen daher eine Split-Ratio von 1:512.

### Funktionsweise eines PON

Nach Durchlaufen des Splitters werden die Signale über Verteilfelder (Drop Terminals) an die einzelnen Benutzer gebracht. Man beachte, dass ein Splitter in der Upstream-Richtung die Funktion eines Combiners erfüllt. Eine optische Netzeinheit – eine ONU (Optical Network Unit) – terminiert das PON

aufseiten des Kunden. Abbildung 3 erläutert die allgemeine Architektur eines PON. Im Zusammenhang mit PON wird die ONU auch als Optical Network Terminal (ONT) bezeichnet. GPON ist ein Standard der ITU, der International Telecommunications Union, der den Begriff „ONT“ verwendet, während EPON ein Standard des Institute-of-Electrical-and-Electronics-Engineers (IEEE) darstellt, der dasselbe Equipment als „ONU“ bezeichnet.

### Funktionsprinzip eines PON

Die grundlegende Funktionsweise eines PON ist der eines HFC-Netzes nicht unähnlich. In der Downstream-Verteilung auf einer einzelnen Wellenlänge von OLT zu ONU/ONT erhalten alle Kunden die gleichen Daten, wobei die einzelnen ONUs/ONTs die für sie bestimmten Signale erkennen und empfangen können. Im Upstream von ONU/ONT zum OLT ist die Lage etwas komplizierter. Hier wird ein Zeitmultiplexverfahren (TDM – Time Division Multiplexing) angewandt, bei dem jedem ONU/ONT Zeitschlitz für eine Übertragung zugewiesen werden. Die Übertragung einer

ganzen Benutzernachricht im Upstream besteht normalerweise aus mehreren dieser als Burst-Mode-Operations bezeichneten Sendegelegenheiten, erfordert also die Zuordnung mehrerer zeitlich nicht zusammenhängender Zeitslots. Da bei der TDM-Methode meistens eine Mehrzahl von Benutzern an einer Upstream-Übertragung beteiligt ist, ist die Upstream-Datenrate für die einzelnen Benutzer grundsätzlich geringer als im Downstream.

Die ersten Erfahrungen mit dem Prinzip des Zeitmultiplex machen wir bereits in der Schule. Spricht die Lehrkraft zur ganzen Klasse, können alle Schüler die Information gleichzeitig verarbeiten und das für sie Relevante aus dem Vortrag gewinnen. Stellt die Lehrkraft jedoch eine Frage an die Klasse, melden sich die Schüler und warten darauf, dass sie aufgerufen werden. So kommt jeder Schüler nacheinander an die Reihe und es wird Durcheinander vermieden. Ein Zeitmultiplexansatz ist also vorteilhaft, wenn viele Parteien mit derselben einzelnen Partei reden wollen.

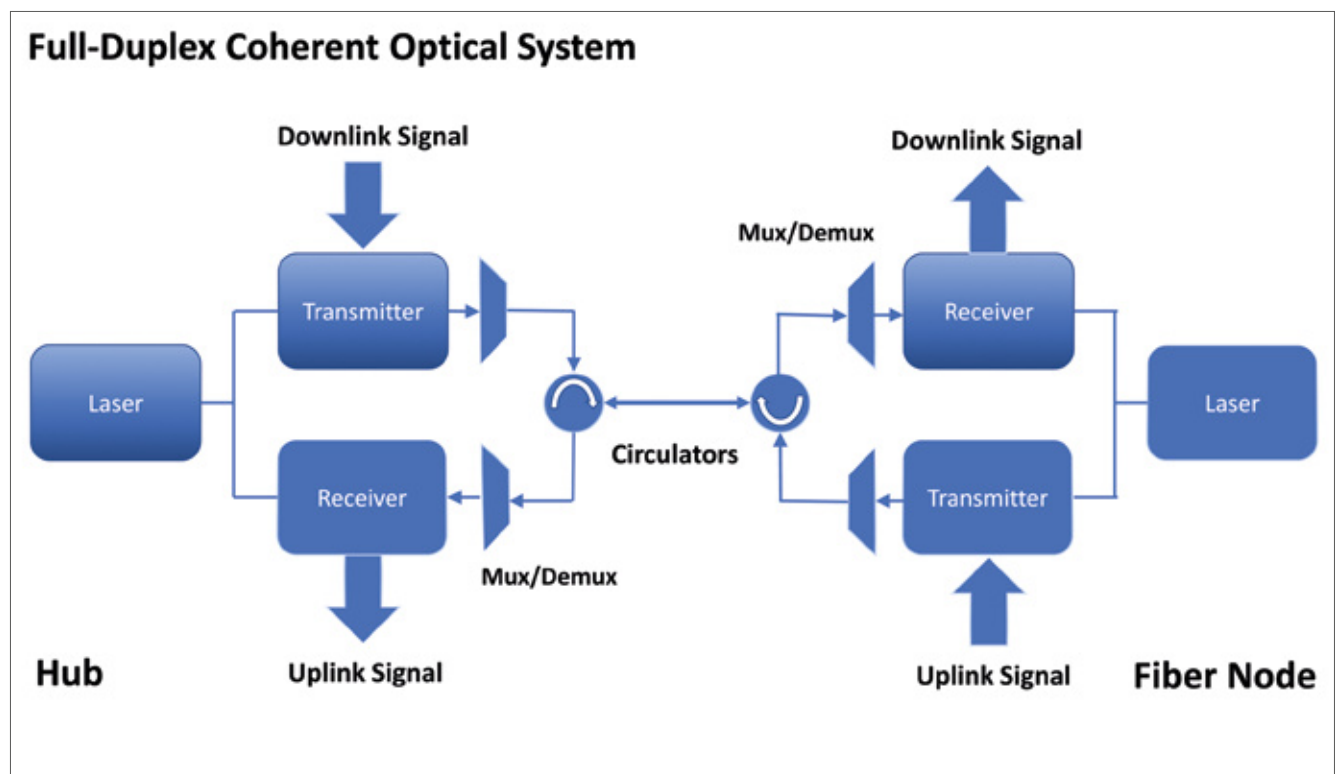


Abbildung 4: Full-Duplex Kohärentes Optisches System



## Full-Duplex kohärentes System

CPON kann als Full-Duplex Verfahren Verwendung finden. Der Begriff Full-Duplex bedeutet, dass das System symmetrische Datenraten wie weiter vorne beschrieben im Up- und Downstream über dieselbe Faser zur Verfügung stellen kann. Auch wenn im WDM-System mehrere Wellenlängen zur Verfügung stehen, wird der Full-Duplex-Betrieb auf jeder Wellenlänge durchgeführt. Dieses wird durch den Einsatz sogenannter optischer Zirkulatoren ermöglicht. Abbildung 4 stellt das Full-Duplex kohärente System zwischen Hub und Optical Node dar. Die Faser zwischen den Zirkulatoren überträgt symmetrisch in beide Richtungen. Ein optischer Zirkulator trennt und kombiniert die Signale in Up- und Downstream. Ein an einem Port des Zirkulators ankommendes Signal wird in Rotationsrichtung (Rotationspfeil) zum nächsten Port transportiert und verlässt den Zirkulator dort wieder. Der Zirkulator funktioniert wie ein Kreisverkehr, an dem man nach der Einfahrt an der nächsten möglichen Ausfahrt wieder abfahren muss. Das Downlink-Signal am Hub in Abbildung 4 läuft über den Transmitter in den Zirkulator und wird auf die gemeinsame Faser geroutet. Am Fiber Node trifft es wieder auf einen Zirkulator und wird am nächsten Ausgang in Rotationsrichtung wieder ausgekoppelt und in den Receiver eingespeist. Für das Upstream-Signal verhält es sich entsprechend.

Optische Zirkulatoren bestehen aus einer Anordnung verschiedener Faraday-Rotatoren („Dreher“) und sogenannter Birefringent Wedges („Keil mit zwei Brechungsindizes“). Ein Faraday-Rotator

nutzt den Faraday-Effekt zum Ändern der Polarisation von elektromagnetischen Wellen und ein Birefringent Wedge trennt ein Lichtsignal in zwei orthogonal polarisierte separate Lichtsignale. Die Polarisation, die den höheren Brechungsindex erfährt, erfährt dabei auch die stärkere Ablenkung. Es sind also diese optischen „Dreher“ und „Keile“, die Up- und Downstream auf einer Faser und Wellenlänge kombinieren und wieder trennen.

## 200-fache Kapazität einer analogen Faser

In den CableLabs wurden im Zuge der Forschung 256 GBit/s über eine Strecke von 80 km mit minimaler Dispersion auf einer einzelnen Wellenlänge übertragen. Das entspricht der 26-fachen Kapazität einer analogen Faser, über die ein voll modulierte Frequenzband von 1,2 GHz Bandbreite mit ausschließlich DOCSIS 3.1-Signalen übertragen wird. Hierbei wurden eine Symbolrate von 32 Gbaud und zwei Polarisationsebenen sowie eine 16-QAM Modulationsordnung (4 Bits pro Symbol) verwendet ( $32 \times 2 \times 4 = 256$ ). Zusätzlich wurden 8 Wellenlängen im WDM-Multiplexverfahren eingesetzt, was eine Datenrate von 2.048 GBit/s über eine einzelne Faser ergibt. Das entspricht ungefähr der 200-fachen Kapazität einer analogen Faser. CPON hat also noch Luft nach oben.

## CPON-Standard soll 2025/26 operativ zur Verfügung stehen

Die kabelgebundene Breitbandindustrie hat vom „Pimp-my-DOCSIS-Modus“ in den „Pimp-my-Fiber-Modus“ geschaltet. Die steten Weiterentwicklungen des

DOCSIS-Standards ermöglichen es Netzbetreibern weltweit, ihre Kunden mit nunmehr symmetrischen Gigabitraten zu versorgen. Diese hohen Bitraten können jedoch nur dann zu und von einer großen Anzahl von Kunden gleichzeitig transportiert werden, wenn das optische Zugangsnetz dafür ausgelegt ist. Da neue Lichtwellenleiter teuer sind und ihre Verlegung Zeit beansprucht, wird mit kohärenten Übertragungsansätzen die Kapazität der bestehenden Fasern massiv erhöht. Die CPON-Initiative der CableLabs aus dem Jahr 2021 hat zum Ziel, einen Standard bis zum Jahr 2024 so weit ausgearbeitet zu haben, dass dieser einer Testphase unterzogen und 2025/2026 operativ zur Verfügung stehen kann. Mit Datenraten von 100 Gbit/s pro Wellenlänge können über eine einzelne Faser und über mehrere Wellenlängen bisher ungeahnte Datenraten symmetrisch übertragen werden, was Netzbetreibern einige Jahre Zeit gibt, ihre Access-Infrastruktur mit neuen Lichtwellenleitern aufzurüsten.

Herr Nielsen hat bisher recht behalten. Der Bandbreitenbedarf hat sich in der Vergangenheit in der Tat ungefähr alle zwei Jahre verdoppelt, wie er in seinem Nielsen's „Law“ vorhersagte. Es ist unwahrscheinlich, dass er in der mittelfristigen Zukunft widerlegt werden sollte. So bleiben auch CPON und kohärente optische Systeme in Breitbandnetzen letztendlich ein „Zeitkaufprojekt“, bis diese zusätzlichen Fasern im Access-Bereich gelegt sind. ■



© Adams Network Engineering

### Dr.-Ing. Alexander C. Adams

Dr.-Ing. Alexander Adams ist Geschäftsführer der Adams Group und Chief Science Officer der Netzkontor Gruppe. Adams verfügt über 22 Jahre Erfahrung in der deutschen und internationalen Breitbandkommunikationsindustrie. Er ist Dozent und europäischer Repräsentant der SCTE -- Society of Cable Telecommunications Engineers (US) und arbeitet in der Proactive Network Maintenance Research Gruppe der CableLabs. Zudem ist er Dozent für Nachrichtentechnik an der Jade Hochschule in Wilhelmshaven/Oldenburg. Adams hält einen Bachelor sowie Master Abschluss in Elektrotechnik von der University of Hawai'i und hat an der TU Darmstadt promoviert.