

# Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger: Adtran Networks SE	Förderkennzeichen: 16KIS1418K
--------------------------------------------	----------------------------------

---

Vorhabenbezeichnung:  
Verbundprojekt: STARFALL – Skalierbare  
Terminalarchitekturen und -subsysteme für faseroptisches  
Raummultiplexing

Teilvorhaben: Konzepte und Subsysteme für  
integrierte Terminals zur effizienten Übertragung in  
optischen Raummultiplexsystemen

---

Laufzeit des Vorhabens:  
Von 01.07.2021 bis 31.12.2024

---

Berichtszeitraum:  
Von 01.07.2021 bis 31.12.2024

---

Projektleiter: Gabriele Di Rosa, [gabriele.dirosa@adtran.com](mailto:gabriele.dirosa@adtran.com)

Beiträge zum Bericht: Dr. Gabriele Di Rosa, Dr. Jasper Müller, Dr. Dimitar Kroushkov, Dr. Florian Azendorf, Dr. Ognjen Jovanovic, Dr. Benjamin Wohlfeil und M. Ahmed Leghari

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Kurzdarstellung</b> .....	<b>2</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	2
1.2	Voraussetzungen .....	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4	Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn .....	3
1.5	Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit .....	3
<b>2.</b>	<b>Eingehende Darstellung</b> .....	<b>5</b>
2.1	Durchgeführte Arbeiten und Erzielte Ergebnisse .....	5
2.1.1	AP0: Projektübergreifende Workshops .....	5
2.1.2	AP1-4: Technische Arbeitspakete .....	5
2.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit .....	14
2.3	Nutzen und Verwertung .....	14
2.4	Externer Fortschritt .....	15
<b>3.</b>	<b>Referenzen</b> .....	<b>15</b>

## 1. Kurzdarstellung

Im Jahr 2022 verkündete die ADVA Optical Networking SE den Firmenzusammenschluss mit der US-amerikanischen Firma Adtran Inc., wodurch es im Jahr 2023 zu einer Umbenennung von ADVA Optical Networking SE zu Adtran Networks SE kam.

### 1.1 Aufgabenstellung

Optische Übertragungssysteme sind das Rückgrat der digitalen Welt. Die Datenraten in optischen Netzen steigen exponentiell an, angetrieben durch Technologien wie 5G. Das nutzbare Wellenlängenspektrum einer Einmodenfaser ist nahezu ausgeschöpft, daher bietet sich Raummultiplex (eng; Spatial division multiplexing, SDM) als Lösung an. SDM ermöglicht eine lineare Skalierung der Datenrate mit der Anzahl der genutzten Raumpfade, was ökonomisch sinnvoll ist.

Das Verbundvorhaben STARFALL hatte das Ziel, neue kosteneffiziente Terminalarchitekturen für SDM-Systeme zu entwickeln und als Demonstrator zu implementieren. Ein Kammlaser erzeugt die Linien für mehrere Transceiver, und kooperierende Signalverarbeitungsblöcke verarbeiteten mehrere Kanäle gleichzeitig. Diese Ansätze wurden in einem Laboraufbau mit modularem Kammlaser, Echtzeit-Signalprozessierung und SDM-Faser demonstriert. Ziel war die Erforschung von SDM-Übertragungssystemen im Hinblick ihres praktischen Einsatzes in der Zukunft. Im STARFALL wurde eine leistungsfähige und kosteneffiziente Systemarchitektur mit integrierten SDM-Terminals, die optische SDM/WDM (eng; wavelength division multiplexing, WDM) Superkanäle verwendeten, untersucht und definiert. Zwei zentrale Terminal-Subsysteme standen im Fokus: Kammlaser für verschiedene Anwendungsfälle und kooperierende kodierte Modulation und digitale Signalerarbeitung (engl. digital signal processing, DSP). Diese wurden in Laborexperimenten und einem Systemtestaufbau mit Echtzeit-Signalverarbeitung demonstriert.

### 1.2 Voraussetzungen

Alle Partner verfügten über umfangreiche allgemeine Erfahrungen im Bereich der optischen Kommunikation sowie über spezielles Fachwissen in einigen Schlüsseltechnologien wie Kammlaser und Echtzeit-Signalverarbeitung. Diese Erfahrungen wurden zum Teil in anderen auf nationaler oder europäischer Ebene geförderten Projekten gesammelt oder stammten aus kommerziellen Aktivitäten.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik Heinrich Hertz Institut (HHI), und Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Darüber hinaus unterstützte das irische Unternehmen Pilot Photonics LTd. die Aktivitäten, indem es aus gemeinsamem wissenschaftlichem Interesse neue Prototypen von Kammlasern zur Verfügung stellte.

Adtran koordinierte das Projekt und war verantwortlich für die Anforderungsanalyse der System- und Netzarchitektur für kosteneffizientes Raummultiplexing mit SDM/WDM-Superkanälen. Zusätzlich untersuchte Adtran die Netzplanung für effiziente Netze sowie DSP-Subsysteme und optimierte Architekturen für Superkanäle. HHI befasste sich mit dem Netzbetrieb basierend auf SDM-spezifischen Telemetriedaten. Es leitete auch die Gestaltung der DSP-Echtzeitimplementierung und den Aufbau des SDM-Echtzeitdemonstrators. KIT leitete die Untersuchungen der kooperierenden DSP-Subsysteme für kodierte Modulation und MIMO-Entzerrung. Darüber hinaus war KIT verantwortlich für das Thema „optische Stromversorgung“ bei dem Kammlaser für SDM/WDM-Superkanäle. Alle Partner wirkten an den Systemexperimenten und der finalen Demonstration.

Die Arbeiten von Adtran waren in die folgenden Arbeitspakete gegliedert:

Arbeitspaket	Titel
AP0	Projektübergreifende Workshops

<b>AP1</b>	System- und Netzaspekte für effiziente SDM-Netze
<b>AP2</b>	SDM-Transceiver-Architekturen
<b>AP3</b>	Kooperierende Digitale Signalverarbeitung
<b>AP4</b>	Echtzeit-Kanalmessungen und Demonstration

AP0 war spezifisch für Adtran und hatte das Ziel, Treffen und Workshops für alle Projekte der Initiative Forschung Agil – Räummultiplexing in faseroptischen Netzen zu organisieren.

#### 1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand bei Projektbeginn

Zu Beginn des Projekts unterschied sich der Stand der Technik bei SDM-Systemen zwischen parallelen Einmoden-Faserbündeln und Mehrkern- bzw. Mehrmoden-Fasern. Untersee-Langstreckensysteme nutzten seit langem parallele Fasern mit geteilten optischen Faserverstärkern. Systeme mit Mehrkern-/modenfasern befanden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. 2018 wurde im INCIPCT-Projekt die erste Testumgebung mit verlegter Mehrkern-/modenfaser vorgestellt [Antonelli18]. Diese maßgefertigten Fasern hatten noch keine Industriestandards, aber ITU-T Q5/SG15 diskutierte bereits einen „Technical Report“ zu „Fibers for SDM“. Vorarbeiten im EXAT-Projekt [Morioka09] legten die Grundlage für Rekordexperimente mit über 10 Pbit/s Datenrate [Soma17]. Die in diesen Experimenten verwendeten Terminals waren jedoch ökonomisch nicht praktikabel für eine hohe SDM-Kanalzahl.

Terminals für SDM-Systeme waren daher noch Forschungsgegenstand ohne Industriestandards. Vorarbeiten zu Kammlasern und MIMO-Verarbeitung existierten [Wanke15, Kakande16], jedoch fehlten wichtige SDM- und Superkanal-spezifische Aspekte, die in STARFALL untersucht wurden. Effiziente Bandbreitenzuweisung und Kapazitätsanalysen wurden in früheren Arbeiten behandelt [Shariati18], aber STARFALL fokussierte sich auf kosteneffiziente Terminalarchitekturen. SDM/WDM-Superkanäle wurden hinsichtlich ihrer Switching-Anforderungen untersucht [Marom15, Shariati17], jedoch ohne die Auswirkungen auf Terminalarchitekturen zu betrachten.

Bisherige Veröffentlichungen konzentrierten sich auf reine Übertragungseigenschaften, während STARFALL auch den Empfänger und die digitale Signalverarbeitungskette betrachtete. Grundlegende Konzepte wurden aufgezeigt [Randel11, Feuer12], aber gemeinsame Modulation und Codierung für SDM wurden noch nicht eingehend untersucht. Wichtige Durchbrüche bei der Erforschung von optischen Kammlasern wurden erzielt, einschließlich der Erzeugung von ultrabreitbandigen Kammlasern [Ataie15, Puttnam15, Marin17, Corcoran20]. Das erreichbare optische Signal-zu-Rauschverhältnis bei begrenzter optischer Leistung pro Laserlinie musste jedoch noch weiter erforscht werden.

Der Betrieb und das Management von SDM-Netzen waren komplexer als bei aktuellen Netzen. Erste Arbeiten zu Ressourcenzuweisungsschemata und QoT-Schätzverfahren (eng: quality of transmission, QoT) existierten [Shariati18], aber Weiterentwicklungen waren notwendig. Dazu gehörten akkurate Parameterschätzungen, zuverlässige ML-basierte (eng: machine learning, ML) QoT-Schätzverfahren und netzweite QoT-Schätzungen.

#### 1.5 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Das Projekt hat seine ursprünglichen Ziele erreicht, sowohl in technischer Hinsicht als auch in Bezug auf seine Auswirkungen auf die Forschungslandschaft in Deutschland. Die angestrebten technischen Ziele wurden entsprechend den zu Beginn des Projekts festgelegten Meilensteinen erreicht. Adtran legte besonderen Wert auf Forschungsaspekte, die während der Projektlaufzeit immer mehr an Bedeutung gewannen, insbesondere auf die Netzplanung von Systemen mit extrem hoher Kapazität, bei denen Endgeräte auf Superchannel-Basis zum Einsatz kommen, sowie auf die Entwicklung von integrierten Kammlasern.

Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern war ausgezeichnet, mit regelmäßigen Treffen und Gesprächen, um die Entscheidungen voranzutreiben und alle über die Fortschritte der einzelnen Partner während der gesamten Projektlaufzeit auf dem Laufenden zu halten. Die üblichen persönlichen Projekttreffen wurden auch durch die Aktivitäten in AP0 bereichert, wo fruchtbare Diskussionen und Präsentationen zusammen mit den Partnern der anderen Projekte der Initiative Forschung Agil - Räummultiplexing in faseroptischen Netzen durchgeführt wurden.

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1 Durchgeführte Arbeiten und Erzielte Ergebnisse

#### 2.1.1 AP0: Projektübergreifende Workshops

Während der Projektlaufzeit organisierte Adtran mehrere Veranstaltungen, um die Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedern verschiedener SDM-Projekte zu fördern und die Sichtbarkeit des Förderprogramms zu erhöhen.

Ein erstes persönliches Treffen fand am 30. Juni und 1. Juli 2022 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Karlsruhe statt. Der Workshop bot die Gelegenheit, die Ziele der verschiedenen Projekte zu diskutieren und den Grundstein für eine projektübergreifende Zusammenarbeit zu legen.

Im Mai 2023 organisierte Adtran einen Workshop an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur (HTWK) in Leipzig, der mit der VDI-VDE ITG-Konferenz „Photonische Netze“ zusammenfiel. Dies bot zusätzlich die Gelegenheit, die Förderinitiative der Forschungscommunity in Deutschland vorzustellen.

Im Jahr 2024, als das Projekt kurz vor dem Abschluss stand, nahm Adtran an der Organisation eines internationalen Workshops auf der ECOC-Konferenz in Frankfurt teil. Zwei Redner der Initiative „SDM Germany“ wurden eingeladen und gaben der internationalen Forschungsgemeinschaft einen Einblick in die im Rahmen der Förderinitiative erzielten Ergebnisse.

#### 2.1.2 AP1-4: Technische Arbeitspakete

Zu Beginn der Aktivitäten wurden Untersuchungen zu den potenziellen Kamm-basierten Terminalarchitekturen und deren Leistung durchgeführt. Verschiedene Architekturen, bestehend aus Verstärkungs- und Filterstufen, wurden in Betracht gezogen, um optische Träger mit ausreichender Leistung für alle Kanäle aus dem Kammlaser zu erzeugen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Leistung dieser Architekturen wurde in Bezug auf das optische Signal-Rausch-Verhältnis (OSNR, eng: Optical Signal to Noise Ratio) unter realistischen Bedingungen von Lasern, Filtern, Modulatoren und Verstärkern bewertet. Dabei wurden Parameter wie das optische Träger-Rausch-Verhältnis, der optische Verlust, die Verstärkerverstärkung, die Rauschzahl und die Sättigungsleistung berücksichtigt.

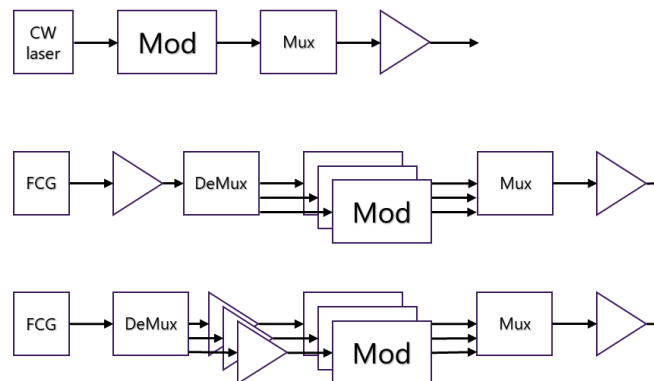


Abbildung 1: Architektur für optische Sender mit Dauerstrichlasern (CW laser, eng: continuous wave laser) (oberes Diagramm) sowie für Kammlaser-basierte Sender mit gemeinsamer Verstärkung aller Kammlinien (mittleres Diagramm) und mit individueller Verstärkung jeder einzelnen Linie des Kammlasers (unteres Diagramm)

Nach der ersten Bewertung der Geräteleistung wurden umfangreiche Studien zu den Netzaspekten von Sendern auf der Basis von Kammlasern durchgeführt. Diese Sender werden als Mehrwellenlängenquellen (MWS, eng: multi-wavelength source) bezeichnet. Konventionelle dedizierte Laser werden hingegen als Einzelwellenlängenquellen (SWS, eng: single-wavelength source) bezeichnet. Die Studien konzentrierten sich

auf MWS mit 4 und 8 Linien. Wir sehen diesen Wertebereich als den richtigen Kompromiss zwischen zukünftiger Skalierbarkeit des Transceivers und übermäßig erhöhter Komplexität aufgrund der starken Parallelisierung.

Es wurden zwei Arten von MWS in Betracht gezogen: i) Konventionelle MWS mit einem konstanten freien Spektralbereich (FSR, eng: free spectral range) zwischen den Linien, die als MWS mit festem FSR bezeichnet werden. ii) MWS mit flexiblem FSR auf einem <math><12,5\text{-GHz}</math>-Raster. Diese innovative Technologie, die als MWS mit flexiblem FSR bezeichnet wird, wurde zu Beginn des Projekts entwickelt [PilotPhFlyer].

Eines der Hauptziele unserer Netzstudien bestand darin, die Vorteile einer flexibleren Frequenzzuweisung im Vergleich zu Sendern mit festem FSR besser zu verstehen. Abbildung 2 zeigt einen qualitativen Vergleich der optischen Leistung eines Kammlasers unter Verwendung beider Ansätze.

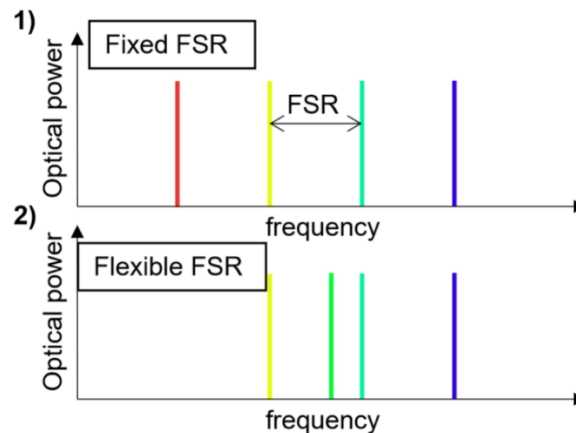


Abbildung 2: Darstellung des Spektrums einer 4-Linien fixed-FSR 1) MWS und einer 4-Linien Flexible-FSR 2) MWS.

Technisch-wirtschaftliche und Leistungsbewertungen von MWS in optischen Hochleistungsnetzen wurden anhand von Netzplanungsstudien auf der physischen Ebene durchgeführt. Bei den ersten Untersuchungen wurden zwei Netztopologien berücksichtigt: ein nationales Backbone-Netz (Nobel-Germany) und ein kontinentales Backbone-Netz (Nobel-EU). Diese weisen unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf die Anzahl der Knoten und die Verteilung der Länge der optischen Pfade auf. Es wurden flexible WDM-Netze im C-Band mit 400 Frequenzschlitzen von jeweils 12,5 GHz in Betracht gezogen. Unter den beiden MWS-Architekturen zeigten die flexiblen FSR-MWS eindeutig die beste Leistung.

Ausgewählte Ergebnisse der Netzstudie für die deutsche Netztopologie sind der Übersichtlichkeit halber in Abbildung 3 dargestellt. Hier ist zu beobachten, dass die OSNR-Reduktion von MWS nur zu einem geringen Anstieg der erforderlichen Anzahl von Lichtpfaden (LP, eng: light paths) führt und dass selbst im schlimmsten Fall der OSNR-Reduktion keine Unterversorgung des Datenverkehrs bis zum großen angeforderten Datenverkehr (ART, eng: aggregated requested traffic; >120 Tbit/s) auftritt. Jeder LP erfordert ein Transceiver-Paar, jedoch wird die geringfügig erhöhte Anzahl von LP durch die starke Reduzierung der erforderlichen Lasermodule gut ausgeglichen. Diese Reduzierung bietet einen angemessenen Spielraum für die Kosten eines integrierten Kammlasers.

Diese erste Studie zeigte, dass flexible 4-Linien-MWS wirtschaftlich vorteilhaft sind, wenn sie bis zu 260 % der Kosten eines Standard-Lasermoduls ausmachen. Dies setzt einen Anteil von 33 % der Kosten eines optischen Transceivers für den Laser voraus. Mehr Details finden Sie in [1].

Es wurden weitere Netzstudien durchgeführt, um die Auswirkungen von MWS in aktuellen optischen Netzen richtig einschätzen zu können. Insbesondere haben wir den aktuellen Trend der zunehmenden Anpassungsfähigkeit der Modulationsrate berücksichtigt und das Potenzial der Kombination von MWS-basierten Transceivern mit erhöhter Anpassungsfähigkeit der Modulationsrate aufgezeigt, die durch

probabilistische Konstellationsformung (PS, eng: probabilistic shaping) erreicht wird [3]. Dadurch werden die Auswirkungen des durch die MWS verringerten OSNR tatsächlich minimiert.

Eine Studie zur Netzplanung zeigte, dass bei flexiblen FSR-MWS ein um bis zu 5 dB reduzierter Sende-OSNR (OSNR<sub>TX</sub>, eng: transmitter OSNR) nur zu einem moderaten Anstieg der zusätzlich erforderlichen Lichtpfade (LPs, eng: light paths) um bis zu 7 % führt. Gleichzeitig bieten die flexiblen FSR-MWS-Transceiver das Potenzial für Einsparungen von bis zu 71 % bei der Anzahl der Wellenlängenquellen. Ausgewählte Ergebnisse, die dieses Verhalten zeigen, sind in Abbildung 4 dargestellt. Mehr Details finden Sie in [2].

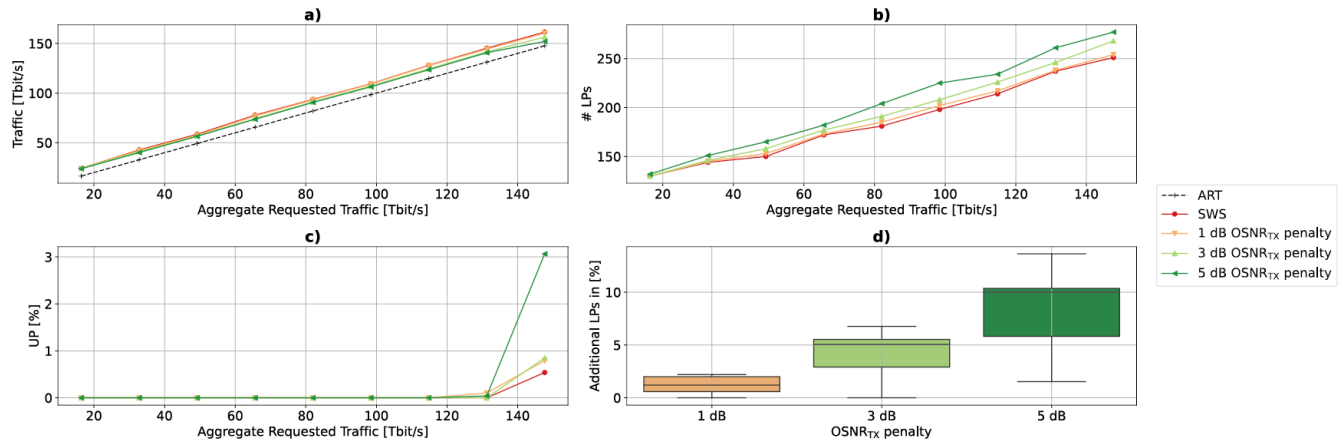


Abbildung 3: Ergebnisse der Netzstudie mit Flexible-FSR-MWSS. Bereitgestellter Verkehr (a), Anzahl der LPs (b), Unterversorgung (UP, eng: underprovisioning) (c) und Verteilung zusätzlicher Wellenlängenquellen (d) in der deutschen Topologie.

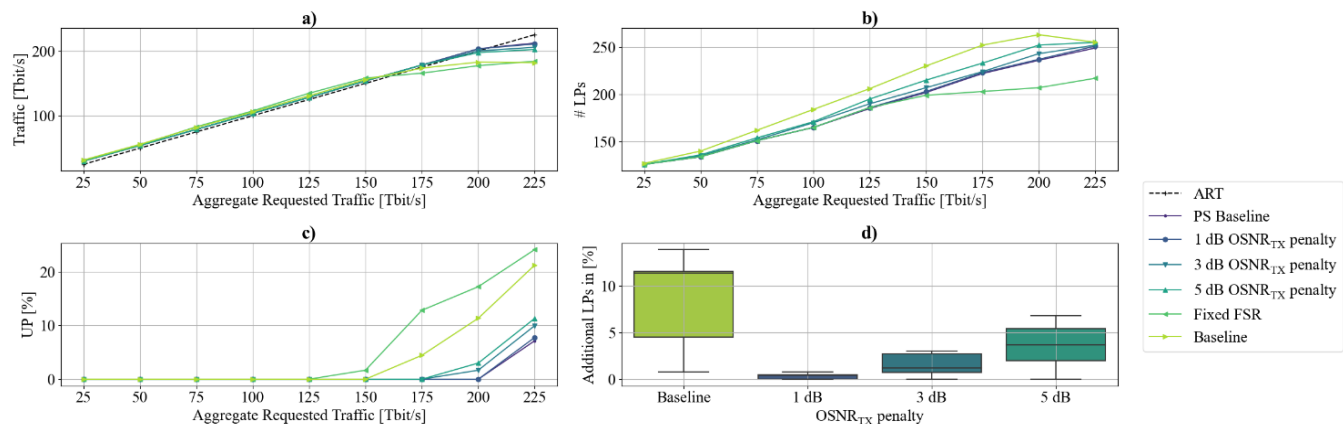


Abbildung 4: Bereitgestellter Datenverkehr a), Anzahl an LPs b), Underprovisioning c) und zusätzlich bereitgestellte LPs verglichen mit dem PS Baseline Szenario d) auf der Nobel-Germany Topologie.

Wir haben weitere Netzstudien durchgeführt, um die Auswirkungen von MWS-basierten Transceivern unter Berücksichtigung verschiedener Strategien zur Erweiterung der Netzkapazität über mehrere Zeiträume zu verstehen [4]. Wir haben ein proaktives mehrperiodisches Planungskonzept in Betracht gezogen, welches es Netzbetreibern ermöglicht, eine „Pay-as-you-grow“-Strategie zu verfolgen. Dieser Ansatz ermöglicht die Nutzung optischer Kommunikationstechnologie der nächsten Generation, wie z. B. flexible FSR-MWS-Transceiver mit erhöhter Modulationsratenanpassung. Das proaktive (eng: proactive) Planungskonzept wurde mit inkrementellen (eng: incremental) Konzepten verglichen, die dem Stand der Technik entsprechen. Der Arbeitsablauf der verschiedenen proaktiven mehrperiodischen Planungskonzepte ist in Abbildung 5 dargestellt.

Wir haben festgestellt, dass mit dem proaktiven Konzept bis zu 60 % weniger LPs benötigt werden. Zusammen mit dem Einsatz von MWS ermöglicht dies eine erhebliche Einsparung von 12 % bei der Anzahl der benötigten Laser, wenn flexible FSR-MWS-Transceiver berücksichtigt werden. Ausgewählte Ergebnisse, die diese Erkenntnisse belegen, sind in Abbildung 6 dargestellt. Mehr Details finden Sie in [4].

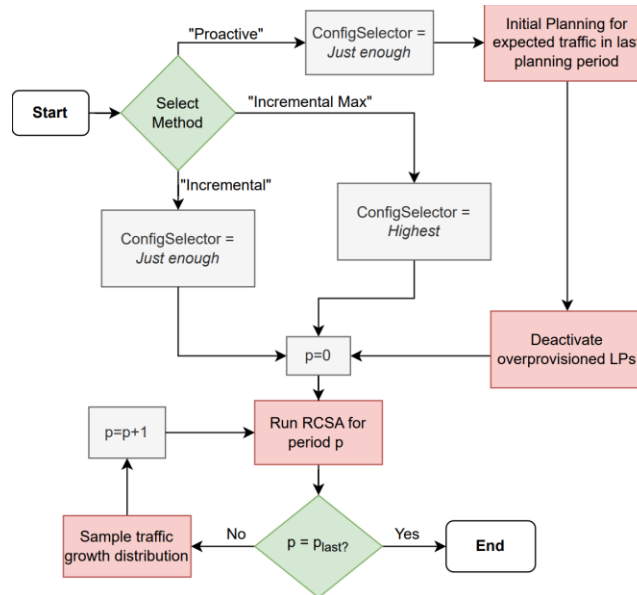


Abbildung 5: Ablauf der Mehrperioden-Planungskonzepte „Proactive“, „Incremental“ und „Incremental Max“.

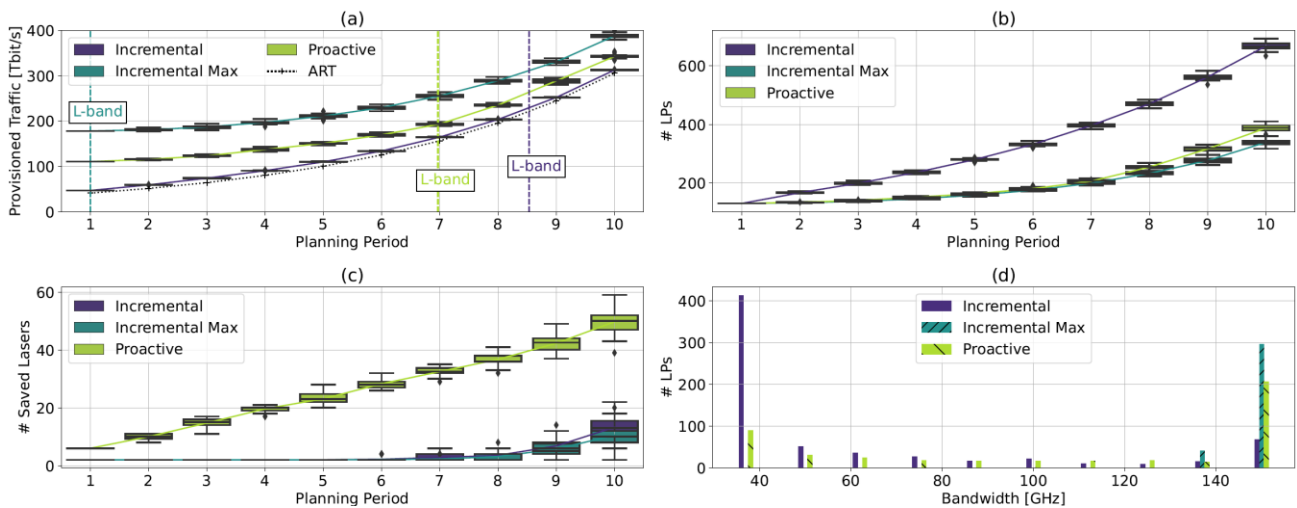


Abbildung 6: Planungsergebnisse auf Nobel-Deutschland. (a) Bereitgestellter Datenverkehr, (b) bereitgestellte LPs, (c) eingesparte Laser durch Verwendung von MWSs (nur Senderseite), (d) Bandbreitenverteilung der eingesetzten Konfigurationen im letzten Planungszeitraum

Eines der Hauptziele des Projekts war die Funktionsmusterentwicklung und Analyse von Kammlasern für SDM-Transceiver-Architekturen. Unsere ersten Studien konzentrierten sich auf die Erzeugung von Kämmen durch elektrooptische Modulation. Der Eingang eines Modulators ist ein herkömmlicher Laser. Ein sinusförmiges HF-Signal einer bestimmten Frequenz wird an den elektrischen Eingang des

Intensitätsmodulators (MZM, eng: Mach-Zehnder-Modulator) angelegt. Diese Art von Kämmen erreicht einen Frequenzabstand, der der Frequenz des HF-Ansteuersignals entspricht.

Bei HF-Signalen mit einer Frequenz von über 50 GHz wird es immer schwieriger, einen effizienten Signalgenerator mit Strommodulator und Bandbreiten für elektrische Signalgeneratoren zu realisieren. Daher wurde eine Variante des modulatorbasierten Kammlasers untersucht. Hier ist der freie Spektralbereich (FSR, eng: free spectral range) doppelt so groß wie die Frequenz des HF-Signals. Dies wird durch eine geeignete Wahl der HF-Amplitude und der Vorspannung des Modulators erreicht. Dieses Konzept und der schematische Aufbau des Laboraufbaus sind in Abbildung 7 dargestellt.

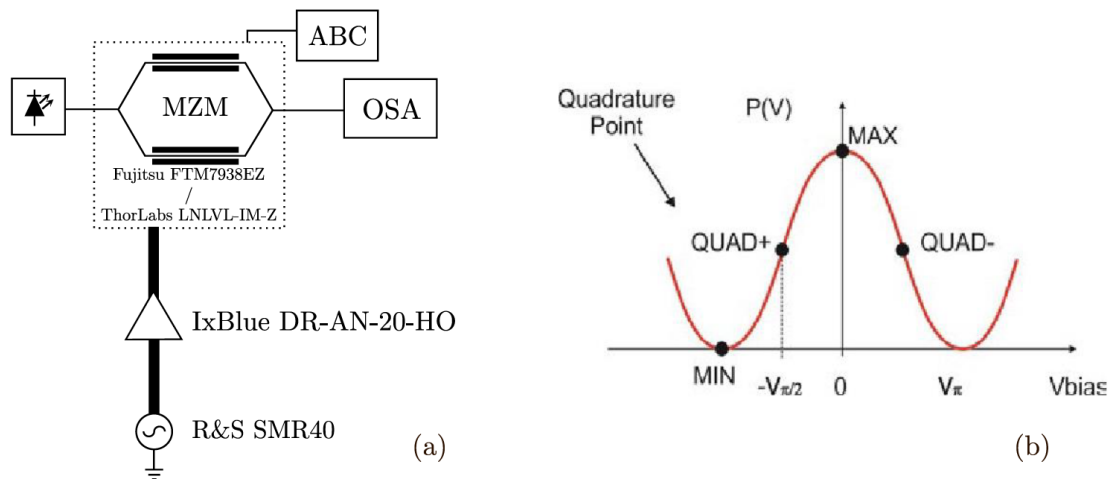


Abbildung 7 (a)

Abbildung 7: (a) Schematische Darstellung des Kammlasers mit den verwendeten Komponenten. ABC: automatische Bias-Kontrolle (eng: automatic bias control), OSA: optischer Spektrumanalysator. (b) Übertragungsfunktion eines Intensitäts-MZM, Bild aus [LaserCompOnline].

Ein Kammlaser, der auf einem optischen Intensitätsmodulator basiert, wurde erfolgreich im Labor gebaut, und die Simulationen wurden optimiert, um die gemessenen Parameter der erworbenen Modulatoren und des elektrischen HF-Treibers anzupassen. Dadurch wurde die Bandbreite auf 25 GHz begrenzt, um eine ausreichende Treiberleistung zu erzielen. Wenn der optische Modulator anstelle des QUAD-Arbeitspunkts an den MIN- oder MAX-Arbeitspunkt gebracht wird, wie in Abbildung 7(b) dargestellt, kann der FSR verdoppelt werden.

Wir haben die beiden in Abbildung 7(a) dargestellten Modulatoren getestet. Beide Komponenten basierten auf LiNbO<sub>3</sub>, aber die Fujitsu-Komponente besteht aus X-Schnitt LiNbO<sub>3</sub>, während die ThorLabs-Komponente aus Z-Schnitt LiNbO<sub>3</sub> besteht, was zu einem asymmetrischen Design führt. Die Z-Schnitt-Struktur ermöglicht eine effizientere Modulation, d. h. eine höhere Anzahl optischer Linien bei gleicher HF-Leistung.

Die von der OSA gemessenen optischen Spektren für das X-Schnitt-Gerät und die entsprechenden Simulationsergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt. Wir sehen, dass aufgrund der begrenzten elektrischen HF-Leistung und Modulatorbandbreite nur zwei oder drei Linien bei 50 GHz mit einer Ebenheit von < 10 dB erzeugt werden können, wenn MIN- oder MAX-Vorspannungspunkte verwendet werden. Durch mehrere Modulationsstufen könnten mehr Linien erzielt werden, dies würde jedoch die Komplexität und den Stromverbrauch enorm erhöhen.

Außerdem bedeutet die Kristallsymmetrie des Z-Schnitt-Modulators, dass nur HF-Signale mit zwei Treibern verwendet werden können, um gerade oder ungerade Harmonische zu unterdrücken. Dies erhöht die Kosten und den Stromverbrauch bei nur mäßigen Zuwächsen in Bezug auf die Anzahl der Linien pro Modulator. Die mit diesem Modulator erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

Obwohl die Demonstration erfolgreich war, wurden die Grenzen dieses Ansatzes deutlich. Im Anschluss an die Fortschritte auf diesem Gebiet während des Projekts arbeiteten wir mit dem irischen Unternehmen Pilot Photonics Ltd. zusammen, um dessen Funktionsmuster eines integrierten Kammlaser-Arrays (iCLA, eng: integrated comb laser array) zu testen [PilotPhFlyer]. Das Gerät ist die Umsetzung eines flexiblen FSR-Kammlasers, der in unseren Netzstudien vielversprechende Ergebnisse zeigte. Es wurden erste Studien über die potenziellen und vorteilhaften Anwendungsszenarien dieser Kammlasertechnologie in kohärenten Transceivern durchgeführt [5]. Abbildung 10 zeigt die Zeichnung des Funktionsmusters, der aus einem integrierten photonischen Chip besteht, der einen Frequenzkamm (eng: comb) erzeugt und jeweils vier der erzeugten Träger demultiplexiert (DEMUX, eng: demultiplex).

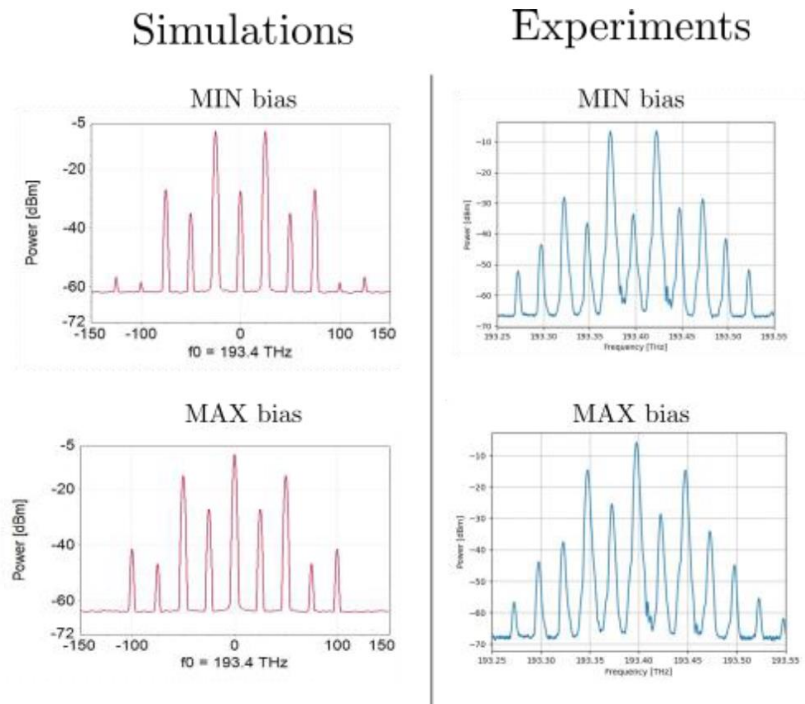


Abbildung 8: Simulationsergebnisse und gemessene Ausgangsspektren des Kammlasers basierend auf einem LiNbO3-MZM mit X-Schnitt für MAX und MIN Bias-Punkte.

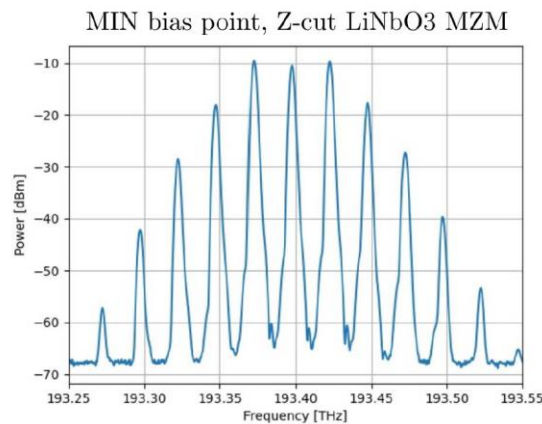


Abbildung 9: Gemessenes Ausgangsspektrum des Kammlasers basierend auf einem LiNbO3-MZM mit Z-Schnitt.

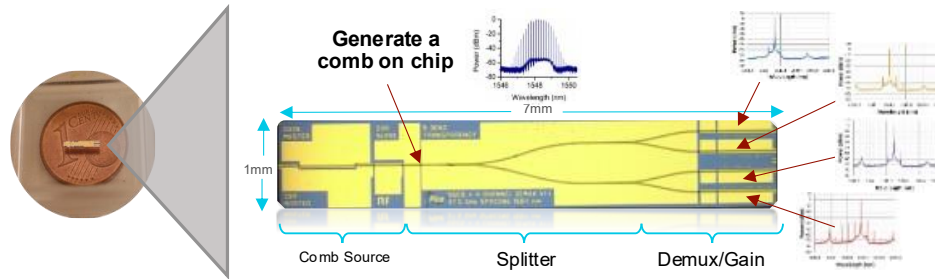


Abbildung 10: Integriertes photonisches Chipdesign zur Erzeugung eines Kammlasers und Demultiplexen von vier Trägern

Bewertungen des Funktionsmusters von Pilot Photonics wurden im Labor von Adtran mit handelsüblicher optischer Übertragungstechnik durchgeführt. Dazu gehörten Echtzeit-DSP-Chips und kohärente optische Baugruppen, die Datenraten von 100 Gbit/s bis 400 Gbit/s übertragen. Ziel war es, die Leistung des gewinn-geschalteten Kamms und des optischen Injektionsverriegelungs-DEMUX (OIL, eng: optical injection locking) zu bewerten.

Ein umfassender Vergleich mit der Leistung eines Standard-CW-Lasers (CW, Continuous Wave) wurde ebenfalls anhand des Schaltplans in Abbildung 12 durchgeführt, der eine Übertragungsanordnung mit Rauschbelastung zur Bewertung der Bitfehlerrate (BER)-OSNR-Kurve enthält. Der iCLA erzielte vielversprechende Ergebnisse. Er zeigte über einen weiten Bereich von BER-Werten für die QPSK-Übertragung bei 60 GBaud nahezu die gleiche Leistung wie der CW-Laser. Dies passt zu dem interessanten Anwendungsszenario eines miniaturisierten Moduls mit mehreren 200G-QPSK-Kanälen für die Aggregation von Edge-Datenverkehr [5].

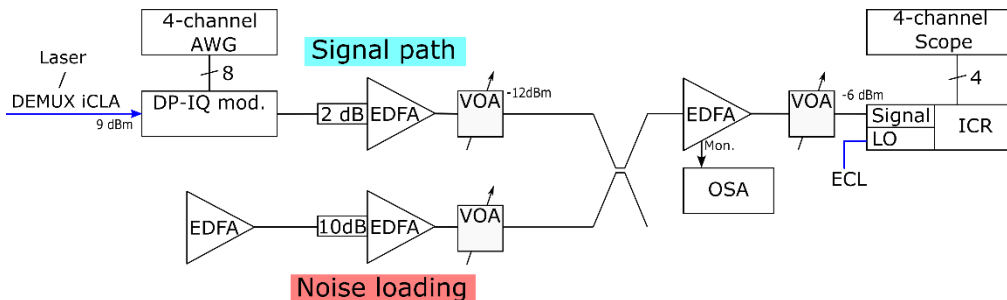


Abbildung 12: Laboraufbau zur Bewertung der Leistung der iCLA-Einheit im Vergleich zu einem Standard-CW-Laser.

Die umfangreichen Aktivitäten zur Entwicklung und Erprobung von Kammlasern wurden durch Studien zu weiteren Komponenten zukünftiger SDM/WDM-Netze ergänzt, insbesondere im Hinblick auf Mehrkernfasern (MCF, eng: multi-core fibers) und kooperative digitale Signalverarbeitung.

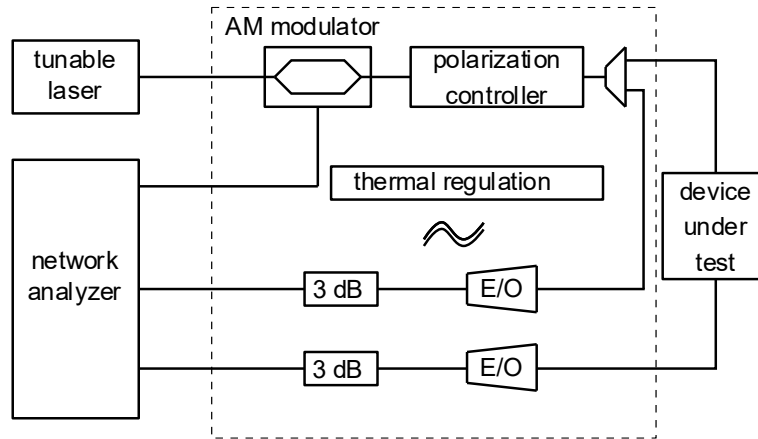


Abbildung 13: Laboraufbau für die Charakterisierung der Multikern-Faser

Was die Übertragungsfasern betrifft, so konnten wir im Rahmen des Projekts einen MCF-Prototyp erhalten, um damit die Eigenschaften moderner ungekoppelter Mehrkernfasern zu charakterisieren.

Die Faserspulen wurden mithilfe einer Methode charakterisiert, die auf der Phasenverschiebung der Modulation basiert, wie in Abbildung 13 dargestellt. Gemessen wurden die Dämpfung pro Kern, die Dispersion, die Gruppenlaufzeit und die differentielle Gruppenlaufzeit aufgrund der Polarisationsmodendispersion sowie die differentielle optische Weglänge zwischen den Kernen. Eines der wichtigsten Ergebnisse war die Beobachtung einer unterschiedlichen Frequenzantwort zwischen den Kernen, was sich auf die Systemleistung auswirkt und in der einschlägigen Literatur nicht oft erwähnt wird. Auch die Pfadlänge zwischen den Kernen wies messbare Unterschiede auf, was auf eine Verzögerung zwischen den Kernen hindeutet. Dies wurde jedoch bereits von anderen Forschungsgruppen für verschiedene Fasertypen durchgängig beobachtet [Puttnam18].

Die Untersuchungen zur kooperativen digitalen Signalverarbeitung konzentrierten sich auf die Phasentrückgewinnung (CPR, eng: carrier phase recovery), die aufgrund der inhärenten Korrelation zwischen den Kanälen sowohl für kamm-basierte Transceiver als auch für SDM-Systeme von besonderer Bedeutung ist. In den bisherigen Arbeiten fehlten Studien über die Auswirkungen der durch die Übertragung über große Entfernungen verursachten Dekorrelation. Diese wurden jedoch von uns als entscheidend für die Übertragung über große Entfernungen identifiziert. Mehrere Methoden, die auf der Phasenschätzung über eine Teilmenge von „Hauptkanälen“ und der Anwendung über „Sekundärkanäle“ basieren, wurden mit numerischen Simulationen untersucht.

Durch die Optimierung des Algorithmus zur Auswahl der Hauptkanäle und der Phasenschätzung konnten wir feststellen, dass die kooperative Phasenschätzung herkömmliche kanalweise Lösungen auch bei großen Entfernungen und relevanten BER-Werten für 16QAM- und 64QAM-Signale übertreffen kann [7]. Der für diese Studie verwendete Simulationsaufbau ist in Abbildung 14 dargestellt. Die numerischen Ergebnisse, die

die Verbesserung der Netto-Informationsrate in Abhängigkeit von der Übertragungsentfernung zeigen, sind in Abbildung 15 dargestellt.

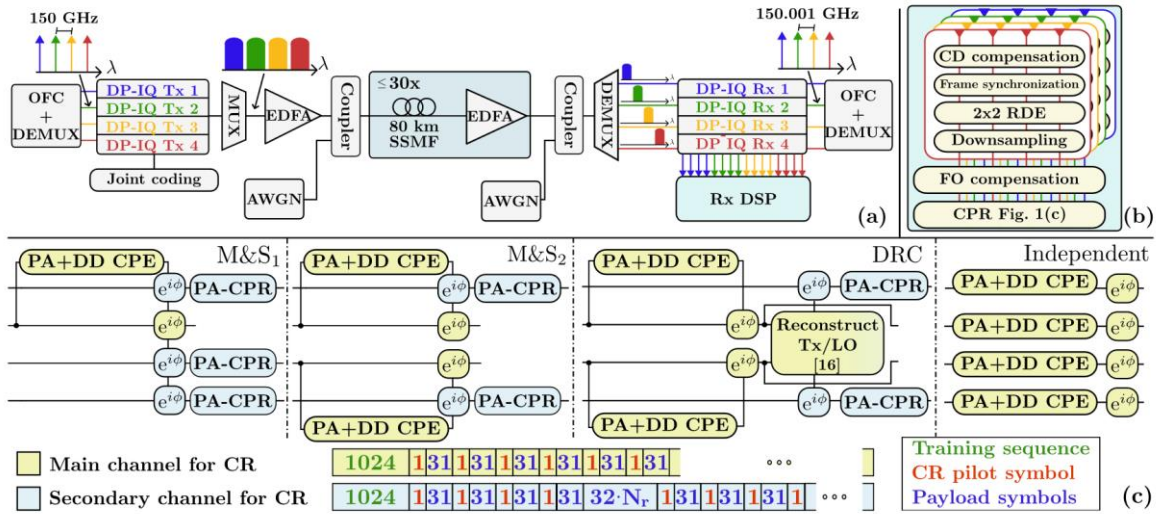


Abbildung 14: (a) Schematische Darstellung des simulierten Übertragungsaufbaus, (b) der berücksichtigten digitalen Signalverarbeitung, (c) der verschiedenen berücksichtigten Algorithmen zur Phaserrückgewinnung. Detaillierte Definitionen und numerische Werte finden Sie in [7].

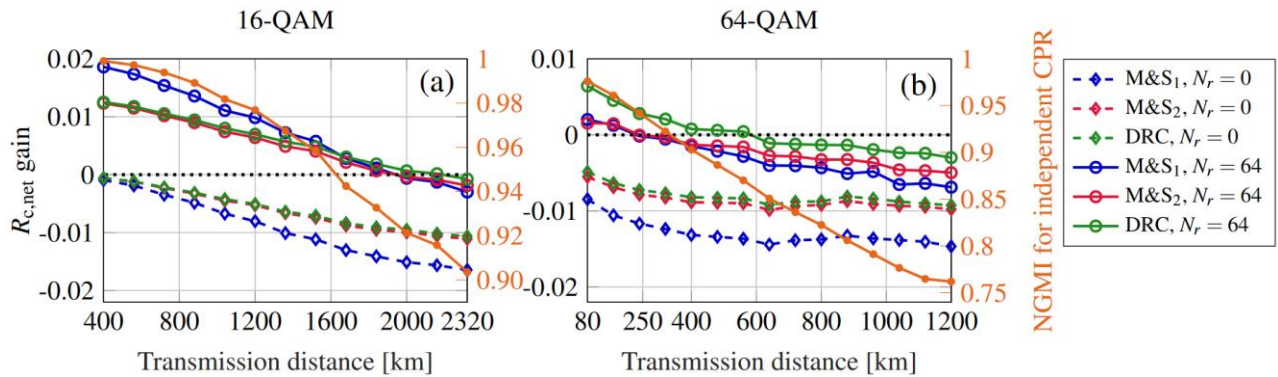


Abbildung 15: Numerische Ergebnisse über die Leistung der verschiedenen in Betracht gezogenen Algorithmen zur Phaserrückgewinnung für (a) 16-QAM und (b) 64-QAM-Modulation. Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse und die Definition der Metrik für die Nettodatenrate finden Sie in [7].

Zum Abschluss der Aktivitäten zur Entwicklung und Demonstration von Signalverarbeitungskonzepten wurde während des Projekts eine Echtzeit-Signalverarbeitung implementiert. Die Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandlung erfolgte durch den Betrieb des analogen elektronischen Systems auf dem XILINX Radiofrequency-System-on-Chip (RFSoc). Die Signalaufbereitung, Entzerrung und Zeitrückgewinnung auf digitalen Kanälen wurden mittels einer Echtzeit-DSP-Implementierung durchgeführt. Abbildung 16 zeigt das Blockdiagramm der Implementierung. Hier werden auch die nach der Analog-Digital-Wandlung und Echtzeitverarbeitung gespeicherten Daten dargestellt, die die korrekte Demodulation der Binärpegel in jeder Modulationsdimension

zeigen.

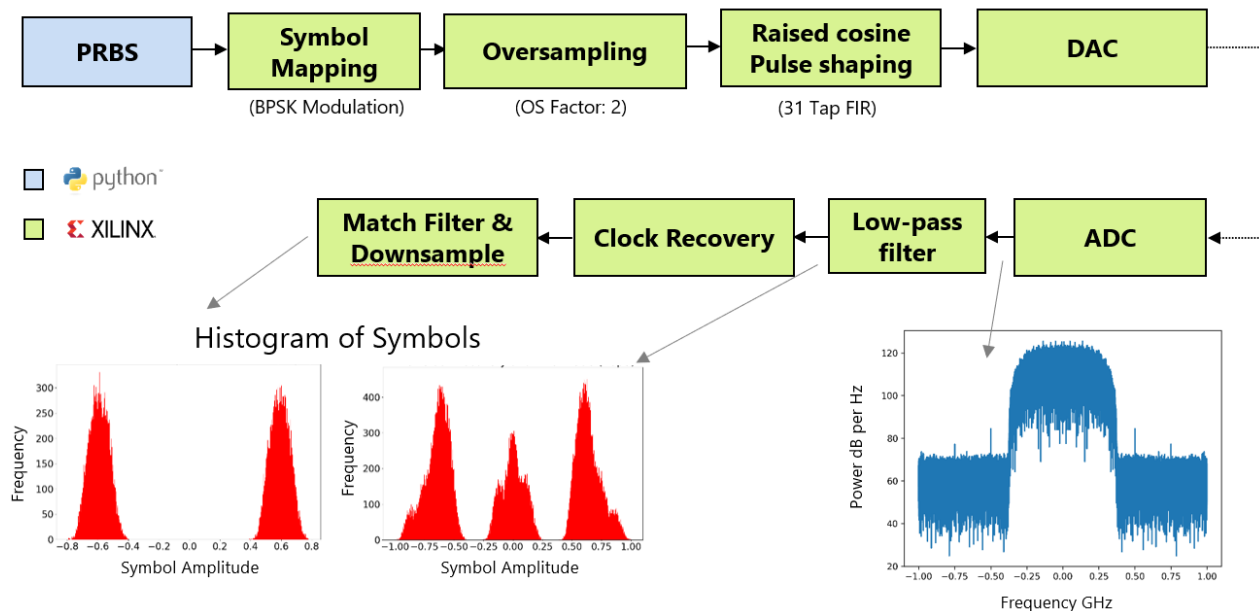


Abbildung 16: Blockdiagramm der Echtzeit-Implementierung

## 2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeiten zielten darauf ab, die kosten- und energieeffiziente Skalierung zukünftiger optischer Netze unter Verwendung von SDM und hochparallelen Transceivern auf Basis von Kammlasern zu untersuchen. Diese Technologie hat das Potenzial, die Skalierung zukünftiger optischer Netze revolutionär voranzutreiben.

SDM-Systeme werden derzeit erstmals für Unterseeverbindungen eingesetzt, und Kammlaser für die optische Kommunikation befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Daher zielten die Projektaktivitäten einerseits darauf ab, Systemspezifikationen abzuleiten, um diese Entwicklungen zu fördern, und andererseits die aktuellste verfügbare Technologie zu bewerten.

Der Arbeitsaufwand im Rahmen des Projekts war angemessen, da das Thema von der Komponentenentwicklung bis zur Definition der System- und Netzarchitektur reichte und es notwendig war, modernste Technologie zu entwickeln und zu beschaffen, um relevante Ergebnisse zu erzielen.

## 2.3 Nutzen und Verwertung

Die im Rahmen des Projekts erworbenen Kenntnisse und Ergebnisse waren von grundlegender Bedeutung für die Bewertung des Potenzials der untersuchten Technologien und damit für den möglichen Skalierungspfad zukünftiger optischer Netze. Die SDM-Technologie gilt seit über einem Jahrzehnt als Hauptkandidat für die Unterstützung der zukünftigen Skalierung der Netzkapazität. Zu Projektbeginn fehlte es jedoch in Deutschland an Fachleuten für dieses spezielle Thema. In diesem Zusammenhang boten STARFALL und die gesamte Förderinitiative SDM Germany Adtran und der deutschen Forschungs- und Industriegemeinschaft die Mittel, um diese Technologie voranzutreiben und Funktionsmuster und Demonstratoren zu entwickeln. Dies führte nicht nur zu einem besseren Verständnis der Technologie, sondern auch zum Aufbau besserer Beziehungen zu anderen Unternehmen weltweit, beispielsweise aus Japan und den USA, die diese Technologie in den letzten Jahren entwickelt haben.

Ein ähnliches Ergebnis wurde bei den Aktivitäten im Zusammenhang mit Frequenzkämmen erzielt, die spezifisch für STARFALL waren. Dank der Arbeit im Rahmen des Projekts wurden fortgeschrittene

Funktionsmuster getestet, Kooperationen mit anderen Unternehmen initiiert und künftig neue Produktkonzepte ins Auge gefasst

## 2.4 Externer Fortschritt

Während der Projektlaufzeit wurden deutliche Fortschritte bei der Produktisierung von SDM-Systemen und Kammlasern für die Telekommunikation bekannt gegeben.

In Bezug auf die SDM-Technologie kündigte Google die Bereitstellung eines Unterseekabels mit 2-kerniger Mehrkernfasertechnologie an, was eine der meistbeachteten Ankündigungen des Jahres 2023 in der Community war. Das Kabel verwendet nur eine SDM-Faser, aber an den Verstärkerstandorten Fan-in-Fan-out für den Anschluss an Verstärker und andere Netzwerkelemente. Ein Mehrkern-Faserverstärker gilt als nächster Schritt und fortschrittlichere Prototypen von Unternehmen wie Sumitomo Electric wurden auf Konferenzen vorgestellt. Es wurde keine Anwendung für terrestrische Systeme angekündigt, die im Mittelpunkt von STARFALL standen. Die Untersee-Anwendung wurde durch die Anforderungen an eine höhere Kabeldichte vorangetrieben, die bei terrestrischen Systemen nicht in gleichem Maße zum Tragen kommen. Es wird jedoch erwartet, dass die durch die Untersee-Anwendung initiierten Entwicklungen den Markt vergrößern und die Technologie für die geplante zukünftige Implementierung in terrestrischen Netzwerken mit besserer Leistung und Kosteneffizienz bereit machen werden. Diese Aspekte wurden in mehreren Workshops mit großer industrieller Beteiligung bei ECOC und OFC diskutiert. Dies zeigt, dass das Thema relevant und weiterhin aktuell ist.

Auch bei den Laserkämmen für die Telekommunikation gab es während der Projektlaufzeit bedeutende Entwicklungen. Während diese Geräte zu Beginn des Projekts nur als Forschungsmustern auf der Basis diskreter Komponenten eingesetzt wurden, entwickelten mehrere Start-ups und innovative vollständig integrierte Funktionsmuster und führten diese auf Konferenzen vor, was einen klaren Übergang von der reinen Forschung zur Entwicklung von Kammlasern zeigt. Aufgrund der noch geringen technologischen Reife dieser Geräte wurde jedoch kein vollständiger Transceiver mit integriertem Laserkamm angekündigt.

- [1] Müller, Jasper, et al. "Comparison of single-wavelength and multi-wavelength transponders in a physical-layer-aware network planning study." *European Conference and Exhibition on Optical Communication*. Optica Publishing Group, 2022.
- [2] Müller, Jasper, et al. "Multi-wavelength transponders for high-capacity optical networks: a physical-layer-aware network planning study." *Journal of Optical Communications and Networking* 15.7 (2023): C138-C146.
- [3] Müller, Jasper, et al. "Cost-Efficient Capacity Scaling using Multi-Wavelength Transponders and Adaptive Modulation." *2023 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*. IEEE, 2023.
- [4] Müller, Jasper, et al. "Capitalizing on next-generation optical communication systems with proactive multi-period network planning." *49th European Conference on Optical Communications (ECOC 2023)*. Vol. 2023. IET, 2023.
- [5] G. Di Rosa, F. Smyth, M. D. Gutierrez, J. Müller, B. Wohlfeil, and J. Elbers, "Advancements and Applications of Comb-Based Transceivers in Coherent Optical Networks," in *Advanced Photonics Congress 2023*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2023), paper SpW3E.2.
- [6] G. Di Rosa, M. Eiselt, L. Rapp, "What Will Eventually Trigger Large-Scale Commercialization of SDM Fibers?" Workshop participation, European Conference on Optical Communications (ECOC) 2023
- [7] G. Di Rosa, O. Jovanovic, M. A. Leghari, J. Müller, B. Wohlfeil, and J. Elbers, "Optimization of Pilot-Aided Joint Phase Recovery for Frequency Comb-Based Wideband Transmission," in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2024*, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2024), paper M1E.4.

## 3. Referenzen

- [Antonelli18] C. Antonelli et al., "The City of L'Aquila as a Living Lab: the INCIPICT Project ...," 5G World Forum, 2018.
- [Ataie15] V. Ataie et al., "Ultrahigh Count Coherent WDM Channels Transmission Using Optical Parametric Comb-Based Frequency Synthesizer," JLT, 2015.
- [Corcoran20] B. Corcoran et al., "Ultra-dense optical data transmission over standard fibre with a single chip source," *Nature Communications*, 2020.
- [Feuer12] M. Feuer et al., "Joint Digital Signal Processing Receivers for Spatial Superchannels," PTL, 2012.
- [Marin17] P. Marin-Palomo et al., "Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications," *Nature* 2017.
- [Marom15] D. Marom and M. Blau, "Switching solutions for WDM-SDM optical networks", *IEEE Comms Magazine*, 2015.
- [Morioka09] T. Morioka, "New generation optical infrastructure technologies: EXAT initiative towards 2020," *OECC*, 2009.
- [Puttnam15] B. Puttnam et al., "2.15 Pb/s Transmission Using a 22 Core Homogeneous Single-Mode Multi-Core Fiber and Wideband Optical Comb", *ECOC* 2015.
- [Randel11] S. Randel et al., "6x 56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6x 6 MIMO equalization," *Optics Express*, 2011.

[Shariati17] B. Shariati et al., "Impact of Spatial and Spectral Granularity on the Performance of SDM Networks Based on Spatial Superchannel Switching," JLT, 2017.

[Shariati18] B. Shariati et al., "Physical-Layer-Aware Performance Evaluation of SDM Networks Based on SMF Bundles, MCFs, and FMFs," JOCN, 2018.

[Soma17] D. Soma et al., "10.16 Peta-bit/s Dense SDM/WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core...", ECOC'17.

[Wanke15], M. Wanke, "Monolithically Integrated Absolute Frequency Comb Laser System," US Patent US9391420B2.

[LaserCompOnline] , [https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user\\_upload/home/Datasheets/lc/application-reports/ixblue/introduction-to-modulator-bias-controllers.pdf](https://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/application-reports/ixblue/introduction-to-modulator-bias-controllers.pdf)

[PilotPhFlyer] <https://www.pilotphotonics.com/wp-content/uploads/2022/10/Pilot-iCLA-Flyer-Sept-2022.pdf>

[Puttnam18] Puttnam BJ, Rademacher G, Luis RS, Sakaguchi J, Awaji Y, Wada N. Inter-core skew measurements in temperature controlled multi-core fiber. In: Opt. Fiber Commun. Conf.(OFC), Optica Publishing Group. 2018:Tu3B-3.