Kurzbericht

Verbundvorhaben
“Spatial Multiplexing in Optical Access Networks – SAMOA-NET"

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung

<table>
<tr><td colspan="2">Zuwendungsempfänger:
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.</td><td>Förderkennzeichen:

16KIS1423K</td></tr>
<tr><td colspan="3">Titel des Teilvorhabens:

MIMO-Signalverarbeitung für das SDM-PON</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Projektleiter des Teilvorhabens:

Dr.-Ing. Kai Habel</td><td>Tel.: +49 30 31002 465</td></tr>
<tr><td>Email: kai.habel@hhi.fraunhofer.de</td></tr>
<tr><td colspan="3">Autoren: Dr.-Ing. Kai Habel, Sarah Cwalina, Ziyan Ma</td></tr>
<tr><td colspan="3">Laufzeit des Vorhabens:

Von: 01.08.2021 bis: 31.11.2024</td></tr>
<tr><td colspan="2">Berichtszeitraum:

von: 01.08.2021 bis: 31.11.2024</td><td>Datum:

31.05.2025</td></tr>
</table>

1 Aufgabenstellung

Nicht zuletzt COVID-19 hatte durch einen massiven Umstieg auf Internet-basierte Telearbeit Engpässe in der digitalen Infrastruktur sichtbar gemacht. Das Internet basiert auf Glasfasernetzen, deren Kapazität unter Last an ihre Grenzen gerät. Das Projekt SAMOA-NET hat das Potential von Raummultiplex in optischen Zugangsnetzen erforscht, um die bekannten Engpässe zu beseitigen. Diese Engpässe entstehen vermehrt im optischen Zugangsnetz, weil die Glasfaseranbindung unter vielen Nutzern im passiven optischen Netz (PON) aufgeteilt wird. Jeder Zugangsbereich hat einen aktiven Knoten (optical line terminal, OLT). Das Signal wird vom OLT über eine Glasfaser, für alle Nutzer noch gemeinsam, zu einem entfernten Knoten transportiert, an dem die Leistung passiv aufgeteilt wird (1:N Splitter). Zum Beispiel setzt das symmetrische 10-Gbit/s (XGS)-PON ein statisches Teilverhältnis im Bereich von 32 bis 64 ein. Hinzu kommt eine Leistungsdynamik bis zu 20 dB durch verschiedene Splitter-Instanzen, Faserlängen und Komponenten. Der Medienzugriff im Zeitmultiplex (TDM-PON) teilt zusätzlich die Bandbreite dynamisch unter den aktiven Nutzern auf. Die verfügbare Nutzerrate nimmt ab, wenn die aktive Nutzerzahl steigt. Die Aufteilung reduziert das Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) und die Bandbreite, wodurch sich die durchschnittliche Nutzerrate reduziert zu

$$C_{TDM-PON} = \frac{B}{N_{aktiv}} \log_2\left(1 + \frac{G^2 \cdot SNR}{L_{TDM}^2 \cdot \Delta}\right)$$

wobei B die Bandbreite, N_{aktiv} die Zahl der aktiven Nutzer, G die optische Verstärkung, SNR das Signal-zu-Rauschverhältnis zwischen OLT und Nutzerfrontend (inkl. Faser), L das statische Teilverhältnis im Koppler und Δ der Implementierungsverlust des Übertragungsverfahrens sind. Höhere Nutzerraten sind durch mehr Bandbreite und weitere Dimensionen (Wellenlänge, Raum) möglich. Wellenlängenmultiplex (TWDM-PON, WDM-PON) wurde umfassend untersucht und standardisiert (z.B. NG-PON2). Allerdings benötigt jeder Nutzer einen teuren, wellenlängenabstimmbaren Laser. Deshalb haben sich TWDM/WDM-PON bisher nicht durchgesetzt. Wünschenswert wäre eine kostengünstige Lösung, die wie im XGS-PON, "farblose" Module einsetzt. Die Verwendung von größerer Bandbreite ist aber auch mit höherem Rauschen und damit mit dem Bedürfnis nach größerer Empfangsleistung verbunden, um das SNR konstant zu halten. Vor allem die hohen Verluste der Leistungskoppler werden zukünftige Zugangssysteme vor große Herausforderungen bzgl. der Sende- und Empfangsleistung stellen.

2 Wissenschaftlicher Stand zu Projektbeginn

Das Projekt untersucht verschiedene Aspekte der optischen Netzinfrastruktur, wobei der Fokus auf PONs, VCSEL Arrays, PD Arrays, Multikernfasern, Kopplung, MIMO, Systemsimulation und Systemexperimente liegt:

- PONs: Die Entwicklung von PON-Technologien von G-PON zu XGS-PON und zukünftigen Standards wie 25 Gbit/s und 50 Gbit/s wird untersucht. Hauptanwendungen sind Mobilfunk, Industrie 4.0 und IoT. Nokia demonstrierte 5G Midhaul über 25 Gbit/s PON.
- VCSEL Arrays: VCSELs sind für optische Kurz- und Mittelstrecken etabliert. Ziel ist die Bandbreitenerhöhung und Vereinfachung der Herstellung langwelliger VCSELs.
- PD Arrays: Herausforderungen bei der Minimierung inaktiver Flächen zur Reduzierung von Übersprechen werden adressiert. Erste vertikal beleuchtete PD Arrays wurden vorgestellt.
- Multikernfaser: Verschiedene Herstellungsverfahren werden analysiert, um kostengünstige Volumenskalierung zu ermöglichen. Heraeus hat Erfahrungen in der Herstellung von Cladding-Zylindern.
- Kopplung: Das Verfahren „butt coupling" ist etabliert, aber aktive Lösungen wie LCoS Phasenmodulatoren sind attraktiv zur Anpassung an verschiedene Fasertypen.
- MIMO: MIMO-Unterdrückung von Übersprechen in Zugangsnetzen wird untersucht. Multikernfaser bietet Vorteile gegenüber Multimodefasern hinsichtlich Leistungsverlust und Übersprechen.
- Systemsimulation: Fortgeschrittene Simulationswerkzeuge zur Modellierung von Multikernfaser-Übertragungssystemen werden entwickelt.
- Systemexperimente: MIMO-Systemexperimente mit IM/DD über eine Multimodefaser zeigen Herausforderungen durch Modenrauschen. Erste Laborexperimente mit Übertragung mehrerer PONs über eine Multikernfaser wurden durchgeführt.

Das Projekt zielt darauf ab, die technologischen Grundlagen und Anwendungen für zukünftige optische Netze zu verbessern und zu erweitern.

3 Ablauf des Projektes

Das Projekt war in vier technische Arbeitspakete eingeteilt. In AP1 wurden Anforderungsanalyse, Anwendungsszenarien, Architektur und das Systemkonzept betrachtet. Weiterhin wurden techno-ökonomische Fragestellungen bearbeitet und der Demonstrator bzw. die Systemsimulationen geplant. In AP2 wurden die Sende- und Empfangselemente, die Multikernfasern entwickelt und die entsprechenden Prototypen bereitgestellt. Die Ein- und Auskopplung in die Multikernfaser wurde realisiert und die Algorithmen zur MIMO-DSP wurden entwickelt und getestet. In AP3 wurden das Mehrkernfasermodell für die Modenanalyse und Signalausbreitung, die Modelle für die aktive Ein- und Auskopplung an der OLT sowie das Modell für die MIMO-DSP entwickelt. In AP4 wurden die in AP2 entwickelten Komponenten in den Demonstrator integriert und mittels Systemsimulation gezeigt, dass die gezeigten Ergebnisse sich auch auf ein reales Szenario skalieren lassen.

4 Wesentliche Ergebnisse

Hinsichtlich **der Architektur von SDM-PON** wurden zwei Szenarien untersucht:

- Ein Faserkern pro Kunde: Jeder Teilnehmer erhält einen exklusiven Faserkern, ähnlich einem Punkt-zu-Punkt-System, mit Vorteilen in Transceiver-Integration und Energieeffizienz.
- Geteilter Faserkern: Mehrere Teilnehmer teilen sich die Kapazität eines Faserkerns, was mehr Anschlüsse ermöglicht, aber mit geringerer Kapazität und höherer Komplexität verbunden ist.

Vergleiche mit bestehenden Architekturen zeigen eine Kostenersparnis, trotz Zusatzkosten für FAN-Out Komponenten.

Im Rahmen der **Arbeiten zur Kopplung** wurde der Strahl eines Lasers mit vertikalem Resonator (VCSEL) mit einem asphärischen Linsenpaar in eine Faser eingekoppelt und die Kopplungseffizienz im Hinblick auf verschiedene Fehlanpassungsparameter wie laterale und fokale Verschiebung analysiert. Darüber hinaus wurde dem asphärischen Linsenpaar ein Spatial Light Modulator (SLM) hinzugefügt, um das adaptive optische System zu vervollständigen und die Strahlsteuerung und -formung sowie die Beugungseffizienz, Kopplungseffizienz und dynamische Faserkopplung zu analysieren.

Für die **optische Charakterisierung der Multikernfasern S02 und S04** wurden die Faserspulen mit einem sogenannten Fan-in-Fan-out ausgestattet. Es wurde ein Photonic Dispersion Loss Analyzer (PDLA) verwendet, welches ein präzises Messgerät ist, zur vollständigen Charakterisierung von optischen Übertragungsstrecken und Komponenten in Bezug auf deren dispersive und dämpfungsbedingte Eigenschaften. Die typischen Kenngrößen, die dabei untersucht werden, sind: Einfügedämpfung (IL), Chromatische Dispersion (CD), Differenzielle Gruppengeschwindigkeitsverzögerung (DGD), Polarisationsabhängige Dämpfung (PDL). Ein großer Vorteil eines PDLAs ist die gleichzeitige, breitbandige Messung dieser Parameter über einen typischen Wellenlängenbereich (z. B. 1260–1620 nm), was ihn besonders geeignet für die Qualifizierung moderner Singlemode-Fasern, Komponenten oder Transceivermodule macht.

Die **Arbeiten zur MIMO-DSP** lassen sich wie folgt zusammenfassen: Für ein Kurzstecken-SDM-System mit OOK und PAM4 mit Datenraten von bis zu 30 Gbit/s pro Kanal, haben wir die Grenzen der MIMO-DSP basierend auf Simulationen und experimentellen Daten ermittelt. In unserer Untersuchung haben wir SDM-Systeme mit schwach gekoppelten MCFs unterschiedlicher Länge von bis zu 20 km aufgebaut. Unsere Ergebnisse zeigen, dass MIMO-DSP nur dann effektiv ist, wenn sehr hohe Crosstalk-Pegel vorhanden sind. Dies bedeutet, dass in einem solchen System, die Komplexität des DSP erheblich reduziert werden kann und eine Standard Ein-Kanal-DSP ausreicht. Dies zeigt das Potenzial von WC-MCF-basierten Konfigurationen in zukünftigen SDM-PON-Anwendungen.