

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: VPIphotonics GmbH	Förderkennzeichen: 16KIS1230
Verfahren der Künstlichen Intelligenz für die Optimierung der Glasfasernetze am Beispiel einer intelligenten Stadt (KIGLIS)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 – 31.10.2023	
Ansprechpartner Shi Li, Dr. Elias Giacomidis (technischer) Harald Fleick (administrativer)	

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangsvoraussetzungen und Projektdurchführung.....	5
1.1	Aufgabenstellung	5
1.2	Voraussetzungen	5
1.3	Planung und Ablauf	6
1.4	Wissenschaftlicher & technischer Stand zu Projektbeginn	6
1.5	Zusammenarbeit mit externen Partnern	7
2	Projektergebnisse (Kurzdarstellung).....	7
2.1	Infrastruktur und Architektur.....	7
2.2	Netzwerktechnologien	8
2.3	Künstliche Intelligenz in optischen Zugangsnetzen	8
2.4	Integration der Ergebnisse in einem Demonstrator	9
3	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	9
3.1	Eigene Veröffentlichungen.....	10
3.2	Öffentliche Vorstellung der Projektaktivitäten	10
4	Projektergebnisse (Detaillierte Darstellung)	11

1 Ausgangsvoraussetzungen und Projektdurchführung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes KIGLIS war es, ein optisches und KI-gestütztes Referenznetzwerk für zukünftige digitalisierte Städte zu entwerfen (KI: künstliche Intelligenz). Dabei sollte die Einbindung von künstlicher Intelligenz in den unterschiedlichen Bereichen der Infrastruktur erforscht werden.

Der Fokus von VPIphotonics (im Folgenden auch kurz VPI) lag auf der Entwicklung von softwarebasierten Design- und Planungswerkzeugen, mit denen die KI Methoden in den unterschiedlichen Bereichen wie die Signalentzerrung trainiert, getestet und validiert werden können. Folgende Themen wurden dabei innerhalb von drei Arbeitspaketen adressiert, welche eng verzahnt mit den Aktivitäten der Partner in KIGLIS durchgeführt wurden:

- Erstellung einer Anforderungsliste für zukünftige optische Zugangsnetze
- Untersuchung und Optimierung von hochbitratigen passiv optischen Netztechnologien
- Entwicklung einer Testumgebung für die Generierung von Trainingsdaten und das Trainieren und Testen von KI-Methoden
- Untersuchung und Entwicklung von KI-Methoden für die Signalentzerrung
- Entwicklung von geeigneten Methoden für die Generierung von Überwachungsdaten in optischen Zugangsnetzen.

1.2 Voraussetzungen

VPIphotonics ist ein führender und global anerkannter Anbieter von Softwareprodukten und Dienstleistungen im Bereich Modellierung von optischen Komponenten, Übertragungssystemen und Kommunikationsnetzen. Die angebotenen Produkte zeichnen sich durch einen hohen Grad an Flexibilität in der Modellierung aus. Weiterhin verfügt VPI über eine hohe Anerkennung auf dem Gebiet der Netzwerkplanung. Von VPI entwickelte Algorithmen zur störungsabhängigen Konfiguration von Netzen und zur Equipment-Konfiguration werden von bedeutenden Systemanbietern eingesetzt.

In den vergangenen Jahren konnte VPI durch interne und öffentliche Forschungsaktivitäten, gefördert durch das BMBF und die EU, vielfältige Expertisen aufbauen. Erwähnenswert sind hier unter anderem Arbeiten zur Modellierung und Charakterisierung von Transienten in rekonfigurierbaren Netzen, Arbeiten zur Modellierung von Nichtlinearitäten und zur schnellen Abschätzung der Übertragungseffekte, die Entwicklung eines Emulators für nichtlineare Übertragungen und die Modellierung von DSP-Eigenschaften auf Systemebene, die Planung von disaggregierten Netzen und Einbindung in SDN Managementsysteme, die Analyse und Modellierung nichtlinearer Komponenteneigenschaften, sowie die Entwicklung von effizienten DSP Algorithmen für probabilistisch geformte Signale. Derzeit ist VPIphotonics u.a. am HORIZON-JU-SNS-2022 Projekt FLEX-SCALE, dem CELTIC Projekt AI-NET-PROTECT-NET, sowie dem BMBF Projekt SAMOA-NET beteiligt.

Um den Projektzielen in KIGLIS gerecht zu werden, wurden neue Modelle geschaffen, prototypisch eingebunden und validiert, sowie Untersuchungen zu exemplarischen

Anwendungen durchgeführt. Softwarebasierte Design- und Planungsumgebungen von VPI konnten dafür unter Einbeziehung offener Schnittstellen zur Cosimulation (z.B. für Matlab, Python, VBA) genutzt werden.

Die gestellten Aufgaben wurden zielstrebig angegangen auch dank eigener umfangreicher Vorkenntnisse bzgl. der Simulation optischer Übertragungsstrecken, veröffentlichter Erkenntnisse zu modernen Technologien, sowie Informationen von Kunden und externen Kooperationspartnern.

1.3 Planung und Ablauf

Das Kickoff-Meeting (01.12.2020) fand aufgrund pandemiebedingter Restriktionen online statt. Die weiteren Progress-Meetings (07.10 - 09.10.2021, 07.06.-08.06.2022,) sowie das Abschluss-Meeting (12.10-13.10.2023) fanden als persönliche Treffen statt. Mitarbeiter von VPI nahmen an allen Treffen des KIGLIS Konsortiums teil, stellten Projektergebnisse vor und koordinierten weiterer Aktivitäten mit den Partnern. Weiterhin wurden zum Austausch von Ergebnissen und zur Abstimmung der Arbeiten wenigstens monatlich stattfindende Telefonkonferenzen durchgeführt. Zusätzlich dazu koordinierten wir gemeinsame Arbeiten mit einzelnen Projektpartnern direkt.

Außerdem wurden Veranstaltungen zur Präsentation der Ergebnisse für Fördergeber und der Öffentlichkeit sowie zur Analyse der internationalen Forschungs- und Marktlandschaft besucht. Insbesondere besuchten wir folgende Konferenzen: OFC 2021 (06.-11.06.2021 als virtuelle Konferenz), ECOC 2021 (12.-16.09.2021 in Bordeaux), TOP Conference 2022 (14.02-15.02.2022 in London), OFC 2022 (06.03-10.03.2022 in San Diego), ECOC 2022 (18.09.-22.09.2022 in Basel), OFC 2023 (05.03-09.03.2023 in San Diego), ECOC 2023 (01.10-05.10.2023 in Glasgow). Wir präsentierten dort Projektergebnisse und informierten uns über den neuesten Stand der Technik bzgl. Technologien und Konzepte für PON Übertragungssysteme und KI-Methoden in optischen Netzwerken.

Das Projekt wurde für den Zeitraum vom 01.11.2020 bis 31.10.2023 geplant und auch so durchgeführt. Der größte Teil der vorgenommenen Arbeiten wurde im Bereich der erwarteten Planung durchgeführt. Der finanzielle Aufwand des Projektes lag im Bereich des ursprünglich geplanten Aufwands laut Projektantrag. Die Personalkosten sind etwas höher und die Reisekosten geringer, da zum Teil auf Reisen zu Konferenzen und Workshops verzichtet wurde.

1.4 Wissenschaftlicher & technischer Stand zu Projektbeginn

VPIphotonics ist ein global anerkannter Anbieter von Software und Diensten zur integrierten Kapazitäts- und Netzwerkplanung für die Telekommunikationsindustrie. Insbesondere ist VPI führend in der Herstellung von Simulationssoftware für Forschung und Entwicklung von optischen Kommunikationssystemen. Die Produkte zeichnen sich insbesondere durch einen hohen Grad an Modellierungsflexibilität aus. Andere Anbieter mit Produkten, die ähnliche Aufgaben lösen sollen, sind Synopsys (USA) und Optiwave (Canada).

VPI weist eine weltweit anerkannte Expertise zu Fragen der Modellierung und Simulation optischer Übertragungssysteme sowie zugrundeliegender Technologien auf. Zusammen mit den Partnern und deren komplementären Kompetenzen wie z.B. optische Zugangssysteme (KIT-IPQ, NOKIA), Mehrfachzugriff als Teil der Orchestrierung (NOKIA), Infrastrukturplanung

(Atesio), Stadtnetzbetrieb der Glasfaser (TMAXX), autonomen Fahren (FZI) repräsentierte KIGLIS ein Konsortium mit Zugriff auf Erkenntnisse und Erfahrungen zum neuesten Stand der Technik.

Mehrere Veröffentlichungen der internationalen Forschungsgemeinschaft lagen zu Beginn des Projektes vor. Sie wurden im Projektantrag aufgelistet und soweit sinnvoll als Ausgangsbasis für die Lösung verschiedener Problemstellungen genutzt. Eine Auflistung wichtiger Literaturquellen, welche für die Projektarbeiten relevant waren, befindet sich im Kapitel 4 im Rahmen der detaillierten Beschreibung der Projektergebnisse.

1.5 Zusammenarbeit mit externen Partnern

Es bestand eine enge Zusammenarbeit mit allen Partnern im Konsortium. Prototypen der entwickelten Modelle und Algorithmen wurden ausgewählten Partnern, auch außerhalb des Konsortiums, zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden gemeinsame Softwareinterfaces geschaffen und darauf aufbauend verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

2 Projektergebnisse (Kurzdarstellung)

Entsprechend der Zielsetzung des Vorhabens wurden Modelle und Algorithmen entwickelt, welche Simulationen und Planungen von Anwendungen in Zugangs- und Metronetzbereich zukünftiger digitalisierter Städte unter Einsatz von KI-Methoden ermöglichen. Wesentliche Ergebnisse sind im Folgenden kurz zusammengefasst. Kapitel 4 beinhaltet eine detaillierte Übersicht der erzielten Projektergebnisse. Die relevanten Fortschritte anderer Stellen, welche während der Durchführung des Projekts bekannt geworden sind, sind in Kapitel 4 mit aufgeführt.

2.1 Infrastruktur und Architektur

Ziel dieses Schwerpunktes war die Definition eines Infrastrukturkonzeptes basierend auf den Anforderungen einer zukünftigen digitalisierten Stadt (Smart City). Als Referenzstadt wurde Karlsruhe definiert. Zunächst wurden anhand von 30 betrachteten Anwendungen mit Fokus auf Netzwerklatenz und benötigte Bandbreite vier repräsentative Applikationen festgelegt, welches als Grundlage für eine Referenzarchitektur dient. Diese sind "Remote Assistance", "Video Surveillance", "Cooperative Adaptive Cruise Control" und "Road Safety Warnings". Im Mittelpunkt des Infrastrukturkonzeptes steht das optische Glasfaser-basierte Zugangsnetz, das alle derzeit verfügbaren Funknetzwerke unterstützt. Zudem sollte die Referenzinfrastruktur die hohen Datenmengen, bestehend aus Sensoren und neuen Diensten, möglichst in Echtzeit übertragen. Dabei sollten mindestens 100 Gbps für eine maximale Reichweite von 20 km verfügbar sein. In Bezug auf den Glasfaserausbau sollte eine Latenzzeit von unter 1 ms mit einer Zuverlässigkeit von 99.999% für die zukünftigen Anwendungen erreicht werden.

In Zusammenarbeit mit Atesio, NOKIA und TelemaxX wurde mit Hilfe des Netzplanungstools VPIlinkConfigurator das Referenznetzwerk anhand der topologischen Daten erstellt. Die Erkenntnisse wurden in einer Publikation veröffentlicht.

2.2 Netzwerktechnologien

In einem weiteren Schwerpunkt beschäftigten wir uns mit den technologischen Herausforderungen in optischen Zugangsnetzen, um die Anforderungen der Referenzarchitektur zu gewährleisten. Als Ausgangspunkt wurden die aktuell verfügbaren Technologien in diesem Bereich analysiert. In Hinblick auf die Kosten und Nachhaltigkeit sollte das Referenznetz auf einem KI-unterstützten passiv optischen Netz (PON) basieren mit einem festen Leistungsbudget von 31,5 dB.

Mögliche PON Systemlösungen, die einerseits auf der traditionellen Intensitätsmodulation und Direktdetektion (IM/DD) als auch andererseits auf kohärenter Technologie aufbauen, wurden entwickelt und in der Simulationsumgebung VPItransmissionMaker Optical Systems untersucht. Von denen wurde ein IM/DD und ein kohärentes Systemkonzept ausgewählt und genauer untersucht.

Das IM/DD System basierte auf der vierstufigen Pulse Amplituden Modulation (PAM-4). Dabei wurden unterschiedliche Teilaspekte wie die Empfängerbandbreite oder Senderkomponenten sowie energieeffiziente digitale Signalverarbeitung (DSP) auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht und optimiert. Während der Analyse hatten wir festgestellt, dass bei dieser Bandbreite der Chirp des Modulators einen erheblichen Einfluß auf die Übertragungsqualität haben kann. Als kohärente PON Lösung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern eine frequenzkammbasierte Architektur betrachtet und ebenfalls auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht.

Für die Bewertung der Verbindungsqualität wurden unterschiedliche Möglichkeiten untersucht. Zunächst wurden die Transmitter mit der TDEC (Time and Dispersion Eye Closure) Methode bewertet. Hierfür hatten wir die Funktionalität unseres TDEC Modules für NRZ mit höheren Bitraten und zusätzlichem Entzerrer erweitert und mit einem Simulationsaufbau ausgewertet.

Als nächstes hatten wir charakteristische Überwachungsdatensätze von unterschiedlichen PON-Topologien mithilfe von VPIlinkConfigurator erstellt. Hierzu wurde die Funktionalität der Planungsumgebung für optische Zugangsnetze erweitert. Weiterhin untersuchten wir unterschiedliche Simulationsmöglichkeiten zur Erzeugung von virtuellen Daten der optischen Zeitbereichsreflektometrie. Anhand von leistungsgemittelten Signaldaten konnten diverse Datensätze für unterschiedliche PON Topologien emuliert werden. Mithilfe dieser Daten können Glasfasernetze charakterisiert und die Fehlersuche vereinfacht werden.

2.3 Künstliche Intelligenz in optischen Zugangsnetzen

Durch die Entwicklung von geeigneten KI-gestützten Algorithmen sollten die technologischen Herausforderungen der Referenzinfrastruktur überwunden werden. Hierzu wurden zunächst Anwendungsbereiche identifiziert, wo KI-Methoden konventionellen Methoden der digitalen Signalverarbeitung (DSP) möglicherweise überlegen sind.

Eine Python Testumgebung in unserer Simulationsumgebung wurde in Absprache mit den Projektpartnern aufgebaut. Speicherformat und unterschiedliche Anwendungen wurden diskutiert. Insgesamt wurden zwei Anwendungsfälle näher betrachtet. Im ersten Anwendungsfall wurde untersucht, inwiefern KI-Methoden als digitale Signalentzerrer im

Vergleich zu herkömmlichen DSP Methoden eingesetzt werden könnten. Für kohärente Systeme hatten wir als erstes verschiedene Clustering Algorithmen für die Kompensation der Nichtlinearitäten von Sender und Faser untersucht. Der Fokus lag jedoch auf dem IM/DD 100G PON PAM-4 Setup. Hier verglichen wir unterschiedliche KI Methoden mit einem linearen Entzerrer. Auch wurde ein neuer KI-Algorithmus basierend auf einer SCInet (Sampling-Convolutional and Interaction Network) Methode mit integrierter Frequenzkalibrierung entwickelt. Wir konnten zeigen, dass diese Methode Verbesserungen in Bezug auf Komplexität und Performanz gegenüber herkömmlichen neuronalen Netzen bieten kann.

Im zweiten Anwendungsfall untersuchten wir die Möglichkeit mithilfe von KI und experimentell bzw. simulativ erzeugter OTDR Daten diskrete Ereignisse in einem PON (z.B. Reflexion, Dämpfung) zu klassifizieren. So sollten damit zunächst Informationen über die lokale Netzinfrastruktur gesammelt und später für die Erkennung von Anomalien eingesetzt werden. Zwei KI Methoden basierend auf den Ensemble Classifier und der LSTM Architektur wurden für die Ereigniserkennung genutzt. Die beste Erkennungsrate mit 98% wurde mit dem Ensemble Classifier erreicht, wenn ausschließlich mit gemessenen OTDR Daten trainiert wurde. Das Training mit simulativ erzeugten Datensätzen lieferte aufgrund der geringen Auflösung der Signaldaten nur eine reduzierte Erkennungsrate.

2.4 Integration der Ergebnisse in einem Demonstrator

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden verschiedene Demonstratoren geplant und im Rahmen eines Abschlussevents an unterschiedlichen Standorten in Karlsruhe durchgeführt. Einzelne Forschungsergebnisse von VPI konnten in verschiedenen Demonstratoren integriert und vorgestellt werden.

3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dank der Zusammenarbeit mit den Partnern in KIGLIS ist es uns gelungen, neue Trends rechtzeitig zu erfahren und wichtige Informationen zur Anwendung in die Erforschung neuer Modelle und Dienstleistungsangebote einfließen zu lassen.

Insbesondere ermöglichten die Forschungsaktivitäten eine deutliche Vergrößerung des Wissenspotentials bei VPI in den Bereichen zukünftiger passiv optischer Zugangsnetze sowie KI-gestützter Methoden zur digitalen Signalverarbeitung und zur Erkennung von Netzwerkanomalien. Die erzielten Ergebnisse des Projektes wurden der Öffentlichkeit zeitnah in wissenschaftlichen Publikationen und auf Konferenzen zugänglich gemacht.

Ziel der Maßnahmen war es, die Marktführerschaft im Bereich Simulationssoftware für optische Kommunikationssysteme zu erhalten. Die kontinuierlich auftretenden Innovationen in diesem Bereich machen eine permanente Weiterentwicklung von numerischen Simulationsmodellen sowie eine tiefere Integration mit Prozessen der Netzwerkplanung erforderlich. Schon während des Projektzeitraumes sind gewonnene Ergebnisse in Spezifikationen neuer Produkteigenschaften eingeflossen. Es ist Ziel, weitere Prototypen und Designerkenntnisse des Projektes als Grundlage für Weiterentwicklungen von Softwaretools zu nutzen. Über das Angebot von Dienstleistungen zur Planung und zum Design von KI-basierten optischen Zugangsnetzen sowie adäquaten Technologien sollen neue Umsatzströme erschlossen werden.

3.1 Eigene Veröffentlichungen

Wichtige Projektergebnisse wurden als Teil von Fachbeiträgen für technische Fachzeitschriften und -kongresse zur Publikation eingereicht, damit sie einem breiteren Publikum bekannt gemacht werden. Sieben Veröffentlichungen konnten dadurch mit Hilfe der Arbeiten aus dem KIGLIS Projekt generiert werden; weitere sind nach Projektabschluß in Arbeit. Details sind der Liste der Veröffentlichungen zu entnehmen.

3.2 Öffentliche Vorstellung der Projektaktivitäten

Auf der VPIphotonics Webseite wurde eine kurze Darstellung der Projektziele und Partner eingebettet, sowie ein Link zur KIGLIS Website (www.kiglis.de) implementiert.

Auf internationalen wissenschaftlichen Konferenzen mit Ausstellungsmöglichkeiten (insbesondere ECOC 2021-23, OFC 2022-23) wurden verschiedene Projektergebnisse der interessierten Öffentlichkeit präsentiert und mit Kunden diskutiert. Darunter waren Themen wie Implementierung einer Python Testumgebung für die Entwicklung von KI-Algorithmen. Des Weiteren wurden auf Top Conference 2022 und Photonic Days 2022 Projektergebnisse vorgestellt und mit den Anwesenden diskutiert.

4 Projektergebnisse (Detaillierte Darstellung)

Inhaltsverzeichnis

4	Projektergebnisse (Detaillierte Darstellung)	11
4.1	Infrastruktur und Architektur.....	12
	Anwendungsfelder in der „Smart City“ Umgebung.....	12
	Referenzinfrastruktur für die betrachteten Anwendungen	13
4.2	Netzwerktechnologien	14
	Stand der Technik	14
	PON-Systemarchitekturen	15
	Qualitätsbewertung der PON-Transceiver.....	17
	Überwachung der Verbindungsqualitäten und Erkennung von Anomalien	18
4.3	Künstliche Intelligenz in optischen Netzen	20
	Identifikation von Optimierungsproblemen.....	20
	Testumgebung für das Training und die Validierung von KI-Algorithmen	21
	KI-Algorithmen für die Signal Entzerrung	22
	KI-Algorithmen für die Überwachung und frühzeitige Fehlererkennung in PONs.....	25
4.4	Integration der Ergebnisse in einen Demonstrator	26
	Abschlussevent	26
4.5	Referenzen	27

4.1 Infrastruktur und Architektur

Anwendungsfelder in der „Smart City“ Umgebung

Unter „Smart City“ versteht man eine hohe Digitalisierung der Stadtgebiete in den unterschiedlichen Bereichen wie zum Beispiel Mobilität, Wirtschaft, Wohnen und Soziales [1][2]. Digitale Dienstleistungen in diesen Bereichen werden mithilfe von einer großen Anzahl von Sensoren realisiert und benötigen eine robuste und intelligente Infrastruktur, die die vorhandene Netzwerkinfrastruktur bestehend aus Funk- und optischen Fasertechnologien optimal einsetzt. Insbesondere das optische Fasernetzwerk muss die hohe Datenlast schnell und effizient an die verarbeitenden Datenzentren weiterleiten. Hier können mithilfe von künstlicher Intelligenz die Verwaltung des optischen Netzwerkes verbessert und durch KI-gestützte Signalverarbeitung die Datenrate erhöht werden. Beides sind wichtige Voraussetzungen für eine nachhaltige Stadtentwicklung.

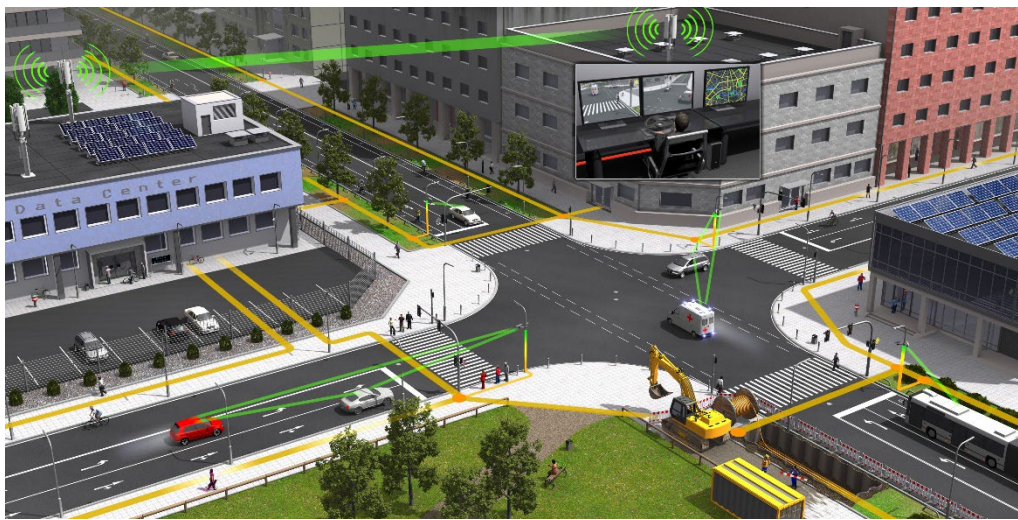


Abbildung 1: Die Vision einer intelligenten Netzwerkinfrastruktur mit Funk- (grün) und optischen Faserverbindungen (gelb).

Um die Anforderung von zukünftigen intelligenten Städten und dessen Infrastruktur und Systemarchitektur genauer zu untersuchen, wurden zunächst einmal mögliche Anwendungsfälle genauer untersucht. Hierzu wurden gemeinsam mit den Projektpartnern eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt und insgesamt 30 Anwendungen in der Smart City für die Erstellung einer Referenzarchitektur ausgewertet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf benötigte Netzwerklatenz und Bandbreite gelegt.

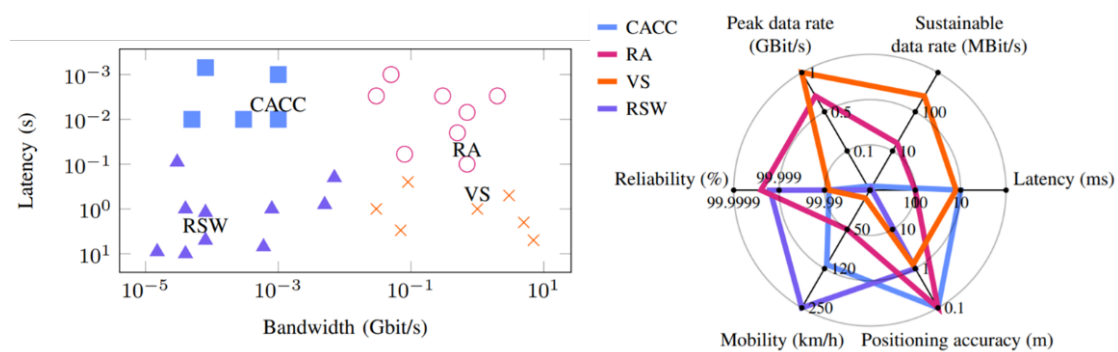


Abbildung 2: Anforderungen der Anwendungen in Bezug auf Netzwerklatenz und benötigte Bandbreite (links) und Spinnendiagramm von vier repräsentativen Anwendungen (rechts).

Eine Liste der Anwendungen wurde erstellt und in vier Gruppen unterteilt. Davon wurden vier repräsentative Anwendungen ausgewählt: "Remote Assistance (RA)" [3], "Video Surveillance (VS)" [4], "Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)" [5] und "Road Safety Warnings (RSW)" [6]. Besonderes Augenmerk wurde auf RA und das damit zusammenhängende autonome Fahren gelegt, das als einer der wichtigsten Dienste für die intelligente Stadt identifiziert wurde und als Grundlage für die Anforderungen an die künftige KI-gestützte Netzinfrastruktur dient. Als neue „Smart City“ Anwendungen, die eine hohe Datenrate und gleichzeitig eine niedrige Latenzzeit von weniger als 1ms benötigt, wurde eine erforderliche Zuverlässigkeit von 99,999% festgelegt.

Für die Erstellung einer Referenzinfrastruktur wurde Karlsruhe ausgewählt, da mit den Projektpartnern TelemaxX und KIT bereits Kenntnisse über die lokale Netzwerkinfrastruktur vorhanden sind.

Referenzinfrastruktur für die betrachteten Anwendungen

Ausgehend von den aktuell verfügbaren Funkzugangsnetze wie 5G, Wifi oder LoRa-WAN benötigt die darunter liegende Datenverbindung und -übertragung ein optisches Netzwerk. Als Ausgangspunkt für die Referenzinfrastruktur haben wir den aktuellen Zustand der optischen Zugangsnetze erfasst, sowie relevante Standardisierungen [7][8] untersucht. In Hinblick auf die zukünftigen Anwendungen wurde eine Datenrate von mindestens 100 Gbps mit einer maximalen Reichweite von 20 km im optischen Zugangsnetz definiert. KI-gestützte Methoden sind dabei ein wichtiger Bestandteil, um die technologischen Herausforderungen wie Kosten und niedrige Latenz für passive optische Netze (PON) zu überwinden. Zudem muss die Netzinfrastruktur von intelligenten und nachhaltigen Städten die neuen bandbreite-intensiven Dienste, die ihre Daten zum Teil von Sensoren erhalten, möglichst in Echtzeit bewältigen [9].

Eine Übersicht zur derzeit verfügbaren Netzinfrastruktur und die Herausforderungen für künftige KI-basierte optische Kommunikationsnetze wurde in einer Veröffentlichung [10] zusammengetragen.

In Zusammenarbeit mit Atesio, NOKIA und TelemaxX wurde mit Hilfe des Netzplanungstools *VPILinkConfigurator* ein digitales Abbild für das 100G-PON-Referenznetzwerk erstellt. Dabei wurden die topologischen Netzwerkdaten des PON-Zugangsnetzes eines Karlsruher Stadtteils von Atesio und die Informationen über die Anbindung der Datenzentren von TelemaxX in *VPILinkConfigurator* importiert.

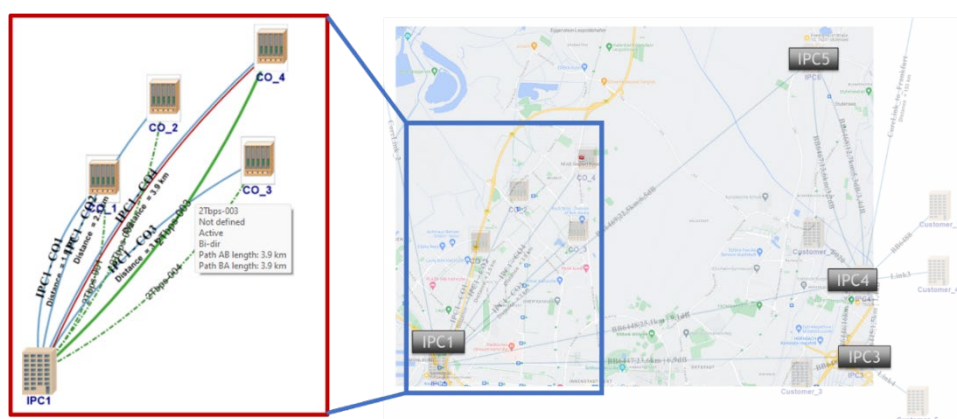


Abbildung 3: Infrastruktur der Datenzentren zu den lokalen Zugangspunkten von TelemaxX in *VPILinkConfigurator*.

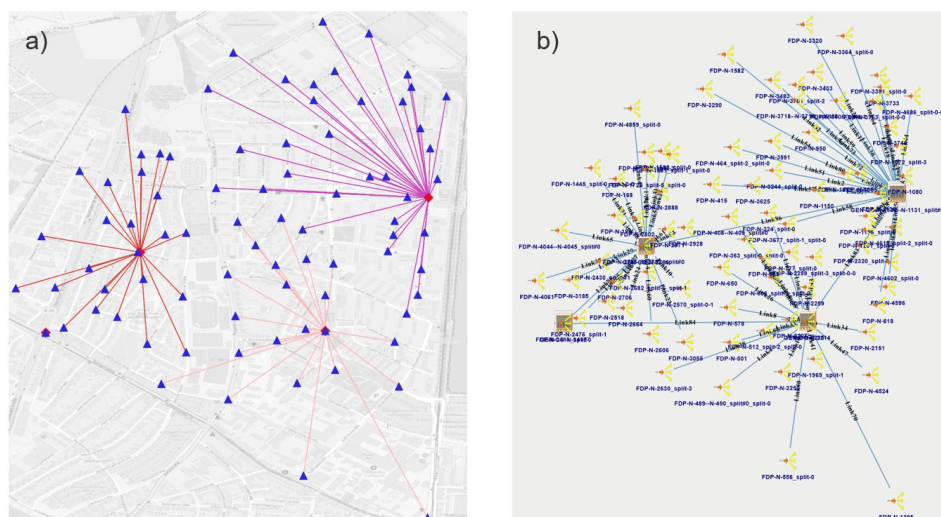


Abbildung 4: Importieren der Atesio Daten a) aus QGIS [11] in VPlinkConfigurator b).

Für die Erstellung eines digitalen Zwillings für eine quasi latenzfreie Datenprozessierung in lokalen Datenzentren wurde eine Kostenanalyse von unterschiedlichen Glasfaserausbauten anhand der Spezifikationen für einen Stadtteil von Karlsruhe durchgeführt.

4.2 Netzwerktechnologien

Stand der Technik

In Zusammenarbeit mit NOKIA und KIT-IPQ wurden bestehende optische Zugangsnetze anhand der definierten Anforderungen untersucht. Die aktuell am Meisten genutzte Technologie für lokale Netzinfrastrukturen ist das PON. Es ist eine kosteneffektive bidirektionale Punkt-zu-Multipunkt optische Glasfaserverbindung mit bis zu 64 Endpunkten und einer maximalen Distanz von 20 km. Diese Verbindungen bestehen meistens aus rein passiven Komponenten. Die genutzte Technologie basiert auf der Intensitätsmodulation und Direktdetektion (IM/DD). Aktuell sind vor allem Gigabit PON (GPON) und 10-Gbps PON (XGSPON) im Einsatz. Kommerziell sind bereits Komponenten für 25-Gbps (25GSPON) verfügbar.

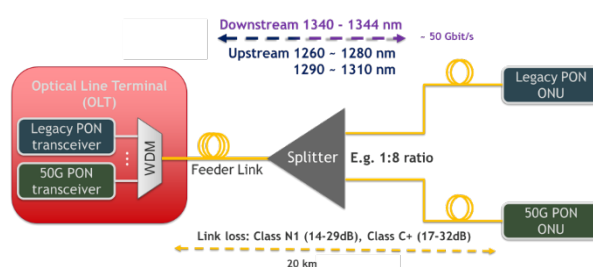


Abbildung 5: Technische Spezifikation von 50G PON.

Auch ist die 50-Gbps PON Standardisierung [7] bereits abgeschlossen, so dass eine Markteinführung in den nächsten Jahren zu erwarten ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftige Netzinfrastrukturen für eine intelligente Stadt eine noch höhere Datenrate benötigen werden.

PON-Systemarchitekturen

Für zukünftige optische Zugangsnetze wird man sich sehr wahrscheinlich auf die Weiterentwicklung des PON-Ökosystems konzentrieren [12]. Folgt man den bisherigen Trend, so ist zu erwarten, dass für den Zeitraum 2025-2030 die PON Transceiver Technologie mindestens eine Verdopplung der Kapazität bereitstellt. Hierzu haben wir unterschiedliche 100 Gbps fähige PON-Systemarchitekturen und den Einsatz von maschinellem Lernen in Zugangsnetzen untersucht.

Für die potentiellen Systemlösungen wurden mit der Simulationsumgebung *VPItransmissionMaker Optical Systems* verschiedene Setups entwickelt und untersucht. Dazu gehörten unter anderem PAM-4 mit Kramers-Kronig (KK) Empfänger und kohärente DP-QPSK Übertragung mit Parametereinstellungen aus [13]. Als eine zweite mögliche kohärente 100G PON-Lösung wurde gemeinsam mit den Projektpartnern eine frequenzkammbasierte Architektur betrachtet [14][15]. Dabei wird das gesendete Signal auf den gesamten Frequenzkamm kopiert. Dadurch soll die Wirtschaftlichkeit kohärenter Systeme im Zugangsnetz verbessert werden, indem der externe Resonanzlaser (ECL) als lokaler Oszillator (LO) auf der optischen Netzeinheit (ONU) Seite durch einen kostengünstigen DFB-Laser ersetzt wird. Zusätzlich können Subträger durch Frequenzmultiplex für eine dynamische Anpassung der Datenrate genutzt werden. Um die Kosten für das PON-System so gering wie möglich zu halten, haben wir uns daher in Absprache mit den Projektpartnern gegen die Ansätze mittels KK-Empfänger und kohärenter DP-QPSK Signalisierung entschieden.

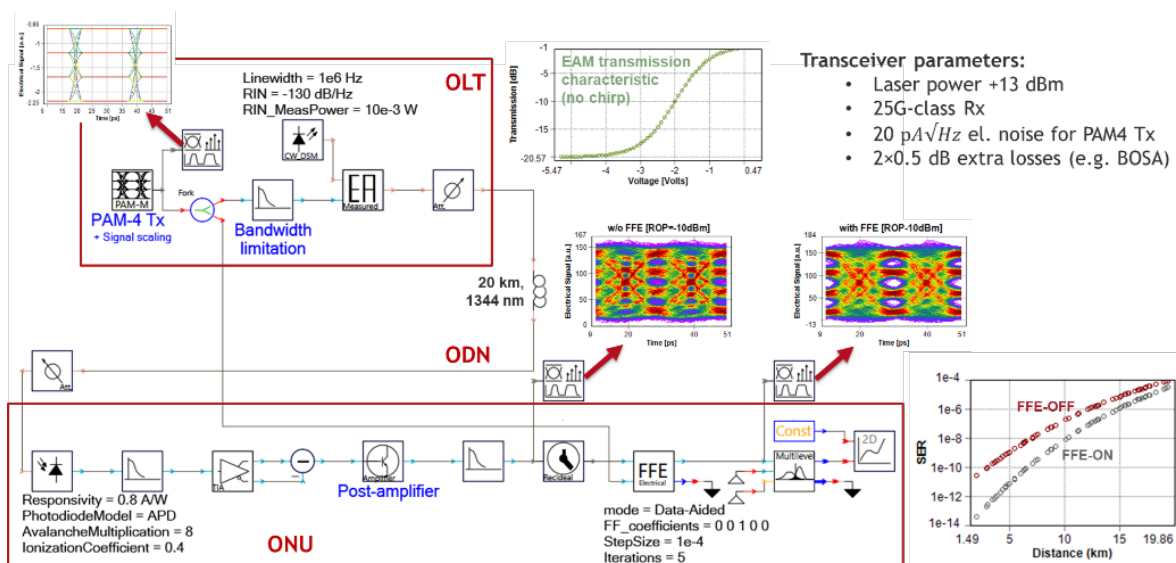


Abbildung 6: 100 Gbps PAM-4 Downstream PON.

Vielmehr konzentrierten wir uns auf ein IM/DD 100G-PON-Setup mit PAM-4 und PAM-8. Hierzu haben wir mit den technischen Daten von NOKIA ein Setup für die Downstream-Übertragung erstellt. Dieses besteht aus einem distributed feedback (DFB) Laser und einem Elektroabsorptionsmodulator (EAM) auf der Senderseite und einer Avalanche-Fotodiode (APD) mit Transimpedanzverstärker (TIA) auf der Empfängerseite.

Verschiedene Aspekte wie die Empfängerbandbreite und den Einsatz von digitaler Signalverarbeitung (DSP) mit einem festen Leistungsbudget von 31,5 dB wurden untersucht. Auch die optische Empfangsleistung (ROP) wurde variiert. Wir konnten zeigen, dass PAM-4

durch den Einsatz von DSP und einer optimierten Bandbreite für das 100G PON geeignet ist. In diesem Zusammenhang untersuchten wir auch neuartige und energieeffiziente DSP-Methoden mit geringer Komplexität für zukünftige Zugangsnetze [16].

Durch die Optimierungen der DSP konnte die Anzahl der Taps für den Feed-Forward Entzerrer (FFE) von bisher 15 auf 5 für eine 20 km lange Übertragungsstrecke reduziert werden. Dadurch wurden zusätzliche DSP-Algorithmen, wie das Maximum-Likelihood Sequenzschätzung (MLSE), nicht mehr benötigt.

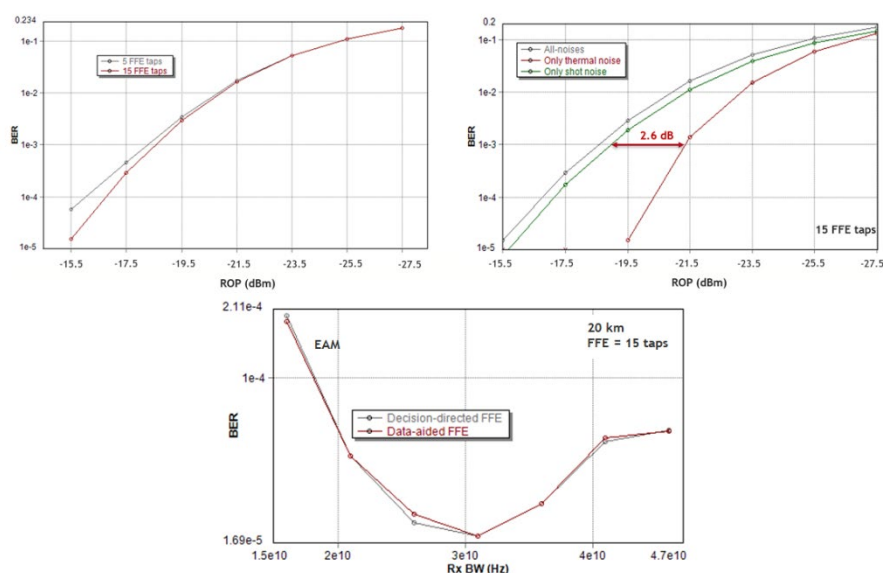


Abbildung 7: Ergebnisse von PAM-4 Untersuchungen für eine 20 km Downstream Übertragung.

Im Zuge der Untersuchung haben wir festgestellt, dass Chirp in einem EAM im O-Band eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf die Übertragungsqualität haben kann. Die Transfercharakteristik und der Alphafaktor des EAM wurden aus [17][18] entnommen. Außerdem haben wir die Performanz eines Mach-Zehnder Modulators (MZM) mit der eines EAMs verglichen, den MZM jedoch aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit später nicht weiter in Betracht gezogen. Wir untersuchten auch PAM-8 Übertragungen, konnten jedoch keine Parametereinstellungen finden, die eine vergleichbare Performanz ermöglichen.

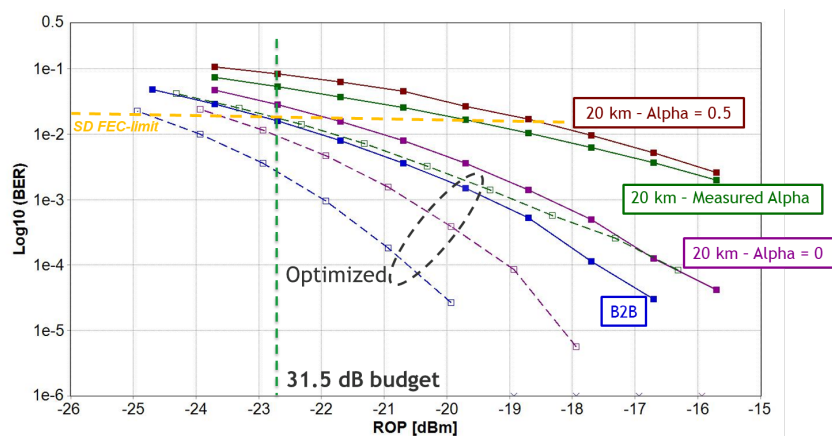


Abbildung 8: Auswirkung des Chirps auf die Übertragungsqualität für ein Linkbudget von 31,5 dB.

Des Weiteren haben wir den Sender hinsichtlich des Arbeitspunktes und des Pegels für

PAM-4 optimiert.

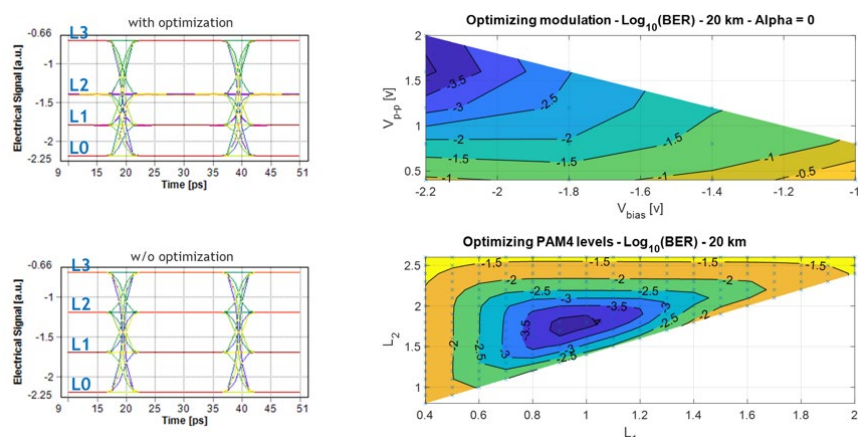


Abbildung 9: Optimierung des Transmitters bezüglich des Arbeitspunktes des EAMs und der Amplitudenstufen.

Qualitätsbewertung der PON-Transceiver

Eine Möglichkeit, die Verbindungsqualität zu bewerten, ist die Charakterisierung des Transmitters. So lässt sich mit der TDEC (Time and Dispersion Eye Closure) Methode [19] die Qualität des Transmitters bestimmen. Ein existierendes TDEC-Modul zur Bestimmung des TDECQ (Quaternary) für PAM-4 wurde erweitert, um auch mögliche PON-Transceiver mit NRZ Modulationsformat für 50 Gbps oder zukünftige 100 Gbps Datenrate abzudecken. Diese beinhaltet wie für die PAM-4 Übertragung einen zusätzlichen (FFE) Entzerrer. Daher wurde zunächst die TDEC Berechnung mit der Methode von [19] implementiert. Hierfür haben wir dann weiterhin einen Simulationsaufbau entwickelt, der die Anwendung testet und validiert.

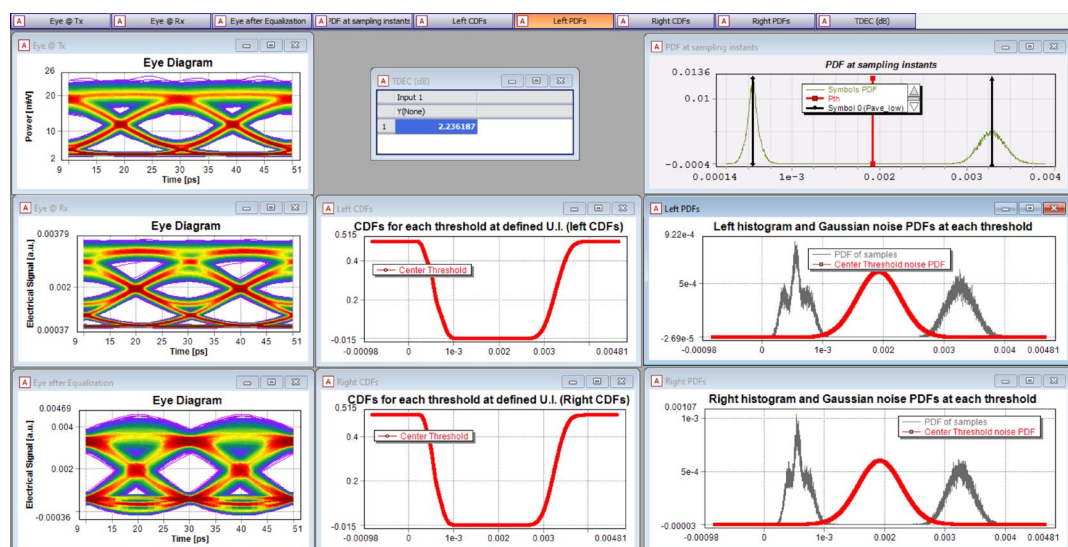


Abbildung 10: Ergebnisse der TDEC Berechnung für 50 Gbps NRZ Übertragung nach 20 km und mit einem 15 Taps FFE.

In Zusammenarbeit mit Nokia wurde anschließend eine offene Liste an zu realisierenden Ergänzungen für die TDEC Abschätzung nach [7] erstellt. Diese beinhaltet beispielsweise Aspekte der Realisierung einer Short Stress Pattern Random (SSPR)-Sequenz nach [20] sowie die Identifikation der Teilsequenz für die Outer Modulation Amplitude (OMA)-Berechnung. Da jedoch für unser 100 Gbps Referenznetzwerk PAM-4 als Modulationsformat spezifiziert wurde, wurden die Ergänzungen nicht weiterverfolgt.

Überwachung der Verbindungsqualitäten und Erkennung von Anomalien

Ein wichtiger Aspekt in der Überwachung der Netzinfrastruktur ist die frühzeitige Erkennung von fehlerhaften Netzwerkkomponenten. Für die Generierung von charakteristischen Überwachungsdatensätzen einer gesamten PON-Topologie nutzen wir *VPllinkConfigurator*. Diese Planungsumgebung ermöglicht uns, eine komplette Netzwerktopologie zu erstellen und anhand von Designregeln zu optimieren [21].

In Abstimmung mit den Projektpartner von NOKIA wurde zunächst die Referenzinfrastruktur mit den unterschiedlichen Funk- und Faseranbindungen in *VPllinkConfigurator* abgebildet. Hierzu haben wir die Funktionalität der Software für den Einsatz zur Planung von Zugangsnetzen erweitert, um die charakteristischen Kontroll-Datensätze zu generieren. Diese umfassen Signalleistung, Dämpfung und andere bekannte Netzwerkparameter. Erste Datensätze wurden mit den Spezifikationen der 50G PON-Netztopologie nach [7] erstellt. Sie sollten als Trainingsdatensätze für eine KI-gestützte Überwachung und Anomalien Erkennung genutzt werden.

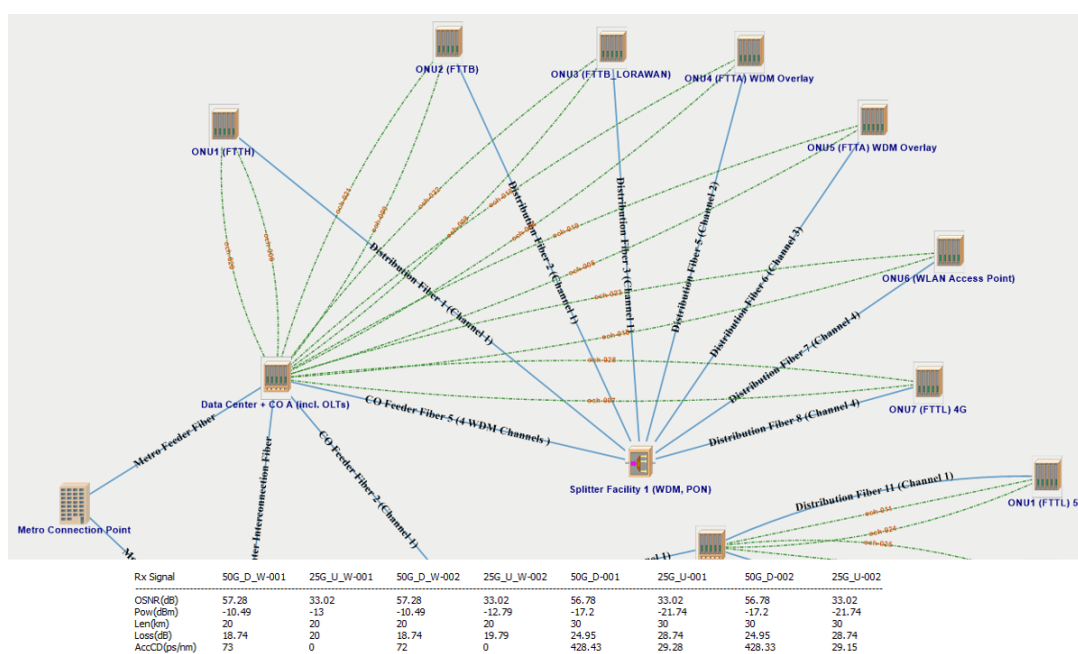


Abbildung 11: Abbildung des Referenznetzwerks in Netzplanungsumgebung mit den üblichen Kontrolldaten.

Mit der zunehmenden Konnektivität in Smart Cities muss dementsprechend auch das optische Zugangsnetz erweitert werden. Die Überwachung und Wartung von derart großen Glasfasernetzen stellen eine Herausforderung dar. Sehr oft werden für die Diagnose und Fehlersuche sogenannte optische Zeitbereichsreflektometer (OTDR) eingesetzt. Diese senden kurze Lichtpulse in die Faser und erfassen zurückreflektierte Lichtleistung. Dadurch kann man ein Leistungsprofil erstellen und Aussagen über die verwendeten Komponenten entlang der Faserstrecke anhand der Rückreflexion treffen. Auch kann man OTDR Daten von unterschiedlichen Zeitpunkten vergleichen und so Bruchstellen, also Anomalien, erkennen. Jedoch ist eine Identifizierung von Fehlern in PON schwierig. Bis zu 64 Teilnehmer (ONUs) werden mithilfe von mehreren Splittern mit nur einer Versorgungsfaser verbunden, so dass das Leistungsprofil eine akkumulierte Reflexion aller Endpunkte beschreibt.

Wir untersuchten die Möglichkeit durch Simulationssetups künstliche OTDR Datensätze zu generieren. Diese sollten als Trainingsdatensätze dienen, um die vom AIFB entwickelten KI-Algorithmen zu testen, welche anhand von OTDR-Information Rückschlüsse auf verlegte Fasern in einer Region ziehen und auch für die Anomalien-Früherkennung genutzt werden.

Zunächst konnten wir anhand von Simulationen in *VPItransmissionMaker Optical Systems* ein Leistungsprofil der einzelnen Faser Verbindung in vorwärts und rückwärts Richtung für eine von NOKIA definierte PON-Topologie erstellen.

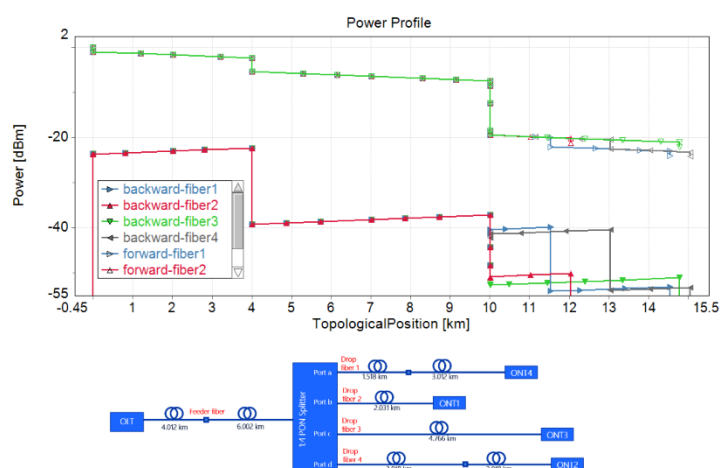


Abbildung 12: Leistungsprofil der einzelnen Faserverbindungen für eine PON-Topologie mit einem 1:4 Splitter.

Durch zusätzliche Modifikationen erstellten wir OTDR-ähnliche Datensätze ohne Reflexionen. Darauf aufbauend haben wir unterschiedliche Simulationssetups für PON-Architekturen mit unterschiedlicher Anzahl von Splittern und Splittingverhältnissen erstellt.

OTDR Emulation for a PON with 2 Splitters (1:4 & 1:4)

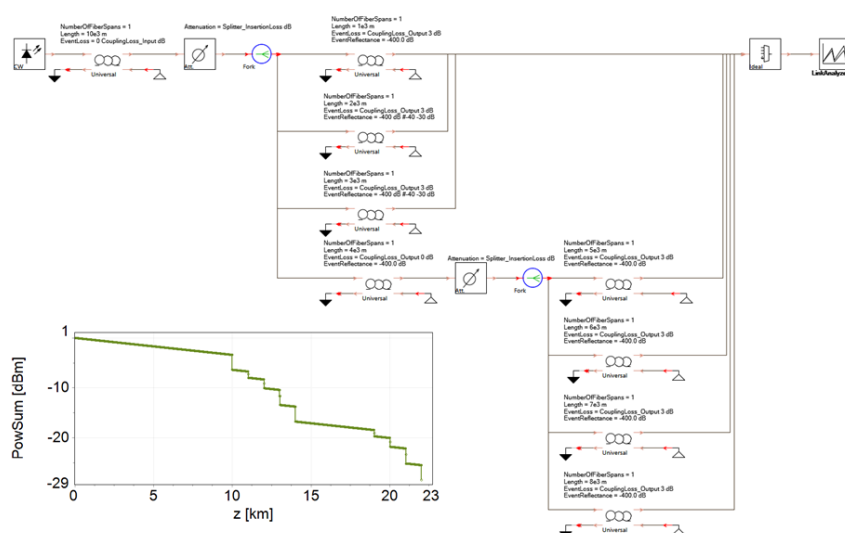


Abbildung 13: Simulationsetup für eine PON-Architektur mit zwei 1:4 Splittern mit einem OTDR Profil ohne Reflexionen.

Jedoch konnten die charakteristischen Reflexionen nicht ohne erheblichen Aufwand simuliert werden. Daher haben uns entschieden die künstlichen OTDR Daten in der *VPIlinkConfigurator* Umgebung zu emulieren. Dabei werden die physikalischen Veränderungen entlang der Faser,

im Gegensatz zur numerischen Simulation, nur anhand von einzelnen Signalparametern (z.B. mittlere optische Leistung) erfasst. Dadurch lassen sich die ansonsten rechenintensive numerische Pulsausbreitung durch effiziente analytische Übertragungsfunktionen beschreiben. Für die Emulation wird die mittlere Signalleistung durch jede Komponente erfasst, die jeweils durch ihre eignen Einfügedämpfungs- und Reflexionsparameter beschrieben werden. Dadurch können alle diskreten lokalen Ereignisse dargestellt werden.

Insgesamt wurden von unterschiedlichen Topologien 96 emulierte OTDR Datensätze generiert. Die Datensätze sind frei verfügbar und können in [22] abgerufen werden.

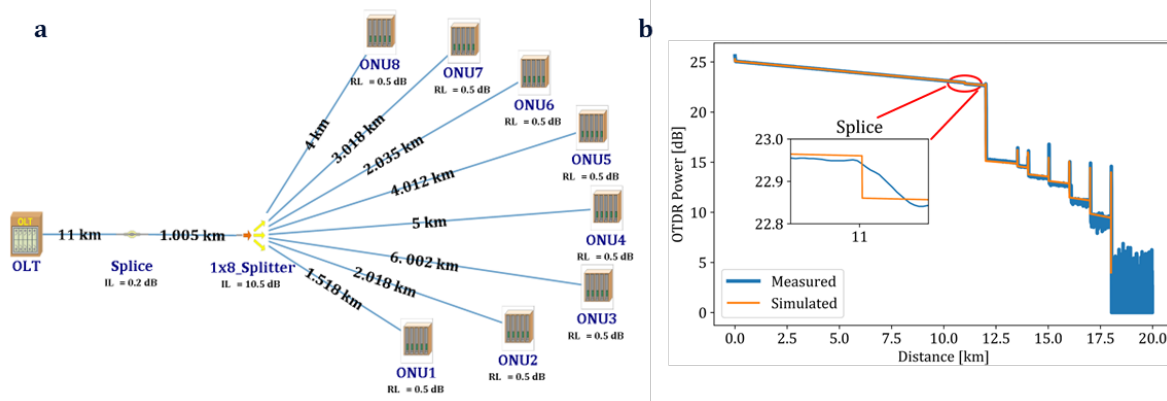


Abbildung 14: Referenztopologie im VPILinkConfigurator mit emulierten und gemessenen OTDR Plot.

4.3 Künstliche Intelligenz in optischen Netzen

Identifikation von Optimierungsproblemen

Künstliche Intelligenz kann auf unterschiedlicher Weise in optischen Netzen eingesetzt werden [23][24]. In Zusammenarbeit mit dem Partner von KIT und NOKIA wurden Bereiche in der optischen Kommunikation identifiziert, für die KI-gestützte Methoden herkömmlichen Optimierungsmethoden überlegen sein könnten.

In enger Abstimmung mit den Partnern des AIFB wurden mehrere Seminare durchgeführt, um Wissen über den aktuellen Stand der KI-Forschung zu vermitteln. Es wurden verschiedene Techniken und deren Funktionsweise vorgestellt und anhand von Beispielen mit Hilfe von Python praktisch umgesetzt. In diesem Zusammenhang wurde auch der Anwendungsbereich für das Projekt diskutiert. So entstanden zwei Fallbeispiele, für die wir gemeinsam mit NOKIA und KIT-IPQ Trainingsdaten für die Entwicklung der KI-Algorithmen generierten. Die Anwendungsbeispiele umfassen die Signalentzerrung und die Erkennung der Netzwerk-topologie anhand von OTDR Daten mit neuronalen Netzen.

So wurde zu einem untersucht, inwiefern KI-Algorithmen die technologischen Herausforderungen für ein 100G PON im Vergleich zu konventionellen DSP Methoden bewältigen können. Dabei wurden unterschiedliche Methoden wie Deep Neural Networks (DNNs), Clustering und auch neuentwickelte Methoden angewendet.

Im Bereich der Netzüberwachung und Fehlererkennung wurde untersucht, inwieweit KI-Methoden bei der Analyse von OTDR Daten zur Erkennung und Klassifizierung von Ereignissen entlang der gesamten PON Topologie helfen kann.

Testumgebung für das Training und die Validierung von KI-Algorithmen

Um geeignete KI-Algorithmen für die Entzerrung zu finden, wurden in enger Abstimmung mit dem Projektpartner am AIFB geeignete Datenformate und Testumgebung definiert. Hierfür generierten wir zunächst in der Simulationsumgebung *VPItransmissionMaker Optical Systems* Trainingsdaten vom PAM-4 Setup mit KK-Empfänger. Dazu gehörten Senderdatensätze und Datensätze, die an verschiedenen Positionen entlang der Übertragung gesammelt wurden. Ziel ist es, das gestörte Signal an verschiedenen Positionen (nach der Faser im optischen Bereich, nach der KK-Verarbeitung) mit Hilfe verschiedener KI-Algorithmen wieder in das ursprüngliche Sendersignal zurückzuführen bzw. zu entzerren.

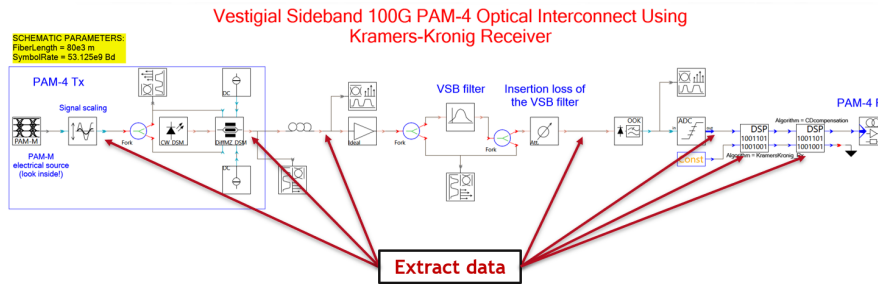


Abbildung 15: Simulationssetup mit PAM-4 und Kramers-Kronig Empfänger und Generation von Trainingsdaten an unterschiedlichen Positionen.

In einem alternativen Ansatz werden KI-Algorithmen, die kein Training benötigen, direkt mithilfe einer API in ein Simulationssetup eingebunden.

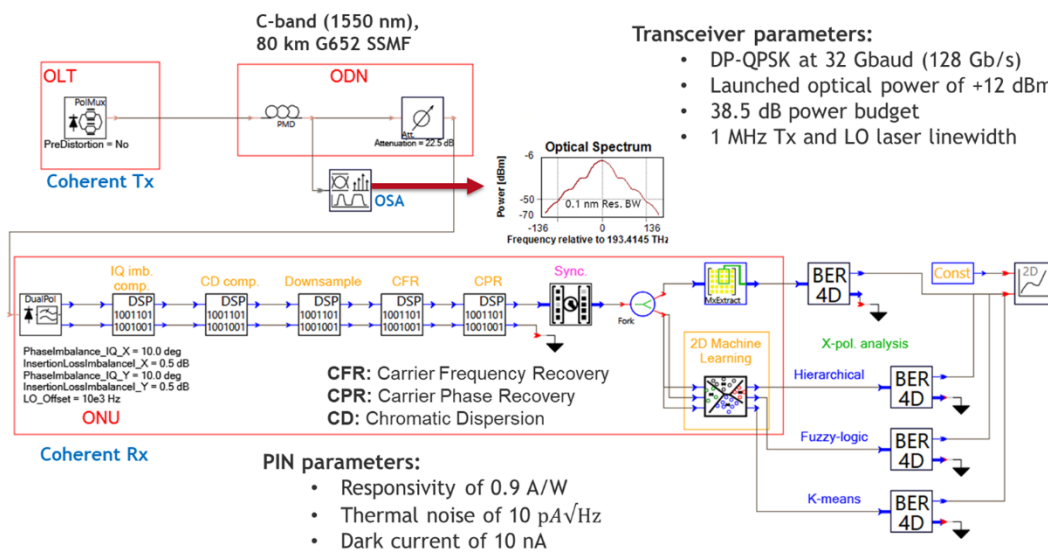


Abbildung 16: Simulationssetup für Dual-Polarisiertes QPSK kohärentes Übertragungssystem mit Clustering als ein Teil der digitalen Signalverarbeitung.

Weiterhin haben wir ein auf Python basierendes Framework konzipiert und entwickelt, das die Generierung von simulierten Trainingsdaten vereinfacht und zugleich die im Projekt entwickelten KI-Algorithmen in die Simulationsumgebung integriert. Das erleichtert das Testen und Validieren der KI-Methoden. In Kollaboration mit KIT-IPQ wurden Trainingsdaten für die KI-gestützte Signalentzerrung eines PAM-4 Übertragungssystems erzeugt. Die Plattform ermöglicht es auch experimentelle Daten einfacher zu integrieren. Die Trainingsdaten werden in HDF5 Format gespeichert. Als Referenz wurde ein DNN-Modell mit

TensorFlow [25] integriert.

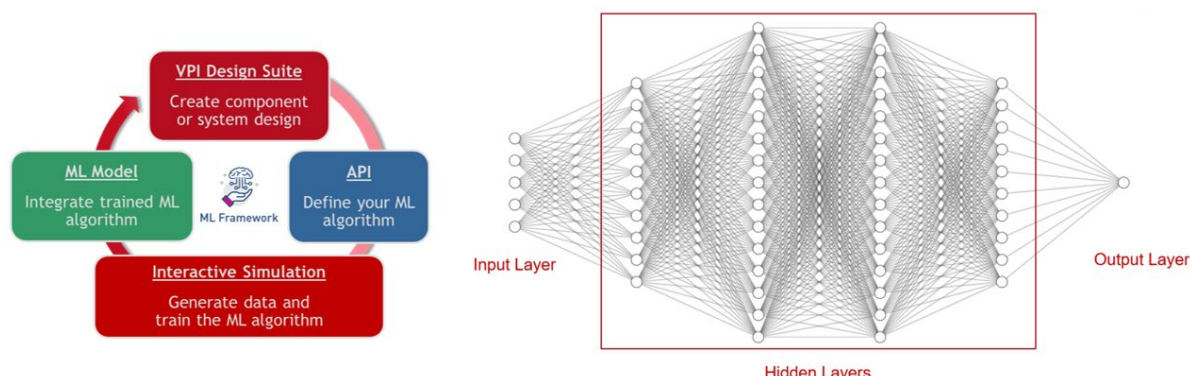


Abbildung 17: Konzept einer Simulationsumgebung für die Generierung von Trainingsdaten und Training von KI-Methoden (links). Implementation eines DNN Models (rechts).

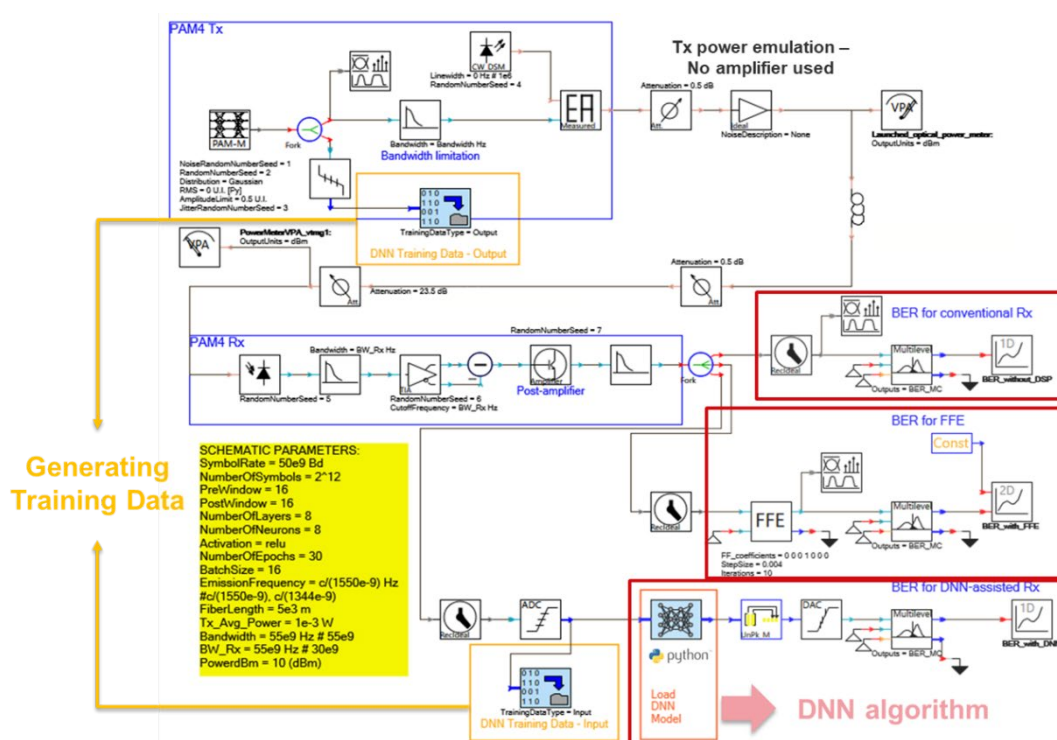


Abbildung 18: Simulationssetup für die Erstellung von Trainingsdaten und das Training des DNN Models.

KI-Algorithmen für die Signal Entzerrung

Für die kohärente Übertragung untersuchten wir die Möglichkeit, verschiedene Clustering-Algorithmen (CA) [26] zu verwenden, um die Nichtlinearitäten von Sender und Faser zu kompensieren. Die CA halfen bei der Festlegung der Entscheidungsschwellen. Wir verglichen vier Methoden, wobei all, bis auf der K-Means Methode nichtlineare Schwellen nutzen. Unsere Untersuchungen ergaben, dass durch den Einsatz von CA bei der Festlegung der Entscheidungsschwellen deutlich bessere BERs erzielt werden können für Signale mit einer Extinktionsrate von 8 dB oder besser. Diese Ergebnisse veröffentlichten wir [27]. Geplante Untersuchungen zum Einsatz weiterer Clustering Methoden für kohärente DP-QPSK Übertragungssysteme wurden nicht weiter fortgesetzt, da wir uns auf die Arbeiten zu PAM-4 basierten Systemen fokussierten.

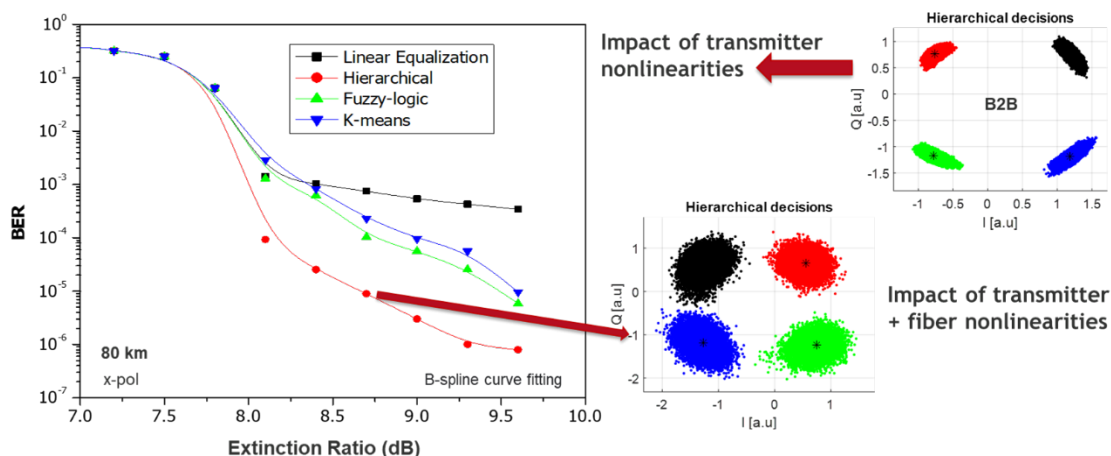


Abbildung 19: Ergebnisse der unterschiedlichen Clustering Methode.

Die Untersuchungen des 100G PAM PON Systems haben gezeigt, dass die chromatische Dispersion (CD) und die Nichtlinearität der Komponenten die Übertragungsqualität erheblich beeinträchtigen können. Eine KI-gestützte Entzerrung könnte einen Vorteil gegenüber konventionellen adaptiven linearen Filteralgorithmen haben.

Am Sender und Empfänger haben wir die PAM-4 Symbole mit einem Sample-pro-Symbol (SpS) als Trainingsdatensatz gespeichert. Wir haben zunächst Daten für Signalübertragungen im O- und C- Band in Bezug auf einzelne physikalische Effekte wie CD, Chirp und senderseitigen Jitter erzeugt. Wir betrachteten unterschiedliche Streckenlängen von 3 bis 11 km und variierten den quadratischen Mittelwert sowie die maximale Amplitudenschwankung in Bezug auf den Jitter. Schließlich wurde ein weiterer Datensatz für realistische Fälle mit allen Effekten generiert.

Erste Ergebnisse mit einem DNN zeigen eine Verbesserung der Übertragungsqualität im Vergleich zur Nutzung eines konventionellen (FFE).

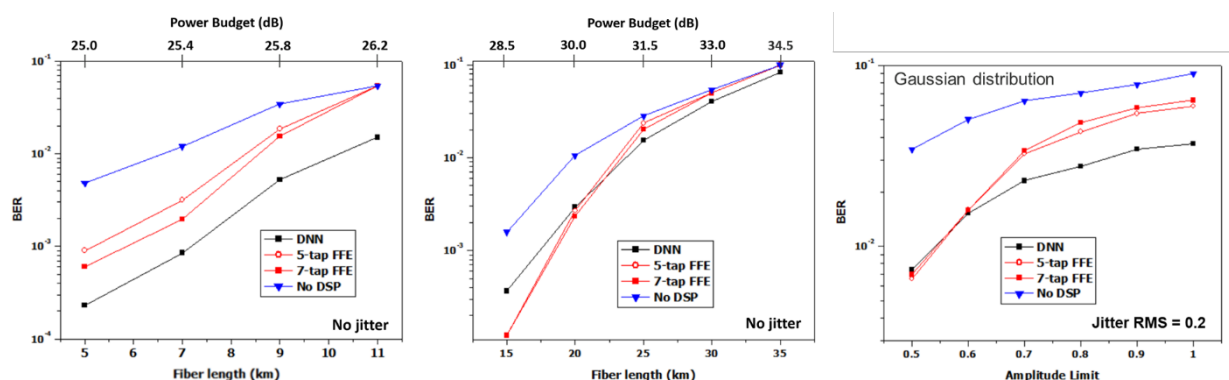


Abbildung 20: BER-Performanz bezüglich CD in C-Band (links) und O-Band (Mitte); Jitter in O-Band (rechts) für unterschiedliche Entzerrer Methoden.

In Kooperation mit unserem Partner von AIFB wurde auch ein neuer KI Algorithmus entwickelt. Dieser basiert auf einem SCInet (Sampling-Convolutional and Interaction Network) mit integrierter Frequenzkalibrierung (FC) [28].

Das FC-SCInet Model besteht aus drei Schlüsselkomponenten: Preprocess, Decomp und SCIBlock. Im ersten Prozessschritt wird das Signal normalisiert und in einen Tensor umgewandelt. Anschließend wird das Signal mit einem gleitenden Mittelwertfilter in zwei

Komponenten (niederfrequente und hochfrequente) aufgeteilt. Der hochfrequente Anteil wird in SCINet Block in gerade und ungerade Element weiter aufgeteilt und mit einem 1D Convolutional Layer verarbeitet. Dieser Prozess wird Interactor genannt und wird mehrmals im SCINet Block wiederholt. Danach wird der hochfrequente Anteil wieder mit den niederfrequenten Werten zusammengefügt und in einem Convolutional Layer noch einmal gemeinsam verarbeitet. Der Output entspricht mit trainierten Gewichten dem entzerrten Signal.

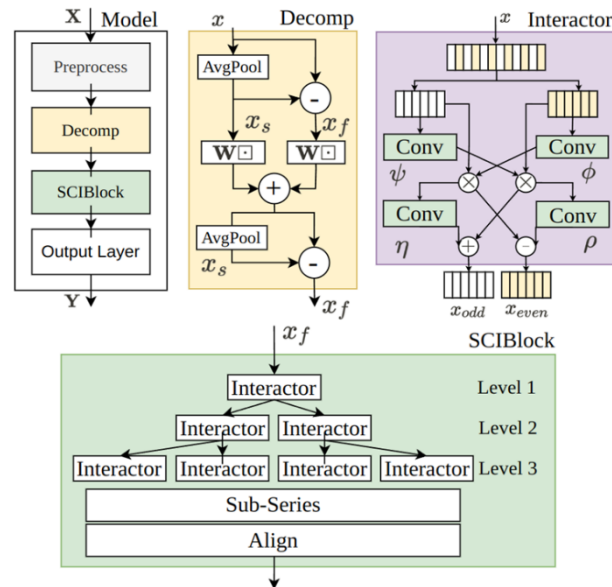


Abbildung 21: Blockdiagramm des FC-SCINet Modells.

Das FC-SCINet Modell wurde mit einem DNN Modell und mit einem linearen Entzerrer verglichen. Dabei wurde die Distanz variiert und die Sendeleistung auf 10 dBm fixiert, so dass ein Link Budget von 28.7 dB erreicht wurde. Die restlichen Parameter entsprachen dem 100G PAM-4 PON Referenzsystem. Die Parameter des DNN Modells wurden dabei für jede Distanz optimiert. Insgesamt wurden zwei Fälle betrachtet und eine Komplexitätsanalyse durchgeführt. Im ersten Szenario wurde nur die chromatische Dispersion betrachtet. Im zweiten Fall wurden alle Effekte aktiviert. Diese beinhalteten neben CD auch den nichtlinearen Kerr-Effekt und den stochastischen Timing Jitter beim Sender.

Die Komplexität wurde anhand der Anzahl der Multiplikationen von reellen Werten pro Symbol (RMpS) nach [29] bestimmt. Dieser ist bei einem optimierten DNN Modell mit drei Schichten mit jeweils 60 künstlichen Neuronen in der ersten Schicht, 64 in der zweiten und 18 in der letzten Schicht um etwa 10% komplexer als das neue FC-SCINet Modell.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden noch während der Projektlaufzeit zur OFC 2024 eingereicht und inzwischen auch veröffentlicht [30].

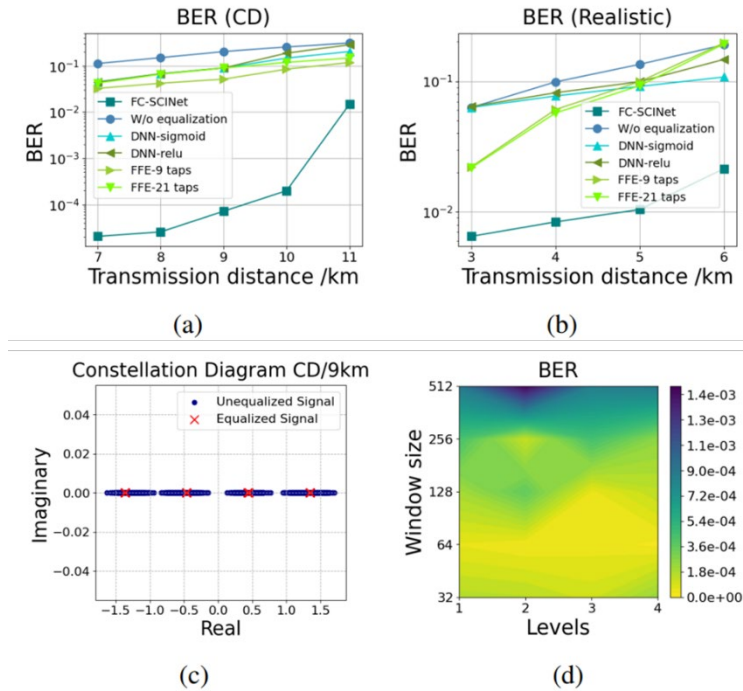


Abbildung 22: BER Ergebnisse von FC-SCINet, DNN, FFE und ohne Entzerrung für unterschiedliche Fälle (a,b); Konstellationsdiagramm (c) und 2D Parameterbetrachtung (d).

KI-Algorithmen für die Überwachung und frühzeitige Fehlererkennung in PONs

In Zusammenarbeit mit Nokia und AIFB wurden geeignet KI-Algorithmen für die Eventklassifizierung anhand von OTDR Leistungsprofilen untersucht. Ziel war es, die erfolgreiche Zuweisung einer Ereignisklasse (Reflexion, Dämpfung oder kein Ereignis) zu jedem der diskreten Zeitschritte im OTDR Profil zu erreichen. Mithilfe der KI sollen zunächst Informationen über die Netzinfrastruktur in einer Region gewonnen werden, welche dann für Überwachung bzw. Erkennung von Anomalien genutzt werden können.

Um die Performanz der Klassifizierung zu verbessern, wurden emulierte OTDR-Daten von unterschiedlichen PON-Architekturen für das Training generiert. Die im Labor gemessenen Daten sollten anschließend als reine Testdaten genutzt werden.

Zwei KI Methoden wurden untersucht. Die erste Methode nutzt ein Ensemble Classifier Modell, das lernt und über mehrere Klassifizierungsmethoden aggregiert. Es wurde ein Random Forrest Modell [31] als Basis eingesetzt. Das zweite Modell basiert auf der LSTM (Long Short Term Memory) Architektur [32]. Diese kann sehr gut sequentielle zeitabhängige Daten mithilfe von rekurrenten Verbindungen verarbeiten.

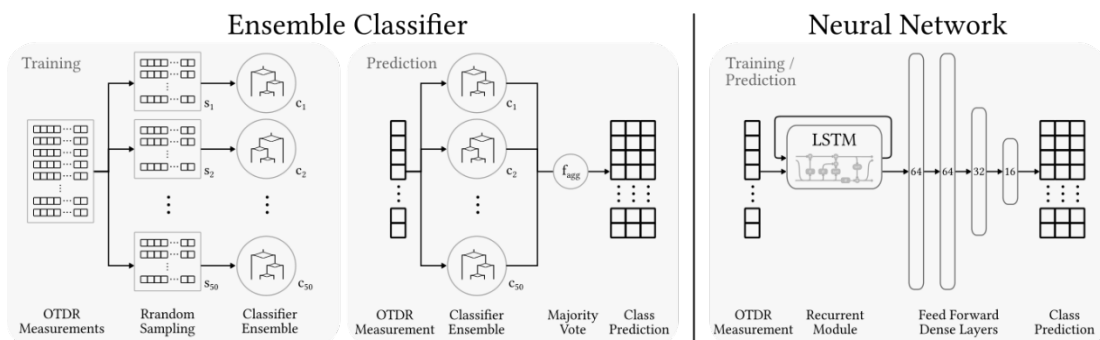


Abbildung 23: KI Methoden für die Ereignisklassifizierung.

So konnte mit dem Ensemble Classifier eine 96% Erkennungsrate erreicht werden, wenn mit den gemessenen OTDR Daten trainiert wurde. Mit dem zusätzlichen Wissen der Faserverlegung konnten bei den Ereignissen auch die Ursache (z. B., Splitter, Faserende) identifiziert werden. Die vorläufigen Ergebnisse wurden in [33] veröffentlicht.

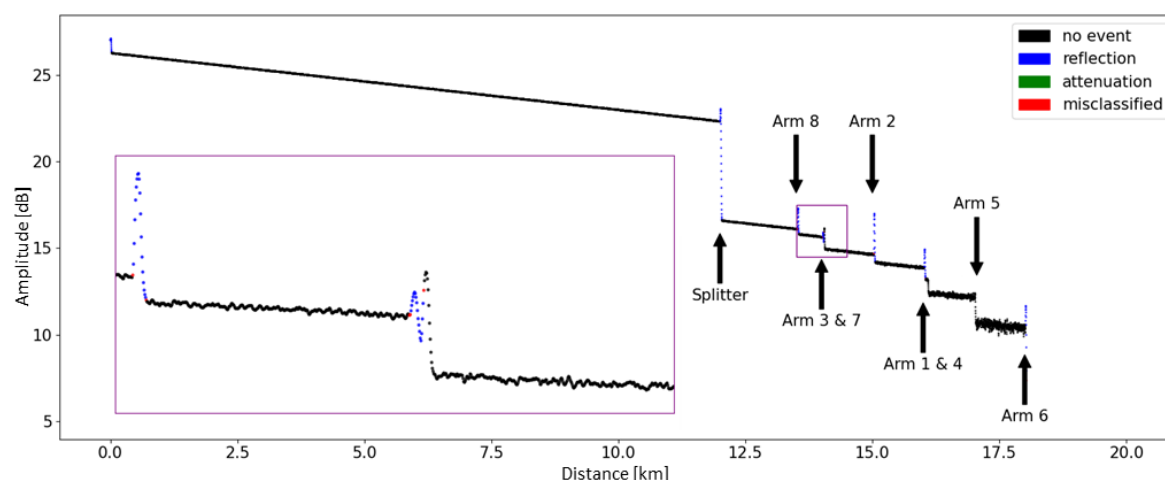


Abbildung 24: Eventklassifizierung mit KI Algorithmen für jeden Datenpunkt.

Durch weitere Optimierungen erhöhten wir die Erkennungsrate auf 98% mit dem Ensemble Classifier. Eine 70% Erkennungsrate konnte erreicht werden, wenn mit reinen emulierten Daten trainiert wurde. Dies ist auf die fehlende Auflösung und die Nutzung von parametrisierten Daten zurückzuführen. Eine numerische simulierte Pulsausbreitung und Reflexion könnte zu einer Verbesserung der Erkennungsrate führen. Die gesamten Ergebnisse der Untersuchung wurden in einem Journal [34] veröffentlicht.

4.4 Integration der Ergebnisse in einen Demonstrator

Abschlussevent

Im Konsortium wurden mögliche Demonstratoren vorgeschlagen, auf ihre Durchführbarkeit überprüft und potenziell angepasst. Darauf aufbauend wurde eine Liste von verschiedenen Projektdemonstratoren mit entsprechenden Anforderungen erstellt. Involvierte Projektpartner entwickelten gemeinsam in kleiner Runde ein Konzept, welches dann im Sommer 2023 umgesetzt werden sollte. Auch wurden die örtlichen Gegebenheiten besprochen, sowie ein verantwortlicher Projektpartner bestimmt. So wurde beispielsweise für den RA Demonstrator das KIT-Campus-Ost als geeigneten Standort ausgewählt. Insgesamt wurden drei Standort ausgewählt: KIT-Campus-Ost, Campus-Süd und TelemaxX.

Die Forschungsergebnisse von VPI wurden in verschiedenen Demonstratoren integriert und an den unterschiedlichen Standorten vorgestellt. So wurde mittels *VPIlinkConfigurator* die Referenzinfrastruktur vorgestellt, und ein Laborsetup in der Simulationsumgebung *VPItransmissionMaker Optical Systems* als Referenz nachgebaut.



- 1] R. Giffinger, C. Fertner, H. Kramar, R. Kalasek, N. Milanovi, E. Meijers, "Smart cities - Ranking of European medium-sized cities, 2007".
- 2] B. N. Silva, M. Kahn, K. Han, "Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities," Sustainable Cities and Society, vol. 38, pp. 697-713, Apr. 2018.
- 3] E. Ackerman, "What Full Autonomy Means for the Waymo Driver." [Online]. Available: <https://url.fzi.de/72565>.
- 4] A. Alshammari, D. B. Rawat, "Intelligent Multi-Camera Video Surveillance System for Smart City Applications," in CCWC, 2019.
- 5] Z. Wang, G. Wu, M. J. Barth, "A review on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) systems: Architectures, controls, and applications," ITSC, 2018.
- 6] D. Cmara, C. Bonnet, F. Filali, "Propagation of Public Safety Warning Messages: A Delay Tolerant Network Approach," in WCNC, 2010.
- 7] ITU-T G.9804.3 (09/2021).
- 8] IEEE Standard 802.3caTM-2020.
- 9] T. Pfeiffer, "PON going beyond FTTH," J. of Opt. Com. and Networking, vol. 14, no. 1, A31-A40, Jan. 2022.
- 10] D. Bogdoll, P. Matalla, C. Füllner, C. Raack, S. Li, T. Käfer, S. Orf, M.R. Zofka, F. Sartoris, C. Schweikert, T. Pfeiffer, A. Richter, S. Randel, R. Bonk, "Kiglis: Smart Networks for Smart Cities," 2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Sep 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISC253183.2021.9562826.
- 11] <https://qgis.org/de/site/> (Stand: 24.04.2023).
- 12] V. Houtsma et al., "Transceiver technologies for passive optical networks: past, present, and future," J. of Opt. Commun. and Netw., vol. 13, no. 1, 2021.
- 13] N. Suzuki, H. Miura, K. Matsuda, R. Matsumoto, K. Motoshima, "100 Gb/s to 1 Tb/s Based Coherent Passive Optical Network Technology," in Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 8, pp. 1485-1491, 15 April 15, 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2785341.
- 14] M. M. H. Adib et al., "Colorless Coherent TDM-PON Based on a Frequency-Comb Laser," in Journal of Lightwave Technology, 2022.
- 15] M. Adib et al., "Subcarrier-Based Coherent PON Architecture for a Converged Fiber Infrastructure in Smart Cities," in Advanced Photonics Congress (APC), 2022.
- 16] J. Wei, C.F. Lam, J. Zhou, I. Aldaya, E. Giacomidis, A. Richter, Q. Cheng, R. Pentty, I. White, "Low

- Complexity DSP for High Speed Optical Access Networking," *Applied Sciences* 2021, 11, no. 8: 3406, doi.org/10.3390/app11083406.
- [17] V. Houtsma et al., "Transceiver technologies for passive optical networks: past, present, and future," *J. of Opt. Commun. and Netw.*, vol. 13, no. 1, 2021.
 - [18] K. Zhang et al., "Performance comparison of DML, EML and MZM in dispersion-unmanaged short reach transmissions with digital signal processing," *Opt. Exp.*, vol. 26, no. 26, 2018.
 - [19] IEEE Standard 802.3bs™-2017
 - [20] OIF-CEI-04.0x.
 - [21] D. Khomchenko, A. Richter, J. Farina, "Automated Link Loss Compensation and Cost Effective Amplifier Placement in XHaul Optical Networks," *ONDM 2020*, Barcelona, Spain, May 18 – 21 2020.
 - [22] OTDR Trace Training Data. <https://www.kaggle.com/datasets/johannesreber/otdr-trace-training-data>. Accessed 19. 12.2023.
 - [23] J. Mata et al., "Application of Artificial Intelligence Techniques in Optical Networks," 2018 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), Waikoloa, HI, USA, 2018, pp. 35-36, doi: 10.1109/PHOSST.2018.8456691.
 - [24] F. Musumeci et al., "An Overview on Application of Machine Learning Techniques in Optical Networks," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1383-1408, Secondquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2880039.
 - [25] <https://www.tensorflow.org/> (Stand 24.04.2023)
 - [26] E. Giacomidis, Y. Lin, M. Blott, L.P. Barry, "Real-time machine learning based fiber-induced nonlinearity compensation in energy-efficient coherent optical networks ", *APL Photonics*, vol. 5, no. 041301, 2020, doi.org/10.1063/1.5140609.
 - [27] J. Wei, E. Giacomidis, J. Zhou, M. A. Jarajreh, S. Li, I. Aldaya, Y. Lu, A. Tsokanos, A. Richter, "Effective handling of nonlinear distortions in CO-OFDM using affinity propagation clustering," *Opt. Express* 30, 15697-15707 (2022).
 - [28] M. Liu, et al., "SCINet: Time Series Modeling and Forecasting with Sample Convolution and Interaction," *arXiv preprint: arXiv:2106.09305v3*, 2022.
 - [29] P. J. Freire, et al., "Performance Versus Complexity Study of Neural Network Equalizers in Coherent Optical Systems," *IEEE JLT* 39(19), 6085-6096 (2021).
 - [30] C. Shao, S. M. Billah, E. Giacomidis, S. Li, J. Lei, P. Sahu, A. Richter, T. Käfer, M. Färber, "Machine Learning in Short-Reach Optical Systems: A Survey on PONs," submitted to the Special Issue of *Photonics* (ISSN 2304-6732), 2024.
 - [31] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, "Random Forests," in *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, Springer New York, 2009, pp. 587-604
 - [32] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, "Sequence Modeling: Recurrent and Recursive Nets," *Deep learning*, MIT press Cambridge, MA, USA, 2016, 367-415
 - [33] M. Straub, T. Saier, J. Reber, R. Borkowski, S. Li, A. Richter, M. Färber, T. Käfer R. Bonk, "AI-based OTDR event detection, classification and assignment to ODN branches in passive optical networks," 49th European Conference on Optical Communications (ECOC 2023), Hybrid Conference, Glasgow, UK, 2023, pp. 1146-1149, doi: 10.1049/icp.2023.2469.
 - [34] M. Straub, J. Reber, T. Saier, R. Borkowski, S. Li, D. Khomchenko, A. Richter, M. Färber, T. Käfer, R. Bonk, "ML approaches for OTDR diagnoses in passive optical networks—event detection and classification: ways for ODN branch assignment," *J. Opt. Commun. Netw.* 16, C43-C50 (2024)

Inhaltliche Zusammenfassung

Zuwendungsempfänger: VPIphotonics GmbH	Förderkennzeichen: 16KIS1230
Verfahren der Künstlichen Intelligenz für die Optimierung der Glasfasernetze am Beispiel einer intelligenten Stadt (KIGLIS)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 – 31.10.2023	
Ansprechpartner Shi Li, Dr. Elias Giacomidis (technischer) Harald Fleick (administrativer)	

1 Zielstellung und Ablauf

Ziel des Projektes KIGLIS war es, ein optisches und KI-gestütztes Referenznetzwerk für zukünftige digitalisierte Städte zu entwerfen (KI: künstliche Intelligenz). Dabei sollte die Einbindung von künstlicher Intelligenz in den unterschiedlichen Bereichen der Infrastruktur erforscht werden.

Der Fokus von VPIphotonics (VPI) lag auf der Entwicklung von softwarebasierten Design- und Planungswerkzeugen, mit denen die KI Methoden in den unterschiedlichen Bereichen wie die Signalentzerrung trainiert, getestet und validiert werden können. Um diesen Zielen gerecht zu werden, wurden neue Modelle geschaffen, prototypisch eingebunden und validiert, sowie Untersuchungen zu exemplarischen Anwendungen durchgeführt. Softwarebasierte Design- und Planungsumgebungen von VPI konnten dafür unter Einbeziehung von Schnittstellen zur Cosimulation genutzt werden. Die Aufgaben konnten zielstrebig angegangen werden auch dank eigener umfangreicher Vorkenntnisse bzgl. der Simulation optischer Übertragungsstrecken, veröffentlichter Erkenntnisse zu modernen Technologien, sowie Informationen von Kunden und Partnern.

2 Projektergebnisse

Entsprechend der Zielsetzung des Vorhabens wurden Modelle und Algorithmen entwickelt, welche Simulationen und Planungen von Anwendungen in Zugangs- und Metronetzbereich zukünftiger digitalisierter Städte unter Einsatz von KI-Methoden ermöglichen. Folgende Themen wurden adressiert, welche eng verzahnt mit den Aktivitäten der Partner in KIGLIS durchgeführt wurden:

- Erstellung einer Anforderungsliste für zukünftige optische Zugangsnetze
- Untersuchung und Optimierung von hochbitratigen passiv optischen Netztechnologien
- Entwicklung einer Testumgebung für die Generierung von Trainingsdaten und das Trainieren und Testen von KI-Methoden
- Untersuchung und Entwicklung von KI-Methoden für die Signalentzerrung
- Entwicklung von geeigneten Methoden für die Generierung von Überwachungsdaten in optischen Zugangsnetzen.

Im Folgenden sind wichtige Ergebnisse zusammengefasst.

Wir erstellten zusammen mit den Partnern die Definition eines Infrastrukturkonzeptes basierend auf den Anforderungen einer zukünftigen digitalisierten Stadt (Smart City). Als Referenzstadt wurde Karlsruhe festgelegt. Anhand von 30 betrachteten Anwendungen mit Fokus auf Netzwerklatenz und benötigter Bandbreite wurden vier repräsentative Applikationen festgelegt, welches als Grundlage für eine Referenzarchitektur dienten. Im Mittelpunkt des Infrastrukturkonzeptes steht das optische Glasfaser-basierte Zugangsnetz, das alle derzeit verfügbaren Funknetzwerke unterstützt. Zusätzlich dazu muss die neue Referenzinfrastruktur die hohen Datenmengen, bestehend aus Sensoren und neuen Diensten, möglichst in Echtzeit übertragen. Dazu sollten mindestens 100 Gbps für eine maximale Reichweite von 20 km verfügbar sein. In Bezug auf den Glasfaserausbau sollte eine Latenzzeit von unter 1 ms mit einer Zuverlässigkeit von 99.999% für die zukünftigen Anwendungen erreicht werden. In Zusammenarbeit mit den Partnern wurde das

Referenznetzwerk anhand topologischer Daten in der Erweiterung eines Netzplanungstools von VPI erstellt.

Wir beschäftigten uns mit den technologischen Herausforderungen in optischen Zugangsnetzen, um die Anforderungen der Referenzarchitektur zu gewährleisten. Als Ausgangspunkt wurden die aktuell verfügbaren Technologien in diesem Bereich analysiert. In Hinblick auf die Kosten und Nachhaltigkeit sollte das Referenznetz auf einem KI-unterstützten passiv optischen Netz (PON) basieren.

Mögliche PON Systemlösungen, die einerseits auf der traditionellen Intensitätsmodulation und Direktdetektion (IM/DD) als auch andererseits auf kohärenter Technologie aufbauen, wurden entwickelt und in einer gegebenen Simulationsumgebung von VPI untersucht. Das IM/DD System basierte auf der vierstufigen Pulse Amplituden Modulation (PAM-4). Dabei wurden unterschiedliche Komponenten und Systemaspekte auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht und optimiert. Als kohärente PON Lösung wurde eine frequenzkamm-basierte Architektur betrachtet und ebenfalls auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. Für die Bewertung der Verbindungsqualität wurden unterschiedliche Möglichkeiten untersucht. Für die IM/DD Systeme implementierten wir u.a. die erweiterte TDEC (Time and Dispersion Eye Closure) Methode, welche NRZ-basierte Systeme mit höheren Bitraten und zusätzlichem Entzerrer unterstützt.

Weiterhin erstellten wir charakteristische Überwachungsdatensätze von unterschiedlichen PON-Topologien mithilfe von Funktionalitätserweiterungen in einer Netzplanungssoftware von VPI. Anhand von leistungsgemittelten Signaldaten erstellten wir diverse Datensätze, mit denen unterschiedliche PON Topologien emuliert werden können. Mithilfe dieser Daten können Glasfasernetze charakterisiert und die Fehlersuche vereinfacht werden.

Durch die Entwicklung von geeigneten KI-gestützten Algorithmen sollten die technologischen Herausforderungen der Referenzinfrastruktur überwunden werden. Hierzu wurden Anwendungsbereiche identifiziert, wo KI-Methoden konventionellen Methoden der digitalen Signalverarbeitung überlegen sind. In Absprache mit den Projektpartnern wurde eine Python-Testumgebung in unserer Simulationsumgebung aufgebaut und verschiedene Anwendungsfälle betrachtet.

Insbesondere untersuchten wir, inwiefern KI-Methoden als digitale Signalentzerrer im Vergleich zu herkömmlichen DSP Methoden eingesetzt werden könnten. Für kohärente Systeme verglichen wir verschiedene Clustering Algorithmen für die Kompensation der Nichtlinearitäten von Sender und Faser. Für ein IM/DD 100G PON PAM-4 Szenario verglichen wir unterschiedliche KI Methoden mit einem linearen Entzerrer. Es wurde ein neuer KI-Algorithmus basierend auf der SCInet (Sampling-Convolutional and Interaction Network) Methode mit integrierter Frequenzkalibrierung entwickelt. Wir konnten zeigen, dass diese Methode Verbesserungen in Bezug auf Komplexität und Performanz gegenüber herkömmlichen neuronalen Netzen bieten kann.

Weiterhin untersuchten wir die Möglichkeit mithilfe von KI und experimentell bzw. simulativ erzeugter OTDR Daten diskrete Ereignisse in einem PON (z.B. Reflexion, Dämpfung) zu klassifizieren. So sollten damit zunächst Informationen über die lokale Netzinfrastruktur gesammelt und später für die Erkennung von Anomalien eingesetzt werden. Verschiedene KI-Methoden wurden für die Ereigniserkennung untersucht, wobei die Ensemble Classifier Methode die besten Ergebnisse lieferte.

Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden verschiedene Demonstratoren geplant und im Rahmen eines Abschlussevents an unterschiedlichen Standorten in Karlsruhe durchgeführt. Einzelne Forschungsergebnisse von VPI zur Referenzinfrastruktur und der simulativen Referenzabbildung eines Laborsetups wurden in den Demonstratoren integriert.

3 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dank der Projektarbeiten konnten neue Trends rechtzeitig erkannt werden und Informationen zur Anwendung in die Erforschung neuer Modelle und Dienstleistungen einfließen. Insbesondere wurde das Wissen in den Bereichen zukünftiger passiv optischer Zugangsnetze sowie KI-gestützter Methoden zur digitalen Signalverarbeitung und zur Erkennung von Netzwerkanomalien deutlich erhöht.

Ziel der Maßnahmen war es, die Marktführerschaft im Bereich Simulationssoftware für optische Kommunikationssysteme zu stärken und den Einsatzbereich einer Planungssoftware für optische Netzwerke zu erweitern. Dies konnte erreicht werden. Gewonnene Ergebnisse sind Grundlage von Spezifikationen neuer Produkteigenschaften. Über das Angebot von Dienstleistungen zur Planung und zum Design von KI-basierten optischen Zugangsnetzen sowie adäquaten Technologien sollen neue Umsatzströme erschlossen werden.

Wichtige Ergebnisse wurden als Teil von Beiträgen für technische Fachzeitschriften und -kongresse veröffentlicht. Auf Fachmessen mit Ausstellungsmöglichkeiten (ECOC 2021-23, OFC 2022-23) wurden Ergebnisse der Öffentlichkeit präsentiert und mit Kunden diskutiert. Ein besonderes Highlight war das Thema der Implementierung einer Python-Testumgebung für die Entwicklung von KI-Algorithmen zum Einsatz in Simulations- und Planungstools für optische Übertragungssysteme und Netzwerke.