

Zuwendungsempfänger: Gesellschaft für Angewandte Mikro- und Optoelektronik mit beschränkter Haftung	Förderkennzeichen: 16KIS1291
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: AI-NET-PROTECT Teilvorhaben: Photonisches integriertes System für optisch neuromorphe Netzwerküberwachung	
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2021 - 30.06.2024	
Berichtszeitraum: 01.02.2021 - 30.06.2024	

Die Autoren: Dr. Rijil Thomas
 Dr. Stephan Suckow

Kurzbericht

Das Teilprojekt "Optische neuromorphe Telemetrie", an dem AMO maßgeblich beteiligt ist, zielt auf die Entwicklung eines siliziumbasierten photonischen integrierten Schaltkreises (PIC) ab, der für neuromorph unterstützte Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) bei der Überwachung optischer Netze zugeschnitten ist. Unter mehreren Möglichkeiten haben wir uns für die Modulationsformaterkennung (MFI) entschieden, um das Potenzial eines solchen Systems zu demonstrieren. Die Unteraufgabe von AMO spielt eine Schlüsselrolle bei der Schaffung der photonischen Hardwaregrundlage, die für die Realisierung dieser intelligenten optischen Netze unerlässlich ist. Zu den spezifischen Aufgaben von AMO gehörten die Planung, das Design und die Herstellung des photonischen Reservoir-Hardware-Beschleunigers auf dem siliziumbasierten PIC. AMO leitete die Erstellung eines Subsystemmodells für den photonischen Reservoir-Chip und führte numerische Simulationen dieser Bauelemente durch. Wir modellierten und entwarfen passive integrierte Systemkomponenten, führten Prozessentwicklung und -herstellung durch und charakterisierten Testchips mit diesen passiven Komponenten, deren Bemühungen zum Entwurf und zur Herstellung eines neuromorphen PIC namens NeuroPIC führten. Darüber hinaus mussten die folgenden Teilziele oder Meilensteine erreicht werden:

- 1. Generation des neuromorphen PIC
- Neuromorpher PIC mit erweiterten Funktionen

Neuromorphe Designs wie optische künstliche neuronale Netze nutzen die parallele Verarbeitung auf photonischen Plattformen, wodurch Engpässe reduziert und die Energieeffizienz im Vergleich zu herkömmlichen, auf der von-Neumann-Architektur basierenden KI-Implementierungen erheblich verbessert werden. Die Silizium-auf-Isolator (SOI)-Technologie hat sich aufgrund ihrer geringen optischen Verluste und hohen Integrationsdichte als ideale Plattform für diesen Zweck erwiesen. Darüber hinaus ist SOI aufgrund des hohen thermooptischen Koeffizienten von Silizium der beste Kandidat, um energieeffiziente, gewichtsgesteuerte optische Schalter am Ausleseabschnitt des photonischen Speichers in Betracht zu ziehen. Photonic Reservoir Computing, eine für optische Plattformen optimierte Variante des maschinellen Lernens, ermöglicht eine passive, energieeffiziente Signalverarbeitung durch Nutzung von Interferenzmustern in optischen Wellenleitern. Mit Komponenten wie Phasenschiebern und Multimode-Interferometern (MMI) bieten SOI-basierte photonische Reservoirs eine skalierbare, kompakte Lösung für die Implementierung neuromorpher Funktionen, was sie zu einer vielversprechenden Wahl für die Weiterentwicklung intelligenter optischer Netzwerke macht.

In diesem Projekt konzentrierte sich AMO auf einen kompletten passiven photonischen Schaltkreis. Die Liste der verwendeten passiven Komponenten umfasst Gitterkoppler, Multimode-Interferenzkoppler (MMIs), Verzögerungstrecken, d.h. Wellenleiter bestimmter Länge, und Wellenleiterkreuzungen. Bei den Gitterkopplern untersuchten wir einen inversen Designansatz, der zu einem ungleichmäßigen, frei apodisierten Gitter führte. Obwohl die simulierten Ergebnisse eine Kopplungseffizienz von ~65% im Vergleich zu ~54% für standardmäßige homogene Gitterkoppler versprochen, haben wir das homogene Gitterdesign aus der AMO-Standardbibliothek verwendet, das bereits vor diesem Projekt verifiziert und getestet wurde, da die experimentelle Charakterisierung der hergestellten Gitter mit inversem Design keine besseren Ergebnisse als die standardmäßigen homogenen Gitter ergab. Als Wellenleiterdesign wurde ein flach geätzter Rippenwellenleiter gewählt, um die Verluste im Vergleich zu Streifenwellenleitern zu verringern. Zu den weiteren Komponenten gehören ein 3x3 MMI und eine Wellenleiterkreuzung, die zusammen mit dem Wellenleiter modelliert/simuliert, hergestellt und an einem Test-PIC mit Designvariationen getestet wurde, um das Bauelement-Design zu optimieren und den Prozess zu entwickeln. Die 3x3-MMIs aus der Testwafer-Charakterisierung zeigten eine nahezu perfekte gleichmäßige Aufteilung des Lichts auf alle 3 Ausgänge (-4,77 dB pro Ausgang), für alle drei Eingangsanschlüsse. Die Notwendigkeit der Wellenleiterkreuzung ergibt sich aus den Zwängen des 2D-Layouts,

wenn die Ein- und Ausgänge von jedem der 16 Knoten/MMI der so genannten 4-Port-Architektur zu dem Array von 16 Eingangs- und 16 Ausgangs-Gitterkopplern auf der linken und rechten Seite des 4-Port-Reservoir-Layouts geführt werden. Eine einfache und direkte Wellenleiterkreuzung aus der Testwafercharakterisierung wies einen Übertragungsverlust von 1,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -28 dB in den orthogonalen Armen auf, während das Kreuzungsdesign mit optimierten Armen einen Übertragungsverlust von weniger als <0,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -30 dB in den orthogonalen Armen aufwies. Das optimierte Design gewährleistet somit nahezu verlustfreie Kreuzungen.

Nach einer anfänglichen Prozessentwicklung und -optimierung betrug der gemessene Wellenleiterverlust des ersten erfolgreichen Wafers 5,9 dB/cm. Das Reservoir mit 4-Port-Architektur wurde dann mit diesen Komponenten und ihren oben genannten Leistungswerten entworfen und hergestellt. Das Layout wurde so gestaltet, dass alle 16 Knoten oder die 3x3 MMI in einem 4x4-Gitter angeordnet sind, das mit den benachbarten Knoten durch Verzögerungsstrecken bestimmter Länge verbunden ist. Jedes 3x3 MMI erweitert außerdem einen seiner Ports von jeder Seite zur linken und rechten Seite des Reservoirs, was den Zugang zu allen Knoten mit einem Paar Faserarrays (FA) auf beiden Seiten durch 16 Gitterkoppler auf jeder Seite des Reservoirs ermöglicht. Im Laufe des Projekts wurden Maßnahmen zur Prozessverbesserung durchgeführt, z. B. Änderungen der lithografischen Parameter, Untersuchung des Reinigungs- und Einkapselungsprozesses, Änderung des Einkapselungsmaterials usw., um die Wellenleiterverluste zu verbessern. Durch diese Maßnahmen konnten die Verluste von ursprünglich 5,9 dB/cm auf 1 dB/cm reduziert werden. Außerdem wurden drei NeuroPIC Generationen mit FA verklebt und in einem Gehäuse untergebracht, um die Handhabung und Charakterisierung zu erleichtern. Das erste NeuroPIC mit einem Verlust von 5,9 dB/cm wurde von AMO verpackt und war damit das Bauelement der ersten Generation, das zur weiteren Charakterisierung in den Systemteststand am Fraunhofer HHI integriert werden konnte. Aufgrund der manuellen Ausrichtung konnten die FA jedoch nicht perfekt mit dem erforderlichen Winkel ausgerichtet werden, wodurch sich die optimale Transmission von der zentralen C-Band-Wellenlänge (1550 nm) der Telekommunikation entfernte. Dies wurde behoben und verbessert, indem die nächsten beiden Highlight Bauelemente mit 2,6 dB/cm und 1 dB/cm Wellenleiterverlusten bei einem professionellen Dienstleister verpackt wurden. Das zweite verpackte Bauelement war somit das NeuroPIC der zweiten Generation mit verbesserten Verlusten und FA-Ausrichtung. Anstatt für das zweite Projektziel einen NeuroPIC mit neuer Funktionalität zu entwickeln, wurde die Priorität auf die Lösung der Probleme gelegt, die bei dem Bauelement der ersten Generation festgestellt worden waren, nämlich die Verbesserung der Wellenleiterverluste und die Lieferung eines perfekt im C-Band ausgerichteten FA für die Charakterisierung im HHI. Das Bauelement der dritten Generation mit dem geringsten Verlust wurde gegen Ende des Projekts fertiggestellt und könnte in anderen zukünftigen Studien und Folgeprojekten verwendet werden.

Die Design-Parameter des Reservoir-PICs, wie z.B. die Länge der Verzögerungsstrecken, waren das Ergebnis von Diskussionen und Simulationsstudien mit unseren Partnern IDP GmbH und Fraunhofer HHI, die so optimiert wurden, dass sie bei einer Symbolrate von 32 GBaud mit minimalem Fehler funktionieren. Die neuromorphe Funktionalität des Reservoir-PICs wurde in einem vollständigen Transceiver-Teststand auf Systemebene am HHI mit einem kohärenten Empfänger charakterisiert, wobei vier verschiedene Modulationsformate - 4QAM, 16QAM, 32QAM und 64 QAM - mit 100%iger Genauigkeit erfolgreich klassifiziert wurden. Der NeuroPIC der zweiten Generation wurde vom HHI bei der abschließenden Projektdemonstration eingesetzt, bei der gezeigt wurde, dass das Endsystem mit integriertem NeuroPIC mit der Direct-Detect-Platine zwei Modulationsformate - 4QAM und 16QAM - mit 100 %iger Genauigkeit klassifizieren konnte.

Zuwendungsempfänger: Gesellschaft für Angewandte Mikro- und Optoelektronik mit beschränkter Haftung	Förderkennzeichen: 16KIS1291
Vorhabenbezeichnung: Verbundprojekt: AI-NET-PROTECT Teilvorhaben: Photonisches integriertes System für optisch neuromorphe Netzwerküberwachung	
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2021 - 30.06.2024	
Berichtszeitraum: 01.02.2021 - 30.06.2024	

Autoren: Dr. Rijil Thomas
Dr. Stephan Suckow

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzbericht und Einführung	3
2.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	5
	AK2.5 Optische neuromorphe Telemetrie	5
3.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
4.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten	16
5.	Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse	16
6.	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen	17
7.	Veröffentlichung der Ergebnisse	17

1. Kurzbericht und Einführung

Der Kurzbericht liegt auch als separater Bericht vor. Zur besseren Übersicht wird er hier wiederholt.

Das Teilprojekt "Optische neuromorphe Telemetrie", an dem AMO maßgeblich beteiligt ist, zielte auf die Entwicklung eines siliziumbasierten photonischen integrierten Schaltkreises (PIC) ab, der für neuromorph unterstützte Anwendungen der künstlichen Intelligenz (KI) bei der Überwachung optischer Netze zugeschnitten ist. Unter mehreren Möglichkeiten haben wir uns für die Modulationsformaterkennung (MFI) entschieden, um das Potenzial eines solchen Systems zu demonstrieren. Die Unteraufgabe von AMO spielt eine Schlüsselrolle bei der Schaffung der photonischen Hardwaregrundlage, die für die Realisierung dieser intelligenten optischen Netze unerlässlich ist. Zu den spezifischen Aufgaben von AMO gehörten die Planung, das Design und die Herstellung des photonischen Reservoir-Hardware-Beschleunigers auf dem siliziumbasierten PIC. AMO leitete die Erstellung eines Subsystemmodells für den photonischen Reservoir-Chip und führte numerische Simulationen dieser Bauelemente durch. Wir modellierten und entwarfen passive integrierte Systemkomponenten, führten Prozessentwicklung und -herstellung durch und charakterisierten Testchips mit diesen passiven Komponenten, deren Bemühungen zum Entwurf und zur Herstellung eines neuromorphen PIC namens NeuroPIC führten. Darüber hinaus mussten die folgenden Teilziele oder Meilensteine erreicht werden:

- 1. Generation des neuromorphen PIC
- Neuromorpher PIC mit erweiterten Funktionen

Neuromorphe Designs wie optische künstliche neuronale Netze nutzen die parallele Verarbeitung auf photonischen Plattformen, wodurch Engpässe reduziert und die Energieeffizienz im Vergleich zu herkömmlichen, auf der von-Neumann-Architektur basierenden KI-Implementierungen erheblich verbessert werden. Die Silizium-auf-Isolator (SOI)-Technologie hat sich aufgrund ihrer geringen optischen Verluste und hohen Integrationsdichte als ideale Plattform für diesen Zweck erwiesen. Darüber hinaus ist SOI aufgrund des hohen thermooptischen Koeffizienten von Silizium der beste Kandidat, um energieeffiziente, gewichtsgesteuerte optische Schalter am Ausleseabschnitt des photonischen Speichers in Betracht zu ziehen. Photonic Reservoir Computing, eine für optische Plattformen optimierte Variante des maschinellen Lernens, ermöglicht eine passive, energieeffiziente Signalverarbeitung durch Nutzung von Interferenzmustern in optischen Wellenleitern. Mit Komponenten wie Phasenschiebern und Multimode-Interferometern (MMI) bieten SOI-basierte photonische Reservoirs eine skalierbare, kompakte Lösung für die Implementierung neuromorpher Funktionen, was sie zu einer vielversprechenden Wahl für die Weiterentwicklung intelligenter optischer Netzwerke macht.

In diesem Projekt konzentrierte sich AMO auf einen kompletten passiven photonischen Schaltkreis. Die Liste der verwendeten passiven Komponenten umfasst Gitterkoppler, Multimode-Interferenzkoppler (MMIs), Verzögerungsstrecken, d.h. Wellenleiter bestimmter Länge, und Wellenleiterkreuzungen. Bei den Gitterkopplern untersuchten wir einen inversen Designansatz, der zu einem ungleichmäßigen, frei apodisierten Gitter führte. Obwohl die simulierten Ergebnisse eine Kopplungseffizienz von ~65% im Vergleich zu ~54% für standardmäßige homogene Gitterkoppler versprochen, haben wir das homogene Gitterdesign aus der AMO-Standardbibliothek verwendet, das bereits vor diesem Projekt verifiziert und getestet wurde, da die experimentelle Charakterisierung der hergestellten Gitter mit inversem Design keine besseren Ergebnisse als die standardmäßigen homogenen Gitter ergab. Als Wellenleiterdesign wurde ein flach geätzter Rippenwellenleiter gewählt, um die Verluste im Vergleich zu Streifenwellenleitern zu verringern. Zu den weiteren Komponenten gehören ein 3x3 MMI und eine Wellenleiterkreuzung, die zusammen mit dem Wellenleiter modelliert/simuliert, hergestellt und an einem Test-PIC mit Designvariationen getestet wurde, um das Bauelement-Design zu optimieren und den Prozess zu entwickeln. Die 3x3-MMIs aus der Testwafer-Charakterisierung zeigten eine nahezu perfekte gleichmäßige Aufteilung des Lichts auf alle 3 Ausgänge (-4,77 dB pro Ausgang), für alle drei Eingangsanschlüsse. Die Notwendigkeit der Wellenleiterkreuzung ergibt sich aus den Zwängen des 2D-Layouts, wenn die Ein- und Ausgänge von jedem der 16 Knoten/MMI der so genannten 4-Port-Architektur zu dem Array

von 16 Eingangs- und 16 Ausgangs-Gitterkopplern auf der linken und rechten Seite des 4-Port-Reservoir-Layouts geführt werden. Eine einfache und direkte Wellenleiterkreuzung aus der Testwafercharakterisierung wies einen Übertragungsverlust von 1,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -28 dB in den orthogonalen Armen auf, während das Kreuzungsdesign mit optimierten Armen einen Übertragungsverlust von weniger als <0,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -30 dB in den orthogonalen Armen aufwies. Das optimierte Design gewährleistet somit nahezu verlustfreie Kreuzungen.

Nach einer anfänglichen Prozessentwicklung und -optimierung betrug der gemessene Wellenleiterverlust des ersten erfolgreichen Wafers 5,9 dB/cm. Das Reservoir mit 4-Port-Architektur wurde dann mit diesen Komponenten und ihren oben genannten Leistungswerten entworfen und hergestellt. Das Layout wurde so gestaltet, dass alle 16 Knoten oder die 3x3 MMI in einem 4x4-Gitter angeordnet sind, das mit den benachbarten Knoten durch Verzögerungsstrecken bestimmter Länge verbunden ist. Jedes 3x3 MMI erweitert außerdem einen seiner Ports von jeder Seite zur linken und rechten Seite des Reservoirs, was den Zugang zu allen Knoten mit einem Paar Faserarrays (FA) auf beiden Seiten durch 16 Gitterkoppler auf jeder Seite des Reservoirs ermöglicht. Im Laufe des Projekts wurden Maßnahmen zur Prozessverbesserung durchgeführt, z. B. Änderungen der lithografischen Parameter, Untersuchung des Reinigungs- und Einkapselungsprozesses, Änderung des Einkapselungsmaterials usw., um die Wellenleiterverluste zu verbessern. Durch diese Maßnahmen konnten die Verluste von ursprünglich 5,9 dB/cm auf 1 dB/cm reduziert werden. Außerdem wurden drei NeuroPIC Generationen mit FA verklebt und in einem Gehäuse untergebracht, um die Handhabung und Charakterisierung zu erleichtern. Das erste NeuroPIC mit einem Verlust von 5,9 dB/cm wurde von AMO verpackt und war damit das Bauelement der ersten Generation, das zur weiteren Charakterisierung in den Systemteststand am Fraunhofer HHI integriert werden konnte. Aufgrund der manuellen Ausrichtung konnten die FA jedoch nicht perfekt mit dem erforderlichen Winkel ausgerichtet werden, wodurch sich die optimale Transmission von der zentralen C-Band-Wellenlänge (1550 nm) der Telekommunikation entfernte. Dies wurde behoben und verbessert, indem die nächsten beiden Highlight Bauelemente mit 2,6 dB/cm und 1 dB/cm Wellenleiterverlusten bei einem professionellen Dienstleister verpackt wurden. Das zweite verpackte Bauelement war somit das NeuroPIC der zweiten Generation mit verbesserten Verlusten und FA-Ausrichtung. Anstatt für das zweite Projektziel einen NeuroPIC mit neuer Funktionalität zu entwickeln, wurde die Priorität auf die Lösung der Probleme gelegt, die bei dem Bauelement der ersten Generation festgestellt worden waren, nämlich die Verbesserung der Wellenleiterverluste und die Lieferung eines perfekt im C-Band ausgerichteten FA für die Charakterisierung im HHI. Das Bauelement der dritten Generation mit dem geringsten Verlust wurde gegen Ende des Projekts fertiggestellt und könnte in anderen zukünftigen Studien und Folgeprojekten verwendet werden.

Die Design-Parameter des Reservoir-PICs, wie z.B. die Länge der Verzögerungsstrecken, waren das Ergebnis von Diskussionen und Simulationsstudien mit unseren Partnern IDP GmbH und Fraunhofer HHI, die so optimiert wurden, dass sie bei einer Symbolrate von 32 GBaud mit minimalem Fehler funktionieren. Die neuromorphe Funktionalität des Reservoir-PICs wurde in einem vollständigen Transceiver-Teststand auf Systemebene am HHI mit einem kohärenten Empfänger charakterisiert, wobei vier verschiedene Modulationsformate - 4QAM, 16QAM, 32QAM und 64 QAM - mit 100%iger Genauigkeit erfolgreich klassifiziert wurden. Der NeuroPIC der zweiten Generation wurde vom HHI bei der abschließenden Projektdemonstration eingesetzt, bei der gezeigt wurde, dass das Endsystem mit integriertem NeuroPIC mit der Direct-Detect-Platine zwei Modulationsformate - 4QAM und 16QAM - mit 100 %iger Genauigkeit klassifizieren konnte.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die von AMO durchgeführten Arbeiten beschrieben.

AP 2.5 Optische neuromorphische Telemetrie

Die Arbeiten wurden weitestgehend planmäßig durchgeführt. Es erfolgte eine Änderung des Teilziels „Neuromorpher PIC mit erweiterten Funktionen“, auf welche wir später detailliert eingehen.

Modellierung und Entwurf von passiven integrierten Systemkomponenten

Die anfänglichen Ziele des Projekts bestanden darin, die passiven Komponenten mit minimalen Verlusten zu modellieren, um den NeuroPIC zu bauen. Wir haben verschiedene Module von Ansys Lumerical verwendet, um sie zu simulieren. Die grundlegendste Komponente ist der Wellenleiter, der mit dem Lumerical MODE FDE Solver entworfen wurde. Abbildung 1a zeigt den Querschnitt des elektrischen Feldes des Wellenleiters. Wir haben einen flach geätzten Rippenwellenleiter mit 70 nm Ätztiefe bzw. 150 nm Rippenhöhe verwendet, um den Verlust durch Seitenwandstreuung zu minimieren.

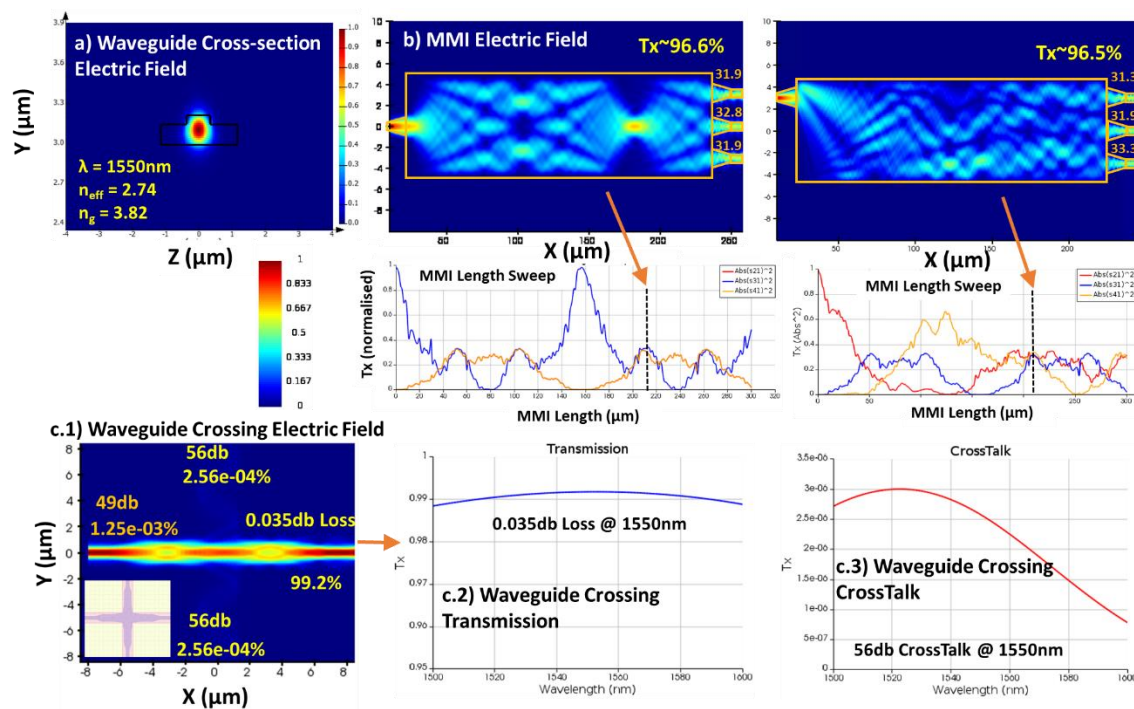


Abbildung 1: Simulierte Ergebnisse der passiven Komponenten, die für den Aufbau des NeuroPICs erforderlich sind: a) Elektrisches Feldprofil der TE-Grundmode des flach geätzten Wellenleiters; b) Interferenz des elektrischen Feldes im 3x3-MMI-Koppler für den Eingang am zentralen Eingang (links) und am oberen Eingang (rechts). In beiden Fällen wird die Signalleistung gleichmäßig auf alle drei Ausgänge verteilt ($-4,77$ dB Aufteilung). Unter jedem Szenario ist auch eine Variation der Länge des MMI, um die optimale Länge zu finden, bei der eine gleichmäßige Verteilung für alle Eingangsszenarien erfolgt; c) Verteilung des elektrischen Feldes an einer optimierten Wellenleiterkreuzung, die eine maximale Übertragung durch gegenüberliegende Arme und ein minimales Übersprechen in die orthogonalen Arme zeigt. Die entsprechenden Diagramme zeigen die jeweils erzielte spektrale Bandbreite.

Wir haben ein 3x3 MMI verwendet, in dem jeweils zwei Anschlüsse an jeder Seite dazu dienen, benachbarte Knoten/MMIs miteinander zu verbinden und die Signalleistung gleichmäßig im Reservoir zu verteilen. Die beiden verbleibenden Anschlüsse des MMI, einer von jeder Seite, werden als Eingangs- und Ausgangspunkte verwendet, um die übertragenen Informationssignale in das Reservoir einzufügen und das gemischte Signal oder die transformierten höherdimensionalen Daten aus dem Reservoir zu entnehmen. Abbildung 1b zeigt die in Lumerical EME simulierte Verteilung des elektrischen Feldes, und die Abbildung unter der elektrischen

Feldverteilung zeigt die Längenoptimierungssimulation, bei der die MMI-Länge von 210 μm extrahiert wird, bei der die drei Ausgangsanschlüsse die Signalleistung möglichst gleichmäßig für jedes Eingangsszenario aufteilen (-4,77 dB Aufteilung), mit einer Gesamttransmission von etwa 96,5% (0,16 dB Verlust).

Bei dem komplexen Layout der NeuroPIC-Architektur sind Wellenleiterkreuzungen unvermeidlich. Daher war es wichtig, eine Kreuzung mit minimalem Verlust und Übersprechen zu entwerfen. Dies wurde mit einem simulierten Übertragungsverlust von 0,035 dB und einem Übersprechen von -56 dB erreicht, was vernachlässigbar ist. Abbildung 1c zeigt die simulierte Verteilung des elektrischen Feldes und die Bandbreite desselben.

Entwurf, Herstellung und Charakterisierung von Testchips

Der Testchip mit den oben genannten Komponenten wurde dann auf der 6" SOI-Plattform von AMO hergestellt. Die Herstellung besteht aus 4 lithografischen Prozessschritten für 1 Markerebene und 3 Schritte für photonische Bauelemente. Ein zusammengefasster Prozessablauf ist dargestellt in Abbildung 2. Wir beginnen mit einem 6" 220 nm SOI-Wafer mit 3 μm vergrabener Siliziumoxid (BOX) als Ausgangsmaterial. Der erste Prozess ist eine lithografische Strukturierung der Markerebene mit unserem i-line Stepper (Projektionslithografie), gefolgt von einem reaktiven Ionenätzen (RIE) auf Fluorchemiebasis. Anschließend werden zwei weitere Masken belichtet und auf ähnliche Weise geätzt, um den Kern und die Rippe der Wellenleiter zu bilden (siehe Abbildung 2), inkl. MMIs und Kreuzungen. Die erste Maske wird zur Herstellung des Wellenleiterkerns (RIB Wg in Abbildung 2c) verwendet. Die zweite Maske bildet die breitere Rippe und isoliert die Wellenleiter voneinander, indem das restliche Silizium zwischen den Wellenleitern vollständig weggeätzt wird. Die abschließende Belichtung erfolgt mittels Elektronenstrahlithografie (EBL), um die sehr feinen Strukturen der Gitterkoppler zu definieren und mit anschließender RIE zu strukturieren.

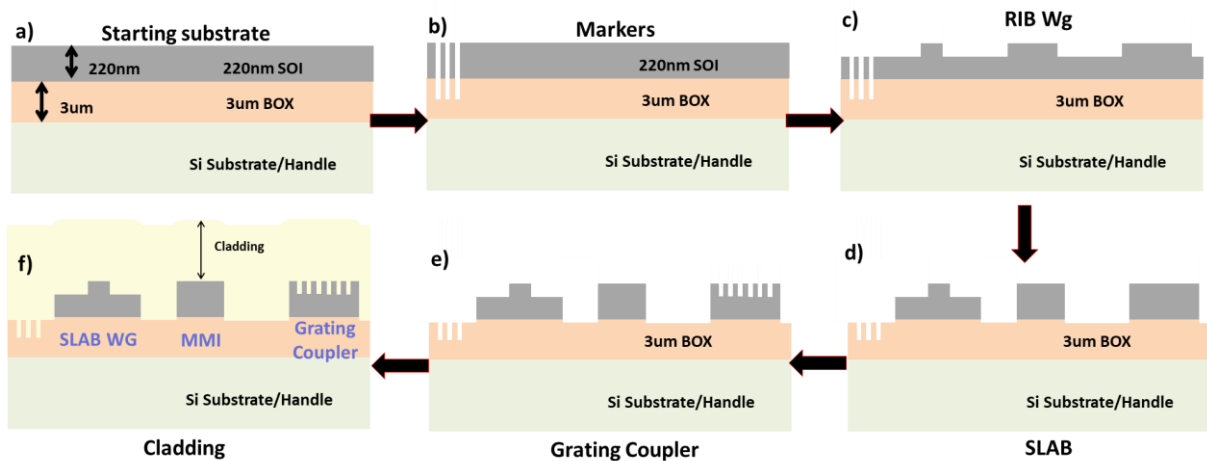


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prozesses.

Die auf den Testchips hergestellten Komponenten wurden mit dem Lichtmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht und optisch charakterisiert. Abbildung 3 zeigt die REM- und Mikroskopbilder der hergestellten Komponenten (Wellenleiter, Kreuzung, MMI, Verzögerungsstrecke und Gitterkoppler), auf denen zu erkennen ist, dass die Strukturen mit hoher Qualität hergestellt wurden.

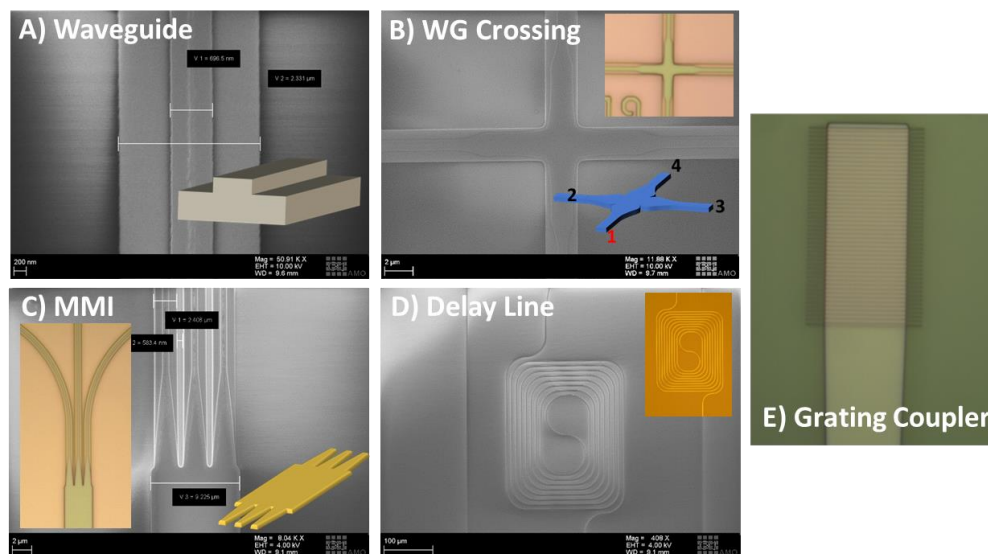


Abbildung 3: REM Aufnahmen A) eines flach geätzten SOI-Wellenleiters (das Nebenbild unten rechts skizziert die Struktur), B) Wellenleiterkreuzung (Nebenbild unten rechts skizziert die Struktur, oben rechts zeigt es ein Mikroskopbild), C) 3x3 MMI (das Nebenbild unten rechts skizziert die Struktur, links zeigt es ein Mikroskopbild), D) Verzögerungsstrecke (das Nebenbild oben rechts zeigt ein Mikroskopbild). E) Mikroskopbild eines Gitterkopplers.

Die Wellenleiter- und Gitterkoppler-Verluste wurden durch Cutback-Messungen mit 10 Wellenleitern von 1,4 cm bis 8 cm Länge unter Verwendung eines abstimmbaren C-Band-Lasers im Wellenlängenbereich zwischen 1530 nm und 1570 nm charakterisiert. Die Spektren in Abbildung 4a zeigen maximale Transmission um 1550 nm Wellenlänge herum, in Übereinstimmung mit dem Designziel der Gitterkoppler. Die Verluste verschiedener Wellenleiter wurden in Abbildung 4b gegen die entsprechenden Wellenleiterlängen. Für 1550 nm wurde ein Ausbreitungsverlust von 5,9 dB/cm aus der Steigung einer linearen Anpassung des Diagramms extrahiert. Obwohl dieser Wert höher ist als der typische Verlust für solche Wellenleiter, wurde festgestellt, dass das NeuroPIC auch bei diesem hohen Verlust gute Genauigkeitsergebnisse liefert, wie später im letzten Abschnitt zur Systemleistung näher erläutert wird. Der y-Achsenabschnitt in der Cutback-Darstellung in Abbildung 4b entspricht einem Verlust von 8,1 dB, von dem wir annehmen, dass er durch den Kopplungsverlust der beiden Gitterkoppler dominiert wird, d. h. ein Verlust von 4,05 dB pro Gitterkoppler.

Die Übertragung durch die MMI-Teststrukturen umfasst den Verlust durch die Gitterkoppler an beiden Enden, den Wellenleiterausbreitungsverlust vor und nach den MMI und den Verlust durch das MMI selbst, der idealerweise minimal sein sollte. Abbildung 4c zeigt die gemessenen MMI-Transmissionsspektren aller drei Ausgänge für jeden der drei Eingänge des MMI. Die Oszillationen in den gemessenen Spektren in Abbildung 4c sind auf die Gitterkoppler in Verbindung mit nicht perfekt TE-polarisiertem Eingangslight zurückzuführen, da diese bereits in den Referenzmessungen ohne MMI vorhanden sind. Abbildung 4d zeigt einen Vergleich der Gesamtübertragung durch das MMI. Für jeden der drei Eingänge wurden die Ausgangssignale aller drei Eingänge addiert, so dass sich um 1550 nm ein Gesamtwert von 7,5-8 dB ergibt. Geht man von einem Kopplungsverlust von $\sim 3,5$ -4 dB pro Koppler aus, können die Gesamtverluste der beiden Gitterkoppler zusammen mit den Wellenleiterverlusten auf $\sim 7,5$ -8 dB geschätzt werden. Dies bedeutet, dass der Verlust durch das MMI vernachlässigbar ist. Daraus lässt sich schließen, dass die MMI im gewünschten Wellenlängenbereich gut funktionieren.

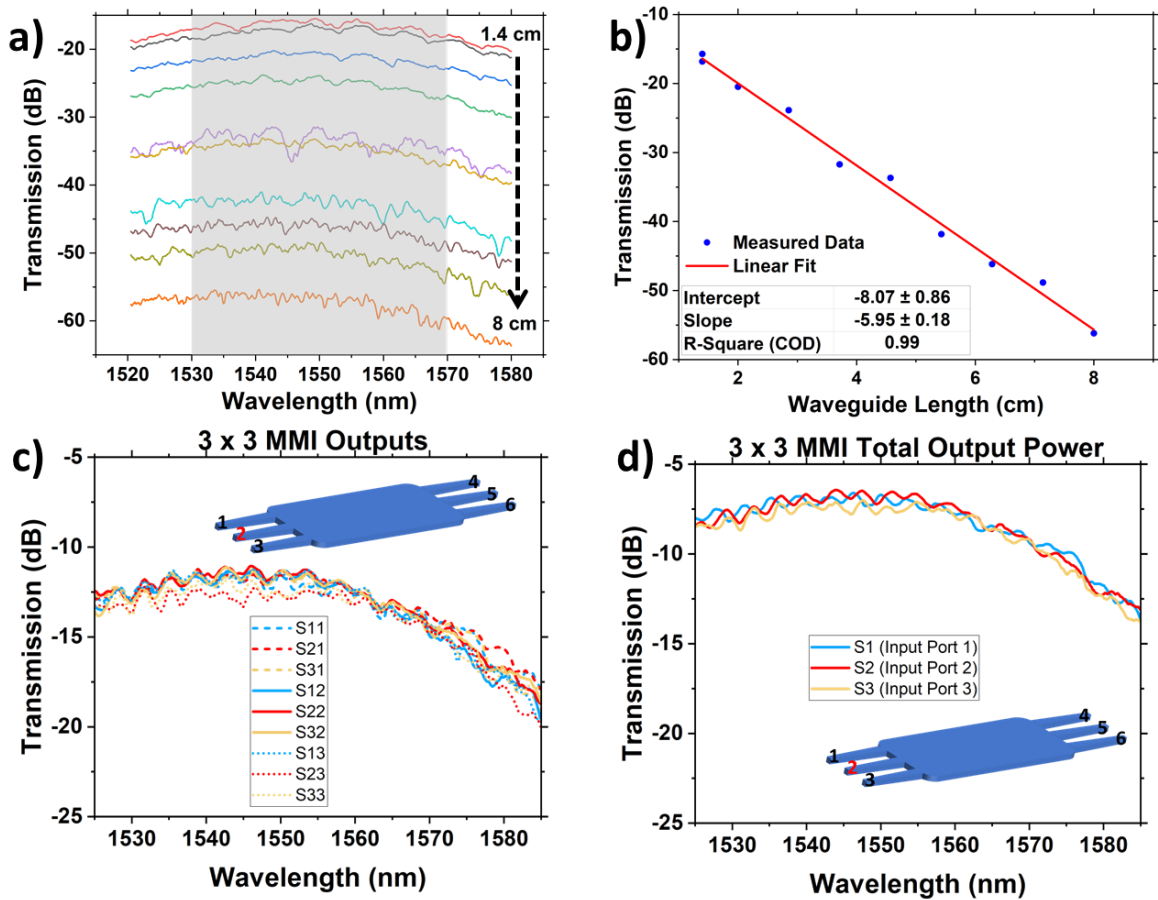


Abbildung 4: Optische Messergebnisse der Komponenten des photonischen Reservoirs. a) Das Diagramm zeigt die Transmissionsspektren von Wellenleitern verschiedener Länge. b) Cutback-Diagramm: Einfügedämpfung bei 1550 nm gegenüber der Wellenleiterlänge für zehn verschiedene Wellenleiterlängen. Die Steigung der Kurve stellt die Ausbreitungsdämpfung dar, und der Y-Achsenabschnitt gibt die Kopplungsdämpfung für die beiden Gitterkoppler an, die für die Ein-/Auskopplung verwendet werden. c) Transmissionsspektren der MMIs für alle Eingangs- und Ausgangskombinationen (Nebensbild: Schema des 3x3-MMI mit beschrifteten Eingängen und Ausgängen). d) Gesamtausgangsleistung von allen drei Ausgängen für jeden Eingang (Nebensbild: Schema des 3x3-MMI mit beschrifteten Eingängen und Ausgängen).

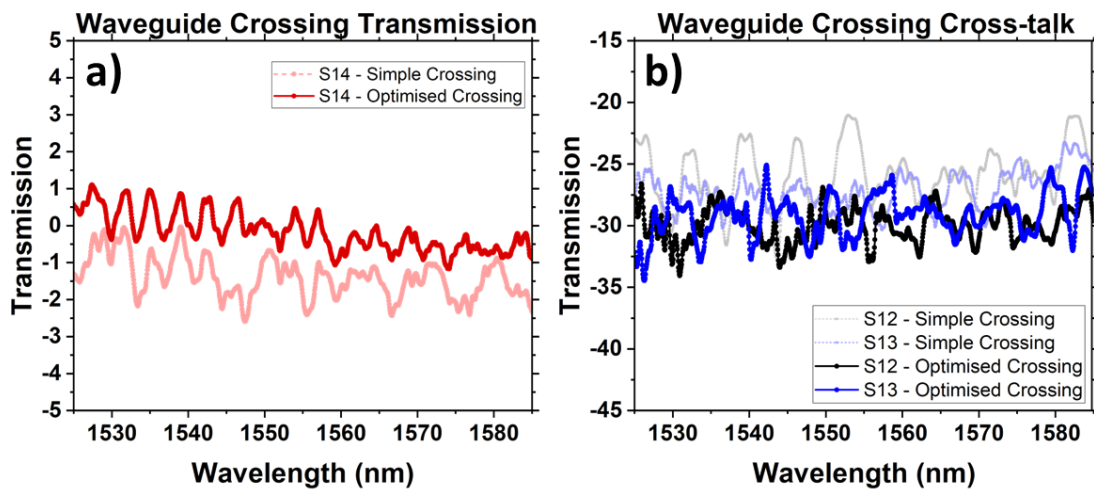


Abbildung 5: normierte Transmission (a) und Übersprechen (b) der einfachen und optimierten Wellenleiterkreuzung.

Die Verluste der Wellenleiterkreuzungen wurde auf ähnliche Weise berechnet wie die der MMI. Eine einfache und direkte Wellenleiterkreuzung wies einen Transmissionsverlust von 1,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -28 dB in den orthogonalen Armen auf, während das optimierte Kreuzungsdesign einen Transmissionsverlust von <0,5 dB/Kreuzung und ein Übersprechen von -30 dB in den orthogonalen Armen aufwies (Abbildung 5). Somit gewährleistet das optimierte Design Wellenleiterkreuzungen mit nahezu ungestörter Transmission.

Für die Gitterkoppler testeten wir einen inversen Designansatz, der zu einem ungleichmäßigen, frei apodisierten Gitter führte. Obwohl die simulierten Ergebnisse eine Kopplungseffizienz von 65% im Vergleich zu 54% für standardmäßige homogene Gitterkoppler versprochen, haben wir letztlich das homogene Gitterdesign aus der AMO-Standardbibliothek verwendet, das bereits vor diesem Projekt verifiziert und getestet wurde, da bei der experimentellen Charakterisierung die hergestellten photonischen Inversdesign-Gitter (3,9 dB pro Koppler) keine besseren Ergebnisse als die standardmäßigen homogenen Gitter (3,6 dB pro Koppler) lieferten (Abbildung 6). Bei der Diskussion dieser Werte muss darauf hingewiesen werden, dass aufgrund der manuellen Ausrichtung der Höhe der Glasfaser über dem Wafer von Messung zu Messung leichte Abweichungen beim Kopplungsverlust zu erwarten sind.

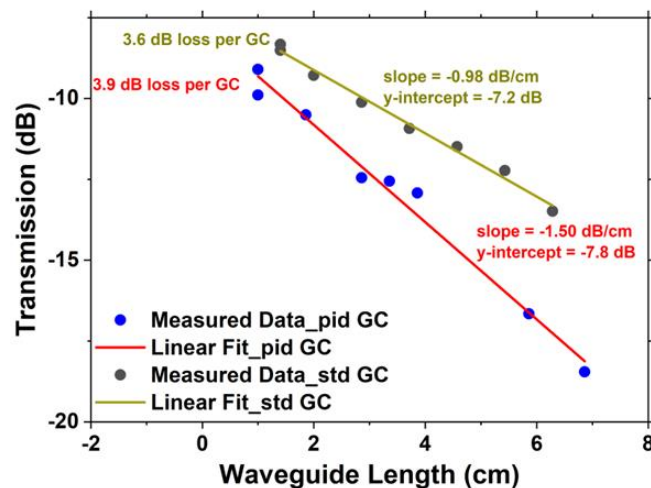


Abbildung 6: Vergleich des gemessenen Cutback-Diagramms für Gitterkoppler mit der ungleichmäßigen apodisierten photonischen inversen Designmethode (pid GC) und den homogenen AMO-Standard-Gitterkopplern (std GC).

Entwurf und Herstellung des neuromorphen PIC der ersten Generation

Abbildung 7a zeigt das Schema des in dieser Arbeit verwendeten Reservoirs mit sog. 4-Port-Architektur. Das Design besteht aus einem Netz von 16 Knoten, die durch MMI-Koppler repräsentiert werden, die in einem 4x4-Gitter angeordnet und über Verzögerungstrecken bestimmter Länge mit benachbarten Knoten verbunden sind. Jeder Knoten hat einen Eingang und einen Ausgang, der mit einem Gitterkoppler verbunden ist. Abbildung 7b zeigt die schematische Darstellung des Layouts zur Implementierung der 4-Port-Architektur aus Abbildung 7a unter Verwendung der optimierten Komponenten des Testchips. Die Gitterkoppler sind in einem Array aus 16 aktiven Kanälen und 2 zusätzlichen Gitterkopplern gruppiert, die zur aktiven Ausrichtung der Eingangs- und Ausgangs-FA verwendet werden. Die Knotenpunkte des Reservoirs sind mit spiralförmigen Verzögerungstrecken mit einer gewählten Länge von 3,68 mm verbunden, um eine spezifische Zeitverzögerung der optischen Signale von einem Netzwerkknoten zum nächsten von 47 ps zu erreichen.

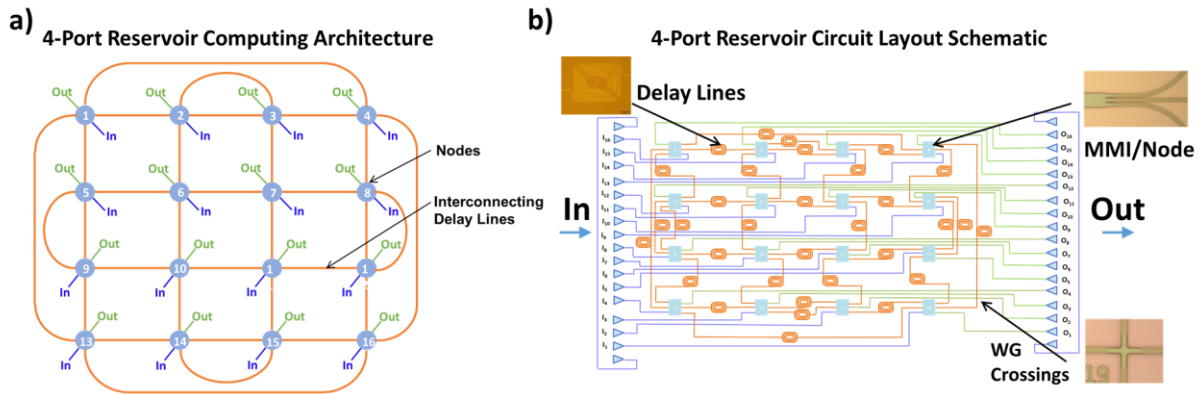


Abbildung 7: Schematische Darstellung der a) 4-Port-Reservoir-Computing-Architektur und b) realisiertes Schaltungslayout (Nebenbilder: optische Mikroskopbilder der hergestellten Komponenten - spiralförmige Verzögerungsstrecken, MMI, Wellenleiterkreuzung).

Es gibt insgesamt 32 Verzögerungsstrecken zwischen den Knoten, jede mit einer Länge nahe dem Entwurfsziel von 3,68 mm. Der Wert von 3,68 mm wurde nach einer Optimierung via Simulation durch Fraunhofer HHI festgelegt, um einen minimalen Fehler für die Symbolrate von 32 Gbaud/s zu erzielen. Aufgrund von Layout-Beschränkungen weichen jedoch einige der Verzögerungsabstände von dem gewünschten Wert ab. Abbildung 8 zeigt die realisierten Längen der Verzögerungsstrecken und ihre Verteilung.

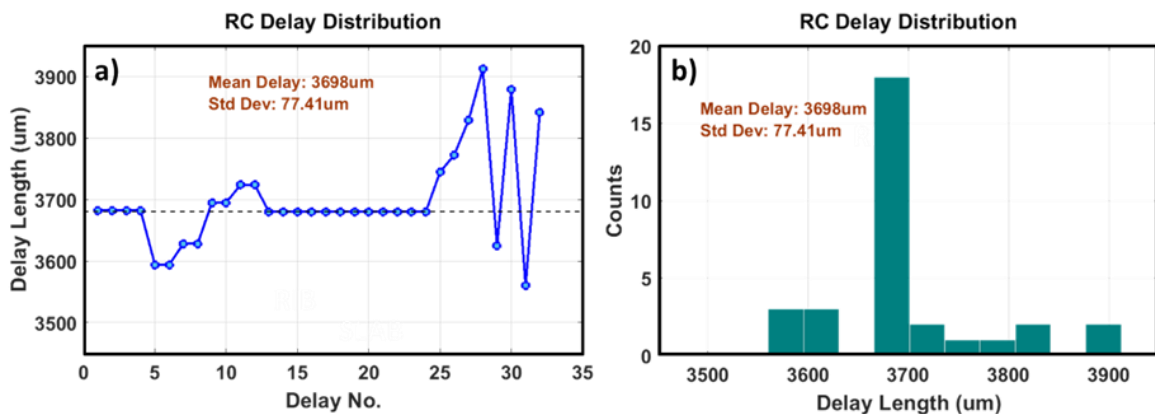


Abbildung 8: a) Tatsächliche Längen der Verzögerungsstrecken zwischen den Knoten im realisierten Reservoir, b) Verteilung der verwendeten Verzögerungslängen. Mittelwert = 3698 µm, Median = 3680 µm, Standardabweichung = 77 µm.

Meilenstein „1. Generation des neuromorphen PIC verfügbar“

Wir verpackten den ersten NeuroPIC bei AMO und lieferten den Demonstrator an das HHI zur weiteren Charakterisierung. Wie bereits erwähnt, werden die Ein- und Ausgänge jedes der 16 Knoten in einem 127 µm-Raster mit einer Reihe von Gitterkopplern auf dem Chip realisiert und zur linken und rechten Seite der Schaltung geführt. Die 18-Kanal-FA (16 in/out + 2 Kanäle für aktive Justage) wurden dort aufgeklebt. Der hergestellte Chip wurde dann mit einem Peltier-Element (einem thermoelektrischen Kühler (TEC)) in einem Metallgehäuse unter Verwendung eines Borosilikatglassubstrats verklebt. Das Metallgehäuse, der TEC, der Glasträger und das PIC wurden mit einem temperaturhärtenden Silberepoxid zusammengeklebt und die FA wurden mit einem ultraviolett (UV) härtenden Epoxid auf das PIC geklebt. Abbildung 9 zeigt die schematische Darstellung des verpackten Chips und den Demonstrator.

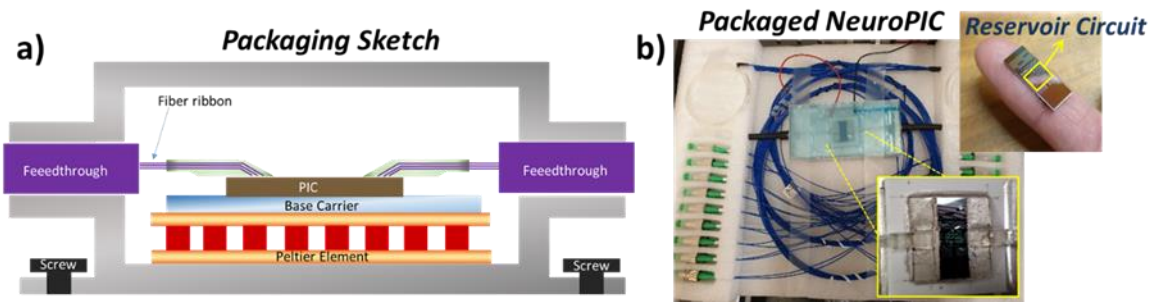


Abbildung 9: a) Skizze des selbst gefertigten Gehäuses, b) Der verpackte Demonstrator der 1. Generation, mit einem Ausschnitt des gefertigten PIC mit dem gelb markierten photonischen Reservoir.

Herstellung des neuromorphen PIC der zweiten Generation

Aktivitäten zur Prozessverbesserung

Da die erzielten Verluste von 5,9 dB/cm für das NeuroPIC der ersten Generation (w#11 in Abbildung 10a) deutlich über den typischerweise zu erwartenden Werten lagen, haben wir erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Verluste des Wellenleiters zu optimieren. Wir versuchten, die Kantenrauheit (LER) des Wellenleiterkerns durch Reflow-Techniken zu verbessern, bei denen der Fotolack nach der Belichtung bzw. Entwicklung einer höheren Temperatur ausgesetzt wird, um so sein Seitenwandprofil zu glätten. Die erste getestete Methode bestand darin, nach dem Belichtungs- und Entwicklungsprozess eine zusätzliche Aushärtungszeit, das so genannte Hardbake, vorzusehen. Ein weiterer Ansatz ist die Erhöhung der Temperatur während des eigentlichen Entwicklungsprozesses nach der Belichtung, das so genannte Post Exposure Bake (PEB). Beide Methoden zeigten eine Verbesserung der Wellenleiterverluste, wobei die Erhöhung der PEB-Temperatur einen Vorteil gegenüber der Hardbake-Methode brachte. Wir untersuchten auch die Auswirkungen der RCA-Standardreinigung (Radio Corporation of America) auf die Wellenleiterverluste, indem wir die Zwischenschritte der Standardreinigung 1 (SC1), der Standardreinigung 2 (SC2) und der Fluorwasserstoffsäure (HF)-Tauchbehandlung analysierten. Wie erwartet, verringert sich der Verlust nach einer vollständigen RCA-Reinigung. Wir haben auch festgestellt, dass bestimmte Kombinationen von RCA und unserer hauseigenen Low Temperature Oxide (LTO)-Einkapselung die Verluste aus unbekanntem Grund erhöhen (w#7,8,9 in Abbildung 10a). Diese Beobachtung stimmte auch mit einer extern ausgelagerten LTO-Beschichtung überein (w#12, 13 in Abbildung 10a), was bestätigt, dass die Ursache nicht der Prozess oder der Ofen war, der für die LTO-Abscheidung bei AMO verwendet wurde. Folglich wurde der niedrigste Wellenleiterverlust ohne RCA-Reinigung durch direkte Abscheidung der LTO-Einkapselung auf dem strukturierten SOI-Wafer erreicht, auf dem der Verlust von unseren anfänglichen 5,9 dB/cm auf 2,6 dB/cm reduziert wurde (w#14 in Abbildung 10a). Ein NeuroPIC aus diesem w#14 wurde von einem externen Dienstleister für die zweite Generation der verpackten NeuroPIC verwendet. Wir untersuchten auch eine SiO₂-ähnliche Ummantelung auf Polymerbasis als Ersatz für LTO. Wir stellten fest, dass sich der Verlust nicht wie bei früheren Bauelementen verschlechterte, sondern sich auf 0,98 dB/cm reduzierte (w#17 in Abbildung 10a), was den niedrigsten bisher in AI-NET PROTECT erreichten Wellenleiterverlust darstellt. Abbildung 10a gibt einen Überblick über den Fortschritt des Herstellungsprozesses und die entsprechende Verbesserung der Ausbreitungsverluste des Wellenleiters während der gesamten Projektlaufzeit. Abbildung 10b zeigt das Cutback-Diagramm, das den Wellenleiterverlust des besten Wafers w#17 zusammen mit dem Cutback-Diagramm der beiden vorhergehenden Highlight-Wafers (w#11 und w#14) zeigt, die für die Bauelemente der ersten und zweiten Generationen verwendet wurden.

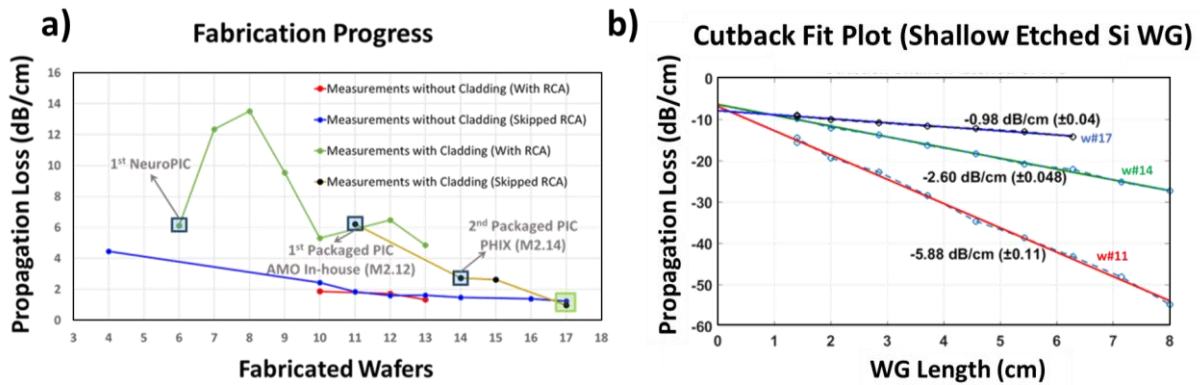


Abbildung 10: a) Fortschritt des Herstellungsprozesses und Verbesserung der Wellenleiterausbreitungsverluste während der Projektlaufzeit; b) Cutback-Diagramm, das die Wellenleiterausbreitungsverluste der Highlight-Wafer w#11 (von AMO verpackte, erste Generation NeuroPIC), w#14 (extern verpackte zweite Generation NeuroPIC) und w#17 (Wafer mit geringsten Ausbreitungsverlusten mit Polymereinkapselung) zeigt.

Meilenstein „Neuromorpher PIC mit erweiterten Funktionen verfügbar“ bzw. „1. Generation des neuromorphen PIC verfügbar“

Aufgrund der technischen Probleme mit der 1. Generation des NeuroPIC haben wir uns entschlossen, diese Probleme mit einer Neuauflage des gleichen Designs zu lösen, statt weitere Funktionalität hinzuzufügen. Der Wafer w#14 mit einem Wellenleiterverlust von 2,6 dB/cm wurde daher von einem externen Dienstleister als NeuroPIC der zweiten Generation verpackt und zur Charakterisierung auf Systemebene an das Fraunhofer HHI geliefert. Abbildung 11a zeigt das Bauteil mit FAs, die sowohl auf der Eingangs- als auch auf der Ausgangsseite mit Epoxidharz verklebt und ausgerichtet sind. Das Maximum der Transmission liegt jetzt im Gegensatz zur ersten Generation wie gewünscht bei 1550 nm, was optimal für die Charakterisierung im C-Band ist. Abbildung 11b zeigt das Spektrum, das durch die Ausrichtungsschleife im nicht optimal ausgerichtetem NeuroPIC der ersten Generation gemessen wurde, während Abbildung 11c das gleiche Spektrum für die optimal ausgerichtete zweite Generation zeigt. Abbildung 12 zeigt das vollständige NeuroPIC der zweiten Generation im Gehäuse, wobei das PIC in der Mitte mit der Reservoirschaltung hervorgehoben ist.

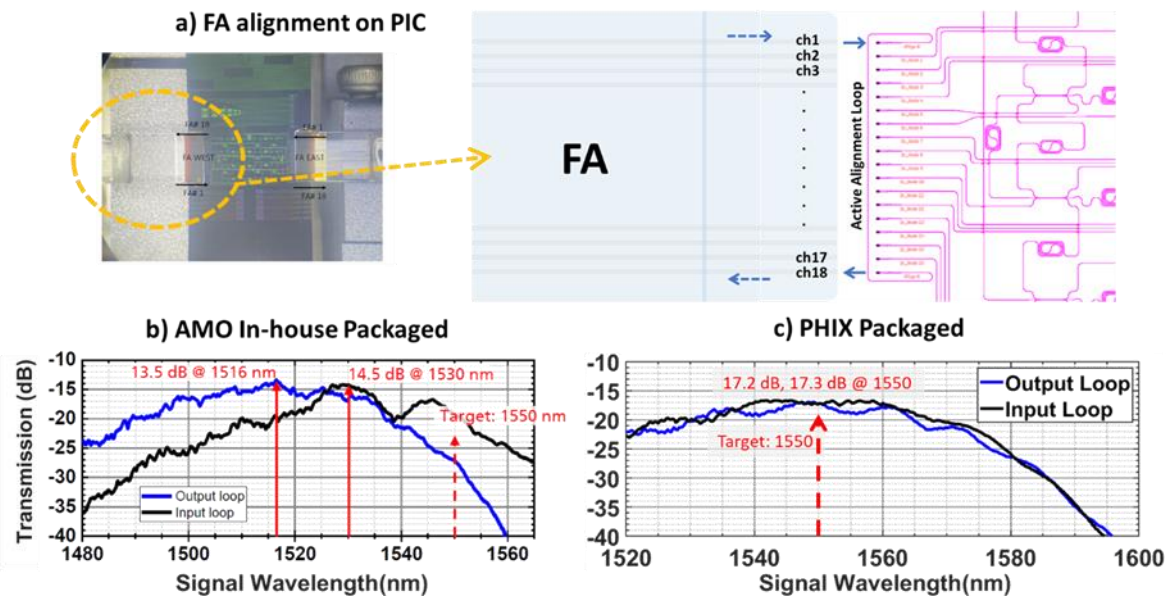


Abbildung 11: a) Foto und Layout des verpackten NeuroPIC der zweiten Generation mit FA. Ausrichtungsschleifen-Transmissionsmessungen von der Ostseite (Eingang) und der Westseite (Ausgang) des Reservoirs von b) der ersten NeuroPIC Generation (w#11) und c) der zweiten NeuroPIC Generation (w#14).

Der Wafer mit dem besten Wellenleiterverlust w#17 wurde ebenfalls auf ähnliche Weise verpackt. Dieses dritte verpackte Bauelement mit den geringsten Verlusten wurde jedoch erst gegen Ende des Projekts fertiggestellt und wird momentan für weitergehende Studien verwendet.

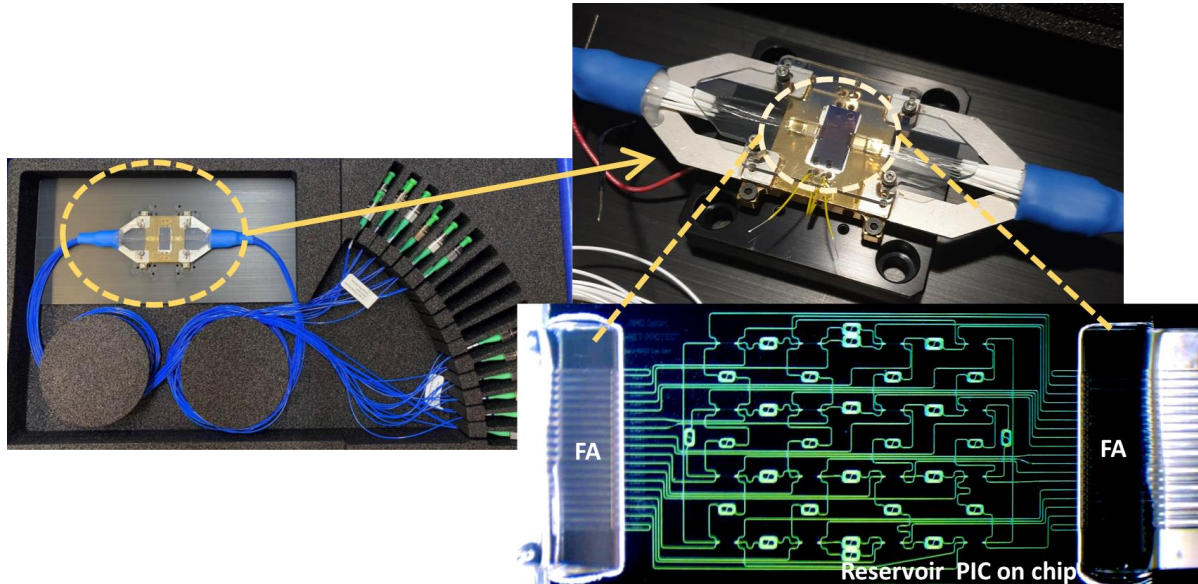


Abbildung 12: Neuromorpher PIC im professionellen Gehäuse, wobei der PIC und die FAs auf der linken und rechten Seite der Reservoirschaltung aufgeklebt sind.

Experimentelle Charakterisierung

Charakterisierung der zweiten Generation neuromorpher PICs auf Bauelement-Ebene

Der Messaufbau am HHI wurde zum Vergleich der Verlustleistung der PICs verwendet. Bei den betrachteten PICs handelt es sich um die beiden Generationen der verpackten NeuroPICs, mit 5,9 dB/cm bzw. 2,6 dB/cm Wellenleiterverlust. Der Boxplot in Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Transmission aller 16 Ausgangskanäle der PICs, wenn eine pseudozufällige Bitfolge (PRBS) bei 1550 nm Wellenlänge mit einer Leistung von 20 dBm gleichmäßig in die 16 Eingangskanäle des NeuroPIC eingespeist wird. Der Boxplot zeigt, dass die Ausgangsleistung des NeuroPIC der zweiten Generation mit im Durchschnitt bei -17 dB liegt und damit etwa 20 dB besser ist als die des NeuroPIC der ersten Generation. Darüber hinaus ist die Leistung innerhalb des Reservoirs wesentlich gleichmäßiger verteilt, wie die engere Verteilung aller Messpunkte zeigt.

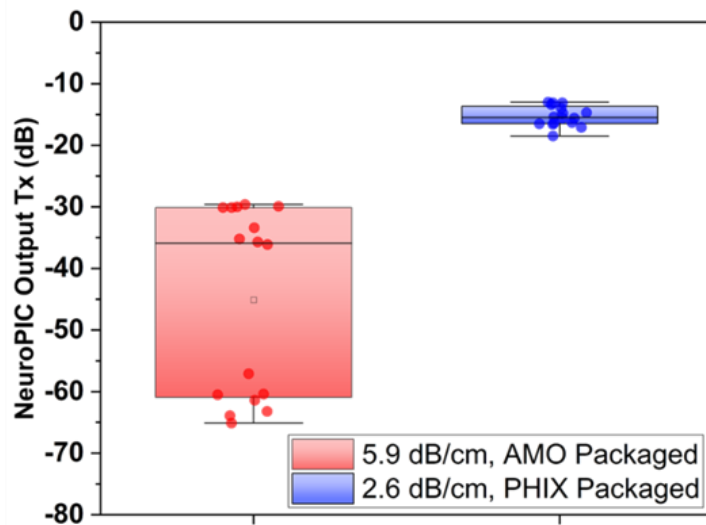


Abbildung 13: Boxplot der Ausgangsleistung in dB in allen 16 Ausgangskanälen der NeuroPICs der ersten und zweiten Generation.

Charakterisierung der neuromorphen PICs auf Systemebene

Das von HHI und der ID photonics GmbH (IDP) entwickelte Messsystem für die Charakterisierung von NeuroPICs ist in Abbildung 14 dargestellt. Das komplexe Messverfahren ist im Bericht des HHI nachzulesen. AMO unterstützte die Arbeiten beratend und mit einem Forschungsaufenthalt von Enes Seker am HHI. Besonderes Augenmerk haben wir auf die Frage gelegt, welche Nicht-Idealitäten im Design oder in der Herstellung den größten Einfluss auf die Leistung des NeuroPICs haben. Das Ergebnis ist, dass das Reservoircomputing extrem robust ist und dass die Leistung des Reservoirs in Bezug auf die Modulationsformaterkennung (MFI) kaum auf diese Variationen reagiert. Details finden sich in der in Kapitel 7 genannten Veröffentlichung, welche sich aktuell noch in der Begutachtung befindet.

Abbildung 14a skizziert die am HHI durchgeführten Messungen mit einem kohärenten Empfänger zur Analyse der Ausgangssignale. Die Signale wurden mit einer Symbolrate von 32 GBaud und bei verschiedenen optischen Signal-zu-Rauschverhältnissen (OSNR) und über Entfernungen von 0 bis 100 km übertragen. Die Ergebnisse wurden vom HHI auf der 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC) veröffentlicht (*von Hünefeld, Guillermo et. al., OFC, pp. 1-3. IEEE, 2023*). Die Konfusionsmatrix auf der rechten Seite zeigt die Vorhersagegenauigkeit für jedes der vier Modulationsformate (4-QAM, 16-QAM, 32-QAM und 64-QAM) für die maximal getestete Entfernung von 100 km Faserlänge bei 2 dB OSNR. In diesem herausforderndsten Fall konnte noch eine durchschnittliche Genauigkeit von >87% erreicht werden. Abbildung 14b zeigt einen ähnlichen Aufbau für die am HHI durchgeführten Messungen mit dem NeuroPIC der zweiten Generation, der zusammen mit IDP aufgebaut und in der abschließenden Projektdemonstration verwendet wurde. Dazu kam statt des kohärenten Empfängers eine kostengünstige Platine von IDP mit Direct-Detect-Photodioden mit relativ niedriger Geschwindigkeit (200 MHz) zum Einsatz. Die Konfusionsmatrix auf der rechten Seite der Abbildung zeigt die Vorhersagegenauigkeit für jedes der beiden Modulationsformate (4-QAM, 16-QAM) unter Verwendung eines kommerziellen ADTRAN-Transponders. Wie in der abschließenden Projektdemo gezeigt, lag die Klassifizierungsleistung bei perfekten 100%.

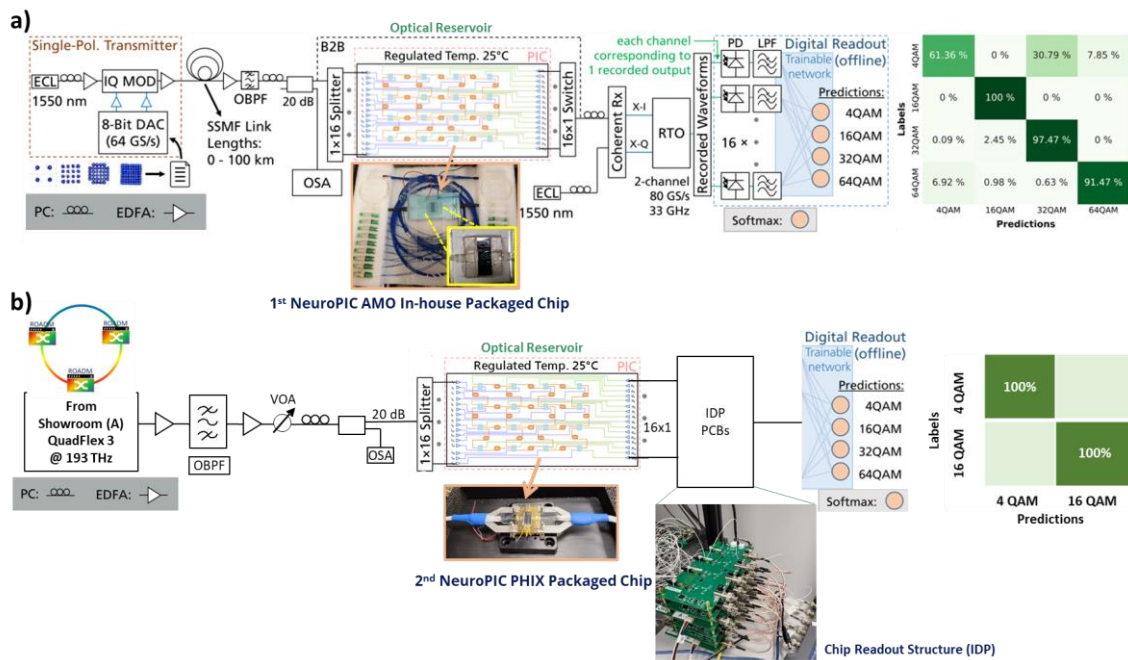


Abbildung 14: Allgemeine Transceiver- und Modellstruktur des neuronalen Netzwerks für MFI am HHI. Das Reservoir in der Mitte wird zwischen dem Sender und dem Empfänger verwendet; a) Aufbau der 1st Versuchsserie, die am HHI mit der ersten Generation des NeuroPICs und kohärentem Empfänger durchgeführt wurde. Die Konfusionsmatrix (rechts) zeigt die Vorhersagegenauigkeit für jedes der vier verwendeten Modulationsformate (4-QAM, 16-QAM, 32-QAM & 64-QAM) nach Transmission über 100 km Glasfaser bei 2 dB OSNR am Eingang. b) Aufbau des zweiten Experiments, die am HHI mit dem NeuroPIC der zweiten Generation und der Empfängerplatine von IDP Verwendung eines kommerziellen ADTRAN Transponders durchgeführt wurde. Die Konfusionsmatrix (rechts) zeigt die Genauigkeit der Vorhersage für jedes der beiden verwendeten Modulationsformate (4-QAM, 16-QAM).

Es ist erwähnenswert, dass diese Leistungen mit einem NeuroPIC mit nicht optimalen Wellenleiterverlusten erzielt wurden. Dies bedeutet, dass mit noch geringeren Wellenleiterverlusten die in das Reservoir eintretenden Signale länger darin gehalten werden können, was mehr Interferenzen und eine reichhaltige Signalmischung ermöglicht und somit die Anwendungsmöglichkeiten der NeuroPICs auf kompliziertere Aufgaben erweitert.

3. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Gesamtbudget	Ausgaben
Personalkosten	568.094,24 €	555.553,46 €
Mieten und Rechnerkosten	0,- €	0,- €
Sachkosten	175.199,91 €	192.801,75 €
Vergabe von Aufträgen	0,- €	0,- €
Reisen	25.680,- €	27.276,91 €

Investitionen	81.232,41 €	80.042,86 €
Insgesamt	850.206,56 €	855.674,98 €

Das geplante Budget wurde in guter Näherung eingehalten.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Obwohl nur wenige dedizierte neuromorphe Chips auf dem Markt erhältlich sind, schreitet die Forschung auf diesem Gebiet rasch voran, wobei wichtige Akteure wie Intel und BrainChip erhebliche Fortschritte erzielen. Diese Bemühungen unterstreichen die Bedeutung der neuromorphen Datenverarbeitung, die einzigartige Vorteile wie massive Parallelität und Energieeffizienz bietet. Photonische neuromorphe Chips, die mit ihrer Energieeffizienz, Geschwindigkeit und Parallelität ganz eigene Vorteile mit sich bringen, gewinnen ebenfalls an Aufmerksamkeit. Photonik-basierte neuromorphe Chips, wie der an der Tsinghua-Universität entwickelte "Taichi"-Chip, ziehen aufgrund ihrer Skalierbarkeit und außerordentlichen Energieeffizienz, mit der sie Tera-Operationen pro Sekunde pro Watt (TOPS/W) erreichen, ebenfalls große Aufmerksamkeit auf sich. Wie in unserem Projekt gezeigt wurde, sind photonische Chips für Reservoir Computing von Natur aus tolerant gegenüber Unzulänglichkeiten, was sie besonders für Anwendungen wie die Überwachung von Telekommunikationsnetzen mit nahezu perfekter Genauigkeit geeignet macht. Ohne die Förderung durch das BMBF wäre AMO nicht in der Lage gewesen, die Arbeiten durchzuführen.

Wir halten die durchgeführten Arbeiten für angemessen, weil:

- Die Arbeit an den Wellenleiterverlusten war notwendig, um die Gesamtverluste im System zu verringern und sicherzustellen, dass das Signal, das in das Reservoir eingespeist wird, lang genug bleibt, um sich weiter zu mischen und reichhaltige Interferenzmuster bilden kann.
- Die Arbeit am Packaging der Wellenlängenmonitore war notwendig, um die Chips im HHI-Labor wiederholbar und zuverlässig mit verschiedenen Parametervariationen charakterisieren zu können.

5. Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Trotz der sehr guten Leistungen des NeuroPICs der ersten Generation mit hohen Wellenleiterverlusten sind die zweite und dritte Generation mit geringeren Wellenleiterverlusten potenziell nützlicher für herausforderndere Anwendungen. In der QNC Space Ausschreibung der FMD QNC Initiative haben wir einen Antrag eingereicht, um zusammen mit HHI und IDP eine weitere Anwendung des NeuroPICs zu erforschen. Im zum 01.01.2025 startenden BMBF-geförderten Projekt SUSTAINET werden AMO und HHI des NeuroPIC um zusätzliche Funktionalität erweitern, die über das in PROTECT ursprünglich geplante Maß hinaus geht.

Inzwischen haben die Ergebnisse von AINET-PROTECT auch zur Bewilligung eines vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Patentvalidierungsprojekts ResTop (Förderkennzeichen: EFRE-20800062) geführt, das AMO derzeit bearbeitet.

Im Rahmen unserer laufenden Bemühungen, die Wirkung und Reichweite unserer Forschung zu maximieren, führen wir derzeit Gespräche mit dem Fraunhofer HHI über Möglichkeiten, die NeuroPICs für neue Anwendungen von Dritten testen zu lassen.

6. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen

Während der Durchführung des Projekts, insbesondere unmittelbar nach dem offiziellen Projektabschluss, wurden drei Publikationen über neuromorphe PICs mit ähnlichen Architekturen veröffentlicht. In der Veröffentlichung "Experimental Demonstration of 4-Port Photonic Reservoir Computing for Equalization of 4 and 16 QAM Signals" (<https://doi.org/10.1109/JLT.2024.3444480>) von Sarah Masaad et. al. im Journal of Lightwave Technology vom August 2024 wird eine ähnliche 4-Port-Architektur auf einer Siliziumnitrid-Plattform (SiN) demonstriert. Sie haben einen weiteren Anwendungsfall der Entzerrung unter Verwendung von 2 Modulationsformaten von 28 Gbaud/s gezeigt, bei dem eine Bitfehlerrate (BER) erreicht wird, die mit der rechenintensiven digitalen Signalverarbeitung (DSP) vergleichbar ist, was das Potenzial eines neuromorphen PICs für Telekommunikationsanwendungen zeigt.

In einer Veröffentlichung vom September 2024, "Modulation format identification in elastic optical networks using integrated photonic reservoir computing and untrained K-nearest neighbors algorithm" (<https://doi.org/10.1364/OE.533608>) von Quan Li et. al. in Optics Express, wird eine numerische Demonstration gezeigt, bei der eine durchschnittliche Genauigkeit von >96% in der MFI-Anwendung erreicht wird, eine ähnliche Anwendung wie die unsrige. Es ist jedoch anzumerken, dass sie ein größeres System mit 52 Knoten direktionalen Kopplern als Knoten verwendet haben, im Vergleich zu unserem System mit 16 MMIs als Knoten. Darüber hinaus haben sie nur eine relativ einfache Reihe von Modulationsformaten (OOK, PAM4, QPSK und BPSK) verwendet, bzw. solche mit deutlich größeren Unterschieden als in unserem Fall mit verschiedenen QAM-Formaten.

In einer Veröffentlichung vom November 2024, "Reservoir computing for equalization in a self-coherent receiver scheme" (<https://doi.org/10.1364/OE.534576>) von Aimen Zelaci et. al. in Optics Express wird erneut eine numerische Demonstration auf einer SiN-Plattform für die Anwendung der Entzerrung eines 32 GBd 16 QAM-Signals gezeigt. In der Studie werden BER-Werte unterhalb der FEC-Grenze (Forward Error Correction) von $<3,8 \times 10^{-3}$ angegeben. Sie behaupten auch, dass das Reservoir einen elektronischen chromatischen Dispersionskompensator übertrifft.

Diese Arbeiten demonstrieren, dass photonisches Reservoir Computing ein sehr aktives Forschungsfeld ist.

7. Veröffentlichung der Ergebnisse

AMO war an umfangreichen Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit beteiligt, wobei die Aktivitäten und Ergebnisse des Projekts durch eingeladene Vorträge, Workshop-Poster und Ausstellungen in der neuromorphen und weiteren technologischen Gemeinschaft verbreitet wurden. Während der gesamten Projektlaufzeit wurden die Arbeitsergebnisse von AI-NET PROTECT als Workshop-Poster auf dem Jülich-Aachen Neuromorphic Computing (NC) Day 2022 und 2023 von Enes Şeker präsentiert, als Workshop-Poster während eines von der AMO organisierten Workshops in Aachen 2022 von Enes Şeker, als eingeladene Vorträge auf der W3+ Fair Convention (Firmenmesse, 2023) und dem ICOS Workshop on Sustainable Electronics & International Cooperation on Semiconductors (Grenoble, 2023) von Dr. Stephan Suckow vorgestellt und als Poster auf zwei Konferenzen (ECIO 2024 und ICNCE 2024) von Enes Şeker präsentiert. Begleitet wurden diese Aktivitäten von 9 LinkedIn Posts, welche 17 mal geteilt wurden, >740 Reaktionen erzeugten und >10.000 mal gesehen wurden. Eine wissenschaftliche Publikation von Enes Şeker mit dem Titel "**Hardware Realization of Neuromorphic Computing with a 4-Port Photonic Reservoir for Modulation Format Identification**" befindet sich momentan in der Begutachtung bei ACS Photonics. Außerdem wurde eine Patentanmeldung für die NeuroPIC-Architektur von AMO eingereicht.