



PRESE- MITTEILUNG

Neuromorphes Rechnen mit Sound

ERLANGEN, 16. APRIL 2024

Optische neuronale Netze rechnen mit Licht und bieten potentiell die Bewältigung anspruchsvoller Rechenaufgaben in kurzer Zeit und mit gigantischen Datenmengen. Um ihr volles Potenzial auszuschöpfen, sind jedoch weitere Fortschritte erforderlich. Eine Herausforderung ist die Rekonfigurierbarkeit von optischen neuronalen Netzen. Einem Forscherteam der Stiller-Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts ist es nun in Zusammenarbeit mit dem MIT gelungen, die Grundlage für neue rekonfigurierbare neuromorphe Bausteine zu legen, indem es dem photonischen maschinellen Lernen eine neue Dimension hinzugefügt hat: Schallwellen. Die Forscher nutzen Licht, um temporäre akustische Wellen in einer optischen Faser zu erzeugen. Die so erzeugten Schallwellen können eine wiederkehrende Funktion beispielsweise in einem Telekommunikations-Lichtwellenleiter ermöglichen, die für die Interpretation von kontextbezogenen Informationen wie Sprache unerlässlich ist.

Künstliche Intelligenz ist heute alltäglich und hilft uns bei der Bewältigung unserer täglichen Aufgaben. Sprachmodelle wie ChatGPT sind in der Lage, natürlich formulierte Texte zu erstellen, Absätze strukturiert zusammenzufassen, und uns zu helfen unseren Verwaltungsaufwand zu verringern. Der Nachteil ist ihr enormer Energiebedarf, so dass im Zuge der Weiterentwicklung dieser intelligenten Geräte neue Lösungen zur Beschleunigung der Signalverarbeitung und zur Verringerung des Energieverbrauchs benötigt werden.

Neuronale Netze sind ein mögliches Rückgrat einer künstlichen Intelligenz. Ihr Aufbau als optisches neuronales Netz – basierend auf Licht statt auf elektrischen Signalen – verspricht die Verarbeitung großer Datenmengen mit hoher Geschwindigkeit und großer Energieeffizienz. Bislang waren viele der experimentellen Ansätze zur Implementierung optischer neuronaler Netze jedoch auf feste unflexible Komponenten angewiesen. Nun hat ein internationales Forscherteam unter der Leitung von Birgit

© Long Huy Dao



Künstlerische Darstellung der optoakustischen Datenverarbeitung.

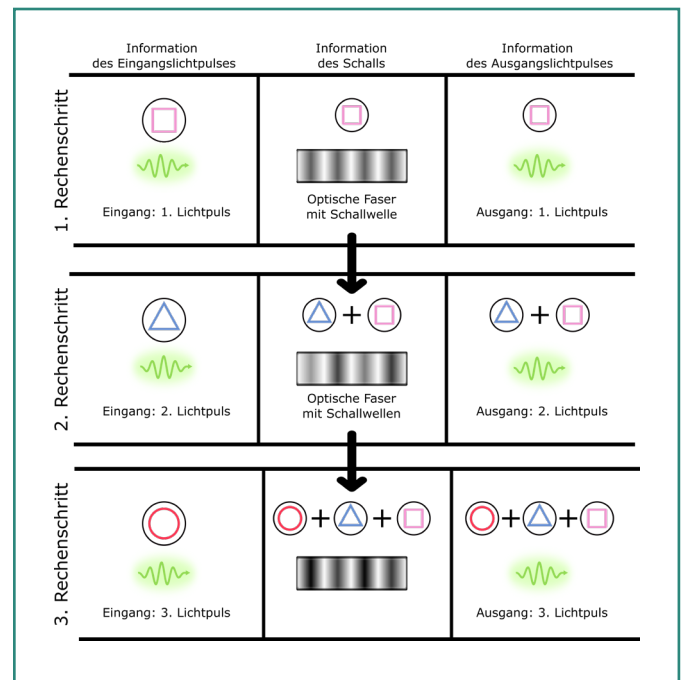
Stiller am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Zusammenarbeit mit Dirk Englund vom MIT erstmals einen Weg gefunden, rekonfigurierbare Bausteine auf der Basis von Schallwellen für das photonische maschinelle Lernen zu bauen. Für ihren experimentellen Ansatz verwenden die Forscher haardünne optische Fasern, die bereits weltweit für schnelle Internetverbindungen genutzt werden.

Der Schlüssel der Erfindung liegt in der lichtgesteuerten Erzeugung von Schallwellen, die die nachfolgenden Rechenschritte eines optischen neuronalen Netzes manipulieren. Die optischen Informationen werden verarbeitet und mit den akustischen Wellen in Beziehung gesetzt. Die Schallwellen haben eine viel längere Übertragungszeit als der optische Informationsstrom. Daher verbleiben sie länger in der optischen Faser und können nacheinander mit jedem nachfolgenden Verarbeitungsschritt verknüpft werden. Die Einzigartigkeit dieses Verfahrens liegt darin, dass es vollständig durch Licht gesteuert wird und keine komplizierten Strukturen und Wandler benötigt.

„Ich freue mich sehr, dass wir mit dieser neuen Forschungsrichtung Pionierarbeit bei der Nutzung von Schallwellen zur Steuerung optischer neuronaler Netze geleistet haben. Unsere Forschungsergebnisse haben das Potenzial, die Entwicklung neuartiger Bausteine für neue photonische Berechnungsarchitekturen anzustoßen“, sagt Dr. Birgit Stiller, Leiterin der Forschungsgruppe Quantenoptoakustik.

Der erste Baustein, den das Team experimentell demonstriert hat, ist ein rekurrenter Operator, eine Technologie, die im Bereich der rekurrenten neuronalen Netze weit verbreitet ist. Der Operator ermöglicht die Verknüpfung einer Reihe von Berechnungsschritten und liefert somit einen Kontext für jeden einzelnen durchgeführten Berechnungsschritt.

Ein anschauliches Beispiel für die Bedeutung des Kontextes findet sich in der menschlichen Sprache. So kann die Reihenfolge der Wörter die Bedeutung eines Satzes bestimmen. Die Sätze „Sie beschloss, die Herausforderung zu erforschen.“ und „Sie beschloss, die Forschung herauszufordern.“ bestehen aus denselben Wörtern, haben aber unterschiedliche Satzaussagen. Der Grund dafür ist der unterschiedliche Kontext, der jeweils durch die Reihenfolge der Wörter bestimmt wird. Ein herkömmliches, voll vernetztes neuronales Netz auf einem Computer hat Schwierigkeiten, den Kontext zu erfassen, da es Zugriff auf den Speicher benötigt. Um diese Herausforderung zu überwinden, wurden neuronale Netze mit rekurrenten Operationen ausgestattet, die einen internen Speicher ermöglichen und in der Lage sind, kontextbezogene Informationen zu erfassen. Diese rekur-

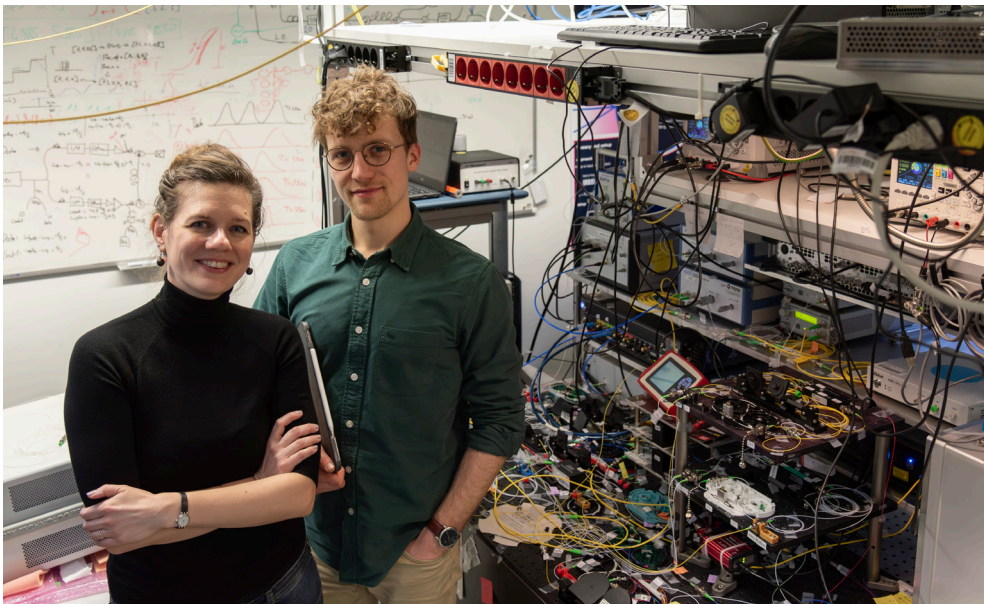


Die von einem optischen Puls getragene Information kann in eine akustische Welle umgewandelt werden (Step 1). Diese Information bleibt in der akustischen Welle erhalten, auch nachdem der Lichtpuls die optische Faser verlassen hat. Diese akustischen Wellen beeinflussen die darauffolgenden Rechensteps 2 und 3, die wiederum neue akustische Impulse generieren. Die akustischen Wellen verbinden zeitlich getrennte Dynamiken und dienen als Informationskanal.

renten neuronalen Netze lassen sich zwar problemlos digital implementieren, aber die analoge Umsetzung in der Optik ist eine Herausforderung und war bisher auf künstliche Strukturen als Speicher angewiesen.

Die Forscher haben nun Schallwellen verwendet, um einen rekurrenten Operator zu implementieren. Das Ergebnis ist der Optoacoustic REcurrent Operator (OREO), der die intrinsischen Eigenschaften eines optischen Wellenleiters ausnutzt, ohne dass ein künstliches Reservoir oder neu hergestellte Strukturen erforderlich sind. OREO bietet den Vorteil, dass er vollständig optisch gesteuert wird, so dass der optoakustische Computer Puls für Puls programmierbar ist. Damit haben die Forscher zum Beispiel erstmals eine rekurrente Abschaltung optisch realisiert, eine Regelungstechnik, die bisher nur zur Leistungssteigerung digitaler rekurrenter neuronaler Netze eingesetzt wurde. OREO konnte bis zu 27 verschiedene Muster unterscheiden und damit seine Fähigkeit zur Kontextverarbeitung unter Beweis stellen.

„Die rein optische Steuerung von OREO ist eine leistungsstarke Funktion. Vor allem die Möglichkeit, das System Puls für Puls zu programmieren, bietet mehrere zusätzliche Freiheitsgrade. Die Verwendung von Schallwellen für photonisches maschinelles



Dr. Birgit Stiller und Steven Becker im Labor

Lernen stellt den Status quo in Frage, und ich bin sehr gespannt, wie sich das Feld in Zukunft entwickeln wird“, sagt Steven Becker, Doktorand im Stiller-Labor.

In Zukunft könnte die Verwendung von Schallwellen für optische neuronale Netze eine neue Klasse optischer neuromorpher Computer erschließen, die spontan rekonfiguriert werden können. Auch On-Chip-Implementierungen optischer neuronaler Netze können von diesem Ansatz profitieren, der in photonischen Wellenleitern ohne zusätzliche elektronische Steuerungen umsetzbar ist.

„Photonisches maschinelles Lernen könnte ein großes Potenzial für die parallele Verarbeitung von Informationen und energieeffiziente Operationen bieten. Die Hinzunahme akustischer Wellen kann dazu mit einem vollständig optisch gesteuerten und einfach zu bedienenden Werkzeugkasten beitragen“, sagt Dr. Birgit Stiller.

Originalpublikation in Nature Communications:

Steven Becker, Dirk Englund, and Birgit Stiller (2024).

“An optoacoustic field-programmable perceptron for recurrent neural networks”, Nature Communications (2024).

DOI: [10.1038/s41467-024-47053-6](https://doi.org/10.1038/s41467-024-47053-6)

<https://www.nature.com/articles/s41467-024-47053-6>

Wissenschaftlicher Kontakt:

Dr. Birgit Stiller / Forschungsgruppenleiterin

›Quantenoptoakustik‹ am

Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen.

www.mpl.mpg.de / birgit.stiller@mpl.mpg.de

Das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) deckt ein breites Forschungsspektrum ab, darunter nichtlineare Optik, Quantenoptik, Nanophotonik, photonische Kristallfasern, Optomechanik, Quantentechnologien, Biophysik und – in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Zentrum für Physik und Medizin – Verbindungen zwischen Physik und Medizin. Das MPL wurde im Januar 2009 gegründet und ist eines der über 80 Institute der Max-Planck-Gesellschaft, die Grundlagenforschung in den Natur-, Bio-, Geistes- und Sozialwissenschaften im Dienste der Allgemeinheit betreiben.