

## PHOTONIK

# Phase wechsel dich

**Die Integration von Phasenwechselmaterialien in photonische Bauelemente ermöglicht neue Rechnerarchitekturen für Anwendungen in der Künstlichen Intelligenz.**

Johannes Feldmann und Wolfram Pernice

Herkömmliche Computerarchitekturen stoßen immer häufiger an ihre Grenzen, wenn sie wachsende Datenfluten verarbeiten sollen. Um mit der rasanten Entwicklung des Informationszeitalters Schritt zu halten, bedarf es neuer Technologien, wie der integrierten Photonik mit Phasenwechselmaterialien. Diese optische Plattform ermöglicht Architekturen, die Daten parallel und nahezu in Lichtgeschwindigkeit effizient verarbeiten.

Die Digitalisierung geht mit der Analyse exponentiell zunehmender Datenmengen einher. Beispiele sind kognitive Aufgaben wie die Sprach- und Mustererkennung, aber auch die Bildverarbeitung von Videodaten für autonomes Fahren oder das Angebot von Livestreaming-Diensten. Die Miniaturisierung elektrischer Schaltkreise kann dem Bedarf an immer schnelleren und effizienteren Methoden der Datenverarbeitung nicht mehr folgen. Auch der steigende Energiebedarf herkömmlicher Rechnerarchitekturen sorgt insbesondere bei Künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen für Probleme. Die heutigen Von-Neumann-Architekturen sind dem menschlichen Gehirn in präziser Arithmetik deutlich überlegen, lösen kognitive Aufgaben aber wesentlich schlechter. Daher liegt es nahe, mit der Natur als Vorbild die Funktion unseres Gehirns mit spezifischer Hardware nachzubilden.

Analog zu den integrierten Schaltkreisen der Elektronik bietet die integrierte Photonik eine robuste und skalierbare Plattform, um komplexe optische Schaltkreise zu entwerfen und zu konstruieren. Die Bestandteile optischer Aufbauten – beispielsweise Filter, Modulatoren und Detektoren – lassen sich mithilfe herkömmlicher Lithographieverfahren in Miniaturform auf Halbleiterchips herstellen. Optische Wellenleiter führen das Licht und bieten eine stabile und reproduzierbare Umgebung für seine gezielte Manipulation. So ist es möglich, Information in der Phase oder der Amplitude des Lichts zu speichern und auszulesen.

Die Telekommunikation nutzt die integrierte Photonik schon seit langem bei der Konversion elektrischer Signale, um Daten in schnellen Glasfasernetzen mittels integrierter Laser und Modulatoren zu übertragen. Für die Grundlagenforschung finden sich Anwendungen in der Quantenoptik [1, 2] und für die Sensorik in der Biologie [3]. Der nahezu verlustfreie Informationstransport in integrierten Wellenleitern und die Datenübertragung mit Lichtgeschwindigkeit bieten besonderes Potenzial für alternative Rechnerarchitekturen, insbesondere bei paralleler Datenverarbeitung. Multiplexverfahren für die Wellenlänge oder die Polarisation erlauben es, in einem Schaltkreis mehrere Signale gleichzeitig und unabhängig voneinander zu verarbeiten. Ein idealer photonischer Schaltkreis besteht aus

verlustarmen Wellenleitern, optischen Modulatoren und Detektoren, die mit Frequenzen bis zu 100 GHz arbeiten: Die große spektrale Bandbreite ermöglicht eine hohe Parallelität.

Heute lassen sich tausende optische Komponenten in chipintegrierten photonischen Schaltkreisen in einem Bereich zusammenfassen, der so groß ist wie eine 1-Cent-Münze (Abb. auf S. 36). Ein nanophotonischer Prozessor aus photonischen Schaltkreisen (Abb. 1) diente kürzlich dazu, gesprochene Vokale zu erkennen [4]. Das zeigt, wie fortgeschritten die Fabrikation photonischer Schaltkreise heute ist. Wesentliche Bestandteile einer Elektronik sind bereits analog zu elektrischen Schaltkreisen in großer Stückzahl auf einen Chip integrierbar. Allerdings nutzte dieser Prozessor thermische Heizelemente für die Modulation des Lichts. Diese lassen sich zwar unkompliziert in den optischen Schaltkreis integrieren und einfach elektronisch steuern, haben aber durch das thermische Aufheizen elektrischer Kontaktflächen einen hohen Energiebedarf und sind langsam. An ihrer Stelle können sogenannte Phasenwechselmaterialien für eine nicht-flüchtige und energieeffiziente Modulation in photonischen Schaltkreisen sorgen.

### Amorph oder kristallin – das ist hier die Frage!

Seit den 1960er-Jahren wird eine Materialklasse erforscht, deren elektrische und optische Eigenschaften sich abhängig vom Materialzustand reversibel verändern. Beispielsweise variiert die elektrische Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen, wenn das Material von der amorphen in die kristalline Phase übergeht. Auch der Brechungsindex dieser Phasenwechselmaterialien verhält sich unter dieser Transformation reversibel. Weil geringe Schaltenergien nötig sind und die Phasen ohne weitere Energiezufuhr über mehrere Jahre stabil existieren, kommen Phasenwechselmaterialien seit den 1990er-Jahren kommerziell als optische Datenspeicher in Form von DVDs oder Blu-ray-Discs zum Einsatz [5].

Die Chalkogenide mit ihrem bekanntesten Vertreter  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  bilden die größte Klasse von Phasenwechselmaterialien. Der Kontrast ihrer optischen und elektrischen Eigenschaften beruht auf den unterschiedlichen Bindungsarten in den beiden Phasen. Im amorphen Zustand dominieren kovalente Bindungen: Die Elektronen sind lokalisiert, und es existiert keine langreichweitige Ordnung. Dies führt zu niedriger elektrischer Leitfähigkeit und geringer optischer Absorption. Der kristalline Zustand zeichnet sich dagegen durch eine resonante Bindung aus, bei der sich mehrere Atome die Elektronen teilen. Diese Delokalisierung führt zu metallischem Verhalten mit hoher elektrischer Leitfähigkeit und großer Absorption von Licht. Während elektronische Datenspeicher (phase-change RAM) den Unterschied in der elektrischen Leitfähigkeit ausnutzen, basieren optische Datenträger auf der veränderten Reflektivität und Absorption. Auch integrierte photonische Bauteile nutzen diese aus.

Wenn das Material die Phase wechselt, ändern sich Real- und Imaginärteil des Brechungsindex, was sowohl die Phase des Lichts als auch die Absorption im Material

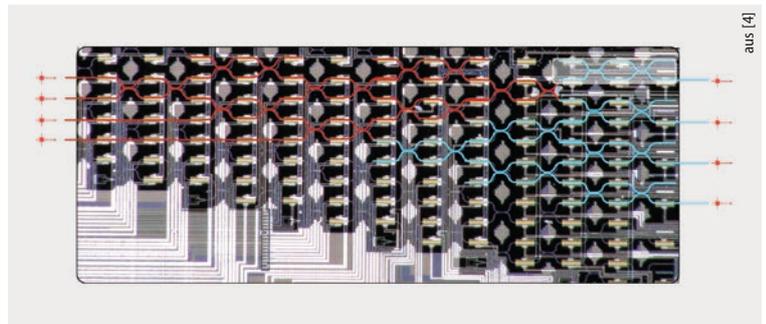


Abb. 1 Ein integrierter photonischer Schaltkreis für neuromorphes Rechnen vereint wichtige Elemente wie Modulatoren, Detektoren und Steuerung.

beeinflusst. Um das Material in einen optischen Schaltkreis zu integrieren, wird es auf der Oberseite eines Wellenleiters abgeschieden (Abb. 2a). Führt der Wellenleiter Licht, koppelt es evaneszent an das Phasenwechselmaterial, also über sein außerhalb des Wellenleiters exponentiell abfallendes elektromagnetisches Feld, und reagiert auf dessen Kristallzustand. Eine Simulation für eine Wellenlänge von 1550 nm zeigte, dass das Licht in einem Wellenleiter aus dem transparenten Halbleiter Silizumnitrid kaum beeinflusst wird, wenn das Phasenwechselmaterial amorph vorliegt (Abb. 2b). Im kristallinen Zustand verlagert sich dagegen das elektrische Feld, sodass das Licht mit dem Material wechselwirkt (Abb. 2c). Auch die effektiven Brechungsindizes unterscheiden sich deutlich: Beim Wechsel vom amorphen zum kristallinen Zustand wächst der Realteil von 1,6 auf 1,8 an, der Imaginärteil steigt von 0,002 auf 0,084. Insbesondere das Verhalten des Imaginärteils er-

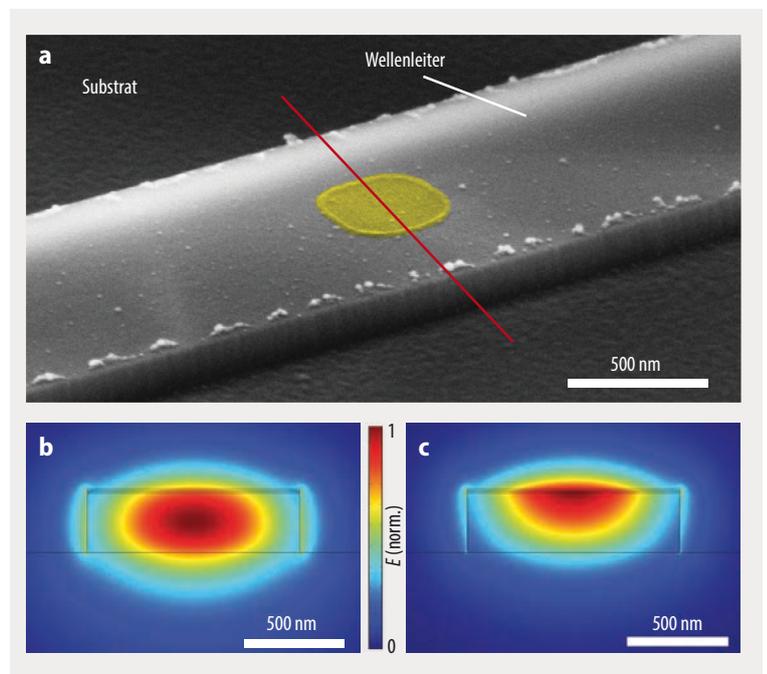
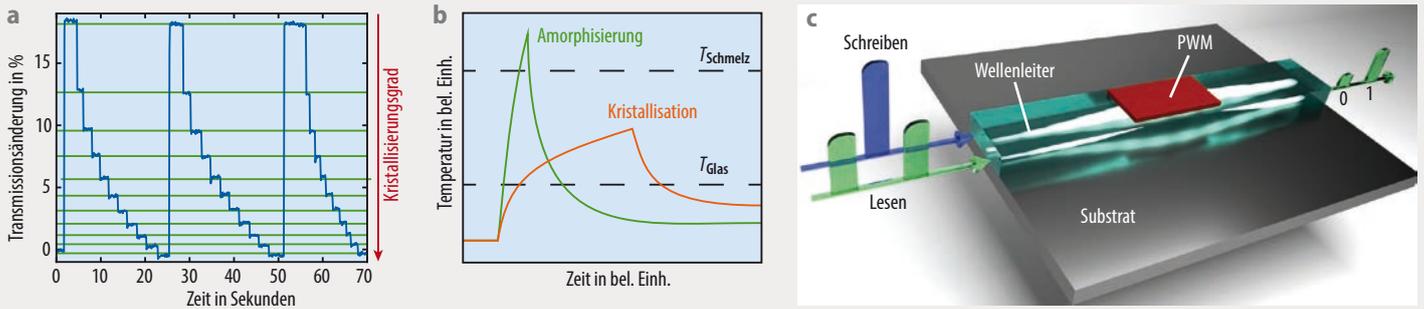


Abb. 2 Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme (a) zeigt auf dem Substrat den Wellenleiter mit einem aufgebrachten Phasenwechselmaterial (gelb). Für einen Querschnitt durch den Wellenleiter (rot) lässt sich die optische Mode simulieren: In einem amorphen Phasenwechselmaterial ist das elektrische Feld im Wellenleiter zentriert (b, dunkelrot), für ein kristallines Material verlagert sich das Feld an die Oberfläche des Wellenleiters (c).



**Abb. 3** Für einen Wellenleiter mit Phasenwechselmaterial (PWM) ändert sich die optische Transmission mit dem Kristallisierungsgrad des Materials (a, blau). Zustände zwischen vollständiger Absorption und vollständiger Transmission (grün) sind realisierbar. Im zeitlichen Verlauf der Temperatur lassen sich Amorphisierung (b, grün) und Kristallisation (orange) unterscheiden. Im amorphen Zustand wird das Eingangslicht vollständig transmittiert, und das Auslesen der Zelle ergibt Eins (c, grün). Nach der Kristallisation durch einen energiereichen optischen Puls (blau) absorbiert das Material das Licht, und eine Null wird ausgelesen.

möglichst es, die Amplitude des im Wellenleiter geführten Lichts gezielt zu modulieren.

Im kristallinen Zustand absorbiert das Phasenwechselmaterial das Licht größtenteils und transmittiert nur wenig. Weil die Kopplung an das Material im amorphen Zustand gering ist, wird das Licht fast vollständig transmittiert. Dabei verändert sich das Verhalten schrittweise zwischen nahezu vollständiger Absorption und Transmission – je nachdem, wie groß die Anteile von kristallinem und amorphem Material sind (**Abb. 3a**). Diese Zwischenzustände lassen sich beispielsweise für Multilevel-Speicher [6] oder in der Arithmetik [7] nutzen. Sie können auch als analoges Speicherelement dienen.

Zudem ist es möglich, zwischen den Zuständen elektrisch umzuschalten oder optisch im Sub-Nanosekundenbereich [6]. Das elektrische Schalten bietet sich insbesondere an, um elektrische und optische Schaltkreise auf einem Chip zu integrieren. Herkömmliche Elektronik lässt sich besser miniaturisieren und kann Steuerungsaufgaben übernehmen, während die optische Variante die eigentliche Datenverarbeitung schnell und effizient erledigt. Der reversible Schaltvorgang ist mithilfe des zeitlichen Verlaufs der Temperatur zu verstehen (**Abb. 3b**). Das Erhitzen über den Schmelzpunkt  $T_{\text{Schmelz}} \approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$  und schnelle Abkühlen unter die Glasübergangstemperatur  $T_{\text{Glas}}$  (200 bis  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) überführt den kristallinen in den amorphen Zustand. Durch das schnelle Abkühlen haben die Atome nicht genug Zeit, um mittels Diffusion wieder ihre bevorzugte, energetisch günstigere kristalline Ordnung herzustellen: Der amorphe ungeordnete Zustand friert ein. Für die Kristallisation muss  $T_{\text{Glas}}$  so lange überschritten werden, bis die Ordnung wieder vorliegt. Das Erhitzen können optische Pulse im Wellenleiter übernehmen, deren Energie vom Phasenwechselmaterial absorbiert wird (**Abb. 3c**); auch Joulesches Heizen mit zusätzlichen Elektroden ist möglich.

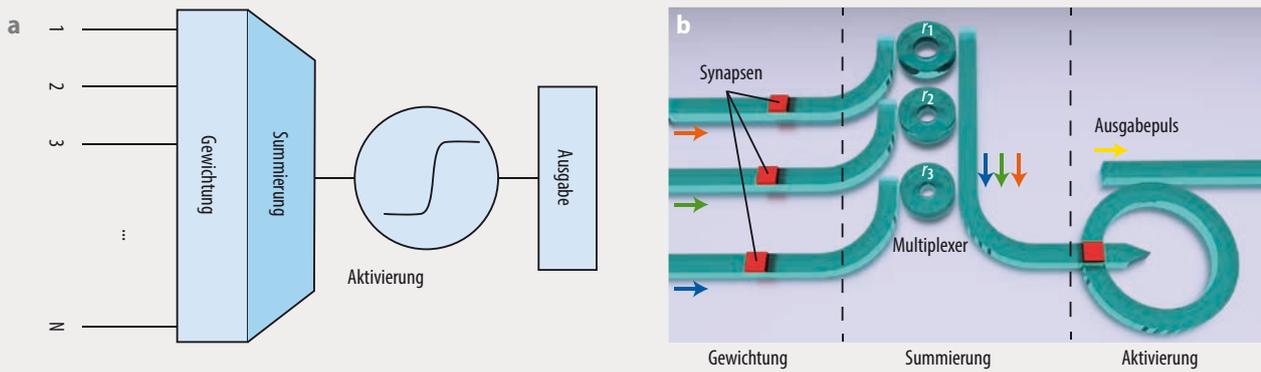
Der einfache Aufbau – bestehend aus einem Wellenleiter mit einem evaneszent gekoppelten Phasenwechselmaterial – lässt sich beispielsweise als optischer nicht-flüchtiger Datenspeicher [8] oder für arithmetische Aufgaben wie Ad-

dition, Subtraktion oder Faktorisierung nutzen [7]. Ausgehend von dieser analogen Zustandsspeicherung bietet die Photonik mit Phasenwechselmaterialien weiteres Anwendungspotenzial. Beispiele sind optische neuronale Netzwerke oder die Implementierung der Matrixmultiplikation.

### Neuronen optisch implementieren

Neuronale Netze bilden die Arbeitsweise unseres Gehirns in eine Rechnerstruktur ab, die kognitive Aufgaben wie Sprach- und Mustererkennung sowie Klassifizierungen ausführen kann. Die ersten neuronalen Netze haben Informatiker auf Computern programmiert, die auf herkömmlichen Von-Neumann-Architekturen beruhten und Befehle sequenziell abarbeiteten. Dabei sind Speicher- und Prozessoreinheit strikt getrennt, und der Datentransfer zwischen Speicher und Prozessor stellt die wesentliche Limitierung für eine schnellere Verarbeitung dar. Diesen Flaschenhals können „in-memory computing“-Verfahren umgehen, indem sie die Rechnungen direkt im Speicher ausführen. Dazu dürfen Speicher und Prozessor nicht mehr physisch voneinander getrennt sein. Für die entsprechende Hardware kommen Architekturen infrage, die auf Phasenwechselmaterialien basieren: Sie speichern die Daten nicht-flüchtig, also auch ohne ständige Energiezufuhr. Außerdem sind optische neuronale Netze vorstellbar, welche die Grundfunktionen eines klassischen neuronalen Netzes allein mit photonischen Bauelementen nachbilden und eigenständig nur mittels Licht einfache Muster erkennen.

Ein neuronales Netz besteht aus mehreren Schichten künstlicher Neuronen. Diese Grundbausteine des Netzwerks übernehmen die Rechenfunktion. Im Fall eines vollständig vernetzten neuronalen Netzes sind alle Neuronen der vorhergehenden Schicht mit denen der darauffolgenden verknüpft. Die erste Schicht nimmt die zu verarbeitenden Informationen auf, wichtet – wie jede weitere – die Eingangssignale mit variablen Faktoren und bildet eine gewichtete Summe (**Abb. 4a**). Diese dient als Eingabewert einer Aktivierungsfunktion, die darüber entscheidet,



**Abb. 4** Ein künstliches Neuron wichtet zunächst die Eingangssignale 1 bis  $N$ . Die gewichtete Summe geht in eine Aktivierungsfunktion ein, die über die Höhe des Ausgabepulses entscheidet (a). Bei einem künstlichen Neuron aus photonischen Bauelementen entscheidet das Phasenwechselmaterial (b, rot) über die Gewichtung. Die unterschiedlichen Wellenlängen (Pfeile) der Eingangssignale lassen sich mittels Ringresonatoren auf einen Wellenleiter zusammenführen. Ein weiterer Resonator bildet die Aktivierungsfunktion ab: Wenn die gewichtete Summe zum Schalten des Phasenwechselmaterials ausreicht, ändert sich dessen Resonanzbedingung und ein Ausgabepuls wird erzeugt.

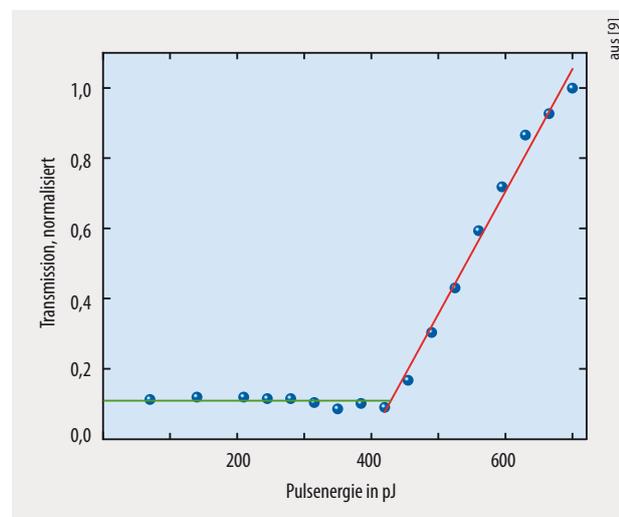
ob das Neuron ein Ausgangssignal sendet oder nicht. Im einfachsten Fall handelt es sich um eine Stufenfunktion, die bis zu einem festgelegten Schwellenwert die Ausgabe Null liefert und oberhalb einen festen Wert größer Null annimmt. Aufgrund ihrer Differenzierbarkeit sind heute Sigmoidfunktionen gebräuchlicher – oder auch die „rectified linear unit“-Funktion (ReLU). Nach dem Propagieren durch das Netzwerk liefert die letzte Schicht das Ergebnis. Durch einen geeigneten Algorithmus, beispielsweise die Backpropagation, erlernt das Netz die Gewichtungsfaktoren und hält sie nach Abschluss des Trainings konstant.

Für ein optisches neuronales Netz ist es entscheidend, die Funktion eines Neurons in einem photonischen Bauteil nachzubilden [9]. Zunächst gilt es, die Eingangssignale in optische Pulse umzuwandeln und über Wellenleiter zum photonischen Neuron zu leiten (Abb. 4b). Die Gewichtung der Signale übernehmen Phasenwechselmaterialien, die auf den Wellenleitern aufgebracht sind: Abhängig von seinem Zustand absorbiert das Material mehr oder weniger Licht. Im Anschluss erfolgt die Summation mit dem Wellenlängen-Multiplexverfahren. Dazu nutzt ein optisches Neuron einen Ringresonator, der sich so nah am Wellenleiter befindet, dass das Licht evaneszent einkoppeln kann. Damit es zur konstruktiven Interferenz kommt, muss ein ganzzahliges Vielfaches der Lichtwellenlänge der optischen Umlauflänge des Resonators entsprechen. Andernfalls interferiert das Licht destruktiv mit sich selbst, was das Einkoppeln effektiv unterdrückt. Ringe mit verschiedenen Radien  $r_i$  können demnach Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen in einem angekoppelten Wellenleiter vereinen („multiplexen“), so wie sich umgekehrt mehrfarbiges Licht in seine einzelnen Bestandteile auftrennen lässt („demultiplexen“). Im Fall eines optischen Neurons vereinen die Ringresonatoren die gewichteten Eingangssignale und summieren so ihre Leistung gewichtet auf.

Als letzter Abschnitt des Neurons nutzt die Aktivierungseinheit diese gewichtete Summe als Eingabe und prüft anhand der implementierten Aktivierungsfunktion, ob ein Ausgangssignal zu senden ist. Photonisch besteht die

Einheit aus einem weiteren Ringresonator, der einen Wellenleiter kreuzt. An der Kreuzung ist ein Phasenwechselmaterial aufgebracht. Befindet sich dieses ursprünglich im kristallinen Zustand, besitzt der Ring eine feste Resonanzbedingung. Sendet man Licht der passenden Wellenlänge durch den Ausgangswellenleiter, koppelt es in den Ring ein: Das Neuron leitet kein Ausgabesignal weiter. Sobald nun die gewichtete Summe an der Kreuzung den Schwellenwert überschreitet, um Teile des Phasenwechselmaterials in den amorphen Zustand zu überführen, ändert sich die Resonanzbedingung aufgrund der neuen optischen Weglänge des Rings: Ein Teil des Lichts im Ausgangswellenleiter transmittiert und dient als Ausgabesignal des Neurons.

Weil abhängig von der gewichteten Summe unterschiedliche Anteile des Phasenwechselmaterials in den amorphen Zustand übergehen, bildet der beschriebene Aufbau optisch effektiv eine ReLU-Funktion nach (Abb. 5): Das Ausgabe-



**Abb. 5** Die experimentellen Daten (blau) belegen, dass das beschriebene optische Neuron für ein Eingangssignal mit weniger als 420 pJ Energie nicht reagiert (grün, Fit). Oberhalb dieses Werts wächst die Energie des Ausgabepulses linear an (rot, Fit).

signal bleibt so lange nahezu Null, bis die Energie ausreicht, um das Phasenwechselmaterial zu schalten. Anschließend nimmt das Signal linear mit der Schaltenergie zu.

Mit diesen optischen Neuronen als Bausteinen lassen sich Netzwerke erstellen. Schon ein optisches neuronales Netzwerk aus vier Neuronen und 60 Synapsen (Abb. 6a) ist in der Lage, vier einfache Pixelmuster zu unterscheiden. Nach dem erfolgreichen Training ist jedes Neuron auf ein bestimmtes Muster spezialisiert und liefert nur bei diesem ein hohes Ausgangssignal (Abb. 6b). Dazu gilt es zunächst, die Gewichtungsfaktoren durch ein Training einzustellen, das überwacht oder unüberwacht erfolgt. Beim überwachten Training hilft ein Datensatz aus Paaren von Eingabe- und Ausgabewerten, die Faktoren mithilfe eines geeigneten Algorithmus wie Backpropagation zu optimieren. Liegen solche Datensätze nicht vor, kommen unüberwachte Lernverfahren zum Einsatz: Das neuronale Netzwerk extrahiert dabei selbstständig Muster aus einem Datenstrom und ordnet diese zu. Die vorgestellte Architektur ist skalierbar und eignet sich auch bei komplexeren Anwendungen, die mehr Neuronen benötigen.

### Optisch multiplizieren

Eine weitere Anwendung besteht darin, die Hardware konventioneller Prozessoren mittels Photonik zu beschleunigen. Matrixmultiplikationen sind sehr zeitaufwändig, aber beispielsweise in der Computergrafik unumgänglich. Neuromorphe Rechnerstrukturen können den Vorgang beschleunigen: In einem optischen neuronalen Netz lässt sich beispielsweise das Gewichten und Aufsummieren der Eingangssignale als Matrixmultiplikation interpretieren. Schon die einfache Zelle aus Wellenleiter und Phasenwechselmaterial kann solche Operationen durchführen

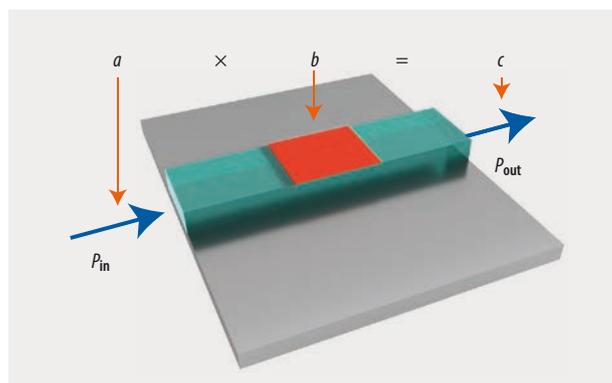


Abb. 7 Bei der Skalarmultiplikation entsprechen die Faktoren  $a$  und  $b$  der Leistung des Eingangslichts  $P_{in}$  und dem Zustand des Phasenwechselmaterials (rot), das Produkt  $c$  der Amplitude  $P_{out}$ .

[10]. Der einfachste Fall ist die Multiplikation von Skalaren:  $a \times b = c$  (Abb. 7). Entspricht der Faktor  $a$  der Leistung des Eingangslichts  $P_{in}$  und der Faktor  $b$  dem Verlustfaktor, der vom Zustand des Phasenwechselmaterials abhängt, ergibt sich die transmittierte Leistung  $P_{out}$  als Produkt  $c$  der beiden Faktoren. Das Verknüpfen mehrerer solcher Zellen erlaubt es, Matrix- bzw. Vektormultiplikationen effizient mit einer einfachen optischen Transmissionsmessung zu realisieren. Eine Summe lässt sich als Kombination der Ausgangsleistungen zweier Zellen bestimmen.

Die optischen Zellen arbeiten bei mehreren aufeinanderfolgenden Operationen besonders effektiv, wenn ein Faktor konstant bleibt und dieser durch das Phasenwechselmaterial abgebildet wird. Der variable Faktor ist schnell durch die Eingangsleistung des Lichts veränderbar. Dieser Fall tritt insbesondere bei Berechnungen in neuronalen Netzen auf, wenn das Training abgeschlossen ist und die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Schichten, also die Zustände der Phasenwechselmaterialien, feststehen. Die Operation entspricht einer optischen Transmissionsmessung, deren Geschwindigkeit nur durch die Modulation der Eingangsvektoren und die Bandbreite der Detektoren limitiert ist. Diese beträgt heute bis zu 100 GHz und liegt damit fast zwei Größenordnungen über derjenigen typischer elektronischer Prozessoren. Weil keine Phasentransformation in den Phasenwechselmaterialien notwendig ist und die Eingangsleistung bis zur Detektionsschwelle reduziert werden kann, erfolgt die Operation außerdem sehr energieeffizient.

### Auf dem Weg zu neuen Architekturen

Die Photonik hat sich in unserem Alltag bereits in der Telekommunikation sowie in optischen und elektrischen Datenspeichern weit verbreitet. Beide Plattformen zu kombinieren, ist eine aktuelle Herausforderung der Forschung. Sie verspricht großes Potenzial, beispielsweise bei der Datenverarbeitung mittels „in-memory computing“ und für die Entwicklung spezialisierter Hardware für die Künstliche Intelligenz und neuronale Netzwerke. Schlüsseloperationen wie die Matrixmultiplikation sind schon heute mithilfe von Phasenwechselmaterialien effizient und mit hohem Datendurchsatz möglich. Optische künstliche Neu-

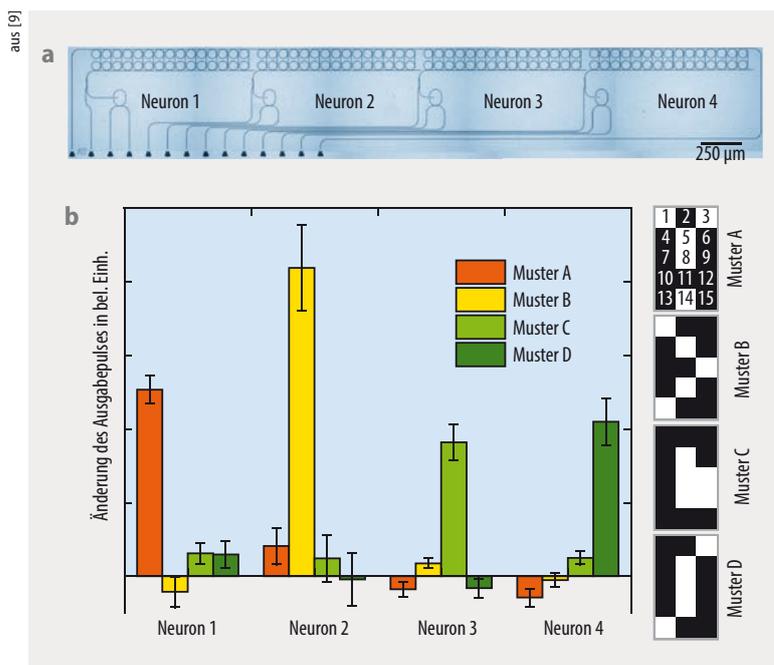


Abb. 6 Das optische Mikroskopbild zeigt ein neuronales Netzwerk aus vier Neuronen mit insgesamt 60 Synapsen (a). Nach erfolgreichem Training spricht genau eines der Neuronen auf eines der Pixelmuster an (b).

ronen erlauben es, mit Multiplexverfahren Daten parallel zu verarbeiten. So lassen sich Einschränkungen kompensieren, beispielsweise der eher große Flächenbedarf von optischen Schaltkreisen im Vergleich zu elektronischen. Weil die Wellenleiter das Licht nicht absorbieren, treten in optischen Schaltkreisen keine Wärmeverluste auf: Das aufwändige Kühlen bei hohen Taktfrequenzen entfällt.

Die Integration von Phasenwechselmaterialien ermöglicht es, die passiven photonischen Bauteile – beispielsweise Wellenleiter und Resonatoren – durch eine aktive Komponente zu ergänzen, die das Licht modulieren kann. Aufgrund der nicht-flüchtigen Eigenschaften der Phasenwechselmaterialien bedarf es keiner Energie, um den Speicherzustand aufrechtzuerhalten. Das ermöglicht eine energieeffiziente Datenverarbeitung und -speicherung. Darüber hinaus machen schnelle Schaltzeiten im Subnanosekundenbereich und der geringe Energiebedarf beim Schaltvorgang die Photonik mit Phasenwechselmaterialien zu einem vielversprechenden Kandidaten für zukünftige neuromorphe Rechnerarchitekturen.

**Literatur**

[1] J. W. Silverstone et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **22**, 390 (2016)  
 [2] J. Wang et al., Nat. Photonics **14**, 273 (2020)  
 [3] V. M. N. Passaro et al., Sensors **12**, 15558 (2012)  
 [4] Y. Shen et al., Nat. Photonics **11**, 441 (2017)  
 [5] N. Yamada und T. Matsunaga, J. Appl. Phys. **88**, 7020 (2000)  
 [6] C. Ríos et al., Nat. Photonics **9**, 11, 725 (2015)  
 [7] J. Feldmann et al., Nat. Commun. **8**, 1256 (2017)  
 [8] J. Feldmann et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **26**, 2 (2020)  
 [9] J. Feldmann et al., Nature **569**, 208 (2019)  
 [10] C. Ríos et al., Sci. Adv. **5**, 2 (2019)

**Die Autoren**



**Johannes Feldmann** studierte Physik an der WWU Münster. Als Doktorand untersucht er die integrierte Photonik mit Phasenwechselmaterialien insbesondere für unkonventionelle optische Rechnerarchitekturen mit Anwendungen in der Künstlichen Intelligenz.

**Wolfram Pernice** promovierte an der University of Oxford und war danach als Postdoc an der Yale University und als Leiter einer Emmy Noether-Gruppe am Karlsruher Institut für Technologie tätig. An der WWU Münster nutzt er nanophotonische Systeme, um unkonventionelle Rechnerarchitekturen zu realisieren.



**M. Sc. Johannes Feldmann** und **Prof. Dr. Wolfram Pernice**, Physikalisches Institut, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Heisenbergstr. 11, 48149 Münster

# Physik Journal

Newsletter

The screenshot shows the newsletter interface with the following content:

- Header: Physik Journal Newsletter
- Text: "Sehr geehrter Herr Einstein, für die erste DPG-Herbsttagung in Freiburg steht mittlerweile das Programm zur Verfügung. Auch in unser Doppelhft August/September können Sie schon jetzt online einen Blick werfen." followed by "Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen Ihr Physik Journal Team".
- Section: "Physik Journal Nachrichten" with a "Panorama" sub-header.
- Article 1: "Den Horizont erweitern" (15.08.2019) - "Mit zwei Online-Umfragen fordert die Europäische Kommission auf, Horizon Europe mitzugestalten." Includes a colorful grid image.
- Article 2: "Pionier der angewandten Mathematik" (13.08.2019) - "Zum 200. Geburtstag des britischen Mathematikers und Physikers George Gabriel Stokes." Includes a portrait of George Gabriel Stokes.
- Footer: "WEBINAR Fluid-Struktur-Interaktion simulieren | 19. September, 14:00 Uhr" with a "jetzt registrieren" button and the COMSOL logo.

- ▶ Online-Meldungen der Redaktion,
- ▶ Neuigkeiten aus der DPG, TV-Tipps und mehr finden Sie in unserem Newsletter.

Sie möchten ihn erhalten?  
 Hinterlegen Sie Ihre E-Mail-Adresse und bestellen Sie den Newsletter unter:  
[www.dpg-physik.de/ueber-uns/mitgliedschaft/dpg-mitgliedschaft-aendern](http://www.dpg-physik.de/ueber-uns/mitgliedschaft/dpg-mitgliedschaft-aendern)