

SCHATTEN

RISSE

SCHATTENRISSE

VON HARTEM UND WEICHEM LICHT

WOLFRAM PERNICE

Winzige Schaltkreise, die mit Lichtteilchen bestückt sind, lassen auf Hochleistungscomputer hoffen, die der Funktionsweise des menschlichen Gehirns nahekommen. Die optischen Hardwarealternativen eröffnen die Möglichkeit für faszinierende Anwendungen, beispielsweise im Bereich der Künstlichen Intelligenz.

A

Aus der Fotografie ist die Wirkung von hartem und weichem Licht gut bekannt. Mit hartem Licht lässt sich die Umgebung mit klar definierten scharfen Konturen im Schattenwurf ausleuchten. Weiches Licht macht das Bild diffuser und lässt Umrisse verschwimmen. Ausschlaggebend für den jeweiligen Effekt ist die Größe der Lichtquelle im Vergleich zum beleuchteten Objekt: Eine relativ kleine Lichtquelle führt zu harter Schattenbildung, eine ausgedehnte Lichtquelle zu weicheren, unschärferen Konturen.

Das Spiel mit Schärfe und Unschärfe erlaubt nicht nur der visuellen Kunst eindrucksvolle Gestaltungsmöglichkeiten. Scharfe Konturen sind auch erwünscht, wenn es darum geht, definierte Strukturen für die Halbleitertechnik auf sehr kleinen Längenskalen zu schaffen. Die Beugung des Lichts an sehr kleinen Strukturen führt allerdings dazu, dass klare Muster aufweichen, was immer dann geschieht, wenn die Größenordnungen im Bereich der optischen Wellenlänge und somit auf der Nanoskala liegen. Diese Beugungseffekte geben die minimale Auflösung vor, die sich bei der Belichtung mit einer gegebenen Wellenlänge oder Farbe des Lichts erreichen lässt. Zum Erreichen sehr feiner Nanostrukturen oder sehr dicht gepackter Muster wäre wirklich hartes Licht ideal geeignet. Zumal Licht nicht nur die Konturen, sondern auch die Eigenschaften der belichteten Materialien beeinflusst, etwa bei der Fotolithografie, einer wichtigen Methode zur Herstellung von Halbleiterbauelementen.

Um Nanomuster zu erzeugen, werden in der Halbleitertechnik Fotolacke benutzt. Die Löslichkeit der Fotolacke hängt davon ab, wie sie belichtet werden: Es gibt Lacke, die bei Belichtung aushärten oder sich chemisch vernetzen; und es gibt Lacke, die aufweichen, wenn sie Licht einer bestimmten Wellenlänge ausgesetzt sind. Aushärtende Lacke eignen sich zum Schutz von Materialien; aufweichende Lacke dienen beispielsweise dazu, Bereiche zu definieren, in denen weitere Prozessschritte erfolgen sollen. Die raffinierte Abfolge von Belichtungen mit beiden Fotolacksorten ist die Grundlage zur Herstellung von Nanostrukturen, die elektrische oder optische Signale verarbeiten und als integrierte Bausteine (Chips) für die Elektronik und die Optik genutzt werden können.

Vorbild: das menschliche Gehirn

Für die sogenannte integrierte Optik, also die Optik auf Chipbasis, wie wir sie in unserer Arbeitsgruppe am Kirchhoff-Institut für Physik entwickeln, werden üblicherweise Nanostrukturen angestrebt, die kleiner als ein Mikrometer sind. Zum Vergleich: Ein Haar hat einen Durchmesser von etwa 50 Mikrometern. Licht kann mithilfe sogenannter Wellenleiter in sehr kleine Nanostrukturen eingeführt werden. Das macht Schaltkreise möglich, in denen keine Elektronen, sondern Lichtteilchen – Photonen – wirken. Solche „photonischen Schaltkreise“ sind für alle Anwendungen interessant, bei denen es darum geht, Daten sehr schnell und ohne großen Energieaufwand zu verarbeiten. Dies öffnet das Tor für völlig neue optische Rechnerarchitekturen, die nicht wie traditionelle elektronische Computer arbeiten, sondern der Funktionsweise des menschlichen Gehirns nachempfunden sind. Der Schwerpunkt unserer Arbeitsgruppe liegt in der Entwicklung und Verbesserung dieser Rechnerarchitekturen.

Die von der Bau- und Arbeitsweise des menschlichen Gehirns inspirierten „neuromorphen Rechner“ sind wichtig, um Hardware für die Künstliche Intelligenz (KI) bereitzustellen. KI-Anwendungen sind bereits in vielen Bereichen unseres Alltags angekommen. Sie helfen beispielsweise bei der

Spracherkennung, verschlüsseln Daten auf dem Smartphone, unterstützen Suchfunktionen, dienen zur Mustererkennung im Internet und sind unerlässlich für die Sicherheit beim autonomen Fahren. All diese Anwendungen stellen herkömmliche elektronische Rechner vor enorme Herausforderungen, weil bei ihnen die Datenspeicherung und Datenverarbeitung getrennt erfolgen. Diese Art der elektronischen Architektur macht es notwendig, Daten kontinuierlich über spezielle Systeme, sogenannte Bussysteme, auszutauschen, was zu einer sequenziellen Taktung führt und den Datendurchsatz begrenzt. Das menschliche Gehirn geht mit Daten vollkommen anders um: Sie werden lokal mit sehr hoher Parallelität verarbeitet, die Verarbeitung erfolgt zudem oft analog, also kontinuierlich, und nicht digital, also in Stufen. Das ist für alle Rechenoperationen wichtig, die in der KI benötigt werden. Die von uns erforschten „photonischen neuromorphen Rechner“ versprechen, diese hohen Ansprüche zu erfüllen.

Rechnen mit Licht

Photonische neuromorphe Rechner benutzen Licht, um Additionen und Multiplikationen als elementare mathematische Rechenoperationen durchzuführen. Die eigentliche Rechenaufgabe wird in die Codierung der miteinander zu verrechnenden Zahlen sowie in die Messung des Ergebnisses übersetzt. Photonische neuromorphe Rechner können dies in einem einzigen Schritt erledigen, weil Lichtteilchen im Unterschied zu Elektronen viele Freiheitsgrade aufweisen, die eine inhärente, gleichzeitige Datenverarbeitung zulassen – das ist der besondere Charme optischer Rechenverfahren. Bei elektronischen Systemen ist es notwendig, viele Einzeloperationen nacheinander auszuführen.

Zur Datenübertragung mithilfe von Glasfasern wird beispielsweise die Wellenlänge des Lichts ausgenutzt, damit Daten auf vielen Farben gleichzeitig über dieselbe Glasfaser ausgetauscht werden können. Dieses Prinzip lässt sich auch für photonische Rechner verwenden: Unterschiedliche Rechenoperationen werden auf unterschiedliche Farben codiert und parallel im selben optischen Rechensystem durchgeführt. Die parallele Verarbeitung bietet enorme Geschwindigkeitszuwächse in der Taktfrequenz – die Berechnungen erfolgen gleichsam mit Lichtgeschwindigkeit. Photonische Rechner können nicht nur deutlich schneller rechnen als elektronische Systeme, sie können darüber hinaus in einer Dimension skaliert werden, die traditionellen Rechnern grundsätzlich nicht verfügbar ist.

Photonische Schaltungen können dank der Fortschritte der Materialwissenschaft und der integrierten Optik heute am Rechner entworfen, simuliert und anschließend in Fertigungsfabriken oder auch bei uns im Reinraum in Heidelberg hergestellt werden. Der Fertigung photonischer Schaltungen kommt die bereits langjährige Erfahrung bei der Herstellung elektronischer Schaltungen zugute. Glücklicherweise kann auf Silizium als Wellenleitermaterial zurückgegriffen werden –

**„Das Spiel mit
Schärfe und
Unschärfe erlaubt
nicht nur der
visuellen Kunst
eindrucksvolle
Gestaltungsmög-
lichkeiten.“**

„Photonische neuromorphe Rechner benutzen Licht, um Additionen und Multiplikationen als elementare mathematische Rechenoperationen durchzuführen.“

auch das weist eine hohe Kompatibilität mit den Methoden der Halbleiterindustrie auf. Das Bereitstellen all dieser Kapazitäten erlaubt es, einzelne Bausteine zu großflächigen Systemen zusammenzufassen. Für das optische Rechnen bedeutet dies: Kleine Schaltkreise werden zu mächtigen Rechenwerken zusammengeschaltet, die viele Multiplikationen und Additionen parallel ausführen. Dies geschieht mithilfe von Rechengittern oder Matrizen; die Eingänge der zu multiplizierenden Zahlen liegen parallel als Vektoren vor. Auf diese Weise können Matrix-Vektor-Rechnungen mithilfe von Licht in Chipform durchgeführt werden – mit sehr hohem Datendurchsatz und sehr geringem Energieaufwand.

Faszinierende Anwendungen

Schon heute werden in der KI künstliche Nervenzell-Netzwerke für kognitive Prozesse eingesetzt. Matrix-Vektor-Multiplikationen sind in diesen neuronalen Netzwerken zentrale Berechnungen: Sie müssen immer wieder durchgeführt werden, was sehr viel Zeit und Energie kostet. Um Zeit und Energie zu sparen, versuchen wir, die zentralen Rechenschritte von speziellen Beschleunigersystemen ausführen zu lassen, die für diese Art von Rechenoperationen optimiert sind und sie für weitere Berechnungen effizient verfügbar machen können. Hier kommen photonische Hardwarebeschleuniger ins Spiel: Sie erlauben eine sehr rasche

Datenverarbeitung und stellen langfristig eine sehr große Rechenkapazität bereit.

Photonische Rechner sind für spezielle Operationen sehr gut geeignet, wieder andere Operationen lassen sich besser in elektronischer Hardware abbilden. Ideal wären „hybride Rechner“, die elektronisch arbeiten und zugleich photonische Beschleuniger enthalten. Bislang gestaltet es sich noch schwierig, photonische Beschleuniger in existierende elektronische Rechensysteme zu integrieren. Diese Ansätze sind jedoch attraktive Modelle für künftige Hochleistungsrechner, die wir erforschen, um den Rechenhunger neuer KI-Anwendungen auch langfristig zu stillen.

Die sehr hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten machen photonische Rechenmodule beispielsweise für die Objekterkennung beim autonomen Fahren interessant – eine wesentliche Sicherheitsvoraussetzung. Dazu erfassen Kamera- und Sensorsysteme die Umgebung, und der Rechner muss die Daten interpretieren, damit auf das Fahrgeschehen dynamisch reagiert werden kann. KI-Verfahren, insbesondere neuronale Netzwerke, sind hierfür ein zentraler Bestandteil. Wie schnell das Gesamtsystem reagiert, wird von der Rechenzeit der Systemkomponenten bestimmt: Je schneller die Objekterkennung erfolgt, desto schneller kann das Fahrzeug korrigiert werden – die Beschleunigersysteme beeinflussen



PROF. DR. WOLFRAM PERNICE ist seit Oktober 2021 Professor für Experimentalphysik am Kirchhoff-Institut für Physik der Universität Heidelberg. Nach dem Studium der Mikrosystemtechnik an der Universität Freiburg und der Promotion an der University of Oxford (Großbritannien) forschte er zunächst an der Yale University (USA) und dann am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), bevor er auf eine Professur an die Universität Münster berufen wurde. Schwerpunkte seiner Forschung liegen in der Nanophotonik und der Realisierung integrierter optischer Schaltungen für die Künstliche Intelligenz und das optische Quantenrechnen.

Kontakt: wolfram.pernice@kip.uni-heidelberg.de

SHADOW'S EDGE

HARD AND SOFT LIGHT

WOLFRAM PERNICE

Photographers use light sources of different sizes to control the hardness of the shadow cast by an object. Hard shadows with defined edges are created by hard light, soft shadows with blurred edges by soft light. In lithography, an important process in the production of semiconductor elements, edge definition is determined by the semiconductor scale and the properties of light, and limited by diffraction effects that occur at length scales equalling the wavelengths of light. At the same time, certain material properties change with exposure to light, such as the solubility of the photoresists used in lithography.

Our research group uses such photo-sensitive material properties to create programmable nanostructures that form the basis of novel photonic computing platforms in which electrons, i.e. current, are replaced by light. With the photonic computing methods at the centre of our research, important computing operations that are relevant for artificial neuronal networks and artificial intelligence can be carried out very quickly and with high energy efficiency. This approach makes use of the fact that light offers new degrees of freedom, not available to electronic computers, to process massive amounts of information simultaneously and at high clock speeds.

The underlying architecture is based on the functioning of neurons and the human brain, which do not differentiate strictly between data storage and data processing. Such “neuromorphic” computing methods inspired by the brain promise to enable new applications in autonomous driving, in the training of artificial neuronal networks or in the ultra-fast processing of telecommunication signals. In these applications, soft and hard material properties provide the basis for the implementation of purely optical, ultra-fast matrix-vector multipliers that can be used as hardware accelerators in the development of artificial intelligence. ●

PROF. DR WOLFRAM PERNICE is Professor of Experimental Physics at Heidelberg University's Kirchhoff Institute, which he joined in October 2021. He studied microsystems technology at the University of Freiburg and obtained his doctorate from the University of Oxford (UK), then worked as a researcher at Yale University (USA) and at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), before accepting a professorship at the University of Münster. Wolfram Pernice's research interests are nanophotonics and the building of integrated optical circuits for artificial intelligence applications and optical quantum computing.

Contact: wolfram.pernice@kip.uni-heidelberg.de

“Photonic hardware accelerators permit ultra-fast data processing and will, in the long term, lead to a significant increase in computing capacity.”

die Sicherheit des Gesamtsystems also unmittelbar. Weitere interessante Anwendungen bietet das Training neuronaler Netzwerke, was sehr zeit- und energieaufwendig ist. Hierzu können photonische Matrix-Vektor-Multiplikatoren genutzt werden. Sie bieten den Vorteil des hohen Datendurchsatzes, sie können effizient an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden, und sie tragen wesentlich zu einer Reduktion des Energieverbrauchs bei.

Auch die Reprogrammierung photonischer Rechner kann in vielfältiger Weise erfolgen. Eine elegante Lösung bietet sich über Phasenwechselmaterialien an, wie sie auf wieder beschreibbaren DVDs verwendet werden. Liegen diese Materialien als harte Kristalle vor, sind sie metallähnlich; ist die Kristallstruktur ungeordnet oder amorph, sind die Materialien glasähnlich und transparent. Beide Zustände lassen sich sehr akkurat durch die Belichtung mit kurzen Laserpulsen einstellen. Die Änderung des Materialzustands wird als Grundprinzip für die optische Datenspeicherung auf DVDs genutzt, wozu die Multiplikatoren der Materialeigenschaft codiert werden: Metallähnliche, harte Kristallzustände bedeuten eine logische Null, glasähnliche oder weiche Kristallzustände stellen eine logische Eins dar. Die einmal eingestellten Zustände bleiben über sehr lange Zeiträume bis hin zu Dekaden erhalten, ohne dass eine externe Energiezufuhr erforderlich ist. Nicht zuletzt ist es für praktische Anwendungen attraktiv, dass bereits sehr kleine Strukturen eines Phasenwechselmaterials über den benutzten Wellenleiter sehr große Auswirkungen auf Licht haben. Das erlaubt es uns, die Größe der Bauteile zu reduzieren und den Platz auf einem Chip effektiv zu nutzen.

Weiche und Härte von Licht umreißen ein faszinierendes Spannungsfeld: einerseits die präzise Strukturbildung mithilfe der Eigenschaften des Lichts, andererseits das Einstellen des Härtegrads von Materialien durch Lichtmodifikationen. Das geschickte Ausnutzen dieses Wechselspiels macht es uns möglich, neue Verfahren der Lithografie und neue optische Methoden für die Datenverarbeitung zu konzipieren. Besonders spannend sind die Übergangsbereiche zwischen beiden Extremen, etwa gemischte Zustände von Phasenwechselmaterialien, die sowohl geordnete kristalline als auch ungeordnete Komponenten enthalten. Ausgestattet mit diesem Werkzeugkasten lassen sich dann gewiss selbst die härtesten Probleme des Designs von Rechnerarchitekturen angehen. ●

„Photonische Hardwarebeschleuniger erlauben eine sehr rasche Datenverarbeitung und stellen langfristig eine sehr große Rechenkapazität bereit.“