

# Photonisch- elektronische Integration

Schlüsseltechnologie für die  
Kommunikationstechnik und Sensorik

VDE ITG

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung . . . . .	3
1. Einleitung . . . . .	4
2. Photonisch-elektronische Integration . . . . .	5
3. Forschungsfelder . . . . .	6
4. Handlungsempfehlungen . . . . .	9

## Autoren

**Christian Schäffer (Koordinator)**, Helmut-Schmidt  
Universität Hamburg

**Jörg-Peter Elbers**, ADVA

**Robert Weigel**, FAU Erlangen-Nürnberg

**Damian Dudek**, Deutsche Forschungsgemeinschaft

**Matthias Berger**, Finisar

**Andreas Leven**, Nokia

**Sven Otte**, Sicoya

**Christoph Schulien**, Ranovus

**Harald Bock**, Infinera

**Heiko-Gustav Kurz**, Volkswagen

**Andreas Umbach**, Aucept

**Christoph Scheytt**, Heinz-Nixdorf Institut der  
Universität Paderborn

**Klaus Petermann**, TU Berlin

**Manfred Berroth**, Universität Stuttgart

**Andreas Stöhr**, Universität Duisburg-Essen

**Friedel Gerfers**, TU Berlin

**Jeremy Witzens**, RWTH Aachen

**Martin Schell**, Fraunhofer Heinrich Hertz Institut

**Gerhard Kahmen**, Leibniz Institut für innovative  
Mikroelektronik

**Wolfgang Heinrich**, Ferdinand Braun Institut

## Herausgeber

### VDE ITG – Informationstechnische Gesellschaft im VDE e.V.

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main

*Januar 2021*

# Zusammenfassung

Für die Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft ist eine performante und effiziente Informationsverarbeitung, -verteilung und -speicherung unabdingbar. Die Mikroelektronik entwickelt sich in einem rasanten Tempo und benötigt die Photonik in der Prozessortechnologie, der Datenkommunikation und der Sensorik als notwendige Ergänzung. Rapide steigende Datenraten und neue Anwendungen wie THz-Radio, Kohärenz-Tomographie, maschinelles Sehen, Lidar und Quanteninformationsverarbeitung erfordern zunehmend den Einsatz photonischer Technologien. Erst durch eine intelligente Integration von Elektronik und Photonik können beide Technologien ihre volle Wirkung entfalten.

Integrierte photonische Transceiver bieten gegenüber elektronischen Transceivern ein enormes Verbesserungspotenzial, was die erreichbare Datenrate, Reichweite, Energieeffizienz und Kompaktheit angeht. Integriert-optische Sensoren erlauben räumliches Sehen mit besserer Auflösung und zu niedrigeren Kosten als konventionelle Lösungen. Kombiniert mit anwendungsspezifischen elektronischen Schaltkreisen ebnet sie den Weg für neue System-on-Chip (SoC)- und System-in-Package (SiP)-Lösungen ungekannter Integrationsdichte. Der Markt für Siliziumphotonik-Komponenten allein wird in 2025 auf 3.5 Mrd. USD geschätzt<sup>1</sup>, der gesamte optische Transceiver-Markt im Jahr 2019 war über 6 Mrd. USD groß<sup>2</sup>. Beide Kennzahlen zeigen das hohe Marktpotenzial photonisch-elektronisch integrierter Produkte auf.

Weltweit beschäftigen sich Initiativen wie Petra<sup>3</sup> in Japan, DARPA's Electronics Re-urgence Initiative mit Projekten wie PIPES<sup>4</sup> und LUMOSA und Industriekonsortien wie COBO<sup>5</sup> und CPO<sup>6</sup> damit, die photonisch-elektronische Integration voranzutreiben. In Deutschland fördert die DFG in einem Schwerpunktprogramm Grundlagenforschung auf diesem Gebiet<sup>7</sup>. Für eine kommerzielle Umsetzung sind jedoch noch eine Vielzahl von Herausforderungen zu lösen. Die Hightech-Strategie der Bundesregierung betont die zentrale Bedeutung der Mikroelektronik für den Standort Deutschland. Im Verbund mit der Photonik, mit der die deutsche Industrie in 2018 einen Umsatz von 3 Mrd. EUR erzielt hat<sup>8</sup>, gilt es jetzt, die Chancen zu nutzen, die die photonisch-elektronische Integration in Zukunftsfeldern wie Kommunikation, Industrie 4.0 und Mobilität bietet. Zu diesem Zweck werden 1) eine Förderinitiative für photonisch-elektronische integrierte Schaltungen, 2) die Weiterentwicklung von Silizium als Integrationsplattform auch für die Hetero-Integration und 3) der Entwurf einer Industriestrategie für photonisch-elektronische Mikrochips empfohlen.

---

1 Yole Développement, [http://www.yole.fr/iso\\_album/illus\\_si\\_photonics\\_marketforecast\\_yole\\_may\\_2020.jpg](http://www.yole.fr/iso_album/illus_si_photonics_marketforecast_yole_may_2020.jpg)

2 Lightcounting, <https://www.lightcounting.com/light-trends/optical-communications-industry-will-be-among-first-emerge-covid-19-disruptions/>

3 Photonics Electronics Technologies Research Association, <http://www.petra-jp.org/e/index-e.html>

4 Photonics in the Package for Extreme Scalability, <https://www.darpa.mil/program/photonics-in-the-package-for-extreme-scalability>

5 Consortium for On-Board Optics, <https://www.onboardoptics.org>

6 Co-Packaged Optics collaboration, <https://www.facebook.com/CoPackagedOpticsCollaboration>

7 DFG:Schwerpunktprogramm 2111 Integrierte Elektronisch-photonische Systeme für die ultrabreitbandige Signalverarbeitung

8 Spectaris, [https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS\\_Trendreport\\_Photonik\\_2019-2020.pdf](https://www.spectaris.de/fileadmin/Content/Photonik/Zahlen-Fakten-Publikationen/SPECTARIS_Trendreport_Photonik_2019-2020.pdf)

# Einleitung

Hochinnovative Technologien wie die Mikro- und Nanoelektronik und immer stärker auch die Photonik spielen in unserem Leben eine immer zentralere Rolle. Sie durchdringen nicht nur die Informations- und Kommunikationstechnik des Alltags, sondern verbinden in zunehmenden Maße unsere Gesellschaft. Sie bereiten den Weg in eine neue Informationsgesellschaft und bringen diese in rasanten Entwicklungszyklen permanent weiter. Die Digitalisierung macht die Informationstechnik zu einem wesentlichen Bestandteil unseres Lebens. Die Information wird fast ausschließlich in einem globalen optischen Netz transportiert. Der Zugang dazu erfolgt zunehmend über Funk mit mobilen Endgeräten. In Zukunft werden auch Produktionsanlagen und die Maschinen darin sowie viele Geräte, die uns im Alltag umgeben in das Kommunikationsnetzwerk eingebunden sein, wodurch sich völlig neue Dienste und Funktionen – aber auch Herausforderungen – ergeben, die unsere Gesellschaft nachhaltig prägen werden. Um auch weiterhin der wachsenden Informationsmenge gerecht zu werden, ist es erforderlich, den Energiebedarf und die Kosten je übertragenem Bit nochmals drastisch zu reduzieren. So beträgt die heute je Einwohner in Europa übertragene Datenmenge etwa 43 GB/Monat und diese soll im Jahr 2022 pro Einwohner auf etwa 117 GB/Monat steigen<sup>9</sup>. Es wird erwartet, dass im Jahr 2022 neben 4,8 Milliarden Menschen (etwa 60 % der Weltbevölkerung) rund 28,5 Milliarden Geräte das Internet nutzen. Mehr als die Hälfte davon wird ausschließlich mit anderen Geräten kommunizieren (Internet der Dinge: IoT). Das Internet-Videostreaming wird sich bis 2022 verdreifachen und das Spielen über das Internet bleibt ein Trend, dessen Datenvolumen sich verzehnfachen soll. Die Wachstumsrate des gesamten Internetverkehrs liegt schätzungsweise bei 25 % – 80 % pro Jahr, je nach Netzwerksegment, Verkehrstyp (IP, Video, mobile Daten, IoT) und geographischer Region<sup>10</sup>. Der Anteil am globalen Stromverbrauch durch die Kommunikationssysteme wird dann ca. 8 % betragen. Um diese Steigerungen des übertragenen Datenvolumens bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauchs zu realisieren, ist eine weit über den heutigen Stand hinausgehende Integration in den informationsverarbeitenden Systemen notwendig.

Die Beherrschung der Elektronik war – und ist – für die Innovationskraft in Deutschland entscheidend. Die Elektronik im Allgemeinen und die Fähigkeit zur Entwicklung und Herstellung von elektronischen Systemen sind essenziell für den Erfolg von Forschung und Industrie. Aufgrund seiner Innovationskraft und

Systemexpertise, verbunden mit einer weitreichenden Technologie- und Komponentenkompetenz, hat Deutschland in der Forschungs- und Industrielandschaft eine Spitzenposition inne.

In der Elektronik konnte in den letzten 50 Jahren nach Maßgabe des Moore'schen Gesetzes etwa alle 18 Monate eine Verdopplung der Anzahl der Transistoren pro Fläche erreicht werden und dadurch konnten sehr hohe Rechenleistungen auf einem integrierten Schaltkreis implementiert werden. Zunehmend wird nun jedoch die elektronische Chip-zu-Chip-Kommunikation zum Flaschenhals, da die Bandbreite der elektrischen Übertragungsleitungen begrenzt ist. Auch der Energieverbrauch der elektrischen Datenschnittstellen erreicht eine kritische Größe. Überdies kann das elektronische Packaging die Anzahl von IO-Pins kaum mehr steigern. Derzeit erreicht man pro I/O-Pin eine Bandbreite bzw. Datenrate von maximal 25 Gbit/s bzw. 50 Gbit/s. 100 Gbit/s sind bereits in der Entwicklung, zeigen aber bereits Grenzen auf, welche nur durch optische Lösungen überwunden werden können. Hochleistungs-Prozessoren weisen Speicherbandbreiten von mehr als 10 Tbit/s auf, Switches für Router überschreiten in nächster Zukunft sogar die 50 Tbit/s, wofür schon jetzt mehrere hundert High-Speed I/O-Pads benötigt werden<sup>11</sup>. Für eine weitere Skalierung sind hierbei optische I/O-Schnittstellen und optische Transceiver entscheidende Komponenten, um die Datentransferraten elektronischer Multi-chip-Module und die mit ihnen aufgebauten Systeme weiter zu steigern. Disruptive Lösungen sind daher erforderlich, um diese Lücke zu schließen; und die photonische Integration bietet dieses Potenzial. So stellt beispielsweise die direkte Faser-Chip-Kopplung in Siliziumphotonik-Technologie Bandbreiten von mehr als 12 THz (100 nm / Edge-Coupling) und 5 THz (40 nm / Grating-Coupler) pro optisches I/O-Pad zur Verfügung<sup>12</sup>. Die Skalierung von photonischen Schaltungen folgt mit 30 % pro Jahr allerdings nicht ganz dem Moore'schen Gesetz. Es gilt also die Lücke zwischen der stetig wachsenden Nachfrage nach Bandbreite bzw. Übertragungsrate und der Steigerung der Leistungsfähigkeit der Transceiver zu schließen.

9 [www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html](https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html)

10 Peter Winzer: From Scaling Disparities to Integrated Parallelism: A Decathlon for a Decade, IEEE JLT March 2017, p. 1099–1115.

11 NVIDIA Ampere Architecture In-Depth <https://developer.nvidia.com/blog/nvidia-ampere-architecture-in-depth/>

12 Riccardo Marchetti, Cosimo Lacava, Lee Carroll, Kamil Gradkowski, and Paolo Minzioni, „Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [Invited],“ *Photon. Res.* 7, 201–239 (2019)  
12 OIDA, „OIDA Quantum Photonics Roadmap: Every Photon Counts,“ OIDA Report, 3 (2020)

# Photonisch-elektronische Integration

Viele photonische Komponenten können bereits in einem siliziumbasierten CMOS-kompatiblen Prozess integriert werden. Eine dünne Siliziumschicht (wenige zehntel Mikrometer) auf Siliziumoxid dient dabei als Wellenleiter und zur Realisierung rein optischer Komponenten wie z. B. Filter. Ebenfalls lassen sich Modulatoren basierend auf dotierten Wellenleiterstrukturen oder mit elektrooptischen Polymeren auf Silizium realisieren. Die Einbindung von Germaniumschichten erlaubt die Realisierung von sehr effizienten Photodetektoren. In dieser „Silicon-on-Insulator“ Technologie-(SOI) können damit auch komplexe Modulator- und Detektorsysteme integriert werden; die Lichtquelle ist derzeit jedoch noch hybrid aufzubringen. Dazu werden auch neuartige, skalierbare Aufbau- und Verbindungstechnologien benötigt wie zum Beispiel Wafer-Bonding oder Transfer-Printing. Neue Forschungsansätze widmen sich der (monolithischen) Heterointegration von auf Verbindungshalbleitern beruhenden Komponenten (z. B. elektrooptische Konverter oder ultraschnelle Transistoren) mit der leistungsfähigen Silizium-Technologie (CMOS- oder Bipolar-Transistoren). Auf dem Gebiet der ultra-breitbandigen SiGe-BiCMOS Hochgeschwindigkeits-Technologien sind Europa und Deutschland sogar weltweit führend. So spielt die photonisch-elektronische Integration schon heute eine tragende Rolle bei der Realisierung von optischen Transceivern. Die weitere Steigerung der Nachfrage nach Übertragungskapazität macht weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung in einem kurzen Zeithorizont notwendig.

Das Vorgehen bei der Integration ist multidimensional. Eine Dimension ist die Parallelisierung von Komponenten bzw. Funktionen, an der heute schon gearbeitet wird. Die zweite Dimension, die photonisch-elektronische Integration, eröffnet Freiheitsgrade im Design von Systemen, die noch weitgehend ungenutzt sind. Damit verschwimmen die bisherigen Grenzen zwischen der rein optischen und der rein elektronischen Signalverarbeitung. Weitere Dimensionen sind z. B. Kosten, Verlustleistung und die Datenrate pro Funktionsblock. Gefordert ist ein holistischer Ansatz für die photonisch-elektronische Integration, der Synthese- und Analysetechniken sowie die Simulation in allen Freiheitsgraden des Lichts erlaubt (Zeit, Frequenz, Raum und Polarisation). In einem Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft werden die Grundlagen für integrierte photonische Kommunikationssysteme höchster Bandbreite untersucht. Was beispielsweise vor 10 Jahren nur mit rein optischer Signalverarbeitung möglich war, ist heute mit Hilfe von leistungsfähiger digitaler Elektronik und entsprechender Software realisierbar. Durch die Kombination aus optischer und elektronischer Signalverarbeitung sind hier wichtige Fortschritte zu erwarten, die auch Anwendungen außerhalb der Telekommunikation finden, z. B. für Lidar,

die optische Kohärenztomographie (OCT), die multimodale Endoskopie und Mikroskopie sowie in dem Zukunftsfeld der Quantenphotonik mit Anwendungen in der Sensorik und der Kommunikation. Neuartige Methoden dürfen dabei, auf Systemebene betrachtet, nicht zu einer Steigerung des Energieverbrauchs führen. Energieeffizienz und Nachhaltigkeit sind eine wichtige Prämisse bei der Erforschung dieses neuen Gebietes, das auf eine Verschmelzung von Mikroelektronik und Photonik zielt.

# Forschungsfelder

## A) Transceiver-Chiplets für elektronische Systems-in-Package höchster Kapazität

Eine drastische Erhöhung der I/O-Bandbreite bei gleichbleibendem oder besserem Raum- und Energiebedarf, so wie sie z.B. für die nächste Generation von Switch-ASICs mit mehr als 10Tbit/s Durchsatz per Chip notwendig ist, erfordert eine massive Modularisierung und Parallelisierung in einer oder mehreren Dimensionen. So sollen elektronische Module zusammen mit photonischen Modulen integriert werden, die eine Datenrate von 100 Tbit/s pro Gesamtmodul erlauben. Der Energieaufwand soll dabei weniger als ein Pikojoule pro Bit betragen. Zur Optimierung des Durchsatzes kann neben Raum-, Zeit-, Frequenz- und Polarisationsmultiplex auch die Anzahl der Modulationsstufen erhöht werden. So sollen Datenverbindungen mit bisher unerreichter Nutzung der Bandbreite, höchster Effizienz und maximaler Reichweite realisiert werden. Die Konsequenz ist eine generelle Einführung eingebetteter photonischer Chips für die Signalübertragung in fortschrittlichen mikroelektronischen Systemen. Neben FPGAs und speziellen ASICs wirkt sich die photonische Konnektivität für Zentraleinheiten (CPUs), Grafikprozessoren (GPUs) und domänenspezifische Beschleuniger auf eine Vielzahl von Anwendungen mit vielfältigem Verwendungszweck aus, darunter Anwendungen der künstlichen Intelligenz, des maschinellen Lernens und der Emulation in großem Maßstab sowie des Hochleistungsrechnens (HPC).

## B) Terminaltechnik für optische Netze der nächsten Generation

In den optischen Netzen der nächsten Generation wird in einem ersten Schritt die enorme Bandbreite der Glasfaser von etwa 70 THz durch die Nutzung mehrerer Übertragungsbänder besser ausgeschöpft. Eine weitere Erhöhung der Übertragungskapazität ist durch die Nutzung der räumlichen Dimension entweder in einer Faser oder mit mehreren Fasern möglich. Kommen diese aus verschiedenen Richtungen (2 bis 6), so werden in diesem Knoten eine Vielzahl von kohärenten Transceivern benötigt. Stand der Technik sind Knoten, in denen ein oder zwei optische Träger durch einen Transceiver bearbeitet werden. Der darin befindliche ASIC (Application Specific Integrated Circuit) beinhaltet die Digitale Signalverarbeitung (DSP) und ein Photonikmodul. Die Verarbeitung von dutzenden derartiger Kanäle erfordert hoch integrierte Lösungen. Hier stellt sich die Frage nach einer geeigneten Architektur und geeigneten Komponenten, die neben hoher Performanz einen

hohen Grad an Parallelität aufweisen müssen. Grundlegende Bedeutung bekommen hierbei optische Signalquellen wie z. B. optische Frequenzkämme, die von mehreren Kanälen genutzt werden oder auch die Nutzung einzelner optischer Funktionen durch mehrere Träger. Damit einher geht eine Erhöhung der Symbolrate auf über 100 GBd pro optischem Träger. Höhere Modulationsformate erfordern hierbei ein sehr gutes Signal-zu-Rauschverhältnis aller Komponenten im Signalpfad und eine höhere Auflösung der Wandler in den Transceivern bei höchsten Abtastgeschwindigkeiten ( $>120$  Gs/s). Dies stellt höchste Anforderungen an die Halbleitertechnologien und das Schaltungsdesign. Optische Technologien zur Analog-Digital- und Digital-Analogwandlung (ADC & DAC) werden hier interessant. Klassische Aufbautechniken stoßen hier an ihre Grenzen. Die Verbindungen zwischen Optik und Elektronik müssen quasi verlustfrei realisiert werden, was mit separaten Gehäusen nur schwer möglich ist. Die Vielzahl der Kanäle und die hohen Datenraten stellen auch enorme Anforderungen an die Synchronisation der Komponenten in solch komplexen Knoten, die mit neuartigen optoelektronischen Oszillatoren erfüllt werden können. Durch Hybridintegration lassen sich die Vorteile einer sehr geringen Taktschwankung („Low-Jitter“, „Low Skew“) in der Signalführung und -übertragung ausnutzen, die eine weitere Steigerung der Integrationsdichte erlauben. Diese massive Erhöhung der Komplexität und des Datendurchsatzes muss mit einer sublinearen Erhöhung der elektrischen Leistungsaufnahme und des Platzbedarfes ermöglicht werden.

Auf klassischen Halbleitertechnologien beruhende optische Detektoren und Modulatoren stoßen in den gegenwärtigen Übertragungssystemen an die Grenzen ihrer Möglichkeiten bezüglich der maximalen Signalbandbreite. Erste vielversprechende Resultate zeigen jedoch, dass neue Materialsysteme (z. B. basierend auf Graphen) dank der extrem hohen intrinsischen Beweglichkeit der Ladungsträger einen Ausweg bieten können. Eine zentrale Aufgabe ist dabei die Integration dieser Materialsysteme in photonisch integrierten Schaltungen (Photonic Integrated Circuits, PICs) auf einer skalierbaren, z. B. SOI- oder Siliziumnitrid-basierten Technologie-Plattform.

### **C) Neue Lösungen für optische Sensorik, Mikrowellenphotonik, und THz-Technik**

Die geringe Dämpfung der Glasfaser ermöglicht eine Überwachung der Infrastruktur von Anlagen und Geräten oder eine Vor-Ort-Diagnostik in der Medizintechnik (Point-of-Care Diagnostic) durch eingebettete optische Sensoren. Kosteneffiziente Lösungen bei bildgebenden Verfahren mit deutlicher verbesserter Performance, z. B. eine Steigerung der Ortsauflösung oder eine Erhöhung der Bildrate, versprechen Lidar-on-a-Chip oder eine 3D-Bildgebung für die optische Kohärenztomographie (OCT). Photonisch-elektronisch integrierte Lidar-Systeme werden für zukünftige Anwendungen wie dem autonomen Fahren eine wichtige Rolle spielen. Hierbei können auch verschiedene Wellenlängenbereiche, wie für sichtbares und infrarotes Licht oder für mm-Wellen-Strahlung kombiniert werden. Die Verwendung mehrerer Sensoren bzw. Wellenlängenbereiche erfordert eine hochgenaue Synchronisation durch einen rauscharmen Masteroszillator sowie eine präzise Verteilung der Taktsignale. Vorgaben sind neben der verbesserten Auflösung und erhöhten Reichweite eine Reduzierung der Beobachtungszeit und der Kosten.

Die Mikrowellenphotonik wird in den Netzen des Mobilfunks der fünften und sechsten Generation (5G, 6G) sowie in der Radarsensorik eine wesentliche Rolle spielen. Neben Erzeugung und Transport der Funkwellen wird die optische Signalverarbeitung in Mehrstrahlantennen künftig wesentlich sein. Wichtig ist hierbei die Realisierung eines nahtlosen Übergangs von der eigentlichen Funksignalübertragung zur Photonik. Bei Mehrantennen-Radarsystemen hängt die Winkelauflösung direkt von der Antennenapertur ab. Durch den Einsatz von Mikrowellenphotonik lassen sich wesentlich größere Aperturen realisieren, die z. B. für das autonome Fahren eine stark verbesserte Radarbildgebung ermöglichen. Optische Oszillatoren weisen ein deutlich geringeres Phasenrauschen als elektronische Oszillatoren auf und ermöglichen die Erzeugung, Verteilung und Verarbeitung von Signalen höchster Qualität in Kommunikation und Messgeräten. Durch Hybridintegration lassen sich die Vorteile hoher zeitlicher Präzision in der Signalführung und -übertragung ausnutzen, die eine weitere Erhöhung der Integrationsdichte z. B. in Phased-Array-Antennen erlauben.

Auch für Anwendungen der THz-Technik (z. B. in der Sensorik mit THz-Signalen) sind photonisch-elektronisch integrierte Systeme von großer Bedeutung. So sind beispielsweise THz-Signalquellen einfach durch Photo-Mischung zweier optischer Laserquellen realisierbar. Die Integration plasmonischer Wandler mit THz-Antennen auf kleinstem Raum verspricht die Detektion bzw. Ausstrahlung von Funkwellen im THz-Bereich und

deren direkte Wandlung in die optische Domäne bzw. aus der optischen Domäne. So wäre eine transparente Übertragung von Signalen aus der Faser in THz-Radiowellen möglich – und damit z. B. die kostengünstige drahtlose Anbindung von Endgeräten und Teilnehmern mit Datenraten von bis zu 100 Gbit/s und mehr. Weitere Anwendungen sind das 3D-Sensing für die Gesichtserkennung mit Mobiltelefonen und in Fahrzeugen.

### **D) Analoge optische Signalprozessoren**

Heute werden meist elektronische Systeme genutzt, um Signale zu verarbeiten und nichtlineare Operationen durchzuführen. Während optische Träger für die Übertragung immenser Datenmengen bis über mehrere 1000 km genutzt werden, können auch die in einem optischen Netzwerk benötigten Grundfunktionen, wie Switching/Routing, Wellenlängen- und Formatkonversion, Phasenkonjugation, phasenempfindliche Verstärkung, optische Fouriertransformation und Regeneration der Signale in Amplitude und Phase mit integriert optischen Plattformen realisiert werden. Durch die Integration vieler Komponenten auf einer technologischen Plattform wird schon heute ein beachtliches Niveau an Komplexität erreicht. Jede dieser Technologien hat ihre spezifischen Herausforderungen, die in nächster Zeit gelöst werden müssen, um komplexe funktionale optische Signalverarbeitungslösungen zu entwickeln. Die analoge optische Signalverarbeitung bildet die Grundlage für Systeme zur Quanteninformationsverarbeitung. Lineare und leistungseffiziente Signalprozessoren, die mittels Ko-Integration von Elektronik und Photonik aufgebaut werden, können Anwendungen in der Künstlichen Intelligenz unterstützen. Des Weiteren könnten photonische Prozessoren in Zukunft die direkte Signalverarbeitung in Systemen für THz-Mobilkommunikation übernehmen. Eine interessante Entwicklungsrichtung dabei sind programmierbare optische Schaltkreise, die aus vielen gleichen Einheitszellen aufgebaut sind und zur Realisierung diverser Funktionalitäten mit Hilfe einer entsprechenden elektrischen Ansteuerung umprogrammiert werden können.

## E) Weiterentwicklung von Silizium als Integrationsplattform

Eine Herausforderung bei der Photonik-Elektronikintegration liegt in den unterschiedlichen Materialsystemen, die hierfür verwendet werden. Silizium ist das wichtigste Halbleitermaterial der Elektronik und wird auch für die weitere Skalierung zu kleineren Strukturgrößen die Basis der elektronischen Schaltungen sein. Für die optische Übertragung auf der Glasfaser haben sich die Lichtwellenlängen um  $1,5\ \mu\text{m}$  (minimale Dämpfung) bzw.  $1,3\ \mu\text{m}$  (minimale chromatische Dispersion) etabliert. Diese Lichtwellenlängen verlangen III/V- Halbleitermaterialien für die Lichterzeugung. Es gibt zwar Versuche, derartige Lichtquellen monolithisch auf Silizium zu integrieren, sie befinden sich aber noch in einem frühen Forschungsstadium und es werden noch einige Jahre vergehen, bis dies industriell anwendbar sein wird. Ohne das langfristige Ziel einer monolithischen Integration aktiver optischer Bauelemente und elektronischer Schaltungen aufzugeben, werden zwischenzeitlich hybride Integrationstechniken untersucht. Photonische Komponenten werden heute auf mehreren Plattformen wie Si, InP, SiO<sub>2</sub>, LiNbO<sub>3</sub>, SiN, Polymer und Glas hergestellt. Sie weisen je nach Anwendung ihre spezifischen Vor- und Nachteile auf. In Produkten wie optischen Transceivern finden deshalb heute mehrere Materialsysteme Anwendung. InP-basierte optische Quellen oder Verstärker werden hybrid mit Modulatoren und Wellenleiterbauelementen z. B. auf Silicon on Insulator-Basis verbunden. Insbesondere jede optische Koppelstelle ist dabei kritisch für die Funktion und Effizienz der optischen Schaltung und erfordert präzise und zuverlässige Lösungen. Durch die Kombination von verschiedenen Materialsystemen auf einem Chip über hybride Integrationsansätze werden diese Herausforderungen adressiert. So können z. B. plasmonische Strukturen mit nichtlinearen Polymeren oder Materialien wie BaTiO<sub>3</sub> oder Lithium Niobate-on-Insulator (LNOI) eingesetzt werden, um Modulatoren extrem hoher Bandbreite zu ermöglichen ( $>100\ \text{GHz}$ ). Die Einbindung derartiger Strukturen in photonisch-elektronisch integrierte Schaltungen stellt eine wichtige Fragestellung dar. Auch das thermische Verhalten von komplexen photonisch-elektronisch integrierten Schaltungen wirft interessante Fragestellungen auf. Der Vorteil von Silizium in der Elektronik ist ein Betrieb bei hohen Junction- und Umgebungstemperaturen. Bei der Heterointegration von Verbindungshalbleitern muss heute oft aktiv gekühlt werden, was Aufbau und Gehäuse-Konzepte erheblich erschwert und den Leistungsverbrauch erhöht. Ansätze, die einen stabilen Hochtemperaturbetrieb erlauben sind daher hier sehr interessant. Ein weiteres praktisches Thema ist die Vermeidung von Reflexionen, insbesondere an der Schnittstelle zu Lasern oder

Gewinn-Elementen. Integrierbare Isolatoren mit brauchbaren Spezifikationen gibt es trotz langjähriger Forschung nicht. Mikrooptische Isolatoren erfordern normalerweise ein hermetisches und damit teureres Gehäuse oder sind nicht direkt integrierbar. Bei der Reflexionsempfindlichkeit können gegebenenfalls Quantum Dot-Laser einen Ausweg bieten.

Ein wichtiges offenes Thema ist die Erarbeitung von generellen kostengünstigen Packaging-Konzepten, die auch bei Integration von III/V- und anderen Halbleiterbauelementen keine Hermetizität benötigen und möglichst vollautomatisch gefertigt und montiert werden können. Der Einfachheit halber will man sich an die Packaging-Konzepte der Mikroelektronik (LGA/BGA Packages) anlehnen, die auch im Themenfeld A) eine hohe Relevanz haben. Bei der Realisierung von komplexen optischen Transceivern wäre es vorteilhaft, wenn Transceiver-Chiplets oder Unterfunktionen hiervon hinsichtlich ihrer Abmessungen und Funktionen standardisiert und damit austauschbar/steckbar wären, um eine hinreichend große Ausbeute bei großen Silizium-Photonik Multi-Chip-Modulen zu erzielen.

Hohe Anforderungen bestehen bei der Realisierung verlustarmer und kostengünstiger Faserkoppeltechnik für photonisch-elektronisch integrierte Schaltungen. Es gibt bereits umfangreiche Untersuchungen zu Taperstrukturen und z. B. zu Gitter-unterstützten Koppelstrukturen. Weitgehend erfolgt die Kopplung aber noch mit aktiver Justage, da Genauigkeiten im Sub-Mikrometerbereich erforderlich sind; hier ist es im Sinne der Kosten-Ökonomie erforderlich, zu passiv gekoppelten Strukturen überzugehen. Hierbei ist nicht nur die Koppelstruktur, sondern auch die Faseranbindung als solche zu betrachten. Steckbare Faserverbindungen könnten beispielsweise eine vielversprechende Alternative zu angeklebten Faser-Arrays sein. Sie bergen allerdings mechanische (Größe, Stabilität, Justiergenauigkeit) und thermische Herausforderungen bei der Verarbeitung. Gemeinsame Entwicklung der Kerntechnologien auf dem Gebiet der Photonik ist der Schlüssel zu einer erfolgreichen Erschließung der Märkte durch die Industrie.

# Handlungsempfehlungen

Die großen technologischen Herausforderungen im Bereich der Photonik und der Mikroelektronik bei der photonisch-elektronischen Integration sind von einer Firma oder einem Forschungsinstitut allein nicht zu bewältigen. Die Voraussetzungen in Deutschland sind jedoch hervorragend, um die Herausforderungen gemeinsam anzugehen und die Chancen zu nutzen, welche die photonisch-elektronische Integration in Zukunftsfeldern wie Kommunikation, Industrie 4.0 und Mobilität bietet.

Die Photonikindustrie umfasst in Deutschland ca. 1000 Firmen mit mehr als 135.000 Mitarbeitern. Rund 50 Firmen sowie 20 Universitäten und Forschungseinrichtungen beschäftigen sich in Deutschland mit der optischen Kommunikationstechnik. Fünf der zehn größten optischen Netzausrüster haben Forschungs- und Entwicklungsstandorte in Deutschland. Mit dem Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik IHP, dem Ferdinand Braun-Institut FBH sowie dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut HHI und dem Fraunhofer IAF stehen außeruniversitäre Forschungsinstitute für die Prototypenfertigung von InP, Silizium-Photonik und Hochgeschwindigkeits-elektronik auf Silizium-Germanium-Basis zur Verfügung. Die photonisch-elektronische Integration bietet auch die Möglichkeit, insgesamt auf die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) zurückzugreifen und sie für eine kommerzielle Nutzung zu öffnen.

Konkret werden folgende Maßnahmen empfohlen:

1. Die Initiierung eines Förderprogramms, um vielversprechende photonisch-elektronisch integrierte Lösungen für Kommunikation und Sensorik in industriegeführten Verbundvorhaben zu erforschen und zur Anwendungsreife zu bringen. Dazu gehört auch der Ausbau von Prototyping- und Kleinserien-Fertigungskapazitäten zur Beschleunigung der Markteinführung von Forschungsergebnissen in die Anwenderindustrie. Dabei muss des Weiteren auch die Nutzung weltweiter Fertigungspartner möglich sein, wenn in Deutschland keine geeigneten Partner zur Verfügung stehen.
2. Die Weiterentwicklung von Technologien für die Heterointegration von Siliziumphotonik, Siliziumelektronik, III-V-Verbindungshalbleitern und neuartigen Materialien sowie für die optische Chip-Kopplung. Ein besonderes Augenmerk gilt robusten und resilienten Verfahren, die eine hohe Ausbeute und eine automatisierte Aufbautechnik ermöglichen. Eine Kooperation mit führenden kommerziellen Halbleiterherstellern ist unabdingbar notwendig, in letzter Zeit aber aus Kosten-/Nutzengründen immer schwieriger geworden. Daher sind neue Kooperationsmodelle zu entwickeln, die insbesondere auch KMUs und Forschungseinrichtungen befähigen, ihre innovativen Entwicklungen auf Basis aktueller Spitzentechnologien durchführen zu können.
3. Den Entwurf einer zumindest in Deutschland, besser darüber hinaus auch in der Europäischen Union abgestimmten Industriestrategie für die weitgehend automatische Fertigung photonisch-elektronisch integrierter Mikrochips. Heute befinden sich Halbleiterfabriken für solche Produkte fast ausschließlich in Asien oder den USA. Zur Stärkung der technologischen Souveränität ist eine Ertüchtigung lokaler Halbleiterhersteller für eine Volumenproduktion in Deutschland oder Europa anzustreben mit dem Ziel einer Aufholjagd bzw. einer Re-Industrialisierung und der Wiederansiedlung von Produktion und Test im Bereich der Photonik und der Elektronik. Voraussetzungen sind qualifizierte Prozesse auf dem neuesten Stand, eine umfangreiche Design- und Testunterstützung, eine Standardisierung von Funktionsblöcken hinsichtlich ihrer physikalischen und funktionalen Parameter sowie wettbewerbsfähige kommerzielle Rahmenbedingungen. Letztere können durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen hergestellt werden. Geeignete Maßnahmen wären eine bessere steuerliche Förderung von F&E, eine angemessene Senkung der bei der Produktion anfallenden hohen Strom- und Wasserkosten, die Sicherstellung von Planungssicherheit von zukünftigen Produktionskosten sowie die Förderung von Produktionsansiedlungen.



## Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 125 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. 2.000 Mitarbeiter an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Experten und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch. Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Hauptsitz des VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e. V.) ist Frankfurt am Main.

Mehr Informationen unter [www.vde.com](http://www.vde.com).

## Über die VDE ITG

Die VDE ITG wurde 1954 gegründet und ist als interdisziplinär arbeitende, wissenschaftliche Fachgesellschaft in das fachübergreifende Netzwerk des VDE eingebunden. Sie agiert als Schnittstelle für Experten der Informationstechnik (ITK) in Wirtschaft, Verwaltung, Lehre und Forschung. Ihre Mitglieder bündeln in enger internationaler Anbindung die deutsche Kompetenz im Bereich der ITK. Die VDE ITG fördert Forschung und Anwendung dieser Schlüsseltechnologie sowie deren effizienten Einsatz in den Bereichen Daten- und Kommunikationstechnik sowie -systeme, Umweltschutz, Medizin und Verkehr.

Mit ihrem weitgespannten internationalen Netzwerk versteht sich die VDE ITG als Plattform für Innovationen und Wissenstransfer für die erfolgreiche Kooperation von Industriepartnern und Forschungseinrichtungen. Hierzu führt die VDE ITG eine ganze Reihe von Fachtagungen, Diskussionssitzungen und Workshops durch. Mit ihren Studien und Empfehlungen bringt die VDE ITG ihre Expertise in Politik und Gesellschaft ein und nimmt an Förderprogrammen teil.

Ein weiterer Schwerpunkt der VDE ITG Aktivitäten ist die intensive Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie der Aus- und Weiterbildung der auf dem Gebiet der Informationstechnik tätigen Ingenieur\*innen und Wissenschaftler\*innen.

Die VDE ITG hat zurzeit ca. 7.200 Mitglieder und 1200 ehrenamtliche Mitarbeiter. Die fachliche Arbeit vollzieht sich in 7 Fachbereichen mit 34 Ausschüssen und 32 Fachgruppen sowie mehreren Fokusprojekten.

[www.vde.com/itg](http://www.vde.com/itg)

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt

Tel. +49 69 6308-0  
Fax +49 69 6308-9865  
[info@vde.com](mailto:info@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)

**VDE**