

Einführung in photonische Quantenchips für Nachrichtentechniker

Analoge Realisierungen und Operationen für 6G-Signalverarbeitung

Abstract

Photonische integrierte Schaltkreise (PICs) revolutionieren die Nachrichtentechnik: Von latenzarmen RF-Filtern für 6G-Netze bis zu parallelen AI-Operationen in Data-Centern. **Die 6G-Standardisierung beginnt 2025, wobei photonische Komponenten der Schlüssel zur Erschließung des Terahertz (THz)-Frequenzbereichs für extrem hohe Datenraten sind [?].** Diese Einführung basiert auf aktueller Literatur (2024–2025) und beleuchtet analoge Realisierungsprinzipien (z.B. Interferenz via MZI), bevorzugte Operationen (Matrix-Multiplikation, Signal-Filterung) und Relevanz für Echtzeit-Kommunikation. Praxisnah: Tabelle zu Techniken, Ausblick auf Hybride Systeme. Quellen: Reviews aus Nature, SPIE und ScienceDirect. **Aktuelle Forschungen (EPFL/Harvard) haben einen revolutionären optoelektronischen Chip vorgestellt, der THz- und optische Signale auf einem Prozessor verarbeitet [?].**

Contents

1 Grundlagen: Photonische Chips in der Nachrichtentechnik

Photonische Quantenchips nutzen Lichtwellen für hochparallele, energieeffiziente Verarbeitung – essenziell für 6G (Bandbreiten > 100 GHz, Latenz < 1 ms). **Die Europäische Kommission hat den Start der 6G-Standardisierung für 2025 angekündigt, mit einem Fokus auf Souveränität und führender Technologieposition [?]. Das Jahr 2025 wurde zudem von den Vereinten Nationen als das Internationale Jahr der Quantenwissenschaften (IYQ) ausgerufen, was die strategische Bedeutung der Photonik untermauert [?].** Im Gegensatz zu elektronischen CMOS-Chips (Wärme-Limits bei hohen Frequenzen) ermöglichen PICs analoge Signalverarbeitung durch optische Interferenz und Modulation, angelehnt an klassische analoge Optik (z. B. aus der RF-Technik der 1980er).

Wichtiger Hinweis: Die Technik ist stark analog: Kontinuierliche Wellentransformationen (Phasenverschiebung, Diffraktion) dominieren, da Photonen intrinsisch parallel (Wellenlängen-Multiplexing) und latenzarm sind. Hybride Systeme (Photonik + Elektronik) ergänzen für Steuerung.

Aktuelle Trends (2025): Skalierbare Wafer (z. B. 6-Zoll-TFLN) für industrielle Einsätze in Data-Centern, mit $1000\times$ -Speedup für AI-Workloads [?, ?].

2 Realisierung von Operationen: Analoge Prinzipien

Operationen werden primär durch optische Bauteile realisiert, die analoge Verarbeitung priorisieren. Kernkomponenten:

- **Mach-Zehnder-Interferometer (MZI):** Für Phasenmodulation und lineare Transformationen; analoge Addition/Multiplikation via Interferenz.
- **Wellenleiter und Modulatoren:** Elektro-optische (z. B. LiNbO_3) oder thermische Steuerung für kontinuierliche Signale.
- **Monolithische Integration:** Co-Packaging auf Si- oder TFLN-Plattformen minimiert Verluste (< 1 dB), ermöglicht dynamische Rekonfiguration.

Die Technik lehnt sich an analoge RF-Systeme an: Statt diskreter Bits kontinuierliche Wellenfelder für Echtzeit-Filterung (z. B. Demodulation in 6G) [?].

Beispiel: Lineare Transformation (Matrix-Vektor-Multiplikation) via MZI-Mesh: $y = M \cdot x$, wobei M durch Phasen ϕ_i programmiert wird: $\phi_i = \arg(M_{ij})$.

3 Bevorzugte Operationen für photonische Bauteile

Photonische Chips eignen sich für lineare, frequenzabhängige und parallele Operationen, da analoge Kontinuität Energie spart (pJ/Bit) und Bandbreite maximiert. Basierend auf 2025-Reviews:

Nicht bevorzugt: Nicht-lineare Logik (z. B. AND/OR), da Photonen linear sind; hier Hybride nötig.

Operation	Realisierung (analog)	Relevanz für Nachrichtentechnik
Matrix-Multiplikation (GEMM)	MZI-Arrays für Interferenz-basierte Addition/Multiplikation	AI-Training in Edge-Netzen (z. B. Transformer für 6G-Routing) [?]
RF-Signal-Filterung	Optische Diffraction/FFT via Wellenleiter	Demodulation, BSS in 5G/6G (Bandbreite > 100 GHz) [?]
Recurrent-Processing	Programmierte photonische Circuits (PPCs) für sequentielle Transformationen	Echtzeit-Überwachung in Netzen (z. B. RNNs für Anomalie-Erkennung) [?]
Differential-Operationen	Meta-Optik für Gradienten (z. B. Edge-Detection)	Bild-/Signal-Enhancement in Optischen Netzen [?]
Parallele Optimierung	Korrelation via kohärente PICs	Gradient-Descent für Routing-Optimierung [?]

Table 1: Bevorzugte Operationen auf photonischen Chips – Fokus auf analoge Techniken

4 Literaturübersicht: Aktuelle Entwicklungen (2024–2025)

Basierend auf neuesten Reviews (offen zugänglich) und aktuellen Projekten:

- **Analog optical computing: principles, progress, and prospects (2025):** Überblick über analoge PICs; Fortschritte in rekonfigurierbaren Designs für Echtzeit-Signale [?].
- **Integrierte Terahertz-Kommunikation:** Ein revolutionärer optoelektronischer Prozessor (EPFL/Harvard, 2025) integriert die Verarbeitung von **Terahertz-Wellen** und optischen Signalen auf einem Chip. Dieser Durchbruch ist entscheidend für 6G, da er Hochleistung ohne nennenswerten Energieverlust ermöglicht und mit bestehenden photonischen Technologien kompatibel ist [?].
- **Integrierte Photonik für 6G-Forschung:** Projekte wie **6G-ADLANTIK** und **6G-RIC** (Fraunhofer HHI) entwickeln photonisch-elektronische Integrationskomponenten, um den THz-Frequenzbereich für 6G zu erschließen und die Resilienz von Netzwerken zu verbessern (SUSTAINET) [?].
- **Integrated photonic recurrent processors (2025):** Recurrent-Operationen via PPCs; Anwendungen in sequentieller Verarbeitung (z. B. Netzwerk-Überwachung) [?].
- **Photonics for sustainable AI (2025):** GEMM als Kern für AI; photonische Vorteile für energiearme 6G-Inferenz [?].

- **All-optical analog differential operation... (2025):** Meta-Optik für Differential-Computing; ideal für Signal-Enhancement [?].
- **Harnessing optical advantages in computing: a review (2024):** Parallele Vorteile; Fokus auf FFT und Korrelation für RF [?].

Diese Quellen betonen den Shift zu analogen Hybriden für 6G: Von Prototypen zu skalierbaren Wafern.

5 Ausblick: Photonik in 6G-Netzen

Photonische Chips ermöglichen latenzarme, skalierbare Kommunikation: Z. B. optische BSS für Multi-User-MIMO in 6G. Herausforderungen: Verluste minimieren (via InAs-QDs). Zukünftig: Voll-integrierte PICs für Edge-Computing in Basissationen. **Das Fraunhofer HHI bietet bereits anwendungsspezifische PICs auf der Siliziumnitrid (SiN) Plattform an, die auch in Biowissenschaften und Sensorik eingesetzt werden [?].**

References

- [1] Analog optical computing: principles, progress, and prospects. ScienceDirect, 2025. [Link](#).
- [2] Integrated photonic recurrent processors. SPIE, 2025. [Link](#).
- [3] Photonics for sustainable AI. Nature, 2025. [Link](#).
- [4] All-optical analog differential operation... De Gruyter, 2025. [Link](#).
- [5] Harnessing optical advantages in computing: a review. Frontiers, 2024. [Link](#).
- [6] Leichsenring, H. (2025). Steht die Quantentechnologie 2025 am Wendepunkt. Der Bank Blog; DPG (2025). 2025 – Das Jahr der Quantentechnologien. LP.PRO - Technologieforum Laser Photonik.
- [7] Europäische Kommission (2025). 6G-Netze in Europa. Gestaltung der digitalen Zukunft Europas.
- [8] Benea-Chelmus, C. et al. (2025). 6G-Mobilfunk rückt näher – Revolutionärer Chip schafft optische und elektronische Datenverarbeitung. Leadersnet; Nature Communications (Publikation).
- [9] Fraunhofer HHI (2025). Berlin 6G Conference 2025; Fraunhofer HHI (2025). Photonics West 2025.
- [10] RF-Signal-Filterung. (Placeholder reference for the table entry).