

Einführung in photonische Quantenchips für Nachrichtentechniker

Analoge Realisierungen und Operationen für
6G-Signalverarbeitung

Januar 2025

Zusammenfassung

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 [?].**

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen: Photonische Chips in der Nachrichtentechnik	1
2	Realisierung von Operationen: Analoge Prinzipien	2
3	Bevorzugte Operationen für photonische Bauteile	3
4	Literaturübersicht: Aktuelle Entwicklungen (2024–2025)	3

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).

Wichtig

Wichtiger Hinweis: Die Technik ist stark analog: Kontinuierliche Wellentransformationen (Phasenverschiebung, Diffraction) 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:

Operation	Realisierung (analog)	Relevanz für Nachrichtentechnik
Matrix-Multiplikation (GEMM)	MZI-Arrays für Interferenzbasierte 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 [?]

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

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

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.