

# Einführung in photonische Quantenchips für Nachrichtentechniker

Analoge Realisierungen und Operationen für 6G-Signalverarbeitung

## 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

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<sub>3</sub>) 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  $\phi_i$  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: