

# Einführung in photonische Quantenchips für Nachrichtentechniker

Analoge Realisierungen und Operationen für 6G-Signalverarbeitung

Johann Pascher

Abteilung für Kommunikationstechnik,

Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt (HTL), Leonding, Österreich

johann.pascher@gmail.com

17. November 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 [7].\*\* 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 [8].\*\*

## Inhaltsverzeichnis

|   |   |
|---|---|
| 1 Grundlagen: Photonische Chips in der Nachrichtentechnik | 2 |
| 2 Realisierung von Operationen: Analoge Prinzipien        | 2 |
| 3 Bevorzugte Operationen für photonische Bauteile         | 2 |
| 4 Literaturübersicht: Aktuelle Entwicklungen (2024–2025)  | 3 |
| 5 Ausblick: Photonik in 6G-Netzen                         | 4 |

# 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 [7]. Das Jahr 2025 wurde zudem von den Vereinten Nationen als das Internationale Jahr der Quantenwissenschaften (IYQ) ausgerufen, was die strategische Bedeutung der Photonik untermauert [6].\*\* 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:** 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 [3, ?].

# 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) [1].

**Schlüsselformel:** 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:

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 Interferenzbasierte Addition/Multiplikation                  | AI-Training in Edge-Netzen (z. B. Transformer für 6G-Routing) [3]      |
| RF-Signal-Filterung          | Optische Diffraktion/FFT via Wellenleiter                                   | Demodulation, BSS in 5G/6G (Bandbreite > 100 GHz) [10]                 |
| Recurrent-Processing         | Programmierte photonische Circuits (PPCs) für sequentielle Transformationen | Echtzeit-Überwachung in Netzen (z. B. RNNs für Anomalie-Erkennung) [2] |
| Differential-Operationen     | Meta-Optik für Gradienten (z. B. Edge-Detection)                            | Bild-/Signal-Enhancement in Optischen Netzen [4]                       |
| Parallele Optimierung        | Korrelation via kohärente PICs  | Gradient-Descent für Routing-Optimierung [5]                           |

Tabelle 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 [1].
- **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 photoni schen Technologien kompatibel ist [8].
- **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) [9].
- **Integrated photonic recurrent processors (2025)**: Recurrent-Operationen via PPCs; Anwendungen in sequentieller Verarbeitung (z. B. Netzwerk-Überwachung) [2].
- **Photonics for sustainable AI (2025)**: GEMM als Kern für AI; photonische Vorteile für energiearme 6G-Inferenz [3].
- **All-optical analog differential operation... (2025)**: Meta-Optik für Differential-Computing; ideal für Signal-Enhancement [4].
- **Harnessing optical advantages in computing: a review (2024)**: Parallele Vorteile; Fokus auf FFT und Korrelation für RF [5].

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 [9].\*\*

## Literatur

- [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).