

All-Optical Circuits

Die Weiterentwicklung rein elektronischer Schaltkreise wird in Zukunft im Hinblick auf einen akzeptablen Energieverbrauch und erreichbare Datenübertragungsraten an physikalische Grenzen stoßen. Abhilfe verspricht hier die zunehmende Nutzbarmachung mit Photonen statt Elektronen arbeitender optischer Komponenten. Bei der Entwicklung sogenannter All-Optical Circuits geht es darum, eine Datenverarbeitung, -übertragung und -speicherung mit möglichst vollständig lichtbasierten Ansätzen zu realisieren. Dabei ist heute schon absehbar, dass solche volloptischen Schaltkreise die siliziumbasierte Elektronik allenfalls ergänzen, aber nicht völlig ersetzen werden.

Die meiste Energie wird bei der elektronischen Datenübertragung innerhalb von Computerchips oder zwischen Computerkomponenten verbraucht und geht als Abwärme verloren. Dies wird bei hochintegrierten Schaltkreisen mit den steigenden Datenraten immer problematischer – sowohl im Hinblick auf die technische Umsetzung der Wärmeabfuhr als auch auf den ökologisch signifikanten Gesamtenergieverbrauch der globalen IT-Infrastruktur. Prinzipiell ist die optische Datenübertragung der elektronischen überlegen, weil sich Lichtsignale z. B. über Glasfasern mit deutlich geringerem Energieverlust übertragen lassen und außerdem mit unterschiedlichen Wellenlängen viele unterschiedliche Signale parallel übertragen werden können (Multiplexing), ohne dass sie sich gegenseitig beeinflussen. Die elektronische Datenübertragung über Kabel oder Leiterbahnen ist zudem physikalisch auf Übertragungsraten von etwa 10 Gigabit pro Sekunde begrenzt. Dagegen sind die Grenzen der optischen Datenübertragung über Wellenleiter technisch noch längst nicht ausgereizt – aktuelle Laborrekorde liegen im Bereich von mehreren 10 Terabit pro Sekunde (bei Verwendung nur einer einzigen Wellenlänge). Daher ist die optische Datenübertragung im Bereich der Telekommunikation über längere Strecken schon seit Jahrzehnten etabliert, wird zum Teil bereits in Rechenzentren zur Verbindung von Computern und Com-

puter-Boards genutzt und ist nun Ziel der Entwicklung von Verbindungen auch zwischen oder innerhalb von Computerchips bis hin zu volloptischen Lösungen.

Betreiber von Rechenzentren und Datennetzwerken stehen außerdem vor großen Herausforderungen, die sich aus dem enormen Anstieg des Internet-Datenverkehrs ergeben. Problematisch ist dabei insbesondere die Vermittlung (Switching bzw. Routing) von optisch übertragenen Daten, die heute in der Regel mit elektronischen Komponenten erfolgt, wozu die optischen Signale zunächst in elektrische und dann wieder in optische Signale umgewandelt werden müssen. In volloptischen Netzwerken wären solche Signalumwandlungen nicht nötig und dadurch deutlich höhere Datenübertragungsraten bei geringerem Energieverbrauch erreichbar.

Bei der Entwicklung volloptischer Switches und anderer aktiver Komponenten ist man jedoch mit zwei Besonderheiten von Photonen gegenüber Elektronen konfrontiert. Zum einen besitzen Elektronen eine elektrische Ladung, wodurch sie direkt miteinander wechselwirken und einfach manipuliert werden können, was grundlegend für die Signalverarbeitung und -vermittlung ist. Photonen hingegen sind ungeladen und können nicht direkt miteinander wechselwirken, sondern nur unter bestimmten Bedingungen innerhalb von geeigneten Medien. Dies macht volloptische Prozessoren und Switches vergleichsweise schwer realisierbar. Die zweite angesprochene Besonderheit besteht darin, dass es sich bei Lichtsignalen um elektromagnetische Wellen handelt, die sich als solche nicht ohne Weiteres beliebig lange zwischenspeichern lassen. Dies wiederum erschwert die technische Realisierung eines volloptischen Pendants zu elektronischen Arbeits- und Zwischenspeichern.

Für den Umgang mit optischen Signalen werden verschiedene physikalische Effekte genutzt. Eine wichtige Rolle spielen dabei nichtlineare optische Effekte, mit denen sich Licht auf unterschiedliche Arten manipulieren lässt. Beispiele hierfür

sind Umwandlungen von Wellenlängen zum Multiplexing oder optisch induzierte Änderungen des Brechungsindex zur Umlenkung von Lichtsignalen. Die dabei stattfindende Wechselwirkung der Lichtwellen ist deutlich schwächer als die Wechselwirkung elektrischer Signale, weswegen hohe Lichtintensitäten benötigt werden. Aus diesem Grund sind optische Resonatoren eine wichtige Komponente von volloptischen Schaltkreisen – in ihnen wird einfallendes Licht gewissermaßen eingeschlossen, wodurch sich hohe Intensitäten aufbauen können. Beispiele für weitere benötigte photonische Komponenten sind Lichtquellen, Modulatoren, Wellenleiter, Strahlteiler, Filter, optische Verstärker, Photodetektoren, Interferometer.

Optische Verbindungen über immer kürzere Strecken bis hinunter auf Chipenebene wurden bereits demonstriert, sind jedoch im Vergleich zu heute üblichen elektronischen Verbindungen noch deutlich teurer und damit in dieser Hinsicht auf längere Sicht nicht konkurrenzfähig. Auch die Realisierung wirklich volloptischer Switches scheint auf absehbare Zeit nicht umsetzbar zu sein, was u. a. darauf zurückzuführen ist, dass bei der Vermittlung von Signalen in Netzwerken Daten auch immer verarbeitet und zwischengespeichert werden müssen, was sich bisher nur elektronisch umsetzen lässt. Bisher demonstrierte volloptische Prozessoren sind in ihrem Leistungsumfang auf grundlegendste Operationen beschränkt und ihre Umsetzung kann allenfalls als gelungener Machbarkeitsbeweis ohne aussichtsreiche Zukunftsperspektive betrachtet werden. Es ist eine weitverbreitete Einschätzung, dass volloptische Computer allein bestehend aus photonischen Komponenten auf absehbare Zeit nicht realisiert werden können. Jedoch ist davon auszugehen, dass in nächster Zeit zunehmend hybride optisch-elektronische Schaltkreise realisiert werden, in denen volloptische und elektronische Komponenten jeweils für die Teilaufgaben eingesetzt werden, die von ihnen am besten erfüllt werden können.

Dr. David Offenber