

# Ultraschnelle Spin-Laser für die nächste Generation der optischen Datenübertragung

*Markus Lindemann*

Die Bereitstellung einer stabilen Internetverbindung mit ausreichend großer Bandbreite ist ein erheblicher Wirtschaftsfaktor und stellt eine wichtige Basis für die Digitalisierung dar. Bereits jetzt übersteigt der Bedarf zeitweise die Kapazität der Netzwerk-Infrastruktur. Zusätzlich wird für die erforderliche Bandbreite ein weiteres immenses Wachstum prognostiziert. Ultraschnelle Datenverbindungen basieren heute üblicherweise auf optischen Komponenten. Für kurze Verbindungen innerhalb von Serverzentren werden als optische Komponenten der Transmitter vertikal emittierende Laserdioden (VCSEL) eingesetzt, deren Intensität zur Aufprägung von Informationen direkt über den Betriebsstrom moduliert wird. Die Modulationsbandbreite der VCSEL, welche die maximal erreichbare Modulationsfrequenz bestimmt, ist durch die Resonanzfrequenz der Intensitätsdynamik limitiert. Diese Resonanzfrequenz wird von Design-Parametern des VCSELS und dem elektrischen Arbeitspunkt festgelegt. Die Optimierung dieser Werte wird mit steigenden Anforderungen an die Modulationsbandbreite immer schwieriger, sodass sich das Wachstum der technisch realisierten Bandbreite pro Verbindung im Gegensatz zur immer schneller steigenden Nachfrage an Bandbreite verringert.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Energieverbrauch des Transmitters. In 2020 wird erwartet, dass in den USA etwa 50 Großkraftwerke für den Betrieb der dortigen Serverzentren nötig sein werden. Ein Großteil davon entfällt auf die Datenübertragungssysteme und ihre Kühlung. Somit ist eine energiesparende und schnellere Alternative zum konventionellen VCSEL dringend erforderlich.

In dieser Arbeit wird eine solche Alternative vorgestellt: In einem Spin-VCSEL wird der Elektronen-Spin genutzt, um eine herausragend hohe Modulationsbandbreite zu erreichen. Über die Polarisation des Elektronen-Spins lässt sich die optische Polarisation des vom Spin-VCSEL emittierten Lichtes steuern. Mittels Spin-Injektion wird die Polarisation moduliert und somit als Informationsträger genutzt. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Größe der Anisotropie des Brechungsindex, auch Doppelbrechung genannt, für dieses Konzept eine besonders relevante Eigenschaft des Lasers darstellt: Sie bestimmt die Resonanzfrequenz. Maximierte Doppelbrechung führt somit zu maximierter Datenrate. Es wird ein Konzept zur Beeinflussung der Doppelbrechung entwickelt, um den Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz der Polarisationsdynamik und Doppelbrechung experimentell zu beweisen. Weiterhin wird eine Steigerung der Modulationsbandbreite mit der Doppelbrechung experimentell gezeigt. Es werden Konzepte zur Maximierung der Doppelbrechung verwendet, um die technischen Limitierungen des Konzeptes auszuloten. Eine Resonanzoszillation der Polarisationsdynamik wird bis zu 212 GHz gezeigt, etwa eine Größenordnung über den Werten für konventionelle VCSEL. Ein präziser Parametersatz für ein erweitertes Simulationsmodell wird herausgearbeitet, um Datenübertragung bei solch hohen Frequenzen numerisch zu untersuchen. Für den verwendeten Spin-VCSEL ergibt sich eine Modulationsbandbreite bzw. mögliche Datenrate von 240 GBit/s, dem 7-fachen des leistungsfähigsten konventionellen VCSELS. Zusätzlich zur gesteigerten Modulationsbandbreite bietet der Spin-VCSEL auch einen um eine Größenordnung verringerten Energieverbrauch. Spin-VCSEL mit elektrischer Spin-Injektion wurden bisher nur bei starker Kühlung realisiert. Dies macht ihren Einsatz in einem Serverzentrum jedoch technisch sehr aufwendig und damit unwirtschaftlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher zusätzlich ein Konzept entwickelt, das die Realisierung von elektrischer Spin-Injektion bei Raumtemperatur basierend auf einer Änderung der Geometrie des VCSELS durch Minimierung der Spin-Injektionslänge unter Verwendung eines Reflexionsgitters mit integrierten Spin-Injektionskontakten ermöglicht. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit das Potential des Spin-VCSELS auf, die zukünftige Technologie für ultraschnelle optische Datenübertragung zu werden und den steigenden Bedarf an Bandbreite energieeffizient abzudecken.