

# Optisches OAM-Multiplexing

Unter Multiplexing versteht man in der optischen Kommunikation die gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale über ein Medium zur Erhöhung der Datenübertragungsrate. Dazu werden die Signale beispielsweise auf Licht mit verschiedenen Wellenlängen oder Polarisationen moduliert, so dass sie auf der Empfängerseite mit geeigneten optischen Komponenten wieder voneinander getrennt werden können. Eine weitere, für diesen Zweck nutzbare Eigenschaft von Licht ist der sogenannte Bahndrehimpuls (engl. Orbital Angular Momentum, häufig abgekürzt als OAM). In Kombination mit den herkömmlichen Verfahren könnte der Einsatz des OAM-Multiplexing zu einer deutlichen Steigerung der erreichbaren Datenübertragungsraten führen. Seine prinzipielle Machbarkeit ist mittlerweile vielfach demonstriert worden, praktisch sinnvoll einsetzbare Systeme erscheinen jedoch erst langfristig realisierbar.

Der OAM ist eine relativ abstrakte, technisch bisher kaum genutzte und daher wenig geläufige Eigenschaft von Lichtwellen, die mit sehr komplex geformten Wellenfronten einhergeht. Als Wellenfront bezeichnet man die Fläche in einer Welle, in der sich alle Schwingungen in der gleichen Phase, d. h. im gleichen Schwingungszustand, befinden. Licht mit OAM besitzt als charakteristische Eigenschaft schraubenförmige Wellenfronten, weshalb es in der Literatur im Deutschen oft als verdrehtes Licht oder Korkenzieher-Licht und im Englischen als Twisted Light oder Vortex Beams bezeichnet wird. Verschiedene OAM-Zustände unterscheiden sich in der Anzahl und Drehrichtung ineinanderliegender schraubenförmiger Wellenfronten.

Ein Lichtstrahl in einem definierten OAM-Zustand wird üblicherweise als OAM-Mode bezeichnet. Unterschiedliche OAM-Moden können räumlich überlagert werden, sich gemeinsam über große Strecken ausbreiten und dann prinzipiell wieder sauber voneinander getrennt werden. Beim OAM-Multiplexing nutzt man diese physikalische Eigenschaft, um mit mehreren OAM-Moden voneinander unabhängige Datenkanäle zu schaffen,

die gleichzeitig über eine Glasfaser oder eine Sichtverbindung (durch die Luft, unter Wasser oder im Weltraum) ohne Übersprechen übertragen werden können. Es konnte bereits prinzipiell demonstriert werden, dass sich das OAM-Multiplexing mit herkömmlichen Multiplexing-Verfahren kombinieren lässt. So könnte man mit den beim Wellenlängen-Multiplexing heute üblichen über hundert Wellenlängen multipliziert mit den zwei physikalisch möglichen Polarisationen (links- und rechts-zirkular) und der Anzahl der verwendeten OAM-Moden hunderte bis tausende unabhängige Datenkanäle schaffen.

Es gibt aktuell verschiedene etablierte und in Entwicklung befindliche Methoden, übliches Laserlicht ohne OAM mit speziellen optischen Bauteilen in OAM-Moden umzuwandeln. Dazu zählen z. B. sogenannte Spiralphasenplatten und neuerdings auch Metaoberflächen, mit denen jeweils nur die OAM-Moden erzeugt werden können, für die sie gefertigt wurden. Eine flexiblere, aber teurere Alternative stellen räumliche Lichtmodulatoren dar, mit denen computergesteuert nahezu beliebige OAM-Moden gebildet werden können. Darüber hinaus forscht man derzeit an miniaturisierten und optisch integrierten Lichtquellen, die ohne zusätzliche Bauteile direkt OAM-Moden aussenden. Solche Systeme basieren in der Regel auf wenigen Mikrometern großen Ringlasern, wobei bisher jedoch nur Systeme von begrenzter Funktionalität demonstriert werden konnten.

Während es relativ einfach ist, viele datentragende OAM-Moden in einem Strahl zu überlagern, stellt die gleichzeitige Trennung aller Datenkanäle nach der Übertragung, das sogenannte Demultiplexing, eine bisher noch nicht zufriedenstellend gelöste Herausforderung dar. Eine einzelne OAM-Mode lässt sich zwar im Prinzip mit dem gleichen optischen Bauteil aus dem überlagerten Strahl abtrennen, mit der sie erzeugt wurde, indem er dieses in umgekehrter Richtung durchläuft und die übrigen OAM-Moden einfach ausgeblendet werden. Je größer jedoch die

Anzahl an verwendeten Moden ist, um so unpraktikabler wird dieser Ansatz aufgrund des zunehmenden Aufwands an optischen Bauteilen und einer unzureichenden Effizienz. Weitere Herausforderungen ergeben sich beim OAM-Multiplexing in der Freiraumkommunikation daraus, dass die komplexen Wellenfronten der OAM-Moden durch atmosphärische Turbulenzen oder die Streuung an Mikropartikeln beeinträchtigt werden, und in der Faserkommunikation dadurch, dass Licht aus einer OAM-Mode in andere übertragene OAM-Moden oder gänzlich andere Moden der Faser einkoppeln kann. In beiden Fällen führt dies dazu, dass es zu einem Übersprechen zwischen den Datenkanälen kommt und sich die übertragenen Signale nicht mehr sauber voneinander trennen lassen.

Ob das OAM-Multiplexing zukünftig eine breite Anwendung in der optischen Kommunikation finden wird, ist nach Einschätzung selbst der renommiertesten Fachwissenschaftler bisher noch nicht klar. Unbestritten ist, dass für einen praktischen Einsatz erst deutlich kompaktere, kostengünstigere und effizientere Systeme zur Erzeugung, zum Multiplexing und Demultiplexing von OAM-Moden entwickelt werden müssten. Für eine Anwendung in der Freiraumkommunikation wäre es zudem vor allem nötig, Ansätze zur Reduktion von Turbulenzeffekten weiterzuentwickeln, wie adaptive Optiken oder digitale Signalverarbeitungstechniken. Zur Nutzung in der Faserkommunikation müsste es deutliche Fortschritte vor allem bei der Herstellung entsprechender Vortex-Fasern geben, um eine stabile und störungsfreie Übertragung vieler OAM-Moden über größere Faserlängen erreichen zu können. Zukünftig könnte die Technologie insbesondere dort zur Steigerung von Datenübertragungsraten eingesetzt werden, wo mit herkömmlichen Multiplexing-Verfahren technische und physikalische Grenzen erreicht werden, vor allem wohl in Kernbereichen von Kommunikationsnetzen (Backbones).

**Dr. David Offenber**