

# Fortschritte in der Quantenphotonik: Die entscheidende Rolle von Ultra Low Loss (ULL)-Glasfasersteckern

**Kurzfassung:** Quantenphotonik hat sich zu einem schnell voranschreitenden Gebiet mit enormem Potenzial für verschiedene Anwendungen entwickelt, darunter Quantencomputing, Quantenkryptographie und Quantenkommunikation. Da die Nachfrage nach einer effizienten und zuverlässigen Übertragung von Quanteninformationen steigt, wird die Rolle von Glasfaser-Steckverbindungen immer wichtiger. Dieses White Paper gibt einen Überblick über die neuesten Fortschritte in Diamonds Bemühungen, die Verbindungsverluste in Singlemode-Fasersteckern zu verringern, um den Akteuren im Bereich der Quantenphotonik eine neue Klasse von Ultra Low Loss-Steckern zur Verfügung zu stellen, die ihnen helfen können, die Effizienz der Kopplung von Quantenemittern, Detektoren und anderen Komponenten zu verbessern und die Entwicklung robuster Quantentechnologien zu erleichtern.

## 1. Einführung

Die einzigartigen Eigenschaften von Quantensignalen, wie Verschränkung und Überlagerung, machen sie äußerst anfällig für Störungen aus der Umgebung. Der Erfolg von Quantenanwendungen hängt daher von der Zuverlässigkeit der Übertragung und Manipulation von einzelnen Photonen ab. Ultra Low Loss-Glasfaserstecker als entscheidende Verbindung zwischen Quantengeräten spielen in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle. Standard-Steckverbinder können erhebliche Verluste verursachen, die die Zuverlässigkeit der Quantenkommunikation beeinträchtigen. Ultra-Low-Loss-Steckverbinder bewältigen diese Herausforderung, indem sie die Signalverschlechterung minimieren und die Integrität der Quantenzustände aufrechterhalten.

## 2. Anwendung von faseroptischen Steckern in der Quantenphotonik

Lichtwellenleiter und Steckverbinder werden in vielen Bereichen der Quantenphotonik eingesetzt. Im Folgenden werden einige Anwendungsfälle genannt:

- Quantenkommunikation: Die Glasfasertechnik ermöglicht eine Hochgeschwindigkeits-Quantenkommunikation über große Entfernungen, die eine zuverlässige und sichere Übertragung von Quantenzuständen und Quanteninformationen ermöglicht.
- Quantencomputer: Glasfasern sind für die Verbindung von Qubits in Quantencomputersystemen unerlässlich und ermöglichen eine schnelle Datenübertragung und eine effiziente Verarbeitung von Quanteninformationen.
- Quantensensorik: Faseroptische Sensorsysteme werden in der Quantensensorik eingesetzt, um physikalische Größen, wie z. B. Magnetfelder oder Gravitationswellen, mit hoher Präzision und Empfindlichkeit zu messen.
- Quantenschlüsselverteilung (QKD): Glasfasern dienen als Medium für die sichere Quantenkommunikation über QKD-Protokolle, die die Verteilung von kryptografischen Schlüsseln mit höchster Sicherheit gewährleisten.
- Photonen-zählung: Glasfaserschnittstellen sind ein wesentlicher Bestandteil von Anwendungen zur Photonen-zählung, die den Nachweis und die Messung einzelner Photonen für Quantenexperimente und die präzise Verarbeitung von Quanteninformationen ermöglichen.

Zu den typischen Steckverbindern, die in Quantenanwendungen zum Einsatz kommen, gehören der E-2000® und der Mini AVIM® von Diamond, die für ihre Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit auch unter sehr speziellen Betriebsbedingungen, wie sie in diesem Anwendungsbereich immer wieder vorkommen, bekannt sind. Darüber hinaus stellt die Vakuumdurchführung von Diamond ein Ultrahochvakuum- und Tieftemperatursystem dar, das eine nahtlose Integration in Quantenaufbauten ermöglicht.

## 3. Die Ursachen der Einfügedämpfung

Die optische Leistung eines Steckverbinders kann nur durch die Steuerung und Überwachung verschiedener Parameter gewährleistet werden, wie z. B.:

- Eigenschaften der Ferrule: Durchmesser, Form und Genauigkeit des Lochdurchmessers und dessen Konzentricität;
- Parameter für das Polieren;
- Unvollkommenheiten an der Stirnseite (Kratzer, Vertiefungen und Verunreinigungen);
- Seitlicher Versatz und Winkelversatz der Faserkerne; diese Parameter müssen während des gesamten Herstellungs- und Montageprozesses gemessen und unter Kontrolle gehalten werden.

Die seitliche Fehlausrichtung trägt am meisten zu den Einfügeverlusten in Singlemode-Steckern bei. Die Hersteller von Glasfasern geben in der Regel eine Exzentrizität zwischen Kern und Mantel von 0,5 Mikrometern und eine Genauigkeit des Manteldurchmessers von  $\pm 1$  Mikrometer an. Die auf dem Markt erhältlichen modernen Keramikferrulen bieten Präzisionsbohrungen mit einer Toleranz von 1 Mikrometer über dem nominalen Fasermanteldurchmesser und einer Exzentrizität von 0,5 Mikrometern, was im schlimmsten Fall zu einer seitlichen Fehlausrichtung der Faserkerne in Bezug auf den äußeren Ferrulendurchmesser von bis zu 2 Mikrometern führt.

Die Ausrichtung der Steckverbinder zueinander kann zwar die Auswirkungen des Kernversatzes abmildern, aber nicht vollständig beseitigen. Infolgedessen weisen selbst verlustarme Steckverbinder einen Restverlust von möglicherweise 0,2 bis 0,3 dB auf. Aus diesem Grund scheint ein Ansatz, der darauf abzielt, diese in den verwendeten Materialien vorhandenen Restmängel zu reduzieren oder sogar vollständig zu beseitigen, der richtige Weg zu sein, um die ULL-Leistung zu erreichen.

## 4. Die Diamond Ferrule und aktive Kernausrückung

Diamond hat eine innovative Methode des Faserabschlusses eingeführt, die den Kern aktiv und präzise in der Mitte der Ferrule platziert. Im Gegensatz zum Design von Keramikferrulen verwendet die Methode von Diamond ein Zwei-Komponenten-Element, das aus einer harten Zirkoniumdioxid-Keramikhülse und einem verformbaren Titaneinsatz besteht. Diese auf eine Toleranz von 0,5  $\mu\text{m}$  oder weniger präzisionsgeschliffenen und polierten Ferrulen haben absichtlich gesetzte größere Bohrungen von typischerweise 127 Mikrometer für Standardfasern mit 125 Mikrometer Durchmesser. Ein kreisförmiges Crimpwerkzeug mit einem Keilprofil verformt dann den Titaneinsatz plastisch, um den Bohrungsdurchmesser an den Durchmesser der Faser anzupassen. Nach Einkleben und Aushärten der Faser in der Ferrule wird ein weiteres Crimpwerkzeug verwendet, um den Einsatz plastisch zu verformen und die Faser zu verschieben und so die Kernexzentrizität auf weniger als 0,125 Mikrometer zu reduzieren. Dies wird durch eine computergestützte

Exzentrizitätsmessung in Echtzeit erreicht. Der aktive Kernausrückungsprozess bietet eine präzise Positionierung, reduziert den „Kolbeneffekt“ der Faser (axiale Verschiebung der optischen Faser innerhalb der Ferrule) und verbessert die thermische Stabilität. Darüber hinaus erübrigt sich bei diesem Ansatz die Notwendigkeit, die Ferrulen sorgfältig zu sortieren, um Variationen des Mantel-Durchmessers auszugleichen. Dies stellt eine zuverlässigere und effizientere Alternative zu nicht ausgerichteten Ferrulen dar. Diese Technologie ermöglichte es Diamond, die 0,1-dB-Steckerklasse auf den Markt zu bringen, die vor über 20 Jahren den Markt für Telekommunikations-Glasfaserstecker revolutionierte.

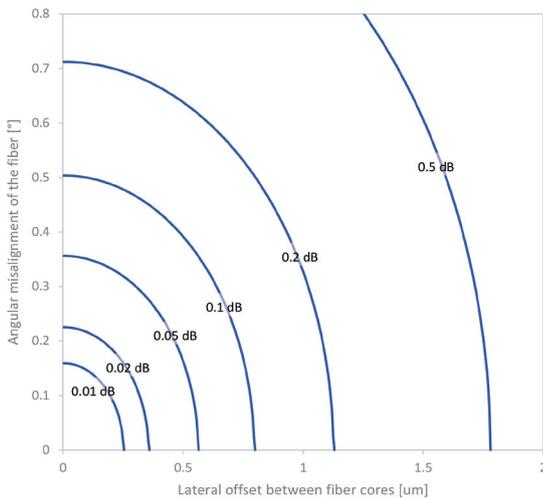


Abbildung 1: Konturlinien, die den theoretischen Einfluss von Seiten- und Winkelversatz auf die Einfügedämpfung von Singlemode-Steckverbindern zeigen.

**5. Der Weg zu Ultra Low Loss-Steckverbindern**

Durch die Nutzung ihrer umfangreichen Erfahrung mit dieser firmeneigenen Technologie und unter Berücksichtigung von kundenspezifischen Anforderungen, insbesondere im Bereich der Quantenphotonik, hat Diamond kürzlich ihr Kern-Kern-Zentrierungsverfahren verbessert, um geringere Verluste zu erzielen. Dieses Ergebnis wurde durch die Verringerung der Fertigungstoleranzen, die Nutzung der jüngsten Fortschritte bei den Bildgebungssystemen und die Einführung einer neuen Software für die Kern-Kern-Zentrierung erreicht, die den Bedienern ein sehr präzises und reproduzierbares Arbeiten ermöglicht. Mit dem neuen Verfahren war Diamond in der Lage, Singlemode E-2000®-Steckverbinder mit einer durchschnittlichen Einfügedämpfung von nur noch 0,045 dB bei zufälliger Steckerpaarung und einem Höchstwert von 0,06 dB bei 95 % der Verbindungen<sup>1</sup> herzustellen.

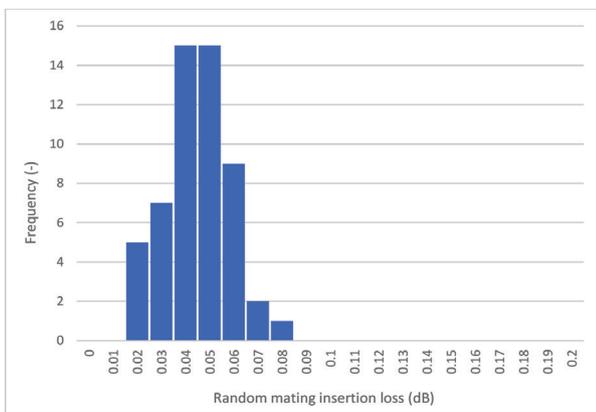


Abbildung 2: Messungen zufälliger Steckerpaarungen bei 1550 nm an den ersten Prototypen von E-2000® Ultra Low Loss Steckverbindern (SMF-28e+ Faser).

Die Ergebnisse sind stark abhängig von der Faser, der Wellenlänge und dem Steckertyp. Darüber hinaus wurden einige Prototypen mit einer bei 1550 nm polarisationserhaltenden Faser hergestellt. In dieser Konfiguration war es möglich, Steckverbinder mit einem durchschnittlichen IL-Wert von 0,05 dB bei zufälliger Steckerpaarung und einem Maximalwert von 0,09 dB bei 95 % der Verbindungen herzustellen, wobei dabei immer noch sehr hohe Werte für das Polarisations-Extinktionsverhältnis erzielt wurden. Fasern mit niedriger Wellenlänge sind kritischer, da die Verluste exponentiell mit der Abnahme des Modenfelddurchmessers zunehmen. Durch Interpolation der Ergebnisse, die bei höheren Wellenlängen erzielt wurden, können die folgenden Verteilungen abgeschätzt werden:

- 630 nm: Mittelwert von 0,15 dB bei zufälliger Steckerpaarung, mit einem Höchstwert von 0,25 dB bei 95 % der Verbindungen;
- 780 nm: Mittelwert von 0,11 dB bei zufälliger Steckerpaarung, mit einem Höchstwert von 0,18 dB bei 95 % der Verbindungen.

Jede spezifische Konfiguration erfordert einen anderen Prozess und führt zu anderen Ergebnissen. Das erfahrene Ingenieurteam von Diamond ist bereit, mit den Kunden über maßgeschneiderte Lösungen zu diskutieren und die Produkte zu entwickeln, die ihren individuellen Anforderungen am besten entsprechen.

1. Vorläufige Daten von Prototypen, die unter Verwendung von SMF-28e+ Fasern bei 1550 nm hergestellt wurden.

**6. Messunsicherheiten**

Das Ergebnis von Einfügedämpfungsmessungen wird in hohem Maße von größeren Messunsicherheiten beeinflusst (Qualität von Referenzsteckern und Adaptoren, Schwankungen des Fasermodenfelddurchmessers, Unsicherheiten im Zusammenhang mit dem Messgerät) und kann daher nicht als eindeutiges Kriterium für die Definition von Leistungsstufen für optische Steckverbinder verwendet werden. Dies gilt insbesondere für Ultra Low Loss-Steckverbinder, da deren Einfügedämpfungswerte in der gleichen Größenordnung wie die Messunsicherheit liegen. Aus diesem Grund sollte die Messung der Einfügedämpfung als eine rein statistische Darstellung eines Loses von zufällig zusammengesteckten Steckverbindern behandelt werden und nicht als absolute Werte einzelner Steckverbinder. Da der wichtigste, die Dämpfung beeinflussende Parameter der seitliche Versatz der Faserkerne ist, kann die Leistung eines Loses, gemessen über die IL-Werte bei zufälliger Steckerpaarung, durch die Einhaltung bestimmter Grenzwerte für diesen Parameter garantiert werden. Diese Grenzwerte werden während des Konfektionierungsverfahrens streng kontrolliert und zu 100 % gemessen.

**7. Andere Technologien**

Für Quantenanwendungen bietet Diamond eine Reihe weiterer relevanter Technologien an, die spezifischen Anforderungen gerecht werden. Power Solution Steckverbinder sind für Hochleistungsanwendungen konzipiert und gewährleisten eine zuverlässige Leistung unter anspruchsvollen Bedingungen. Diamond ist auch auf die Polarisationserhaltung spezialisiert, die eine präzise Steuerung und Manipulation der Lichtpolarisation in Quantensystemen ermöglicht. Wenn es um hohe und sehr niedrige Temperaturen geht, wie z. B. bei kryogenen Anwendungen, sind die Steckverbinder von Diamond so konzipiert, dass sie extremen Bedingungen standhalten und gleichzeitig eine optimale Leistung bieten. Die Technologien von Diamond bringen genau dort Leistung, wo Sie sie brauchen.

**8. Schlussfolgerung**

Mit dem weiteren Voranschreiten der Quantenphotonik wird die Bedeutung von Ultra Low Loss (ULL) Glasfasersteckern weiter zunehmen. Glasfasern und Steckverbinder sind mehr als nur ein

Beitrag - sie ermöglichen grundlegend veränderte Quantentechnologien und verkörpern die wesentliche Verbindung zwischen theoretischem Verständnis und realen Quantenanwendungen. Diamonds Erfahrung und die Bereitschaft, stets an der Spitze der Entwicklung zu stehen, versetzen uns in die Lage, die Bedürfnisse unserer Kunden bestmöglich zu erfüllen und ihnen den Weg für die Realisierung fortschrittlicher Quantentechnologien zu ebnen.

### **Über Diamond**

Diamond SA ist ein internationales Unternehmen mit einem soliden Know-how in der Entwicklung, Herstellung und Montage von Komponenten für optische Präzisionsfasern. Diamond ist bekannt für seine wiederholbare, sehr niedrige Einfügedämpfung aufgrund der Verwendung seiner patentierten Kern-Kern-Zentrierungstechnologie (ACA). Diamond SA ist auch der Erfinder des weltberühmten E-2000® Steckers. Wenn Sie mehr über die Steckverbinder und Technologien von Diamond erfahren möchten, kontaktieren Sie uns bitte: +41 58 307 45 45 oder besuchen Sie: [www.diamond-fo.com](http://www.diamond-fo.com).