

# Ultra-Low Loss (ULL) Glasfaserstecker – Wegbereiter für Fortschritte in der Quantenphotonik

Quantenphotonik entwickelt sich schnell zu einem vielversprechenden Bereich mit enormem Potenzial für Anwendungen wie Quantencomputing, Quantenkryptographie und Quantenkommunikation. Mit der steigenden Nachfrage nach effizienter und zuverlässiger Übertragung von Quantensignalen werden Glasfaserstecker immer wichtiger. Ziel dieses Whitepapers ist es, einen Überblick über die Initiativen von DIAMOND zu geben, eine Klasse von Ultra-Low-Loss Steckern zu entwickeln, die es Akteuren der Quantenphotonik ermöglicht, die Effizienz von Emitter-, Detektor- und anderen Komponenten zu steigern und so die Entwicklung robuster Quantentechnologien zu unterstützen.

## 1. Einführung

Die einzigartigen Eigenschaften von Quantensignalen, wie Verschränkung und Überlagerung, machen sie besonders anfällig für Störungen. Der Erfolg von Quantenanwendungen hängt daher stark von der zuverlässigen Übertragung und Manipulation einzelner Photonen ab. Ultra-Low Loss Glasfaserstecker spielen dabei eine zentrale Rolle, da sie als Schlüsselverbindung zwischen Quantenkomponenten fungieren. Standardstecker verursachen erhebliche Verluste und beeinträchtigen die Qualität der Quantenkommunikation. Ultra-Low-Loss Stecker minimieren diese Signalverluste und bewahren die Integrität der Quantenzustände.

## 2. Glasfaserstecker in der Quantenphotonik

Quantenanwendungen erfordern Komponenten, die Präzision, Langlebigkeit und hohe Leistung vereinen, um unter extrem anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig zu funktionieren. Die E-2000®- und Mini AVIM®-Steckverbinder von Diamond sind branchenführende Lösungen, die sich durch aussergewöhnliche optische Leistung, Robustheit und Anpassungsfähigkeit auszeichnen, selbst wenn sie rauen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Der E-2000® ist besonders für seinen integrierten Verschlussmechanismus bekannt, der die Faserendfläche vor Verunreinigungen und Beschädigungen schützt und so eine gleichbleibende Leistung über einen langen Zeitraum gewährleistet. Der Mini AVIM® hingegen wird für sein kompaktes, leichtes Design in Kombination mit robuster Zuverlässigkeit geschätzt und ist daher der bevorzugte Steckverbinder für anspruchsvolle Umgebungsbedingungen wie extreme Temperaturen und Vibrationen.

Darüber hinaus bietet die Vakuumdurchführung von Diamond eine entscheidende Schnittstellenlösung für Quantensysteme, die im Ultrahochvakuum (UHV) und unter kryogenen Bedingungen arbeiten. Entwickelt, um eine präzise und effiziente Lichtübertragung über Vakuumbarrieren hinweg zu ermöglichen, gewährleistet diese Durchführung minimalen Signalverlust und optimale Leistung bei der Integration optischer Komponenten in Quantenumgebungen. Die fortschrittliche Technologie und das Engineering von Diamond stellen sicher, dass diese Lösungen die strengen Anforderungen der Quantenforschung und -entwicklung erfüllen und unübertroffene Zuverlässigkeit und optische Präzision bieten.

## 3. Ursachen für Einfügeverluste

Die optische Leistung eines Steckverbinders kann nur durch die Kontrolle mehrerer Parameter gewährleistet werden, wie z. B.:

- Eigenschaften der Ferrule:  
Durchmesser, Form und Genauigkeit des Lochdurchmessers und dessen Konzentrität;
- 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 ist der wichtigste Faktor für die Einfügedämpfung bei Singlemode-Steckverbindern. Faserhersteller geben in der Regel eine Exzentrizität von Kern zu Mantel von maximal 0,5 Mikrometer und eine Genauigkeit des Manteldurchmessers von  $\pm 1$  Mikrometer an.

## 4. Die Ferrule und das Active Core Alignment (ACA) von DIAMOND

Diamond hat eine innovative Methode für den Faserabschluss eingeführt, bei der der Kern aktiv und präzise in der Mitte der Ferrule platziert wird. Im Gegensatz zu Keramik-Ferrulen verwendet die Diamond-Methode ein Zwei-Komponenten-Element, das aus einer robusten Zirkoniumdioxid-Keramikhülse und einem verformbaren Titaneinsatz besteht. Diese Ferrulen werden mit einer Toleranz von 0,2  $\mu\text{m}$  oder weniger präzisionsgeschliffen und geläpft und weisen absichtlich etwas zu große Bohrungen auf, in der Regel 127 Mikrometer für Standardfasern mit 125 Mikrometer. Ein kreisförmiges Crimpwerkzeug mit Keilprofil verformt dann den Titaneinsatz plastisch, um den Bohrungsdurchmesser an den Faserdurchmesser anzupassen. Nach dem Verkleben und Aushärten der Faser in der Ferrule wird ein weiteres Crimpwerkzeug verwendet, um den Einsatz plastisch zu verformen und die Faser so zu verschieben, dass die Exzentrizität des Kerns auf weniger als 0,125 Mikrometer reduziert wird. Dies wird durch eine computergestützte Echtzeitmessung der Exzentrizität erreicht. Die aktive Kernausrückung ermöglicht eine präzise Positionierung, reduziert den "Kolbeneffekt" der Faser (axiale Verschiebung der optischen Faser in der Ferrule) und verbessert die thermische Stabilität.

Darüber hinaus eliminiert dieser Ansatz die Notwendigkeit, die Ferrulen sorgfältig zu sortieren, um Variationen im Manteldurchmesser 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 mehr als 20 Jahren den Markt für Glasfaserstecker für die Telekommunikation revolutionierte.

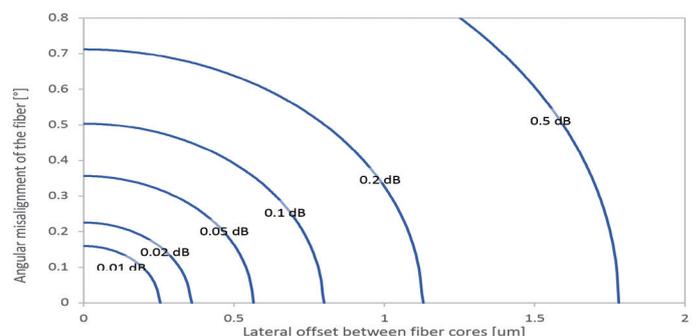


Bild 1: Konturlinien, die den theoretischen Einfluss von lateraler und angularer Fehlausrichtung auf die Einfügedämpfung von Singlemode-Steckverbindern zeigen.

### 5. Der Weg zu Ultra-Low-Loss Steckern

Basierend auf der umfangreichen Erfahrung mit dieser proprietären Technologie und unter Berücksichtigung kundenspezifischer Anforderungen, insbesondere im Bereich der Quantenphotonik, hat Diamond jüngst seinen Kern-Kern-Zentrierungsprozess verbessert, um geringere Verluste zu erzielen.

Erreicht wurde dies durch die Verringerung der Fertigungstoleranzen, die Nutzung der jüngsten Fortschritte bei den Imaging-Systemen und die Einführung einer neuen Software für die Kern-Kern-Zentrierung, die es den Nutzern ermöglicht, sehr präzise und reproduzierbar zu arbeiten. Mit dem neuen Verfahren ist es Diamond möglich, Singlemode E-2000® Steckverbinder mit einer durchschnittlichen Einfügedämpfung von nur 0,017 dB bei zufälliger Steckerpaarung und einem Höchstwert von 0,04 dB bei 95 % der Verbindungen herzustellen<sup>1</sup>.

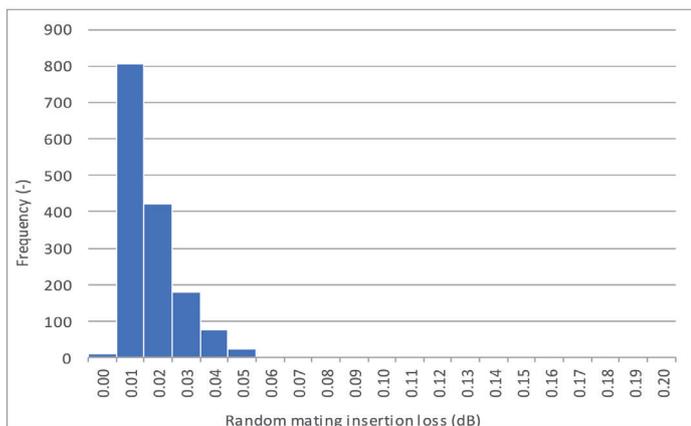


Bild 2: Messungen der Einfügedämpfung bei zufälliger Paarung bei 1550 nm an einem Los von 40 E-2000® Ultra-Low-Loss Steckverbindern.

Die Ultra-Low-Loss-Technologie ist nicht auf eine bestimmte Wellenlänge beschränkt. Während sich typische Anwendungen auf 1550 nm konzentrieren, hat die Technologie auch bei nicht standardmäßigen Wellenlängen, wie z.B. sichtbarem Licht, hervorragende Leistungen gezeigt. Um ihre Zuverlässigkeit zu validieren und die erreichbaren optischen Verluste zu bestimmen, wurden umfangreiche Tests mit verschiedenen Fasertypen und bei unterschiedlichen Wellenlängen durchgeführt. Diese Tests liefern wichtige Daten, um die Anpassungsfähigkeit der Technologie zu bewerten und eine optimale Leistung in verschiedenen Anwendungen zu gewährleisten.

Die Testergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

FASER NAME	FASER TYP	WELLENLÄNGE (nm)	DURCHSCHNITTLICHER IL	MAX 95% IL (dB)
Ultra-Low Loss Faser (kompatibel mit G.652.D)	SM	1550 nm	0.017	0.04
Corning SMF-28e+	SM	1550 nm	0.034	0.07
Nufern 780-HP-HYT-BK	SM	800 nm	0.057	0.10
Fujikura SM.15-P-8/125	PM	1550 nm	0.050	0.09
Thorlabs UHNA3 (ultra high Na)	SM	1550 nm	0.070	0.15

Tabelle 1: Ergebnisse der Messung der zufälligen Einfügedämpfung von Diamond ULL-Steckverbindern an verschiedenen Glasfasertypen.

Jede spezifische Konfiguration erfordert ein eigenes Verfahren, das zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Das erfahrene Ingenieurteam von Diamond steht bereit, um mit den Kunden maßgeschneiderte

Lösungen zu erörtern und die Produkte zu definieren, die ihren spezifischen Anforderungen am besten entsprechen.

<sup>1</sup> Produktionsdaten für ULL-Steckverbinder, die mit einer Singlemode-Faser bei 1550 nm hergestellt wurden.

### 6. Messunsicherheiten

Das Ergebnis von Einfügedämpfungsmessungen wird in hohem Maße von Messunsicherheiten beeinflusst (Qualität der Referenzstecker und Adaptern, Schwankungen des Fasermodenfelddurchmessers, Unsicherheiten des Messgerätes) und kann daher nicht als eindeutiges Kriterium für die Definition von Leistungsklassen für optische Steckverbinder verwendet werden. Dies gilt insbesondere für Ultra-Low-Loss-Steckverbinder, da deren Einfügedämpfung in der gleichen Größenordnung wie die Messunsicherheit liegt. Aus diesem Grund sollte die Messung der Einfügedämpfung als rein statistische Darstellung eines Loses zufällig gesteckter Steckverbinder betrachtet werden und nicht als Absolutwerte einzelner Steckverbinder. Da der wichtigste Parameter, der sich auf die Dämpfung auswirkt, die seitliche Fehlausrichtung der Faserkerne ist, kann die Leistung eines Loses in einer Zufallspaarmessung garantiert werden, indem bestimmte Grenzwerte für diesen Parameter eingehalten werden, der während des Fertigungsprozesses streng kontrolliert und zu 100 % gemessen wird.

### 7. Andere Technologien

Für Quantenanwendungen bietet Diamond eine Reihe weiterer relevanter Technologien an, die spezifische Anforderungen erfüllen. Die Power Solution-Steckverbinder sind für Hochleistungsanwendungen konzipiert und gewährleisten eine zuverlässige Leistung unter anspruchsvollen Bedingungen. Diamond ist auch auf Polarisationserhaltung spezialisiert, die eine präzise Kontrolle und Manipulation der Lichtpolarisation in Quantensystemen ermöglicht. Bei hohen und sehr niedrigen Temperaturen, wie z.B. in kryogenen Anwendungen, sind die Steckverbinder von Diamond so ausgelegt, dass sie extremen Bedingungen standhalten und gleichzeitig eine optimale Leistung bieten. Die Technologien von Diamond bieten Leistung genau dort, wo Sie sie brauchen.

### 8. Fazit

Mit dem weiteren Voranschreiten der Quantenphotonik wird die Bedeutung von ULL (Ultra Low Loss)-Glasfasersteckverbindern weiter zunehmen. Glasfasern und Steckverbinder leisten mehr als nur einen Beitrag - sie ermöglichen grundlegend veränderte Quantentechnologien und sind das entscheidende Bindeglied zwischen theoretischem Verständnis und realen Quantenanwendungen. Diamonds Erfahrung und der Wille, immer an der Spitze der Entwicklung zu stehen, ermöglichen es uns die Bedürfnisse unserer Kunden bestmöglich zu erfüllen und ihnen den Weg zur Quantentechnologien zu ebnet.

### Über DIAMOND

Diamond SA ist ein internationales Unternehmen mit solidem Know-how in der Entwicklung, Herstellung und Montage faseroptischer Präzisionskomponenten. Diamond ist bekannt für seine reproduzierbare, sehr niedrige Einfügedämpfung dank seiner patentierten Kern-Kern-Zentrierungstechnologie (ACA). Diamond SA ist auch der Erfinder des weltbekannten E-2000® Steckverbinders. Wenn Sie mehr über die Steckverbinder und Technologien von Diamond erfahren möchten kontaktieren Sie uns via Telefon +41 58 307 45 45 oder besuchen Sie [www.diamond-fo.com](http://www.diamond-fo.com).