



CORNING

Sauberkeit von Glasfaserverbindungen im Rechenzentrum – Die Auswirkungen von Verunreinigungen

Martin Hempstead
und Eric ten Have

Inhalt

Einleitung	2	Abbilden und Messen von Verunreinigungen auf Steckerstirnflächen	7
Echtes „Plug & Play“ – Die Wichtigkeit von Sauberkeit im Rechenzentrum	2	Verunreinigungsquellen und -mechanismen	8
Art der Verunreinigungen, die auf Steckerstirnflächen auftreten	3	Partikelmigration	11
Auswirkungen von Verunreinigungen in Glasfaseranschlüssen	4	Auswirkungen von Staubkappendesign	12
		Schlussfolgerung	13

Einleitung

Moderne Rechenzentren erfordern Netzwerke mit extrem hoher Geschwindigkeit und extrem niedriger Latenz, damit sie neue Technologien und Anwendungen unterstützen können, die auf der ganzen Welt zum Einsatz kommen. Heutzutage werden die besten technischen Lösungen dazu entwickelt und eingesetzt, um die Exabyte an Daten zu übertragen, die zur Unterstützung unserer sozialen und beruflichen Interaktionen erforderlich sind. All dies kann jedoch durch ein einziges Teilchen Schmutz, Fett oder sogar eine Hautschuppe auf der Stirnfläche des LWL-Steckverbinders zunichte gemacht werden.

Diese Abhandlung beschreibt die Auswirkungen der Sauberkeit im Rechenzentrum und einige unserer Erkenntnisse aus einer Studie über Schmutzpartikel und andere Verunreinigungen an optischen Steckverbindern.

Wir befassen uns in diesem Whitepaper mit den Auswirkungen von Verunreinigungen auf optische Signalverluste und zeigen die Herausforderungen bei der Einschätzung der Dämpfungsverluste auf Grundlage einer visuellen Prüfung auf. Durch die Untersuchung der Art der Schadstoffe und die Erkennung von Ansammlungen von Verunreinigungen können wir feststellen, wie sie an die Stirnfläche gelangen. Dabei müssen auch die Herausforderungen einer zuverlässigen Messung des Verunreinigungsgrads durch Bildanalyse berücksichtigt werden, insbesondere auf instrumentenunabhängige Weise. Abschließend befasst sich das Whitepaper mit den Auswirkungen des Designs von Staubschutzkappen und deren Beitrag zur Verschmutzung und prüft die Möglichkeit, auf die Reinigung der Steckverbinderenden am Installationsort zu verzichten und dennoch eine gute optische Leistung zu erhalten.

Echtes „Plug & Play“ – Die Wichtigkeit von Sauberkeit im Rechenzentrum

Die aktuelle Empfehlung von Corning lautet, dass Kunden alle Steckverbinder an Corning-Produkten vor der Installation reinigen sollten, aber nicht kontrollieren müssen. Ein großer Vorteil von sauberen Verbindungen ist die Tatsache, dass Installateure die Produkte sofort nach dem Entpacken anschließen können und nicht erst jeden einzelnen Steckverbinder reinigen oder gar kontrollieren zu müssen, was nach wie vor regelmäßig gemacht wird.

Wir haben die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens getestet, indem wir die Einfügedämpfung (IL) an einer großen Anzahl von MultimodeStaubschutzkappen-Verbindungen, wie sie in einem Rechenzentrum (Abbildung 1) häufig vorkommen, unter Verwendung verschiedener Reinigungsverfahren gemessen haben. Die Ergebnisse deuten stark darauf hin, dass Produkte, die einem optimierten Reinigungsverfahren unterzogen wurden und über Staubschutzkappen verfügen, die ohne eine weitere Reinigung montiert werden können (Fall „keine Reinigung im Rechenzentrum“) eine genauso gute oder gar bessere Leistung erzielen (in Bezug auf die IL-Verteilung und Anzahl der IL-Ausfälle) als ein kurz vor Herstellung der Verbindung „vor Ort“ gereinigtes Produkt.

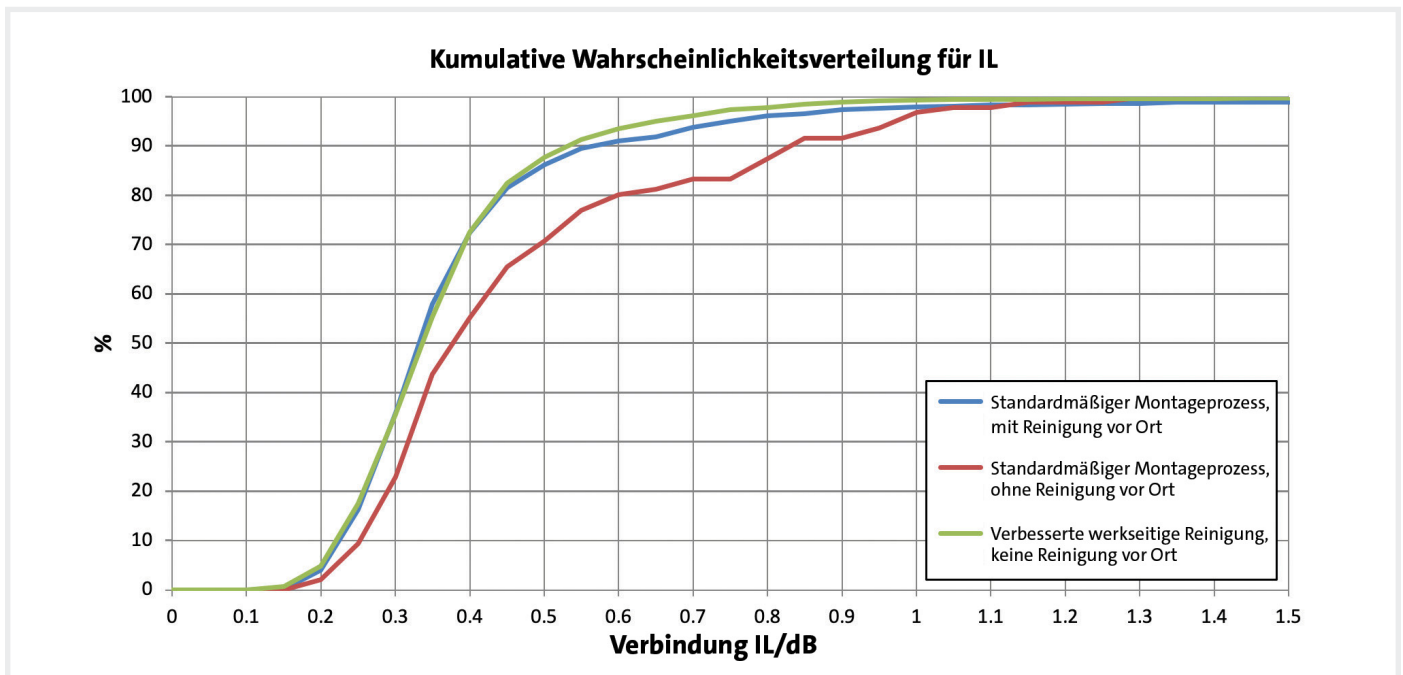


Abbildung 1: Vergleich von IL-Messungen einer typischen Verbindungsarchitektur für den aktuellen Prozess (Standard-Montageprozess mit Reinigung vor Ort, blaue Linie) und dem Fall "keine Reinigung im Rechenzentrum" (erweiterte Werksreinigung ohne Reinigung vor Ort, grüne Linie). Die Verbindungen bestanden aus 12-LC zu 1-MPO Modulen, die über ein MPO-MPO-Patchkabel verbunden waren. Die Daten zeigen, dass eine verbesserte Reinigung und die Verwendung optimierter Staubkappen, die ohne Reinigung vor Ort montiert werden, eine gleichwertige oder bessere Leistung als das derzeitige Standardverfahren erbringen können. Die Daten für ein Standardprodukt, das ohne Reinigung vor Ort montiert wurde (rote Linie), werden als Referenz angegeben und schneiden schlechter ab als die anderen Produkte.

Art der Verunreinigungen, die an Steckerstirnflächen auftreten

Wir haben die Arten von Materialien, die auf den Endflächen von industriellen Steckverbindern zu finden sind, mit verschiedenen Verfahren untersucht:

- Rasterelektronenmikroskopie (REM) für morphologische Informationen und die damit verbundene energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) für Daten über die Elementzusammensetzung
- Raman- und IR-Spektroskopie für Informationen über die molekulare Zusammensetzung

Die Ergebnisse für Einfaser- und Mehrfaser-Steckverbinder, die typischerweise in Rechenzentren eingesetzt werden, sind in Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 dargestellt. Es gibt ein breites Spektrum von Materialien, von denen viele nicht abschließend identifiziert werden können, dazu gehören:

- Hautschuppen, die als stickstoffhaltige organische Partikel identifiziert wurden, wodurch sie aus Sicht der Zusammensetzung nicht von Polyamidpolymerpartikeln unterscheidbar sind
- Mineralien und andere anorganische Schmutzpartikel
- Öle, und
- viele generische „organische“ (kohlenstoffhaltige) Partikel, von denen einige vermutlich von den spritzgegossenen Polymeren stammen, die zur Gestaltung der Komponenten des Steckverbindergehäuses verwendet werden

Diese wurden sowohl an Einfaser-Steckverbindern mit Zirkoniumdioxid-Hülsen als auch an MPO-Steckern mit glashaltigen Polymer-Hülsen gefunden. Die Partikelgrößen und Morphologien sind ebenfalls sehr variabel.

Auflistung der verschiedenen Materialzusammensetzungen, die auf den Stirnflächen von LC-Steckverbindern zu finden sind.

Polyamid (Hautschuppen)	PET	Acrylkleber
Mit Kieselsäure verstärktes Epoxidharz	C/Al/Salze	Zellulose
Organische Stoffe	Polierrückstände	CaCO ₃
Möglicher Calcit	C mit Fe-/KCl-Partikeln	Talk
C/O-Teilchen (möglicherweise Polymer)	Organische Stoffe / Salze	
C-Schmiere/-Flecken	C-/O-/Na-/Si-/S-/Cl-/K-Faser	

Tabelle 1: Auflistung der verschiedenen Materialzusammensetzungen, die auf den Stirnflächen von LC-Steckverbindern zu finden sind.

Auflistung der verschiedenen Materialzusammensetzungen, die auf den Stirnflächen von MPO-Steckverbindern zu finden sind.

Polyamid (Hautschuppen)	NaCl-Teilchen	C/O/Si mit Kieselsäureteilchen
C/O-Teilchen (möglicherweise Polymer)	C-Schmiere/-Flecken	Si-/O-Teilchen
C-/O-/N-Teilchen	C-/O-/Si-/Cl-Teilchen	Zellulose
Organische Stoffe	PEI – Ultem (Polyetherimid)	Delrin (Acetylharz)
LC – schwarzer Kunststoff	SiC-Teilchen	C-/N-/Na-/Si-/Cl-Teilchen
K-/Al-/Si-/O-Teilchen	C-/Si-/O-Teilchen	Organische Salze
C-/O-/Si-Teilchen	C-/N-/Na-Teilchen	C/Na/Mg/Al/Si/K/Ca/Fe mit KCl-Einschlüssen
Edelstahl	Mikroskopischer Bohrsplan	Kieselsäure
C/Na/Mg/Al/Si/Cl/K/Ca mit Zirkonoxid-Einschlüssen	O-/Mg-/Si-Teilchen	C-/O-/Na-/Al-/Si-/Cl-/K-/Ca-Teilchen
C-/O-/Na-/Mg-/Al-/Si-/S-/Cl-/K-/Ca-Teilchen	Organische Stoffe mit Al, Si und Salzen	
C-/O-/Si-/N-Teilchen	C-/N-/Na-/Cl-Teilchen	

Tabelle 2: Auflistung der verschiedenen Materialzusammensetzungen, die auf den Stirnflächen von MPO-Steckverbindern zu finden sind.

Auswirkungen von Verunreinigungen in Glasfaseranschlüssen

Es gibt mindestens zwei potenzielle Auswirkungen von Verunreinigungen auf Glasfaseranschlüsse in Rechenzentrumsanwendungen: Verlust an optischer Leistung, wenn Licht gestreut oder absorbiert wird (Einfügedämpfung, IL), was das Verhältnis von empfangenem Signal zu Rauschen verschlechtert, und reflektierte Leistung, die bei Singlemode-Fasern mit der Signalquelle interagieren kann (Rückflusdämpfung, RL). Diese können durch die direkte optische Wirkung der Verunreinigungen, durch Luftspalte, die durch starre Verunreinigungen entstehen, und durch Schäden an den Enden, die durch die Verunreinigungen verursacht werden, entstehen.

Da das Risiko des Verbindens verunreinigter Stirnflächen hoch ist, sollte man wissen, wie die optische Leistung voraussichtlich beeinträchtigt werden könnte. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wurde die erwartete IL für eine bestimmte Verteilung von Verunreinigungen auf dem polierten Faserende eines Steckverbinders untersucht.

Ein veröffentlichtes Modell verwendet einen Ansatz mit einem leistungsgewichteten verdeckten Bereich [1]. Als Eingangsdaten wird ein Bild der Steckerstirnfläche mit einer Verunreinigungsverteilung verwendet; die Verunreinigungsverteilung wird als undurchsichtige Abdeckung verwendet, so dass jedes Pixel auf dem Bild des Faserendes entweder überträgt (keine Schmutzpartikel, 100 % Leistung wird übertragen) oder verdeckt (Schmutzpartikel vorhanden, 0 % Leistung wird übertragen) ist. Wenn diese Abdeckung über die durch die Faser verlaufende Leistungsverteilung gelegt wird, kann die übertragene Leistung und damit die IL abgeschätzt werden. Für eine Verbindung sind selbstverständlich zwei Flächen erforderlich, d. h. der Abdeckungseffekt der zwei Verunreinigungsstellen muss kombiniert werden.

Anhand dieses Modells kann ein Teil der IL-Leistung erklärt werden, wie in Abbildung 2 unten aus Referenz 1 hervorgeht, wo eine klare Korrelation zwischen der gemessenen Dämpfung und der durch diesen Prozess geschätzten Dämpfung gezeigt wird. Jedoch ist die am besten geeignete Polynomerwartung keineswegs perfekt und bleibt weit hinter dem zurück, was erforderlich wäre, um Pass/Fail-Kriterien mit geringen False-positive- oder negativen Ergebnissen zu implementieren. Darüber hinaus stimmt die Höhe der Dämpfung nicht mit dem Gauß-gewichteten verdeckten Bereich überein – wenn z. B. 30 % der Leistung absorbiert oder blockiert würden, würde die erwartete Dämpfung 1,5 dB betragen und nicht die 0,6 dB, die im idealen Fall angezeigt werden.

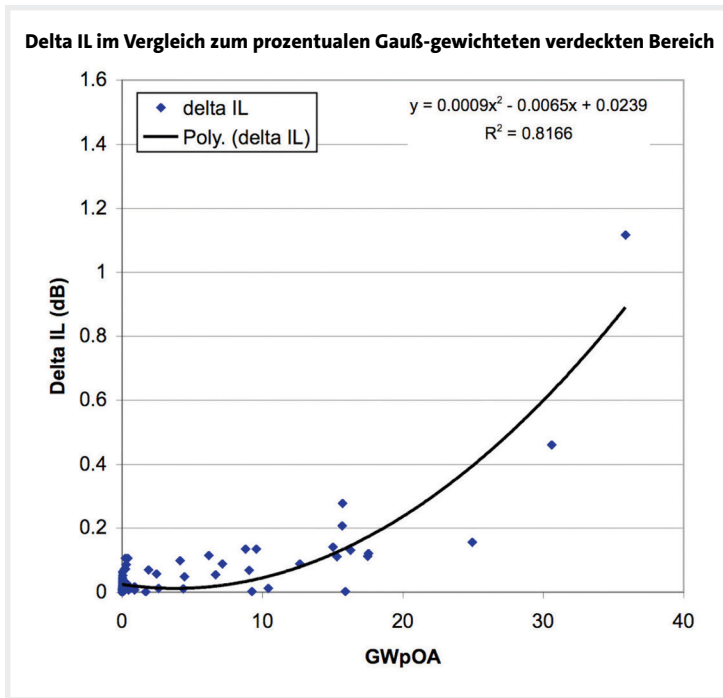


Abbildung 2: Aus Referenz [1]. Überschüssige Einfügedämpfung, aufgrund von Schmutzpartikeln als Funktion des Gauß-gewichteten verdeckten Bereichs (GWpOA). Die Datenpunkte („Delta-IL“) auf einer quadratischen Trendlinie angebracht.

Dieses Modell ist ansprechend einfach und leicht zu implementieren, allerdings gibt es mehrere nicht berücksichtigte Faktoren, die es wahrscheinlich machen, dass die Vorhersagen von den tatsächlichen Ergebnissen abweichen. Eine genaue Berechnung der Dämpfung durch Verunreinigungen im Verbindungsbereich zwischen zwei Steckverbindern erfordert die 3D-Verteilung der durch ihre optischen Eigenschaften charakterisierte Verunreinigung bei der zu untersuchenden Wellenlänge, nachdem die Verbindung hergestellt wurde. Bei der Verteilung der Verunreinigungen, betrachtet durch ein typisches Mikroskop, fehlt ein Großteil dieser Informationen:

- Die Mikroskope verwenden typischerweise blaues Licht zur Beleuchtung, das zwar ein gutes räumlich aufgelöstes Bild liefert, aber nicht die optischen Eigenschaften bei der Verwendung für Wellenlängen im nahen Infrarot-Bereich (Nah-IR) anzeigt.
- Die Optik in vielen Mikroskopen scheint so ausgelegt zu sein, dass sie Bilder mit starkem Kontrast erzeugt; dies geschieht beispielsweise dadurch, dass sie nur Licht aufnimmt, das direkt durch die Stirnfläche gelangt oder nur in sehr kleinen Winkeln gestreut wird, so dass die meisten Schmutzpartikel dunkel erscheinen. Die Mikroskope stellen zwar Schmutzpartikel mit sehr gutem Kontrast dar, aber es liegen selbst bei blauen Lichtwellenlängen keine Informationen über den Real- und Imaginärteil des Brechungsindex vor.
- Das Bild des Mikroskops gibt keine Auskunft über die Form, die Materialzusammensetzung oder die mechanischen Eigenschaften der Schmutzpartikel. Da auf physische Kontaktverbindungen enorme Drücke wirken – im Falle eines LC-Steckverbinders etwa der 1.000-fache Atmosphärendruck – um die erforderliche Hertzsche Kontaktverformung zu bewirken, werden die meisten Verunreinigungen im verbundenen Zustand vollständig verformt. Bei kleineren Schmutzpartikeln, die einen Spalt an der Verbindungsstelle bilden, ist der Druck noch höher. Die optische Leistung der verunreinigten Steckverbindung wird durch diese deformierte Materialverteilung bestimmt; um diese Verteilung zu ermitteln, ist die Kenntnis der Anfangsverteilung im unverbundenen Zustand und ein Modell für die Auswirkung des Drucks auf diese Verteilung erforderlich.
- Für Singlemode-Fasern ist das Modell des verdeckten Bereichs noch ungeeigneter als für Multimode-Fasern, da die Phase bei der Bestimmung der Übertragung eine große Rolle spielt. Als extremes Beispiel würde eine Phasenverschiebung von einer Hälfte des Grundmodus durch π Radiant die Übertragung vollständig aufheben, ohne dass überhaupt eine Materialabsorption erforderlich wäre – in diesem Fall würde das Licht zu 100 % in das Mantelglas eingehen.

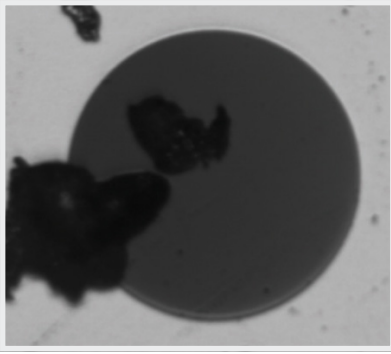


Abbildung 3: Hautschuppen auf einer Faser und der umgebenden Zirkoniumdioxid-Hülse, betrachtet durch ein Mikroskop für Steckverbinder. Es ist zu beachten, dass die lichtdurchlässige Hautschuppe vollkommen dunkel erscheint.

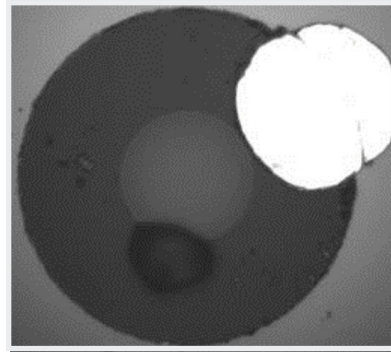


Abbildung 4: Abbildung der Stirnfläche eines Einfaser-Steckverbinders mit einer Stahlscheibe (weiß), die durch die Steckkräfte des Steckverbinders aus der Kugelform zu einer flachen Scheibe gedrückt wurde.

Abbildung 3 unten zeigt das Erscheinungsbild einer Hautschuppe auf einer LC-Stirnfläche, wie sie durch ein Tischmikroskop dargestellt wird. Die Hautschuppe ist vollkommen dunkel, was darauf hindeutet, dass sie stark lichtundurchlässig ist; Hautschuppen lassen blaues Licht jedoch relativ gut durch, obwohl das Licht typischerweise durch die unregelmäßige Form der Schuppenoberfläche abgelenkt wird. Es ist zu beachten, dass das Modell des verdeckten Bereichs voraussagen würde, dass eine Hautschuppe, die die Faser vollständig bedeckt, eine Dämpfung von 100 % oder eine IL von ∞ dB aufweisen würde.

Abbildung 4 veranschaulicht deutlich die enormen Drücke, die bei einer physischen Kontaktverbindung an der optischen Verbindungsstelle wirken. Die weiße Scheibe ist tatsächlich eine zerdrückte Stahlkugel, die bei der Herstellung der Verbindung flachgedrückt wurde. In diesem Fall war die Kugel hart genug, um das Glas der optischen Faser zu beschädigen. Die möglichen Auswirkungen auf ein weiches Objekt wie eine Hautschuppe müssen berücksichtigt werden.

Zur experimentellen Untersuchung von Einfügedämpfungseffekten haben wir eine Technik entwickelt, um Partikel auf der Faser in Einfaser-Steckverbindern zu platzieren. Die Partikel wurden auf eine dünne Glasplatte gestreut, und ein Mikroskop auf der einen Seite der Platte wurde verwendet, um einen Steckverbinder auf der anderen Seite so zu führen, dass er mit einem der Partikel in Kontakt kommt und dieses aufnimmt. Dasselbe Mikroskop wurde zur Abbildung des Partikels auf dem Steckverbinder verwendet, nachdem die Glasscheibe entfernt wurde.

Abbildung 5 unten zeigt das Auftreten von Partikeln aus 3 verschiedenen Materialien auf der Stirnfläche des Steckverbinders nach der Verbindung mit einem sauberen Steckverbinder.

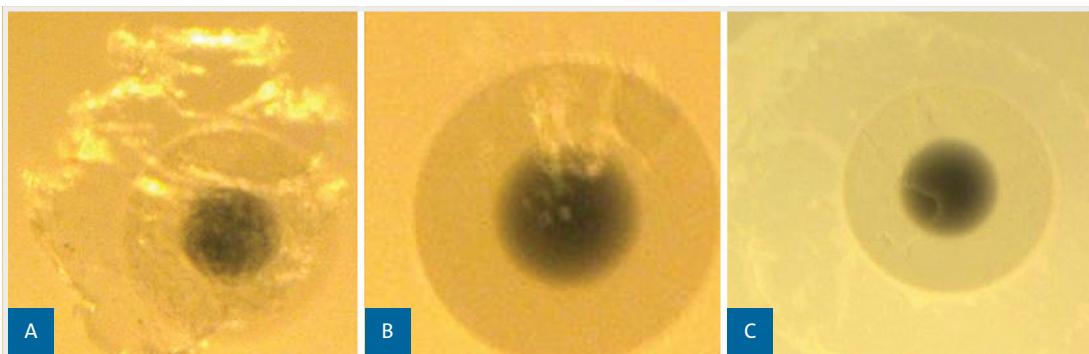


Abbildung 5: Partikel, die absichtlich über Fasern in LC-Steckverbindern platziert wurden, um die Auswirkungen der Verdeckung auf die IL zu untersuchen: (a) Delrin®, (b) Ultem®, (c) Hautschuppe.

Tabelle 3 unten zeigt die gemessene IL für jeden Fall. Da diese Bilder mit einem normalen Labormikroskop mit einer großen numerischen Apertur aufgenommen wurden, ist das Erscheinungsbild relativ unterschiedlich (und es kann ein Farbbild erzeugt werden, da eine Beleuchtung mit weißem Licht verwendet wird). Die Dämpfung deckt ein breites Spektrum ab und scheint nicht gut mit dem in Abbildung 5 dargestellten Abdeckungsgrad korreliert zu sein. Insbesondere eine Hautschuppe, die die gesamte Mitte bedeckt, weist bei der Verbindung nur eine sehr geringe Dämpfung auf – dies steht im Gegensatz zu der 100%igen Dämpfung, die aufgrund des Auftretens in den Mikroskopen zu erwarten wäre (Abbildung 3).

Dies sollte nicht so verstanden werden, dass Schmutzpartikel die IL nicht beeinträchtigen können, aber die genaue Bestimmung des Effekts erfordert weit mehr Daten als jene, die von einem einfachen Untersuchungsbild geliefert werden.

Gemessene Einfügedämpfung für in Abbildung 5 oben dargestellte verdeckte Steckverbinder.

Material	IL
Verbindung 1: Delrin®	0,08 dB
Verbindung 2: Ultem®	0,48 dB
Verbindung 3: Hautschuppe	0,01 dB

Tabellene 3: Gemessene Einfügedämpfung für in Abbildung 5 oben dargestellte verdeckte Steckverbinder.

Abbilden und Messen von Verunreinigungen auf Steckerstirnflächen

Um die Auswirkungen von Verunreinigungen und Reinigung wirklich zu verstehen, mussten wir Verfahren zur Bewertung der Belastung von Ferrulenendflächen durch Verunreinigungen entwickeln. Gegenwärtige industrielle Bildgebungssysteme und Bildanalyseprogramme sind so gestaltet, dass sie nach benutzerdefinierten Kriterien eine Pass/Fail-Beurteilung des Erscheinungsbildes der Stirnflächen liefern. Im Allgemeinen sind die Kriterien in der vorhandenen Norm IEC 61300-3-35 eine bevorzugte Wahl, obwohl diese Kriterien eigentlich eher für Oberflächenschäden als für Verunreinigungen geeignet sind. Tatsächlich fordert das IEC-Dokument, dass alle losen Schmutzpartikel vor der Prüfung entfernt werden müssen – der Begriff „lose Schmutzpartikel“ ist definiert als „Partikel und Rückstände, die durch Reinigung entfernt werden können“; aus unserer Sicht ist dies eher ein Zirkelschluss (wir merken an, dass die IEC-Norm derzeit aktiv überprüft wird, was einige der Erörterungen und Schlussfolgerungen in diesem Abschnitt betreffen könnte). Unter Anwendung dieser Norm berücksichtigen die Softwarepakete die IEC-Prüfbereiche, einen auf den Faserkern zentrierten Kreis mit einem Durchmesser von 250 µm bei Einfaser-Steckverbindern und nur die Faser selbst bei MPO-Steckverbindern. Einige Routinen werden sogar beendet, wenn der Verunreinigungsgrad einen Grenzwert überschreitet, der nicht der IEC entspricht. So könnte eine von einem Klicker (Reinigungsstift) gereinigte Endfläche eine Übereinstimmung mit der IEC-Norm aufweisen, während sie außerhalb eines zentralen, gereinigten Bereichs erhebliche Verunreinigungen aufweist, wie in Abbildung 6 unten dargestellt. Für unsere Arbeit benötigten wir eine Software, die die gesamte Stirnfläche untersucht und sämtliche Schmutzpartikel und andere Verschmutzungen auf der Stirnfläche identifiziert und, was ebenso bedeutend ist, die Wirkung eines Reinigungsvorgangs genau aufzeigt und verdeutlicht, welche Merkmale entfernt oder hinzugefügt wurden. Dies war eine besondere Herausforderung für MPO-Ferrulen.

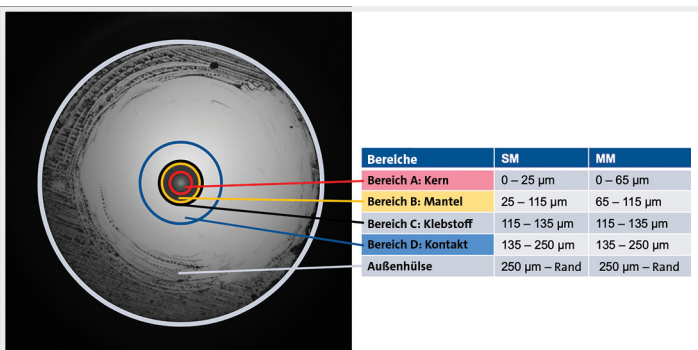


Abbildung 6: IEC-Prüfbereiche für einen Multimode-LC-Steckverbinder (Endfläche nach absichtlicher Verunreinigung mit öligem Material und anschließender Reinigung mit „Klicker“-Reinigungsstäbchen).

Die aktuelle IEC-Norm sieht vage Definitionen für die Qualifizierung der Geräte selbst anhand von Prüfartefakten vor. Wir haben jedoch festgestellt, dass ein zuverlässiger Nachweis von Verschmutzungen von mehreren Faktoren abhängt, von denen keiner in der Norm definiert ist:

- Die effektive Auflösung des optischen Systems – diese wird von der Optik und der Arbeitswellenlänge beeinflusst und umfasst die Pixelgröße und den Dynamikbereich des Bildgebungschips.
- Die Genauigkeit der Fokussierung (die ein Autofokus sein kann), insbesondere die Wiederholbarkeit der Fokussierung. Dies wirkt sich auf die Auflösung aus, die wiederum den Bildkontrast beeinflusst.
- Das Beleuchtungssystem – die Wellenlänge, Intensität, Stabilität und Winkelverteilung.
- Die mechanische Stabilität des Geräts – Vibrationen des Bildes verringern den Kontrast der Schmutzpartikel und vergrößern die sichtbare Fläche, bis zu dem Punkt, an dem ein Teilchen möglicherweise nicht mehr sichtbar ist.

Wir verwendeten handelsübliche Bildgebungssysteme, entwickelten aber unsere eigene Bildanalysesoftware für jedes System und alle Steckverbinderarten, mit dem wir arbeiteten – LC, SC und MPO.

Typische Ergebnisse aus Bildgebung und Bildanalyse sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 unten dargestellt.

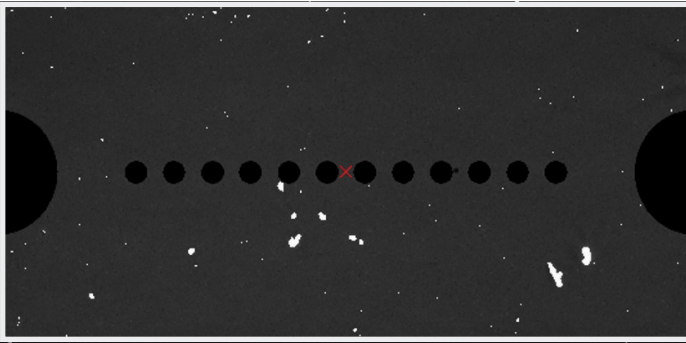


Abbildung 7: MPO-Stirnfläche nach Bildgebung und Bildanalyse; identifizierte Schmutzpartikel werden als weiße Flächen dargestellt.

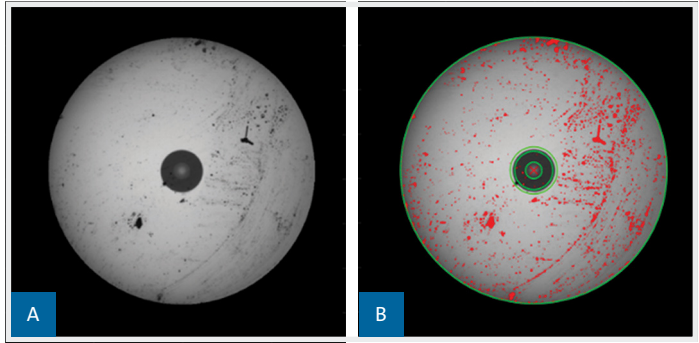


Abbildung 8: Bild der Stirnfläche des LC-Steckverbinders, roh (a) und analysiert (b) – identifizierter Schmutz rot dargestellt.

Verunreinigungsquellen und -mechanismen

Die große Bandbreite an Zusammensetzungen, die bei den in den Tabellen 2 und 3 oben aufgeführten Steckverbindern zu finden ist, ist nicht unerwartet, da die Steckverbinder in einer üblichen industriellen Produktionsumgebung und mit unterschiedlichen Herstellungsbedingungen hergestellt werden. Bei ihrer Herstellung durchlaufen sie zahlreiche Verarbeitungs- und Behandlungsschritte: Die Stirnflächen werden poliert, es werden Staubkappen angebracht und entfernt, und sie werden zur Prüfung und Messung in enganliegende Befestigungsvorrichtungen aus Metall eingesetzt. Darüber hinaus sind die Steckverbinder der Verarbeitung und Montage von Kabelmaterialien und Gehäuseteilen ausgesetzt.

Nicht nur in der Fertigungsumgebung, sondern auch in Installationsumgebungen, in denen Steckverbindungen gelöst und bearbeitet werden müssen, um sie zu prüfen und zu installieren, sind eine Reihe dieser Quellen zu finden.

Polieren:

Die Polierverfahren, ob durch Läppen auf Nass-Polierfolie oder mit Schleifschlämmen durchgeführt, erzeugen flüssige Rückstände, die von der Faser und den Ferrulen abgeriebene Partikel sowie die Schleifmittel enthalten. Wenn diese Rückstände trocknen, bilden sie einen widerstandsfähigen Film, der schwer zu entfernen ist; Anzeichen für diese Art der Verunreinigung sind stark haftende Streifen oder Schlieren auf der Stirnfläche. Polierrückstände, die auf Teilen des Gehäuses oder des Kabelmantels eintrocknen, können später Teilchen erzeugen, die eine weitere Quelle von Verschmutzungen darstellen.

Ablagerung von Staub aus der Luft auf freiliegende Stirnflächen:

Dies tritt zwar auf, geschieht aber nur sehr langsam und führt in der Regel zu lose anhaftenden Schmutzpartikeln, die sich leicht entfernen lassen. Abbildung 9 unten zeigt einige anfänglich saubere Steckerstirnflächen, die vertikal nach oben gerichtet installiert wurden und etwa eine Woche lang in einer typischen Nicht-Reinraumumgebung der Luft ausgesetzt waren. Die Geschwindigkeit der Staubablagerung ist sehr langsam, was auch dadurch bestätigt wird, dass es nicht üblich ist – wenn auch nicht extrem selten – dass sich Partikel während der Inspektion auf den Endflächen ablagern. Die Ablagerungsgeschwindigkeit und die Haftkräfte hängen wahrscheinlich beide vom Zustand der elektrostatischen Ladung der Stirnfläche ab. Wir haben erhebliche Spannungen (in einigen Fällen mit Größenordnungen um 500 V) an den Stirnflächen und sogar noch höher an anderen Oberflächen, wie z. B. in Teilebeuteln, gemessen; der Grad der statischen Aufladung wird vermutlich durch Feuchtigkeit, durch die Handhabung und durch die Reibung während des Anbringens/Entfernens der Staubkappe beeinflusst.

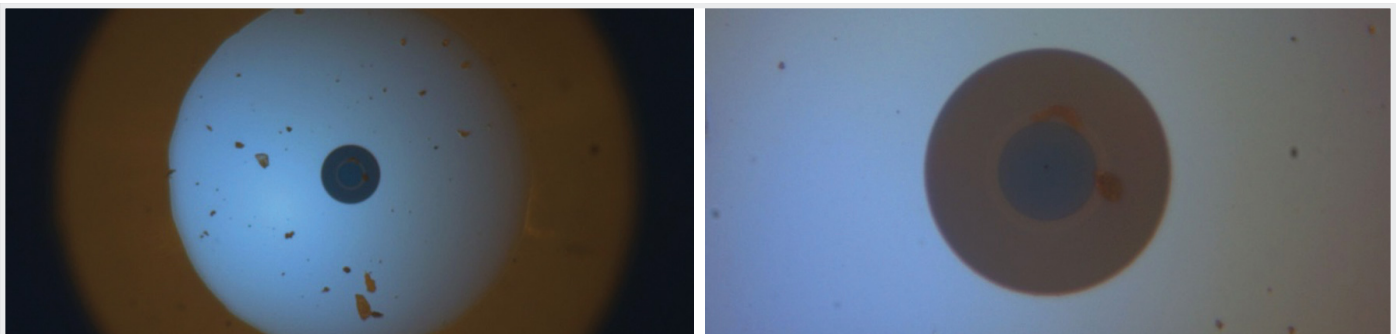


Abbildung 9: Ergebnisse der Exposition des anfänglich sauberen LC-Steckverbinders, mit der Stirnfläche nach oben, an die Umgebungsluft über ca. eine Woche. Links: vollständige Ansicht der Stirnfläche, rechts: erweiterter Faserbereich.

Kreuzkontamination durch Untersuchungsrichtungen:

Mikroskope werden sowohl bei der Herstellung als auch bei der Installation verwendet, um die Stirnflächen zu untersuchen und die Einhaltung der Anforderungen, wie z. B. Abwesenheit von Kratzern, Ausbrüchen und Verunreinigungen, zu beurteilen. Bei diesen Mikroskopen werden die Ferrulen der Steckverbinder durch mechanische Befestigungen fixiert, um eine schnelle und einfache Ausrichtung auf die optische Achse des Instruments zu ermöglichen. Diese Befestigungen verfügen über das Potenzial, Verschmutzungen aufzunehmen und zwischen Steckverbindern zu übertragen sowie durch mechanischen Abrieb weitere Verschmutzungen zu erzeugen. Solche Übertragungen können durch mechanischen Kontakt oder durch die Einwirkung elektrostatischer Kräfte erfolgen. Die Stahlkugel, die in Abbildung 4 oben zerquetscht wurde, war das Ergebnis einer solchen Übertragung, wobei die Stahlkugel von künstlichem „Schmutz“ stammte, der auf einen anderen, in derselben Befestigungsvorrichtung untersuchten Steckverbinder aufgebracht wurde (es ist dabei anzumerken, dass die Vorrichtung gereinigt und zwischen den Labors transportiert wurde, nachdem der verunreinigte Steckverbinder untersucht wurde, bevor jedoch das Bild in Abbildung 4 aufgenommen wurde). Bei den Bildern in Abbildung 10 und Abbildung 11 unten handelt es sich um Standbilder aus einem Video, das mit einer ausgebohrten, handelsüblichen Mikroskopbefestigung aufgenommen wurde und die das Ergebnis nach dem Springen von Teilchen unter dem Einfluss elektrostatischer Felder zeigen.

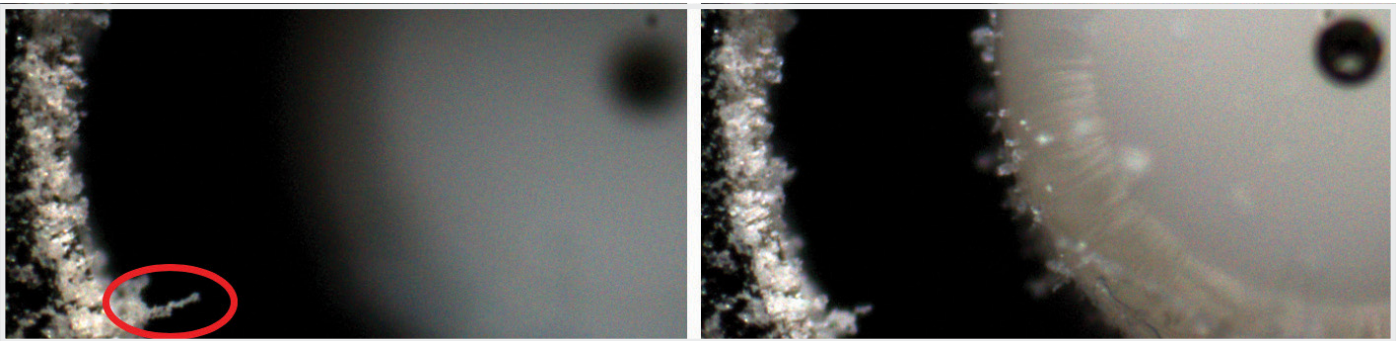


Abbildung 10: Wenn sich eine LC-Ferrule einer ausgebohrten Metallbefestigungsvorrichtung annähert, wird ein Staubpartikel auf der Befestigungsvorrichtung (links) durch elektrostatische Kräfte zur Befestigungsvorrichtung gezogen (rechts). Sowohl die Ferrule als auch die Befestigungsvorrichtung wurden absichtlich und stark verunreinigt, um die Wirkung deutlicher sichtbar zu machen.

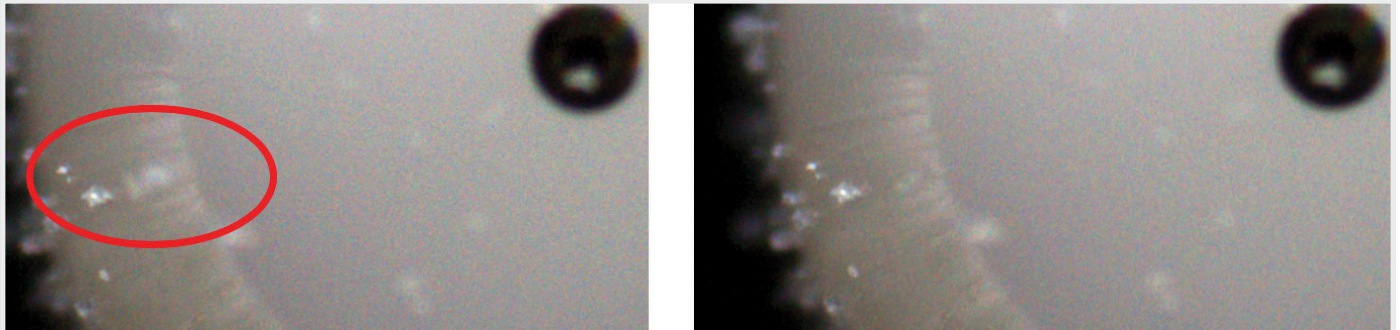


Abbildung 11: Kurz nachdem die Bilder in Abbildung 10 aufgenommen wurden, sprang ein Staubpartikel auf der Ferrule (links) von ihr ab, vermutlich wieder unter dem Einfluss elektrostatischer Kräfte.

Handhabung:

Bei einigen Fertigungs- oder Installationseinstellungen muss das Bedienpersonal nicht verpflichtend Handschuhe oder Fingerlinge tragen, so dass die Gefahr besteht, dass die auf den Stirnflächen der Steckverbinder Fingerabdrücke entstehen oder sie mit anderen Bereichen der Haut in Kontakt kommen. Einige Verunreinigungen, die durch Hautkontakt entstehen, sind unerwartet schwer zu entfernen, so dass sie mit einem robusten Schleiflappen abgerieben werden müssen. Unterschiedliche Körperregionen verursachen Verschmutzungen mit unterschiedlichem Widerstand gegen eine Reinigung – Nasenflüssigkeit ist sehr ölig und lässt sich leicht entfernen, während Verschmutzungen von der Rückseite des Arms sich nur schwer entfernen lassen und ein intensives Abwischen erfordern. Fingerabdrücke scheinen irgendwo dazwischen zu liegen - wobei zu beachten ist, dass selbst die Verwendung von Handschuhen eine Kreuzkontamination nicht ausschließt.

Verunreinigung durch Staubschutzkappen:

Auf Staubschutzkappen können sich Partikelrückstände aus dem Spritzgußprozess befinden. Sie können es aus der Luft, von Oberflächen, mit denen sie in Berührung kommen, oder aus dem Kontakt mit anderen Kappen aufnehmen, und weitere Ablagerungen können durch abrasiven Kontakt mit Fremdoberflächen (einschließlich der Ferrulendflächen) oder anderen Kappen entstehen. Solche Verunreinigungen können durch bekannte Vektoren auf die Stirnfläche übertragen werden: mechanischer Kontakt, mechanischer Schock (z. B. Stick-Slip-Bewegung beim Aufschieben der Staubkappe auf den Steckverbinder), elektrostatische Kräfte oder möglicherweise sogar Luftströme.

Wir haben festgestellt, dass Ablagerungen an den Stirnflächen von Einfaser-Steckverbindern, insbesondere von solchen mit abgeschrägten Zirkoniumdioxid-Hülsen, dazu neigen, sich an der Schnittstelle zwischen der zentralen polierten Fläche und dem raueren, abgeschrägten äußeren Bereich festzusetzen. Dies deutet auf eine Kombination aus mechanischem Abrieb an dieser Verbindungsstelle hin, der gegen Staubkappenmaterialien oder Befestigungsvorrichtungen wirkt, wenn beim Einsetzen ein Kontakt mit der Ferrule auftritt, und einer Reinigungswirkung, die in der Mitte des polierten Bereichs wirksamer ist.

Staubkappen, die zum Schutz der Stirnflächen während der Herstellung der Steckverbinder verwendet werden, werden häufig aus PVC geformt. PVC ist verträglich und flexibel, enthält jedoch ölige Verbindungen, in der Regel Phthalate, um diese Flexibilität zu ermöglichen. Diese Verbindungen gelangen manchmal als ölige Tröpfchen auf die Steckverbinder, die beim Zusammenstecken des Steckverbinders Tröpfchenringe um den Kontaktbereich bilden können.

Angesichts der großen Vielfalt an Materialarten und möglichen Kontaminierungswegen, einschließlich von Natur aus schmutziger Prozesse wie Polieren, wird selbst die Montage der Steckverbinder in einer streng kontrollierten sauberen Umgebung wahrscheinlich kein akzeptables Endprodukt liefern, bei dem kein abschließender Reinigungsschritt erforderlich ist.

Selbst nachdem der Steckverbinder vollständig montiert und mit einer Staubkappe versehen ist, besteht die Möglichkeit, dass er Verunreinigungen aufnimmt, bevor er beim Kunden endgültig verbunden wird.

Auch wenn wir dies nicht nachgewiesen haben, kann die Lagerung unter Bedingungen mit schwankendem Luftdruck, variierender Temperatur, Luftfeuchtigkeit und/oder in Gegenwart von Schwingungen eine Verunreinigung der Endflächen durch Partikel oder ausgasende Filmschichten verursachen.

Die Aussetzung gegenüber der Umgebungsluft und den Prüfvorrichtungen in Installationsumgebungen birgt, genau wie beim Montageprozess, ein Verschmutzungsrisiko, und kein Prüfverfahren wird in der Lage sein, eine abschließende Blindphase zu verhindern, wenn der Steckverbinder von der Mikroskopbefestigung über die Luft in einen Anschlussadapter übertragen wird.

Durch solche Studien konnten wir einige der Wege aufzeigen, über die Partikel aus den zahlreichen Verschmutzungsquellen im Gehäuse des Steckverbinders oder aus der Umgebung auf die Steckerstirnfläche gelangen. Einer dieser Wege ist in Abbildung 12 unten dargestellt.

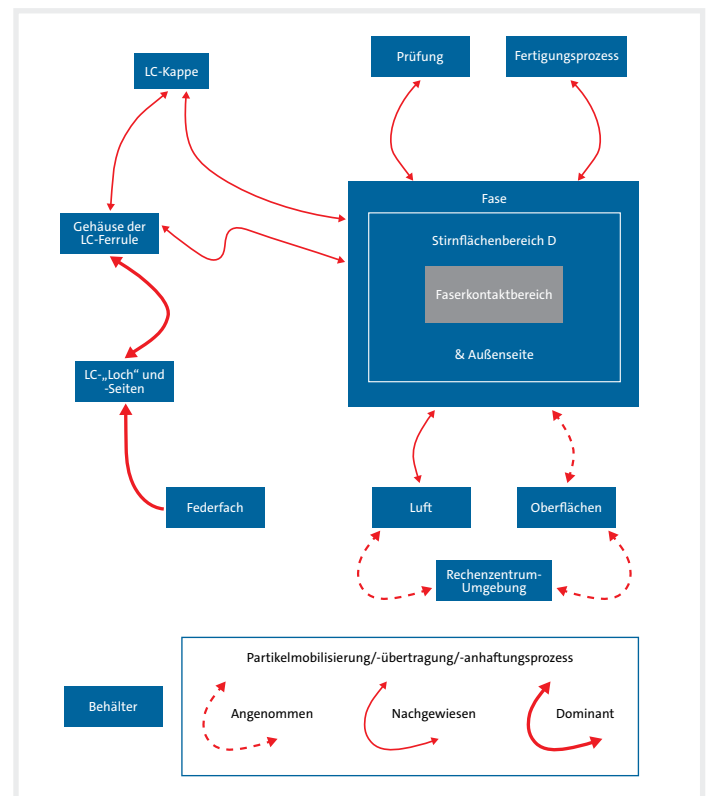


Abbildung 12: Übersicht der Verschmutzungsquellen und Kontaminationswege eines LC-Steckverbinders.

Partikelmigration

Die Partikelmigration von außen auf die Steckverbinderoberfläche wird als Kontaminationsereignis bezeichnet und wurde im vorherigen Abschnitt erläutert. Partikelmigration kann jedoch auch innerhalb des Oberflächenbereichs des Steckverbinders auftreten. Es werden keine zusätzlichen Verunreinigungen hinzugefügt, aber Partikel vom Rand der Ferrule, wo sie die optische Übertragung nicht stören, können in die Kern- oder Mantelzonen der Faser gelangen, wo sie Probleme mit IL oder RL verursachen können.

Abbildung 13 zeigt eine Steckerstirnfläche, die absichtlich verschmutzt und mit einem Klicker-Reinigungsstäbchen gereinigt wurde. Dieser Steckverbinder besteht die Prüfung nach IEC-Norm, da sich die Verunreinigung außerhalb des geprüften Bereichs befindet (Bereich D in Abbildung 6). Wenn die Verunreinigung nur lose gebunden ist, kann sie auch ohne direkten physischen Kontakt von der Kante der Endfläche durch Handhabung oder die Anbringung von Staubkappen in den Bereich der Faser gelangen. Wir haben Fälle von Verunreinigungen beobachtet, die durch elektrostatische Kräfte oder Luftbewegungen während wiederholtem Anbringen/Entfernen von Kappen übertragen werden.

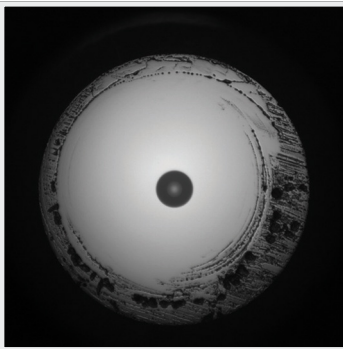


Abbildung 13: Stirnfläche nach Verunreinigung mit öligem Material und Reinigung mit „Klicker“-Reinigungsstäbchen.

Während des eigentlichen Verbindungsvorgangs kann die Stirnfläche auch Schmutz vom anderen Steckverbinder aufnehmen. Abbildung 14 unten zeigt die Übertragung von Verunreinigungen beim Zusammenstecken eines sauberen MPO-Steckverbinders mit einem verschmutzten, vermutlich durch mechanischen Kontakt.

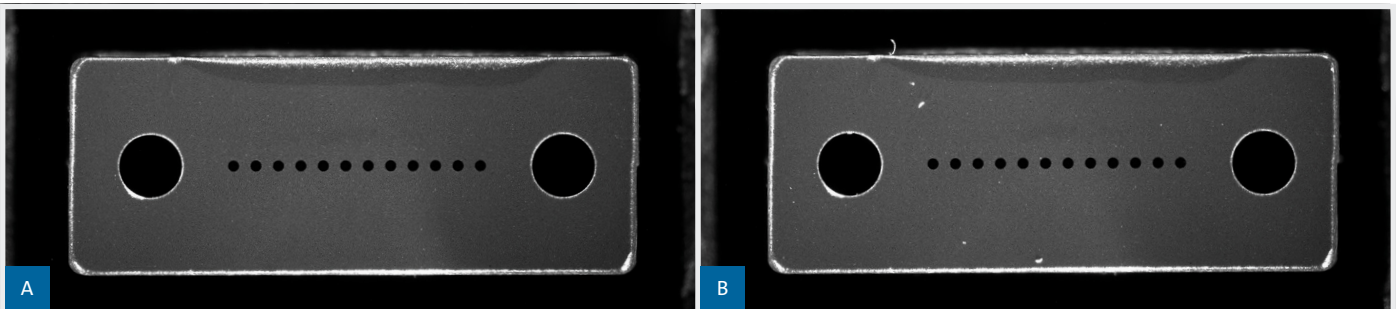


Abbildung 14: MPO-Steckverbinder nach Reinigung (a) und nach dem Zusammenstecken mit einem verschmutzten Steckverbinder (b), wobei eine sichtbare Übertragung der Verschmutzung von einem Steckverbinder auf den anderen zu erkennen ist.

Es ist daher äußerst wichtig, die gesamte Stirnfläche zu reinigen, um zu verhindern, dass Schmutz nach der Endkontrolle an eine kritische Stelle gelangt. Dies trägt dazu bei, eine gute IL-Leistung der Verbindungen im Rechenzentrum auch ohne eine Reinigung vor Ort zu erzielen (Abbildung 1).

Auswirkungen des Staubkappendesigns

Wir erkannten die Notwendigkeit, optimierte Staubkappen zu entwickeln, um dem Risiko der Verunreinigung und der Migration von Schmutzpartikeln entgegenzuwirken. Abbildung 15 zeigt einen Ausschnitt einer Standardkappe zur Veranschaulichung dieses Aspekts.

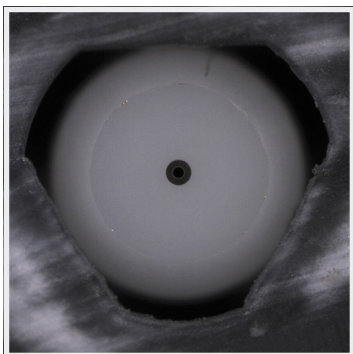


Abbildung 15: Ausschnitt einer Standardkappe, der das hohe Risiko einer Verunreinigung verdeutlicht.

Im Laufe dieser Untersuchung haben wir eine Reihe von standardmäßigen und optimierten Kappendesigns getestet und die Auswirkungen jedes dieser Designs auf die Verunreinigung der Stirnfläche nach dem Anbringen/Entfernen der Kappe gemessen, wobei in einigen Fällen die Steckverbinder vor dem Entfernen der Staubkappe und der Inspektion versandt wurden. Wie in Abbildung 16 unten dargestellt, stellten wir fest, dass nur die Standard-Staubkappen zu einer Verunreinigung des Steckverbindendes führten.

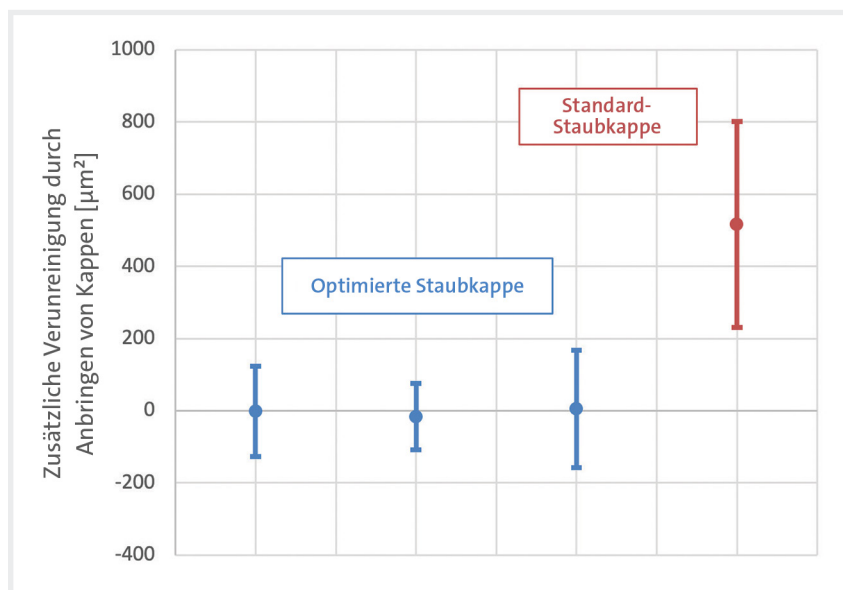


Abbildung 16: Finaler Zustand abzüglich des anfänglichen Verschmutzungsbereichs nach dem Anbringen und Entfernen der Staubkappe bei sauberen LC-Steckverbindern (mit Fehlerbalken mit einem 95%igen Vertrauensniveau) für vier unterschiedliche Kappendesigns, drei optimierte Designs und einem standardmäßigen Design.

Wir haben auch verschiedene Materialien für Staubkappen getestet, darunter antielektrostatische Zusammensetzungen, von denen wir eine bessere Leistung erwarteten. Letztendlich konnten wir jedoch keinen Vorteil feststellen. Es gab einen Hinweis darauf, dass die durch das Anbringen und anschließende Entfernen der Kappe hervorgerufene Variation der Sauberkeit bei antistatischen Materialien besser sein könnte als bei anderen Zusammensetzungen, allerdings war die Statistik unzureichend, und dieser Effekt müsste weiter untersucht werden. Vor der Verwendung dieser antistatischen Materialien ist eine sorgfältige Überlegung erforderlich, da sie Zusatzstoffe enthalten, die ihrerseits eine Verunreinigung verursachen könnten.

Schlussfolgerung

In diesem Whitepaper haben wir die Aktivitäten zur Untersuchung von Schmutzpartikeln und anderen Verunreinigungen an optischen Steckverbindern im Rechenzentrum dargestellt. Wir haben aufgezeigt, dass die Bewertung der Auswirkungen auf den optischen Leistungsverlust anhand eines kontrastreichen Verunreinigungsbildes unpraktisch und mit großer Unsicherheit behaftet ist, da die meisten Informationen, die zur Modellierung der optischen Dämpfung erforderlich sind, nicht vorhanden sind. Unsere Untersuchungen über die Art der Verunreinigungen ergaben ein breites Spektrum an chemischen Zusammensetzungen und Materialklassen. Wir behandelten die zahlreichen Verunreinigungsquellen und die zahlreichen Pfade, über die sie zur optischen Stirnfläche eines Steckverbinders gelangen.

Wir gingen auf die Schwierigkeiten einer zuverlässigen Messung des Verunreinigungsgrades durch Bildanalyse ein, insbesondere auf instrumentenunabhängige Weise, im Zusammenhang mit der Prüfung der Stirnflächen und den Qualitätsanforderungen in Übereinstimmung mit der IEC-Norm. Wir wiesen auch auf das Risiko einer Kreuzkontamination bei der Verwendung von berührenden Befestigungsvorrichtungen während der Prüfung hin, da die Verunreinigung eines verschmutzten LWL-Steckverbinders sich ausbreiten und eine zunächst saubere Menge von später geprüften Steckverbindern verschmutzen kann.

Wir untersuchten die Auswirkungen von Staubkappen, insbesondere die Vorteile optimierter Staubkappen und das Risiko, dass standardmäßige Kappen zusätzliche Verunreinigungen verursachen können.

Schließlich wiesen wir auf die Möglichkeit hin, auf die Reinigung der Steckerstirnflächen am Installationsort zu verzichten und gleichzeitig weiterhin eine gute optische Leistung durch eine verbesserte werkseitige Reinigung, bei der die gesamte Steckerstirnfläche berücksichtigt wird, sicherzustellen.

Referenzen

¹T. Berdinskikh, A. Ho, J. Garcia, C. Gleason, S. Huang, J. Kilmer, S. Lytle, T. Mitcheltree, B. J. Roche, H. Tkalec, D. H. Wilson and F. (Y.) Zhang, "Development of Cleanliness Specifications for Single-Mode Connectors with 1.25 and 2.5 mm ferrules," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper JThB85.

The logo consists of a solid blue square on the left. To its right, the word "CORNING" is written in a white, bold, sans-serif font.

Corning Optical Communications GmbH & Co. KG • Leipziger Strasse 121 • 10117 Berlin, GERMANY
+00 800 2676 4641 • FAX: +49 30 5303 2335 • www.corning.com/opcomm/emea/de

Corning Optical Communications behält sich das Recht vor, ohne vorherige Ankündigung, Eigenschaften und Spezifikationen von Corning Optical Communications' Produkten zu verbessern, zu erweitern und zu modifizieren. Eine komplette Liste aller Marken von Corning finden Sie unter www.corning.com/opcomm/trademarks. Alle anderen Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber. Corning Optical Communications ist ISO 9001-zertifiziert. © 2020 Corning Optical Communications. Alle Rechte vorbehalten. LAN-2730-A4-DE / September 2020