

**DIN EN 4533-002**

ICS 49.060

Ersatz für  
DIN EN 4533-002:2008-02

**Luft- und Raumfahrt –  
Faseroptische Systemtechnik –  
Handbuch –  
Teil 002: Prüfung und Messung;  
Deutsche und Englische Fassung EN 4533-002:2017**

Aerospace series –  
Fibre optic systems –  
Handbook –  
Part 002: Test and measurement;  
German and English version EN 4533-002:2017

Série aéronautique –  
Systèmes des fibres optiques –  
Manuel d'utilisation –  
Partie 002: Essais et mesures;  
Version allemande et anglaise EN 4533-002:2017

Gesamtumfang 104 Seiten

DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL)

## **Nationales Vorwort**

Der Verband der Europäischen Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie Normung (ASD-STAN) ist vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) für zuständig erklärt worden, Europäische Normen (EN) für das Gebiet der Luft- und Raumfahrt auszuarbeiten. Durch die Vereinbarung vom 3. Oktober 1986 wurde ASD Assoziierte Organisation (ASB) des CEN.

Das vorliegende Dokument (EN 4533-002:2017) wurde von ASD-STAN, Fachbereich Elektrik, unter Mitwirkung deutscher Experten des DIN-Normenausschusses Luft- und Raumfahrt (NL) erarbeitet.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 131-04-10 AA „LWL und LWL-Komponenten“ im DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL).

Entsprechend Beschluss 57/9 des Technischen Ausschusses des Beirats des DIN-Normenausschusses Luft- und Raumfahrt (NL) sind die europäischen Luft- und Raumfahrt-Normungsergebnisse zweisprachig, in Deutsch und Englisch, in das Deutsche Normenwerk zu überführen. Aus diesem Grund wurde der Deutschen Fassung dieses Dokuments die Englische Fassung hinzugefügt.

## **Änderungen**

Gegenüber DIN EN 4533-002:2008-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) die Norm wurde grundlegend überarbeitet, die Struktur geändert;
- b) Abschnitt 3 stellt eine Übersicht über die verschiedenen Faserarten zur Verfügung;
- c) Abschnitt 4 behandelt die Schlüsselp Parameter bei Prüfung und Messung;
- d) Abschnitt 5 beinhaltet Prüfung und Messung in Einmodensystemen, Abschnitt 6 in Mehrmodensystemen;
- e) Abschnitt 7 beschäftigt sich mit dem Prüfen der Netzwerkpfade mittels Reflektometern in den beiden Arten OTDR und OFDR („Optical Time Domain Reflectometer“ und „Optical Frequency Domain Reflectometer“) und dem Footprinting;
- f) Abschnitt 8 beinhaltet Faktoren, die neben den Einkopplungsbedingungen wichtig für präzise und wiederholbare Messungen in Lichtwellenleitersystemen sind;
- g) Abschnitt 9 beschreibt allgemeine Abläufe zur Messung der Einfügungsdämpfung und des Rückstreuverlustes;
- h) Abschnitt 10 enthält Empfehlungen für aufzuzeichnende Parameter bei vorgenommenen Messungen,
- i) Abschnitt 11 bietet einen Überblick über Techniken der Systementwicklung.

## **Frühere Ausgaben**

DIN EN 4533-002: 2008-02

Deutsche Fassung

Luft- und Raumfahrt —  
Faseroptische Systemtechnik —  
Handbuch —  
Teil 002: Prüfung und Messung

Aerospace series —  
Fibre optic systems —  
Handbook —  
Part 002: Test and measurement

Série aérospatiale —  
Systèmes des fibres optiques —  
Manuel d'utilisation —  
Partie 002: Essais et mesures

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 23. Juli 2017 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION  
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

## Inhalt

|                                                                                     | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Europäisches Vorwort .....                                                          | 3     |
| Einleitung .....                                                                    | 4     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                           | 5     |
| 2 Normative Verweisungen .....                                                      | 5     |
| 3 Faserarten .....                                                                  | 5     |
| 4 Prüfung und Messung: Schlüsselparameter .....                                     | 7     |
| 5 Prüfung und Messung in Einmodensystemen .....                                     | 12    |
| 6 Prüfung und Messung in Mehrmodensystemen .....                                    | 13    |
| 7 Prüfen der Netzwerkpfade: Reflektometrie und Footprinting .....                   | 23    |
| 8 Allgemeine Erwägungen zur Prüfung und Messung in Lichtwellenleistersystemen ..... | 30    |
| 9 Praktische Prüfverfahren .....                                                    | 34    |
| 10 Aufzeichnungsparameter .....                                                     | 43    |
| 11 Techniken für die Systementwicklung .....                                        | 43    |
| 12 Anhang: Matrizen .....                                                           | 46    |

## Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 4533-002:2017) wurde vom Verband der Europäischen Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie – Normung (ASD-STAN) erstellt.

Nachdem Umfragen und Abstimmungen entsprechend den Regeln dieses Verbandes durchgeführt wurden, hat diese Norm die Zustimmung der nationalen Verbände und offiziellen Behörden der Mitgliedsländer der ASD erhalten, bevor sie CEN vorgelegt wurde.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juni 2018, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juni 2018 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN 4533-002:2006.

Entsprechend der CEN-CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

## Einleitung

### a) Das Handbuch

Der Zweck dieses Handbuchs ist die Bereitstellung allgemeiner Leitlinien sowohl für Fachleute als auch für Laien auf dem Gebiet der Konstruktion, Installation und Unterstützung von LWL-Systemen in Luftfahrzeugen. Gegebenenfalls wird im Verlauf des Textes auf detailliertere Informationsquellen verwiesen.

Das Handbuch ist in 4 Teile gegliedert, die sich auf grundlegende Aspekte des Lebenszyklus eines optischen Kabelbaums beziehen, und zwar:

Teil 001: Anschlussverfahren und Werkzeuge

Teil 002: Prüfung und Messung

Teil 003: Verfahren zur Fertigung und Installation von Leitungsbündeln

Teil 004: Reparatur, Instandhaltung, Reinigung und Inspektion

### b) Hintergrund

In der Luft- und Raumfahrtindustrie ist die Tatsache allgemein akzeptiert, dass Photonentechnologie wesentliche Vorteile gegenüber konventioneller elektrischer Gerätetechnik aufweist. Dazu gehören eine große Signal-Bandbreitenkapazität, elektrische Sicherheit und die elektromagnetische Störfestigkeit (EMI) von passiven LWL-Bauteilen. Auch lassen sich wesentliche Gewichtseinsparungen im Vergleich zu elektrischen Kabelbäumen realisieren, welche unter Umständen einer starken Abschirmung bedürfen. Bislang ist die EMI-Problematik die wesentliche Antriebskraft für LWL-Kommunikationssysteme in Luftfahrzeugen aufgrund der zunehmenden Verwendung von nicht metallischen Luftfahrzeugstrukturen. Künftige Avionikanforderungen erfordern Bandbreitenspezifikationen von zweistelligen Werten im Mbit/s-Bereich bis zum Multi-Gbit/s-Bereich in einigen Fällen, d. h. jenseits der Grenzen elektrischer Anschlusstechnologie. Die Eigenschaften der Photonentechnologie können potenziell vorteilhaft in vielen Avionikanwendungen eingesetzt werden, sowohl z. B. bei Video-/Messfühler-Mehrfachbetrieb, Signalgebung für die Flugsteuerung, elektronischer Kampfführung sowie Unterhaltungssystemen als auch für Messfühler für das Überwachen von Luftfahrzeugstrukturen.

Die Grundstruktur optischer Verbindungen oder der „optische Kabelbaum“ ist der Schlüssel für die erfolgreiche Einführung optischer Technologie bei kommerziellen und militärischen Luftfahrzeugen. Im Vergleich zu ausgereiften Telekommunikationsanwendungen müssen Lichtwellenleitersysteme für Luftfahrzeuge in einer feindlichen Umgebung (z. B. bei extremen Temperaturen, Feuchtigkeit, Vibrationen und Verunreinigung) betrieben werden, und sich zusätzlichen physikalischen Einschränkungen durch die Luftfahrzeugzelle (z. B. Kabelbaumhalterungen, erforderliche enge Biegeradien und Schottverbindungen) anpassen. Bis vor kurzem waren die optische Kabelbaumtechnologie und damit verbundene Verfahrensweisen für die Anwendung ohne große Sicherheitsreserve unzureichend entwickelt. Darüber hinaus wurden viele Aspekte des Lebenszyklus in den Internationalen Normen nicht angemessen behandelt. Der Mangel an anerkannten Normen führte zu luftfahrtspezifischer Gerätetechnik und Unterstützung. Diese Faktoren zusammen führten zu einem wesentlichen Kostennachteil (Kosten für Anschaffung und Unterhalt), wodurch optische Kabelbäume gegenüber entsprechender Elektrotechnik häufig weniger konkurrenzfähig waren. Mit der Einführung von mehr standardisierten (nach Telekommunikationsart) Lichtwellenfaserbauarten für Kabel in der Luft- und Raumfahrt und der Verfügbarkeit von mehr handelsüblichen Produkten (COTS) in besonders robuster Bauweise ändert sich diese Situation. Diese verbesserten Entwicklungen waren aufgrund der signifikanten Zusammenarbeit in der Forschung zwischen Bauteil- und Ausrüstungs-Herstellern sowie den Flugzeugherstellern als Endnutzer möglich.

## 1 Anwendungsbereich

Dieses Handbuch betrachtet die Anforderungen um eine genaue Messung von Lichtwellenleiterverbindungen ab dem Beginn der Nutzungsdauer und während des Lebenszyklus des Systems ab dessen Installation und während des Betriebs zu ermöglichen. Teil 2 erläutert Probleme in Bezug auf die Messung optischer Verbindungen und bietet Techniken zur Behandlung dieser Probleme. Dieses Dokument erläutert die Messung von Schlüsselparametern in Bezug auf die passive Schicht (d. h. Lichttransmission durch einen optischen Kabelbaum). Es behandelt keine Systemprüfungen, beispielsweise Bitfehlerraten.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes normativ zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 2591-601, *Luft- und Raumfahrt — Elektrische und optische Verbindungselemente; Prüfverfahren — Teil 601: Optische Elemente; Einfügungsdämpfung*

EN 4533-001, *Luft- und Raumfahrt — Faseroptische Systemtechnik — Handbuch — Teil 001: Anschlussverfahren und Werkzeuge*

EN 4533-003, *Luft- und Raumfahrt — Faseroptische Systemtechnik — Handbuch — Teil 003: Verfahren zur Fertigung und Installation von Leitungsbündeln*

EN 4533-004, *Luft- und Raumfahrt — Faseroptische Systemtechnik — Handbuch — Teil 004: Reparatur, Instandhaltung, Reinigung und Inspektion*

## 3 Faserarten

Dieser Abschnitt liefert eine kurze Übersicht über einige der verschiedenen Faserarten, welche in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet werden. Historisch betrachtet, wurden zuerst Mehrmodenfasern mit großem Faserkern und Stufenindexprofil an Bord von Luftfahrzeugen eingesetzt. Zum Zeitpunkt von deren Konstruktion erlaubten diese Fasern eine ausreichende Datenbandbreite, und der große Faserkern ermöglichte eine einfache Kopplung (des Lichts) durch die Fasern sowie eine einfache Ausrichtung der Fasern in Steckverbindern (auch als Verbindungselemente bezeichnet). Daher sind in einigen aktuellen Systemen sowie Altsystemen (en: Legacy-Systeme) Kabelbäume von Lichtwellenleitern zu finden, die auf Fasern mit großem Faserkern basieren. Gebräuchliche Fasertypen mit größerem Kern umfassen die Maße 200/280 µm, 200/300 µm und 100/140 µm (wobei die Schreibweise auf die Größe des Faserkerns/des Fasermantels hinweist).

Verbesserungen in der Bandbreite (hauptsächlich herbeigeführt durch eine reduzierte zeitliche Streuung) bei Mehrmodenfasern sind durch den Einsatz von Fasern mit Gradientenindexprofil möglich. In einfachen Worten ausgedrückt, erlaubt das Brechzahlprofil mit Gradientenindex einen Ausgleich der verschiedenen optischen Pfade durch eine Mehrmodenfaser, um eine Pulsverteilung (Streuung) im Verlauf der Zeit zu reduzieren. Dies führt zu höheren Bandbreiten im Vergleich zu Brechzahlprofilen mit Stufenindex. Bei frühen Fasern mit Gradientenindex, welche in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wurden, kamen Fasern der Größe 100/140 µm zum Einsatz.

In der jüngeren Vergangenheit wurden auch Fasergrößen, die in der Telekommunikation und Datenkommunikation gebräuchlich sind, für die Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Mehrmodenfasern der Größen 62,5/125 µm und 50/125 µm und mit einem Gradientenindexprofil werden mittlerweile für die Datenübertragung sowohl auf zivilen als auch militärischen Luftfahrzeugen eingesetzt. Dies umfasst sowohl Starrflügler als auch Hubschrauber. Fasern sind mit verschiedenen Bandbreiten verfügbar. Mehrmodenfasern werden mit der OM-Kennzeichnung (en: optical multimode) bezeichnet. OM1 bezeichnet eine Fasergröße

von 62,5/125  $\mu\text{m}$ , OM2, OM3 und OM4 bezeichnen Fasergrößen von 50/125  $\mu\text{m}$  mit steigender Bandbreite. Der Einsatz dieser Fasergrößen (insbesondere der Fasern mit einem Außendurchmesser von 125  $\mu\text{m}$ ) ermöglicht den Einsatz von Teilen aus der Massenproduktion (z. B. Keramik-Führungsferrulen) der Telekommunikationsindustrie.

Wie in diesem Dokument erläutert werden wird, wird die Prüfung und Messung von Mehrmodensystemen verkompliziert durch die Lichtverteilung innerhalb der Faser und die relativ kurzen Längen der installierten Fasern, welche üblicherweise mehrere Steckverbinderunterbrechungen im Kabelbaumverlauf haben (z. B. Steckverbinder an produktionsbedingten Trennungen der Flugzeugzelle). Die in die Faser eingeleitete Lichtverteilung ist bei der Ausführung von Messungen von kritischer Wichtigkeit, damit einheitliche Messungen in Mehrmodensystemen garantiert werden.

Obgleich es sich bei den meisten Fasern, welche derzeit in der Luft- und Raumfahrt im Einsatz sind, um Mehrmodenfasern handelt, gibt es ein steigendes Interesse am Einsatz von Einmodenfasern. Einmodenfasern (gelegentlich als Monomodefasern bezeichnet) sind optische Fasern, die dafür konstruiert sind, nur einen einzigen Verteilungsmodus je Polarisationsrichtung für eine bestimmte Wellenlänge zu unterstützen. Sie verfügen für gewöhnlich über einen relativ kleinen Faserkern (mit einem Durchmesser von nur einigen wenigen  $\mu\text{m}$ ) und einen geringen Unterschied im Brechungsindex zwischen Kern und Mantel. Der Modenradius beträgt üblicherweise einige wenige Mikrometer.

Einmodenfasern werden oft als OS1 bezeichnet (en: optical singlemode). Es gibt noch weitere Arten von Einmodenfasern, wie beispielsweise OS2 und A2. Die kleineren Faserkerne sorgen für eine Reihe von Vorteilen [beispielsweise höhere Bandbreite (minimale Streuung), Wellenlängen-Multiplexing, neuartige Sensoranwendungen]. Jedoch machen die kleineren Faserkerne die Kopplung und Ausrichtung an der Quelle und an den Steckverbindern schwieriger (insbesondere aufgrund der rauen Einsatzumgebung in der Luft- und Raumfahrt mit möglichen Extremen bei Temperatur und Vibrationen).

Die Prüfung und Messung von Einmodenfasern ist nicht so kompliziert wie bei Mehrmodensystemen. Das liegt hauptsächlich daran, dass das Licht durch einen einzelnen vorherrschenden Modus oder entlang eines bestimmten Pfades die Faser entlang übertragen wird.

Es sollte beachtet werden, dass die oben angesprochenen optischen Fasern in einem robusten Kabel verpackt werden, welches für die Installation und den Einsatz in einem Kabelbaum geeignet ist. Für weitere Informationen zur Kabelkonstruktion, siehe Teil 001 dieser Normenreihe EN 4533. Es wird ferner angemerkt, dass moderne Lichtwellenleiterkonstruktionen biegungsfähige Lichtwellenleiter verwenden und eine Reihe solcher Konstruktionen für die Luft- und Raumfahrtindustrie existieren. Diese weisen geringere Verluste beim Biegen auf einen kleinen Radius auf (A2-Faser).

Bei der Prüfung und Messung in Mehrmodensystemen mit Glasfasern werden im Allgemeinen LEDs oder Mehrmoden-VSCSELs als Lichtquelle für die Prüfung verwendet. Bei der Prüfung und Messung von Einmodensystemen mit Glasfasern werden im Allgemeinen Halbleiterlaser oder neuere VCSEL-Lichtquellen verwendet. Die übliche Transmissionswellenlänge für Mehrmodenglasfasern beträgt 850 nm (gelegentlich 1 300 nm). Einmodenglasfasersysteme verwenden üblicherweise eine Transmissionswellenlänge von 1 550 nm oder 1 300 nm.

Im Sinne der Vollständigkeit sei an dieser Stelle erwähnt, dass Kunststoff-Lichtwellenleiter (en: plastic optical fibre, POF) für manche Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt in Betracht gezogen werden. Jedoch ist zum jetzigen Zeitpunkt die TRL dieser Technologie deutlich niedriger als bei Glasfasern (zumindest in der Einsatzumgebung der Luft- und Raumfahrt). POF sind üblicherweise deutlich größer als Glasfasern, z. B. mit Größenordnungen von 980/1 000  $\mu\text{m}$ . Dieser große Faserkern macht die Kopplung und Ausrichtung von Steckverbindern deutlich einfacher. Jedoch ist die Verlustrate bei POF deutlich größer (höhere Dämpfung) als bei Glasfasern, und diese Art von Verbindung funktioniert am besten mit Wellenlängen im sichtbaren Bereich (üblicherweise im Bereich 520 nm bis 650 nm).

## 4 Prüfung und Messung: Schlüsselparameter

### 4.1 Einfügungsdämpfung (I.L., en: insertion loss)

Die Bestimmung der Einfügungsdämpfung ist die wahrscheinlich am häufigsten durchgeführte Messung an einer LWL-Übertragungskomponente oder Verbindung/Kabelbaum im Verlauf des Lebenszyklus.

Wenn ein optisches Gerät, ein Bauteil oder ein Faserabschnitt in eine optische Verbindung eingefügt wird, geht ein Teil der optischen Leistung an jenem Gerät (z. B. einem Splitter) oder an den optischen Schnittstellen verloren (z. B. an einem Steckverbinder oder Spleiß). Die Faserabschnitte selbst führen auch zu Verlusten, obgleich diese sehr gering sind (die Dämpfung ist bei den üblichen Transmissionswellenlängen bei Glasfaser sehr gering).

Einiges an optischer Leistung geht durch nicht optimale Schnittstellen, beispielsweise reflektierende Oberflächen oder Streuung, verloren. Ein weiterer erschwerender Faktor sind Ausrichtungsfehler in Steckverbindern. Ein solcher Ausrichtungsfehler kann lateral, axial oder winkelbezogen sein. Auch Verunreinigung beeinflusst die Einfügungsdämpfung (schmutzige Steckverbinder weisen einen höheren Verlust auf als saubere Steckverbinder).

Die Einfügungsdämpfung (oder einfach Dämpfung) wird üblicherweise in Dezibel angegeben, berechnet aus dem Zehnfachen des Logarithmus zur Basis 10 des Verhältnisses zwischen Eingangs- (*in*) und Ausgangsleistung (*out*). Bei Steckverbindern von Fasern liegt dieser Wert oftmals im Bereich von 0,2 dB. Schweißspleiße von hoher Qualität können Werte im Bereich 0,02 dB erreichen.

$$\text{I.L.} = 10 \log_{10} (P_{\text{in}}/P_{\text{out}})$$

Beispielsweise wäre bei einer Transmission von 90 % (0,9) die Einfügungsdämpfung 0,46 dB.

#### 4.1.1 Wichtigkeit einer geringen Einfügungsdämpfung

Eine geringe Einfügungsdämpfung ist für eine effiziente Lichttransmission eindeutig gewünscht. Dies bedeutet, dass nur eine geringe Menge an Licht an der zu prüfenden Komponente oder Verbindung verloren wird. Das Leistungsbudget des Systems gibt in der Regel vor, wie viel Leistung von der Quelle durch die Verbindung zum Empfänger übertragen werden muss. Die Differenz aus der Quellenleistung und dem Mindestmaß an erforderlicher Empfängerleistung führt zu einer Zahl für das Leistungsbudget. Die gesamte Einfügungsdämpfung der Bauteile darf diese Zahl nicht überschreiten. Dabei ist es sinnvoll, eine Sicherheitsmarge vorzusehen, welche Leistungsminderungen des Systems und die Auswirkungen der Alterung auffängt. Eine Alterungsmarge von 3 dB ist bei Verbindungen an Bord von Luftfahrzeugen üblich.

#### 4.1.2 Messverfahren

Es gibt für die Messung der Einfügungsdämpfung verschiedene Verfahren in Abhängigkeit der Art des Bauteils und ob diese mit einem Steckverbinder verbunden ist. Diese werden in der Norm EN 2591-601 detailliert beschrieben. In Bezug auf die Ausrüstung kann die Einfügungsdämpfung mit einer Glasfaserlichtquelle und einem Leistungsmesseraufbau oder anspruchsvolleren Einrichtungen, wie OTDR oder OFBR (später in 6.1 und 6.2 besprochen), gemessen werden.

Hierbei ist vor allem bei der Messung von Mehrmodensystemen hervorzuheben, dass die gemessene Einfügungsdämpfung eines Bauteils, eines Faserabschnitts oder einer kompletten Verbindung von der Lichtverteilung im Bauteil (und der Einkopplungs-Lichtstreuung ab der Quelle) abhängt. Dies bedeutet, dass bei Einsatz zweier verschiedener Lichtquellen (z. B. von verschiedenen Herstellern) zur Prüfung der Einfügungsdämpfung es möglich ist, dass unterschiedliche Werte für die Einfügungsdämpfung herauskommen. Dies macht die Auslegung von Systemen lediglich mit Prüfungsdaten zu den Bauteilen schwierig, vor allem, wenn das eingesetzte Messverfahren nicht angegeben wird.

Abschnitt 5 dieses Dokuments beschreibt, wie die Einkopplungsbedingungen praktisch kontrolliert werden können, um eine einheitliche Prüfung und Messung in Mehrmodensystemen zu ermöglichen.

9.2 beschreibt einige Aspekte der praktischen Messung von Einfügungsdämpfungen.

## 4.2 Rückstreuverlust oder Reflexionsdämpfung

Der Rückstreuverlust R.L. (en: return loss) (oder Reflexionsdämpfung) eines optischen Geräts oder einer optischen Verbindung gibt an, wie viel Licht zur Lichtquelle im Vergleich zur Menge an Licht, die in das System gesendet wird, zurückreflektiert wird.

R.L. wird definiert durch:

$$\text{R.L.} = 10 \log_{10} (P_{\text{in}} / P_{\text{refl}})$$

Üblicherweise wird der Rückstreuverlust in der Einheit Dezibel angegeben. Wenn beispielsweise der Rückstreuverlust 30 dB beträgt, hat das zurückgestrahlte Licht nur die Leistung von 1/1 000 der Leistung des einfallenden Lichtes. Es ist anzumerken, dass nur direkt zurückgestrahltes Licht gemessen wird und kein Licht, welches in eine andere Richtung reflektiert wird, z. B. bei Faserenden mit gespaltetem Winkel. RL ist eine positive Zahl und ein hoher Wert für RL bedeutet, dass nur eine geringe Menge an Leistung von der Verbindung reflektiert wird. Die Leistungswerte werden für gewöhnlich in Watt oder mW gemessen (es sei dabei angemerkt, dass alle Leistungen in derselben Einheit gemessen werden sollten). Bei geringeren Mengen an reflektiertem Licht wird der Wert für den Rückstreuverlust somit eine größere Zahl (z. B. entspricht eine Leistungsreflexion von 1/5 000 einem Rückstreuverlust von 37 dB). In weiterer Entwicklung dieser Idee würde ein perfektes Gerät oder Bauteil mit unendlichem Rückstreuverlust überhaupt kein Licht zur Quelle zurückreflektieren. In der Realität haben echte Einrichtungen einen endlichen Rückstreuverlust.

Bei Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist die zurückreflektierte Leistung der Faser selbst in Bezug auf die reflektierte Leistung der optischen Steckverbinder aufgrund der kurzen eingesetzten Längen sehr gering. Dazu sei angemerkt, dass zusammengesteckte Steckverbinder, wie UPC und APC (en: Ultra Physical Contact, Angled Physical Contact) ebenfalls extrem geringe Rückstreuverluste im Bereich ~ 55 dB zu 65 dB aufweisen können (Werte für Einmodenfasern).

### 4.2.1 Wichtigkeit von hohen Rückstreuverlusten

Manche Systeme (insbesondere Einmoden- und Einzelfrequenzlaser) sind empfindlich gegenüber zurückreflektiertem Licht. Wenn zu viel Licht zurückgestrahlt wird, kann dies den Laserbetrieb destabilisieren und übermäßiges Laserrauschen und/oder Emissionen auf mehreren optischen Frequenzen hervorrufen. Bei der Hochgeschwindigkeitskommunikation mittels Lichtwellenleitern kann zurückreflektiertes Licht letztendlich die Bitfehlerrate erhöhen.

### 4.2.2 Messverfahren

Bezüglich der Einfügungsdämpfung gibt es mehrere verschiedene Verfahren zur Messung des Rückstreuverlustes. Diese Verfahren werden in EN 2591-605 (Rückstreuverlust) detailliert beschrieben. Bei einem üblichen Verfahren wird eine Kopplungseinrichtung (z. B. ein 50:50-Splitter) zur Einleitung von Licht in ein System und Durchleitung des reflektierten Lichtes zu einem Leistungsmesser verwendet. Diese Europäische Norm wird derzeit geprüft und für die Aufnahme der neuesten Verfahren zur Messung des Rückstreuverlustes mit Rückstreuverlustmessern, OTDR und OFDR (en: Optical Time Domain Reflectometer bzw. en: Optical Frequency Domain Reflectometer) aktualisiert.

### 4.2.3 Rückstreuverlust und Reflexionsgrad

Es sei an diesem Punkt auf die Terminologie hingewiesen, da in verschiedenen Texten auch unterschiedliche Begriffe zu diesem Thema auftauchen können. Der Begriff Rückstreuverlust bezieht sich in der Regel auf die Menge an Licht, die von einer optischen Baugruppe reflektiert wird. Diese Baugruppe kann aus unterschied-

lichen Elementen aufgebaut sein (z. B. Steckverbinder, Fasern, Kopplungen, Spleiße usw.). Ein weiterer Begriff ist der Reflexionsgrad. Der Reflexionsgrad eines Steckverbinders oder jeder anderen Art von Reflexionsereignis innerhalb einer Faser (z. B. ein Knick, eine Beschädigung oder eine Unterbrechung) wird im Allgemeinen für ein **einzelnes eigenständiges Ereignis** definiert. Wenn wir die reflektierte Leistung als  $P_{\text{ref}}$  bezeichnen, wird der Reflexionsgrad definiert durch:

$$\text{Reflexionsgrad} = 10 \log_{10} (P_{\text{ref}}/P_{\text{in}})$$

Der Reflexionsgrad ist eine negative Zahl (die reflektierte Leistung ist geringer als die eingehende Leistung) und je niedriger der Reflexionsgrad, desto besser der Steckverbinder. Im Falle eines einzelnen Reflexionsereignisses innerhalb einer Baugruppe, stellen sowohl der RL (der gesamten Baugruppe) als auch der Reflexionsgrad (des Ereignisses) denselben Parameter mit entgegengesetzten Vorzeichen dar.

**WICHTIGE ANMERKUNG** Der Reflexionsgrad und der Rückstreuverlust (RL) stellen denselben Parameter mit entgegengesetzten Vorzeichen dar, wobei der Reflexionsgrad eine negative und der Rückstreuverlust (RL) eine positive Zahl ist. Entsprechend muss ein guter Steckverbinder einen niedrigen Reflexionsgrad (negativer Wert) oder einen entsprechend hohen Wert für den Rückstreuverlust (positiver Wert) aufweisen.

9.6 beschreibt einige praktische Aspekte der Messung von Rückstreuverlusten.

### 4.3 Messung der optischen Leistung

Es kann sein, dass die optische Leistung an verschiedenen Punkten einer Faserverbindung gemessen werden muss. Leistungswerte sind für die Einschätzung der Leistung einer Lichtquelle oder eines Datentransmitters wichtig. Die Leistung am Ende einer Verbindung (vor einem Detektor) bestimmt die empfangene Leistung und diese bestimmt wiederum die Leistungsfähigkeit des Systems. Leistungsmessungen tragen zu den Hauptberechnungen der Einfügungsdämpfung und des Rückstreuverlustes bei.

Die Leistung wird für gewöhnlich in Watt gemessen, obgleich die Leistungsniveaus in Fasersystemen oftmals im mW-Bereich liegen. Leistungsangaben in dBm sind ebenfalls gebräuchlich. Diese werden wie folgt definiert:

$$\text{Leistung (dBm)} = 10 \log_{10} [\text{Leistung (Watt)} / 10^{-3}(\text{Watt})].$$

Daher würde eine Leistung von 1 mW einem Wert von 0 dBm entsprechen. Leistungen unterhalb von 1 mW wären negativ (z. B. 0,5 mW = -3 dBm). Eine Leistung von 2 mW würde +3 dBm entsprechen.

#### 4.3.1 Messverfahren

Die optische Leistung in Lichtwellenleitersystemen wird routinemäßig mittels Leistungsmessen bestimmt (siehe Bild 1). Dabei handelt es sich um tragbare Instrumente, die für gewöhnlich über eine Lichtwellenleiterschnittstelle verfügen (um die Verbindung verschiedener Arten von Steckverbindern am Messgerät zu ermöglichen). Die meisten Leistungsmesser verfügen über eine Option, die optische Leistung entweder in Watt oder dBm anzeigen zu lassen. Manche Instrumente erlauben auch die Speicherung eines Wertes als Bezugsleistung. Nach Aufnahme der Referenz wird die folgende Leistungsmessung als Verlust in dB dargestellt (im Vergleich zum Referenzwert der Leistung). Dies kann für die Messung der Einfügungsdämpfung von Bauteilen sinnvoll sein.



**Bild 1 — Tischgeräte und tragbare Messgeräte für die optische Leistung**

Leistungsmesser dürfen in Verbindung mit Kopplern eingesetzt werden, um den Rückstreuverlust zu messen. Es sind Messgeräte für den Rückstreuverlust verfügbar, welche den Koppler und die Komponenten des Strommessers (und manchmal einer optischen Quelle) integrieren.

#### 4.3.2 Anforderungen an Photodetektoren

Leistungsmesser verfügen über einen aktiven Detektionsbereich. Dieser sollte groß genug sein, um all das Licht sammeln zu können, welches im Rahmen der Prüfung aus der Faser hervorgeht (verknüpft mit der NA der Faser). Daher sollte der Abstand zum aktiven Detektorelement nicht zu klein sein, da ansonsten nicht die gesamte Leistung gesammelt werden kann (siehe Bild 2). Dies ist in der Regel nur bei sehr großen NA-Fasern oder möglicherweise bei POF-Fasern mit sehr großem Faserkern ein Problem. Dieses Problem kann gelöst werden, wenn der Leistungsmesser über eine Photometerkugel verfügt. In manchen Fällen kann es wichtig sein, nur das Licht innerhalb einer bestimmten Verteilung oder Winkelverteilung zu sammeln. Ein Beispiel könnte ein Datenempfänger sein, der eine kleinere Fläche hat oder mit einer Faser gekoppelt ist (mit einem kurzen Faserabschnitt zwischen Detektor und aktivem Empfängererelement). In solchen Fällen kann eine Messleitung am Empfängerende bei der Beschränkung der detektierten Leistung nützlich sein. Die Messung der Leistung mit einem großflächigen Detektor könnte die nutzbare Systemleistung am Empfänger überbewerten.

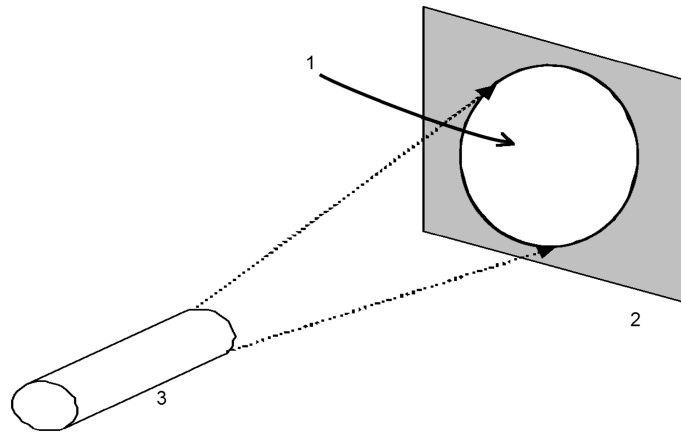
Ein weiterer wichtiger Aspekt der Leistungsmessung ist die Genauigkeit des Messwertes. Leistungsmesser sollten regelmäßig kalibriert werden, um sicherzustellen, dass ein korrekter Messwert angezeigt wird (rückführbar auf nationale Standards). Die meisten Instrumente verfügen auch über die Möglichkeit, eine Wellenlänge für die Messung auszuwählen (dabei wird es sich in den meisten Fällen um eine der hauptsächlich genutzten Transmissionswellenlängen für Glasfasern handeln [z. B. 850 nm, 1 300 nm, 1 550 nm]), obgleich manche Leistungsmesser (mit unterschiedlichen Detektormaterialien) auch andere Wellenlängen messen können (bei POF-Systemen können beispielsweise Wellenlängen von 650 nm genutzt werden).

Wenn die Messwerte des Leistungsmessers zur Folgerung von Einfügungsdämpfung oder Rückstreuverlust verwendet werden sollen, dann ist ein lineares Ansprechverhalten des Leistungsmessers von großer Wichtigkeit (die absolute Genauigkeit der Leistungsmessung ist dann nicht mehr kritisch, weil die Berechnung auf einem Verhältnis mehrerer Leistungswerte beruht).

Es ist ebenfalls anzumerken, dass die beispielsweise von einer LED oder Laserquelle emittierte Leistung unter Umständen nicht vollständig in eine Faser eingekoppelt wird. Die Faser verfügt über einen Akzeptanzwinkel (definiert durch die NA). In manchen Fällen kann es wichtig sein, die „Faserkopplungs“-Leistung zu kennen, d. h. wie viel Licht durch die Faser geleitet wird. Diese Messung kann daher einen Faserabschnitt verwenden, der mit der Lichtquelle verbunden ist, mit der Leistung, die dann am Faserende gemessen wird.

Leistungsmesser detektieren das Licht mit einem aktiven Photodetektor, der üblicherweise auf Halbleitermaterial basiert. Gebräuchliche Arten verwenden Silicium, Germanium und Indiumgalliumarsenid. Diese Materialien verfügen über unterschiedliche Empfindlichkeiten bei verschiedenen Wellenlängen. Im spezifischen Falle eines Photodetektors misst die Ansprechempfindlichkeit die elektrische Leistung je optischen Eingang. Die Ansprechempfindlichkeit eines Photodetektors wird üblicherweise entweder in Ampere oder

Volt je Watt der einfallenden Strahlungsleistung angegeben. Bei den meisten Multimodensystemen der Luft- und Raumfahrt werden bei 850 nm PIN-Photodioden aus Silicium eingesetzt. Diese weisen eine gute räumliche und winkelbezogene Gleichmäßigkeit auf. Der Detektor kann auch eine Filterwirkung auf die Leistungsverteilung haben, wenn sein Ansprechverhalten in Abhängigkeit von seiner Fläche oder dem Einfallswinkel des Lichtes schwankt. Dies kann bei längeren Wellenlängen schlechter sein, aber Auswirkungen werden in den Datenblättern der Hersteller näher beschrieben.



#### Legende

- 1 Fläche des aus der Faser austretenden Lichtstrahls
- 2 Detektorfläche
- 3 Ende der Faser

**Bild 2 — Um zu verhindern, dass der Detektor im Leistungsmesser die Leistungsverteilung filtert, muss er größer sein als der aus der Messleitungsfaser austretende Lichtstrahl.**

Es sollte sichergestellt werden, dass der Leistungsmesser in der Lage ist, die Leistung mit der Wellenlänge des untersuchten Systems zu ermitteln. Das maximale Leistungsniveau des Systems sollte während der Prüfung ohne Sättigung zu ermitteln sein. Ebenso sollte der Leistungsmesser über einen angemessenen dynamischen Bereich verfügen, um korrekte Messungen sowohl bei hohen als auch niedrigen Leistungsniveaus zu ermöglichen. Bei sehr niedrigen Leistungsniveaus kann die Berücksichtigung von Rauschpegeln wichtig werden.

Es sollte nicht vergessen werden, dass Leistungsmesser in der Regel die durchschnittliche Leistung messen, die ermittelt wird (z. B. bei Detektion einer datenmodulierten Lichtquelle), obgleich für den Großteil der Standardprüfungen (z. B. auf Einfügungsdämpfung, Rückreflexion) eine Dauerstrich- (cw, en: continuous wave) Quelle oder Lichteinkopplung verwendet wird.

Die Brechzahlen der als Detektoren verwendeten Werkstoffe sind allgemein hoch, was bedeutet, dass ein Teil des auf den Detektor treffenden Lichtes reflektiert wird. Dieses Licht kann durch die Umgebung zurück auf den Detektor reflektiert werden, wodurch die Leistungsmesswerte anomal hoch werden. Schwärzen der Detektorumgebung minimiert deren Reflektivität und verbessert die Genauigkeit der Leistungsmesswerte. Faseradapter, welche den Fasersteckverbinder vor dem Detektor halten, sind aus diesem Grunde meistens schwarz.

#### 4.4 Lichtverteilung

Obgleich es sich hierbei nicht um eine routinemäßige Messung an montierten optischen Kabelbäumen handelt, kann es notwendig sein, die Lichtverteilung, z. B. einer Quelle oder Faser, zu messen. Lichtverteilungen sind insbesondere bei Prüfungen und Messungen in Mehrmodensystemen, wo die Lichtverteilung Messungen wie die der Einfügungsdämpfung beeinflussen kann, von kritischer Wichtigkeit. Diese Auswirkungen werden detailliert in Abschnitt 6 besprochen. Das Messen der Nahfeld- bzw. Fernfeld-Leistungsverteilungen

einiger Quellen, wie z. B. LED, kann schwierig sein, da die Verpackung einen Teil des emittierten Lichtes dämpfen kann. Die Verteilungen sind erst messbar, wenn das Licht durch einen kurzen Lichtwellenleiterabschnitt geleitet wurde.

Detektoranordnungen (z. B. CCD) dürfen zusammen mit einem bildgebenden System zur Detektion von räumlichen Lichtprofilen, die während der Prüfung des Systems entstehen, verwendet werden. Solche Systeme dürfen auch Software einsetzen, um die Lichtverteilung im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Alternativ kann bei Abtastung des abgebildeten Systems mit einem einzelnen Detektor (z. B. einer Aperturblende, einem Schlitz oder einer Faser, die mit einem Leistungsmesser verbunden ist) die Messung von Teilen der optischen Verteilung möglich sein. Systeme zur automatischen Messung des Nahfeldprofils der Fasern und Zuweisung der Verteilungen in „bestanden“- und „nicht bestanden“-Vorlagen sind ebenfalls verfügbar.

#### 4.5 Zeitliche Messungen

Bei Messungen, welche eine zeitbasierte Detektion des Lichtsystems erfordern, beispielsweise Messungen der Datenraten, Bandbreite, Modulationseffekte, Bitfehlerraten (en: Bit Error Rate, BER) usw., handelt es sich bei dem Lichtdetektorsystem in der Regel um einen schnellen optischen Detektor (mit einer Bandbreite, die ausreicht, um die höchsten Datenraten zu erkennen). Dieser wird üblicherweise in Kombination mit spezialisierten Messeinrichtungen (beispielsweise Oszilloskopen, BER-Prüfgeräten, Signal-Analysegeräten) zur Ableitung der geeigneten Messparameter verwendet. Genaue Details liegen außerhalb des Anwendungsbereichs dieser Europäischen Norm. Im Allgemeinen verfügt der schnelle Detektor jedoch über eine Vorderseite mit einer Lichtwellenleiterschnittstelle, um eine Anbindung des geprüften Systems zu ermöglichen.

### 5 Prüfung und Messung in Einmodensystemen

Bei Einmodenfasersystemen hängen die Messungen für gewöhnlich nicht von der Einkopplungsbedingung in die Faser ab, weil das Licht in einem dominanten einzelnen optischen Modus die Faser entlang übertragen wird. Das transversale Intensitätsprofil am Faserausgang nimmt im Allgemeinen eine feste Form an, welche, unter der Voraussetzung, dass keine „Mantelmoden“ wesentliche Leistungswerte zum Faserende übertragen, von den Einkopplungsbedingungen und den räumlichen Eigenschaften des eingeführten Lichtes unabhängig ist. Die Einkopplungsbedingungen haben lediglich einen Einfluss auf die Effizienz, mit welcher das Licht in den geführten Modus eingekoppelt werden kann.

Einmodenfasern zeichnen sich durch eine kleine Faserkerngröße aus (üblicherweise  $\sim 9 \mu\text{m}$ ). Diese führen die Übertragung einmodig innerhalb eines bestimmten Wellenlängenbereichs aus. Diese Arten von Fasern verfügen über eine „Grenzwellenlänge“. Wird diese überschritten, unterstützt die Faser mehrere Moden.

Obgleich Praxisanwendungen von Einmodenfasern noch eine Neuheit in den Systemen der Luft- und Raumfahrt sind, verwenden diese Einmodenfasern im Allgemeinen die „üblichen“ Wellenlängen der Telekommunikationsbranche, beispielsweise 1 300 nm, 1 550 nm. Die Quellen sind in der Regel Laser. VCSEL mit längeren Wellenlängen sind noch im Anfangsstadium ihrer Anwendung bei Einmodensystemen. Zum Zwecke der Prüfung und Messung sind kleine und kompakte Dauerstrich (cw, en: continuous wave)-Laser für diese Prüfungswellenlängen verfügbar. Es wird hierbei angemerkt, dass viele Mehrmodensysteme der Luft- und Raumfahrt eine kürzere Wellenlänge von 850 nm verwenden, weil zuverlässige und robuste Lichtquellen (LEDs und VCSEL) für diese Wellenlänge verfügbar sind und die Dämpfung bei dieser Wellenlänge noch immer gering ist (Luft- und Raumfahrzeuge sind relativ kurz und erfordern keine extrem niedrige Dämpfung, wie dies möglicherweise bei sehr langen Verbindungen nötig wäre).

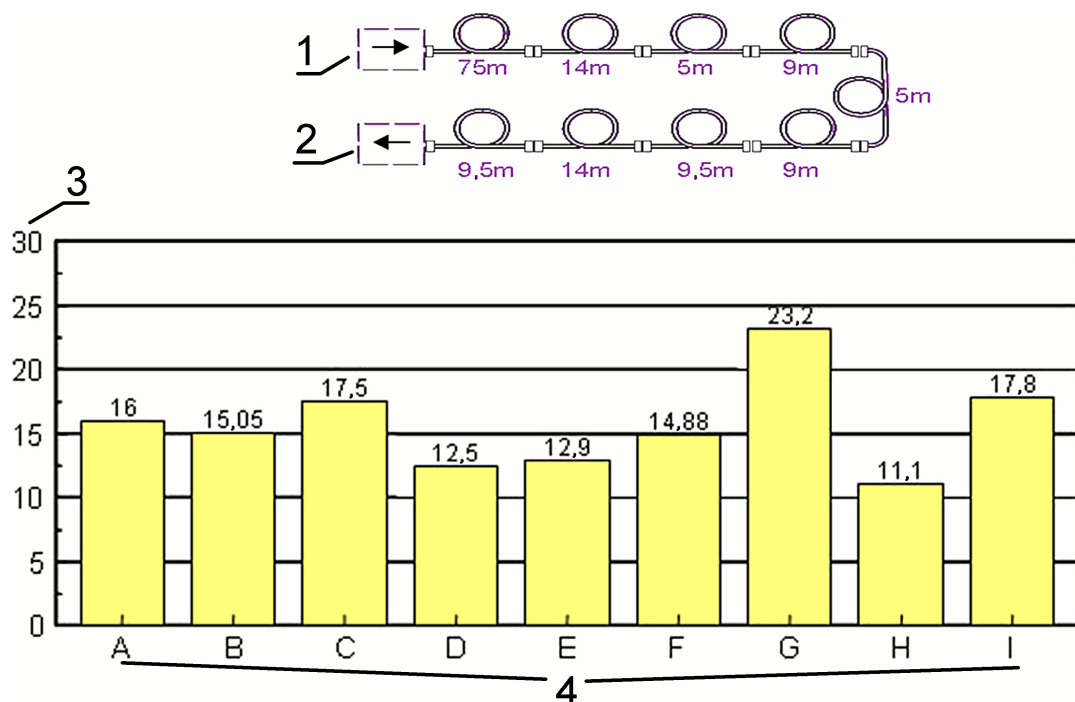
Zur effizienten Einkopplung von Licht in eine Einmodenfaser ist es erforderlich, dass der Lichtstrahl von hoher Qualität ist (idealerweise sollte der  $M^2$ -Strahlqualitätsfaktor nahe einem Wert von 1 sein) und dass das Licht am Eingangsende der Faser fokussiert (auf den entsprechenden Fasermodus) sowie axial und winkelbezogen mit dem Faserkern und der Faserachse ausgerichtet ist. Jegliche Positionierungsfehler müssen deutlich unterhalb des Strahlradius liegen und die winkelbezogene Fehlausrichtung muss im Vergleich zur Strahldivergenz des Modus klein sein.

## 6 Prüfung und Messung in Mehrmodensystemen

Die Prüfung und Messung in Mehrmodensystemen ist komplizierter als bei Einzelmoden. Dies liegt daran, dass die Messungen von der Lichtverteilung innerhalb der Bauteile und Fasern abhängen.

### 6.1 Einkopplungsbedingungen

Die Einkopplungsbedingungen eines Mehrmodenfasersystems sind von besonderer Wichtigkeit. Einfach ausgedrückt, können verschiedene Lichtquellen unterschiedlichen Einkopplungsbedingungen unterliegen und dies kann zu unterschiedlichen Messwerten, beispielsweise für die Einfügungsdämpfung, führen. Das ist eindeutig nicht erwünscht. Ferner kann die Einfügungsdämpfung eines bestimmten Bauteils auch von dessen Einbaulage innerhalb der Verbindung abhängen, wenn die Einkopplungsbedingungen nicht kontrolliert werden.



#### Legende

- 1 Lichtekoppelsystem
- 2 Messgerät für die optische Leistung
- 3 Einfügungsdämpfung (dB)
- 4 Prüfgeräte

**Bild 3 — Schwankungen der Einfügungsdämpfungsmessungen am selben Kabelbaum (Ringversuch) mittels verschiedener Prüfquellen. Dieses Bild verdeutlicht das Erfordernis, die Lichtekopplungsbedingungen von Mehrmodenverbindungen in der Luft- und Raumfahrt sorgfältig zu kontrollieren.**

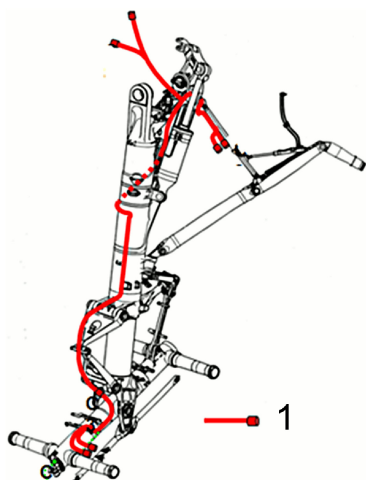
Die Auswirkungen der Einkopplungsbedingungen auf die Verluste der Faserverbindungen sind in Kurzstrecken-Mehrmodenavioniksystemen mit kurzen Faserlängen sowie vielen Knickpunkten mit Steckverbindern und möglicherweise anderen optischen Bauteilen besonders dramatisch. Das Licht bildet in solchen Systemen keine gleichartige modale Verteilung, wie es beispielsweise bei längeren Verbindungen der Fall sein könnte.

Durch Verwendung verschiedener Prüfquellen ist es möglich, eine sehr große Spanne von Dämpfungswerten für ein System zu erzielen. Eine Quelle, die beispielsweise einen Großteil ihrer Leistung in einen sehr kleinen

Winkel im Bauteilinnern einleitet, hat im Vergleich zu einer Quelle, die ihre Leistung in einen größeren Winkelbereich einleitet, einen viel niedrigeren Dämpfungswert. Grund dafür ist, dass Licht bei den größeren Winkeln eher durch Unregelmäßigkeiten in der Bauteilkonstruktion gedämpft wird als Licht bei kleineren Winkeln.

Dieser Effekt wird im Bild 3 deutlich gezeigt, welches die Bandbreite der Einfügungsdämpfungswerte zeigt, die von verschiedenen Prüfungsinstituten am selben optischen Kabelbaum mittels einer Reihe von Lichtquellen gemessen wurden. Die Einfügungsdämpfung schwankte um einen Wert von ungefähr 12,1 dB. Dieses Bild verdeutlicht das Erfordernis, die Einkopplungsbedingungen für Mehrmodenfaserverbindungen klar zu definieren und zu kontrollieren, um wiederholbare und reproduzierbare Messungen an einem Bauteil oder einem System mit niedriger Streuung der Messwerte zu erreichen. Eine Veranschaulichung des Vorteils der Modenkonditionierung wird im Bild 4 unten gezeigt. In diesem Falle wurden zwei Messungen an einem Kabelbaum eines Luftfahrzeugs mit zwei verschiedenen, nicht konditionierten Lichtquellen durchgeführt. Der Unterschied in der Messung der Einfügungsdämpfung am Kabelbaum betrug 0,27 dB. Durch Konditionierung der Lichtverteilung nach der Quelle (durch Einsatz einer simplen Ummantelungstechnik) wurde der Unterschied zwischen den zwei Leistungsmessungen auf 0,02 dB reduziert.

Im Allgemeinen verfügt eine Quelle über zwei Hauptverteilungen. Erstens, die Leistungsschwankung durch die Blendenöffnung der Quelle (die Nahfeldverteilung). Zweitens, die Leistungsschwankung durch Winkel oder die Fernfeldleistungsverteilung. Die Schlüsselparameter der Lichtwellenleiter sind die Kerngröße (Durchmesser =  $2a$ ) und die numerische Apertur (NA). Die Einkopplungsbedingung ist im Grunde ein Vergleich aus der Leistungsverteilung der Quelle mit den Parametern des Fasersystems während der Prüfung. Beispielsweise würde eine Einkopplungsbedingung von 85:85 eine Quelle mit einem Nahfeldprofil beschreiben, welche 85 % des Kerns ausfüllt und eine Winkelverteilung im Fernfeld aufweist, welche 85 % der NA der Faser ausfüllt.



| Prüfung     | Quelle   | Einfügungsdämpfung (dB) |
|-------------|----------|-------------------------|
| Kein Filter | Quelle A | $1,73 \pm 0,08$         |
|             | Quelle B | $1,46 \pm 0,09$         |
| Gefiltert   | Quelle A | $1,39 \pm 0,16$         |
|             | Quelle B | $1,41 \pm 0,15$         |

#### Legende

1 Optisch

**Bild 4 — Schwankungen der Einfügungsdämpfungsmessungen am selben Kabelbaum eines Luftfahrzeugs mit und ohne modale Konditionierung. Dieses Bild verdeutlicht die Wichtigkeit davon, die Lichteinkopplungsbedingungen von Mehrmodenverbindungen in der Luft- und Raumfahrt sorgfältig zu kontrollieren.**

Eine Einkopplungsbedingung der Quelle von 100:100 wird als vollständig angeregte Einkopplung bezeichnet. Beträgt einer der Prozentsätze mehr als 100 %, wird dies als Einkopplung mit Überanregung entweder in der Nahfeld- oder Fernfeld-Leistungsverteilung bezeichnet. Beträgt einer der Prozentsätze weniger als 100 %, wird dies als Einkopplung mit zu schwacher Anregung in der entsprechenden Leistungsverteilung bezeichnet.

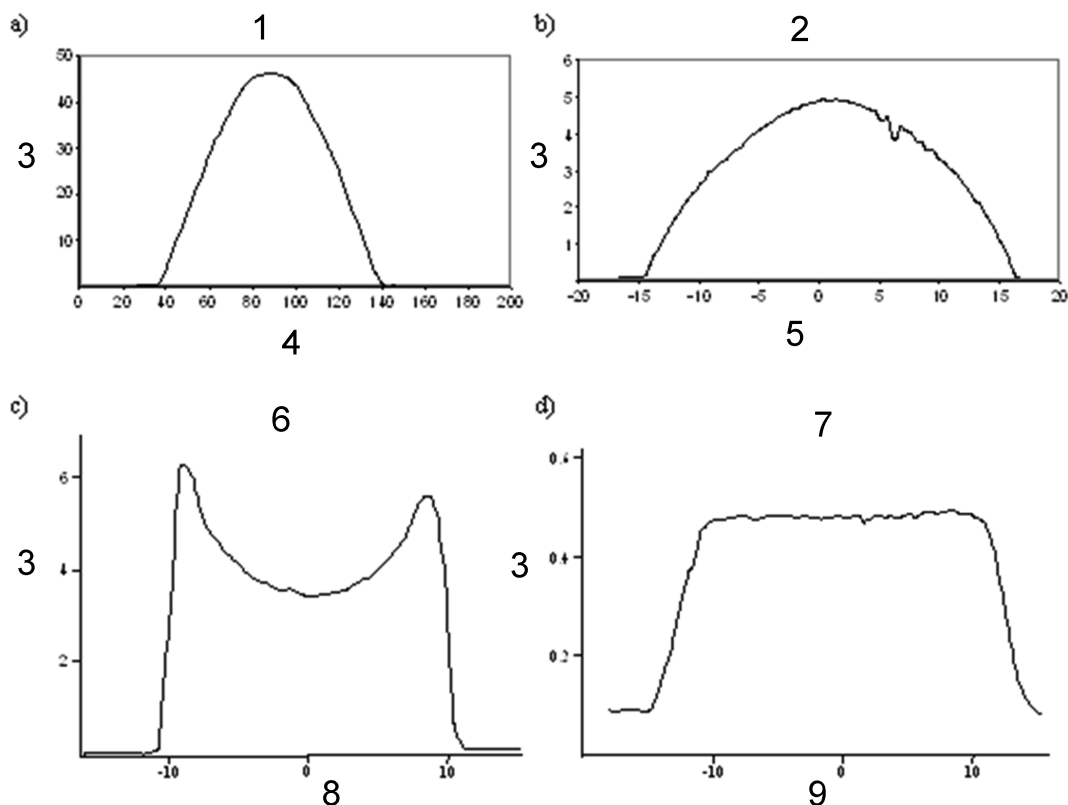
In Avionik-Kabelbäumen verursacht eine Verteilung, die den Faserkern und die numerische Apertur vollständig anregt, eine Dämpfung von Licht, das nah an der Faserkernbegrenzung und dem maximalen von der numerischen Apertur der Faser zugelassenen Winkel eingekoppelt wurde. Die entstehende Verteilung führt zu einer leicht schwachen Anregung der Faser. Die gleiche Verteilung wird letztlich durch eine viel zu schwach angeregte Einkopplung in einen Kabelbaum mit einer großen Anzahl an Bauteilen verursacht, da durch die Herstellungsfehler in den Bauteilen Licht in höhere Winkel und Faserkernlagen gestreut wird.

Diese ideale Verteilung würde irgendwo zwischen einer Einkopplungsbedingung mit Überanregung, die einen übermäßig pessimistischen Wert für die Einfügungsdämpfung ergeben würde, und einer viel zu schwach angeregten Einkopplungsbedingung, die einen optimistischen Wert ergibt, liegen. Im Allgemeinen regt die optimale Einkopplungsbedingung sowohl den Kern der Faser als auch deren numerische Apertur geringfügig zu schwach an. Dies entfernt den Teil der Lichtverteilung der Quelle, der am ehesten durch Herstellungsfehler der Kabelbaum-Bauteile gedämpft wird. Studien haben gezeigt, dass die korrekte Einkopplungsbedingung irgendwo zwischen einer Einkopplung von 80:80 und 90:90 liegt.

Eine weitere Folge der Verwendung der idealen Einkopplungsbedingung für die Messung der Einfügungsdämpfung ist die Minimierung der Differenz zwischen der Dämpfung eines vollständigen Kabelbaums und der Dämpfungssumme der einzelnen Kabelbaum-Bauteile. Es sollte angemerkt werden, dass die Einkopplungsverteilung einer Quelle zur Übertragung von Daten in einer Faser in einem echten System auch über eine bestimmte Leistungsverteilung verfügt. Diese kann durchaus von der Quelle abweichen, die zur Charakterisierung des Fasersystems herangezogen wurde, obgleich wenn beide ähnlich sind, die Leistung der echten Systemverbindung aus den Verlustdaten der Systemkomponenten vorweggenommen werden kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass gut definierte Einkopplungsbedingungen gefordert sind, um

- die zuverlässige Messung der Komponentenverluste sicherzustellen (und so die Berechnung der Systemverluste zu ermöglichen),
- die zuverlässige und wiederholbare Charakterisierung einer Mehrmodenlichtwellenleiterverbindung in der Luft- und Raumfahrt zu ermöglichen, wobei besonders auf die Empfindlichkeit gegenüber extremen und unerwünschten Auswirkungen durch enge Kurven oder falsche Montageverfahren zu achten ist,
- sicherzustellen, dass Hersteller und Bediener die „selbe“ normierte Messung vornehmen.



### Legende

- 1 Gradientenindexfaser mit 0,26 NA und LED-Quelle im Nahfeld
- 2 Gradientenindexfaser mit 0,26 NA und LED-Quelle im Fernfeld
- 3 Leistung (nW)
- 4 Position ( $\mu\text{m}$ )
- 5 Austrittswinkel (Grad)
- 6 Stufenprofilfaser mit 0,2 NA und Weißlichtquelle im Nahfeld
- 7 Stufenprofilfaser mit 0,2 NA und Weißlichtquelle im Fernfeld
- 8 Position (Mikrometer)
- 9 Winkel (Grad)

**Bild 5 — a) und b) sind die Nah- und Fernfeld-Leistungsverteilungen einer durch eine LED-Quelle beleuchteten Gradientenindexfaser. Die LED-Quelle bietet beinahe eine Einkopplungsbedingung mit Vollanregung. c) und d) sind die Nahfeld- und Fernfeld-Leistungsverteilungen einer durch eine Quelle mit weißem Licht beleuchteten Stufenindexfaser. Die LED-Quelle bietet eine Einkopplungsbedingung mit Überanregung.**

Um Unterschiede zwischen den Quellen verschiedener Lieferanten zu vermeiden, muss das Einkopplungsprofil idealerweise definiert werden. Eine typische Spezifikation legt 3 Oberflächen fest, deren Begrenzungen die Intensitätsebenen des Feldes bestimmen. Bei einer Gradientenindexfaser ist anzumerken, dass die Fernfeldanforderungen nicht obligatorisch sind, weil diese mathematisch mit dem Nahfeldprofil verknüpft sind.

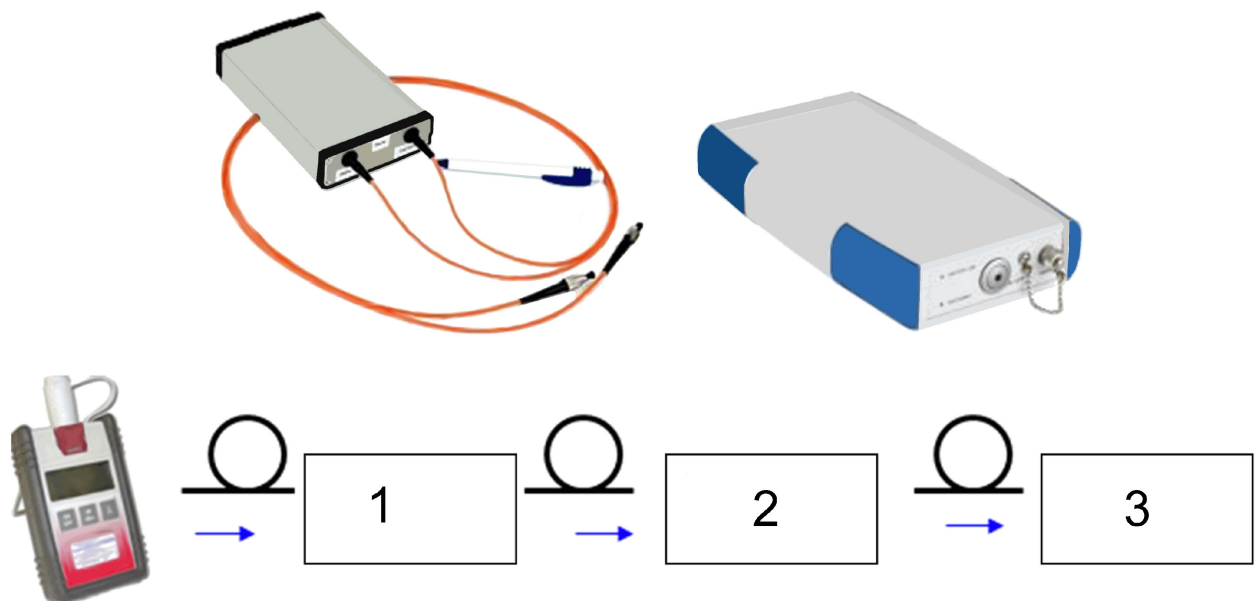
Bevor auf die optimalen Einkopplungsbedingungen für die Prüfung eingegangen wird, sollte angemerkt werden, dass die Nahfeld- und Fernfeldverteilungen, die aus einer Faser heraustreten, auch in Abhängigkeit der Natur des Brechzahlprofils variieren. Daher weisen Gradientenindexfasern im Allgemeinen unterschiedlich ausgeformte Verteilungen auf als Stufenindexfasern, insbesondere wenn die Fasern einer Vollanregung oder Überanregung unterliegen. Einige Unterschiede werden im Bild 5 dargelegt. Die „Hörner“, welche in der Stufenindexverteilung im Nahfeld zu sehen sind, resultieren aus den spiralförmigen Lichtstrahlen, welche im

Mantel die Faser hinuntergeleitet werden. Diese würden letztendlich in den langen Längen der Faser verschwinden.

## 6.2 Schaffung geeigneter Einkopplungsbedingungen

Um spezifische Einkopplungsbedingungen zu erhalten, ist es möglich, das Licht innerhalb einer Lichtwellenleitung zu manipulieren. Dies kann das „Scrambling“ (Vermischen) der Moden innerhalb einer Mehrmodenfaser (um die Faser besser vollanzuregen) und die nachfolgende Filterung des Lichts (z. B. Modenisolierung durch Biegungen in der Faser oder Wickeln der Faser um einen Dorn) zur Schaffung einer gewünschten Verteilung umfassen. Eine andere Alternative ist der Einsatz einer anderen Faserart zur Einkopplung in die Faser (anderer Faserkern und NA), um eine bestimmte Einkopplung zu erreichen.

Heutzutage sind Prüfungsquellen mit kontrollierter Einkopplung oder eingebauter modaler Konditionierungsstufe (vor dem Steckverbinder des Faserausgangs) verfügbar. Alternativ sind auch eigenständige Modenkonditionierer verfügbar, die aus einer Vielfalt von Eingangslichtverteilungen die geforderte Verteilung oder Einkopplungsbedingung am Ausgangssteckverbinder herstellen können. Dies sind im Grunde „Black-Box-Geräte“. Der Bediener verbindet einfach die Lichtquelle mit dem Eingang und der Ausgang verfügt dann über die korrekte Einkopplungsbedingung, um ein bestimmtes Fasersystem zu prüfen. Diese Arten von Quellen gelten als einfacher einzusetzen und sind in der Industrie eher verfügbar. Derartige Einrichtungen sollten verifiziert (kalibriert) werden, um sicherzustellen, dass die Einkopplungsbedingung den Festlegungen entspricht. Ein entsprechender Nachweis müsste in der Dokumentation der ausgeführten Messungen erbracht werden. Ein Beispiel für einen Modenkonditionierer ist in Bild 6 dargestellt.



### Legende

- 1 Modenkonditionierer
- 2 konditionierte Einkopplung
- 3 zu prüfendes System

**Bild 6 — Modenkonditionierer zur Erzeugung geeigneter Einkopplungsbedingungen für die Prüfung von Avionik-Fasersystemen. Der Modenkonditionierer kann mit bestehenden Lichtquellen zur Erzeugung einer geeigneten und einheitlichen Prüfungseinkopplung eingesetzt werden.**

Die Avionik-Einkopplungsbedingungen für Fasern mit 50 µm und 62,5 µm Kernen werden in EN 2591-100 als Querschnittsmuster der Nahfeld- und Fernfeldleistungsverteilungen bestimmt. Diese werden in 3 Intensitätsstufen vorgegeben. Es wird hierbei angemerkt, dass die Telekommunikationsindustrie unter Umständen Einkopplungsbedingungen durch die „Encircled-Flux-Methode“ (z. B. ISO/IEC 61280-4-1) definieren

kann. Dabei handelt es sich um ein integriertes Maß der Leistung innerhalb der Regionen/Bänder des Faserquerschnitts. Dieses ist für die Messung kohärenter Quellen, bei welchen sogenannte Interferenzflecken zwischen den Moden beobachtet werden können, nützlich. Ein Beispiel wird im Bild 7 gezeigt. Der Leser sollte sich dieser verschiedenen Herangehensweisen bewusst sein, aber im Allgemeinen hat die Luft- und Raumfahrtindustrie eine Herangehensweise zur Spezifikation der Einkopplungsbedingungen eingeführt, welche auf einem Prozentsatz des Füllungsgrades beruht.

Es wird ebenfalls angemerkt, dass andere Prüfverfahren, beispielsweise mittels OTDR andere Ergebnisse liefern können, weil das Instrument eine Laserquelle statt einer LED verwendet. Bei der Prüfung von Mehrmodensystemen mit dieser Art von Instrumenten können spezielle Einkopplungsleitungen erforderlich sein. Manche OTDRs verwenden ebenfalls interne Modenkonditionierungssysteme in Übereinstimmung mit den empfohlenen Standards.

### 6.3 Beispiel für geeignete Einkopplungsbedingungen für eine Prüfung in der Luft- und Raumfahrt

EN 2591-100 (derzeit in der Überprüfung) legt geeignete luft- und raumfahrtspezifische Einkopplungsbedingungen für Mehrmodenfaserarten mit Gradientenindexprofil 62,5/125 µm (NA = 0,275) und 50/125 µm (NA = 0,2) zum Einsatz in Luft- und Raumfahrtzeugen fest. Bei diesen handelt es sich um die derzeit am häufigsten eingesetzten Mehrmodenfasergrößen der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Die Einkopplungsbedingungen für Nah- und Fernfeld nach EN 2591-100 sind im Folgenden anhand einer Beispielfaser von 50/125 µm (NA = 0,2) reproduziert. Es wird angemerkt, dass für Gradientenindexfasern es lediglich notwendig ist, die Nahfeldverteilung zu definieren, da das Fernfeld mathematisch mit diesem verknüpft ist. Aus Gründen der Vollständigkeit wird dies dennoch in der Norm spezifiziert.

Es sind mittlerweile Modenkonditionierer verfügbar, welche die Ausgabe einer Prüfquelle so umformen, dass die optimalen Einkopplungsbedingungen für Fasern der Luft- und Raumfahrt erreicht werden (dabei wäre in der Regel eine andere Einheit für jede Art von Faser notwendig). Ebenfalls kommen mittlerweile mehr und mehr Prüfquellen heraus, welche den Modenkonditionierer bereits in die Lichtquelleneinheit integriert haben.

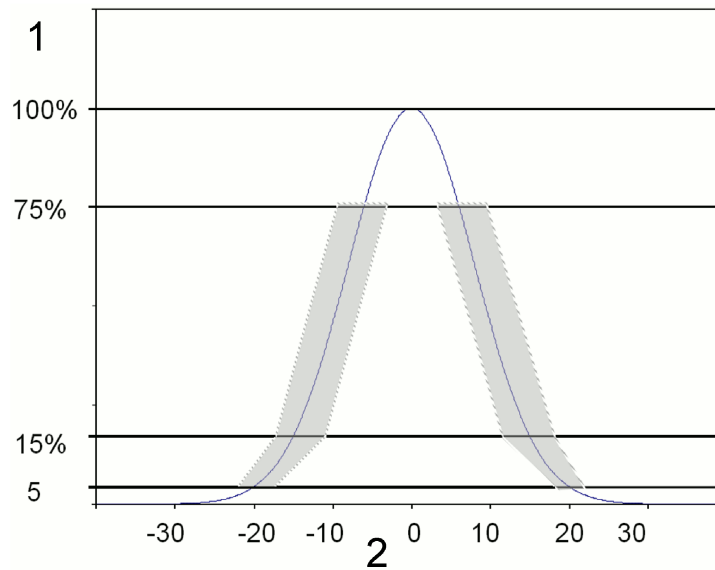
**Tabelle 1 — Einkopplungsspezifikation für eine 50-/125-µm-Faser (0,2 NA) bei 850 nm und 1 300 nm – Nahfeldmuster. Nahfeld gemessen nach EN 60793-1-45, Verfahren A**

| Nennleistung | Maximalwert<br>(µm) | Mindestwert<br>(µm) |
|--------------|---------------------|---------------------|
| 5 %          | 44                  | 41                  |
| 15 %         | 42                  | 36                  |
| 75 %         | 26                  | 16                  |

**Tabelle 2 — Einkopplungsspezifikation für eine 50-/125-µm-Faser (0,2 NA) bei 850 nm und 1 300 nm – Fernfeldmuster**

| Nennleistung | Maximalwert<br>(NA) | Mindestwert<br>(NA) |
|--------------|---------------------|---------------------|
| 5 %          | 0,175               | 0,165               |
| 15 %         | 0,165               | 0,146               |
| 75 %         | 0,095               | 0,074               |

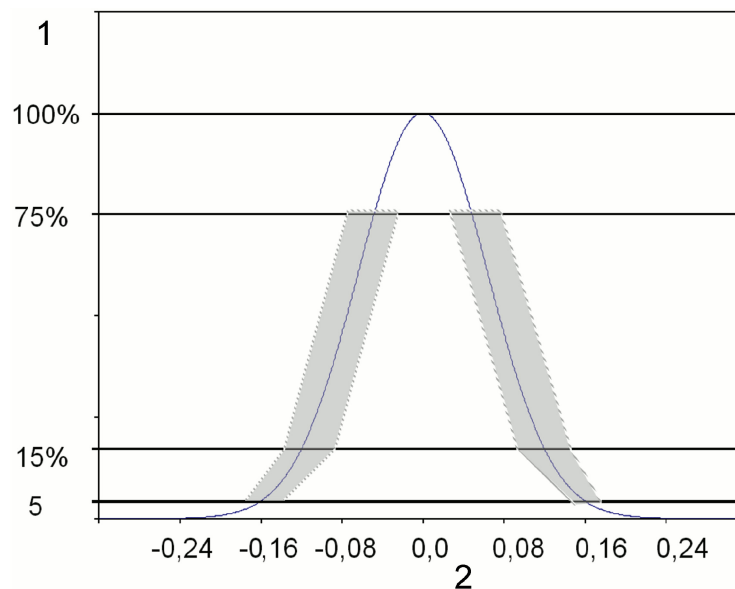
Beispiele für Nah- und Fernfeldscanmuster für 50-/125- $\mu\text{m}$ -Fasern (0,2 NA) werden in Bild 7 bzw. Bild 8 gezeigt.



#### Legende

- 1 Leistung
- 2  $\mu\text{m}$

**Bild 7 — Spezifikation des Einkopplungsscans für eine 50-/125- $\mu\text{m}$ -Faser (0,2 NA) bei 850 nm und 1 300 nm – Nahfeld**



#### Legende

- 1 Leistung
- 2 numerische Apertur

**Bild 8 — Spezifikation des Einkopplungsscans für eine 50-/125- $\mu\text{m}$ -Faser (0,2 NA) bei 850 nm und 1 300 nm – Fernfeld**

Ein Beispiel für eine „Encircled-Flux-Methode“ nach IEC 61280-4-1 wird im Bild 9 gezeigt.

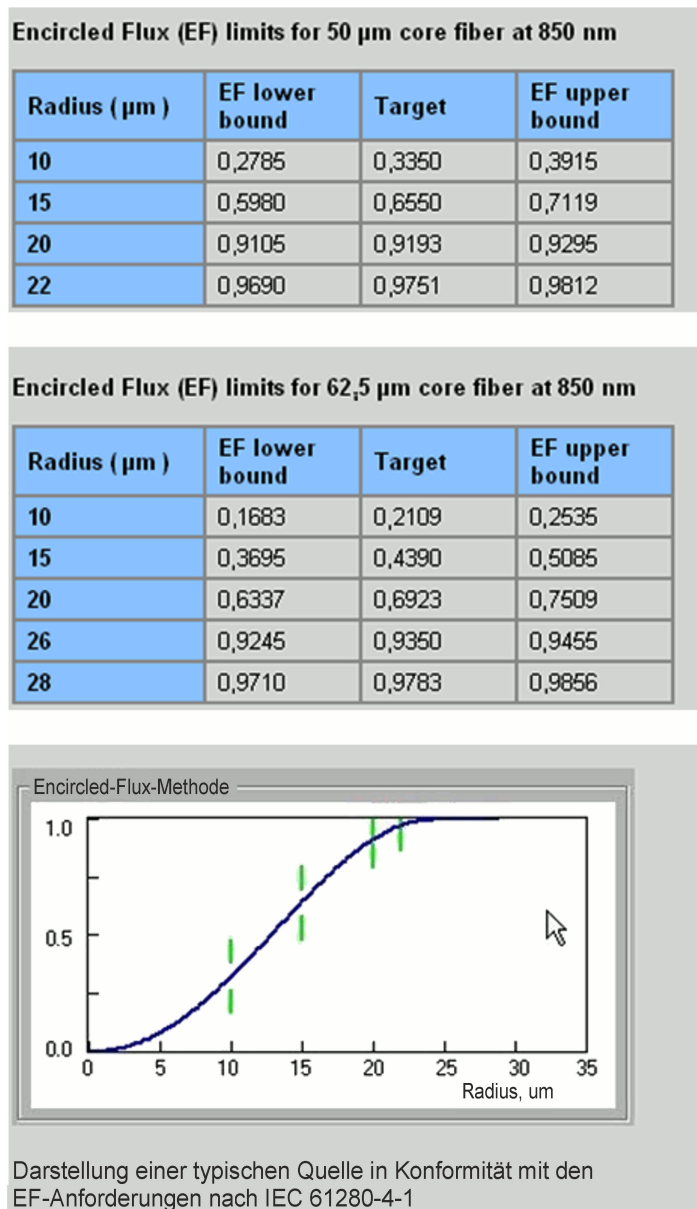
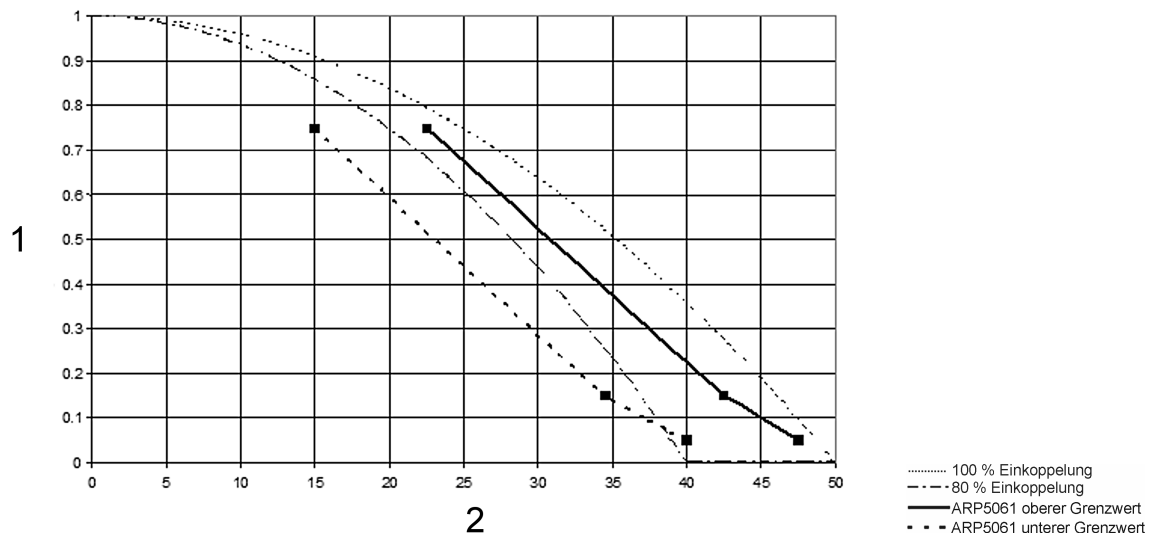


**Bild 9 — Beispiel einer „Encircled-Flux-Methode“ (überwiegend bei Prüfungen in der Telekommunikation eingesetzt) für die Modenkonditionierung in Mehrmodenfasern.**

Fasern mit 50- $\mu\text{m}$ - und 62,5- $\mu\text{m}$ -Kernen sind die am häufigsten vorkommenden Mehrmodenarten, die auf Luftfahrzeugen eingesetzt werden. Wie bereits in Abschnitt 3 erwähnt, können andere Mehrmodenfasern vor allem auf Alt- (en: Legacy)plattformen angetroffen werden. Diese umfassen 100/140- und 200/280- $\mu\text{m}$ - sowie 200/300- $\mu\text{m}$ -Fasern. Viele dieser Fasern haben ein Stufenindexprofil.

Ein Beispiel für die Einkopplungsbedingungen einer 100/140- $\mu\text{m}$ -Gradientenindexfaser (NA 0,29) wird zu informativen Zwecken im Bild 10 gezeigt. Die 100/140- $\mu\text{m}$ -Verteilung stammt aus der amerikanischen Norm ARP5061. Auch hier wird ein dreistufiges Muster zur Definition der Verteilung der Gradientenindexfaser verwendet.

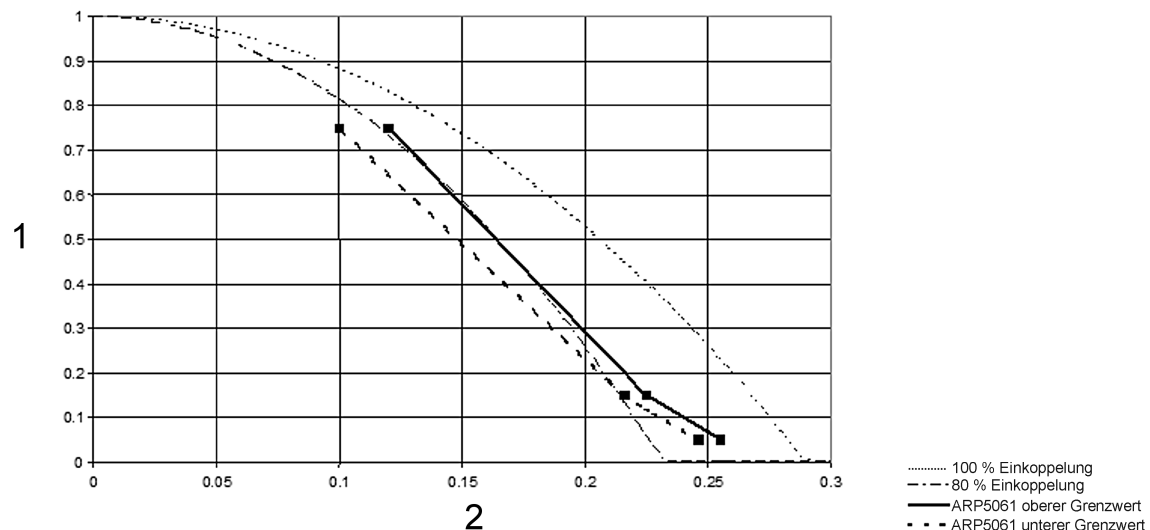
- a) Ober- und Untergrenzen der Nahfeld-Leistungsverteilung für eine Gradientenindexfaser für Avionik nach ARP5061 mit einem Kerndurchmesser von 100 Mikrometer und einer NA von 0,29.



### Legende

- 1 normalisierte Leistung  
 2 radiale Position (Mikrometer)

- b) Ober- und Untergrenzen der Fernfeld-Leistungsverteilung für eine Gradientenindexfaser für Avionik nach ARP5061 mit einem Kerndurchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und einer NA von 0,29



### Legende

- 1 normalisierte Leistung  
 2 radiale Position (Mikrometer)

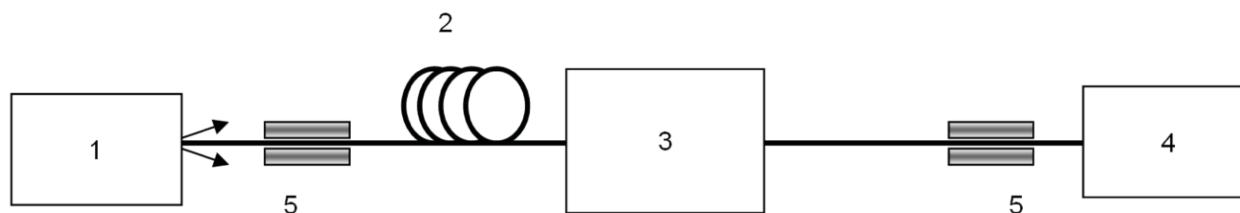
**Bild 10 — Ober- und Untergrenzen der Nahfeld- und Fernfeld-Leistungsverteilungen entsprechend den Festlegungen der Norm ARP5061. Die Grenzen werden mit Kurven verglichen, die die idealen Einkopplungsbedingungen von 100 % und 80 % für eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und einer NA von 0,29 repräsentieren.**

Eine weitere Faser, die in militärischen Plattformen zum Einsatz kommt, ist die 200/280- $\mu\text{m}$ -Stufenindexfaser (Faser nach EN 4533 mit NA 0,24). Ein geeigneter Prüfaufbau für 200/280  $\mu\text{m}$  wird im Bild 11 gezeigt. Eine empfohlene Einkopplungsbedingung lautet wie folgt.

Größe Einkopplungspunkt (80 % Intensität) Überanregung des Kerns  
( $D \sim 1,05 \times \text{Kerndurchmesser} \sim 210 \mu\text{m}$ )

Gleichmäßigkeit der Punktgröße  $\pm 10 \%$  (Überanregung Faser NA  $\sim 0,3$ )

NA-Gleichmäßigkeit (Fernfeld)  $\pm 20 \%$  der Faser NA von 0,24

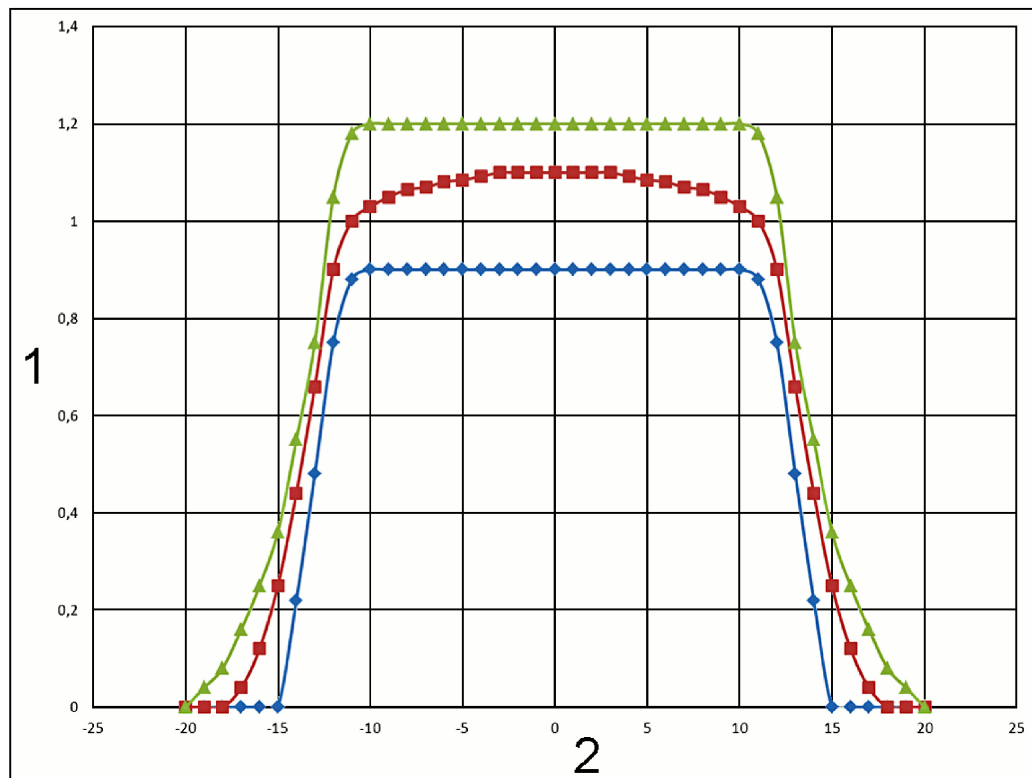


### Legende

- 1 Quelle (Einkopplung mit Überanregung)
- 2 Modenfilter
- 3 zu prüfende Einrichtung (oder Kabelbaum)
- 4 Detektor/Leistungsmesser
- 5 Mantelmodus-Abstreifer

**Bild 11 — Beispiel eines Prüfaufbaus zur Prüfung eines Kabelbaums basierend auf 200/280- $\mu\text{m}$ -Stufenindexfasern (Faser nach EN 4533 mit NA von 0,24)**

Das System beginnt mit einer überangeregten Einkopplung in die Faser. In der Praxis wird dies durch Einkopplung einer Punktgröße erreicht, welche den Faserkern übersteigt (80 % Intensitätsniveau bei  $1,05 \times \text{Faserkerndurchmesser}$ ). Die numerische Apertur des Einkopplungslichtes sollte größer sein als die numerische Apertur der Faser ( $\sim 0,3$  empfohlen). Dieser Aufbau umfasst Abstreifer für den Mantelmodus, um jegliches Licht, welches durch den Fasermantel geleitet wird, auf weniger als 1 % der Gesamtleistung zu reduzieren. In der Praxis wird dies dadurch erreicht, dass ein Abschnitt der Fasern mit freigelegtem Mantel von einem Material mit höherem Brechungsindex eingehüllt wird als der Mantel selbst aufweist. Ein Modenfilter (der permanent in die Kopplungsleitung integriert ist) schränkt die geführten Moden des Systems ein. Dies wird durch eine Dornumwicklung der Faser erreicht (5 Umdrehungen bei einem Durchmesser von 60 mm). Dieser Aufbau führt zu einer Einkopplungsverteilung, die innerhalb der in Bild 12 gezeigten Vorlage liegt. Lichtquellen, welche dieser definierten Verteilung entsprechen, sind kommerziell verfügbar.



### Legende

- ♦— innerer Grenzwert
- normalisierte Leistung
- ▲— äußerer Grenzwert

- 1 normalisierte Leistung
- 2 Grad

**Bild 12 — Beispiel einer Lichtquellenverteilungsvorlage (Fernfeld) für eine 200/280- $\mu$ m-Stufenindexfaser (Faser nach EN 4533 mit NA von 0,24)**

## 7 Prüfen der Netzwerkpfade: Reflektometrie und Footprinting

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den als Reflektometer bekannten Instrumenten. Von diesen gibt es zwei Haupttypen: OTDR und OFDR [optisches Zeitbereichsreflektometer (en: Optical Time Domain Reflectometer) und optisches Frequenzbereichsreflektometer (Optical Frequency Domain Reflectometer)]. Diese Instrumente messen die Einfügungsdämpfung und die Reflexionsereignisse in Lichtwellenleitersystemen auf eine andere Art und Weise als bei der Messung der optischen Leistung. Neben der Messung der Leistung einzelner Bauteile oder Elemente einer Lichtwellenleiterverbindung können diese Instrumente auch zur Messung oder Abbildung ganzer Verbindungen zur Erstellung von Leistungsnachweisen über die Gebrauchsdauer des Luftfahrzeugs hinweg eingesetzt werden. Dies führt im weiteren Verlauf zum Konzept des „Footprintings“, welches am Ende dieses Abschnitts beschrieben wird.

### 7.1 OTDRs

Die Zeitbereichsreflektometrie unterscheidet sich grundlegend von klassischen Leistungsmessverfahren. Das Verfahren beinhaltet die Einkopplung eines Lichtimpulses in das Lichtwellenleitersystem durch ein OTDR-Gerät. Ein Detektor im Messgerät zeichnet dann das Rückstreusignal auf. Innerhalb der Faser wird das Licht in alle Richtungen verstreut (eine sogenannte Rayleigh-Rückstreuung), einschließlich zurück zur Quelle. OTDR verwendet dieses „rückgestreute Licht“ zur Durchführung der Messungen. Zu jedem Zeitpunkt

ist das vom OTDR-Gerät gesehene Licht jenes Licht, welches vom Impuls bei der Durchquerung einer Region der Faser gestreut wird. Da es möglich ist, die Geschwindigkeit des Impulses zu kalibrieren während dieser die Faser durchquert, kann das OTDR-Gerät das, was es im rückgestreuten Licht sieht, mit einer tatsächlichen Position in der Faser korrelieren.

Die entstehende Kurve ist ein Abbild der Verluste und Reflexionsereignisse der gesamten Faser als Funktion der Distanz. Die Zeitsteuerung und Intensität des rückgestreuten Lichtes in Bezug auf den einfallenden Impuls liefert Informationen zur Einfügungsdämpfung und Rückstreuverlusten von Ereignissen (dies ist für Steckverbinder nützlich, kann aber auch Biegungen und Spleiße einschließen).

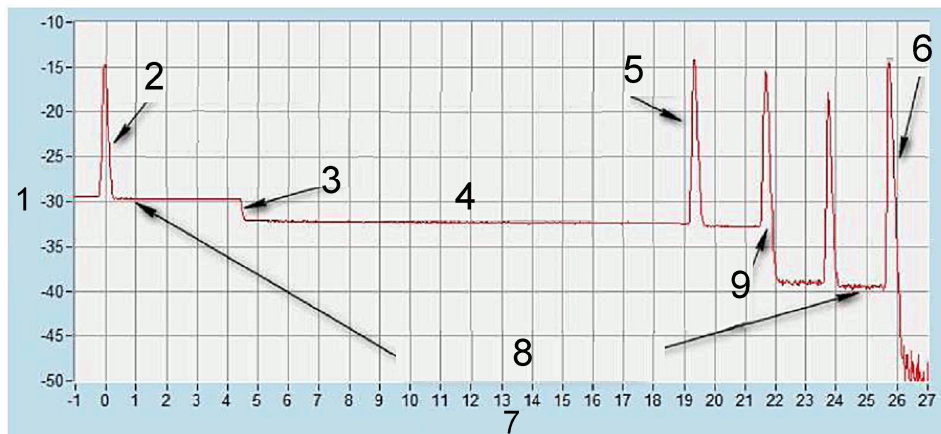
Ein Schlüsselattribut dieser Art der Prüfung ist, dass diese nur einen einzigen Zugangspunkt entlang der Faserverbindung benötigt (im Vergleich zu Leistungsverlustmessungen, welche eine Einführung von Licht in die Verbindung hinein und eine Detektion aus der Verbindung heraus erfordern).

Aufgrund ihrer Fähigkeit, Ereignisse entlang eines Faserpfades zu messen, können OTDR-Geräte auch für die Fehlersuche eingesetzt werden.

### **7.1.1 Beispielhafte Kurve**

Eine typische OTDR-Kurve wird im Bild 13 gezeigt. Diese veranschaulicht einige der Hauptereignisse und -messungen, welche dargestellt werden können. Spitzen und Stufenänderungen in der Kurve zeigen „Ereignisse“ innerhalb der Faser. Die Horizontalschnitte zwischen den Ereignissen zeigen die Rückstreuung durch die Faser selbst.

Die Einfügungsdämpfung eines Ereignisses wird durch die Differenz im Kurvenniveau vor und nach einem Ereignis ausgedrückt. Wie in Bild 13 zu erkennen ist, zeigen Steckverbinder mit niedrigen Verlusten nur wenige Veränderungen in der Höhe der Kurve vor und nach der „Spitze“ des Ereignisses. Einer der Steckverbinder nahe am Ende des Pfades zeigt eine starke Höhendifferenz, was auf einen signifikanten Verlust hinweist. Hierbei kann es sich um einen falsch ausgerichteten oder schmutzigen Steckverbinder handeln.



### Legende

- 1 Amplitude [dB]
- 2 Leistungssteckverbinder – Rückstreuverlust = 29,5 dB – Einfügedämpfung = 0,2 dB
- 3 Spleiß – Einfügedämpfung = 2,4 dB
- 4 Faser – Verlust = 13 dB km (650 nm)
- 5 guter Steckverbinder – Rückstreuverlust = 23,5 dB – Einfügedämpfung = 0,35 dB
- 6 Ende der Baugruppe – Rückstreuverlust = 14 dB
- 7 Distanz [m]
- 8 Gesamtverluste der Baugruppe = 9,8 dB
- 9 schlechter Steckverbinder – Rückstreuverlust = 25 dB – Einfügedämpfung = 6,2 dB

**Bild 13 —Veranschaulichende OTDR-Kurve, welche lösbare Ereignisse, wie Steckverbinderorte/Verluste/Reflexionen zeigt**

Die Messung der Rückstreuverluste mittels OTDR basiert auf der Messung der Höhe einer „Spitze“ infolge der reflektierten Leistung eines Ereignisses in Bezug auf das Ausmaß der Rückstreuung. In dieser Hinsicht ist eine Kalibrierung des Instruments wichtig. Das RBS-Niveau hängt von der Faserart, der Wellenlänge und der Auflösung des Reflektometers ab. Es ist oftmals notwendig, es auf eine bestimmte Reihe von Parametern zu kalibrieren. Dies kann mittels einer bekannten kalibrierten Reflexion erfolgen. Für einen regelmäßigen Anwender kann es nützlich sein, eine Sammlung an Werten aufzubauen, welche den unterschiedlichen Fasern, Wellenlängen und möglicherweise OTDR-Auflösungen entsprechen, und diese Sammlung dann für seine Anwendungen zu verwenden.

Die OTDR-Messung der Reflexion eines einzelnen Ereignisses entspricht dem Rückstreuverlust dieses Ereignisses. Bei mehreren Reflexionen mit ausreichendem Abstand dazwischen misst das OTDR-Gerät den Rückstreuverlust eines jeden einzelnen Ereignisses. Wenn die Reflexionen zu nah aneinander liegen und die Spitzen nicht aufgedeckt werden können, misst das OTDR-Gerät den effektiven Rückstreuverlust der Summe der Reflexionen.

Ein weiteres erwähnenswertes Merkmal ist der große Signalsprung am Ende der Faser in Bild 14, an dem das zurückreflektierte Licht der Faser (RBS-Niveau) auf Geräuschebene abfällt. Es ist dabei sehr wichtig, dass bestätigt wird, dass tatsächlich ein großer Sprung am Ende der Baugruppe besteht, um sicherzustellen, dass der horizontale Teil der Kurve wirklich dem RBS-Licht entspricht und nicht einfach nur Rauschen darstellt.

### 7.1.2 Wichtige Eigenschaften

Die wichtigsten technischen Parameter einer OTDR-Messung sind der dynamische Bereich, die räumliche Auflösung und die sogenannten „Todeszonen“.

### 7.1.3 Dynamischer Bereich

Der dynamische Bereich ist die Differenz aus dem höchsten Rayleigh-Rückstreuungsniveau und dem Rauschpegel des Instruments. Er beschreibt die maximale Fähigkeit der Faserverlustmessung des Instruments. Die Menge an zum OTDR-Gerät rückgestreutem Licht ist proportional zur Rückstreuung der Faser, der Spitzenleistung und Länge des emittierten Prüfungsimpulses. Die Spitzenleistung des Impulses oder die Impulsbreite können erhöht werden, um mehr rückgestreutes Licht zu erhalten sowie die Qualität und die Reichweite der Messung zu verbessern.

### 7.1.4 Auflösung

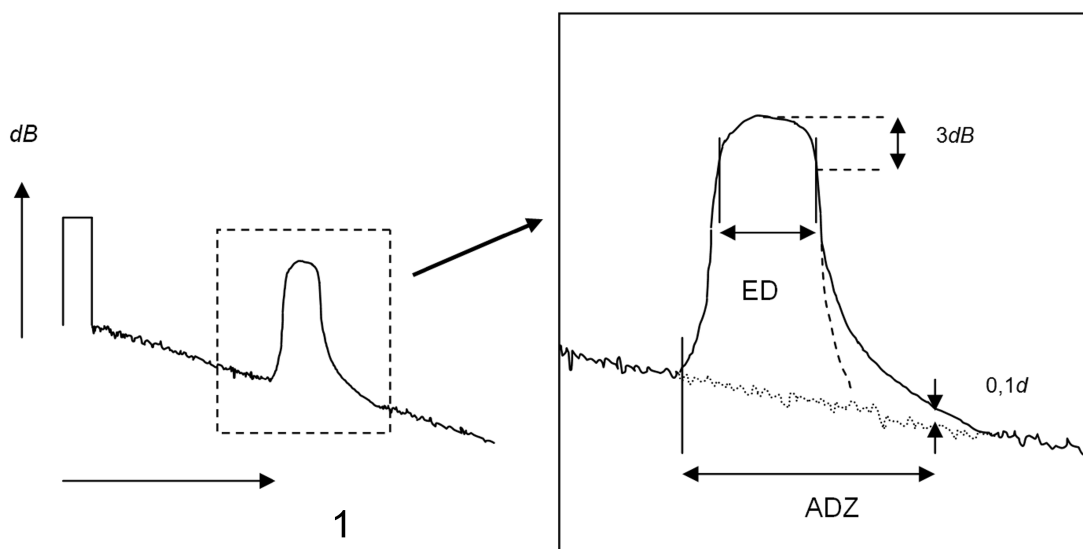
Eine erhöhte Impulsbreite verbessert den dynamischen Bereich, senkt aber die räumliche Auflösung (kürzere Impulse führen zu einer besseren räumlichen Auflösung). Wenn zwei rückstrahlende Ereignisse nah aneinander liegen, dann müssen zwei Spitzen aufgedeckt werden. Manche Instrumente verwenden höchst empfindliche Photonen-zählverfahren, um einen nutzbaren dynamischen Bereich zu erhalten und gleichzeitig kürzere Impulsdauern zu ermöglichen (nützliche Auflösung).

### 7.1.5 Todeszonen

Die Ereignis-„Todeszone“ gibt den Mindestabstand zweier eng aneinanderliegender Ereignisse, welche durch das Instrument separat aufgedeckt werden können. Es wird als Abstand in Meter bei  $-1,5$  dB von jeder Seite der reflektierenden Spitze definiert.

Die Dämpfungstodeszone gibt den Mindestabstand an, der nach einem reflektierenden Ereignis zur Ausführung einer Verlustmessung notwendig ist. Sie ist definiert als Abstand zwischen Einsetzen des Reflexionsimpulses und dem Punkt, an dem der Ereignisausschlag sich bis auf  $0,5$  dB (oder neuerdings auch  $0,1$  dB) über dem Rückstreuungsniveau der Fasern erholt hat.

Die Todeszonen werden in Bild 14 veranschaulicht.



#### Legende

1 Abstand

**Bild 14 — Festlegung der Todeszonen für OTDR**

Für weitere Informationen zu OTDR-Messungen, siehe EN 2591-605, *Luft- und Raumfahrt — Elektrische und optische Verbindungselemente; Prüfverfahren — Teil 605: Optische Elemente, Rückstreuverluste (derzeit in der Überprüfung)*.

### 7.1.6 Diskussion

OTDR-Geräte haben sich im Laufe der Zeit von eher unhandlichen Tischgeräten zu den heutigen Instrumenten, die deutlich kompakter und tragbar sind, entwickelt. Software und Benutzeroberflächen sind besser geworden, aber die Auswertung der Kurvenmerkmale erfordert dennoch ein gewisses Maß an Erfahrung; beispielsweise können Reflexionen zu Phantomereignissen führen, die nur von einem erfahrenen Benutzer erkannt werden können. Der Einsatz von OTDR-Geräten kann außerdem bei bestimmten Netzwerken nur eingeschränkt möglich sein, beispielsweise bei Netzwerken mit Sternkopplung, besonders dann, wenn die Armlängen im Netzwerk ähnlich sind (dies führt zum zeitlichen Zusammenfallen von Ereignissen). Sie funktionieren bei einfachen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen am besten.

Standard-OTDR-Geräte, vorgesehen für die Telekommunikationsanwendung, sind nicht gut für hochauflösende Messungen auf kurze Distanzen geeignet, wie sie an Bord von Luftfahrzeugen wohl erforderlich wären. OTDR-Geräte der Telekommunikationsbranche wurden für Distanzen von mehreren Kilometern mit einer Auflösung von einigen Metern entwickelt, während es bei der Prüfung von Lichtwellenleitern in der Avionik um deutlich kürzere Distanzen und höhere Auflösungsanforderungen geht. Einige typische Zahlen für ein OTDR-Gerät, das für die Anwendung in der Luft- und Raumfahrt geeignet ist, sind eine Ereignistodeszone von  $\sim 12$  cm und eine Dämpfungstodeszone von  $\sim 26$  cm. Eine optische Detektion mit hoher Empfindlichkeit bis zu  $-100$  dBm ist mittels Photonenzähltechnologie möglich.

OTDR-Geräte sind für die gebräuchlichsten Arten von Lichtwellenleitern, einschließlich Standard-Einmodenfasern, OM1- bis OM4-Mehrmodenfasern sowie einige größere Faserarten und polymere optische Fasern (POF) verfügbar. Instrumente sind für die gebräuchlichsten Wellenlängen verfügbar (650 nm, 850 nm, 1 310 nm und 1 550 nm).

Wie zuvor erwähnt, können OTDR-Geräte zum „Footprinting“ eines photonischen Kabelbaums verwendet werden. Bild 13 zeigt, wie eine Ereignisabbildung für eine Faserverbindung aufgezeichnet werden kann. Die Kurve kann aufgezeichnet und zu einem späteren Zeitpunkt neu ausgemessen werden. Es ist daher möglich, Veränderungen eines optischen Kabelbaums zu sehen und alle Verschlechterungen oder Alterungserscheinungen hervorzuheben. Bezüglich der Fehlersuche ist es relativ einfach, neue Reflexionsereignisse (möglicherweise Brüche oder Biegungen) oder fehlerhafte Steckverbinder (beispielsweise charakterisiert durch abnormal hohe Verlust- oder Reflexionswerte) zu identifizieren.

Instrumente sind für gewöhnlich entweder für Einzelmoden- oder Mehrmodenfasern verfügbar. Manche Hersteller können allerdings auch kundenspezifische Instrumente mit mehreren Optionen liefern, z. B. Mehrmodenanschlüsse sowohl für 50- $\mu$ m- als auch 62,5- $\mu$ m-Fasern oder gemischte Einmoden- und Mehrmodenoptionen bei einer bestimmten Wellenlänge, z. B. 1 300 nm.

## 7.2 OFDR

Ein OFDR (optisches Frequenzbereichsreflektometer) ist ein hochauflösendes und hochempfindliches Instrument zur Ausmessung von Glasfasernetzwerken mit kurzen Strecken, welches auf wiederholter Frequenz- (Wellenlängen-) abtastung einer kontinuierlichen Welle basiert. Manchmal wird ein solches Gerät auch als optisches Rückstreuungsreflektometer oder OBR (en: Optical Backscattering Reflectometer) bezeichnet. Üblicherweise wird ein einstellbarer Laser mit externem Resonator als Quelle verwendet. Ein OFDR basiert auf Interferenzen zwischen dem Licht, welches bei Prüfung aus der Baugruppe oder Verbindung zurückkehrt und dem Licht, welches von einem festen Bezugsreflektor innerhalb des Instruments reflektiert wird. Interferenzen beider orthogonaler Polarisationszustände des Lichts werden aufgezeichnet. Bei Ermittlung des komplexen Reflexionskoeffizienten der zu prüfenden Baugruppe im Frequenzbereich wird die Reflektivität im Zeitbereich (und daher als Funktion der Länge) über die Fourier-Transformation des Signals bestimmt.

So wie OTDRs können auch OFDRs eine Zuordnung der Verlust- und Reflexionsereignisse entlang des Faserpfades darstellen. OFDRs sind üblicherweise für Standard-Einmodenfasern mit Telekommunikationswellenlängen von 1 310 nm und 1 550 nm ausgelegt. Jedoch können OFDRs durch Anschluss eines Einmoden-zu-Mehrmoden-Modenkonverters an der Frontplatte des Instruments auch für Mehrmodensysteme verwendet

werden. Dieser Modenkonzert ermöglicht vollständiger angeregte Einkopplungsbedingungen, um auf praktische Art und Weise die gesamten Verbindungsverluste und Rückstreuverluste der Verbindung und jedes einzelnen Segments der Mehrmodenverbindung von einem einzigen Zugangspunkt aus zu messen, führt aber zusätzliche Verluste in das System ein und reduziert so den verfügbaren dynamischen Bereich des Instruments. Die erreichbare Auflösung im Mehrmodensystem wird durch die erhöhte Modendispersion leicht verschlechtert. Die Diskrepanz zwischen Einmoden- und Mehrmodenfasern führt ebenfalls zu weiteren Verlusten (für das reflektierte Licht), welche bei einer Messung berücksichtigt werden müssen.

Ein OFDR kann eine vollständige Charakterisierung der Einfügungsdämpfung, des Rückstreuverlustes und der Abstände zu Ereignissen in einem Lichtwellenleiterkabelbaum oder einer Lichtwellenleiterverbindung bieten. Es ist in der Lage, eine Verbindung mit weniger als 1 mm räumlicher Auflösung an zwei Punkten auszumessen. Eine typische OFDR-Kurve wird in Bild 15 gezeigt. Diese Instrumente sind für die verteilte Sensorik an Bord von Luftfahrzeugen von Interesse, z. B. zur Messung der Temperatur oder Dehnung an verschiedenen Punkten entlang einer Struktur, beispielsweise eines Flügels.

Die Messung des Rückstreuverlustes mittels OFDR basiert auf der Messung der Leistung einer Spitze in Relation zur durch eine bekannte Kalibrierungsquelle reflektierten Leistung (z. B. ein Bezugsreflektor, eine polierte Faserspitze, integrierte Streuung aus bekannter Faserlänge usw.). Die OFDR-Messung der Reflexion eines einzelnen Ereignisses entspricht dem Rückstreuverlust dieses Ereignisses.

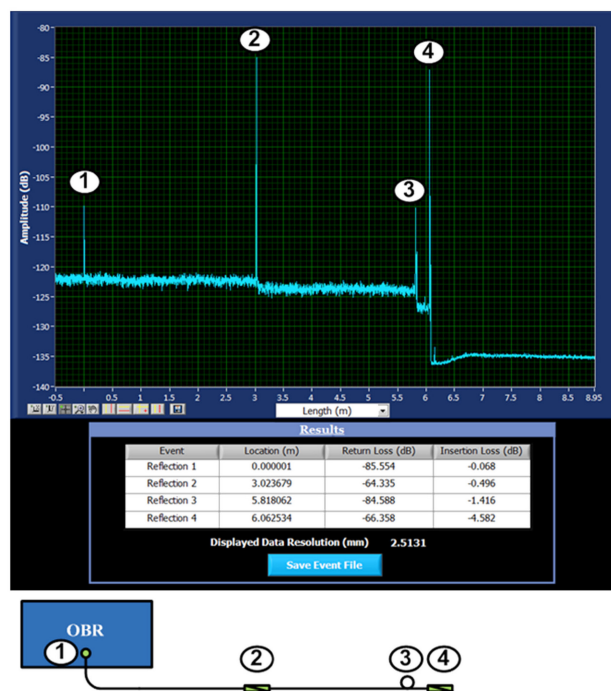


**Bild 15 — Beispiel für eine OFDR-Kurve, welche Ereignisreflexionen und automatische Messungen zeigt**

OFDR-Instrumente hoher Spezifikation verfügen typischerweise über Leistungsdaten im folgenden Bereich:

- < 3 mm räumliche Auflösung;
- 500 m Längenreichweite ohne Todeszone;
- Empfindlichkeit -120 dB;
- 0,1 dB Auflösung der Einfügungsdämpfung.

Aufgrund der Auflösung des Geräts kann ein OFDR Ereignisse innerhalb einer Steckverbinderbaugruppe auflösen.

Kommerziell verfügbare OFDR-Systeme kalibrieren den absoluten Reflexionsgrad durch Messung der Streuung eines bekannten Segments einer Faser innerhalb des Instruments. Dieses interne Verfahren führt zu einer genauen Kalibrierung des RBS-Niveaus. Dieses Verfahren der internen Kalibrierung vereinfacht den Messprozess, da das Instrument automatisch Änderungen der räumlichen Auflösung berücksichtigt. Der Benutzer muss die RBS-Koeffizienten für verschiedene Messungsaufösungen nicht selbst liefern.

Wenn weder eine kalibrierte Reflexion noch eine interne Kalibrierung verfügbar ist, kann eine Schätzung des RBS-Niveaus auch aus der Literatur übernommen werden. In der Regel wird für die meisten üblichen Faserarten der Koeffizient der Rayleigh-Rückstreuung bei verschiedenen Wellenlängen vom Faserhersteller geliefert. Obgleich die veröffentlichten RBS-Koeffizienten für die verschiedenen Arten von SMFs gut übereinstimmen, gibt es bei den MMFs gewisse Schwankungen. Die Messung von Rückstreuverlusten mittels veröffentlichter RBS-Koeffizienten unterliegt daher der gleichen Unsicherheit.

Weitere Informationen zu OFDR-Messungen sind in EN 2591-605 zu finden (derzeit in der Überprüfung).

### 7.2.1 Diskussion

Die Reflektometrie liefert einige Vorteile bei der Prüfung und Messung von Verbindungen in der Luft- und Raumfahrt, besonders die Prüfung von einem Ende aus, Footprinting, Fehlersuche und Auflösung mehrerer Ereignisse. Jedoch sorgt dies auch für finanzielle Kosten. Eine tiefgreifende Schulung des Bedienpersonals kann ebenfalls erforderlich sein. Ebenso wird in der Regel eine Modenkonditionierung zum Einsatz mit Mehrmodensystemen gefordert und die Betriebstemperaturen dieser Instrumente sind beispielsweise auf 0 °C bis 40 °C (–20 °C bis 60 °C Lagertemperatur) beschränkt, was in manchen Plattformumgebungen eine Einschränkung darstellen kann. Zusätzlich können bei jeder Art von Reflektometer starke Reflexionen das System übersättigen und so den Rauschpegel erhöhen.

Innerhalb der Normungsgemeinschaften gibt es derzeit Diskussionen hinsichtlich der absoluten Genauigkeit von Messungen des Rückstreuverlustes bei Messung durch unterschiedliche Instrumente, insbesondere bei Messung von Mehrmodenfasern. Messungen von Einmodenfasern sollten eine bessere Konsistenz aufweisen. Das Problem bezieht sich auf die Art und Weise, mit der das Licht die Moden der Faser ausfüllt (ab dem Ereignis und auch von der Faser selbst zurückgestrahlt), und wie dieses zwischen den verschiedenen Fasern gefiltert ist (z. B. wenn eine Einkopplungsfaser des Instruments vor der zu prüfenden Faser eingesetzt wird). Es wird darüber debattiert, ob das Instrument tatsächlich den „absoluten“ Rückstreuverlust oder den „relativen“ Rückstreuverlust misst (einfach relativ zum rückgestreuten Signal). Es lässt sich argumentieren, dass alle Messungen in Mehrmodenfasern in Relation zu einem Bezug oder einer Verteilung stehen. Jedoch schränkt diese Diskussion die Nützlichkeit dieser Instrumente bei der Abbildung und Fehlersuche von Avionik-Kabelbäumen in keiner Weise ein.

## 7.3 Footprinting

Das Footprinting eines optischen Kabelbaums ist ein Prozess, in welchem der „Zustand“ des Kabelbaums zu verschiedenen Zeitpunkten seiner Gebrauchsdauer aufgezeichnet und abgebildet wird. In der einfachsten Form kann Footprinting die Aufzeichnung der Einfügungsdämpfung verschiedener Pfade im Kabelbaum und durch verschiedene Steckverbinderkanäle umfassen. Dies kann zum Zeitpunkt der Herstellung, nach der Installation und zu verschiedenen Wartungszeitpunkten im Verlauf der Gebrauchsdauer des Luftfahrzeugs stattfinden.

Das Problem der Einkopplungsbedingungen wird vor allem dann wichtig, wenn Messungen von unterschiedlichen Organisationen ausgeführt werden. Um eine echte Verschlechterung der Leistungsfähigkeit des Systems aufzudecken, muss sichergestellt werden, dass die Einkopplungsbedingungen die Messungen nicht beeinflussen. Daher ist es wichtig, dass dieselben empfohlenen Einkopplungsbedingungen von allen eingesetzt werden, die Messungen am Kabelbaum und der Installation vornehmen.

Bei komplexen Netzwerken mit mehreren Pfaden kann die Einfügungsdämpfung dieser Pfade als Array oder Matrix von Werten aufgezeichnet werden. Die Leistungsfähigkeit kann mit dem grundlegenden „Footprint“ (sogenannte „Baseline“) zu späteren Zeitpunkten der Gebrauchsdauer der Installation verglichen werden. Um Messungen effizienter zu gestalten, können diese Messungen den Einsatz von automatischen Prüfeinrichtungen (ATE, en: automatic test equipment) anstelle einer manuellen Messung umfassen. Wenn ATE eingesetzt werden, sollte sichergestellt werden, dass die Einkopplungsbedingungen für alle Pfade der Prüfung korrekt sind. Manche ATE verwenden Schalter als Index zwischen den Pfaden und zur Ausführung der Messungen. Es sollte sichergestellt werden, dass diese Einrichtungen die Einkopplungsbedingung nicht beeinflussen. Der Einsatz von ATE kann eine große Anzahl an Verbindungen erfordern, die am Kabelbaum der Lichtwellenleiter vorgenommen werden müssen. Bei der Ausführung korrekter Messungen ist die Sauberkeit von entscheidender Bedeutung. Daher sollten alle Steckverbinder vor dem Anschluss, wenn möglich, inspiziert und gereinigt werden. Freie Steckverbinder sollten geschützt werden (üblicherweise mit Endstopfen), bis der Anschluss erforderlich ist. Zur Sammlung großer Mengen an Daten können ATE, wenn gefordert, über Funktionen der Datenerfassung und Speicherung von Ergebnissen an Bord sowie Zuordnungen für ein „Bestehen“ und „Nichtbestehen“ verfügen.

Ein umfassenderes Footprinting kann den Einsatz von Instrumenten wie OTDR und OFDR umfassen (optisches Zeitbereichsreflektometer und optisches Frequenzbereichsreflektometer). Diese Instrumente können den Verlust durch einen Kabelbaum abbilden und die einzelnen Werte für Einfügungsdämpfung und Rückstreuverlust der Steckverbinder und Bauteile im Pfad ausgeben. Durch Aufzeichnung einer Baseline-Kurve des Footprintings ist es möglich, zu einem späteren Zeitpunkt ermittelte Kurven mit jener Baseline-Aufzeichnung zu vergleichen. Dadurch kann die Verschlechterung bestimmter Abschnitte oder Steckverbinder aufgedeckt werden. Der Vergleich zwischen aktuellen und früheren Kurven kann automatisch durch Standard-OTDR-Software vorgenommen werden, was Mess- und Diagnosearbeiten sehr vereinfacht. Diese Instrumente beruhen auf Rückstreulicht von Fehlerstellen und Unregelmäßigkeiten eines Lichtwellenleitersystems. Sie bieten den Vorteil, dass nur an einem Ende ein Zugriff auf den Kabelbaum erforderlich ist, obgleich sie komplexer und teurer sind als einfache Kombinationen aus Lichtquelle und Leistungsmesser. Diese Instrumente wurden in Abschnitt 7 zuvor zusammengefasst.

## 8 Allgemeine Erwägungen zur Prüfung und Messung in Lichtwellenleitersystemen

Neben den **Einkopplungsbedingungen**, die eine entscheidende Bedeutung für die Prüfung von Mehrmodensystemen in der Avionik haben, sind die folgenden Faktoren alle wichtig, um präzise und wiederholbare Messungen in Lichtwellenleitersystemen zu ermöglichen.

Es wird angemerkt, dass Aspekte wie die Qualität und der Zustand der Bauteile gleichermaßen für Einmoden- und Mehrmodensysteme von Belang sind, wobei die deutlich kleineren Faserkerne in Einmodensystemen Überlegungen hinsichtlich Fehlern und Schwankungen umso wichtiger machen.

### 8.1 Instrumentenprobleme

- Zusammenpassende Quellenwellenlänge und (kalibrierte) Detektionswellenlänge an Leistungsmessern.
- Quellenstabilität (Schwankungen der Leistungsabgabe im Laufe der Zeit nach einer Aufwärmphase).
- Aktiver Bereich des Leistungsmessers (Leistungsaufnahme von einer Messleitung des Empfängers).
- Linearität des Leistungsmessers.
- Stabilität des Leistungsmessers im Laufe der Zeit.