E DIN EN 4533-001:2025-08 (D)

Erscheinungsdatum: 2025-06-27

Luft- und Raumfahrt - Faseroptische Systeme - Handbuch - Teil 001: Anschlussverfahren und Werkzeuge; Deutsche Fassung ASD-STAN prEN 4533-001:2025

Inhalt

Seite

Vorwort ... 11

Einleitung ... 12
0.1 Das Handbuch ... 12
0.2 Hintergrund ... 12

1 Anwendungsbereich ... 13
1.1 Allgemeines ... 13
1.2 Notwendigkeit von hochintegrierten Anschlüssen ... 14

2 Normative Verweisungen ... 14

3 Begriffe ... 14

4 Auswahl der Bauteile ... 14
4.1 Elemente ... 14
4.2 Lichtwellenleiterkabel ... 15
4.2.1 Allgemeines ... 15
4.2.2 Aufbau des Kabels ... 15
4.2.3 Auswahl der Faser ... 16
4.2.4 Beschichtungen und Polsterungen — Eine Anmerkung zur Terminologie ... 18
4.3 Primärpolsterungswerkstoffe ... 19
4.3.1 Funktion ... 19
4.3.2 Acrylat ... 19
4.3.3 Polyimid ... 19
4.3.4 Silicium ... 20
4.3.5 Zugentlastungselemente ... 20
4.4 Außenmantel ... 20
4.5 Lichtwellenleiterverbindungen (Steckverbinder) ... 21
4.5.1 Einleitung ... 21
4.5.2 Die optische Schnittstelle ... 22
4.5.3 Einwege-Verbindungen/Steckverbinder ... 29
4.5.4 Mehrwege-Verbindungen/Steckverbinder ... 29
4.5.5 Auswahl der Werkzeuge ... 30

5 Gesundheits- und Sicherheitsaspekte ... 31
5.1 Allgemeines ... 31
5.2 Chemikalien ... 31
5.3 Scharfe Kanten ... 32

6 Anschlussprozess ... 32
6.1 Ziel ... 32
6.2 Vorbereitung von Kabeln ... 33
6.2.1 Allgemeines ... 33
6.2.2 Zuschneiden ... 33
6.2.3 Entfernen des Außenmantels ... 34
6.2.4 Werkzeuge für die Handhabung von Kabeln (Greifen des Kabels) ... 39
6.2.5 Zuschneiden/Entfernen von Zugentlastungselementen ... 40
6.3 Entfernen von Sekundärbeschichtung(en) ... 42
6.4 Entfernen der Primärbeschichtungen ... 42

6.4.1 Allgemeines ... 42
6.4.2 Mechanische Techniken für das Entfernen von Primärbeschichtungen ... 43
6.4.3 Alternative Verfahren ... 49
6.4.4 Problematische Beschichtungen — Polyimid und Silicium ... 51
6.4.5 Nachweis verringerter Festigkeit beim Abstreifen von Polsterungsbeschichtungen ... 53
6.4.6 Reinigen oder nicht reinigen ... 54
6.5 Klebstoffe ... 55
6.5.1 Allgemeines ... 55
6.5.2 Klebstofftypen ... 55
6.5.3 Bedeutung der Glasübergangstemperatur (T_g) ... 57
6.5.4 Aushärtungsprogramm für Epoxidharze ... 59
6.5.5 Benutzerfreundlichkeit ... 62
6.5.6 Qualifikation ... 65
6.6 Vorbereitung von Steckverbindern ... 66
6.6.1 Trockenes Anpassen ... 66
6.7 Anbringen von Fasern an der Endstelle ... 67
6.7.1 Klebstoffauftrag ... 67
6.7.2 Bewährte Verfahrensweise für das Einführen der Faser ... 70
6.8 Aushärten des Klebstoffs ... 74
6.8.1 Allgemeines ... 74
6.8.2 Ausrichtung ... 74
6.8.3 Ausrüstung für das Aushärten ... 75
6.9 Entfernen überschüssiger Faser ... 78
6.9.1 Allgemeines ... 78
6.9.2 Grobes Ritzen nach dem Aushärten ... 79
6.9.3 Vorritzen ... 80
6.9.4 Sicherheit ... 80
6.9.5 Ritzwerkzeuge ... 81
6.9.6 Handwerkzeuge mit Federklingen ... 81
6.9.7 Ritzen von Fasern in Ferrulen mit mehreren Fasern ... 82
6.10 Polieren ... 82
6.10.1 Begründung ... 82
6.10.2 Leistungsmetrik ... 82
6.10.3 Geometrien der Endfläche ... 83
6.10.4 Parameter für die Endflächengeometrie ... 84
6.10.5 Polierschritte ... 94
6.10.6 Verfahren für das Kontrollieren der Endflächengeometrie ... 108

7 Inspektion zu Beginn der Gebrauchsdauer ... 115
7.1 Allgemeines ... 115
7.2 Optische oder visuelle Inspektion (Sichtprüfung) ... 115
7.3 Interferometrische Inspektion ... 117
7.3.1 Allgemeines ... 117
7.3.2 Inspektion und Kriterien für „Bestehen“ und „Nichtbestehen“ ... 119

Literaturhinweise ... 123

Bilder

Bild 1 — Typischer Aufbau von Lichtwellenleiterkabeln für die Luft- und Raumfahrt ... 16

Bild 2 — Beispiel für Mehrwegekabel ... 18

Bild 3 — Schnittstelle mit Stirnflächenkopplung für Lichtwellenleiter ... 22

Bild 4 — Schnittstelle mit Winkelschliff-Steckverbinder (APC) ... 23

Bild 5 — Lichtwellenleiterschnittstellen mit aufgeweitetem Strahl (GRIN = Gradientenindex) 24

Bild 6 — Beispiel für einen Steckverbinder mit aufgeweitetem Strahl mit integrierten Optiken 25

Bild 7 — Beispiel für Steckverbinder mit aufgeweitetem Strahl mit entfernbaren Endstellen. Das Linsenelement ist am Ende der Endstellen sichtbar 25

Bild 8 — Detaildarstellung der Endstelle von Lichtwellenleiter, welche die Keramikferrulen zur genauen Ausrichtung der Faser innerhalb einer Verbindung zeigt 26

Bild 9 — In eine Keramikferrule eingelegte Mehrmodenfaser (Endansicht) 26

Bild 10 — Eine MT-Ferrule mit mehreren Fasern 27

Bild 11 — Eine Mehrmodenfasern (Endansicht) eingelegt in eine MT-Ferrule mit mehreren Fasern 28

Bild 12 — Beispiele für Mehrwege- und Einwege-Steckverbinder 30

Bild 13 — Typischer Mehrwege-Steckverbinder für Lichtwellenleiter (mit angebrachter Stützhülse) 30

Bild 14 — Mehrwege-Steckverbinder mit einem Ferrulenaufbau (MT) aus mehreren Fasern 30

Bild 15 — Beschädigung eines Werkzeugs aus gehärtetem Stahl nach dem Schnitt durch einen Quarzglas-LWL 33

Bild 16 — Abstreifwerkzeug mit Spitze aus Wolframcarbid zur Durchschneidung von Lichtwellenleiterkabeln 34

Bild 17 — Angeschrägtes Ende einer Polyimidfaser 34

Bild 18 — Beispiel eines Rotationswerkzeuges (Einsatz durch Einführung und Rotation um die Kabelummantelung) 35

Bild 19 — Beispiel eines Stripmaster-Werkzeugs und Klingensatzes 35

Bild 20 — Messerartige Klingen (Stripmaster-Werkzeug) 36

Bild 21 — Beispiel einer abgestreifen Ummantelung, zeigt ein gutes Abstreifergebnis durch Messerklingen 36

Bild 22 — Gesenkartige Klingen am Stripmaster-Werkzeug 36

Bild 23 — Beispiel einer abgestreiften Ummantelung, die „Ohren“ aufweist, welche durch Einschluss der verbleibenden Ummantelung in den Gesenkklingen verursacht wurden 37

Bild 24 — Scherenartige Klingen an einem Mantelabstreifer 37

Bild 25 — Links: Präzisionskabelabstreifer mit mehreren Öffnungen Rechts: Abstreifer für elektrische Kabel 38

Bild 26 — Abstreiföffnungen von Werkzeugen sollten so gewählt werden, dass diese gerade etwas größer sind als die darunterliegende Beschichtung oder Kabelschicht 39

Bild 27 — Schaden am Zugentlastungselement durch Öffnung falscher Größe 39

Bild 28 — Schäden an Lichtwellenleiterkabel durch Kabelklemmplatte 40

Bild 29 — Werkzeug für die Handhabung von Lichtwellenleiterkabeln 40

Bild 30 — Sequenz, die das Verfahren das „Schneidens und Abstreifens“ zur Herstellung eines ordentlichen Abschlusses zeigt 41

Bild 31 — Unscharfes Zugentlastungselement. Ergebnis stumpfer Klingen und verwobener Fasern 41

Bild 32 — Einige Abstreifwerkzeuge zum Entfernen der Primärbeschichtung von Lichtwellenleitern 44

Bild 33 — Abgewinkelt zur Faser gehaltenes Abstreifwerkzeug 45

Bild 34 — Korrekt gehaltenes Abstreifwerkzeug zur Minimierung der Faserbiegung 45

Bild 35 — Neue Klingenöffnung 46

Bild 36 — Klingen mit Versatz 46

Bild 37 — Abgenutzte Werkzeugklingen 46

Bild 38 — Scharfer Grat an der Öffnung eines „neuen“ Werkzeugs 47

Bild 39 — Links: Automatisierter Abstreifer für Primärbeschichtungen — Rechts: Zusammengesetztes Bild mehrerer Abstreifklingen 48

Bild 40 — Rechts: Flachfaserabstreifer zum Abstreifen von Kabel mit mehreren Fasern — Links: Ein Handhabungswerkzeug für Flachkabel ist dargestellt 49

Bild 41 — Graph für die Festigkeit der Faser nach dem Abstreife n mit verschiedenen Werkzeugen 53

Bild 42 — Schematische Darstellung, die die Erweichung des Klebstoffes (Verringerung des Steifigkeitsmoduls) um den T_g-Wert zeigt 58

Bild 43 — Schematische Darstellung eines Faserrückstoßes (linkes Bild: davor, rechtes Bild: danach), welche 3D-Profile der Bewegung nach Exposition gegenüber hohen Temperaturen nahe der Glasübergangstemperatur eines Klebstoffes zeigt 58

Bild 44 — Vordosierte Menge an Epoxidharz und -härter in einem dosierten Mischpäckchen 63

Bild 45 — Anmischen von Epoxid-Klebstoffen innerhalb eines Mischpäckchens vor dem Auftragen. Oberes Bild: Entfernen der Trennklemme — Mittleres und unteres Bild, Anmischen im Päckchen 64

Bild 46 —Das rechte Bild zeigt eine kleine Zentrifuge zum Entfernen von Luftbläschen bei größeren Herstellungsprozessen 65

Bild 47 — Gemischtes Epoxid in Spritze eingezogen, bereit für den Auftrag 65

Bild 48 — Verringerte Festigkeit von freigelegten Fasern nach dem trockenen Anpassen in einer Keramikferrule 66

Bild 49 — Rückseitiger Auftrag eines Klebstoffes auf die Endstelle eines Steckverbinders. Spritzennadel in die Rückseite einer Endstelle eingeführt 68

Bild 50 — Winzige Epoxidwulst an der Ferrulenspitze weist darauf hin, dass das Bohrloch mit Klebstoff gefüllt ist 68

Bild 51 — Spritzenauftrag über die Vorderseite bei Endstelle nach EN 4639 68

Bild 52 — Zu wenig Klebstoff bedeutet schlechten Schutz der Faser im umkreisten Bildausschnitt 69

Bild 53 — Aus dem Ende des Ferrulenkörpers austretender, überschüssiger Klebstoff 69

Bild 54 — Übermäßiger Klebstoff an der Endfläche der Ferrule 69

Bild 55 — Korrekt dosierte Klebstoffmenge 70

Bild 56 — Falsche Abstreiflängen führen zu Mikrokrümmungen im Steckverbinder 71

Bild 57 — Korrekte Klebstoffmenge auf der Endfläche der Ferrule 71

Bild 58 — Übermäßiger Klebstoff an der Fase der Ferrule (rechtes Bild nach Politur) 72

Bild 59 — Auftrag des Epoxids in eine MT-Ferrule mit mehreren Fasern 72

Bild 60 — Eingeführte Fasern in einer Ferrule mit mehreren Fasern 73

Bild 61 — Crimpring an der Rückseite der Endstelle eines Lichtwellenleiters 73

Bild 62 — Doppelcrimp zwischen Lichtwellenleiterkabel und Endstelle 74

Bild 63 — Typischer Ofen für die Aushärtung von Steckverbindern für Lichtwellenleiter 75

Bild 64 — Eine geteilte Schutzhülse aus Metall ist über der Endstelle zum Schutz der freigesetzten Faser während der Aushärtung positioniert 76

Bild 65 — Beispiel eines Ofens zur schnellen Aushärtung, der durch Absorption von Infrarotstrahlung arbeitet 77

Bild 66 — Beispiel für einen batteriebetriebenen Kompaktofen 78

Bild 67 — Ritzen mittels Handritzstift und Bruchverfahren 79

Bild 68 — Handritz- und Bruchverfahren zum Einritzen. Unteres Bild zeigt das Ergebnis 79

Bild 69 — Beispiel eines stiftartigen Ritzwerkzeugs (oben) und eines Kachelritzwerkzeugs aus Keramik (unten) 81

Bild 70 — Federklingen-Ritzwerkzeuge mit voreingestellter Ritzlänge und Ferrulenausrichtung 82

Bild 71 — Idealisierte flache Steckverbinder, PC-Steckverbinder und angeschrägte PC-Steckverbinder 83

Bild 72 — Unterschied zwischen den Messungen sphärischer und ebener Faserhöhe 85

Bild 73 — Faserunterschneidung und Faserüberstand in einem PC-Steckverbinder 85

Bild 74 — Erlaubte Unterschneidungsgrenzen eines PC-Steckverbinders 87

Bild 75 — Stärkerer Faserrückstoß mit Erhöhung des Überstandes 88

Bild 76 — Versatz der Spitze in einem PC-Steckverbinder 89

Bild 77 — Interferometer für die Inspektion von Simplex- und Flachbandverbindungen 93

Bild 78 — Beispiel der Ausgabe eines Interferometers (Steckverbinder mit einer Faser) 93

Bild 79 — Grafische Darstellung der Interferometer-Messung eines Anschlusses mit mehreren Fasern 94

Bild 80 — Beschädigung der Polierfolie durch scharfe Faserkanten 95

Bild 81 — Vorpolierungsschritt zum Entfernen übermäßiger Längen und scharfer Kanten der Faser 96

Bild 82 — Auswahl von Polierfolien, die üblicherweise bei der Politur von Fasern der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz kommen 96

Bild 83 — Trägerunterlagen verschiedener Härten schränken den Krümmungsradius bei einer Politur von flachem Zustand in ein PC-Profil ein 99

Bild 84 — Typische Materialien für die Handpolitur 100

Bild 85 — Handpolitur mittels klassischer Achtform 100

Bild 86 — Poliermuster 101

Bild 87 — Einfache Polierscheiben 102

Bild 88 — Polierscheiben verbesserter Konstruktion 102

Bild 89 —Automatisierte Faserpoliermaschine; Einschub zeigt eine Vorrichtung für die Polierung von mehreren Fasern. Einschub zeigt eine Vorrichtung für die Polierung von mehreren Fasern 104

Bild 90 — Kommerziell verfügbare, tragbare Poliermaschine 105

Bild 91 — Vergrößertes Bild einer Faser während der anfänglichen Politur mit 9-µm-Aluminiumoxidfolie 106

Bild 92 — Faserendfläche während der Zwischenpolitur (mit 1-µm-Folie) 107

Bild 93 — Endfläche der Endstelle nach feiner Politur (mittels 0,5-µm-Diamantfolie) 108

Bild 94 — Unterschiedliche Härten der Polierscheiben, Auswirkungen auf die Politur 111

Bild 95 — Links: vor der „Reinigung“; — Rechts: nach der „Reinigung“ 115

Bild 96 — Beispiele für Tischmikroskope für die Sichtprüfung 116

Bild 97 — Beispiele für tragbare Sichtprüfungseinrichtungen; Oben: direkt einsehendes, tragbares Betrachtungsgerät; Unten: indirekt einsehendes, tragbares Sondensystem) 117

Bild 98 — Oben: Sondensystem im Einsatz, Unten: eine Auswahl an Adapterspitzen für das Sondensystem 117

Bild 99 — Interferometrische Inspektion im Vergleich zur optischen/visuellen Inspektion (Sichtprüfung) 118

Bild 100 — Robustes und tragbares Interferometer für Lichtwellenleiter 119

Bild 101 — Beispiele für die Eigenschaften von Endflächen und qualitative Inspektionskriterien 120

Bild 102 — Veranschaulichung der Faserendflächen-Zoneneinteilung 121

Tabellen

Tabelle 1 — Grundlegende Eigenschaften einer Faser nach ITU-Regeln 17

Tabelle 2 — Reflexion und Verlustleistung von optischen Steckverbindern 23

Tabelle 3 — Vor- und Nachteile von Klebstoffarten 56

Tabelle 4 — Auswirkung des Aushärtungsprogramms auf T_g 60

Tabelle 5 — PC-Parameter für Simplex-Fasern 91

Tabelle 6 — Beispiel eines maschinellen Polierprozesses 113

Tabelle 7 — Beispiel für ein Polierverfahren eines MT-Ferrulenaufbaus mit mehreren Fasern (für Mehrmodenaufbauten aus 12 Fasern) 114