

Sicherheitsaspekte beim Einsatz von Glasfasern zur Lichtleitung

T. Sandrock

CeramOptec GmbH, Siemensstraße 44, 53121 Bonn

Tel.: 0228 / 979670, Fax: 0228 / 9796799, email: thomas.sandrock@biolitec.com

1. Grundlagen der Lichtwellenleitung mit Glasfasern

Die der optischen Informations- und Leistungsübertragung zugrunde liegende Idee der Lichtwellenleitung mittels interner Totalreflexion^{1,2}, ist bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Seit 1954 werden Glasfasern/Glasfaserbündel zur Bildübertragung eingesetzt³. Aufgrund ihrer hohen Transmissionsverluste ($\alpha \approx 500 \text{ dB km}^{-1}$) waren diese Fasern jedoch weder zur Signalübermittlung über größere Entfernungen noch zur Übertragung (hoher) optischer Lichtleistungen geeignet. Erst die Entwicklung sogenannter „low-loss fibres“, d.h. Fasern mit geringer Dämpfung ($\alpha \leq 500 \text{ dB km}^{-1}$)⁴ ermöglichte die Verwendung von Glasfasern als Lichtwellenleiter in einer Vielzahl industrieller und medizinischer Anwendungen.

1.1 Struktur eines Lichtwellenleiters

Eine lichtleitende Glasfaser besitzt einen Faserkern (engl. „core“) mit Radius a und hoher Brechzahl n_1 , der von einem Fasermantel (engl. „cladding“) mit Radius b umgeben ist. Das Material des Fasermantels weist einen Brechungsindex n_2 auf, der niedriger als der des Faserkerns ist. Der Übergang von n_1 zu n_2 kann sprunghaft erfolgen. Man spricht dann von einer Stufenindexfaser (engl. „step index fibre“). In Abb. 1 ist der Verlauf der Brechzahl n als Funktion des Faserradius r einer solchen Stufenindexfaser dargestellt.

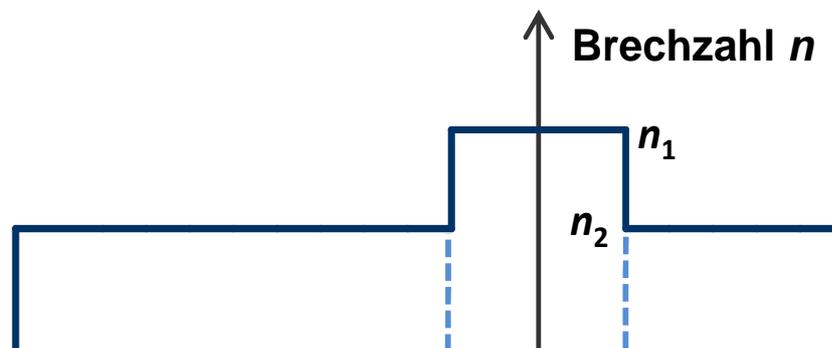


Abb. 1: Brechzahlprofil einer Glasfaser; dargestellt sind Faserkern mit Radius a und Brechzahl n_1 , sowie Fasermantel mit Radius b und Brechzahl n_2 .

Nimmt die Brechzahl n_1 des Faserkerns in radialer Richtung nach außen hin kontinuierlich ab, bis der Brechungsindex n_2 des Fasermantels erreicht wird, so spricht man von einer Gradientenindexfaser (engl. „gradient index fibre“). Brechzahlprofile von Stufenindex- und Gradientenindexfasern sind in Abb. 2 gezeigt.



Abb. 2: Brechzahlprofile einer Stufenindexfaser (links) und einer Gradientenindexfaser (rechts).

Um die Faser vor Umwelteinflüssen wie mechanischer oder chemischer Belastung zu schützen, wird sie mit Schutzschichten (engl. „coating“) aus Polymeren (z.B. Acrylat, Polyimid, Silikon) überzogen. Die Schichtdicke dieser Coatings beträgt je nach Material zwischen 5 und 100 μm . Diese Kunststoffe verhindern u.a., dass an der Faseroberfläche vorhandene Mikrorisse sich durch die Faser fortsetzen und so die mechanische Stabilität der Glasfaser deutlich reduzieren und dass Feuchtigkeit in die Glasstruktur eindringt, was zu einer erhöhten Dämpfung führen kann. Abb. 3 ist die schematische Darstellung einer Glasfaser mit Faserkern, -mantel und Coating.

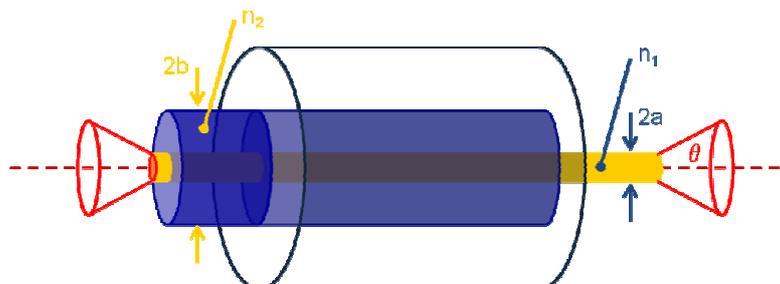


Abb. 3: schematischer Aufbau einer Stufenindexfaser. Der Faserkern hat einen Radius a und eine Brechzahl n_1 . Der Fasermantel mit Radius b weist einen niedrigeren Brechungsindex n_2 auf. θ ist der maximale Winkel, unter dem Licht in den Faserkern eingekoppelt werden kann bzw. unter welchem Licht aus dem distalen Ende der Faser emittiert werden kann.

Zusätzlich können Glasfasern mit weiteren Kunststoffschichten (engl. „jacket“) z.B. aus Nylon oder ETFE versehen werden. Diese schützen den Lichtwellenleiter vor Umwelteinflüssen und erhöhen die mechanische Belastbarkeit.

1.2 Numerische Apertur

Lichtwellenleitung in Glasfasern beruht auf dem physikalischen Prinzip der Totalreflexion an der Grenzfläche Faserkern – Fasermantel. Totalreflexion tritt auf, wenn der Winkel θ , unter dem sich ein Lichtstrahl im Kern relativ zur Faserachse (z-Richtung) ausbreitet, den Grenzwinkel θ_c nicht überschreitet. Für θ_c gilt:

$$\text{Gl. 1} \quad \theta \leq \theta_c \text{ mit } \cos(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$$

Nach dem Brechungsgesetz von W. Snellius (1621)⁵ gilt für den Grenzwinkel der Totalreflexion:

$$\text{Gl. 2} \quad n_0 \sin(\theta_i) = n_1 \sin(\theta_c)$$

Hierbei ist θ_i der maximale Eintrittswinkel, unter dem ein Lichtstrahl noch in den Faserkern eingekoppelt werden kann bzw. der maximale Austrittswinkel, unter dem Licht aus dem Faserkern wieder austreten kann. n_0 ist die Brechzahl des Mediums, in dem sich das Licht außerhalb der Faser ausbreitet.

Für Stufenindexfasern folgt aus Gl. 1 und Gl. 2 für die numerische Apertur, wie sie von E. Abbe definiert wurde:

$$\text{Gl. 3} \quad NA = n_0 \sin(\theta_i) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Gl. 3 zeigt, dass die optische Kenngröße numerische einer Glasfaser, die den maximalen Akzeptanzwinkel darstellt, von den Brechungsindizes n_1 , n_2 des Faserkerns bzw. des Fasermantels abhängen, welche materialabhängige Größen sind. Ausschließlich die Wahl der verwendeten Kern- und Mantelmaterialien bestimmt die numerische Apertur, nicht jedoch das geometrische Faserdesign.

Die Lichtaustrittskegel für verschiedene NA-Werte, die in unterschiedlichen häufig eingesetzten Glasfasern verwendet werden, sind in Abb. 4 schematisch dargestellt. Glasfasern mit einer numerischen Apertur $NA = 0,22$ (Standard-NA) werden sowohl zur Signalübermittlung in der optischen Telekommunikation als auch für die Leistungsübertragung in Anwendungen der industriellen Materialbearbeitung verwendet. Strahlung heutiger Hochleistungs-Faserlaser mit exzellenter Strahlqualität

wird oftmals in sogenannten LMA-Glasfasern (engl. „large mode area“) übertragen. Diese speziellen Glasfasern besitzen einen relativ großen Faserkern (typisch: 20 μm) bei gleichzeitig reduzierter NA (typisch: $\text{NA} = 0,06$) und ermöglichen so den Transport hoher Lichtleistungen mit beugungsbegrenzter Strahlqualität. (Laser-) Licht hoch divergenter Strahlquellen kann nur in Glasfasern mit hoher NA (z.B. $\text{NA} = 0,36$) geführt werden.

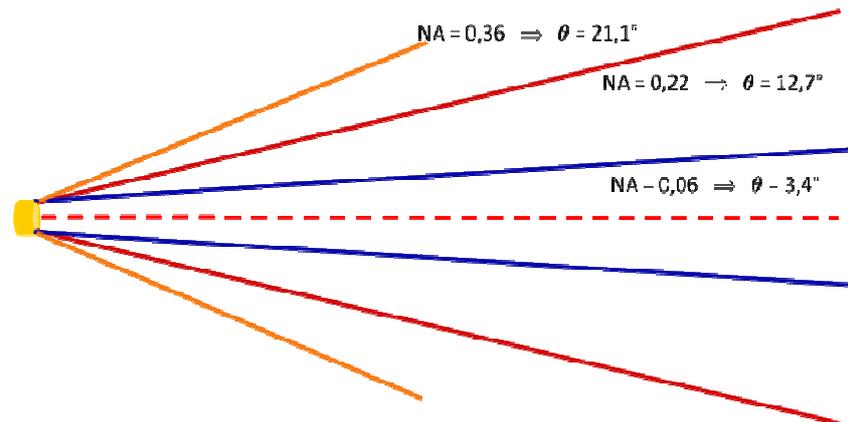


Abb. 4: Divergenzwinkel θ für verschiedene Werte der numerischen Apertur; $\text{NA} = 0,36$ ist eine numerische Apertur, wie sie bei hochdivergenten Strahlquellen (z. B. Laserdioden für medizinische Anwendungen) eingesetzt wird. $\text{NA} = 0,22$ ist die numerische Apertur sogenannter Standardfasern. Fasern zur Übertragung hoher optischer Leistung mit exzellenter Strahlqualität (z. B. multi-kW-Faserlaser zur Materialbearbeitung) besitzen eine niedrige numerische Apertur $\text{NA} = 0,06$.

1.2.1 Einfluss der NA auf sicherheitsrelevante Parameter

Die numerische Apertur einer Glasfaser definiert den maximalen Divergenzwinkel, unter dem Strahlung aus dem Kern einer Glasfaser austreten kann, und hat somit unmittelbaren Einfluss auf Größen, die für Fragen der Lasersicherheit von Wichtigkeit sind, wie z.B. die Leistungsdichte und den Sicherheitsabstand (engl. „nominal ocular hazard distance“, NOHD). Am folgenden Beispiel soll dies verdeutlicht werden:

Angenommen sei ein Laser bei einer Laserwellenlänge $\lambda = 1080 \text{ nm}$ mit kontinuierlicher Leistungsabgabe (cw-Betrieb) über ein Lichtwellenleiter-Strahlführungssystem. Berechnet man zunächst die maximal zulässige Bestrahlung (MZB) gem. EN 60825-1, also die Leistungsdichte, für die keine irreparable Schädigung der Netzhaut zu erwarten ist, so erhält man:

$$\text{Gl. 4} \quad E_{\text{MZB}} = 5 \text{ mW cm}^{-2}.$$

a) Berechnung der Leistungsdichte

Berechnet werden sollen die Leistungsdichten E für Glasfasern mit numerischen Aperturen von 0,06 bzw. 0,36, jeweils in einem Abstand von $z = 1$ m hinter dem distalen Faserende. Nach Gl. 3 folgen für den Winkel θ Werte von ca. $3,4^\circ$ bzw. $21,1^\circ$:

Strahlradius r , Abstand vom Faserende z sind über den Winkel θ verknüpft:

$$\text{Gl. 5} \quad \tan \theta = \frac{r}{z}$$

Somit ergibt sich als Strahlquerschnittsfläche A :

$$\text{Gl. 6} \quad A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot z^2 \cdot \tan^2 \theta$$

Die Leistungsdichte E ist definiert als Quotient aus optischer Leistung P und Fläche A :

$$\text{Gl. 7} \quad E = \frac{P}{A}$$

Anhand Tab. 1 ist ersichtlich, dass die maximal zulässige Bestrahlung in drei von vier Fällen selbst in einem Abstand von 1 m deutlich überschritten wird. Nur bei geringer Laserleistung (10 W) und stark divergentem Strahl ($NA = 0,36$) genügt ein Abstand von 1m, um den Grenzwert MZB einzuhalten.

		NA	
		0,06	0,36
P [W]	10	88	2
	1000	8810	214

Tab. 1: Leistungsdichte in $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ für Fasern mit $NA = 0,06$ bzw. $0,36$ bei Leistungen $P = 10\text{W}$ bzw. 1kW jeweils im Abstand von 1 m nach dem distalen Faserende

b) Berechnung des Sicherheitsabstandes NOHD

Als NOHD gilt der Abstand, bei dem die maximal zulässige Bestrahlung gerade nicht überschritten wird. Dieser berechnet sich gem. EN 60825-1 für die angenommene Situation als:

$$\text{Gl. 8} \quad \text{NOHD} = \frac{\sqrt{4P/(\pi \cdot E_{\text{MZB}})} - a}{\theta}$$

Hierbei sind P die Laserleistung, E_{MZB} die maximal zulässige Bestrahlung, a der Faserkernradius und θ der maximale Austrittswinkel.

In Tab. 2 sind die Sicherheitsabstände wiederum für die zwei exemplarischen NAs bei zwei verschiedenen Leistungen berechnet. Es zeigt sich, dass der NOHD für hoch-brillante Hochleistungslaser (z. B. Faserlaser), wie sie in der industriellen Materialbearbeitung eingesetzt werden, einige 10 m betragen kann. Selbst für Lasersysteme mit niedrigen Leistungen und hoher Divergenz, wie sie u.a. in der Medizin verwendet werden, sind Sicherheitsabstände von mehr als 1 m zu beachten.

		NA	
		0,06	0,36
P [W]	10	8,4	1,4
	1000	84,1	13,7

Tab. 2: Sicherheitsabstand (engl. „nominal ocular hazard distance“, NOHD) in m

Zu beachten ist, dass beide Berechnungen, sowohl für die Leistungsdichte als auch für den NOHD, davon ausgehen, dass tatsächlich Laserlicht unter dem maximal möglichen Winkel emittiert wird, und dass die optische Leistung homogen über den Strahlquerschnitt verteilt ist. Beides sind idealisierte Annahmen.

Wird Laserstrahlung mit geringerer Divergenz in eine Glasfaser eingekoppelt, als nach der NA möglich wäre, so kann trotz Lichtwellenleiterlängen von mehreren Metern die NA beim Lichtaustritt nicht „ausgefüllt“ sein. D.h., dass Laserstrahlung mit geringerer Divergenz emittiert wird, als nach der numerischen Apertur der Faser zu erwarten wäre (vgl. Abb. 5). Somit können u.U. auch deutlich höhere Leistungsdichten E erreicht werden als nach Gl. 5 bis Gl. 7 berechnet.

Auch die Annahme einer homogenen Leistungsverteilung, eines sogenannten „flat top“-Profils, wird in der Regel nicht zutreffen. Tatsächlich wird durch Glasfasern die Laserstrahlung mit einem Gauß-ähnlichen Intensitätsprofil (vgl. Abb. 6) übertragen. Dies bedeutet, dass in Zentrum des Laserstrahl die höchste Intensität zu erwarten ist. Somit können für diesen Bereich deutlich größere Sicherheitsabstände notwendig sein, als gem. Gl. 8 berechnet.

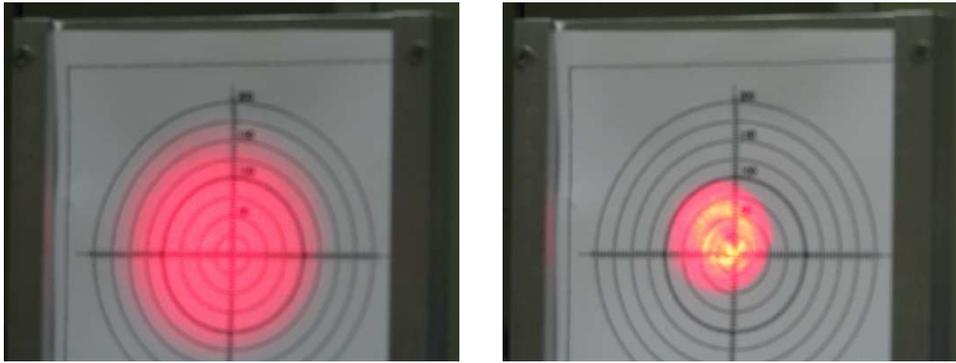


Abb. 5: links: Beispiel für einen emittierten Laserstrahl, der die NA der Glasfaser komplett ausfüllt.
rechts: In dieselbe Glasfaser wurde ein Laserstrahl geringerer Divergenz eingekoppelt. Man erkennt, dass auch die emittierte Strahlung eine geringere Divergenz aufweist als nach der NA der Faser zu erwarten wäre. Dies bedeutet eine höhere Leistungsdichte als bei kompletter Ausnutzung der NA.

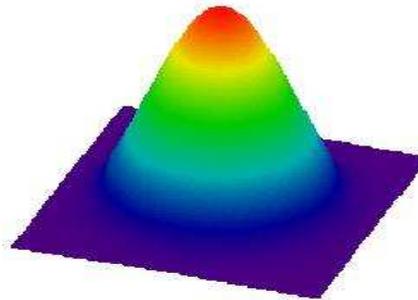


Abb. 6: Leistungsverteilung in einem Laserstrahl mit Gauß-ähnlichem Strahlprofil. Die maximale Leistung wird im Zentrum des Strahls erreicht.

2. Lasersicherheit von Glasfasern als Lichtwellenleiter

Die Frage nach der Sicherheit von Glasfasern ist vor allem die Frage, wie unbeabsichtigte Freisetzung von Laserstrahlung vermieden werden kann, aber auch, wie sekundäre Gefahren durch z.B. die thermische Zerstörung des Lichtwellenleiters zu minimieren sind. Ursachen nicht gewollter Laseremission sind vor allem Beschädigung oder Zerstörung der Glasfaser bzw. des Glasfaserkabels, Fehlfunktionen des Lasersystems sowie der unsachgemäße Umgang mit Lasersystem und/oder Strahlführungssystem.

2.1. Entwicklung eines angepassten Strahlführungssystems

Bereits bei der Entwicklung bzw. Installation eines Lasersystems können Risiken beim Betrieb des Lasersystems reduziert werden, wenn das Strahlführungs-

system auf etwaige Besonderheiten der Applikation und der verwendeten Strahlquelle angepasst ist:

- Welcher Laser wird verwendet?
Hierbei sind insbesondere die Laserparameter Wellenlänge, Leistung und Betriebsart (kontinuierliche (engl. „continuous wave“, CW) oder gepulste Leistungsabgabe ...) zu berücksichtigen.
- Wie soll die Laserstrahlung vom Laser zum Werkstück geleitet werden?
Handgeführte Bearbeitungseinheiten erfordern andere Lichtwellenleiter als bewegliche, Roboter-basierte oder fester Strahlführungssysteme.
- In welcher Umgebung bzw. in welchem Anwendungsfeld soll das Lasersystem eingesetzt werden?
Die Verwendung von Lasern in der industriellen Materialbearbeitung in Werks- oder Produktionshallen erfordert z.B. besondere mechanische und chemische Belastbarkeit des Lichtleitkabels (Trittschutz, Schutz vor Lösungsmitteln). Bei Anwendungen der Luft- und Raumfahrt ist es wichtig, dass die Strahlführungssysteme ein möglichst geringes Eigengewicht aufweisen, dass Materialien unter Vakuumbedingungen nicht ausgasen sowie dass nur halogenfreie Materialien eingesetzt werden. Lichtwellenleiter für medizinische Applikationen hingegen dürfen nur aus biokompatiblen Materialien bestehen.

2.2. Materialauswahl unter Sicherheitsaspekten

Durch die Wahl geeigneter Ausgangsmaterialien (Glas, Coatingmaterialien), durch ein angepasstes Faserdesign (Fasergeometrie, Faserkern- und Fasermanteldurchmesser, NA) und durch eine korrekte Konfektionierung (Schutzschlauch, Stecker, zusätzliche Schnittstellen) kann das Risiko der Zerstörung des Strahlführungssystems durch thermische Überlastung aufgrund hoher optischer Leistungen und durch chemische oder mechanische Beschädigung minimiert werden.

2.2.1 Glas

Für Glasfasern, mit denen Laserstrahlung hoher Leistung und guter Strahlqualität erzeugt bzw. übertragen werden soll, wird in der Regel Quarzglas als Material für den Glasfaserkern und -mantel verwendet. Quarzglas, insbesondere synthetisch hergestelltes Quarzglas (engl. „fused silica“) zeichnet sich durch seine

gute Reinheit und seine hohe Zerstörschwelle aus. Eine hohe Reinheit ermöglicht eine gute Transmission bei nur geringer Dämpfung. Das für den Glasfaserkern verwendete Quarzglas sollte je nach Wellenlänge der zu übertragenden (Laser-) Strahlung ausgewählt werden, da nur so eine geringe Dämpfung sichergestellt werden kann. Eine geringe Dämpfung bedeutet geringe Verluste der übertragenen Lichtleistung und somit nur geringe oder gar keine Erwärmung des Faserkerns, was das Risiko einer thermischen Schädigung des Lichtwellenleiters senkt.

Soll Licht im infraroten oder sichtbaren Spektralbereich übertragen werden, empfiehlt sich die Verwendung sogenannter WF-Fasern (Abb. 7, rechts), für die ein Quarzglas mit nur geringem OH⁻-Anteil verwendet wird. Soll die Glasfaser zur Übertragung von kurzwelliger Strahlung (UV) oder in Umgebungen mit Strahlenbelastung (z.B. Raumfahrt) genutzt werden, so trägt die OH⁻-Dotierung einer UV-Faser (Abb. 7, links) zu einer geringeren Dämpfung bei.

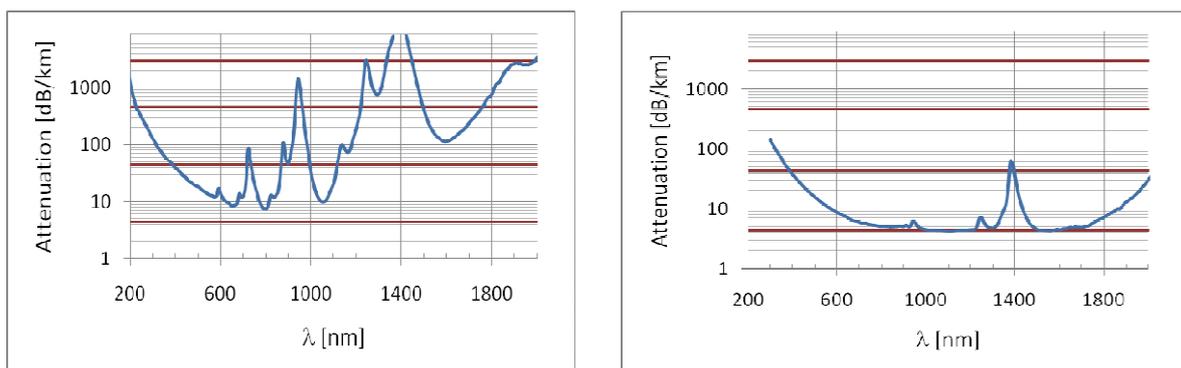


Abb. 7: Dämpfungsspektren von UV-Quarzglas mit hoher OH⁻-Dotierung (links) und WF-Quarzglas (rechts) mit geringer OH⁻-Dotierung, welches für die Übertragung von infraroter (Laser-) Strahlung geeignet ist.

2.2.2 Coating

Bei der Wahl des Coatings, das die Glasfaser vor chemischen und mechanischen Umwelteinflüssen schützen und Faserbrüche durch sich ausbreitende Mikrorisse verhindern soll, sind z.B. während der Anwendung auftretende Temperaturen oder die geplante Art der Konfektionierung zu berücksichtigen.

Silikone weisen interessante optische Eigenschaften und gute thermische Stabilität auf, bedürfen aber zusätzlicher Schutzschichten, um dauerhaft mechanische Stabilität zu gewährleisten. Acrylate sind nur eingeschränkt temperaturstabil, weisen aber nur eine geringe Gasentwicklung unter Vakuumbedingungen auf und werden somit z.B. für Raumfahrtanwendungen eingesetzt. Nylon weist eine so gute mechanische Stabilität auf, dass bei genügender Schichtdicke die Glasfaser kleb-

stofffrei in einem Faserstecker fixiert werden kann, was für Anwendungen mit hohen Laserleistungen vorteilhaft ist.

In jedem Fall ist jedoch auf eine genügende Schichtdicke des Coatingmaterials zu achten, insbesondere bei Glasfasern, die keine runde Glas-Querschnittsfläche aufweisen (z.B. sogenannte D-Profilfasern).

2.2.3 Schutzschlauch

Schutzschläuche können den Lichtwellenleiter vor Umwelteinflüssen wie Luftfeuchtigkeit, Chemikalien, Dämpfen und Staub sowie mechanischer Beanspruchung (Trittschutz, Zugentlastung, Begrenzung des Biegeradius) wirksam schützen. Je nach Anwendung kommen als weitere Auswahlkriterien Temperaturbeständigkeit, Materialzusammensetzung (halogenfreies Material, biokompatibles Material, Brennbarkeit) und Eigengewicht (z.B. Luft- und Raumfahrt) in Frage.

2.2.4 Stecker

Bei „klassischen“ Fasersteckern wie dem z.B. dem SMA-Stecker wird das Faserende in den Stecker eingeklebt. Bei Laserstrahlung mit zu hoher Leistung können Verlustleistungen zu Wärmeentwicklung führen. Aufgrund der eingeschränkten Wärmeleitung kann es zur thermischen Schädigung des Steckers und somit des Lichtwellenleiters kommen. Auch Laserleistung, die aufgrund fehlerhafter Justage der Schnittstelle Laser – Lichtwellenleiter oder zu großer Divergenz bzw. zu großem Strahldurchmesser des Laserstrahls nicht im Faserkern geführt wird, sondern in den Fasermantel gelangt, kann eine thermische Zerstörung verursachen.

Für hohe Lichtleistungen ($P > 100 \text{ W}$) wurden deshalb SMA-kompatible Faserstecker (Abb. 8, links: CO-HP-Stecker der Firma CeramOptec GmbH) entwickelt, die durch ihre Konstruktion eine mechanisch präzise, klebstoff- und verspannungsfreie Fixierung des Faserendes im Stecker gewährleisten. Die verbesserte Wärmeleitfähigkeit ihres Ausgangsmaterials reduziert die Auswirkungen dennoch auftretender thermischer Belastungen. Als weiteres Beispiel eines Steckers ist hier ein Stecker der Firma Light of Future gezeigt (Abb. 8, rechts). Hierbei wird das Glasfaserende durch ein Kegelprisma vor Laserstrahlung geschützt, die aufgrund etwaiger Fehljustage, zu großer Strahldivergenz oder zu großem Strahldurchmesser nicht im Faserkern geführt wird.

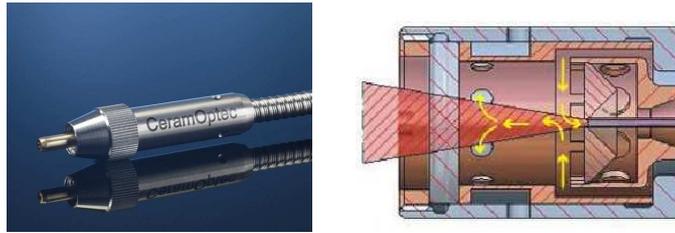


Abb. 8: links: SMA-kompatibler CO-HP-Stecker, der für geführte Lichtleistungen von mehr als 100 W entwickelt wurde; rechts: Hochleistungsstecker der Firma Light of Future, bei dem ein Kegelprisma das Faserende vor Laserstrahlung mit zu großer Divergenz bzw. zu großen Strahlquerschnitt schützt.

2.2.5 technische Schutzeinrichtungen

Neben der Wahl geeigneter Materialien sowie eines angepassten Faser- und Steckerdesigns kann die Sicherheit eines Strahlführungssystems durch weitere technische Maßnahmen verbessert werden. Einige Beispiele sind im Folgenden aufgeführt, die insbesondere die Schnittstellen zwischen Laser und Glasfaser bzw. Lichtwellenleiter und Bearbeitungskopf betreffen:

a) Fasererkennung

Im einfachsten Fall wird erkannt, ob ein Lichtwellenleiter an das Lasersystem (korrekt) angeschlossen wurde. Neuere Verfahren erlauben auch eine Identifikation des Lichtwellenleitertyps und somit seiner Eignung (z.B. hinsichtlich NA und Faserkerndurchmesser) für die Verwendung mit dem entsprechenden Lasersystem.

b) Faserpositionserkennung

Hierbei wird überprüft, ob die Glasfaser in der richtigen Position an das Lasersystem angeschlossen wurde.

c) Faserbruchdetektion

Mit Hilfe elektrischer oder optischer Sensorik kann die Integrität des Lichtwellenleiters überprüft werden. Im Falle eines Faserbruchs wird deutlich weniger Laserleistung am distalen Faserende emittiert; stattdessen wird Laserstrahlung im Bereich des Faserbruchs freigesetzt, die dort zu einer lokalen Erwärmung führt.

d) Fasertransmissionsüberwachung

Hierbei wird die am distalen Faserende abgegebene Lichtleistung überwacht und ggf. mit der in die Faser eingekoppelten Laserleistung verglichen. Ein Beispiel einer solchen Leistungsüberwachung ist in Abb. 9 gezeigt.

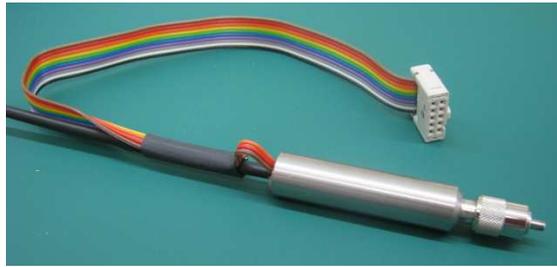


Abb. 9: Faserstecker mit integrierter Leistungsüberwachung.

Durch diese Maßnahmen kann das Risiko unbeabsichtigter Laseremission aufgrund fehlerhaft angeschlossener Strahlführungssysteme oder aufgrund beschädigter Lichtwellenleiter reduziert werden.

2.3 Handhabung

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten erwähnten technischen und materialtechnischen Aspekten ist der sachkundige und verantwortungsvolle Umgang mit Glasfasern für die Lasersicherheit von besonderer Bedeutung.

2.3.1 Biegeradius

Wird eine Glasfaser mit zu geringem Biegeradius gebogen, weil sie z.B. zu eng auf eine Spule aufgewickelt wird, so kann zu einem Faserbruch kommen. Üblicherweise wird empfohlen, dass der Biegeradius R kurzzeitig das 50fache des Manteldurchmessers betragen darf; über längere Zeiträume (z.B. bei der Lagerung) sollte R mindestens 300mal größer als der Manteldurchmesser sein. Wird optische Leistung durch die Glasfaser geführt, sollte der Biegeradius wenigstens das 150fache des Faserkerndurchmessers betragen.

In Tab. 3 sind für vier verschiedene Glasfasern die zulässigen minimalen Biegeradien bei kurzzeitiger mechanischer Belastung, während der Übertragung optischer Leistung sowie für die Lagerung angegeben.

Jedoch beeinflusst das Biegen einer Glasfaser nicht nur u.U. deren mechanische Integrität, sondern auch ihre numerische Apertur. Wie sich die NA mit dem Biegeradius verändert ist in Gl. 9 dargestellt.

$$\text{Gl. 9} \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \left(1 + \frac{a}{R}\right)^2}$$

Hierbei sind n_1 und n_2 die Brechzahlen des Faserkerns bzw. -mantels. a ist der Faserkernradius, R der Biegeradius der Glasfaser.

Wie sich die numerische Apertur gem. Gl. 9 in Abhängigkeit vom Biegeradius R für eine sogenannte LMA-Faser mit 20 μm Faserkerndurchmesser, 400 μm Manteldurchmesser und $NA = 0,06$ verändert, ist in Tab. 4 dargestellt. Es zeigt sich, dass die numerische Apertur für Biegeradien $R < 60$ mm signifikant sinkt. Für $R < 12$ mm wird der Radikand in Gl. 9 negativ, was bedeutet, dass eine Lichtwellenleitung bei diesen Biegeradien nicht mehr möglich ist.

$\varnothing_{\text{Kern}} [\mu\text{m}]$:	20	400	400	400
$\varnothing_{\text{Mantel}} [\mu\text{m}]$:	400	440	720	440
NA_{nominell} :	0,06	0,22	0,22	0,36
min. Biegeradius (mechanisch) [mm]:	20	22	36	22
min. Biegeradius (im Betrieb) [mm]:	3	60	60	60
min. Biegeradius (Lagerung) [mm]:	120	132	216	132

Tab. 3: Für vier verschiedene Glasfasern, wie sie typisch für Anwendungen der Materialbearbeitung sind, wurden die minimalen Biegeradien für kurzfristige mechanische Belastung, während der Übertragung von Laserstrahlung und für die Lagerung angegeben.

$x \cdot \varnothing_{\text{Kern}}$	Biegeradius [mm]	resultierende NA
10000	200	0,06
9000	180	0,06
8000	160	0,06
7000	140	0,06
6000	120	0,06
5000	100	0,06
4000	80	0,06
3000	60	0,05
2000	40	0,05
1000	20	0,04
900	18	0,04
800	16	0,03
700	14	0,02
600	12	0,01

Tab. 4: Für eine Glasfasern mit $\varnothing_{\text{Kern}}$, $\varnothing_{\text{Mantel}}$ und $NA = 0,06$ wurde die numerische Apertur in Abhängigkeit vom Biegeradius R berechnet.

Für eine reale LMA-Faser mit $\varnothing_{\text{Kern}} = 20 \mu\text{m}$, $\varnothing_{\text{Mantel}} = 400 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0,06$ wurde das Transmissionsverhalten in Abhängigkeit vom Biegeradius gemessen. Für $R > 60 \text{ mm}$ wird die optische Leistung nahezu verlustfrei übertragen; erst für Biegeradien kleiner als 55 mm führt die Faserbiegung zu Transmissionsverlusten. Ist optische Leistung, die aufgrund der durch Biegung verringerten NA nicht mehr in der Glasfaser geführt werden kann, genügend groß, kann sie zur Beschädigung des Lichtwellenleiters führen.

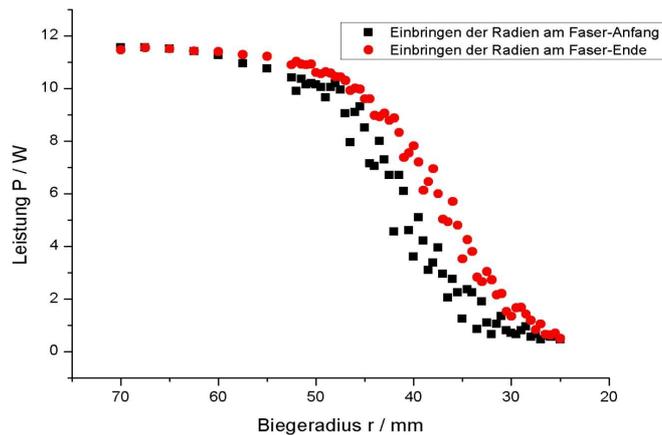


Abb. 10: transmittierte Laserleistung einer Faser mit $\varnothing_{\text{Kern}} = 20 \mu\text{m}$, $\varnothing_{\text{Mantel}} = 400 \mu\text{m}$ und $\text{NA} = 0,06$ in Abhängigkeit vom Faserbiegeradius.

2.3.2 Reinigung

Werden nennenswerte optische Leistungen durch die Glasfaser übertragen, wie es z.B. bei Anwendungen der industriellen Materialbearbeitung der Fall ist, können Verschmutzungen der Faserenden verbrennen und so die Enden der Glasfaser beschädigen und somit den gesamten Lichtwellenleiter unbrauchbar machen. Deshalb gilt es, die Faserendflächen und Steckerenden sauber zu halten.

Faserenden von Lichtwellenleitern, die zeitweise nicht benutzt werden und nicht mit einem Lasersystem bzw. einem Bearbeitungskopf verbunden sind, sollten durch Schutzkappen vor Verunreinigungen durch Staub und andere Umwelteinflüsse geschützt werden. Sollte eine Reinigung der Faserendflächen dennoch einmal erforderlich sein, so dürfen nur vom Hersteller empfohlene Reinigungsmittel verwendet werden, um ein Verkratzen der Faserendfläche oder eine Auflösung des Klebstoffes im Stecker zu vermeiden. Letzteres kann z.B. zu einer thermischen Schädigung des Faserendes durch weitere Verunreinigung der Faserendfläche mit angelöstem Klebstoff oder zum Verlust der Fixierung und Positionierung der Faser im Stecker führen.

2.3.3 Inbetriebnahme/Betrieb der Lasereinrichtung

Auch während des Betriebs eines Lasersystems mit Glasfaser als Strahlführungssystem können einige einfache Regeln / Maßnahmen zur Sicherheit beitragen. Aufgrund ihres vorteilhaften Verhältnisses von Volumen des Faserkernes zur Oberfläche des Lichtwellenleiters kann Wärme verhältnismäßig einfach aus einer Glasfaser abgeführt werden. Ist eine aktive Kühlung der Glasfaser (z.B. mit Wasser) erforderlich, so ist darauf zu achten, dass das Kühlmittel den Lichtwellenleiter kühlt, sobald Laserleistung übertragen wird. Eine verspätete Kühlung kann die aufgeheizte Glasfaser schlagartig abkühlen und durch die auftretenden Spannungen zerstören. Auch für die Reinigung mit flüssigen Reinigungsmitteln gilt, dass eine schockartige Abkühlung der Glasfaser zu vermeiden ist.

Ist das distale Faserende frei beweglich oder handelt es sich gar um einen handgeführten Bearbeitungskopf so ist ein verantwortungsvoller Umgang mit dem Strahlführungssystem im Sinne der Lasersicherheit umso wichtiger. Weder (unliebsame) Vorgesetzte, noch Kollegen, noch Mitarbeiter sind geeignete Zielobjekte.

Des weiteren gilt wie für alle Laseranlagen: Die einschlägigen Vorschriften (z.B. BGV B2, Manual etc.) sind zu beachten und die Nutzung der vorhandenen Schutzeinrichtungen und Schutzausrüstung (Laserschutzbrille!!!) ist verpflichtend.

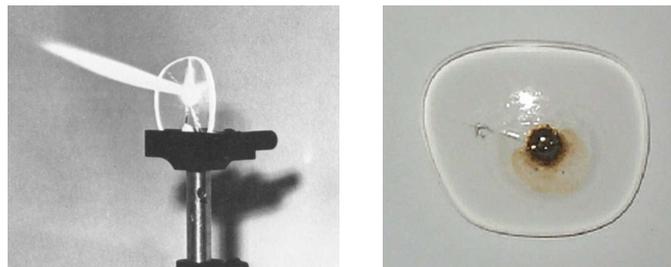


Abb. 11: Laserstrahlung trifft auf das Glas einer Laserschutzbrille und führt zu dessen Beschädigung.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass Handstücke/Bearbeitungsköpfe mit strahlformenden Optiken sowohl Leistungsdichte als auch Sicherheitsabstand verändern können. Ebenfalls sei noch einmal an Abschnitt 1.2.1 und Abb. 6 erinnert: Eine Glasfaser kann Laserstrahlung mit deutlich kleinerer Divergenz emittieren als die NA der Glasfaser erwarten ließe. Gleichzeitig ist in den meisten Fällen ein Gauß-ähnliches Strahlprofil gegeben, bei dem sich ein Großteil der Leistung im Zentrum des Strahles konzentriert.

Literatur

- ¹ J. Tyndall, *On some Phenomena connected with the Motion of Liquids*, Proc. of the Royal Institution of Great Britain **1**, 446 (1854)
- ² H. Gobrecht, *Strahlenoptik*, in Bergmann Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. 3, H. Gobrecht (Hrsg.), Walter de Gruyter & Co., Berlin, New York, 8. Aufl. (1987)
- ³ H.H. Hopkins, *A Flexible Fibrescope, using Static Scanning*, Nature **173**, 39 (1954)
- ⁴ F.P. Kapron, D.B. Keck, R.D. Maurer, *Radiation losses in glass optical waveguides*, Appl. Phys. Lett. **17**, 423 (1970)
- ⁵ M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press, Oxford, New York, Beijing, Frankfurt, Sao Paulo, Sydney, Tokyo, Toronto, 6th ed. (1989)