

Praktikum Optische Nachrichtentechnik Versuch 1 Numerische Apertur und Dämpfung von Multimode-Lichtwellenleitern	Versuchsdatum:..... Semester:.....Gruppe:..... Teilnehmer:..... Email:.....
---	---

Inhalt und Ziel: Sie verstehen die konkrete Anwendung der geometrischen Optik auf zylindrische Kern-Mantel-Lichtwellenleiter(LWL). Sie können die Auswirkungen der Numerischen Apertur (NA) auf optische Übertragungsstrecken einschätzen. Sie lernen den praktischen Umgang mit Glas- und Kunststoff-Fasern einschließlich der Modenanregung. Sie führen eine typische optische Freistrahlmessung mit Fehlerabschätzung und normgerechter Auswertung durch. Sie lernen die unterschiedlichen Dämpfungsursachen in Glasfasern und Kunststoff-Fasern in der Praxis kennen. Sie wenden das klassische Messverfahren „Einfügedämpfung“ an und lernen dessen Einschränkungen einzuschätzen. Sie prüfen den statistischen Beitrag der Steckerdämpfung auf die Gesamtdämpfung einer Übertragungsstrecke.

Einführung

Numerische Apertur

Die Lichtleitung in **Multimode(MM)-Lichtwellenleiter (LWL)** lässt sich in guter Näherung mit der geometrischen Optik beschreiben, d.h. mit Brechung und Totalreflexion von Lichtstrahlen. Die wichtigste Kenngröße solcher LWL ist die *Numerische Apertur (NA)* (in der Literatur auch als A_N bezeichnet):

$$NA = n_o \cdot \sin \Phi_A$$

wobei n_o den Brechungsindex des Mediums bezeichnet, in dem sich die LWL-Endfläche befindet

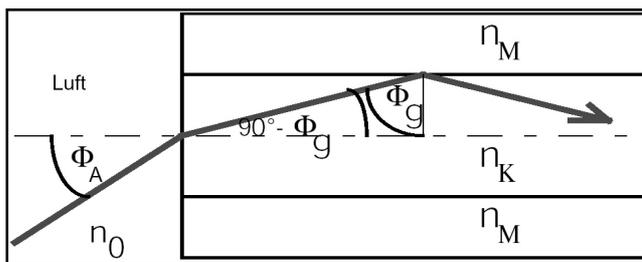


Abb. 1: Akzeptanzwinkel Φ_A

(meistens Luft mit $n_o \approx 1$) und Φ_A den maximalen Einstrahlwinkel (*Akzeptanzwinkel*). Da der Lichtweg grundsätzlich umkehrbar ist, gilt diese Beziehung ebenfalls für den abgestrahlten Lichtkegel. Auf diese Weise lässt sich NA auch messen: definitionsgemäß wird dazu der Winkel Φ_A bestimmt, bei dem die abgestrahlte Leistung **auf 5% gesunken** ist.

Die NA ist wichtig für die Ankopplung optischer Sender (Laserdioden und LEDs, außerdem wirkt sie sich auf die Koppelverluste von LWL-Verbindungen wie Steckern aus.

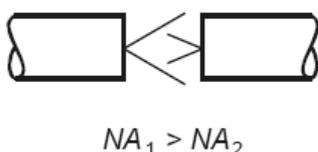


Abb. 2: LWL-Kopplung mit Fehlanpassung der NA

Bei einer Kopplung von zwei LWL mit unterschiedlichen NA ergeben sich im Fall, dass das Licht von der Faser mit der größeren NA in die Faser mit der kleineren NA gekoppelt wird, Koppelverluste durch die Fehlanpassung der NA. Für die dadurch verursachte Dämpfung an der

Koppelstelle gilt: $a_{K,NA} = 20 \log \frac{NA_1}{NA_2}$ für $NA_1 \geq NA_2$

Dämpfung

Bei der Installation, dem Betrieb und der Wartung von optischen Nachrichtensystemen treten **drei typische Dämpfungsursachen** auf:

1. Die Glas- oder Kunststoff-Faser selbst besitzt eine *Eigendämpfung*, die insbesondere bei den Kunststoff-Fasern (auch optische Polymerfasern oder POF [**P**olymer **O**ptical **F**iber] genannt) erheblich sein kann und außerdem von der Sender-Wellenlänge abhängt (siehe Abb. 3a und b).

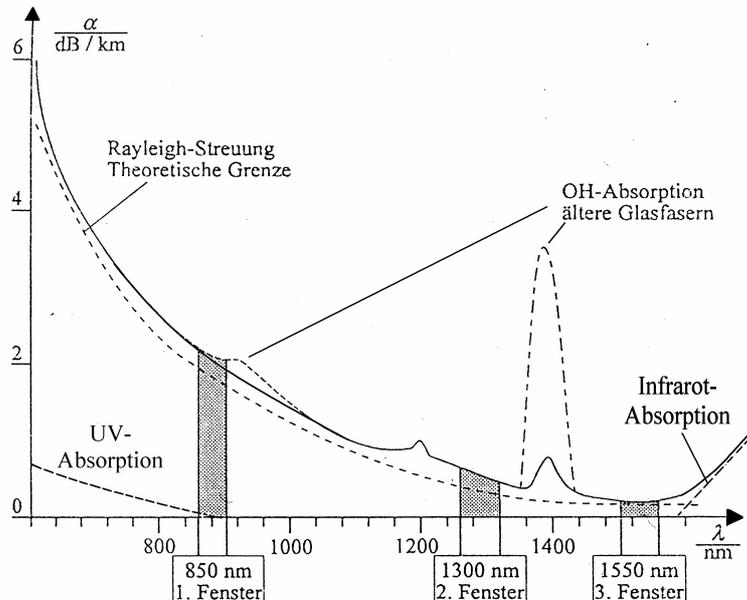


Abb. 3a: Spektrale Dämpfung von Faserwellenleitern aus hochreinem Quarzglas¹

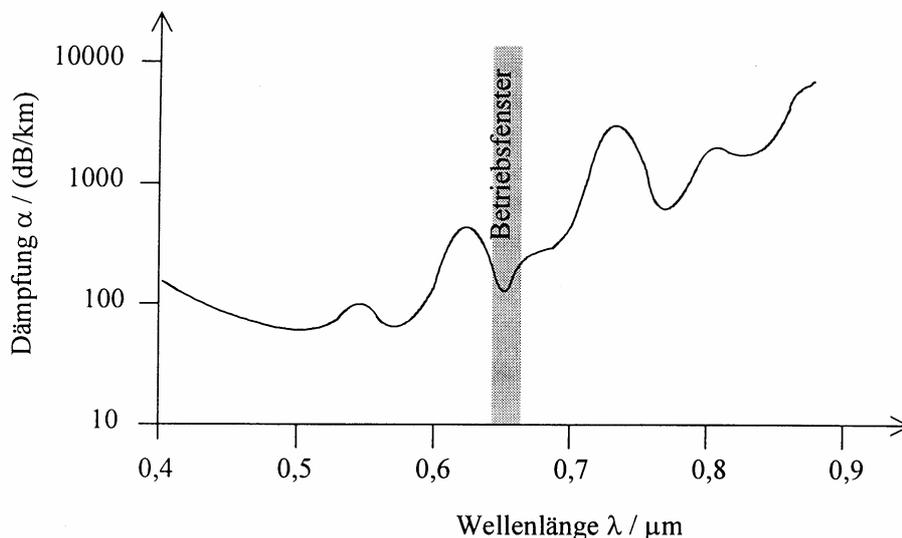


Abb. 3b: Spektrale Dämpfung einer optischen Polymerfaser mit PMMA²-Kern

2. Der verkabelte LWL wird mit zu geringen Krümmungsradien verlegt, z.B. in einem Kabel-Verzweiger, einem Verteilerschrank oder mit zu großem Zug in einem Kabelkanal. Dadurch tritt *Macrobending* auf, das im Pegelplan meistens nicht berücksichtigt wurde.

¹ **Quarzglas** ist ein Glas, das im Gegensatz zu den gebräuchlichen Gläsern keine Beimengungen von Soda oder Calciumoxid enthält, also aus reinem Siliziumdioxid (SiO₂, engl. Bez. daher *fused silica*) besteht.

² **PMMA**: **P**oly**m**ethyl**m**et**a**crylat (gebräuchliche Handelsnamen u.a. *Acrylglas*, *Plexiglas*®) synthetischer, glasähnlicher thermoplastischer Kunststoff

3. Steckverbindungen haben mechanische Toleranzen und sind anfällig gegen Verschmutzung durch Staub usw. Einerseits kann die *Koppeldämpfung* also schwanken - bei beschädigten Steckern bis in den Bereich von einigen dB - andererseits erhöht sich die Dämpfung mit häufiger Benutzung. Bei Einmoden (EM)-LWL kann durch ein Staubkorn auf dem Faserkern das gesamte System versagen!

Die Dämpfung wird in der Praxis häufig – als Alternative zum teuren OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), das auch zusätzliches Expertenwissen benötigt, – mit Pegelsender und Leistungsmesser gemessen.

Kritisch bei der zweifachen Leistungsmessung (jeweils mit und ohne das zu vermessende Kabel bzw. die Steckverbindung) ist die Ankopplung an den Pegelsender, da Steckverbindungen nicht völlig reproduzierbar sind. (Die Ankopplung an das Powermeter ist relativ unkritisch, wenn der Faserausgang die Fotodiode direkt bestrahlt. Bei einer Ankopplung mittels Verbindungsleitung gilt allerdings dasselbe wie für den Sender!) Die genauesten Ergebnisse erhält man darum mit der *Rückschneide-Methode* (*Cut Back Method*), da bei diesem Verfahren, die Einkoppelstelle nicht verändert wird.

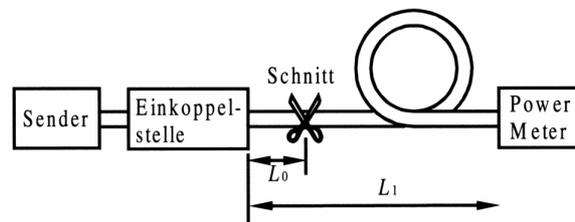


Abb. 4: Rückschneidemethode zur exakten Dämpfungsmessung

Nach der Leistungsmessung mit der Gesamt-Faserlänge L_1 wird auf ein kurzes Faserstück L_0 mit vernachlässigbarer Dämpfung zurückgeschnitten und erneut gemessen. Aus nahe liegenden Gründen ist diese Methode auf Präzisionsmessungen beschränkt. Praktikabler ist das *Einfügevverfahren* (*Insertion Loss Method*):

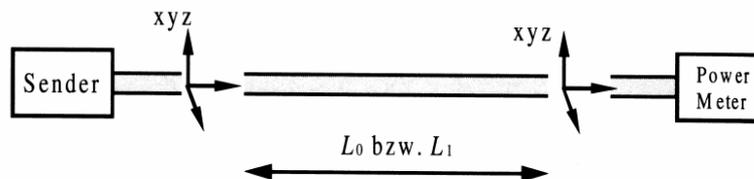


Abb. 5: Schema der Einfügemethode [Abb. nach Wrobel, s. u.]

Zwischen Sender und Leistungsmesser wird einmal die kurze (vernachlässigbare) Leitung mit L_0 und einmal – oder zusätzlich - die zu messende lange Leitung mit L_1 eingefügt. Die Koordinaten xyz in Abb. 4 symbolisieren die möglichen und veränderlichen Koppeldämpfungen durch das mechanische Spiel der Stecker. Im Versuchsteil „Steckverbindung“ sollen Sie gerade diese statistisch schwankende Koppeldämpfung untersuchen. Die Ankopplung an den Leistungsmesser bzw. die Fotodiode können Sie in diesem Versuch allerdings als reproduzierbar betrachten (direkte Bestrahlung).

Testfragen und Vorbereitung

1. Numerische Apertur

- 1.1. Wie lautet das Brechungsgesetz von Snellius? Was versteht man unter Totalreflektion?
- 1.2. Wie sieht das Brechzahlprofil von Stufen-Index (SI)- und Gradienten-Index (GI)-LWL aus?
- 1.3. Wie hängt die NA mit den Mantel- und Kernbrechzahlen n_M bzw. n_K zusammen?

- 1.4. Welche typischen NA-Werte gelten für die hier verwendeten MM-Glasfasern (GI-Glasfaser mit 50 μm Kerndurchmesser) und POF (mit 1 mm Kerndurchmesser) sowie für EM-Fasern?
- 1.5. Was geschieht mit Lichtstrahlen, die mit einem größeren Winkel als Φ_A in eine Faser eingekoppelt werden? Welche Konsequenz hat eine unvollständige Beleuchtung (*Anregung*) des Kerns?

2. Dämpfung

- 2.1. Welche Absorptionsmechanismen wirken einerseits in *Glasfasern* und andererseits in *POF*? Wie sehen jeweils die *spektralen Dämpfungsverläufe* aus?
- 2.2. Welche *Dämpfungsbeläge* erwarten Sie bei den verwendeten Wellenlängen (850 nm bei GI-MM-LWL, 650 nm bei POF)?
- 2.3. Was versteht man unter *Macrobending* und *Microbending*? Wie wirken sie sich aus? Wie können sie in der Praxis entstehen?
- 2.4. Welche Dämpfungsursachen können bei *Faserkopplungen* z. B. durch Stecker auftreten? Was beschreiben die Fresnelschen Formeln und wie wirken sie sich auf Steckverbindungen aus? Wie lauten typische Stecker-Dämpfungswerte?
- 2.5. Bereiten Sie ein tabellarisches Kurzprotokoll für die unten aufgelisteten Messaufgaben vor! Wie könnte eine *Histogramm-Darstellung* der Stecker-Koppeldämpfungen aussehen?

Allgemeine Hinweise:

Lesen Sie die ausliegenden Sicherheitshinweise für den Umgang mit Lasern!

Skizzieren Sie den jeweiligen Messaufbau!

Notieren Sie alle wichtigen Parameter in den jeweiligen Messungen (Gerätetypen, Leitungslängen, Wellenlängen, ...)!

Versuchsdurchführung

1. Numerische Apertur

Die NA von zwei sehr unterschiedlichen MM-Fasertypen ist zu bestimmen:

- 1.1. POF mit Brechzahl-Stufenprofil und Kerndurchmesser 1mm
- 1.2. GI-Glas-LWL mit Kerndurchmesser 50 μm

Dazu wird der *Öffnungswinkel* Φ mit Hilfe eines Drehtisches variiert und jeweils im Fernfeld die Leistung gemessen. Achten Sie auf die exakte Justierung der Mittellage ($\Phi = 0$) und eine sinnvolle Winkelauflösung (kleine Änderungen $\Delta\Phi$ bei starken Leistungsänderungen P_{opt}).

Untersuchen Sie welchen Einfluss das Umgebungslicht auf die Messung nimmt. Bedenken Sie, dass die Lichtleistung auf nur 5% des Maximalwertes bei 0° abfallen muss, um den Öffnungswinkel bestimmen zu können. Sollte das Umgebungslicht in der Größenordnung dieser Leistung sein, würde das Messergebnis stark verfälscht.

Vormessung

Um eine grobe Abschätzung machen zu können bis zu welchen Winkeln gemessen werden muss und um einen ersten Messwert für die NA zu erhalten, führen Sie bitte folgende Messung durch:

- Suchen Sie den Maximalwert der optischen Leistung (um 0°)
- Berechnen Sie daraus die 5% Grenze
- Drehen Sie nun den Drehtisch jeweils in positiver und negativer Richtung bis Sie die 5% Marke erreicht haben und lesen Sie den Winkel ab.
- Bilden Sie das arithmetische Mittel beider Winkel und berechnen Sie daraus das NA der Faser.

Führen Sie anschließend die eigentliche Messung der gesamten Kurve durch, wobei sie auch Leistungen unterhalb der 5% Marke messen sollen.

- Messen Sie beide LWL jeweils von beiden Seiten. (4 Kurven)
- Legen Sie eine Gerade bei 5% der Maximalleistung in den Grafen und lesen Sie die Grenzwinkel ab.
- Berechnen Sie noch im Praktikum mindestens einen gültigen Wert für die NA.

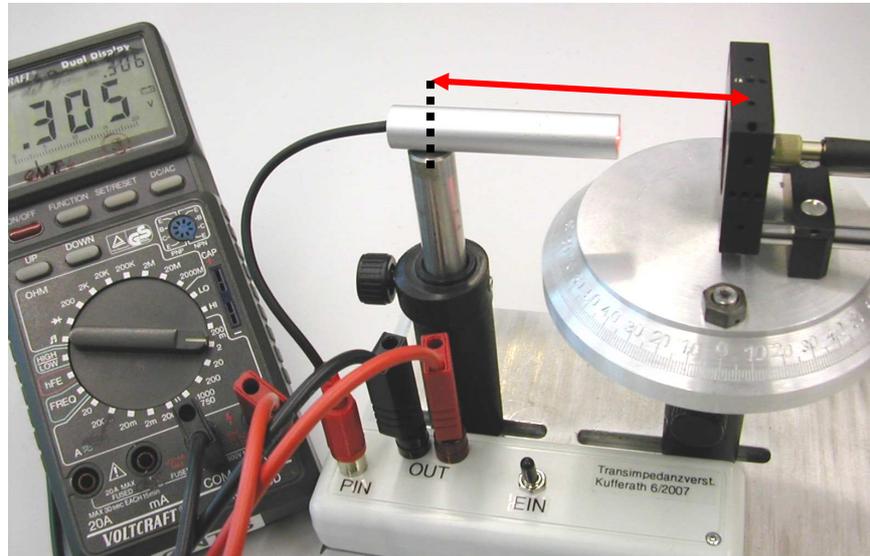


Abb.6: Versuchsaufbau zur Numerischen Apertur

Da die Modenverteilung sehr stark von der Anregung der Faser abhängt, soll bei dieser Messung auch deutlich werden, dass eine Messung der NA nur bei bekannten Anregungsbedingungen sinnvoll und reproduzierbar ist. Angestrebt wird eine Verteilung der Moden, die sich über die Länge der Faser nicht mehr ändert (Modengleichgewicht).

Um diese Bedingung zu erreichen, muss entweder eine hinreichend lange Faser vorgeschaltet werden, oder eine Anregung gewählt werden, die dem Modengleichgewicht möglichst nahe kommt (d.h. unter anderem, dass die NA des Senders möglichst mit der der Faser übereinstimmt). Bei Anregung mit einer Laserdiode ist diese Forderung meistens nicht erfüllt.

Dokumentieren Sie also sorgfältig Ihre Versuchsbedingungen!

2. Dämpfung

Die Dämpfung der beiden Multimode Fasertypen GI-Glas-LWL mit Kerndurchmesser $50\mu\text{m}$ und SI-POF mit Kerndurchmesser $1000\mu\text{m}$ sind zu bestimmen und daraus der Dämpfungsbelag in dB/km zu ermitteln.

- 2.1. Führen Sie zunächst die Messung mit der GI-MMF-Spule bei einer Wellenlänge von 850nm durch. Stellen Sie dazu bei dem 850nm -Laser den Strom auf einen konstanten Wert (unterhalb des Maximalwertes - ansonsten droht die Zerstörung der Diode) ein und messen Sie die Leistung einmal nur mit dem kurzen Anschlussstück und anschließend zusätzlich mit der Fasertrommel. Belassen Sie während der Messung stets das kurze Anschlussstück an der Laserdiode, um die Referenz nicht zu verändern.



Abb.7: Faserspulen

Beachten Sie, dass durch dieses Einfügeverfahren eine zusätzliche Koppelstelle hinzukommt,

die eine Erhöhung der Gesamtdämpfung um ca. 1dB zur Folge hat. Diese Zusatzdämpfung müssen Sie bei Ihren Berechnungen berücksichtigen. Messen Sie jede Trommel mindestens zweimal (einmal von jeder Seite)

- 2.2. Messen Sie an einer POF-Leitung bei zwei verschiedenen Wellenlängen die Dämpfung, um die starke Wellenlängenabhängigkeit des Dämpfungsbelages einer POF zu ermitteln. (LED mit den Wellenlängen $\lambda=650\text{nm}$, und $\lambda=520\text{nm}$). Auch hier sind bei jeder Wellenlänge zwei Messungen zu machen und die Zusatzdämpfung (von ca. 1,5dB) durch die Kupplung heraus zu rechnen.

Geben Sie dem Betreuer den Dämpfungsbelag in dB/km an.

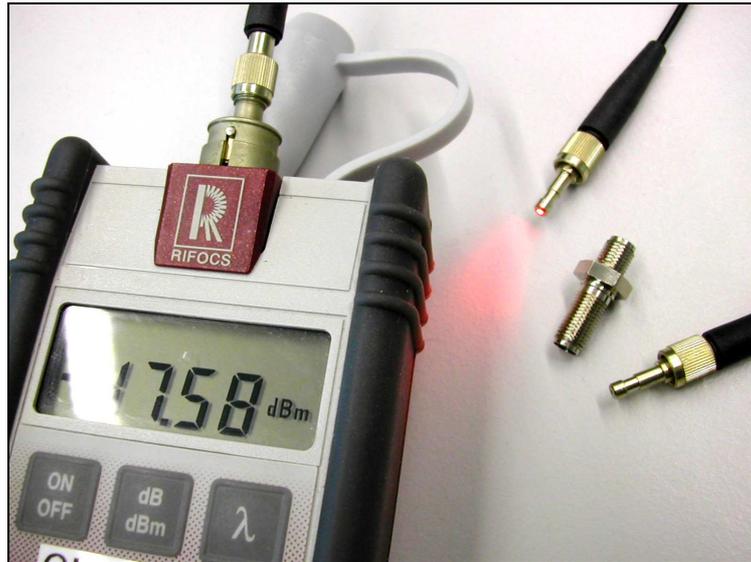


Abb. 8: Versuchsaufbau zur Leistungsmessung

- 2.3. Untersuchen Sie die Stecker-Koppeldämpfung statistisch. Verwenden Sie dazu den Aufbau aus Aufgabe 1 mit einer kurzen Leitung (MMF) am Pegelsender. Stecken Sie je zwanzigmal von beiden Seiten.

(Bemerkung: Bereiten Sie sich auf alle Aufgaben vor; ggf. ist die Durchführung allerdings nur als Demonstration oder verkürzt möglich!)

Versuchsauswertung

1. Numerische Apertur

- 1.1. Zeichnen Sie bereits parallel zur Messung ein $P_{\text{opt}} - \Phi$ -Diagramm und bestimmen Sie Φ_A grafisch aus dem symmetrischen Wertepaar $P_{1,2} = 0,05 P_{\text{max}}$. (Gegebenenfalls Meßwerte im kritischen Bereich ergänzen, dann außerdem interpolieren! Diese Auswertung wird mit einem Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt.)
- 1.2. Schätzen Sie die Fehler Ihrer Messungen ab! (Winkelauflösung, Detektorfläche, ...) Geben Sie als Ergebnisse die NAs beider LWL mit Unsicherheitsintervall an und vergleichen Sie mit Literaturwerten.
- 1.3. Diskutieren Sie den Einfluss der Anregungsbedingungen und von Mantelmoden (sowie der Länge der Messfaser) auf die Messgenauigkeit! Vergleichen Sie hierzu die die Messkurven von GI-Faser und POF.
- 1.4. Berechnen Sie beispielhaft die Koppelverluste durch unterschiedliche NA für die Kombinationen der Fasern aus Ihren Messungen.

2. Dämpfung

- 2.1. Berechnen Sie die Gesamtdämpfung und den Dämpfungsbelag für alle vermessenen LWL. Vergleichen Sie diese Ergebnisse mit den Angaben aus der Literatur!
- 2.2. Vergleichen Sie die POF-Messungen bei den unterschiedlichen Wellenlängen der LEDs und erläutern sie die unterschiedlichen Ergebnisse.
Welche maximale Länge ließe sich mit der POF Faser (1000µm Kern) überbrücken, wenn eine Dämpfung in der Übertragungsstrecke von 25 dB noch gerade zulässig wäre?
Welche maximale Länge ließe sich, bei gleicher Forderung, mit der GI Faser (50µm Kern) überbrücken?
- 2.3. Stellen Sie die Messwerte der Koppeldämpfung aus Aufgabe 2.3 in Form eines Histogramms dar und berechnen Sie Mittelwert und Messunsicherheit.

Die Ausarbeitung zu diesem Versuch besteht aus Skizzen der jeweiligen Messanordnungen, der Tabelle Ihrer Messergebnisse, dem Histogramm und einer ausführlichen Diskussion der Ergebnisse und ihrer Genauigkeit.

Anhang:

Relevante Norm (IEC:1995, 793-1-4) zum Laborversuch: Numerische Apertur

Gleichung:
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$
 (n_1, n_2 : Brechzahlen Kern/Mantel)

- Messtechnisch definiert bei Erreichen von 5% der Maximalleistung (z.B. bei 0 Grad)
- Übliche Messwellenlänge 850nm +/- 25nm
- Prüffaserlänge 2m +/- 0,2m
- Abstreifen der Mantelmoden an beiden Enden der Faser.
- Winkelauflösung ist abhängig von Detektordurchmesser und Abstand von Testfaser
→ Detektor möglichst klein wählen, üblich Auflösung $\leq 0,5^\circ$

$$\theta = \frac{D \cdot 0,006}{R}$$

D = Durchmesser des Detektors in µm

R = Abstand Faser, Detektor in cm

θ = Winkelauflösung in Grad

- Detektor muss im Fernfeld angeordnet werden.

$$R \geq \frac{d^2}{\lambda}$$

d = Durchmesser des emittierenden Bereiches (Kern)

λ = Wellenlänge der Quelle

Quelle: IEC:1995, 793-1-4

Quellenangabe:

[1]: Ch. P. Wrobel, *Optische Übertragungstechnik in der Praxis*, Hüthig-Verlag 1998