

Praktikum Hochfrequenztechnik, Teil 1

Lichtwellenleiter

SoSe 2018

1 Einleitung

In diesem Versuch werden optische Übertragungstrecken mit Single-Mode- und Multi-Mode-Fasern (SMF, bzw. MMF) untersucht und hinsichtlich Verluste und Dispersion bewertet.

2 Vorsichtsmaßnahmen

In diesem Laborversuch werden verschiedene Laserquellen verwendet, die einen scharf gebündelten Lichtstrahl mit einer hohen Leistung abgeben. Unter ungünstigen Umständen kann diese Leistung auf der Netzhaut des Auges dauerhafte Schäden hervorrufen.

Deshalb:

1. Niemals direkt in den Laserstrahl sehen!
2. Nicht für längere Zeit auf eine vom Laserstrahl beleuchtete Oberfläche starren.
3. Keine gut reflektierenden Gegenstände in den Strahlengang führen (z.B. Strahlablenkung an einer Armbanduhr oder einem Fingerring)!

3 Theorie

Dieses Kapitel beschreibt zunächst den allgemeinen Aufbau einer optischen Übertragungstrecke. Anschließend wird darauf eingegangen, welche Effekte die Übertragungsqualität am stärksten beeinträchtigen.

3.1 Beschreibung der Eigenschaften von Übertragungsstrecken

Eine optische Übertragungsstrecke wird i.A folgendermaßen aufgebaut: ein Sender bestehend aus einer modulierten Lichtquelle liefert ein optisches Signal, das mittels einer Faser (SMF oder MMF) übertragen und ggfs. verstärkt wird und schließlich an einem optischen Empfänger gelingt.

3.1.1 Signalerzeugung

Als optische Signalquelle werden meist Halbleiterlaser oder Dioden verwendet. Der Informationsinhalt wird kodiert, indem man das optische Signal moduliert. Dazu existieren eine Reihe Modulationsverfahren. In diesem Versuch wird dazu ein Mach-Zehnder-Interferometer eingesetzt.

Mach-Zehnder-Interferometer Der Mach-Zehnder-Modulator (MZM) besteht prinzipiell aus zwei Wellenleiterverzweigungen, wie in Abb. 1a zu sehen ist. Die optische Leistung wird in der ersten Verzweigung gleichmäßig aufgeteilt und dann jeweils über einen Wellenleiter geführt. Wenn es zu einer Phasendifferenz zwischen den beiden Wellen kommt, interferieren diese bei der zweiten Verzweigung entweder konstruktiv oder destruktiv. Um das optische Signal zu modulieren, wird also die Phase des Signals in einem der beiden Wellenleiter gesteuert, um auf dieser Weise eine Phasendifferenz und damit Modulation zu bewirken.

Phasensteuerung Die Phase eines Signals dreht sich, wenn sich die optische Welle mit Ausbreitungskonstante β entlang eines Weges z ausbreitet:

$$\phi(z) = -\beta z = -n_{eff} \frac{2\pi}{\lambda} z = \Gamma n \frac{2\pi}{\lambda} z \quad (1)$$

Hier beschreiben n_{eff} die effektiven Brechzahl, λ ist die Wellenlänge und Γ der Confinement-Faktor, welcher die Wellenführung charakterisiert. Variiert man nun den Brechungsindex, so kann man entlang einer Länge $z = L$ die Phase des Signals steuern:

$$\Delta\phi = -\Gamma \Delta n \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (2)$$

Damit es zu einer großen Phasenänderung kommt, muss folglich eine gute Wellenführung ($\Gamma \approx 1$), eine lange Wirkstrecke L sowie eine hohe Variation des Brechungsindizes ($\Delta n \gg 1$) vorliegen. Da die Wellenführung begrenzt ist und man die Weglängen möglichst kurz halten möchte, benutzt man Materialien, die einen hohen elektro-optischen Koeffizienten haben und dadurch eine hohe Änderung des Brechnungsindizes hervorrufen können.

In einigen Materialien tritt der lineare elektro-optische Effekt (auch Pockels-Effekt) auf: Der Brechungsindex des Materials wird bei angelegtem, äußeren elektrischen Feld variiert. Der Brechungsindex ist also abhängig von der elektrischen Feldstärke innerhalb des Materials. Typische Materialien mit solch einem Verhalten sind Lithiumniobat (LiNbO_3) und die III-V-Halbleiter, wie z. B. Galliumarsenid (GaAs). Um den Pockels-Effekt zu

nutzen, wird ein äußeres elektrisches Feld angelegt. Das geschieht durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen zwei Elektroden, die auf beiden Seiten des Wellenleiters angebracht sind und einen Abstand d voneinander haben. Der Brechungsindex kann dann folgendermaßen gesteuert werden:

$$\Delta n = 0.5n_0^3 r_{ij} \frac{U}{d} \quad (3)$$

Hierbei beschreibt n_0 den Brechungsindex ohne angelegte Spannung und r_{ij} den relevanten elektro-optischen Koeffizienten, der von Material, Polarisation und Elektrodendesign abhängt.

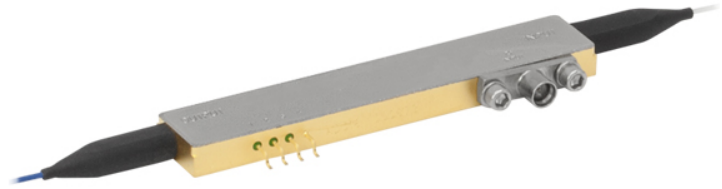
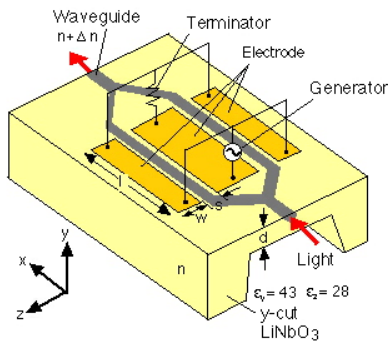


Abbildung 1: a) Schema des Mach-Zehnder-Modulators [8] b) MZM im Labor [9]

Übertragungsfunktion Die Feldverteilung eines Pulses kann man folgendermaßen beschreiben:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = E(x, y) \underline{A}(z, t) e^{j(\omega_0 t - \beta_0 z)} \vec{e} \quad (4)$$

$E(x, y)$ beschreibt die transversale Feldverteilung, die orthogonal zur Ausbreitungsrichtung ist; $A(z, t)$ die Einhüllende der Amplitude, welche sich sehr langsam verändert gegenüber der Trägerfrequenz; β_0 ist die Ausbreitungskonstante und ω_0 die Trägerfrequenz. Der Einheitsvektor \vec{e} beschreibt die Polarisation des Feldes. Am Ausgang des MZM lässt sich dann die Feldamplitude wie folgt beschreiben:

$$\underline{A}_{out} = \frac{A_1 e^{j\phi_1} + A_2 e^{j\phi_2}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Dabei gehen wir davon aus, dass die transversale Feldverteilung in beiden Armen gleich bleibt und deswegen nicht betrachtet werden muss. Die Phasen ϕ_1 und ϕ_2 beschreiben die Phasenunterschiede der Wellenamplituden, die aufgrund der Steuerung des Brechungsindex hervortreten. Wenn man in Gl. 5 die durchschnittliche Phase $\bar{\phi}$ beider Wellen herauszieht und die optische Leistung berechnet, folgt:

$$P_{out} = \frac{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\Delta\phi)}{2} \quad (6)$$

wobei $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ist. Die Übertragungsfunktion ergibt sich, wenn man das Verhältnis von Ausgangsleistung zu Eingangsleistung stellt:

$$H_{MZI} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{A_1^2 + A_2^2} = \frac{1 + b\cos(\Delta\phi)}{2} \quad (7)$$

Hier beschreibt $b = 2A_1A_2/(A_1^2 + A_2^2)$ die sog. *Imbalance*, d.h wie asymmetrisch der Splitter am Anfang des MZM die Leistung aufteilt.

Symmetrische Anordnung Damit der Modulator die gesamte optische Leistung durchschaltet ($H_{MZI} = 1$) oder komplett unterdrückt ($H_{MZI} = 0$), muss dieser symmetrisch aufgebaut sein. Dies bedeutet laut Gl.(7), dass $b = 1$ bzw. $A_1 = A_2$ sein muss. In diesen Fall lässt sich Gl.(5) wie folgt umschreiben:

$$A_{out} = \frac{A_{in}}{2}(e^{j\phi_1} + e^{j\phi_2}) \quad (8)$$

Zieht man jetzt die durchschnittliche Phase ϕ_{av} der Feldamplitude aus dem Summanden heraus und verwendet weiterhin die Differenz beider Phasen, so wird aus Gl. (8) folgender Ausdruck:

$$A_{out} = \frac{A_{in}e^{j\bar{\phi}}}{2}(e^{j\Delta\phi} + e^{-j\Delta\phi}) = A_{in}e^{j\bar{\phi}}\cos(\Delta\phi/2) \quad (9)$$

Die optische Leistung ist dann gegeben gemäß:

$$P_{out} = A_{in}^2 \frac{1 + \cos\Delta\phi}{2} \quad (10)$$

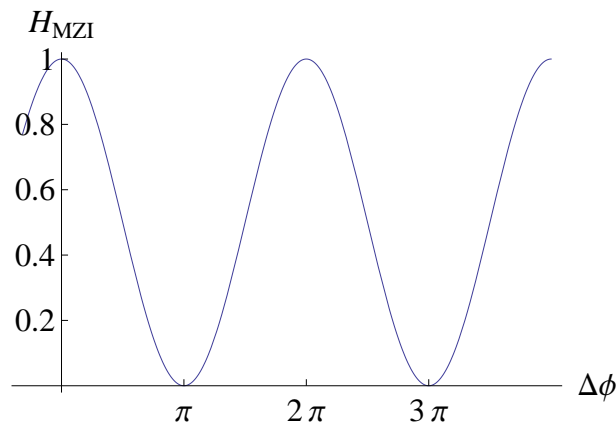


Abbildung 2: Übertragungsfunktion des MZI

In Abbildung (2) ist die Übertragungsfunktion dargestellt. Wie man sehen kann, wird die maximale Leistung durchgelassen, wenn die Phasendifferenz ein Vielfaches von 2π ist. Der Zusammenhang zwischen der Übertragungsfunktion und der extern angelegten

Spannung wird ersichtlich, wenn man Gl.(1) und Gl.(2) in Gl.(10) einsetzt. Die Übertragungsfunktion sieht dann wie folgt aus:

$$H_{MZI} = \frac{1 + \cos(\pi \frac{U}{U_\pi} + \phi_0)}{2} \quad (11)$$

wobei U_π die Spannung angibt, bei welcher die Übertragungsfunktion Null wird.

Kodierungsformate

Non-Return-to-Zero (NRZ) Formate NRZ-Formate sind intensitätsmoduliert. Bei solch einer Modulation wird bei logischen Einsen und Nullen auf das jeweilige Niveau umgeschaltet. Wenn die zu übertragende Bitsequenz auf mehreren Einsen hinter einander besteht, bleibt das Ausgangssignal auf dem Niveau der Eins.

Return-to-Zero (RZ) Formate RZ-Formate sind wie NRZ-Formate intensitätsmoduliert. Im Unterschied zu ihnen werden Einsen in Form von Pulsen moduliert. D.h. die optische Intensität geht am Ende der Bitdauer immer wieder auf Null zurück. Man kann sich das so entstehende Signal als einen Ausschnitt aus einem NRZ-Signal vorstellen [5]. Beide Kodierungsformate ist in Abb.3 zu sehen.

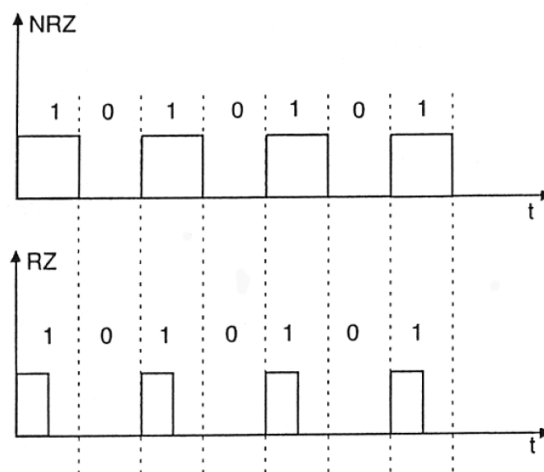


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf eines NRZ und einer RZ Signals.

3.1.2 Signalübertragung

Zur optischen Signalübertragung werden entweder SMF oder MMF verwendet. Ausführliche Informationen über optische Wellenleiter sind beispielsweise in [10, 11] zu finden.

SMF besitzen typischerweise Durchmesser zwischen 8,3 und 10 μm und sind damit kleiner im Vergleich zu den MMF. Die Wellenleiterverluste sind relativ gering, was eine Übertragung über längere Strecken ohne optische Verstärkung erlaubt. Die SMF führen

eine einzelne Mode und erlauben eine höhere Bandbreite als die MMF, da sie keine Modendispersion aufweisen. Weitere Dispersionsmechanismen wie die Materialdispersion und die Wellenleiterdispersion haben einen Einfluss auf die Übertragungsqualität über lange Strecken und stellen den Bedarf an Kompensationstechniken.

Die kleinen Abmessungen der SMF stellen höhere Anforderungen an der Lichteinkopplung, da die numerische Apertur klein ist. Zudem sollen schmalbandige Lichtquellen verwendet werden. Damit ist der Einsatz von SMF kostenintensiver, erlaubt aber höhere Bandbreiten über längere Strecken (bspw. 1000 km bei 1 Tbit/s).

MMF haben einen Durchmesser zwischen 50 und 100 μm , was eine größere numerische Apertur und einfachere Lichteinkopplung bedeutet. Des Weiteren erlauben die größeren Abmessungen die Lichtaufspaltung in mehreren Moden. Da die einzelnen Moden unterschiedliche Laufzeiten besitzen (Modendispersion), führt das zu einer Impulsverbreiterung entlang der Faser. Diese Verbreiterung ist solange zulässig, bis zwei benachbarte Symbole nicht überlappen. Aus diesem Grund werden MMF bei kürzeren Distanzen eingesetzt (bspw. 1 km bei 10 Gbit/s).

Die Begriffe der Dämpfung, chromatischen Dispersion, Materialdispersion und Wellenleiterdispersion werden im nächsten Unterkapitel genauer erläutert.

3.2 Dämpfung und Dispersion in einem optischen Übertragungskanal

Die Übertragung durch einen optischen Kanal ist im Wesentlichen durch drei Faktoren begrenzt: Dämpfung, Dispersion und Nichtlinearitäten [6]. Die letzten machen sich erst bei höheren Leistungen bemerkbar und werden in diesem Versuch nicht betrachtet.

Dämpfungsverluste werden bei optischen Signalen durch das Verhältnis von Ausgangssignal- zu Eingangssignalpegel gemessen:

$$\alpha_D = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{aus}}}{P_{\text{ein}}}\right)$$

mit P_{aus} und P_{ein} die Aus- bzw. Eingangsleistung. Dämpfung entsteht durch die Absorptionswirkung des Materials, Streuung und Reflexion. Bei steigender Leiterlänge entstehen höhere Dämpfungsverluste. Man definiert daher den Dämpfungskoeffizienten, der die Dämpfung im Verhältnis zur Streckenlänge L angibt und typischerweise die Einheit $\left[\frac{\text{dB}}{\text{km}}\right]$ hat:

$$\alpha = \frac{\alpha_D}{L}$$

Chromatische Dispersion Die Gruppenlaufzeit der dielektrischen Lichtwellenleiter ändert sich bei Variation der Wellenlänge. Dieses Phänomen ist auf die chromatische Dispersion zurückzuführen. Mathematisch gesehen ist die chromatische Dispersion die Ableitung der Gruppenlaufzeit nach der Wellenlänge. Die chromatische Dispersion setzt sich aus der Wellenleiterdispersion und der Materialdispersion zusammen:

$$\frac{d\tau}{d\lambda} = \underbrace{-\frac{n_1 - n_2}{c \cdot \lambda} \cdot \frac{V d^2(V \cdot B)}{dV^2}}_{\text{Wellenleiterdispersion}} \underbrace{-\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_2}{d\lambda^2}}_{\text{Materialdispersion}}. \quad (12)$$

Hier sind n_1 und n_2 die Brechzahlen des Faserkerns, bzw. -mantels, c ist die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge, V der Faserparameter und B die normierte Ausbreitungskonstante, wobei:

$$V = k_0 \cdot a \cdot A_N$$

$$B = \frac{\frac{\beta}{k_0} - n_2}{n_1 - n_2}$$

mit k_0 die Wellenzahl im Freiraum, a der Faserradius, A_N die numerische Apertur und β die Ausbreitungskonstante in der Faser.

Zur Ermittlung der einzelnen Dispersionsanteile ist die $B(V)$ -Charakteristik in Abb. 4 vonnöten.

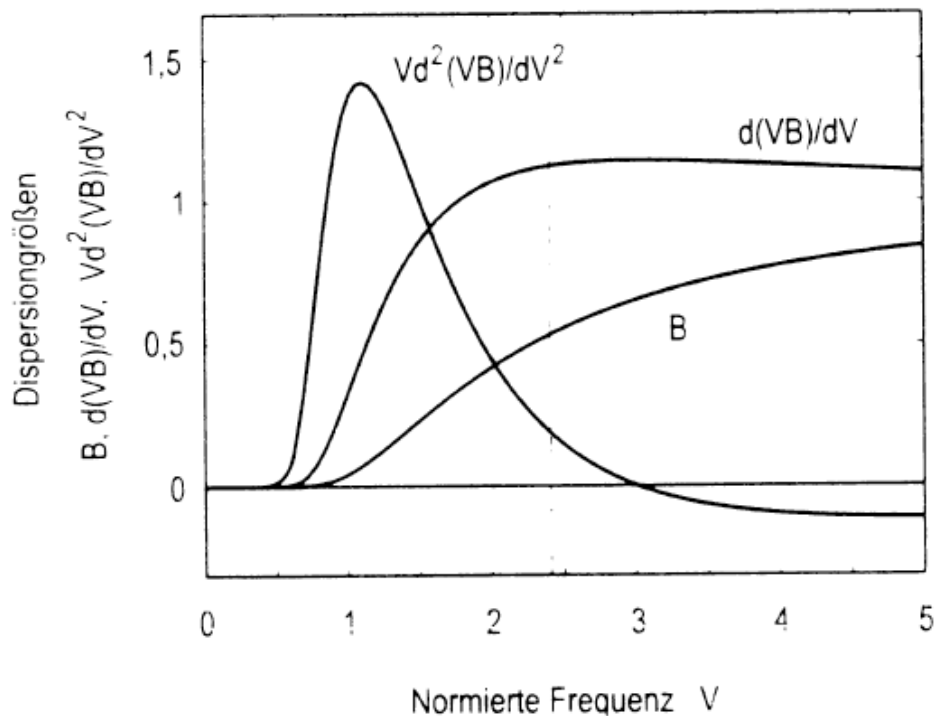


Abbildung 4: Dispersionsgrößen der LP_{01} -Grundwelle bei schwach führenden Stufenfasern [13]

Materialdispersion resultiert dadurch, dass das verwendete Quarzglas eine wellenlängenabhängige Brechzahl hat.

Wellenleiterdispersion ergibt sich aus den unterschiedlichen Pfaden, die die einzelnen Wellenlängenanteile bei Totalreflexion in der Faser zurücklegen. Damit ist die Wellenleiterdispersion abhängig von der Geometrie und den Materialien im Kern und dem Mantel, was wie in (12) erkennbar, in der $B(V)$ -Charakteristik wiedergegeben wird. Bei einwelligen Fasern mit $V < 2,4$ ist $V \cdot \frac{d^2 \cdot V \cdot B}{dV^2}$ positiv wodurch die Wellenleiterdispersion negativ wird. Dies lässt sich nutzen um die chromatische Dispersion zu minimieren [7].

4 Durchführung und Messung

In diesem Kapitel wird auf den Messaufbau und die verwendeten Geräte der einzelnen Versuche eingegangen.

4.1 Übertragungseigenschaften von SMF und MMF

Im ersten Versuchsteil wird eine optische Übertragungsstrecke untersucht.

Messaufbau Der Messplatz wird gemäß Abb. (6) aufgebaut.

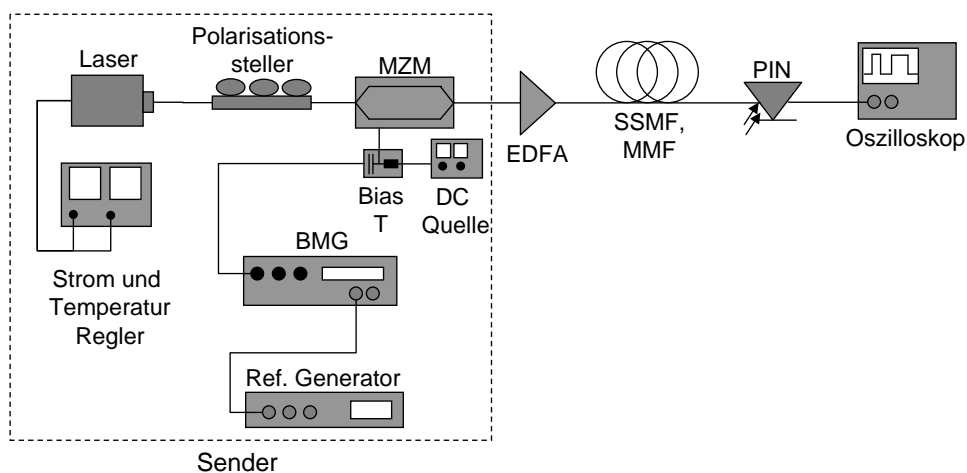


Abbildung 5: Messaufbau zur optischen Übertragung

Als Quelle dient ein Halbleiterlaser der Firma Alcatel, der bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ emittiert. Der Bitmuster-generator (BMG) generiert einen Puls, der mit Hilfe eines elektro-optischen Modulators, den Mach-Zehnder-Modulator (MZM) auf das optische Signal moduliert. Anschließend wird das Signal ggfs. mit einem EDFA optisch verstärkt und dann über die jeweilige Faser übertragen. Detektiert wird das optische Signal mit einer Photodiode (PIN), welche es in ein elektrisches Signal wandelt. Anschließend wird das so gewonnene elektrische Signal mit dem Oszilloskop vermessen.

Verwendete Geräte In diesem Versuch werden

- InGaAsP-Laser
- Strom- und Temperaturregler
- Polarisationssteller
- Mach-Zehnder-Modulator
- Bias-T

- DC Spannungsquelle
- Bitmuster-generator
- SMF (4,4 km)
- MMF (1 km)

verwendet.

4.2 Messung der Dämpfung und der Dispersion von SMF und MMF

In diesem Unterkapitel wird das Messprinzip mit dem photonischen Dämpfungs- und Dispersionsmessgerät Agilent Technologies 86038B erläutert [12].

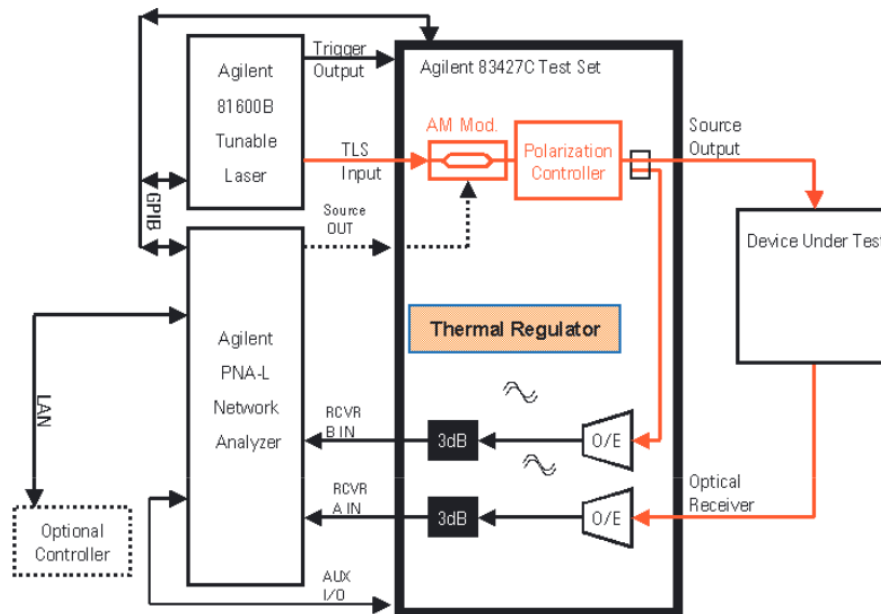


Abbildung 6: Messprinzip mit dem photonischen Dämpfungs- und Dispersionsmessgerät Agilent Technologies 86038B

Agilent 86038B setzt bei allen Messungen die Methode der Modulationsphasenshift (engl. modulation phase shift, MPS) ein. Das Blockdiagramm ist in Abb. 6 dargestellt. Ein abstimmbarer Laser generiert Licht mit variabler Wellenlänge, das einem Mach-Zehnder-Modulation zugeführt wird. Das Signal propagiert weiter durch die zu testende Anordnung und gelangt an einem optischen Empfänger. Dort wird die Modulationseinhüllende zurückgewonnen und deren Amplitude und Phase werden mit einem Performance Netzwerkanalysator (engl. performance network analyser, PNA) bestimmt.

Messung mit der Methode der MPS Zur Messung der Gruppenlaufzeit/chromatischen Dispersion wird die Wellenlänge in sehr kleinen Schritten variiert und dabei die Phasenänderung der Trägerfrequenz gemessen. Durch die Phasenänderung kann die Gruppenlaufzeit berechnet werden mit der Formel

$$\Delta\tau_{(\Delta\lambda)} = \frac{\Delta\phi}{360^\circ} \cdot \frac{1}{f_m}.$$

$\Delta\phi$ beschreibt die Phasenänderung welche durch kleine Änderungen der Wellenlänge entsteht, f_m steht für die Modulationsfrequenz in Hz.

Die Ableitung der Gruppenlaufzeit in Verhältnis zur Wellenlänge gibt die chromatische Dispersion an

$$D = \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda}.$$

Die Messung der Dämpfung hat den gleichen Messaufbau basiert jedoch auf den Amplituden des zurückgewonnen modulierten Signals.

5 Aufgaben

5.1 Vorbereitungsaufgaben

1. Betrachten Sie den zeitlichen Verlauf eines NRZ- und eines RZ-Signals (Abb.3). Was für ein Spektrum erwarten Sie im Frequenzbereich? Worin unterschieden sich im Wesentlichen beide Spektren? Welche Kodierungsform ist dispersionsanfälliger?
2. Der Brechungsindex von Quarzglas kann mit einer Dispersionsgleichung der Form

$$n(\lambda) = 1,45084 - 0,00334\lambda^2 + 0,00292/\lambda^2 \quad (13)$$

beschrieben werden, wobei λ in μm eingesetzt wird. Nehmen Sie an, dass die Dispersion einer Single-Mode Faser durch die gleiche Abhängigkeit gegeben ist. Betrachten Sie eine SMF von 27 km Länge und einem Radius von $a = 5 \mu\text{m}$, die an eine Lichtquelle gekoppelt ist, die eine Wellenlänge von $1,55 \mu\text{m}$ hat. Die numerische Apertur der Faser bei dieser Wellenlänge beträgt 0,1. Der Brechzahlunterschied zwischen Kern und Mantel sei $4,5 \cdot 10^{-3}$. Berechnen Sie die Dispersionsparameter, die sich

- a) aus der Materialdispersion (D_M) und
- b) aus der Wellenleiterdispersion (D_W) ergeben.

Geben Sie die Werte in $\frac{\text{ps}}{\text{km nm}}$ an. Ist die Dispersion bei dieser Wellenlänge kompensiert?

5.2 Versuchsaufgaben und Auswertung

5.2.1 Bewertung von optischen Übertragungssystemen

1. Übertragen Sie mithilfe einer 1 km langen MMF einen Puls der breite $\Delta\tau = 1 \text{ ns}$. Was können Sie feststellen, wenn Sie auf die MMF Druck ausüben?

2. Übertragen Sie nun einen Puls der Breite $\Delta\tau = 1$ ns über eine SMF der Länge 4,6,6 km. Vergleichen Sie diese Übertragung mit der Übertragung über die MMF. Was stellen Sie fest?

5.2.2 Verluste und Dispersion einer SMF

1. Messen Sie die Verluste und die Dispersion einer SMF der Länge 6,6 km in O- und C-Band. Geben Sie die Werte bezogen auf die Faserlänge an.
2. Betrachten Sie nun die SMF mit anschließender Dispersionskompensation über eine DCF (dispersion compensating fiber). Messen Sie erneut die Verluste und die Dispersion in C-Band. Kann man die Reihenfolge der DCF und SMF vertauschen?

Literatur

- [1] Kersten, R.Th. *Einführung in die optische Nachrichtentechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1983, S. 177 ff.
- [2] Grau, G. *Optische Nachrichtentechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1981, S.96 ff.
- [3] Bronstein/Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch.
- [4] Unger, H.-G. *Optische Nachrichtentechnik Teil 1*, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1990, S. 256 ff.
- [5] Bunge, Christian. Skript zur Vorlesung: High Speed Optical Transmission systems.
- [6] Petermann, Klaus. *Einführung in die optische Nachrichtentechnik*, Vorlesungsskript 2007.
- [7] Petermann, Klaus. *Hochfrequenztechnik I*, Vorlesungsskript 2013.
- [8] <http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~hsdhome/gyouseki2-2-4.bmp> (25.04.2018)
- [9] https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918(25.04.2018)
- [10] Okamoto, Katsunari. *Fundamentals of Optical Waveguides*. Academic Press, 2005.
- [11] Neumann, Ernst-Georg. *Single-Mode Fibers Fundamentals*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1988.
- [12] Agilent Technologies 86038B Photonic Dispersion and Loss Analyzer Datasheet
- [13] Voges/Petermann, *Handbuch Optische Kommunikationstechnik*, Springer 2002.