

Modenrauschen in Glasfaser-Links

Weshalb Kabellängen in Singlemode-, nicht aber in Multimode-Anwendungen von Bedeutung sind

Modenrauschen in Glasfaser-Links

Inhalt

Einführung	3
Modenrauschen in Multimode-Glasfaser-Links	4
Modenrauschen in Singlemode-Glasfaser-Links	7
Anhang	9
Referenzen	11

© Copyright 2012 Reichle & De-Massari AG (R&M). Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Dokument darf - auch auszugsweise und egal, aus welchem Grund und in welcher Form - nur mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung durch Reichle & De Massari AG weitergegeben und reproduziert werden. In dieser Publikation enthaltene Informationen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Die Erstellung dieses Dokuments erfolgte mit grösstmöglicher Sorgfalt; es entspricht dem zum Zeitpunkt der Erstellung aktuellen technischen Stand.

Einführung

Modenrauschen ist ein im Zusammenhang mit Multimode-Fasern häufig auftretendes Problem welches mit einer hochwertigen Steckverbindung minimiert werden kann. Faserlängen hingegen haben wenig Einfluss. Oft tritt dieses Phänomen aber auch in Singlemode-Links auf, die kurze Glasfasersegmente wie Stubs in feldkonfektionierbaren Steckverbindern oder Steckermodule beinhalten.

Als Modenrauschen werden Signalstörungen bezeichnet, die durch die Glasfaser und Verbindungsstellen (Steckverbinder oder Spleisse) verursacht werden. Diese Stellen interagieren mit dem Signal und verursachen letztendlich „zufällige“ Schwankungen des Signalpegels am Empfänger. In vielen Fällen wirkt sich dies deutlich auf die Bitfehlerrate (BER, Bit Error Rate) des Kommunikationskanals und damit auf den erreichbaren Durchsatz aus. Das Problem tritt fast ausschliesslich bei Verwendung von Laserquellen wie VCSELs oder DFB-Lasern mit schmaler Linienbreite und grosser Kohärenzlänge auf. LEDs andererseits sind hochgradig inkohärente Lichtquellen mit breiten Spektren. Abbildung 1 zeigt die jeweiligen Effekte und die Lichtflecken der betreffenden Quellen. Während die LED homogen ausleuchtet, ist beim Laser ein sogenanntes Specklemuster zu sehen.

Format:	Whitepaper
Themen:	Modenrauschen, Modenkopplung, selektive Modendämpfung, kurze Glasfasersegmente in Singlemode-Systemen, Multimode-Verkabelung, minimale Glasfaserlänge
Ziel:	Orientierung des Lesers hinsichtlich des Modenrauschens in Singlemode-Links mit kurzen Glasfasersegmenten und in Multimode-Glasfaser-Links
Zielpublikum:	Vertriebsmitarbeiter, Techniker, Ingenieure
Verfasser:	Dr. Thomas Wellinger
Veröffentlicht:	Februar 2012

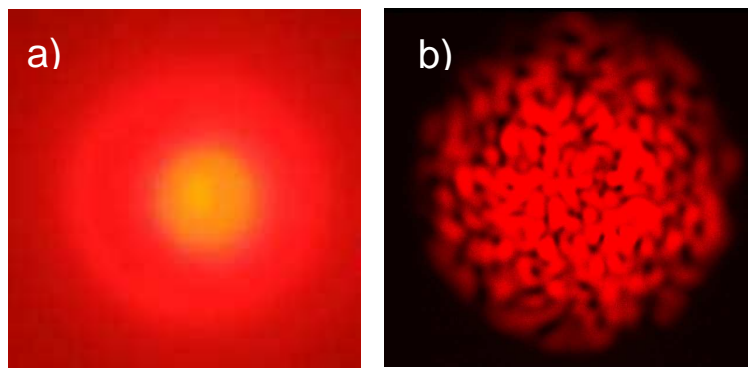


Abbildung 1 – a) Typischer LED-Lichtfleck mit homogener Ausleuchtung, b) Specklemuster eines VCSELs. Gezeigt ist das am Ende einer Multimode-Faser oder an einer Oberfläche auftretende Energiemuster. Das Muster entsteht als Ergebnis von Interferenzen einer Reihe kohärenter Wellenfronten. (Bildquelle: Vadim Makarov www.vad1.com).

Modenrauschen äussert sich als unerwünschte Amplitudenmodulation des Empfangssignals. Es unterscheidet sich von den meisten anderen Arten des Rauschens in der elektronischen Welt, da es nicht aus externen Quellen, sondern vom Signal selbst herrührt, das mit dem optischen Kanal interagiert.

Das Problem tritt auf, wenn zwei Faktoren zusammen kommen:

1. Modenkopplung und
2. modenselektive Dämpfung

Damit Modenrauschen auftreten kann, müssen beide Voraussetzungen - unabhängig vom eingesetzten Fasertyp - vorhanden sein.

Modenrauschen in Multimode-Glasfaser-Links

Modenkopplung – führt nicht zu Rauschen

Multimode-Glasfasern, heute hauptsächlich OM3 und OM4, können mehrere hundert Moden transportieren. Diese Moden entsprechen Lösungen der Maxwell-Gleichungen oder anders gesagt, den diskreten Pfaden, denen das Licht in einer Glasfaser folgen kann. Diese Moden können in Gruppen entarteter Moden¹ (in der Regel 18 bis 20) zusammengefasst werden. In einem perfekten Glasfasersystem kann die Energie (das Licht), die in eine Mode gekoppelt wird, nicht in eine andere Mode der gleichen Faser gekoppelt werden. In der Realität treten jedoch Unvollkommenheiten des optischen Kanals auf wie zum Beispiel:

- Fehlausrichtungen der Steckverbinder
- Abweichungen zwischen den Brechungsindizes zweier miteinander verbundener Fasern
- Unreinheiten in den Fasern
- Unregelmässigkeiten der Fasergeometrien
- Mikrobiegungen
- Spannungen in der Glasfaser

Ist beispielsweise ein Steckverbinder fehlausgerichtet, verlassen manche Moden den Faserkern vollständig und bewegen sich im Mantel weiter, wo sie sehr stark gedämpft werden. Andere Moden übertragen ihre Energie möglicherweise teilweise oder sogar vollständig in andere Moden.

Wird das aus einem VCSEL stammende Licht in eine Multimode-Glasfaser eingekoppelt, wird es in der Regel zunächst in vier bis zehn Moden transportiert (während die verbleibenden Moden keine Leistung transportieren). Nachdem das Licht einen sehr kurzen Weg entlang der Faser zurückgelegt hat, besitzt es in all diesen Moden nach wie vor die gleiche Wellenlänge. Aufgrund unterschiedlicher modaler Gruppengeschwindigkeiten treten jedoch Phasenverschiebungen auf. Für sich genommen stellt dies noch kein Problem dar. Bei Empfang des Signal trifft jede Mode auf eine andere Stelle der Empfangsdiode auf. Etwaige Phasendifferenzen wirken sich also nicht aus – lediglich die Gesamtzahl der Photonen ist wichtig. Allerdings können Modenkopplungseffekte dazu führen, dass aus verschiedenen Moden stammendes Licht in einer einzigen Mode zusammengeführt wird. Die Phasendifferenzen führen in diesem Fall zu Interferenzeffekten in dieser neuen Mode.

Der betreffende Interferenzprozess ist ziemlich kompliziert. Besitzen zwei gekoppelte Moden bei 180 Grad Phasenverschiebung in etwa die gleiche Amplitude, löschen sich die Signale in der neuen Mode gegenseitig aus. In diesem Fall kann keine Energie in dieser Mode transportiert werden. Bei anderen Phasenverschiebungen ist der Signalverlust sehr viel geringer. In den meisten Fällen geht trotzdem ein erheblicher Teil der Energie verloren. Sind die Signale genau phasengleich, wird natürlich die gesamte Energie in die neue Mode eingekoppelt. Bei Interferenzen dieser Art verschwindet keine Energie. Sie wird lediglich an anderer Stelle eingekoppelt. Das resultierende Energiemuster an der Schnittstelle einer Multimode-Glasfaser wird als Specklemuster bezeichnet.

Es ist also wichtig zu verstehen, dass es sich beim Vorgang der Modenkopplung oder dem resultierenden Specklemuster weder um Rauschen an sich noch um eine direkte Rauschquelle handelt. Ein Specklemuster ist lediglich das Resultat des Lichttransports durch eine Multimode-Glasfaser. Rauschen tritt nur dann auf, wenn modenselektive Dämpfung in das System eingeführt wird.

¹ Entartete Moden sind Modengruppen mit der gleichen exponentiellen Ausprägung der Feldkomponenten entlang der Ausbreitungsrichtung in einer Glasfaser, jedoch mit verschiedenen Konfigurationen in jeder transversalen Richtung.

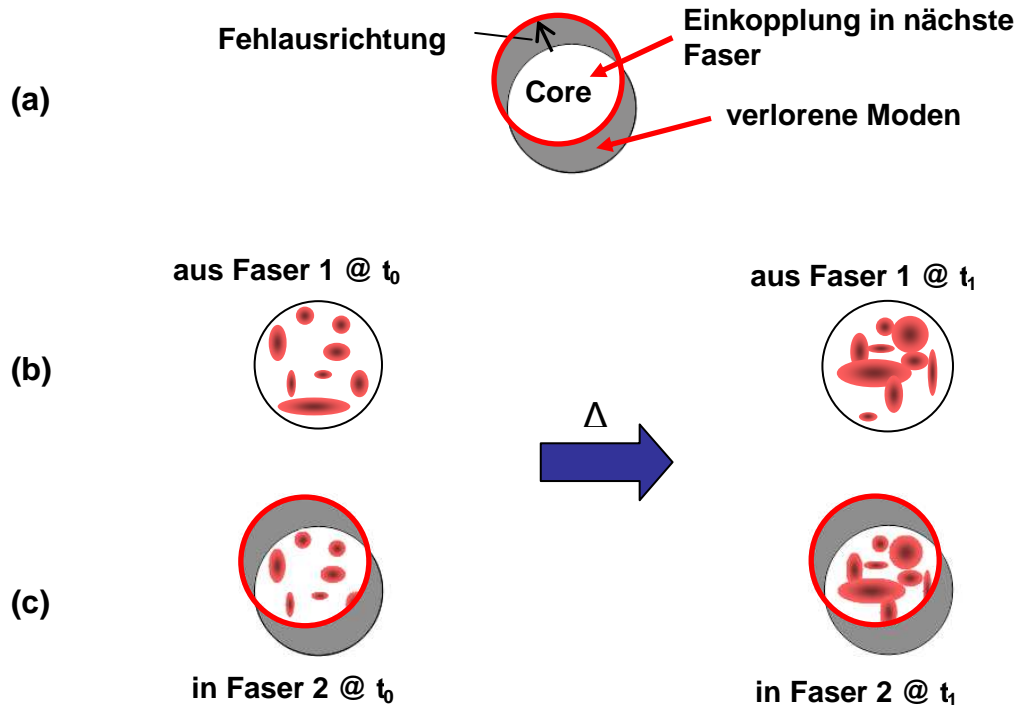


Abbildung 2 – (a) Fehlausrichtung zweier miteinander verbundener Faserkerne. Der weisse Bereich kennzeichnet die überlappenden Kerne von Faser 1 und Faser 2. Die grauen Bereiche sind Regionen, in denen keine direkte Verbindung zwischen beiden Faserkernen besteht, so dass aus Faser 1 austretende Moden in den Mantel von Faser 2 eingekoppelt werden und schliesslich verloren gehen. (b) Obwohl sich das Specklemuster am Ausgang von Faser 1 im Lauf der Zeit ändert, bleibt die Gesamtenergie erhalten. (c) Werden die beiden Fasern mit einem minderwertigen Steckverbinder verbunden, geht aus manchen Moden Energie verloren, während andere Moden unbeeinträchtigt bleiben können. Da die insgesamt verloren gehende Energie im Zeitverlauf zufällig schwankt, schwankt auch die in die nachfolgende Faser übertragene Energie entsprechend.

Modenselektive Dämpfung – führt zu Rauschen.

Fehlausgerichtete Steckverbinder usw. führen also nicht nur zu Modenkopplung sondern auch zum vollständigen Verlust von Moden aus der Faser. Manche Moden gehen vollständig verloren, andere koppeln ihre Energie in andere Moden ein, wobei die Energie in der Faser verbleibt und andere Moden minimal beeinträchtigt werden können. Wenn das oben beschriebene, sich zufällig und abrupt von Mode zu Mode ändernde Signal (wie in Abbildung 2 gezeigt) auf einen minderwertigen Steckverbinder trifft, verringert sich die Signalstärke auf zufällige und abrupt schwankende Art. Geht beispielsweise eine spezielle Mode in einem Steckverbinder verloren, geht kein Signal verloren, wenn die betreffende Mode keine Energie transportiert. Ist die betreffende Mode aber sehr energiereich, ist der Energieverlust sehr hoch. Da die Signalenergie schnell und zufällig in diese Mode hinein und aus ihr heraus wechselt, kommt es zu einem zufälligen Verlust an gesamter Signalstärke. Es tritt also Rauschen im Empfangssignal auf.

Schlussfolgerung

In Multimode-Systemen ist Modenrauschen hauptsächlich bei von VCSEL angesteuerten Anwendungen ein Problem, unabhängig davon, ob OM1-, OM2-, OM3- oder OM4-Fasern verwendet werden. Im Interesse eines möglichst geringen Modenrauschens sollte die Fehlausrichtung in Glasfaserverbindungen unbedingt durch Verwendung hochwertiger Steckverbinder so klein wie möglich gehalten werden. Die tatsächlichen Längen der einzelnen Fasern sind nur von nachrangiger Bedeutung.

Modenrauschen in Singlemode-Glasfaser-Links

Wie wir gesehen haben, ist eine allgemeine Voraussetzung für Modenrauschen die gleichzeitige Ausbreitung mehrerer Moden. Trotzdem kann Modenrauschen auch bei Singlemode-Fasern zu einem Problem werden. Und zwar wie eingangs erwähnt in Singlemode-Links, die kurze, wie in Abbildung 3 gezeigte Fasersegmente beinhalten. Besteht an einer Verbindungsstelle zweier Fasern ein lateraler Versatz der Faserkerne, wird Energie aus der linear polarisierten Fundamentalmode LP_{01} der anregenden Faser in höhere Moden (z.B. LP_{11}) der nachfolgenden Faser eingekoppelt². An der zweiten Schnittstelle – wieder mit Kernversatz – wird ein Teil dieser Mode mit höherer Ordnung zurück in die Mode LP_{01} gekoppelt. Ist die Differenz des optischen Pfads ΔnL (Δn ist die Gruppenindexdifferenz zwischen LP_{01} und LP_{11} und L ist die Länge des kurzen Fasersegments) kleiner als die Kohärenzlänge des Lasers (was bei Telekommunikationslasern die Regel ist), besitzt das in LP_{01} zurück gekoppelte Signal eine Phasenabweichung. Entsprechend wird das Hauptsignal durch Interferenz verstärkt oder gedämpft. Der gleiche Mechanismus kommt bei Fluktuationen der Betriebswellenlänge zum Tragen.

Jede Veränderung des Interferenzmusters führt zu einer geänderten Einfügedämpfung an der zweiten Verbindungsstelle und damit zu einem Signalrauschen durch Amplitudenmodulation (analog zu dem in Multimode-Systemen beobachteten Effekt). Dieses Phänomen tritt in Singlemode-Fasern mit Verbindungsstellen grundsätzlich auf. In der Regel ist dies kein Problem, da die höheren Moden erheblich gedämpft werden oder aus der Faser austreten. Gibt es im Link allerdings kurze Fasersegmente (kürzer als etwa zwei Meter), werden die entstehenden sekundären Moden unter Umständen nicht stark genug gedämpft und können das ursprüngliche Signal stören.

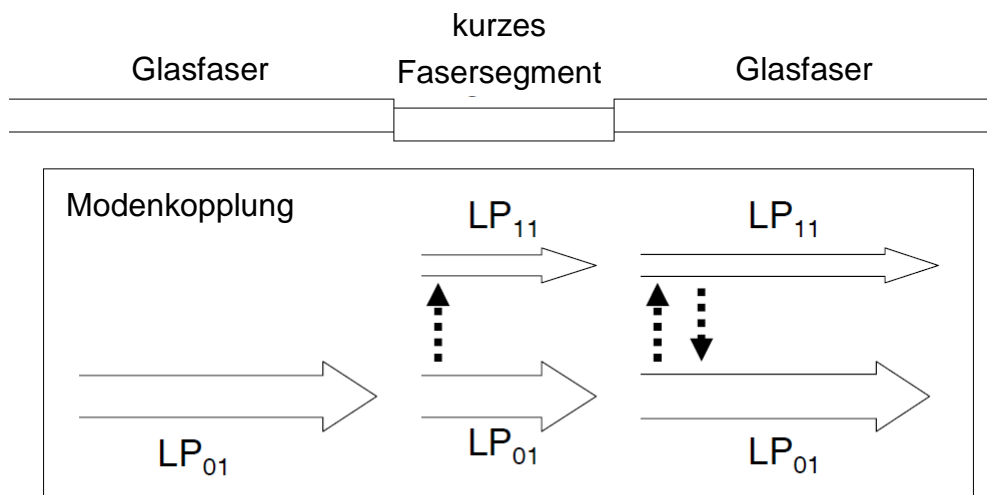


Abbildung 3 – Schematische Darstellung eines kurzen Fasersegments mit angeschlossenen Singlemode-Glasfasern. An der ersten Verbindungsstelle der Glasfasern wird ein Teil der Energie der Fundamentalmode in eine Mode höherer Ordnung eingekoppelt. An der folgenden Verbindungsstelle wird dann ein Teil der Energie zurück in die Fundamentalmode übertragen, wo sie zu Interferenz führt.

² Weitere Einzelheiten zu LP-Moden im Anhang.

Schlussfolgerung

Zur Minimierung des Modenrauschens in Singlemode-Links sollten unbedingt nur Fasersegmente (z.B. Patchkabel in Steckmodulen usw.) mit mehr als zwei Metern Länge verwendet werden. Auch die Verwendung besonders hochwertiger Steckverbinder wie Grade A* oder Grade B trägt wegen ihrer geringen Exzentrizität zur Minimierung des Modenrauschens bei.

Anhang

Die beschriebenen Modenfelder ergeben sich aus den Lösungen der Maxwell-Gleichungen in zylindrischen dielektrischen Wellenleitern (Glasfasern) [1]. Die Anzahl der geführten Moden und deren transversale Profile sind von den genauen Daten der Glasfaser und der Wellenlänge abhängig. Singlemode-Glasfasern können für jede Polarisierungsrichtung nur eine Mode führen. Bei Multimode-Glasfasern sind mehrere hundert Moden möglich. Abbildung 4 zeigt die transversalen Profile einiger weniger linear polarisierter Moden (LP-Moden).

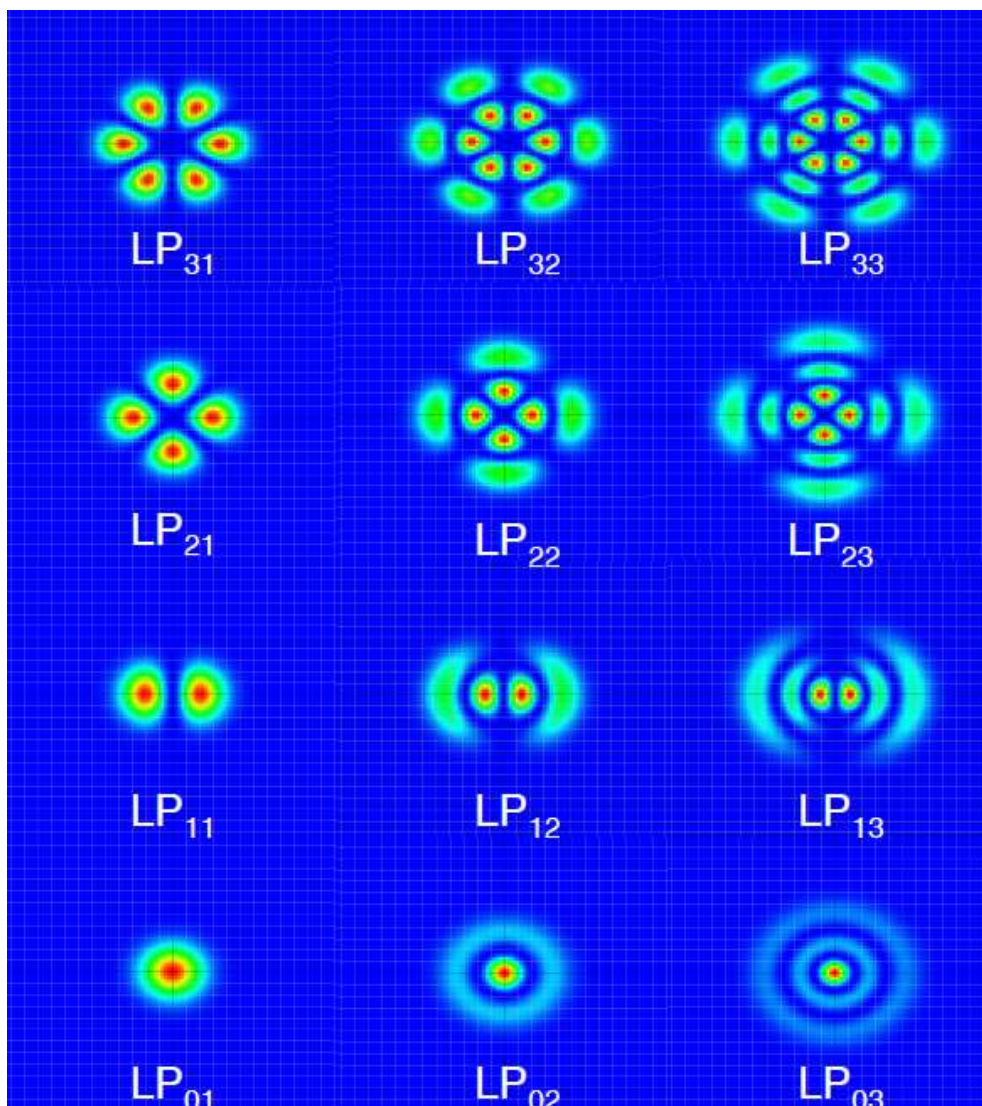


Abbildung 4 – Transversale Intensitätsverteilung einiger LP-Moden in einer Glasfaser.

LP-Moden mit ähnlichen Eigenschaften, beispielsweise mit gleicher Geschwindigkeit, werden als entartete Moden bezeichnet und können als einheitliche Modengruppe betrachtet werden. Für LP_{mn} ist die Hauptmodenzahl p wie folgt definiert [2]:

$$p = m + 2n - 1$$

Hierbei ist m die azimutale und n die radiale Modenzahl.

Mithilfe dieser Informationen können aus den eben gezeigten Moden die jeweiligen Gruppen entarteter Moden gebildet werden:

Hauptmodenzahl	enthaltene Moden
1	LP_{01}
2	LP_{11}
3	LP_{02}, LP_{21}
4	LP_{12}, LP_{31}
5	LP_{03}, LP_{22}
6	LP_{13}, LP_{32}
7	LP_{23}
8	LP_{33}

Referenzen

- [1] E. Snitzer, „*Cylindrical dielectric waveguide modes*“, J. Opt. Soc. of America, **51**, 491 (1961)
- [2] R. Olshansky, „*Mode Coupling Effects in Graded-index Optical Fibers*“, Appl. Opt., **14**, 935 (1975)