

Ereignis	Reflexionsdämpfung
senkrecht gebrochenes LWL-Ende	14 dB
5° schräg gebrochener Parabelprofil-LWL	≈ 20 dB
zerkratzte Oberfläche, schlechter Bruch	(20...40) dB
PC-Stecker (physikalischer Kontakt)	(30...50) dB
Schrägschliff-Stecker (8 °)	> 55 dB
Brechzahldifferenz 0,004	57 dB
Brechzahldifferenz 0,001	69 dB
HRL- bzw. APC-Stecker (Schrägschliff + PC)	> 70 dB

Tabelle 4.3: Größenordnungen typischer Reflexionen

Werden zwei Lichtwellenleiter mit geringfügig unterschiedlichen Kernbrechzahlen (bedingt durch Toleranzen) miteinander verspleißt, kann die Brechzahldifferenz eine messbare Reflexion bewirken (vergleiche drittletzte und vorletzte Zeile in Tabelle 4.3). Der Spleiß erscheint dann im Rückstreudiagramm mit einer winzigen Spitze und bedeutet keinen Mangel der Spleißverbindung.

4.2.5 Zusammenfassung

Wir fassen die wesentlichen Erkenntnisse zur Rückstreuung als universelles Messverfahren folgendermaßen zusammen:

- Die Besonderheit der Rückstreuung im Vergleich zu herkömmlichen Reflektometer-Verfahren ergibt sich aus der Tatsache, dass nicht nur Leistungsrückflüsse von diskreten Ereignissen detektiert werden, sondern dass der Lichtwellenleiter durch die Rayleighstreuung entlang der gesamten Strecke ausgemessen werden kann. Das ermöglicht die vollständige Charakterisierung der installierten LWL-Strecke und begründet damit die Universalität dieses Mess-Verfahrens.
- Die Rückstreuurve liefert eine anschauliche Darstellung des Dämpfungs- und des Reflexionsverhaltens des Lichtwellenleiters.
- Signalreflexionen entstehen an Inhomogenitäten der Brechzahl entlang der LWL-Strecke. Die reflektierten Leistungen sind meist wesentlich größer als die rückgestreuten Leistungen und damit deutlich im Rückstreudiagramm nachweisbar.
- Leistungsfähige Rückstreuemesstechnik ist in der Lage, die Strecke in 32.000 Messpunkte aufzulösen, eine Messzeit deutlich unter einer Minute und eine Dynamik im Singlemode-Bereich von bis zu 45 dB zu realisieren.
- Bei der Messung an Singlemode-Strecken ist ein Modul mit möglichst hoher Dynamik zu einzusetzen.

4.3 Die Analyse von Rückstreudiagrammen

4.3.1 Einleitung

Im Folgenden legen wir dar, wie man möglichst umfassende Informationen über die LWL-Strecke aus dem Rückstreudiagramm erhält. Zunächst wird die Längenmes-

sung und die Dämpfungsmessung mit Hilfe der Rückstreumesstechnik erläutert. Im Weiteren wird darauf eingegangen, wie Toleranzen der Parameter der Lichtwellenleiter die Rückstreckurve beeinflussen. Es wird gezeigt, wie man den Einfluss der Toleranzen auf das Messergebnis reduzieren kann, um zu zuverlässigen Aussagen über die Eigenschaften der LWL-Strecke zu kommen.

4.3.2 Die Interpretation der Rückstreckurve

Längenmessung

Prinzipielle Aussagen zu den Ereignissen auf der Rückstreckurve wurden bereits im vorhergehenden Abschnitt gemacht. Auf der Abszisse im Rückstreckdiagramm wird die LWL-Länge L aufgetragen (vergleiche Bild 4.13), die aus der gemessenen Signallaufzeit t berechnet wird. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$L = \frac{t \cdot c}{2 \cdot n_{gr}} \quad (4.6)$$

Der Faktor $\frac{1}{2}$ ergibt sich aus der Tatsache, dass der Lichtwellenleiter zweimal durchlaufen wird, nämlich in Hin- und in Rückrichtung. Die gemessene Signallaufzeit muss folglich halbiert werden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Gruppengeschwindigkeit im LWL-Kern. Diese ergibt sich aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($c \approx 300.000 \text{ km/s}$) dividiert durch die Gruppenbrechzahl des Glases n_{gr} . Näherungsweise gilt für die Gruppenbrechzahl $n_{gr} \approx 1,5$, somit für die Ausbreitungsgeschwindigkeit im LWL-Kern:

$$v_{gr} = \frac{c}{n_{gr}} \approx 200.000 \text{ km/s} \quad (4.7)$$

Sollen die LWL-Längen exakt ermittelt werden, was insbesondere bei der Fehlersuche aber auch für der Ermittlung des richtigen Aufmaßes wichtig ist, muss die Gruppenbrechzahl exakt bekannt sein.

Diese kann am Rückstreckmessgerät eingestellt werden. Die Gruppenbrechzahlen sollte man vom Lieferant der Lichtwellenleiter erfragen.

Anbieter	LWL-Typ	Brechzahl	Wellenlänge/nm
Corning	SMF-28e™	1,4677	1310
		1,4682	1550
	MetroCor	1,469	1550
	LEAF	1,468	1550
		1,469	1625
	Submarine SMF-LS	1,470	1550
	InfiniCor	1,481	850
	Durchmesser 50 µm	1,476	1300

SIECOR	SMF 1528	1,4675	1310
		1,4681	1550
AT&T	TrueWave (1995)	1,4738	1310
		1,4732	1550
Lucent (OFS)	TrueWave (1997)	1,471	1310
		1,470	1550
	TrueWave RS (1998)	1,471	1310
		1,470	1550/1625
	Allwave	1,466	1310
		1,467	1550
LaserWave Durchmesser 50 µm	1,483	850	
	1,479	1300	
Alcatel	Standard-SM-LWL	1,470	1310/1550
	Enhanced-SM-LWL	1,4640	1310
		1,4645	1550
	TeraLight	1,470	1310/1550
	TeraLight Metro	1,470	1550
	Multimode-LWL Durchmesser 50 µm	1,482	850
		1,480	1300
	Multimode-LWL Durchmesser 62,5 µm	1,497	850
		1,492	1300
GLight Durchmesser 62,5µm	1,497	850	
	1,492	1300	
Sumitomo	PureGuide	1,470	1550
Pirelli	FreeLight	1,470	1550
Draca Comteq	Multimode-LWL Durchmesser 50 µm	1,482	850
		1,477	1300
	Multimode-LWL Durchmesser 62,5 µm	1,496	850
		1,491	1310
	Standard-SM-LWL	1,4677	1310
1,4682		1550	
Dätwyler	Standard-SM-LWL	1,468	1310
		1,467	1550
j-fiber	Multimode-LWL Durchmesser 50 µm	1,483	850
		1,478	1300
	Multimode-LWL Durchmesser 62,5 µm	1,497	850
		1,493	1300
	Standard-SM-LWL	1,467	1310
1,467		1310	
Leoni	Multimode-LWL Durchmesser 50 µm	1,483	850
		1,478	1300
	Multimode-LWL Durchmesser 62,5 µm	1,497	850
		1,493	1300
	Standard-SM-LWL	1,4695	1310
1,4701		1550	

Tabelle 4.4: Gruppenbrechzahlen laut Angaben in den Datenblättern

In Tabelle 4.4 wurden einige effektive Gruppenbrechzahlen verschiedener LWL-Typen (laut Angaben in den Datenblättern) zusammengestellt. Sind die Gruppenbrechzahlen nicht bekannt, kann man für die gängigen LWL-Typen in guter Näherung die Werte entsprechend Tabelle 4.5 einsetzen. Diese Brechzahlen gelten unter der Voraussetzung, dass der Mantel des Lichtwellenleiters aus reinem Quarzglas besteht (SiO_2) und der Kern mit Germaniumdioxid (GeO_2) dotiert wurde.

Dabei ergeben sich die Kernbrechzahlen aus den Mantelbrechzahlen entsprechend Gleichung (1.5) unter Berücksichtigung der für den jeweiligen LWL-Typ geltenden numerischen Apertur.

LWL-Typ	Kernbrechzahl	Mantelbrechzahl
Multimode-LWL, 850nm, Klasse A1a	1,481	1,465
Multimode-LWL, 1300nm, Klasse A1a	1,476	1,462
Multimode-LWL, 850nm, Klasse A1b	1,495	1,465
Multimode-LWL, 1300nm, Klasse A1b	1,490	1,462
Singlemode-LWL, 1310nm, Klasse B 1.1	1,467	1,462
Singlemode-LWL, 1550nm, Klasse B 1.1	1,467	1,462

Tabelle 4.5: Gruppenbrechzahlen typischer Lichtwellenleiter

Umgekehrt kann man aus einer bekannten Faser-Länge auf die Gruppenbrechzahl schließen: Dabei setzt man den Cursor auf das Ende der Strecke und liest die angezeigte Länge ab. Dann verändert man so lange die Einstellung der Brechzahl, bis die angezeigte Länge mit der bekannten Länge übereinstimmt.

So können die Brechzahlen einzelner Teilabschnitte ermittelt werden.

Bei der Längenmessung muss man zwischen Faser-Länge und Kabel-Länge unterscheiden. Im LWL-Kabel ist eine Faserüberlänge (Verseilzuschlag) vorhanden, da die Faser lose im Kabel liegt. Diese ist erforderlich, damit bei Biegung des Kabels die Faser nicht reißt. Außerdem ist der Verseilzuschlag wegen unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Kabelmaterialien und Faser erforderlich.

Der Verseilzuschlag hängt stark von der Art der Verseilung und von der Anzahl der Fasern im Kabel ab. Er liegt typisch bei 0,5 %. Bei größeren Streckenlängen ist es wichtig zwischen Kabel-Länge und Faser-Länge zu unterscheiden.

Zum Durchlaufen einer bestimmten Kabel-Länge benötigt das Licht eine größere Zeit als zum Durchlaufen einer gleich großen Faser-Länge, da die Faser im Kabel um den Verseilzuschlag länger ist. Das bedeutet, dass die effektive Gruppenbrechzahl des Kabels um den Faktor des Verseilzuschlages größer als die der Faser ist.

Für eine genaue Lokalisierung des fehlerhaften Ortes legt man die Kabel-Länge zugrunde, da deren Länge dem tatsächlichen Abstand zwischen Messort und Ort des Fehlers entspricht.

Die Gruppenbrechzahl des Kabels kann man ermitteln, wenn die exakte Kabellänge bekannt ist. (Diese erhält man aus dem Zählstreifen oder dem Kabelaufdruck.) Dann macht man eine Rückstreuungsmessung, setzt den Cursor auf das Ende der Strecke (an den Punkt, ehe der Reflexionspeak ansteigt) und verstellt die Brechzahl solange, bis die angezeigte Länge mit der Kabellänge übereinstimmt.

Diese Kabelbrechzahl hinterlegt man zusammen mit dem Messprotokoll. Im Havariefall stellt man vor der Messung die Kabelbrechzahl ein und erhält den tatsächlichen Ort des Ereignisses.

Dämpfungsmessung

An der Ordinate der Rückstreckkurve werden Dämpfungen in Dezibel abgelesen. Die angezeigten Werte entsprechen nur der Hälfte der tatsächlichen Dämpfung, da die Strecke zweimal durchlaufen und das Signal tatsächlich doppelt gedämpft wird. So werden die Dämpfungen der Stufen im Rückstreudiagramm, aber auch die Neigung der Rückstreckkurve richtig angezeigt. Ebenso der Dämpfungskoeffizient, der sich aus dem Dämpfungsabfall, bezogen auf die LWL-Länge, ergibt (vergleiche Gleichung (4.3) und Bild 4.13).

Die Reflexionsspitzen über dem Rückstreusignal werden allerdings nur mit halber Höhe dargestellt, da dieser Teil des Kurvenverlaufs ja auch durch zwei dividiert wird (vergleiche Abschnitt 4.7).

Generell sollten die Anregungsbedingungen die gleichen sein, wie bei der Dämpfungsmessung (vergleiche Abschnitt 4.1.2). Werden diese nicht realisiert, führt das zu Fehlern im Dämpfungskoeffizienten am Anfang der Strecke. Um Fehler zu vermeiden, darf zur Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten des Lichtwellenleiters der erste Cursor erst gesetzt werden, wenn der Dämpfungsabfall linear erfolgt. Hieraus ist ersichtlich, dass durch manuelles Setzen der Cursors Messfehler entstehen können.

Die Dämpfungsstufen werden vom Rückstreuungsmessgerät automatisch ausgewertet. Dabei wird meist so vorgegangen, dass in die Messkurve vor und hinter dem Ereignis jeweils eine Ausgleichsgerade gelegt wird (Minimierung der quadratischen Abweichung aller Messpunkte: LSA-Methode, Fünf-Punkt-Methode) und diese Geraden bis zum Ort des Ereignisses extrapoliert werden. Der Abstand der Geraden ist dann die (scheinbare) Dämpfung a (Bild 4.16).

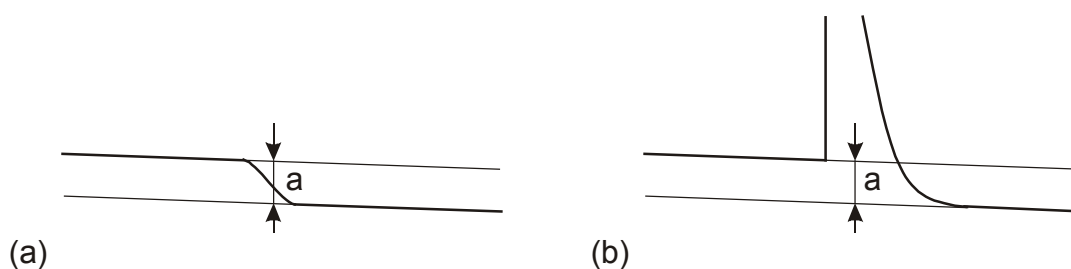


Bild 4.16: Messung einer Dämpfung (a) ohne bzw. (b) mit Reflexion

Auf diese Weise werden auch geringfügige Schwankungen der Messwerte durch Rauscheffekte eliminiert. Die LSA-Methode darf nicht angewandt werden, wenn Stufen in der Rückstreu­kurve sind (beispielsweise Spleiße). Dann sind die Abschnitte zwischen den Stufen mit der LSA-Methode separat auszuwerten.

Bei der Zwei-Punkt-Methode wird eine Gerade durch zwei Punkte der Messkurve gelegt. Dadurch wird das Messergebnis durch Rauscheffekte verfälscht.

Die Länge des Abklingvorganges in Bild 4.16 (a) entspricht der halben Impuls­länge (vergleiche Abschnitt 4.5.4).

Um festzustellen, ob ein diskretes Ereignis und nicht eine Ungleichmäßigkeit des Dämpfungsver­laufs vorliegt, ist das Gebiet um die fragliche Stelle mit verschiedenen Impuls­längen zu prüfen. Ein diskretes Ereignis bewirkt eine unendlich schmale Stö­rung, welche nur bedingt durch die endliche Impulsbreite auch eine endliche Signal­breite im Rückstreudiagramm bewirkt.

Ändert man die Impulsbreite, so ändert sich auch die Signalbreite. Wenn sich die Kurvenform bei Veränderung der Impulsbreiten nicht ändert, handelt es sich um eine Ungleichmäßigkeit des Dämpfungsver­laufs.

Die Länge des Abklingvorganges in Bild 4.16 (b) hängt von den Empfängereigen­schaften, der Reflexionsdämpfung und der Impulsbreite ab.

4.3.3 Die Auswertung problematischer Rückstreudiagramme

Das Prinzip der bidirektionalen Messung

Werden zwei Lichtwellenleiter mit identischen Parametern miteinander gekoppelt (Spleiß oder Stecker), so ist aus der Stufe im Rückstreudiagramm unmittelbar die Dämpfung ablesbar. Weisen die miteinander gekoppelten Lichtwellenleiter unter­schiedliche Parameter auf, so überlagern sich den negativen Stufen durch Koppel­verluste positive oder negative Stufen bedingt durch Toleranzen der LWL-Parameter. Die Stufe zeigt also mehr als nur die Qualität des Spleißes oder des Steckers!

Dieser Effekt tritt insbesondere bei der Kopplung von Multimode-LWL mit unter­schiedlichen Dotierungen (unterschiedliche Dämpfungsklassen) auf. Besonders deut­lich sind die Stufen, wenn ein 50 μm -LWL mit einem 62,5 μm -LWL verbunden wird. Beim Singlemode-LWL entstehen die Stufen durch Toleranzen in den Modenfeld­durchmessern (vergleiche Abschnitt 4.3.4).

Wir betrachten zur Veranschaulichung zunächst zwei idealisierte Fälle. Bild 4.17 (a) zeigt zwei Lichtwellenleiter mit identischen Parametern und folglich identischem Rückstreuverhalten. Diese beiden Lichtwellenleiter werden über einen schlechten Spleiß miteinander verbunden.

Es ergibt sich ein Koppelverlust zwischen den beiden Lichtwellenleitern, der als ne­gative Stufe im Rückstreudiagramm erscheint, sowohl wenn von A nach B (Bild 4.17 (b)) als auch wenn von B nach A (Bild 4.18 (c)) gemessen wird.

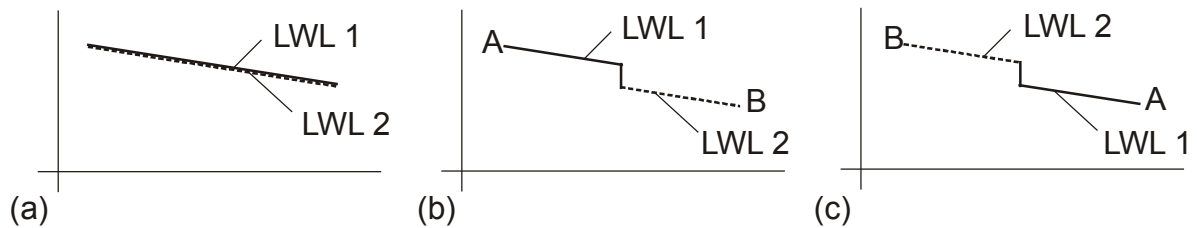


Bild 4.17: Kopplung zweier Lichtwellenleiter mit identischer Rayleighstreuung, schlechter Spleiß

Der zweite idealisierte Fall veranschaulicht zwei Lichtwellenleiter mit unterschiedlichen Rayleighstreuungen. Der Lichtwellenleiter 1 habe eine größere Rayleighstreuung als der Lichtwellenleiter 2. Entsprechend liegt die Rückstreuurve des ersten Lichtwellenleiters höher als die des zweiten Lichtwellenleiters (Bild 4.18 (a)).

Alle anderen Parameter seien identisch (keine intrinsischen Verluste), und die Verbindung sei ideal (keine extrinsischen Verluste).

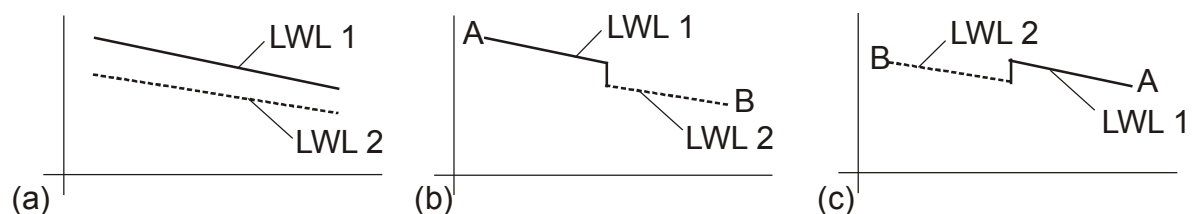


Bild 4.18: Kopplung zweier Lichtwellenleiter mit unterschiedlicher Rayleighstreuung, idealer Spleiß

Beim Übergang vom Lichtwellenleiter 1 zum Lichtwellenleiter 2 (A nach B) (Bild 4.18 (b)) entsteht eine negative Stufe infolge der unterschiedlichen Rayleighstreuungen. Misst man in entgegengesetzter Richtung von B nach A (Bild 4.18 (c)), entsteht eine gleich große positive Stufe, da der Unterschied in den Rayleighstreuungen in entgegengesetzter Richtung gemessen wird.

In der Realität überlagern sich beide Fehlerquellen (Parametertoleranzen und Koppelverlust). Folglich addieren sich auch die Effekte von Bild 4.17 und 4.18. Wie können nun diese Einflüsse getrennt werden? Wie kann man die Effekte durch Parametertoleranzen, die eigentlich nicht interessieren, eliminieren?

Dies wird möglich durch Messung von A nach B, von B nach A und Mittelwertbildung: Führt man eine Mittelwertbildung der Ereignisse von 4.17 (b) und (c) durch, addiert man eine negative Stufe zu einer negativen Stufe und dividiert durch 2: Es bleibt eine negative Stufe als Ergebnis.

Führt man eine Mittelwertbildung der Ereignisse von 4.18 (b) und (c) durch, addiert man eine positive zu einer gleich großen negativen Stufe: Diese kompensieren sich zu Null, es bleibt kein beobachtbares Ereignis mehr übrig.

Daraus wird anschaulich klar, dass Einflüsse, die Koppelverluste auf der Strecke verursachen, durch die Mittelwertbildung erhalten bleiben. Einflüsse, die durch unterschiedliche Rayleighstreuung verursacht werden kürzen sich und können auf diese Weise eliminiert werden.

Prinzipiell ist es möglich, dass eine positive Stufe an der Koppelstelle - bedingt durch unterschiedliche Rayleighstreuungen, durch einen gleich großen Koppelverlust - bedingt durch eine schlechte Kopplung oder Toleranzen der LWL-Parameter - kompensiert wird und das Rückstreudiagramm an dieser Stelle keine Stufe zeigt.

Misst man in entgegengesetzter Richtung, tritt eine entsprechend große negative Stufe auf. Diese ergibt sich aus der Summe einer negativen Stufe infolge unterschiedlicher Rayleighstreuungen und einer negativen Stufe durch schlechte Kopplung.

Beispiel:

Scheinbare Dämpfung in Vorwärtsrichtung: $a_{12} = 0,32$ dB, scheinbare Dämpfung in Rückrichtung: $a_{21} = -0,28$ dB. Mittelwert: $\bar{a} = 0,5 \cdot (a_{12} + a_{21}) = 0,02$ dB.

Namhafte Hersteller sind in der Lage, Lichtwellenleiter mit sehr engen Toleranzen zu fertigen. Verbindet man solche Fasern, sind die oben beschriebenen Effekte gering. Andererseits lassen die gültigen Normen relativ große Toleranzen für die Fasern zu. Faserhersteller, die den Herstellungsprozess weniger gut beherrschen, liefern Fasern mit starken Parameterschwankungen, so dass die oben beschriebenen Probleme auftreten.

Vorteile der bidirektionalen Messung

1. Bestimmung der wahren Dämpfung diskreter Ereignisse:

Die tatsächliche Dämpfung jedes einzelnen Ereignisses ergibt sich aus der Mittelwertbildung aus den Messungen in Hin- und Rückrichtung. Die Rückstreumessung von nur einer Seite ist nicht ausreichend. Die Mittelwertbildung hat sich in den Abnahmevorschriften (insbesondere im Singlemode-Bereich) weitgehend durchgesetzt.

2. Vergrößerung des messbaren Bereiches:

Durch die bidirektionale Messung kann der Messbereich vergrößert werden. Man misst von einer Seite, wobei die Rayleighstreuurve ab einer bestimmten Länge im Rauschen verschwindet. Dann misst man von der anderen Seite, wobei hier die Verhältnisse ebenso sind. Die beiden Messkurven werden gespiegelt einander zugeordnet, und die Endreflexion der einen Kurve wird auf den Anfang der anderen Kurve gelegt. Durch Überlagerung erhält man das Rückstreudiagramm der gesamten Strecke, wobei nur im mittleren Streckenbereich Messwerte aus beiden Richtungen vorliegen. Das heißt eine bidirektionale Auswertung ist nicht möglich.

3. Erkennung von Ereignissen, die sonst in der Totzone liegen:

Sind ein reflektierendes Ereignis (Stecker) und ein nicht reflektierendes Ereignis (Spleiß) eng benachbart, so kann die Totzone (vergleiche Abschnitt 4.5.5) des Steckers so groß sein, dass der Spleiß innerhalb der Totzone liegt und nicht messbar ist.

Das kann man vermeiden, wenn man die Richtung der Messung so wählt, dass erst der Spleiß und dann der Stecker durchlaufen wird. Misst man aus beiden Richtungen, kann das für alle Kombinationen Spleiß/Stecker gewährleistet werden.

Änderung der Rückstredämpfung an einer Koppelstelle

Es sei P_1 die Leistung unmittelbar vor der Koppelstelle. Durch Rayleighstreuung gelangt die Leistung $P_1 D_{s1}$ zurück zum Empfänger. Dabei ist D_{s1} der Rückstrefaktor vor der Koppelstelle. Hinter der Koppelstelle wird die Leistung P_1 entsprechend des Koppelverlustes η_{12} gedämpft, und der Rückstrefaktor hat den Wert D_{s2} (Bild 4.19).

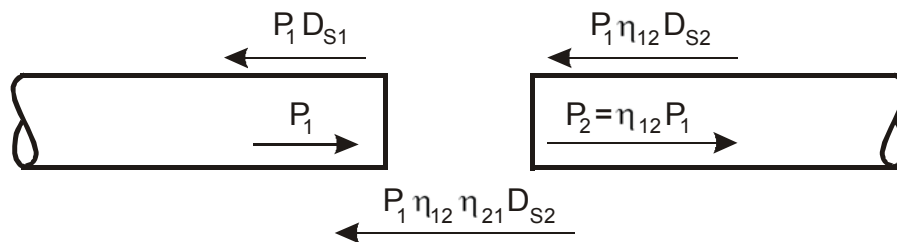


Bild 4.19: Änderung der Rückstredämpfung an einer Koppelstelle

Das rückgestreute Signal erleidet an der Koppelstelle nochmals einen Koppelverlust von η_{21} . Das Leistungsverhältnis LV aus den rückgestreuten Leistungen unmittelbar hinter der Koppelstelle zu derjenigen vor der Koppelstelle ergibt sich dann aus:

$$LV = \frac{\eta_{12} \eta_{21} D_{s2}}{D_{s1}} \quad (4.8)$$

Am Rückstremessgerät wird die Hälfte der gemessenen Dämpfung angezeigt:

$$a_{12} = \frac{1}{2} \cdot 10 \lg LV = 5 \lg \frac{\eta_{12} \eta_{21} D_{s2}}{D_{s1}} \quad \text{in dB} \quad (4.9)$$

Misst man von der anderen Seite, so erhält man:

$$a_{21} = 5 \lg \frac{\eta_{12} \eta_{21} D_{s1}}{D_{s2}} \quad \text{in dB} \quad (4.10)$$

Durch Mittelwertbildung kürzen sich die Rückstrefaktoren, und die unterschiedlichen Rückstredämpfungen haben auf das Ergebnis keinen Einfluss mehr:

$$\bar{a} = \frac{a_{12} + a_{21}}{2} = 5 \lg(\eta_{12} \eta_{21}) \quad \text{in dB} \quad (4.11)$$

In diesem Mittelwert sind nach wie vor außer dem Spleißverlust auch die Koppelverluste zwischen den Lichtwellenleitern enthalten. Es ist trotz Mittelwertbildung keine

Aussage über die Qualität des Spleißes möglich, sofern die LWL-Parameter unterschiedlich sind. Bildet man die Differenz aus (4.9) und (4.10), so kürzen sich die Koppelverluste und man erhält eine Aussage über das Verhältnis der Rückstreu-dämpfungen allein:

$$\Delta a = \frac{a_{12} - a_{21}}{2} = 5 \lg \frac{D_{s2}}{D_{s1}} \quad \text{in dB} \quad (4.12)$$

4.3.4 Kopplung von Singlemode-Lichtwellenleitern mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern

Der Modenfelddurchmesser wird mit einer bestimmten Toleranz spezifiziert. So gilt für den Standard-Singlemode-LWL für den Modenfelddurchmesser bei 1310 nm: $2w_0 = 8,6 \mu\text{m}$ bis $9,5 \mu\text{m}$. Der typische Modenfelddurchmesser bei 1550 nm liegt bei $10,5 \mu\text{m}$. Eine Toleranz ist nicht spezifiziert. Wegen Gleichung (1.39) ist jedoch davon auszugehen, dass die Toleranz im dritten optischen Fenster in der gleichen Größenordnung liegt. Unterscheiden sich die Modenfelddurchmesser der beiden Lichtwellenleiter an der Koppelstelle, können Koppelverluste und Stufen im Rückstreudiagramm entstehen. Der Koppelverlust berechnet sich folgendermaßen:

$$a = 20 \lg \left(\frac{w_1^2 + w_2^2}{2w_1 \cdot w_2} \right) \quad \text{in dB} \quad (4.13)$$

Aus der Formel ist ersichtlich, dass der Koppelverlust zwischen Singlemode-LWL von der Richtung **unabhängig** ist. Das heißt beim Übergang vom kleineren zum größeren Modenfelddurchmesser als auch umgekehrt entsteht ein gleich großer Koppelverlust. Man spricht von einer Fehlanpassung von gaußschen Strahlen. Nur wenn die Modenfelddurchmesser identisch sind, entsteht kein Koppelverlust.

Diese Tatsache hat sehr weitreichende Konsequenzen, insbesondere wenn es um die Frage geht, ob aus dem Rückstreudiagramm auf die Dämpfung der Strecke geschlossen werden kann (vergleiche Abschnitt 4.4.1). Bei Kopplung eines Lichtwellenleiters mit einem Modenfeldradius w_1 und einer Brechzahl n_1 an einen Lichtwellenleiter mit einem Modenfeldradius w_2 und einer Brechzahl n_2 berechnet sich die Stufe a_{12} im Rückstreudiagramm nach der Gleichung [4.2]:

$$a_{12} = \bar{a} + 10 \lg \frac{n_2}{n_1} + 10 \lg \frac{w_2}{w_1} \quad \text{in dB} \quad (4.14)$$

Dabei ist \bar{a} der Koppelverlust. Die Brechzahlunterschiede sind meist so gering, dass der zweite Summand vernachlässigt werden kann. In entgegengesetzter Richtung entsteht eine Stufe nach folgender Gleichung:

$$a_{21} = \bar{a} + 10 \lg \frac{n_1}{n_2} + 10 \lg \frac{w_1}{w_2} \quad \text{in dB} \quad (4.15)$$

Für einen Singlemode-LWL mit einem mittleren Modenfelddurchmesser von $10,5 \mu\text{m}$ ergeben sich in Abhängigkeit von der Toleranz Koppelverluste und Stufen entsprechend Tabelle 4.6. Die Stufe, die bei der Messung mit dem OTDR aus jeweils einer Richtung angezeigt wird, unterscheidet sich stark von der wahren Dämpfung.

Toleranz	w_1	w_2	\bar{a}	a_{12}	a_{21}
$\pm 0,1 \mu\text{m}$	$10,4 \mu\text{m}$	$10,6 \mu\text{m}$	0,001 dB	0,08 dB	-0,08 dB
$\pm 0,2 \mu\text{m}$	$10,3 \mu\text{m}$	$10,7 \mu\text{m}$	0,006 dB	0,17 dB	-0,16 dB
$\pm 0,3 \mu\text{m}$	$10,2 \mu\text{m}$	$10,8 \mu\text{m}$	0,014 dB	0,26 dB	-0,23 dB
$\pm 0,4 \mu\text{m}$	$10,1 \mu\text{m}$	$10,9 \mu\text{m}$	0,025 dB	0,36 dB	-0,31 dB
$\pm 0,5 \mu\text{m}$	$10,0 \mu\text{m}$	$11,0 \mu\text{m}$	0,039 dB	0,45 dB	-0,38 dB

Tabelle 4.6: Koppelverluste \bar{a} und Stufen a_{12} , a_{21} in Abhängigkeit von den Modenfelddurchmessern

Misst man nur aus einer Richtung deutet man die Stufe als Spleißdämpfung. Bei einer Toleranz von $2w = 10,5 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$ misst man beispielsweise eine negative Stufe von 0,26 dB, wohingegen der Koppelverlust nur 0,014 dB beträgt.

Deshalb ist für die Messung der Dämpfung eines Steckers oder Spleißes in jedem Fall eine bidirektionale OTDR-Messung mit anschließender Mittelwertbildung notwendig!

Kleine Toleranzen äußern sich in vernachlässigbaren Koppelverlusten aber in deutlichen Stufen im Rückstreudiagramm! Noch größere Stufen als in Tabelle 4.6 angegeben weisen auf die Mischung von verschiedenen Fasertypen hin (vergleiche Tabelle 1.13).

4.3.5 Zusammenfassung

Wir fassen die Erkenntnisse zur Analyse von Rückstreudiagrammen folgendermaßen zusammen:

- Längen, Dämpfungen und Dämpfungskoeffizienten können aus dem Rückstreudiagramm relativ problemlos entnommen werden. Dabei sollten die automatischen Auswertefunktionen des Rückstreumessgerätes genutzt werden. Diese liefern eine höhere Genauigkeit als eine manuelle Auswertung.
- Bei der Längenmessung ist auf die richtige Einstellung der Brechzahl zu achten.
- Man beachte den Unterschied zwischen Phasenbrechzahl und Gruppenbrechzahl, zwischen Mantelbrechzahl und Kernbrechzahl sowie zwischen Kabelbrechzahl und Faserbrechzahl.
- Die Auswertung des Rückstreudiagramms wird erschwert, falls die miteinander gekoppelten Lichtwellenleiter Toleranzen aufweisen. Dann können im Rückstreudiagramm zusätzliche positive und negative Stufen auftreten.

- Die Dämpfung diskreter Ereignisse (Stecker, Spleiße) lässt sich nur exakt bestimmen, wenn von zwei Seiten gemessen und der Mittelwert aus beiden Messungen berechnet wird.
- Besonders deutlich sind die Stufen, wenn Singlemode-LWL mit unterschiedlichen Modenfelddurchmessern oder Multimode-LWL mit unterschiedlichen Dotierungen gekoppelt werden.

4.4 Interpretation der Mess-Ergebnisse

4.4.1 Vergleich zwischen Dämpfungs- und Rückstreu- kurve

Bild 4.20 veranschaulicht den Unterschied zwischen Pegeldiagramm und Rückstreu- diagramm bei einer richtungsabhängigen Dämpfung. Als Beispiel werden zwei Multi- mode-LWL mit unterschiedlichen Kerndurchmessern, aber ansonsten identischen Parametern betrachtet. (Das Rückstreuverhalten beider Lichtwellenleiter sei identi- sch.)

Beim Übergang vom kleineren zum größeren Kerndurchmesser entsteht (theoretisch) kein Verlust. Das Pegeldiagramm (a) zeigt keine Stufe. Beim Übergang vom größe- ren zum kleineren Kerndurchmesser gibt es Verluste, und im Pegeldiagramm (b) tritt eine Stufe auf.

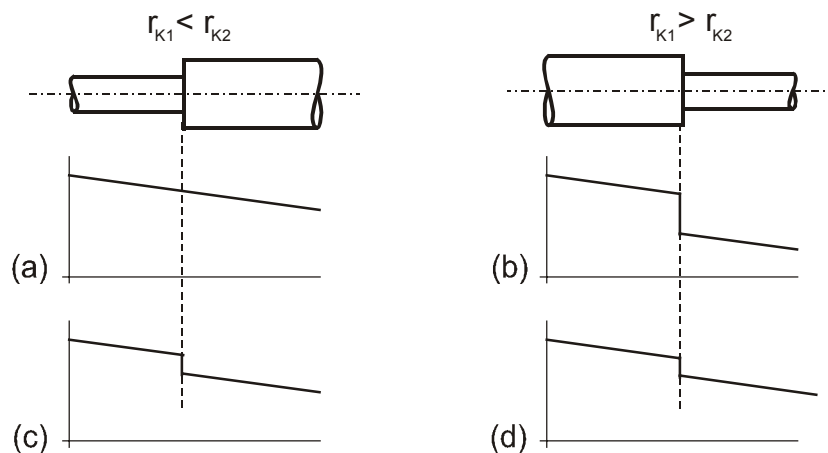


Bild 4.20: Dämpfungsverlauf im Pegeldiagramm (a) und (b) und im Rückstreu- diagramm (c) und (d) bei einer richtungsabhängigen Dämpfung (Vorausset- zung: beide Lichtwellenleiter haben gleiches Rückstreuverhalten)

Das Rückstreudiagramm zeigt den Mittelwert der Dämpfungen aus beiden Richtun- gen an, da jedes Ereignis (Stecker, Spleiß) durch das hin- und wieder zurücklaufen des Impulses zweimal durchlaufen wird. Folglich ergibt der Mittelwert der Stufen von (a) und (b) die Stufe in der Rückstreu- Kurven (c) bzw. (d), die folglich gleich groß sind. Aus dem Rückstreudiagramm ist folglich nicht erkennbar, auf welcher Seite der Lichtwellenleiter mit dem großen Durchmesser und auf welcher Seite der Lichtwellen- leiter mit dem kleinen Durchmesser liegt.