

verwenden und die Reinigungsanleitungen zu beachten. Der Reinigungszustand ist mit dem Fasermikroskop zu kontrollieren. Vorzugsweise sollten Videomikroskope zum Einsatz kommen.

Verschiedene Messhilfsmittel, wie optische Adapter, Rotlichtquelle und Fasererkennungsgesät sind nützlich für die Messung und Fehlersuche.

Für reproduzierbare Dämpfungsmessungen müssen die Moden im Multimode-LWL definiert angeregt werden. Die höchste Genauigkeit erhält man bei Verwendung einer Prüfschnur und eines Moden-Controllers.

Bei der Leistungsmessung ist eine hohe absolute Genauigkeit erforderlich. Die Wellenlängenabhängigkeit der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers ist zu berücksichtigen.

Mit dem Einfügeverfahren B entsprechend **DIN EN 61300-3-4** kann die Dämpfung einzelner Stecker gemessen werden.

Verschiedene Normen definieren die Dämpfungsmessung an Leitungen. Die Messverfahren unterscheiden sich dadurch, wie die Referenzierung aufgefasst wird. Sie kann mit einer, zwei oder drei Schnüren (Patchkabeln) erfolgen. Die Anordnung zur Messung ist bei allen drei Verfahren gleich.

4.3 Optische Rückstreuung

Die optische Rückstreuung an Lichtwellenleitern ist ein universelles Messverfahren. Es ermöglicht das installierte LWL-Netz umfassend zu charakterisieren. Trotz komfortabler Messgeräte ist das Verständnis der prinzipiellen Wirkungsweise des Rückstreuverfahrens erforderlich, um die Messergebnisse richtig interpretieren zu können.

In diesem Abschnitt wird das Prinzip der Rückstreuung erläutert. Anschließend wird dargelegt, wie man aus dem Verlauf der Rückstreuurve die Parameter der LWL-Strecke erhält.

Schließlich werden die Ereignisse untersucht, die die Rückstreuurve beeinflussen (Rayleighstreuung, Fresnelreflexionen) und ihre Größenordnungen abgeschätzt.

4.3.1 Prinzip der Rückstreuung

Die Rückstreuung an Lichtwellenleitern mit einem optischen Rückstreuungsgesät (OTDR: Optical Time Domain Reflectometer) liefert Aussagen über die Eigenschaften des verlegten Lichtwellenleiters, wie Dämpfungen, Dämpfungskoeffizienten, Störstellen (Stecker, Spleiße, Unterbrechungen), deren Dämpfungen und Reflexionsdämpfungen sowie die Streckenlängen bis zu den jeweiligen Ereignissen auf dem Lichtwellenleiter.

Zur Übergabe einer neu installierten LWL-Strecke gehört eine Dokumentation durch Rückstreudiagramme und deren Auswertung mit Hilfe einer geeigneten Software. Aus dieser Dokumentation muss beispielsweise ersichtlich sein, ob die Abnahmevorschriften oder Standards eingehalten werden.

Das Prinzip der Rückstreuung ist aus Bild 4.15 ersichtlich. Ein kurzer leistungsstarker Laserimpuls wird über einen Strahlteiler und den Gerätestecker in das Messobjekt eingekoppelt. Der Lichtwellenleiter bewirkt aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften Leistungsrückflüsse, die gemessen werden.

Verantwortlich für die Leistungsrückflüsse sind zwei Effekte: Fresnelreflexion und Rayleighstreuung. Eine **Fresnelreflexion** tritt immer dann auf, wenn die Brechzahl entlang des Lichtwellenleiters un stetig ist. Das ist zum Beispiel an einem Glas-Luft-Übergang am Ende der Strecke der Fall.

Aber auch Steckverbindungen zwischen zwei LWL-Teilstücken erzeugen in Abhängigkeit von der Oberflächengestalt des Steckverbinders eine mehr oder weniger große Reflexion. Der Effekt der Fresnelreflexionen ist uns in Form von Spiegelungen an Glasoberflächen allgegenwärtig.

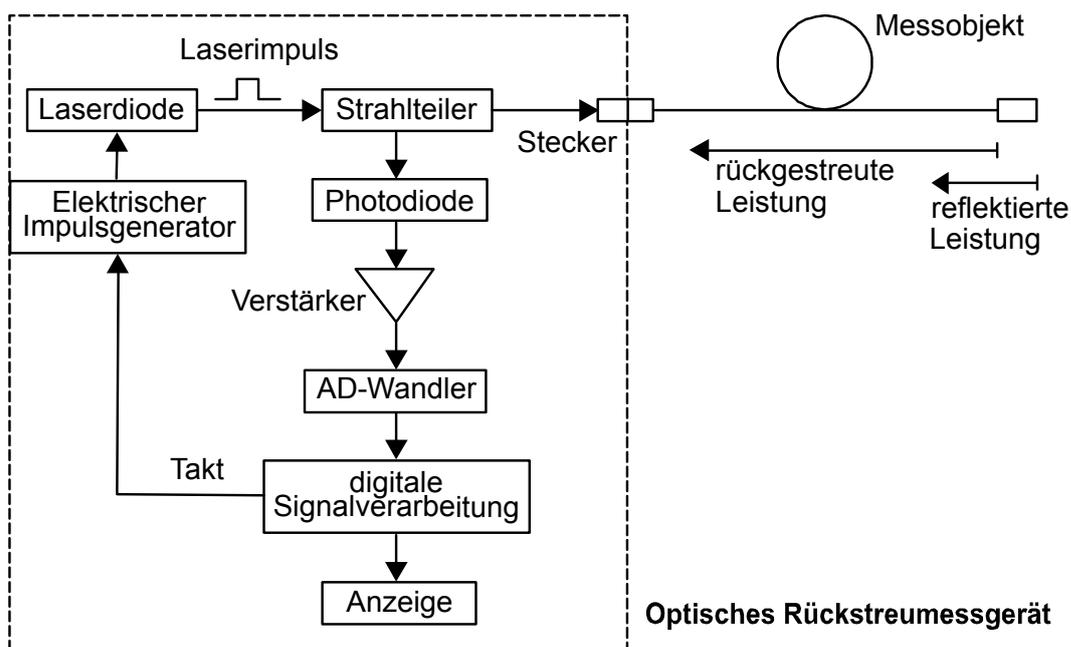


Bild 4.15: Prinzip der Rückstreuung

Im Gegensatz zur Fresnelreflexion ist die **Rayleighstreuung** kein diskretes Ereignis, sondern tritt an jedem Ort entlang der gemessenen Strecke auf. Dadurch wird es möglich, den Lichtwellenleiter auf seiner gesamten Länge zu charakterisieren. Die Ursachen für die Rayleighstreuung sind Dichte- und Brechzahl-Fluktuationen im Glasmaterial, wobei die Rayleighstreuung mit zunehmender Dotierung des Glases ansteigt. Das Licht wird in alle Richtungen gestreut. Der Anteil, der in rückwärtiger Richtung im Lichtwellenleiter geführt wird, kann detektiert werden.

Streueffekte begegnen uns Scheinwerferstrahlen (PKW oder Leuchtturm) oder bei Lasershows: Wir können den Strahl wahrnehmen, obwohl wir nicht hineinblicken. Das ist möglich, weil durch Streueffekte an Staub- oder Feuchtigkeitsteilchen ein kleiner Anteil des Lichts seitlich austritt. Sinngemäß verhält sich das Licht im Lichtwellenleiter durch die Unregelmäßigkeiten im Glasmaterial.

Der Strahlteiler in Bild 4.15 dient der Richtungstrennung von hin- und rücklaufendem Signal. Mit Hilfe eines optischen Zirkulators kann die Richtungstrennung mit geringer Dämpfung erfolgen.

Das zurück gestreute und reflektierte Licht gelangt zum Detektor, der extrem empfindlich sein muss, und das Signal wird der Auswertung zugeführt. Das Besondere an der Rückstreuemesstechnik ist, dass das Messgerät nicht einfach eine Summe über alle Leistungsrückflüsse bildet, die der einzelne Impuls verursacht.

Stattdessen erfolgt mit der Prozessorsteuerung eine Synchronisation zwischen dem Zeitpunkt der Emission des Laserimpulses und dem der Detektierung. Aus der Verzögerung zwischen beiden Signalen kann man auf die Laufzeit des detektierten Signals und damit auf den Ort des jeweiligen Ereignisses schließen.

Das heißt, es wird nicht über alle rückfließenden Leistungen integriert, sondern entsprechend der jeweiligen Laufzeit Punkt für Punkt aufgelöst und von jedem einzelnen Ort die rückfließende Leistung ermittelt. Moderne Messgeräte erfassen innerhalb des jeweiligen Messbereiches mindestens 32.000 Punkte.

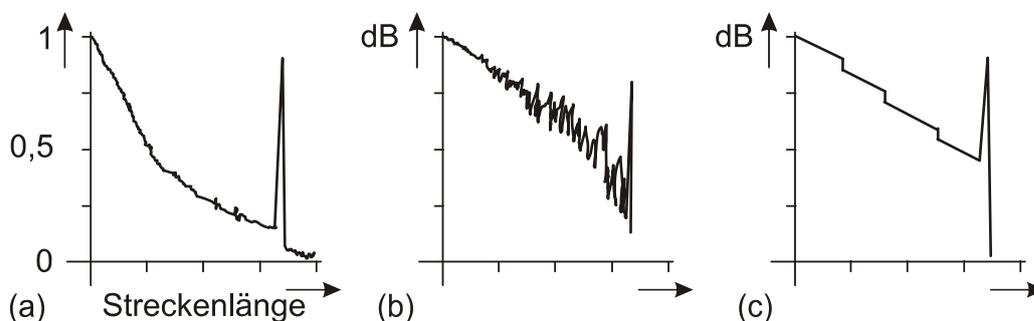


Bild 4.16: Rückstreuukurve:
(a) lineare Darstellung, (b) logarithmische Darstellung, (c) Mittelwertbildung

Der Leistungsabfall im Lichtwellenleiter erfolgt exponentiell entsprechend Gleichung (1.8) (Bild 4.16 (a)). Um ein anschauliches Resultat auf dem Monitor zu erhalten, erfolgt eine Logarithmierung (Bild 4.16 (b)). Um das sehr kleine detektierte Signal aus dem Rauschen herausheben zu können, wird die Messung viele Male wiederholt und der Mittelwert gebildet (Rauschunterdrückung) (Bild 4.16 (c)).

Der Laser wird mit einer bestimmten Impulswiederholrate betrieben, die so bemessen ist, dass der nächste Impuls frühestens nach dem vollständigen Hin- und Rücklauf des vorhergehenden Impulses durch den Lichtwellenleiter ausgesandt wird. Au-

ßerdem verfügt das Rückstromeßgerät über ein geeignetes Speichermedium sowie verschiedene Schnittstellen.

4.3.2 Rückstreckkurve als Messergebnis

Bild 4.17 veranschaulicht eine Rückstreckkurve mit typischen Ereignissen, wobei die Ordinate logarithmisch dargestellt wurde. Leistungsverhältnisse in Dezibel entsprechen Abständen in senkrechter Richtung (Gleichung (1.13)).

Die Geraden-Abschnitte im Rückstreckdiagramm werden durch die Rayleighstreuung verursacht, die an jedem Punkt entlang der Strecke auftritt. Die Spitzen entstehen durch Reflexionen, die diskret sind und meist deutlich größere Leistungsrückflüsse bewirken.

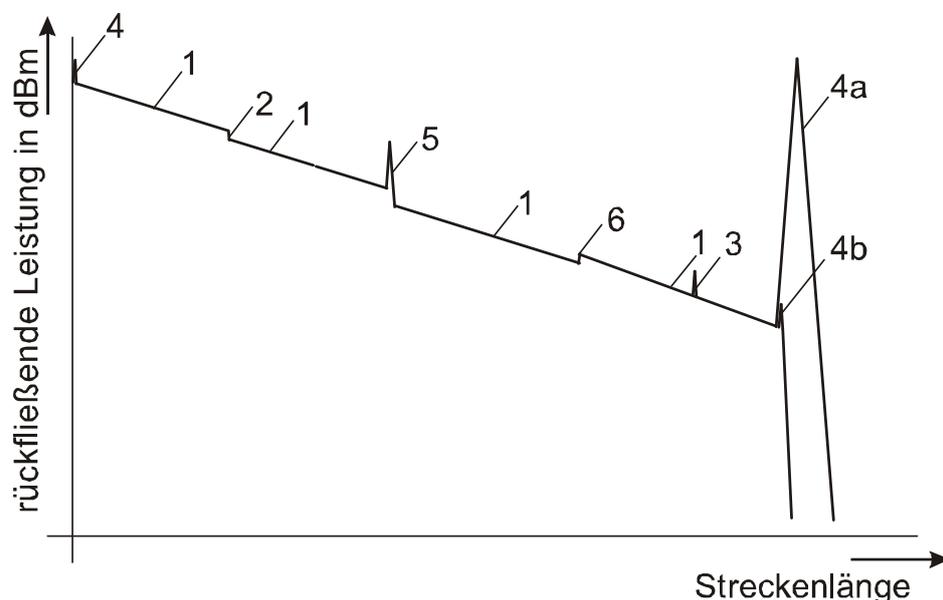


Bild 4.17: Rückstreckkurve mit typischen Ereignissen

Bild 4.17 zeigt die Leistungsrückflüsse in Abhängigkeit von der Streckenlänge. Das Messgerät misst die Laufzeiten der Signale. Der Anwender möchte den Ort wissen, der zur gemessenen Laufzeit gehört. Das Messgerät rechnet Laufzeiten in Orte um und zeigt diese an (Abschnitt 4.4.1).

Der Verlauf des ungestörten Lichtwellenleiters wird durch die mit der Ziffer 1 gekennzeichneten Abschnitte veranschaulicht. Aus deren Neigung, also aus dem Abfall der Rayleighstreuung, schließt man auf den Dämpfungskoeffizienten. Voraussetzung ist, dass die Rayleighstreuung entlang des jeweiligen Streckenabschnittes konstant ist. Der Streckenabschnitt kann durch das Setzen von Cursors ausgewertet werden.

Entsprechend Bild 4.17 gilt für den Dämpfungskoeffizienten:

$$\alpha = \frac{P_1 / \text{dBm} - P_2 / \text{dBm}}{L_2 - L_1} \quad \text{in dB/km} \quad (4.1)$$

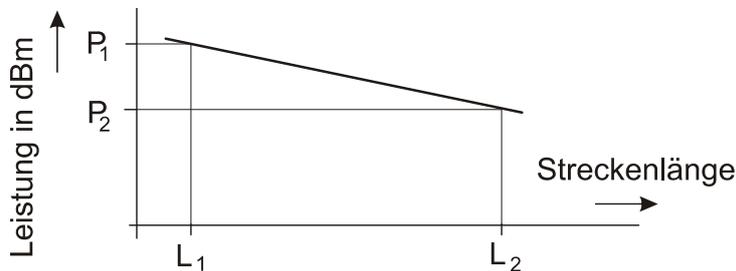


Bild 4.18: Ermittlung des Dämpfungskoeffizienten aus dem Abfall der Rayleighstreuung (L₁ und L₂: Orte der Cursors, P₁ und P₂ zugehörige gestreute Leistungen)

Prinzipiell kann man alle Ereignisse entlang der Rückstreckkurve durch das manuelle Setzen von Cursors auswerten. Das ist aber sehr mühselig. Außerdem ergeben die automatischen Auswertelgorithmen des Messgerätes exaktere Resultate. Das Ergebnis der Auswertungen ist die Ereignistabelle.

In dieser Tabelle werden die Ereignisse durchnummeriert und jedes Ereignis charakterisiert: Typ des Ereignisses, Ort, Dämpfungskoeffizient, Dämpfung, Reflexionsdämpfung usw. Für Routinemessungen ist eine vollautomatische Auswertung zu empfehlen.

Das Ziffer 2 in Bild 4.17 zeigt eine negative Stufe: Das kann eine Dämpfung sein. Da nicht gleichzeitig eine Reflexion auftritt, kann es sich um einen Spleiß oder eine Makrobiegung handeln. Auch ein asymmetrischer Koppler kann eine solche Stufe verursachen.

Ziffer 3 zeigt eine Reflexion ohne gleichzeitige Dämpfung: Ein solches Ereignis wird durch eine Geisterreflexion hervorgerufen (Abschnitt 4.7.3).

Ziffer 4 veranschaulicht die Reflexion am Ausgang des Messgerätes. Die Reflexion am Ende der Strecke entsteht durch Übergang von Glas (Brechzahl $\approx 1,5$) zu Luft (Brechzahl $\approx 1,0$). Bei einem PC-Stecker ist diese Reflexion sehr groß (4a) und bei einem APC-Stecker sehr klein (4b).

Ziffer 5 zeigt sowohl eine Dämpfung als auch eine Reflexion. Das ist typisch für einen PC-Stecker. Bei einem APC-Stecker kann die Spitze verschwinden. Folglich kann das Ereignis bei Ziffer 2 auch durch einen APC-Stecker hervorgerufen worden sein.

Ziffer 6 zeigt eine positive Stufe. Diese hat nichts mit einem Koppelverlust oder gar einer „Verstärkung“ zu tun. Um das Ereignis zu verstehen, darf das Rückstredidiagramm nicht mit einem Pegeldiagramm verwechselt werden. Während das Pegeldiagramm den Leistungsabfall entlang der Strecke veranschaulicht, werden im Rückstredidiagramm die rückgestreuten und reflektierten Leistungen dargestellt.

Verbindet man zwei Lichtwellenleiter mit unterschiedlichen Parametern, beispielsweise einen Lichtwellenleiter mit geringerer Dotierung mit einem Lichtwellenleiter mit höherer Dotierung, kann eine positive Stufe entstehen, da der zweite Lichtwellenleiter das Licht stärker streut.

Wird das gleiche Ereignis aus der entgegengesetzten Richtung gemessen, entsteht eine entsprechend große negative Stufe. Diese Stufe hat nichts mit einer Dämpfung an der Koppelstelle, sondern mit Parametertoleranzen zu tun! Somit kann das Ereignis 2 auch durch Parametertoleranzen verursacht worden sein.

Prinzipiell jede Stufe im Rückstreudiagramm setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: Einem Anteil, der tatsächlich durch eine Dämpfung hervorgerufen wird und einem Anteil bedingt durch Toleranzen zwischen den gekoppelten Lichtwellenleitern.

Bei der Auswertung des Rückstreudiagramms sind nur die Dämpfungen an den diskreten Ereignissen interessant, nicht die Effekte, die durch Parametertoleranzen entstehen. Dieser Anteil an der Stufe muss eliminiert werden. Das ist möglich, indem man von beiden Seiten misst und den Mittelwert bildet.

Oft hört man das Argument, dass eine Messung aus nur einer Richtung ausreichend sei, weil die Strecke nur in einer Richtung betrieben wird. Das ist falsch! Für exakte Resultate ist stets eine bidirektionale Messung erforderlich (Abschnitt 4.4.2).

Die Tatsache, dass nur von einer Seite gemessen werden muss, wurde stets als ein besonderer Vorteil der Rückstreuung im Vergleich zur Dämpfungsmessung herausgestellt. Auf diesen Vorteil muss verzichtet werden, wenn man genaue Resultate erhalten möchte. Die Messung aus beiden Richtungen kann eine Person allein bewältigen, sofern auf einen Nachlauf-LWL verzichtet wird.

Insofern ist die Rückstreuung immer noch vorteilhafter als die herkömmliche Dämpfungsmessung, die stets zwei Personen erfordert. Arbeitet man nicht nur mit Vor-, sondern auch mit Nachlauf-LWL (Abschnitt 4.7.2), muss aber auch dieser Vorteil aufgegeben werden, da dann eine zweite Person am Ende der Strecke benötigt wird.

Die Impulshöhe des Laserimpulses kann bei 10 mW...1 W betragen und die Impulswiederholrate liegt bei einigen kHz.

Der eingekoppelte Laserimpuls hat stets eine endliche Dauer. Das entspricht einer endlichen Länge des Impulszuges. Eine Impulsdauer von 5 ns entspricht etwa einer Impulslänge von 1 m. Das heißt, es wird ein ca. 1 m langer Abschnitt im Lichtwellenleiter beleuchtet.

Trifft der Impulszug auf ein diskretes Ereignis, beispielsweise eine Reflexion, benötigt er eine bestimmte Zeitdauer um es zu durchlaufen. So wird dieses Ereignis im Rückstreudiagramm nicht als Nadelimpuls dargestellt, sondern es hat stets eine endliche Flankensteilheit. Die jeweilige Flankensteilheit ergibt sich aus der Impulslänge.

Kurze Impulse ermöglichen eine steile Flanke und damit ein hohes Auflösungsvermögen. Eng benachbarte Ereignisse können getrennt werden. Bei langen Impulsen ist das Auflösungsvermögen begrenzt.

Mit einem kurzen Impuls wird nur eine geringe Leistung in den Lichtwellenleiter gekoppelt. Die Dynamik und damit die messbare Streckenlänge sind begrenzt. Durch

Vergrößerung der Impulslänge lässt sich auf Kosten des Auflösungsvermögens die Dynamik erhöhen. Dann ist die Rayleighstreuung größer (jeder Impuls trägt eine höhere Energie) und damit sind auch die detektierbaren Strecken länger.

Bild 4.19 zeigt ein reales Rückstreudiagramm. Die gemessene Strecke betrug mehr als 100 km und die Dämpfung mehr als 27 dB. Man erkennt, dass am Ende der Strecke das Messgerät an seine Grenzen stößt. Der Einfluss des Rauschens macht sich zunehmend bemerkbar, so dass am Streckenende keine vernünftige Auswertung mehr möglich ist.

Durch Erhöhung der Messzeit (das heißt der Anzahl der Mittelungen), kann die Kurve geglättet werden. Allerdings ist die Messzeit ein wichtiger Kostenfaktor. Eine große Messzeit ist sinnvoll, wenn man einen Fehler sucht und besonders viele Informationen aus der Messkurve herausholen möchte. Für eine routinemäßige Messung sollte eine kürzere Messzeit reichen, vor allem wenn viele Fasern zu messen sind. Allerdings bedeutet eine kürzere Messzeit Verlust an Dynamik.

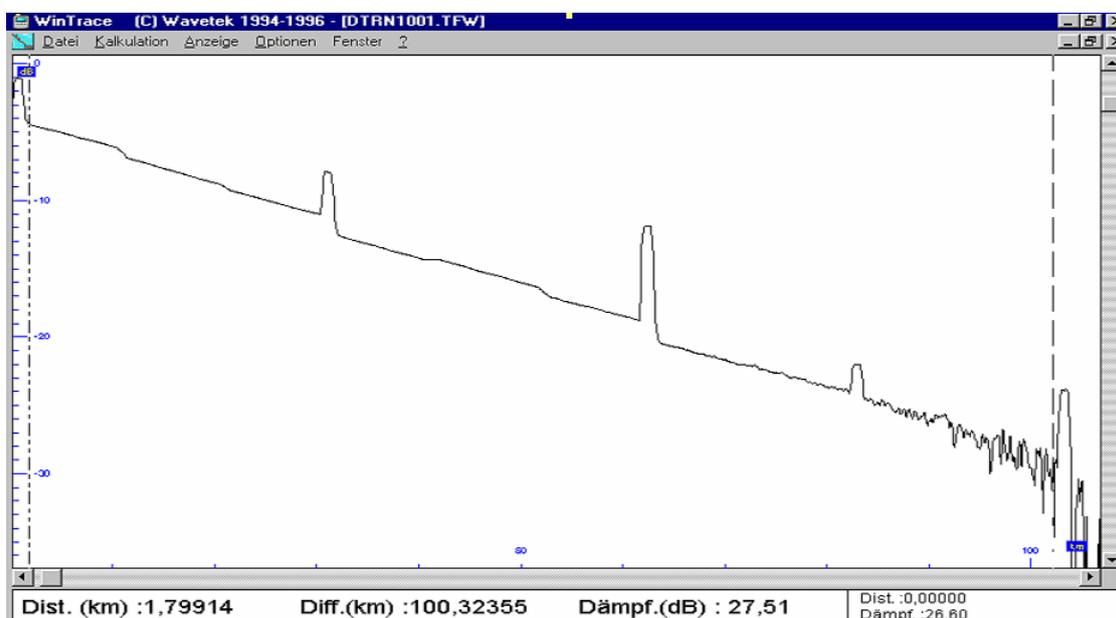


Bild 4.19: Reales Rückstreudiagramm (Quelle: Wavetek)

In den Datenblättern wird die Definition der Dynamik stets auf eine Messzeit von drei Minuten bezogen. Tatsächlich wird meist eine deutlich kleinere Messzeit gewählt.

Eine andere Möglichkeit, die Messkurve am Ende der Strecke zu glätten ist die Messung mit einer größeren Impulslänge, was aber auf Kosten des Auflösungsvermögens geht.

Die beste Lösung ist, mit einem OTDR-Modul mit hoher Dynamik zu messen. Für die Singlemode-Technik werden Module mit unterschiedlicher Dynamik und entsprechend unterschiedlichen Preisen angeboten. Die **Dynamik** ist die Differenz in Dezibel zwischen der eingekoppelten Leistung und der Leistung, bei der der Empfänger ein

Signal-Rausch-Verhältnis von 1:1 misst, bei einer Messzeit von drei Minuten und der maximal spezifizierten Impulslänge.

Beispiel: Modul mit 45 dB Dynamik bei einer Impulslänge von 10 μ s.

Zur Erkennung eines Faserbruchs muss das Signal mindestens 3 dB über dem Rauschen liegen. Zur Erkennung einer Spleißdämpfung von 0,1 dB / 0,05 dB / 0,02 dB **am Ende der Strecke** muss das Signal mindestens 8,5 dB / 10 dB / 12 dB über dem Rauschen liegen. Die nutzbare Dynamik reduziert sich um diesen Betrag. Reduziert man die Messzeit von drei Minuten auf 30 Sekunden, verringert sich die Dynamik um weitere 4 dB.

Die angegebene Dynamik bezieht sich auf die maximale Impulslänge, im Beispiel 10 μ s. Das bedeutet: Wenn man eine Strecke mit einem 45 dB-Modul misst, eine Messzeit von 30 Sekunden einstellt und eine Spleißdämpfung von 0,02 dB am Ende der Strecke noch erkennen möchte, reduziert sich die Dynamik bei maximaler Impulslänge auf $45 \text{ dB} - 12 \text{ dB} - 4 \text{ dB} = 29 \text{ dB}$!

Bei geringerer Impulslänge verringert sich die Dynamik weiter. Reduziert man die Impulslänge von 10 μ s auf 1 μ s (Auflösungsvermögen 100 m), reduziert sich die Dynamik noch mal um 10 dB: verbleibende Dynamik: 19 dB. Reduziert man die Impulslänge auf 100 ns (Auflösungsvermögen 10 m), verringert sich die Dynamik um weitere 10 dB: verbleibende Dynamik 9 dB.

Für die Messung sollte ein Modul mit deutlich höherer Dynamik als die Dämpfung der zu messenden Strecke gewählt werden. So kann man eine geringe Messzeit, eine hohe Genauigkeit, ein großes Auflösungsvermögen und einen großen Messbereich realisieren.

Bei Messung mit zu geringer Dynamik ist die Strecke am Ende verrauscht und kleine Ereignisse können nicht erkannt bzw. ausgewertet werden. Das macht sich wegen des höheren Dämpfungskoeffizienten bei 1310 nm eher bemerkbar als bei 1550 nm. Ist ein APC-Stecker am Streckenende, wird dieser unter Umständen nicht erkannt und eine zu geringe Streckenlänge angezeigt.

Impulslänge und Messzeit sollten so eingestellt werden, dass am Ende der Strecke die Kurve noch mindestens **12 dB über dem Rauschen** liegt. Dann ist die Kurve auch am Ende der Strecke noch hinreichend glatt um kleine Spleiße erkennen und auswerten zu können.

In Bild 4.19 sind weiterhin Reflexionen (einschließlich Anfangs- und Endreflexion) und Dämpfungsstufen erkennbar. Wegen der langen Impulse erscheinen die Stufen schräg.

Etwa in der Mitte des Diagramms ist ein Stück Lichtwellenleiter mit höherer Rayleighstreuung ersichtlich. Erkennbar an der positiven Stufe am Anfang und an der negativen Stufe am Ende dieser Strecke. Dieser LWL-Abschnitt mindert nicht die Qualität der Gesamtstrecke! Die Ursache sind unterschiedliche Faserparameter.