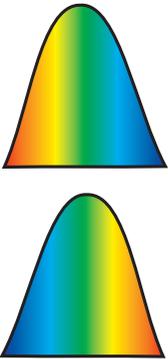


8 Messung der chromatischen Dispersion

Jeder Sender hat eine endliche spektrale Breite. Das heißt, die Leistung des Senders verteilt sich auf die verschiedenen Wellenlängenanteile des emittierten Lichts. Eine Lumineszenzdiode hat eine typische Halbwertsbreite von 30 nm bis 100 nm, eine herkömmliche gewinngeführte Laserdiode hat ein Linienspektrum mit einer Halbwertsbreite von wenigen Nanometern und ein unmodulierter DFB-Laser hat eine typische Halbwertsbreite von 10^{-4} nm.

Bild 8.1: Impulsverbreiterung durch spektrale Aufspaltung



Die chromatische Dispersion (CD) wird durch eine Impulsverbreiterung infolge unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenlängenanteile des eingekoppelten Lichts hervorgerufen. Hat der Lichtwellenleiter einen positiven Koeffizient der chromatische Dispersion, laufen die größeren Wellenlängen langsamer als die kürzeren Wellenlängen: Der Impulsanfang ist blau, das Impulsende ist rot.

Hat der Lichtwellenleiter einen negativen Koeffizient der chromatischen Dispersion, laufen die größeren Wellenlängen schneller als die kürzeren Wellenlängen: Der Impulsanfang ist rot und das Impulsende ist blau.

Der Effekt der Aufspaltung des Lichts in seine spektralen Anteile ist am Regenbogen oder am Prisma allgegenwärtig. Tatsächlich kann am Lichtwellenleiter die Zerlegung des Lichts in seine Spektralanteile in der in Bild 8.1 dargestellten Form nicht beobachtet werden, da es sich um eine zeitliche Aufspaltung handelt (die waagerechte Achse ist nicht der Ort, sondern die Zeit) und nicht mit Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich, sondern im nahen Infrarotbereich gearbeitet wird.

Die chromatische Dispersion ist die Summe aus zwei Effekten: Materialdispersion und Wellenleiterdispersion. Diese Beiträge können sich teilweise oder ganz auslöschen. So kann die chromatische Dispersion zu Null werden, obwohl Materialdispersion und Wellenleiterdispersion ungleich Null sind. Messbar (und damit gegebenenfalls störend) ist nur die Summe aus den beiden Anteilen.

Die Impulsverbreiterung hängt sowohl von den spektralen Eigenschaften des Senders (Zentralwellenlänge, Halbwertsbreite) als auch von den Eigenschaften des Lichtwellenleiters (Koeffizient der chromatischen Dispersion) ab. Bei digitaler NRZ-Modulation gilt für die zulässige Impulsverbreiterung $\Delta\tau_{CD}$ infolge chromatischer Dispersion entsprechend GR-253-CORE [8.1] (T_{bit} : Impulslänge; R: Bitrate) (\rightarrow Tabelle 8.1):

$$\Delta\tau_{CD} \leq 0,306 \cdot T_{bit} = 0,306/R \quad (8.1)$$

Tabelle 8.1: Maximal zulässige Impulsverbreiterung durch chromatische Dispersion in Abhängigkeit von der Bitrate

Bitrate R	SDH	SONET	Impulslänge T_{bit}	maximal zulässige Impulsverbreiterung $\Delta\tau_{\text{CD}}$
51 Mbit/s		OC-1	19,3 ns	5,9 ns
155 Mbit/s	STM-1	OC-3	6,43 ns	1,97 ns
622 Mbit/s	STM-4	OC-12	1,61 ns	492 ps
1,2 Gbit/s		OC-24	803 ps	246 ps
2,5 Gbit/s	STM-16	OC-48	401 ps	123 ps
10 Gbit/s	STM-64	OC-192	100 ps	30 ps
40 Gbit/s	STM-256	OC-768	25,12 ps	7,8 ps

Der Koeffizient der chromatischen Dispersion ist ein Faserparameter, der eindeutig das Dispersionsverhalten des Lichtwellenleiters beschreibt. Er kann bei der Planung der Übertragungstrecke berücksichtigt werden. Dennoch kann unter bestimmten Umständen die Messung der chromatischen Dispersion erforderlich sein:

- Beim Anmieten von LWL-Strecken, sofern keine ausreichende Dokumentation vorhanden ist: Die Strecke kann aus unterschiedlichen Fasertypen bestehen.
- Bei großen Streckenlängen und/oder hohen Bitraten. Die CD-Messung ermöglicht die exakte Dimensionierung der dispersionskompensierenden Bauelemente bzw. Fasern: Kostenersparnis.

Bei der CD-Messung wird ein Faserparameter bzw. ein Streckenparameter ermittelt. Die Messmethoden werden in ITU-T G.650.1 {3.1}, Abschnitt 4.5 und Anhang I und DIN EN 60793-1-42 {8.2} beschrieben. Dabei ist die erstgenannte Norm aktueller. Meist wird die Gruppenlaufzeit $\tau(\lambda)$ des Lichtwellenleiters in Abhängigkeit von der Wellenlänge bezogen auf eine bestimmte LWL-Länge in ps/km gemessen.

Die Messung erfolgt bei diskreten Wellenlängen, die exakt bekannt sein müssen. Eine Kurve $\tau(\lambda)$ wird mit einem geeigneten Polynom an die Messwerte angepasst. Aus dieser Kurve lassen sich folgende Parameter ermitteln:

• Koeffizient der chromatischen Dispersion:
$$D_{\text{CD}}(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \text{ in ps/nm/km} \quad (8.2)$$

• chromatische Dispersion:
$$D(\lambda_0) = D_{\text{CD}}(\lambda) \cdot L \text{ in ps/nm} \quad (8.3)$$

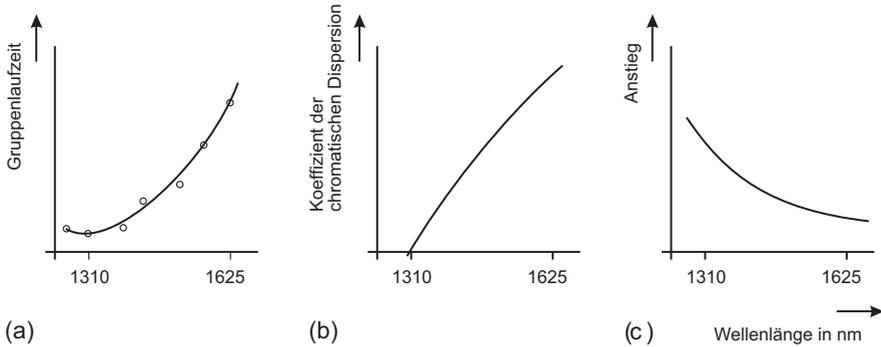
• Nulldurchgang der chromatischen Dispersion λ_0 in nm (Nulldispersionswellenlänge):
$$D_{\text{CD}}(\lambda_0) = 0$$

• Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion:
$$S(\lambda) = \frac{dD_{\text{CD}}(\lambda)}{d(\lambda)} = \frac{d^2\tau(\lambda)}{d\lambda^2} \text{ in ps/nm}^2/\text{km} \quad (8.4)$$

• Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion bei der Nulldispersionswellenlänge:
$$S_0 = S(\lambda_0) \text{ in ps/nm}^2/\text{km}$$

Bild 8.2 zeigt schematisch die Gruppenlaufzeit (a), den Koeffizient der chromatischen Dispersion (b) und den Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion (c) als Funktion der Wellenlänge für einen Standard-Singlemode-LWL.

Während die erste Kurve gemessen wird (die Kreise veranschaulichen mögliche Messpunkte), ergibt sich die zweite Kurve durch Differenziation aus der ersten Kurve entsprechend Gleichung (8.2) und die dritte Kurve ergibt sich durch Differenziation aus der zweiten Kurve entsprechend Gleichung (8.4).

Bild 8.2: Schematische Darstellung von (a) $\tau(\lambda)$, (b) $D_{CD}(\lambda)$ und (c) $S(\lambda)$ 

Der Standard-Singlemode-LWL hat bei 1310 nm einen Nulldurchgang des Koeffizienten der chromatischen Dispersion (\rightarrow Bild 8.2 (b)). Entsprechend ist in diesem Wellenlängenbereich die Gruppenlaufzeit zwischen benachbarten Wellenlängen minimal: Die Kurve in Bild 8.2 (a) durchläuft bei 1310 nm ein Minimum.

Unabhängig vom Fasertyp schlägt die Norm ITU-T G.650.1 im Anhang A Polynome für die Kurvenanpassung vor (\rightarrow Tabelle 8.2). Die Anpassung erfolgt durch Minimierung der Summe der Fehlerquadrate.

Tabelle 8.2: Polynome zur Kurvenanpassung

Polynom-Typ	$\tau(\lambda) =$	$D_{CD}(\lambda) =$	$S(\lambda) =$
3-Term-Sellmeier	$A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}$	$2B\lambda - 2C\lambda^{-3}$	$2B\lambda + 6C\lambda^{-4}$
5-Term-Sellmeier	$A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2} + D\lambda^4 + E\lambda^{-4}$	$2B\lambda - 2C\lambda^{-3} + 4D\lambda^3 - 4E\lambda^{-5}$	$2B\lambda + 6C\lambda^{-4} + 12D\lambda^2 + 20E\lambda^{-6}$
Polynom 2. Ordnung	$A + B\lambda + C\lambda^2$	$B + 2C\lambda$	$2C$
Polynom 3. Ordnung	$A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3$	$B + 2C\lambda + 3D\lambda^2$	$2C + 6D\lambda$
Polynom 4. Ordnung	$A + B\lambda + C\lambda^2 + D\lambda^3 + E\lambda^4$	$B + 2C\lambda + 3D\lambda^2 + 4E\lambda^3$	$2C + 6D\lambda + 12E\lambda^2$

Der Wellenlängenverlauf des Koeffizienten der chromatischen Dispersion hängt vom Lichtwellenleiter-Typ ab (\rightarrow Bild 8.3). Entsprechend unterscheiden sich die Koeffizienten der chromatischen Dispersion, die Anstiege der Koeffizienten der chromatischen Dispersion und die Nulldispersionswellenlängen (\rightarrow Tabellen 8.3, 8.4 und 8.5).

Entsprechend Gleichung (8.3) wächst die chromatische Dispersion mit der Streckenlänge an. Die zulässigen Werte hängen von der Bitrate **und** den spektralen Eigenschaften des Senders ab. Für verschiedene Systeme wurden die maximal zulässigen chromatischen Dispersionen in den Normen ITU-T G.957 [5.5], G.691 [5.4] und G.692 [8.3] spezifiziert. Für extern modulierte Laser gilt:

$$D \leq 16.000 \text{ ps/km bei } R = 2,5 \text{ Gbit/s}$$

$$D \leq 1.000 \text{ ps/km bei } R = 10 \text{ Gbit/s}$$

$$D \leq 62,5 \text{ ps/km bei } R = 40 \text{ Gbit/s}$$

Unter Nutzung von fortgeschrittenen Modulationsverfahren können diese Werte noch größer sein.

Bild 8.3: Koeffizient der chromatischen Dispersion in Abhängigkeit von der Wellenlänge für verschiedene LWL-Typen

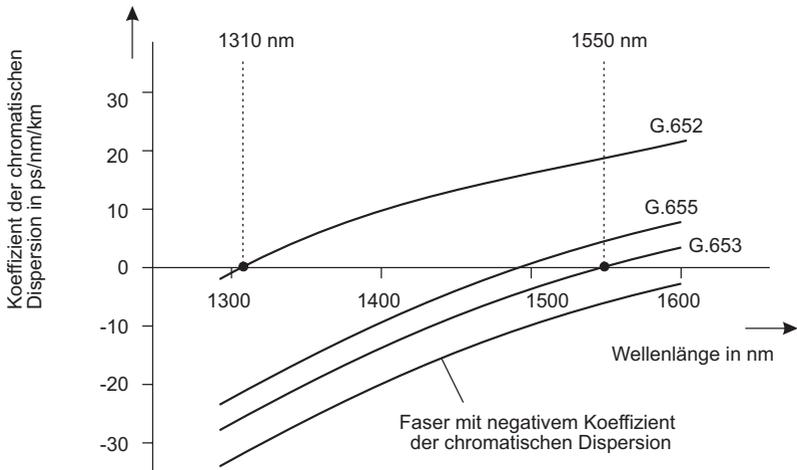


Tabelle 8.3: Typische Koeffizienten der chromatischen Dispersion

Norm/LWL-Typ	Wellenlänge	Koeffizient der chromatischen Dispersion
G.652 (Standard-Singlemode-LWL)	1310 nm	≈ 0 ps/nm ² /km
	1550 nm	≈ 17 ps/nm ² /km
G.653	1550 nm	≈ 0 ps/nm ² /km
G.655.A	1530 nm...1565 nm	0,1 ps/nm ² /km ≤ D _{CD} ≤ 6,0 ps/nm ² /km
G.655.B & C	1530 nm...1565 nm	1 ps/nm ² /km ≤ D _{CD} ≤ 10,0 ps/nm ² /km
G.655, TrueWave RS	1550 nm	≈ 4,4 ps/nm ² /km
G.655, LEAF	1550 nm	≈ 4,2 ps/nm ² /km
G.655, TeraLight	1550 nm	≈ 8,0 ps/nm ² /km
G.656	1460 nm...1625 nm	2 ps/nm ² /km ≤ D _{CD} ≤ 14 ps/nm ² /km

Die typischen Anstiege der Koeffizienten der chromatischen Dispersion wurden in Tabelle 8.4 zusammengestellt.

Tabelle 8.4: Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion

Norm/LWL-Typ	Wellenlänge	Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion
G.652	1300 nm...1324 nm	≤ 0,093 ps/nm ² /km
	1310 nm	≈ 0,086 ps/nm ² /km
	1550 nm	≈ 0,056 ps/nm ² /km
G.655, TrueWave RS	1550 nm	≈ 0,045 ps/nm ² /km
G.655, LEAF	1550 nm	≈ 0,085 ps/nm ² /km
G.655, TeraLight	1550 nm	≈ 0,052 ps/nm ² /km

Für die Nulldispersionswellenlängen gelten die Werte entsprechend Tabelle 8.5.

Tabelle 8.5: Nulldispersionswellenlängen typischer Lichtwellenleiter

Norm/LWL-Typ	Nulldispersionswellenlänge
G.652 {8.4}	$1300 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1324 \text{ nm}$
G.653 {8.5}	$1525 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1575 \text{ nm}$
G.655 {8.6}	$\lambda_0 < 1530 \text{ nm}$
G.656 {8.7}	$\lambda_0 < 1460 \text{ nm}$

8.1 Methoden zur Messung der chromatischen Dispersion

Die dispersionsbedingte Impulsverbreiterung im Singlemode-LWL hängt nicht nur von den Fasereigenschaften sondern auch von den Eigenschaften des Senders ab (Schwerpunktwellenlänge, Halbwertsbreite, Modulation). Würde man die Impulsverbreiterung wie beim Multimode-LWL messen, wäre das Messergebnis eine Mischung aus Faser- und Senderparametern. Die Messung der chromatischen Dispersion hat jedoch zum Ziel, allein die Faser zu charakterisieren.

Außerdem sind Impulsverbreiterungen bei relativ kurzen Singlemode-Strecken meist so gering, dass sie nur schwer bestimmt werden können. Stattdessen wird die Gruppenlaufzeit des Lichtwellenleiters in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen.

Das Messgerät muss robust und für den Feldeinsatz geeignet sein. Es muss eine Messung am verlegten Lichtwellenleiter ermöglichen (abgesetzter Betrieb). Die Messung wird mit diskreten Wellenlängen durchgeführt. Eine Interpolation erfolgt mit Polynomen (\rightarrow Tabelle 8.2).

In der Norm ITU-T G.650.1 {3.1} wurden folgende Messmethoden zur Messung der chromatischen Dispersion standardisiert:

Referenz-Messmethoden:

- Phasenverschiebungs-Technik
- differenzielle Phasenverschiebungs-Technik

Alternative Messmethoden:

- Interferometrische Technik
- Impulsverzögerungs-Technik (spektrale Gruppenlaufzeit im Zeitbereich)

8.1.1 Phasenverschiebungs-Technik

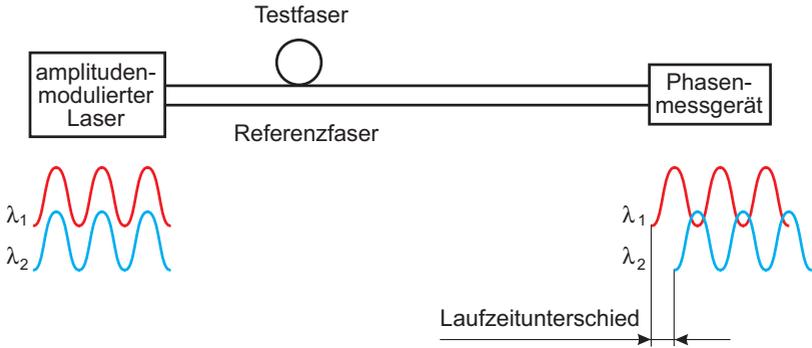
Die Phasenverschiebungs-Technik benötigt am Streckenanfang einen abstimmbaren (oder mehrere diskrete) Laser, die moduliert werden können, und ein Phasenmessgerät am Streckenende. Die Phase einer sinusförmig modulierten Lichtquelle wird mit einem Phasenmessgerät ermittelt und mit einem Referenzsignal verglichen (Bild 8.4). Bei sinusförmiger Modulation gilt folgender Zusammenhang zwischen der Zeit t und der Phase δ : $\sin(\omega t) = \sin(2\pi f t) = \sin(\delta)$. Ein bestimmter Laufzeitunterschied Δt entspricht einer bestimmten Phasenverschiebung $\Delta \delta$:

$$\Delta t = \frac{\Delta \delta}{2\pi f} \quad (8.5)$$

Die Messung wird über den gesamten Wellenlängenbereich durchgeführt. Aus den gemessenen Phasenunterschieden werden die Laufzeitunterschiede in Abhängigkeit von der Wellenlänge berechnet. Bezogen auf die Faserlänge ergibt sich hieraus die Gruppenlaufzeit als Funktion der Wellenlänge $\tau(\lambda)$ in ps/km. Die Modulationsfrequenz f muss geeignet gewählt werden, um eine hohe Empfindlichkeit der Messung zu erhalten. Mit der Modulationsfrequenz

kann auch der Messbereich beeinflusst werden. Dabei ist zu beachten, dass wegen der Periodizität der Sinusfunktion der Zusammenhang zwischen der Phasenverschiebung und dem Laufzeitunterschied nicht eindeutig ist.

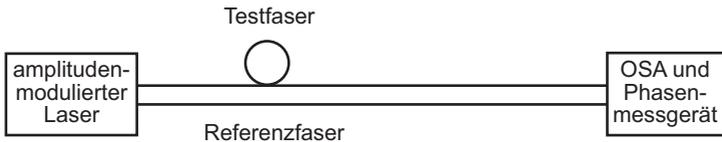
Bild 8.4: Phasenverschiebungs-Technik



8.1.2 Differenzielle Phasenverschiebungs-Technik

Die differenzielle Phasenverschiebungs-Technik ermöglicht noch höhere Genauigkeiten als die Phasenverschiebungs-Technik. Es werden ein abstimmbarer oder mehrere diskrete Laser am Streckenanfang und ein optischer Spektrumanalysator und ein Phasemessgerät am Streckenende benötigt (Bild 8.5).

Bild 8.5: Differenzielle Phasenverschiebungs-Technik



Unter Nutzung des gleichen Prinzips wie bei der Phasenverschiebungs-Technik werden jetzt jeweils gleichzeitig zwei benachbarte amplitudenmodulierte Wellenlängen in die Testfaser eingekoppelt. Die Messung liefert den Laufzeitunterschied zwischen diesen Wellenlängen. Bei Division durch den Wellenlängenabstand ergibt sich der Koeffizient der chromatischen Dispersion direkt (\rightarrow Gleichung (8.2)). Die Referenzfaser liefert ein Vergleichssignal (Wellenlänge, Phase) für das Phasemessgerät.

Sowohl für die Phasenverschiebungs-Technik als auch für die differenzielle Phasenverschiebungs-Technik gilt:

- Durch Verwendung vieler abstimmbarer Laser über den gesamten relevanten Wellenlängenbereich ergibt sich eine hohe Genauigkeit. Meist erfolgt die Messung innerhalb des zweiten (z.B. 1250 nm bis 1350 nm) und/oder des dritten/vierten optischen Fensters (z.B. 1430 nm bis 1630 nm).
- Für diesen Wellenlängenbereich erfolgt eine Kurvenanpassung mit einem geeigneten Sellmeier-Polynom.

- Die Messmethoden sind geeignet für Längen größer als 1 km.
- Funktioniert auch, wenn nichtreziproke Bauelemente (optischer Verstärker, optischer Isolator oder Zirkulator) auf der Strecke sind. Das heißt die Phasenverschiebungs-Technik bzw. die differenzielle Phasenverschiebungstechnik sind insbesondere zur Messung an langen Strecken mit optischen Verstärkern geeignet.
- Es erfolgt gleichzeitig eine spektrale Dämpfungsmessung.

8.1.3 Interferometrische Technik

Die interferometrische Technik erlaubt die Messung der chromatischen Dispersion an kurzen Faserstücken (einige Meter). So kann beispielsweise die Homogenität der chromatischen Dispersion entlang der Faser gemessen werden.

Außerdem kann man lokale Einflüsse wie Temperaturänderungen oder Markokrümmungen auf die chromatische Dispersion erfassen. Die wellenlängenabhängige Gruppenlaufzeit wird mit einem Mach-Zehnder-Interferometer gemessen.

Das Messergebnis, das an einem kurzen Faserstück ermittelt wurde, kann nicht ohne Weiteres auf eine lange Faser extrapoliert werden. Deshalb empfiehlt sich die interferometrische Technik nicht zur Charakterisierung langer Strecken.

8.1.4 Impulsverzögerungs-Technik (Time-of-Flight)

Licht einer Breitband-LED wird in die zu messende Faser eingekoppelt. Am Empfänger werden mit einem abstimmbaren Filter typisch 7 Wellenlängen innerhalb eines optischen Fensters gefiltert. Es werden die Gruppenlaufzeiten für die verschiedenen Wellenlängen am Ende der Strecke gemessen. Anschließend erfolgt Kurvenanpassung mit einem Sellmeier-Polynom.

Die Impulsverzögerungs-Technik ist für Streckenlängen ab 1 km geeignet. Es ist ein abgesetzter Betrieb möglich: Streckenanfang und -ende können sich an verschiedenen Orten befinden. Ein weiterer Vorteil der Methode besteht darin, dass gleichzeitig die Streckenlänge gemessen werden kann. Eine Messung über optische Verstärker ist möglich.

8.1.5 Multiples Wellenlängen-OTDR

Eine Modifikation der Impulsverzögerungs-Technik ist die Rückstreuungsmessung mit mehreren Wellenlängen (multiples Wellenlängen-OTDR). Diese Methode hat große Verbreitung gefunden.

Verschiedene Wellenlängen breiten sich im Lichtwellenleiter mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus und bewirken unterschiedliche Laufzeiten. Da die im Rückstreudiagramm angezeigten Streckenlängen proportional zu den Laufzeiten sind (bei gleicher Brechzahleinstellung), unterscheiden sich die Streckenlängen, je nachdem mit welcher Wellenlänge sie gemessen wurden (Bild 8.6).

Die Brechzahl wird für eine Wellenlänge exakt eingegeben (beispielsweise für 1550 nm). Für die anderen Wellenlängen ist diese Brechzahl ungenau, was zu unterschiedlichen Längen führt.

Aus den verschiedenen Streckenlängen ergeben sich die Gruppenlaufzeiten $\tau(\lambda)$. Die Wellenlängen liefern Messpunkte, die mit dem Sellmeier-Polynom interpoliert werden. Hieraus werden alle anderen Parameter berechnet. Die typische Anzahl der Messwellenlängen beträgt vier (1310 nm, 1450 nm oder 1480 nm, 1550 nm, 1625 nm) oder sechs (je zwei Wellenlängen im Bereich von 1310 nm, 1550 nm und 1625 nm, die durch Temperaturabstimmung des Lasers variiert werden).

Bild 8.6: Rückstreckkurven verschiedener Wellenlängen bei gleicher Brechzahleinstellung am Beispiel von drei Messwellenlängen

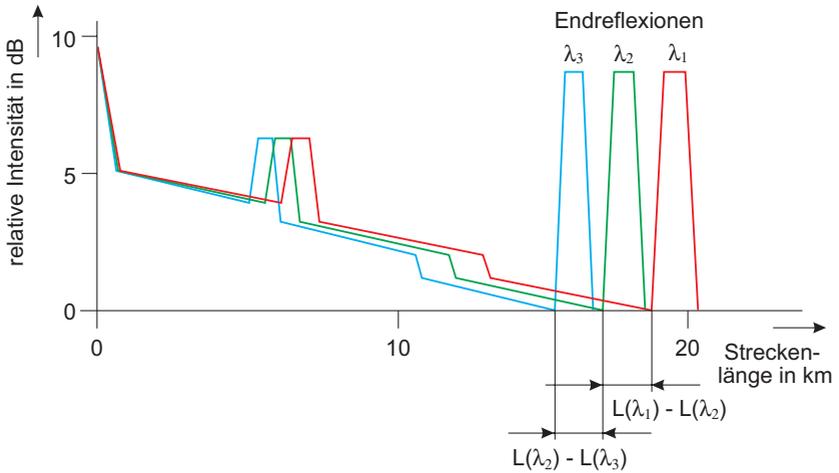


Bild 8.7: Ergebnis einer CD-Messung mit dem Vierwellenlängen-OTDR-Modul N3916AL von Agilent/Opternus

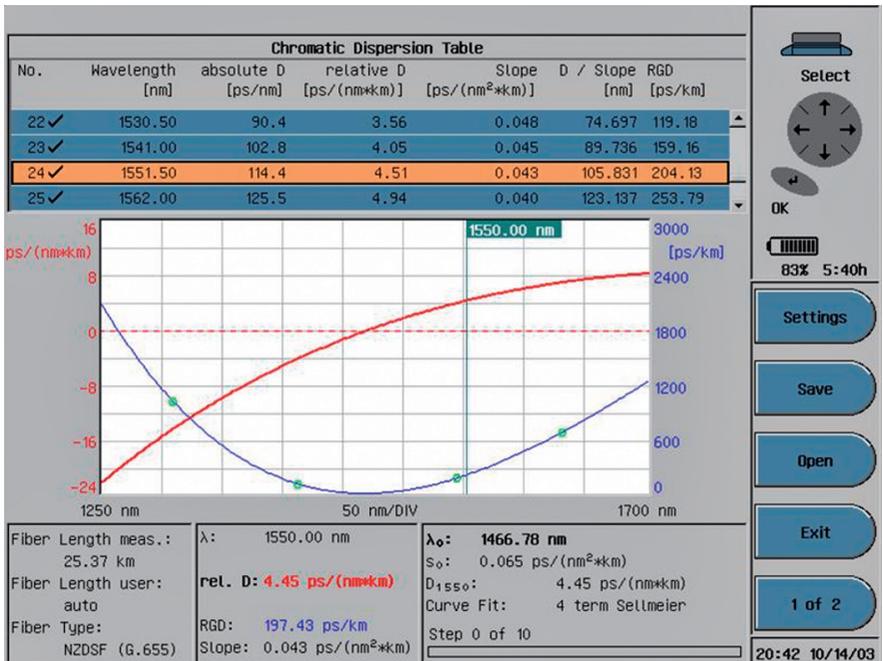


Bild 8.7 zeigt die Gruppenlaufzeit (blau) und den Koeffizient der chromatischen Dispersion (rot) als Funktion der Wellenlänge. Die Messpunkte sind an den grünen Kreisen zu erkennen. Die Auswertung erfolgte mit einem Vier-Term-Sellmeier-Polynom.

Ergebnisse: $L = 25,37 \text{ km}$, $\lambda_0 = 1466,78 \text{ nm}$, $D_{\text{CD}}(\lambda = 1550 \text{ nm}) = 4,45 \text{ ps/nm/km}$, $S_0 = 0,065 \text{ ps/nm/km}$, $S(\lambda = 1550 \text{ nm}) = 0,043 \text{ ps/nm/km}$.

Durch Vergleich der Messergebnisse mit den Tabellen 8.3, 8.4 und 8.5 ist ersichtlich, dass es sich um eine TrueWave-RS-Faser handelt.

Das Modul N3916AL hat folgende Parameter:

- Ergebnisanzeige in Grafik und Tabelle
- Wellenlängen des Rückstreu-Messgerätes: 1310 nm, 1480 nm, 1550 nm, 1625 nm
- Dynamik des Rückstreu-Messgerätes: 40 dB, 37 dB, 38 dB, 35 dB
- dargestellter Wellenlängenbereich: 1250 nm bis 1700 nm
- Genauigkeit des Koeffizienten der chromatischen Dispersion: $\pm 0,5 \text{ ps/nm/km}$
- Messbereich für die chromatische Dispersion: $\pm 2500 \text{ ps/nm}$
- Wellenlängenauflösung: mindestens 0,1 nm

8.1.6 Zusammenfassung

Am Singlemode-LWL wird nicht die Impulsverbreiterung entlang der Strecke, sondern die Gruppenlaufzeit im Lichtwellenleiter in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen.

Die Phasenverschiebungs-Technik ist am aufwändigsten, erlaubt aber die höchste Genauigkeit, da eine große Anzahl von Messwerten zur Verfügung steht. Es kann über optische Verstärker hinweg gemessen werden. Die Messungen können im zweiten und/oder dritten/vierten optischen Fenster erfolgen.

Innerhalb dieser Wellenlängenbereiche erhält man exakte Resultate. Wird nur in einem Fenster gemessen, so ist eine Extrapolation auf andere optische Fenster problematisch (\rightarrow Abschnitt 8.2, Punkt 5). Der Koeffizient der chromatischen Dispersion im anderen optischen Fenster oder die Nulldispersionswellenlänge können ungenau sein.

Die interferometrische Technik ist für eine Messung an verlegten Lichtwellenleitern nicht geeignet. Sie kommt vorzugsweise im Labor zur Messung kurzer Faserstücke zum Einsatz.

Die Impulsverzögerungs-Technik (Time-of-Flight) ermöglicht eine höhere Anzahl von Messpunkten, die aber in der Regel nur innerhalb eines optischen Fensters lokalisiert sind. Eine Messung über optische Verstärker ist möglich.

Die Impulsverzögerungs-Technik mit dem multiplen Wellenlängen-OTDR ist vergleichsweise preiswert, da das Messgerät nicht nur zur CD-Messung, sondern auch zur Rückstremessung verwendet werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass über den gesamten Singlemode-Wellenlängenbereich gemessen wird und so der Fasertyp eindeutig identifiziert werden kann (\rightarrow Beispiel in Bild 8.7).

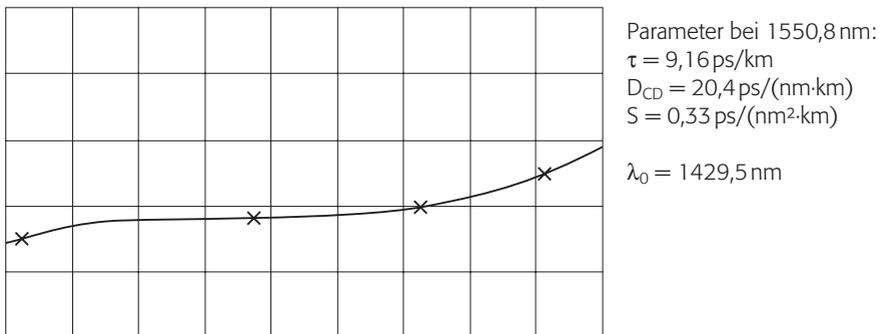
Ein weiterer Vorteil ist, dass prinzipiell der Lichtwellenleiter nur von einer Seite zugänglich sein muss. Ist es jedoch erforderlich, die Endreflexion zu erhöhen, muss auch das Ende der Strecke zugänglich sein (\rightarrow Abschnitt 8.3). Der Nachteil der Impulsverzögerungs-Technik liegt in der begrenzten Anzahl von Messpunkten sowie der begrenzten Streckenlänge. Es kann nicht über optische Verstärker hinweg gemessen werden.

8.2 Hinweise zur Erzielung einer hohen Messgenauigkeit

Um zuverlässige Messergebnisse zu erzielen, ist Folgendes zu beachten:

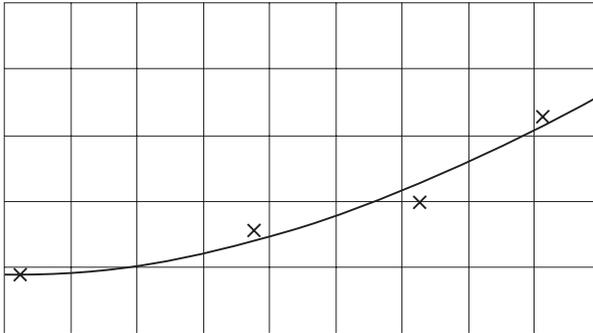
1. Der Vorlauf-LWL muss kurz im Vergleich zu der Faserlänge sein, die gemessen werden muss (wenige Meter sind ausreichend). Ansonsten verfälschen die Eigenschaften des Vorlauf-LWL das Messergebnis.
2. Die Messwellenlängen dürfen nur eine geringe Toleranz haben und müssen genau bekannt sein.
3. Die Faserlänge muss genau bekannt sein (aus der Rückstreuungsmessung ermitteln). Die Gruppenlaufzeit in ps/km wird aus dem Quotienten Laufzeit des Impulses in ps durch die Faserlänge in km berechnet.
4. Erfolgt die Rückstreuungsmessung mit dem multiplen Wellenlängen-OTDR muss der Cursor für alle Wellenlängen an den gleichen Ort gesetzt werden, damit die Längen vergleichbar sind. So bietet sich das Ende der Strecke an. Das ist der Ort unmittelbar vor dem Anstieg des Reflexionspeaks (\rightarrow Bild 8.6). Bei einer verrauschten Kurve kann es jedoch schwierig sein, diesen Ort exakt zu lokalisieren. Um eine hohe Dynamik der Messung zu erreichen, wird der Cursor nicht auf das Ende der Strecke, sondern exakt auf die Spitze der Endreflexion gesetzt. Hierzu muss die Messung mit minimaler Impulslänge erfolgen, was wiederum die Dynamik reduziert. Eine größere Impulslänge würde ein waagerechtes Impulsdach bewirken. Dadurch wird das Setzen des Cursors für alle Wellenlängen an einem vergleichbaren Ort erschwert. Die meisten Messgeräte arbeiten automatisch mit der minimalen Impulslänge und werten auch automatisch aus.
5. Die Messung erfolgt bei diskreten Wellenlängen. Eine Interpolation der Messergebnisse über den gesamten Wellenlängenbereich erfolgt mit Sellmeier-Polynomen. Zur Reduktion von Messfehlern sollte die Anzahl der freien Parameter im Sellmeier-Polynom niedriger als die Anzahl der Messwerte sein. (Beispiel: Messung mit Vierwellenlängen-OTDR, Auswertung mit 3-Term-Sellmeier-Polynom, \rightarrow Bild 8.9). Entgegen früherer Normung werden für einen bestimmten LWL-Typ nicht mehr bestimmte Polynome vorgeschrieben. Wenn die Anzahl der freien Parameter im Polynom gleich oder größer als die Anzahl der Messpunkte ist, wird die Kurve exakt durch alle Messpunkte gelegt, unabhängig davon, ob diese fehlerbehaftet sind oder nicht. Dann kann die Kurvenanpassung fehlerhaft sein (Bild 8.8). Ist die Anzahl der Messpunkte höher als die freien Parameter des Polynoms, wird die Kurve durch Minimierung der quadratischen Abweichung optimiert und der Einfluss von Messfehlern reduziert.

Bild 8.8: Ungenaueres Messergebnis, Auswertung mit 5-Term-Sellmeier-Polynom



Beispiel: Die Bilder 8.8 und 8.9 zeigen die Gruppenlaufzeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Gemessene Wellenlängen: 1310 nm, 1450 nm, 1550 nm und 1625 nm. Auswertung mit 5-Term- bzw. 3-Term-Sellmeier-Polynom. Deutlich sind die unterschiedlichen Kurvenverläufe zu erkennen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Parameter. Insbesondere die Nulldispersionswellenlängen λ_0 unterscheiden sich stark. Während die Nulldispersionswellenlänge in Bild 8.8 auf einen G.655- oder G.656-LWL (NZDS-LWL) hindeutet, entspricht die Nulldispersionswellenlänge in Bild 8.9 einem Standard-Singlemode-LWL (G.652). Alle anderen Parameter deuten auch darauf hin (\rightarrow Tabellen 8.3 bis 8.5).

Bild 8.9: Ungenaueres Messergebnis: Auswertung mit 3-Term-Sellmeier-Polynom



Parameter bei 1550,8 nm:
 $\tau = 563 \text{ ps/km}$
 $D_{\text{CD}} = 21,1 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$
 $S = 0,07 \text{ ps}/(\text{nm}^2\cdot\text{km})$

$\lambda_0 = 1309,7 \text{ nm}$

6. Durch Minimierung der quadratischen Abweichung erhält man vernünftige Resultate **innerhalb** des Wellenlängenbereiches in dem Messwerte vorliegen (Interpolation). Vor einer Extrapolation sei ausdrücklich gewarnt! Je weiter die extrapolierte Wellenlänge von der nächsten gemessenen Wellenlänge entfernt ist, umso größer wird der Messfehler.

8.3 Messung langer Strecken mit dem Wellenlängen-OTDR

Die Phasenverschiebungs-Technik und die Impulsverzögerungs-Technik (Time-of-Flight) ermöglichen eine Messung über optische Verstärker hinweg. Lange Strecken können unproblematisch gemessen werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Messung mit dem multiplen Wellenlängen-OTDR (\rightarrow Abschnitt 8.1.5).

Entsprechend Abschnitt 8.2 Punkt 5 wird der Cursor auf die Spitze des Reflexionspeaks gesetzt. Deshalb ist es wichtig, am Streckenende stets eine hohe Reflexion zu realisieren. Ist ein PC-Stecker am Ende der Strecke, sollte dieser stets gegen Luft arbeiten. Dann entstehen $\approx 4\%$ Reflexion ($\approx 14 \text{ dB}$ Reflexionsdämpfung). Befindet sich ein HRL/APC-Stecker am Ende der Strecke entsteht nur ein kleiner oder gar kein Reflexionspeak (Reflexionsdämpfung $> 55 \text{ dB}$). Dann sollte ein kurzes Faserstück mit einem HRL/APC-Stecker vorn und einem Geradschliff- oder PC-Stecker (gegen Luft) hinten angeschlossen werden, um die Reflexion zu erhöhen.

Durch ein am freien Ende verspiegeltes Faserstück wird die Dynamik der Messung weiter erhöht: Während ein Glas-Luft-Übergang 4% Reflexion bringt, verursacht ein verspiegeltes Ende etwa 96% . Das ist der 24fache Wert ($13,8 \text{ dB}$). Das Messgerät zeigt nur den halben Wert (in Dezibel) der Reflexionsspitzen an (\rightarrow Abschnitte 4.4 und 5.1). Das heißt, durch die Verspiegelung erhöht sich die Dynamik um $6,9 \text{ dB}$. Fasern mit verspiegelten Steckerstimflächen sind kommerziell verfügbar.

Bei großen Streckenlängen wird es zunehmend schwieriger, die Endreflexionen auszuwerten. Das Streckenende verrauscht zunehmend und die exakte Positionierung des Cursors wird erschwert. Wird am Streckenende durch die Verspiegelung eine hohe Reflexion realisiert, liegt der Reflexionspeak deutlich über der Messkurve. Es ist zulässig, dass die Messkurve im Rauschen verschwindet. Aber es muss gewährleistet sein, dass sich die Endreflexion deutlich aus dem Rauschpegel abhebt.

Da die Fasern unterschiedliche Dämpfungskoeffizienten haben, wird mit wachsender Streckenlänge zunächst der Messpunkt mit dem größten Dämpfungskoeffizient der Faser (meist 1450 nm oder 1480 nm) wegfallen. Die Auswertung mit Sellmeier-Polynomen wird erschwert (→ Abschnitt 8.2, Punkt 5), da ein Messpunkt weniger zur Verfügung steht.

Bei noch größeren Streckenlängen (> 100 km) ist auch der Messpunkt bei 1310 nm nicht mehr verfügbar. Eine Auswertung mit nur zwei Stützstellen (lineare Interpolation) bringt keine vernünftigen Ergebnisse mehr. Ist die Strecke so lang, dass die Messung nicht mehr hinreichend genau ausgewertet werden kann, erscheint eine abschnittsweise Messung sinnvoll.

8.4 Mischung von verschiedenen Fasertypen

Erhält man für den Koeffizient der chromatischen Dispersion, für den Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion bzw. für die Nulldispersionswellenlänge Werte, die nicht mit den Angaben in den Tabelle 8.3, 8.4 bzw. 8.5 in Einklang stehen, setzt sich die Strecke offensichtlich aus verschiedenen Fasertypen zusammen.

Die gemessenen Parameter sind Mittelwerte. Die Kenntnis dieser mittleren Parameter ist gewöhnlich völlig ausreichend, da diese auch maßgebend für das Dispersionsverhalten der Strecke sind. Auf der Basis der Messung kann man beispielsweise entscheiden, ob eine Dispersionskompensation erforderlich ist und wie die dispersionskompensierenden Bauelemente zu dimensionieren sind.

Der mittlere Koeffizient der chromatischen Dispersion $\overline{D_{CD}}(\lambda)$ berechnet sich entsprechend Gleichung (8.6). Dabei sind L_i die Längen der einzelnen LWL-Abschnitte, L_{ges} die Gesamtlänge und $D_{CD, i}(\lambda)$ die Koeffizienten der chromatischen Dispersion der einzelnen Abstände.

$$\overline{D_{CD}}(\lambda) = \frac{\sum_i L_i \cdot D_{CD, i}(\lambda)}{L_{ges}} \quad (8.6)$$

Singgemäß gilt für den mittleren Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion $\overline{S}(\lambda)$ Gleichung (8.7).

$$\overline{S}(\lambda) = \frac{\sum_i L_i \cdot S_i(\lambda)}{L_{ges}} \quad (8.7)$$

Es ist im Allgemeinen nicht möglich, aus dem mittleren Koeffizient der chromatischen Dispersion bzw. aus dem mittleren Anstieg auf die entsprechenden Parameter der einzelnen Streckenabschnitte und deren Längen zu schließen. Ein Ausweg wäre die orts aufgelöste Messung der chromatischen Dispersion. Diese ist jedoch als Feldmesstechnik noch nicht verfügbar und die Nachfrage ist aus oben genannten Gründen gering.