

# Chromatische Dispersion und deren Kompensation

## 1 Physikalische Grundlagen

Dispersion in der Lichtwellenleitertechnik ist der Effekt der Impulsverbreiterung entlang der Strecke. Das führt zur Begrenzung der überbrückbaren Streckenlänge und/oder Datenrate.

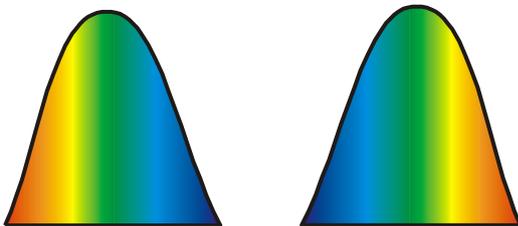
Im [Singlemode-LWL](#) wirken zwei Dispersionsarten:

- [chromatische Dispersion](#): determiniert; physikalisch unvermeidbar
- [Polarisationsmodendispersion](#): sehr kleiner Effekt; lässt sich reduzieren durch Fasern mit minimalem PMD-Koeffizient und moderne Modulationsverfahren

Jeder Sender hat eine endliche spektrale Breite. Die emittierte Leistung besteht aus mehreren Wellenlängenanteilen. Diese Anteile breiten sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $v_K(\lambda)$  aus, da diese von der Kernbrechzahl des Glases  $n_K(\lambda)$  und die Kernbrechzahl des Glases wiederum von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängen:

$$v_K(\lambda) = \frac{c}{n_K(\lambda)} \quad (1)$$

Das Licht ist nicht sichtbar und der Sender hat eine sehr geringe spektrale Halbwertsbreite. Um die Impulsverbreiterung dennoch veranschaulichen zu können, wurde in Bild 1 der Effekt anhand von sichtbarem Licht dargestellt.



**Bild 1: Impulsverbreiterung durch chromatische Dispersion**

Koppelt man Sonnenlicht (weißes Licht) in den Lichtwellenleiter ein, so fächert dieses durch die unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten in die Farben des Regenbogens auf:

- Lichtwellenleiter mit positivem [Koeffizient der chromatischen Dispersion](#) (das sind die herkömmlichen Telekommunikationsfasern) bewirken eine Auffächerung wie in Bild 1 links. Größere Wellenlängen (rotes Ende des Spektrums) laufen langsamer und kleinere Wellenlängen (blaues Ende des Spektrums) laufen schneller. Der Impulsanfang ist blau und das Impulsende ist rot.
- Bei Verwendung eines Lichtwellenleiters mit negativem Koeffizient der chromatischen Dispersion ist der Effekt genau umgekehrt (Bild 1 rechts).

Daraus ist ersichtlich, wie man den Effekt kompensieren kann: Man ordnet hinter einer Faser mit positivem Koeffizient der chromatische Dispersion eine Faser mit negativem Koeffizient der chromatischen Dispersion passender Länge an. Blaue Wellenlängenanteile laufen langsamer, rote Wellenlängenanteile laufen schneller: Der Impuls wird wieder schmaler.

Die chromatische Dispersion ist die Summe aus zwei Effekten: [Materialdispersion](#) und [Wellenleiterdispersion](#). Diese können sich teilweise oder ganz auslöschen. Bei einer bestimmten Wellenlänge (Nulldispersionswellenlänge) kann der Koeffizient der chromatischen Dispersion zu Null werden.

Die chromatische Dispersion wird ermittelt, indem man die Laufzeit des Lichts in ps (**Gruppenlaufzeit**) bei N verschiedenen Wellenlängen misst.

Dividiert man die Laufzeiten durch die Faserlänge L erhält man die [relativen Gruppenlaufzeiten](#):  $\tau(\lambda_1), \tau(\lambda_2), \dots, \tau(\lambda_N)$  in ps/km.

Um die Gruppenlaufzeiten für jede beliebige Wellenlänge zu erhalten, passt man ein Polynom an die Messwerte an und erhält eine Funktion  $\tau(\lambda)$  in ps/km. Daraus lassen sich verschiedene Parameter berechnen:

Der **Koeffizient der chromatischen Dispersion**  $D_{CD}(\lambda)$  ist ein Materialparameter und ein Maß dafür, wie stark sich die relative Gruppenlaufzeit mit der Wellenlänge ändert. Man berechnet  $D_{CD}(\lambda)$  durch Differenziation von  $\tau(\lambda)$  nach der Wellenlänge:

$$D_{CD}(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \text{ in ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \quad (2)$$

Die [chromatische Dispersion CD](#) wächst mit der Streckenlänge:

$$CD(\lambda) = D_{CD}(\lambda) \cdot L \text{ in ps}/\text{nm} \quad (3)$$

Es besteht eine unmittelbare Analogie zur Dämpfung a der Faser ( $\alpha$ : Dämpfungskoeffizient):

$$a = \alpha \cdot L \text{ in dB} \quad (4)$$

So wie die Dämpfung einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf (Dämpfungsbegrenzung) ist auch die zulässige chromatische Dispersion begrenzt (Dispersionsbegrenzung). Der Dämpfungskoeffizient ist wie der Koeffizient der chromatischen Dispersion ein Materialparameter und steht im Datenblatt des Lichtwellenleiters.

Sind Materialdispersion und Wellenleiterdispersion entgegengesetzt gleich groß, addieren sie sich zu Null. Für den Nulldurchgang der chromatischen Dispersion ([Nulldispersionswellenlänge](#)  $\lambda_0$  in nm) gilt:

$$D_{CD}(\lambda_0) = 0 \text{ in ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) \quad (5)$$

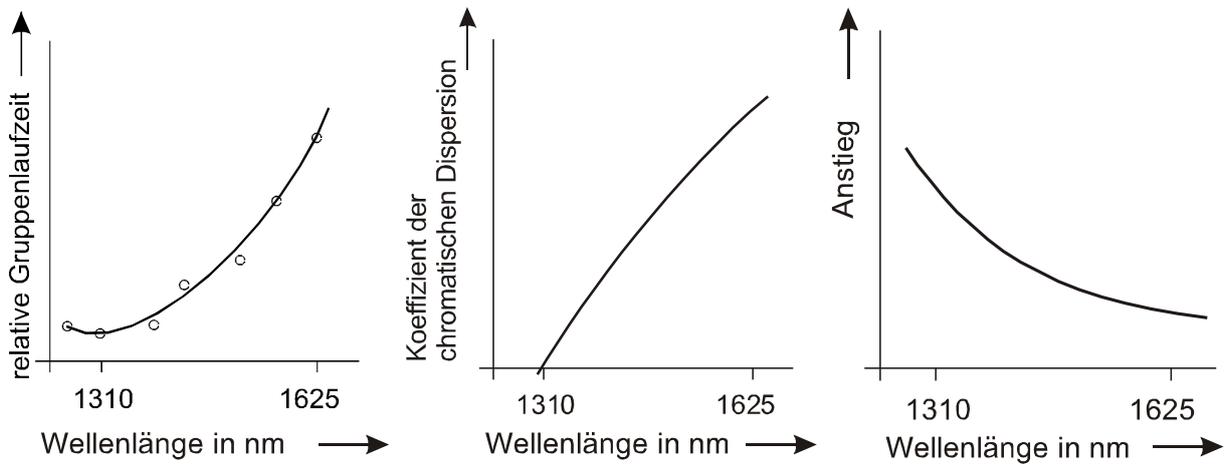
Der [Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion](#) berechnet sich durch nochmaliges Differenzieren nach der Wellenlänge:

$$S(\lambda) = \frac{dD_{CD}(\lambda)}{d\lambda} = \frac{d^2\tau(\lambda)}{d\lambda^2} \text{ in ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km}) \quad (6)$$

Für den **Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion bei der Nulldispersionswellenlänge** gilt schließlich:

$$S_0 = S(\lambda_0) \text{ in ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km}) \quad (7)$$

## 2 Messung und Berechnung der chromatischen Dispersion



**Bild 2: Relative Gruppenlaufzeit, Koeffizient der chromatischen Dispersion, Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion in Abhängigkeit von der Wellenlänge**

Die Kreise in Bild 2 links veranschaulichen die gemessenen relativen Gruppenlaufzeiten  $\tau(\lambda_n)$  für  $n = 1, 2, \dots, N$ . Mit einem geeigneten **Polynom** erfolgt eine Kurvenanpassung  $\tau(\lambda)$ . Die Kurve in Bild 2 Mitte erhält man durch Differenzieren der linken Kurve bezüglich der Wellenlänge (Gleichung (2)) und erhält den Koeffizient der chromatischen Dispersion  $D_{CD}(\lambda)$ . Durch nochmaliges Differenzieren entsteht die Kurve in Bild 2 rechts (Gleichung (6)): Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion  $S(\lambda)$ .

Der Standard-Singlemode-LWL bewirkt bei 1310 nm eine minimale relative Gruppenlaufzeit (Bild 2 links). Das führt zum Nulldurchgang des Koeffizienten der chromatischen Dispersion bei dieser Wellenlänge (Bild 2 Mitte).

Für die Kurvenanpassung werden die Polynome entsprechend Tabelle 1 verwendet.

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

**Tabelle 1: Polynome zur Kurvenanpassung (relative Gruppenlaufzeit  $\tau(\lambda)$ ; Koeffizient der chromatischen Dispersion  $D_{CD}(\lambda)$ ; Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion  $S(\lambda)$ )**

Je nach Fasertyp werden bestimmte Polynome in **DIN EN 60793-1-42 (10/2013)** empfohlen:

Standard-Singlemode-LWL (G.652); biegeunempfindlicher Lichtwellenleiter (G.657):

- 3-Term-Sellmeier-Polynom für den gesamten Wellenlängenbereich
- Polynom 2. Ordnung nur im 1550 nm-Bereich geeignet

Dispersionsverschobener Lichtwellenleiter (G.653); Cutoff-shifted-LWL (G.654):

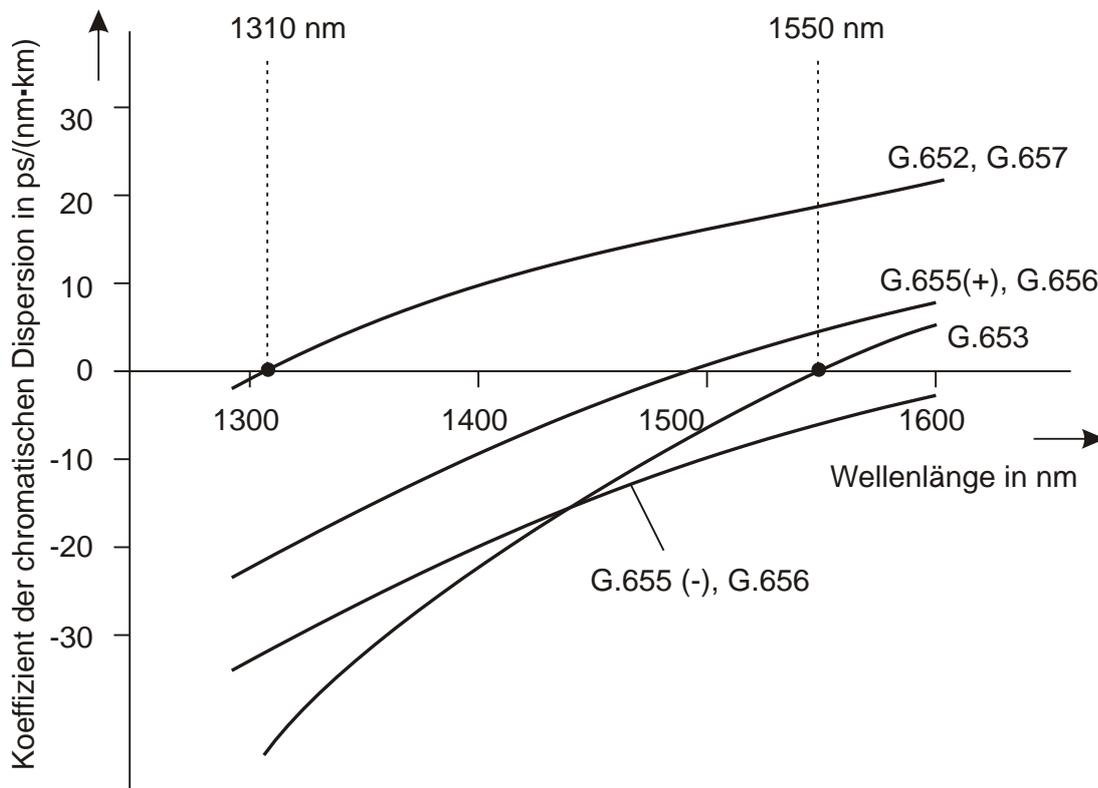
- Polynom 2. Ordnung bei 1550 nm  $\pm$  35 nm. Extrapolation über diesen Bereich hinaus ist nicht zulässig.
- 5-Term-Sellmeier-Polynom oder Polynom 4. Ordnung für größeren Wellenlängenbereich um 1550 nm
- nicht geeignet für 1310 nm

Non-Zero-Dispersion-Shifted-LWL (G.655, G.656):

- Polynom 2. Ordnung in einem kleinen Wellenlängenbereich ( $\pm$  35 nm) (gilt nur für G.655). Extrapolation über diesen Bereich hinaus ist nicht zulässig.
- In einem größeren Wellenlängenbereich: 5-Term-Sellmeier-Polynom oder Polynom 4. Ordnung

### 3 Eigenschaften der verschiedenen Singlemode-LWL

Die Koeffizienten der chromatischen Dispersion verschiedener Singlemode-LWL haben eine unterschiedliche Wellenlängenabhängigkeit (Bild 3).



**Bild 3:**  
**Koeffizient der chromatischen Dispersion verschiedener Singlemode-LWL**

Entsprechend unterscheiden sich die Anstiege der Koeffizienten der chromatischen Dispersion und die Nulldispersionswellenlängen (Tabelle 2, 3, 4).

Norm, LWL-Typ	Wellenlänge	Koeffizient der chromatischen Dispersion
G.652; G.657.A	1310 nm	$\approx 0$ ps/(nm·km)
	1550 nm	$\approx 17$ ps/(nm·km)
G.653	1550 nm	$\approx 0$ ps/(nm·km)
G.654.E	1550 nm	(17...23) ps/(nm·km)
G.655, TrueWave RS	1550 nm	$\approx 4,4$ ps/(nm·km); (2,6...6) ps/(nm·km)
G.655, LEAF	1550 nm	$\approx 3,67$ ps/(nm·km); (2...6) ps/(nm·km)
G.655, TeraLight	1550 nm	$\approx 8,0$ ps/(nm·km); (5,5...9,5) ps/(nm·km)
G.656	1460 nm ...1625 nm	$D_{CDmin} = (1,00...4,58)$ ps/(nm·km) $D_{CDmax} = (4,60...14,00)$ ps/(nm·km)

**Tabelle 2:**  
**Koeffizienten der chromatischen Dispersion verschiedener LWL-Typen**

Norm, LWL-Typ	Wellenlänge	Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion
G.652; G.657.A	1300 nm...1324 nm	$\leq 0,092$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
	1310 nm	$\approx 0,086$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
	1550 nm	$\approx 0,056$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.653	1550 nm	$\approx 0,070$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.654.E	1550 nm	(0,050...0,070) ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.655, TrueWave RS	1550 nm	$\approx 0,042$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.655, LEAF	1550 nm	$\approx 0,105$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.655, TeraLight	1550 nm	$\approx 0,058$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)
G.657.B	1250 nm...1350 nm	$\leq 0,11$ ps/(nm <sup>2</sup> ·km)

**Tabelle 3: Anstiege der Koeffizienten der chromatischen Dispersion verschiedener LWL-Typen**

Norm, LWL-Typ	Nulldispersionswellenlänge
G.652; G.657.A	$1300 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1324 \text{ nm}$
G.653	$1500 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1600 \text{ nm}$
G.655 (+)	$\lambda_0 < 1530 \text{ nm}$
G.656	$\lambda_0 < 1460 \text{ nm}$
True Wave RS	$\lambda_0 \approx 1460 \text{ nm}$
LEAF	$\lambda_0 \approx 1500 \text{ nm}$
TeraLight	$\lambda_0 \approx 1440 \text{ nm}$
G.657.B	$1250 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1350 \text{ nm}$

**Tabelle 4: Nulldispersionswellenlängen verschiedener LWL-Typen**

Entsprechend Bild 3 und Tabelle 2 sind die Koeffizienten der chromatischen Dispersion determiniert. Ein bestimmter Fasertyp hat bei einer bestimmten Wellenlänge unabhängig vom Hersteller einen bestimmten Wert.

Damit ist der Einfluss der chromatischen Dispersion planbar. Es gibt keine guten oder schlechten Fasern bezüglich der CD-Koeffizienten. Es handelt sich um einen physikalisch unvermeidbaren Effekt.

Als Beispiel zeigt Tabelle 5 die Koeffizienten der chromatischen Dispersion in Abhängigkeit von der Wellenlänge von acht verschiedenen Herstellern. Die Werte streuen zwar, liegen aber innerhalb bestimmter Grenzen. So gilt für **alle** Fasern:

- $D_{CD}(\lambda = 1310 \text{ nm}) \approx 0 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$
- $D_{CD}(\lambda = 1550 \text{ nm}) \approx 17 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$
- $D_{CD}(\lambda = 1625 \text{ nm}) \approx 20 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$

Wellenlänge (nm)	Vendor 1 (Min CD)		Vendor 1 (Max CD)		Vendor 2 (Min CD)		Vendor 2 (Max CD)		Vendor 3 (Min CD)		Vendor 3 (Max CD)		Vendor 4 (Min CD)		Vendor 4 (Max CD)		Vendor 5 (Min CD)		Vendor 5 (Max CD)		Vendor 6 (Min CD)		Vendor 6 (Max CD)		Vendor 7 (Min CD)		Vendor 7 (Max CD)		Vendor 8 (Min CD)		Vendor 8 (Max CD)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max																
1270	-4,96	-2,36	-4,82	-2,83	-4,74	-3,14	-4,83	-3,18	-5,18	-2,54	-4,80	-3,05	-4,70	-2,76	-3,99	-1,83																
1280	-3,99	-1,56	-3,87	-1,88	-3,79	-2,18	-3,87	-2,26	-4,18	-1,68	-3,83	-2,12	-3,80	-1,82	-3,16	-0,92																
1290	-3,05	-0,77	-2,96	-0,94	-2,86	-1,25	-2,94	-1,34	-3,19	-0,83	-2,89	-1,21	-2,90	-0,91	-2,25	0,00																
1300	-2,12	0,00	-2,06	-0,02	-1,96	-0,33	-2,03	-0,43	-2,17	-0,01	-1,97	-0,32	-2,10	-0,10	-1,28	0,92																
1310	-1,23	0,91	-1,18	0,88	-1,08	0,56	-1,14	0,46	-1,28	0,89	-1,07	0,55	-1,20	0,84	-0,32	1,77																
1320	-0,35	1,81	-0,33	1,76	-0,22	1,44	-0,28	1,33	-0,35	1,75	-0,20	1,41	-0,40	1,68	0,48	2,60																
1330	0,45	2,68	0,50	2,62	0,61	2,29	0,56	2,19	0,49	2,61	0,65	2,24	0,50	2,50	1,17	3,42																
1340	1,19	3,53	1,31	3,47	1,43	3,13	1,38	3,03	1,25	3,41	1,49	3,06	1,30	3,30	1,84	4,15																
1350	1,92	4,37	2,10	4,29	2,23	3,94	2,19	3,85	2,01	4,25	2,30	3,86	2,00	4,08	2,49	4,88																
1360	2,63	5,19	2,87	5,10	3,01	4,75	2,97	4,65	2,75	5,04	3,10	4,64	2,80	4,90	3,13	5,59																
1370	3,32	5,99	3,55	5,90	3,79	5,51	3,73	5,44	3,47	5,83	3,88	5,39			3,87	6,33																
1380	4,00	6,78	4,28	6,68	4,55	6,27	4,47	6,21	4,17	6,58	4,65	6,13			4,59	7,05																
1390	4,67	7,54	4,98	7,44	5,29	7,02	5,19	6,97	4,88	7,39	5,41	6,86			5,29	7,77																
1400	5,32	8,30	5,68	8,19	6,02	7,76	5,91	7,72	5,58	8,14	6,15	7,58			5,96	8,49																
1410	5,96	9,04	6,37	8,92	6,74	8,48	6,60	8,45			6,88	8,30			6,61	9,20																
1420	6,58	9,76	7,05	9,65	7,44	9,19	7,27	9,18			7,60	9,01																				
1425					7,79	9,55			7,31	9,97																						
1430	7,20	10,47	7,72	10,35	8,14	9,89	7,94	9,89			8,31	9,71			7,29	9,91																
1440	7,80	11,17	8,31	11,05	8,82	10,58	8,58	10,58			9,00	10,40			7,99	10,64																
1450	8,39	11,86	8,99	11,73	9,50	11,26	9,18	11,27	8,98	11,71	9,67	11,08			8,71	11,35																
1460	8,97	12,53	9,66	12,41	10,16	11,93	9,79	11,94			10,33	11,76			9,35	12,11																
1470	9,54	13,19	10,32	13,07	10,82	12,59	10,40	12,61			10,98	12,42			9,98	12,82																
1475					11,15	12,92			10,60	13,40																						
1480	10,10	13,84	10,96	13,72	11,45	13,22	10,99	13,26			11,61	13,08			10,63	13,54																
1490	10,65	14,48	11,59	14,36	12,10	13,87	11,57	13,90			12,23	13,73			11,26	14,27																
1500	11,19	15,10	12,21	14,99	12,74	14,51	12,13	14,53	12,16	15,16	12,83	14,37	12,30	14,50	11,87	14,99																
1510	11,72	15,72	12,82	15,61	13,36	15,14	12,68	15,15			13,42	15,00	12,80	15,20	12,45	15,68																
1520	12,24	16,33	13,42	16,23	13,98	15,76	13,21	15,76			14,00	15,63	13,40	15,80	13,11	16,40																
1525					14,28	16,06			13,66	16,89					13,55	16,79																
1530	12,76	16,93	14,01	16,83	14,59	16,37	13,74	16,36			14,56	16,25	14,00	16,40	13,84	17,12																
1540	13,26	17,51	14,59	17,43	15,18	16,97	14,27	16,94			15,12	16,85	14,50	17,00	14,40	17,76																
1550	13,76	18,09	15,16	18,02	15,76	17,56	14,78	17,52	15,10	18,56	15,66	17,45	15,00	17,50	14,94	18,39																
1560	14,25	18,66	15,73	18,60	16,33	18,14	15,28	18,10			16,20	18,05	15,60	18,20	15,50	19,01																
1570	14,73	19,22	16,28	19,18	16,89	18,71	15,78	18,66			16,73	18,63	16,10	18,80	15,99	19,63																
1575					17,17	18,99			16,48	20,20					16,29	19,93																
1580	15,20	19,78	16,82	19,76	17,45	19,27	16,27	19,21			17,24	19,21	16,60	19,30	16,49	20,25																
1590	15,67	20,32	17,36	20,33	17,99	19,83	16,75	19,76			17,75	19,77	17,10	19,90	16,95	20,88																
1600	16,13	20,86	17,89	20,89	18,53	20,37	17,23	20,30	17,81	21,81	18,25	20,33	17,60	20,40	17,46	21,45																
1610	16,59	21,39	18,41	21,45	19,06	20,91	17,70	20,83			18,75	20,89	18,10	21,00	17,89	22,08																
1620	17,03	21,91	18,92	22,01	19,58	21,44	18,17	21,36			19,23	21,43	18,60	21,50	18,31	22,69																
1625	17,25	22,17	19,17	22,28	19,84	21,71	18,40	21,62	19,09	23,38	19,47	21,70	18,90	21,80	18,60	23,01																

Tabelle 5: CD-Koeffizienten verschiedener Hersteller (Quelle: ITU-T Recommendation G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable)

#### 4 Begrenzungen durch chromatische Dispersion

Die Impulsverbreiterung kann zur Überlappung benachbarter Impulse führen (Inter-symbol-Interferenz). Bei digitaler Übertragung wird dann zum Beispiel eine logische „Null“ als „Eins“ erkannt oder umgekehrt. Das führt zu Bitfehlern.

Als Daumenregel sollte entsprechend Telcordia common generic criteria GR-253-CORE „Synchronous optical network transport system“ die Differenz zwischen der Impulsbreite am LWL-Ausgang  $t_a$  und der Impulsbreite am LWL-Eingang  $t_e$  bei digitaler [NRZ](#)-Modulation nicht größer sein als ( $\Delta t$ : Impulsverbreiterung;  $T_{\text{bit}}$ : Bitlänge):

$$\Delta t = t_a - t_e \leq 0,306 \cdot T_{\text{bit}} \quad (8)$$

Das führt zur Begrenzung der überbrückbaren Länge/Datenrate durch chromatische Dispersion. Für externe Modulation des Lasers (NRZ) und [Power Penalty](#) 1 dB gilt:

$$L = \frac{115.362((\text{Gbit/s})^2 \cdot \text{ps/nm})}{R^2 \cdot |D_{\text{CD}}|} \quad (9)$$

Multipliziert man Gleichung (9) mit  $|D_{\text{CD}}|$  erhält man mit der Definition entsprechend Gleichung (3) Grenzwerte für die maximal zulässige chromatische Dispersion in Abhängigkeit von der Datenrate:

- $|CD| \leq L \cdot |D_{\text{CD}}| = 18458 \text{ ps/nm}$  bei  $R = 2,5 \text{ Gbit/s}$  (10.1)

- $|CD| \leq L \cdot |D_{\text{CD}}| = 1154 \text{ ps/nm}$  bei  $R = 10 \text{ Gbit/s}$  (10.2)

- $|CD| \leq L \cdot |D_{\text{CD}}| = 72 \text{ ps/nm}$  bei  $R = 40 \text{ Gbit/s}$  (10.3)

- $|CD| \leq L \cdot |D_{\text{CD}}| = 11,5 \text{ ps/nm}$  bei  $R = 100 \text{ Gbit/s}$  (10.4)

So wie die Dämpfung der Strecke nicht überschritten werden darf, muss auch die chromatische Dispersion innerhalb bestimmter Grenzen liegen.

### Beispiel:

Übertragung von 10 Gbit/s über 80 km mit Standard-Singlemode-LWL bei 1550 nm:

$$|CD| = L \cdot |D_{\text{CD}}| = 80 \text{ km} \cdot 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}) = 1360 \text{ ps/nm}$$

Entsprechend Gleichung (10.2) muss gewährleistet sein:

$$-1154 \text{ ps/nm} \leq CD \leq 1154 \text{ ps/nm}$$

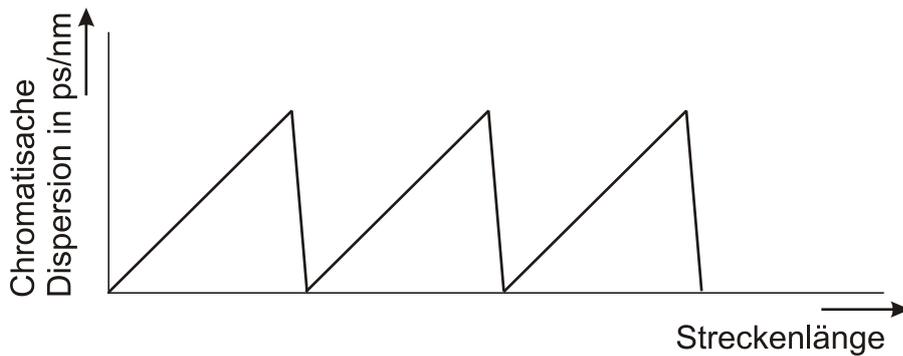
Die chromatische Dispersion liegt außerhalb des zulässigen Bereichs und muss kompensiert werden.

Bei hohen Datenraten muss die Kompensation sehr exakt erfolgen, um eine kleine resultierende chromatische Dispersion zu erreichen. Bei 100 Gbit/s muss entsprechend Gleichung (10.4) gewährleistet werden:  $-11,5 \text{ ps/nm} \leq CD \leq 11,5 \text{ ps/nm}$

## 5 Kompensation der chromatischen Dispersion

### 5.1 Dispersionskompensation mit Fasern

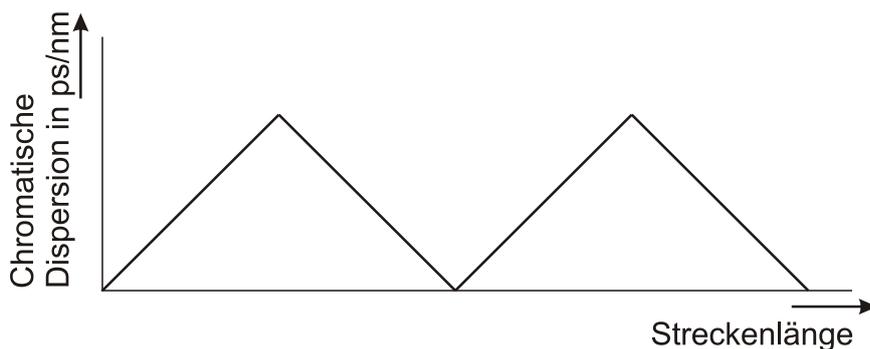
Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, muss die dispersionskompensierende Faser ([DCF](#)) einen negativen Koeffizient der chromatischen Dispersion haben. Bild 4 zeigt die chromatische Dispersion in Abhängigkeit von der Streckenlänge. Die Anstiege der Geraden entsprechen dem Koeffizient der chromatischen Dispersion. Erster Abschnitt: Standard-Singlemode-Faser mit  $D_{\text{CD}} \approx 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  bei 1550 nm. Falls dieser Abschnitt 80 km lang ist, sind 1360 ps/nm zu kompensieren. Für eine dispersionskompensierende Faser (DCF) gilt zum Beispiel  $D_{\text{CD}} \approx -95 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ . Der Anstieg ist negativ und fällt sehr stark ab (zweiter Abschnitt in Bild 4); Länge ca. 14 km.



**Bild 4: Nachträgliche Kompensation der chromatischen Dispersion**

So verfährt man bei nachträglicher Kompensation, beispielsweise bei Aufrüstung der Strecke von 2,5 Gbit/s auf 10 Gbit/s, wenn die chromatische Dispersion zu groß wird. Nachteil ist, dass die dispersionskompensierende Faser in einer Box aufgewickelt ist und nicht zur Überbrückung einer bestimmten Strecke genutzt werden kann.

Ist von vorn herein klar, dass die chromatische Dispersion kompensiert werden muss, kann man die dispersionskompensierende Faser für die Überbrückung der Strecke mit nutzen. Dann hat die kompensierende Faser beispielsweise einen Koeffizient  $D_{CD} \approx -17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  und es ergibt sich die Darstellung entsprechend Bild 5.



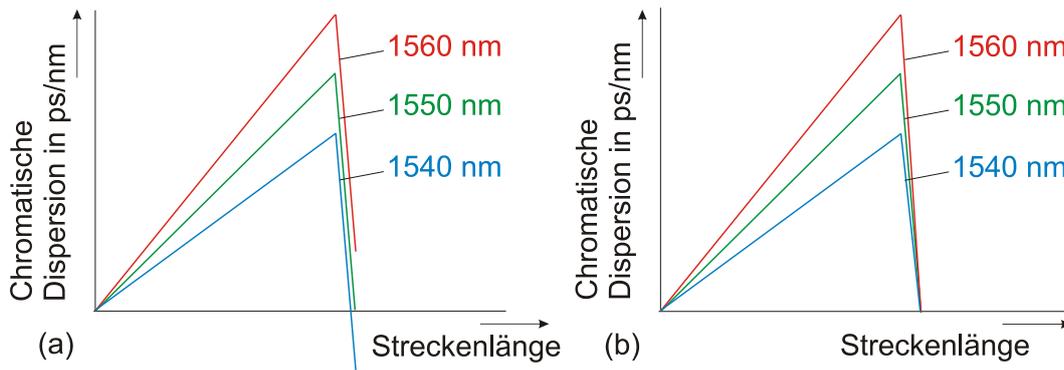
**Bild 5: Lichtwellenleiter mit gleich großen positiven und negativen Koeffizienten der chromatischen Dispersion (alternierend)**

Dispersionskompensierende Fasern haben folgende Nachteile:

- hoher Dämpfungskoeffizient
- kleiner Modenfelddurchmesser: Bewirkt Fehlanpassung zur Übertragungsfaser und damit Dämpfung.
- Beitrag zur Polarisationsmodendispersion

## 5.2 Wellenlängenabhängige Dispersionskompensation

Der Koeffizient der chromatischen Dispersion wächst mit der Wellenlänge (Bild 3). Ein Wellenlängenmultiplex-Signal erstreckt sich über einen bestimmten Wellenlängenbereich. Die Impulse verschiedener Wellenlängen werden unterschiedlich stark verbreitert (Bild 6 (a)). Bei einer wellenlängenunabhängigen Kompensation kann zwar für die Mittenwellenlänge exakt zu Null kompensiert werden, für 1560 nm verbleibt ein Rest chromatische Dispersion und bei 1540 nm wird überkompensiert.



**Bild 6:**  
**Wellenlängenunabhängige (a) und wellenlängenabhängige (b) Kompensation**

Die verbleibende Dispersion muss die Gleichungen (10) erfüllen. Je höher die Datenrate, umso kleiner ist der Bereich der zulässigen chromatischen Dispersion.

Darüber hinaus wächst die verbleibende chromatische Dispersion mit der Streckenlänge. Es ist eine exakte Dispersionskompensation erforderlich.

Das wird möglich durch wellenlängenabhängige Kompensation: Bei höheren Wellenlängen muss stärker kompensiert werden als bei geringeren Wellenlängen (Bild 6 (b)).

Eine Kompensation für alle Wellenlängen ist möglich, wenn die relative Steigung der Übertragungsfaser und der Kompensationsfaser gleich sind.

Die relative Steigung (Relative Dispersion Slope: RDS) ist folgendermaßen definiert:

$$RDS(\lambda) = \frac{\text{Steigung}(\lambda)}{\text{Koeffizient der CD}(\lambda)} = \frac{S(\lambda)}{D_{CD}(\lambda)} \text{ in } 1/\text{nm} \quad (11)$$

Dispersionskompensierende Fasern (DCF) mit gleich großer RDS und mit negativen Vorzeichen von  $S$  und  $D_{CD}$  ermöglichen eine ideale Dispersionskompensation innerhalb eines bestimmten Wellenlängenbereiches:

$$RDS_{DCF} = RDS_{Strecke} \quad (12)$$

$$CD_{DCF} = -CD_{Strecke} \Rightarrow D_{CD}^{DCF} \cdot L_{DCF} = -D_{CD}^{Strecke} \cdot L_{Strecke} \Rightarrow \frac{L_{DCF}}{L_{Strecke}} = -\frac{D_{CD}^{Strecke}}{D_{CD}^{DCF}} \quad (13)$$

Das Verhältnis der Faserlängen muss (betragsmäßig) umgekehrt proportional zum Verhältnis der Koeffizienten der chromatischen Dispersion sein.

Mit geeigneten dispersionskompensierenden Fasern ist man in der Lage, über ein breites Wellenlängenband die relative Steigung an die Übertragungsfaser anzupassen. Tabelle 6 zeigt im oberen Teil Übertragungsfasern und im unteren Teil kompensierende Fasern. Die RDS-Werte von Vascade L1000 und S1000 sind identisch (fett hervorgehoben) und ermöglichen eine optimale Kompensation.

Auch Fujikura bietet dispersionskompensierende Fasern an. Sie sind im Wellenlängenbereich 1525 nm bis 1615 nm an G.652-LWL, LEAF, TrueWave RS bzw. TeraLight angepasst.

LWL-Typ (Übertragungswellenlänge)	D <sub>CD</sub> in ps/(nm·km)	S in ps/(nm <sup>2</sup> ·km)	RDS in 1/nm
G.652-LWL (1550 nm)	17	0,056	0,0033
TrueWave RS (1550 nm)	4,4	0,042	0,010
TrueWave RS (1585 nm)	6	0,042	0,007
LEAF (1550 nm)	3,67	0,105	0,029
LEAF (1585 nm)	7	0,105	0,015
TeraLight (1550 nm)	8,0	0,058	0,0073
TeraLight (1585 nm)	10	0,058	0,0058
Vascade L1000 (1550 nm)	18,5	0,06	<b>0,0032</b>
Wideband-DCF (1550 nm)	-95	-0,33	0,0035
NZDF-DCF (1550 nm)	-98	-0,63	0,0064
Vascade S1000 (1550 nm)	-37	-0,12	<b>0,0032</b>

**Tabelle 6: Relative Steigung verschiedener Fasern  
oben: Fasern für die Übertragung; unten: dispersionskompensierende Fasern**

### 5.3 Dispersionskompensierende Fasern von Fujikura

Tabelle 7 zeigt einen Ausschnitt aus einem Datenblatt von Fujikura. Es wird unterschieden zwischen [C-Band](#) (1525 nm bis 1565 nm) und [L-Band](#) (1565 nm bis 1615 nm).

Aus den spezifizierten chromatischen Dispersionen ergeben sich die Längen und die Koeffizienten der chromatischen Dispersion (Fasertyp) der Übertragungsfaser.

CD = -340 ps/nm beim DC-Modul für das C-Band ermöglicht die Kompensation von 20 km mit Standard-Singlemode-LWL ( $D_{CD} \approx 17$  ps/(nm·km) bei 1545 nm). Die anderen CD-Werte entsprechen den Längen 40 km, 60 km, 80 km. Die relative Steigung ist an den Standard-Singlemode-LWL (C-Band) angepasst (0,0034/nm). Die maximale Dämpfung beträgt 8,5 dB.

CD = -380 ps/nm beim DC-Modul für das L-Band ermöglicht ebenfalls eine Kompensation von 20 km mit Standard-Singlemode-LWL ( $D_{CD} \approx 19$  ps/(nm·km) bei 1590 nm). Die anderen CD-Werte entsprechen 40 km, 60 km, 80 km. Die relative Steigung ist an den Standard-Singlemode-LWL (L-Band) angepasst (0,0028/nm). Die maximale Dämpfung beträgt 8,9 dB.

Die Fasern beider Module haben eine sehr geringe effektive Fläche: 19  $\mu\text{m}^2$ . Eine Kopplung an den Standard-Singlemode-LWL (effektive Fläche: 78  $\mu\text{m}^2$ ) bewirkt eine Dämpfung von etwa 2,1 dB.

Wegen der hohen Dämpfung der dispersionskompensierenden Faser und der Dämpfung bei Kopplung an die Übertragungsfaser sind meist [optische Verstärker](#) erforderlich.

Darüber hinaus bewirken dispersionskompensierende Fasern einen großen Beitrag zur Polarisationsmodendispersion (PMD). Das heißt die Verringerung der chromatischen Dispersion wird durch die Erhöhung der Polarisationsmodendispersion erkauft.

### Slope Compensation DC Fiber Module for C-band

Parameter	Unit	Min.	Max
Operating Wavelength	nm	1525	1565
Operating Temperature	degC	-5	70
Storage Temperature	degC	-20	75
SBS threshold	dBm	4	-
$n_2/A_{eff}$	1/W	-	$1.7 \times 10^{-9}$
Fiber effective area @1550nm	$\mu m^2$	19	-

Item	Unit	DC-C-N340-UW	DC-C-N680-UW	DC-C-N1020 - UW	DC-C-N1360 - UW
Dispersion @1545nm	ps/nm	-340+/-10	-680+/-20	-1020+/-30	-1360+/-40
Dispersion Slope @1545nm(Typical)	ps/nm <sup>2</sup>	-1.0	-2.0	-3.1	-4.1
Ratio of Disp. & Disp. Slope @1545nm	nm <sup>-1</sup>	0.0034+/-20%(Standard), +/-10% available TBD for other ratio versions			
Insertion Loss @1550nm	dB	≤3.6	≤5.4	≤7.0	≤8.5
Insertion Loss(Typical)	dB	2.7	4.1	5.3	6.7
PMD	ps	≤0.6	≤0.9	≤1.0	≤1.0
PMD(Typical)	ps	0.2	0.3	0.4	0.5
PDL	dBp-p	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.1
Connector type	-	As requested			
Dimensions	mm	224 x 238 x 45			

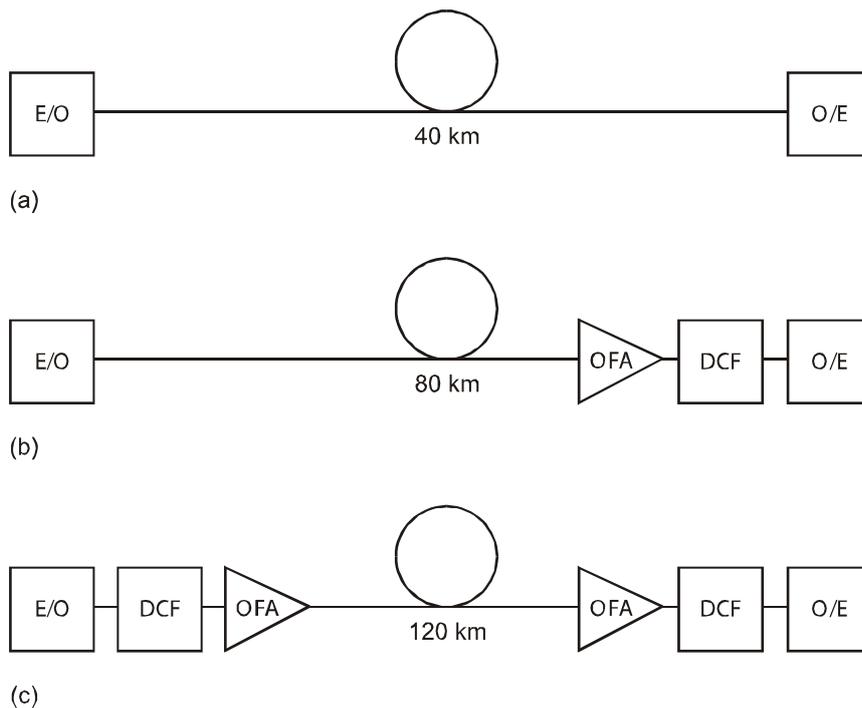
### Slope Compensation DC Fiber Module for L-band

Parameter	Unit	Min.	Max
Operating Wavelength	nm	1565	1615
Operating Temperature	degC	-5	70
Storage Temperature	degC	-20	75
SBS threshold	dBm	4	-
$n_2/A_{eff}$	1/W	-	$1.7 \times 10^{-9}$
Fiber effective area @1590nm	$\mu m^2$	19	-

Item	Unit	DC-L-N380-UW	DC-L-N760-UW	DC-L-N1140 - UW	DC-L-N1520-UW
Dispersion @1590nm	ps/nm	-380+/-10	-760+/-20	-1140+/-30	-1520+/-40
Dispersion Slope @1590nm(Typical)	ps/nm <sup>2</sup>	-1.0	-2.0	-3.0	-4.0
Ratio of Disp. & Disp. Slope @1590nm (Typical)	nm <sup>-1</sup>	0.0028+/-20%(Standard), +/-10% available TBD for other ratio versions			
Insertion Loss @1590nm	dB	≤3.9	≤5.7	≤7.4	≤8.9
Insertion Loss(Typical)	dB	3.2	4.7	6.3	7.8
PMD	ps	≤0.6	≤0.9	≤1.0	≤1.0
PMD(Typical)	ps	0.3	0.4	0.5	0.5
PDL	dBp-p	≤0.1	≤0.1	≤0.1	≤0.1
Connector type	-	As requested			
Dimensions	mm	224 x 238 x 45			

**Tabelle 7: Auszug aus dem Datenblatt von DC-Fasern von Fujikura**

Bild 7 zeigt die Vorgehensweise, wenn optische Verstärkung erforderlich ist. Optischer Verstärker (OFA) und dispersionskompensierende Fasern (DCF) befinden sich meist am gleichen Ort. Während bei 40 km Streckenlänge eine Dispersionskompensation und damit auch Verstärkung nicht erforderlich sind, werden bei 80 km OFA und DCF am Ende der Strecke angeordnet. Bei noch größerer Streckenlänge (120 km) auch am Anfang.



**Bild 7: Optische Verstärkung und Kompensation der chromatische Dispersion**

### 5.3 Photonische Kristallfaser

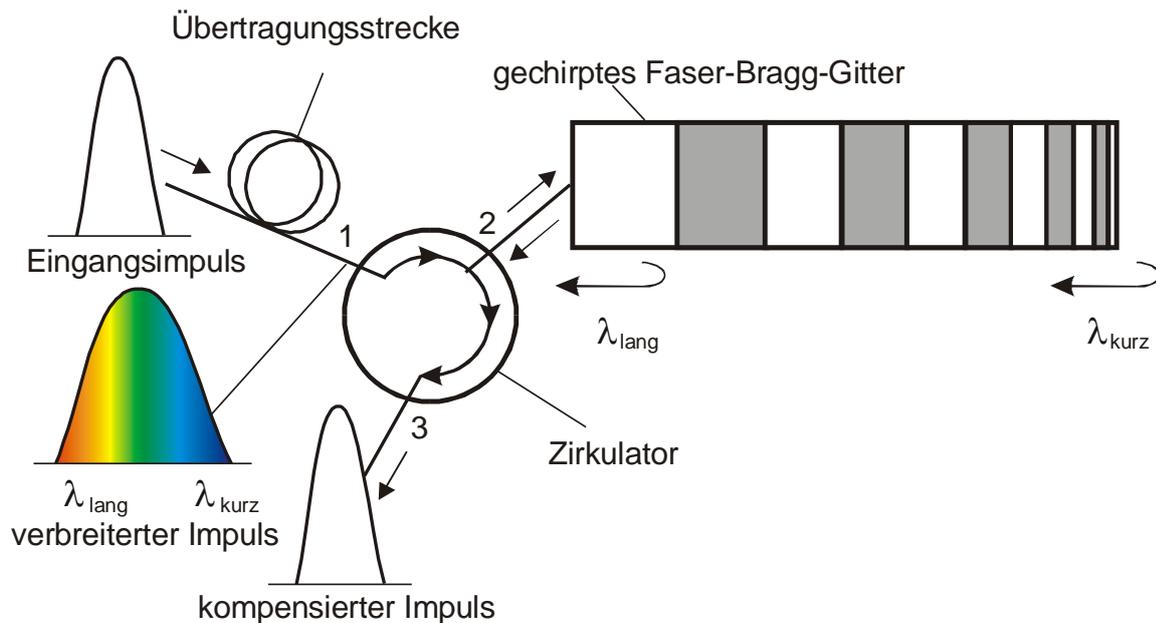
Mit einer Dual-Core [Photonischen Kristallfaser \(PCF\)](#), einer Faser mit Löcherstruktur parallel zur optischen Achse, erreicht man  $D_{CD} \approx -18.000 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ . Das entspricht (betragsmäßig) etwa dem 1000fachen Wert des Standard-Singlemode-LWL. Um die Dispersion einer 80 km langen Strecke zu kompensieren reicht eine Photonische Kristallfaser von  $80 \text{ km}/1000 = 80 \text{ m}$  aus. Die chromatische Dispersion über der Länge in der Darstellung wie in Bild 4 hat dann einen sägezahnförmigen Verlauf.

### 5.4 [Gechirptes Faser-Bragg-Gitter](#)

Bild 8 zeigt die Wirkungsweise eines gechirpten Faser-Bragg-Gitters. Der schmale Impuls am Anfang der Strecke wird durch die chromatische Dispersion verbreitert: Die kurzen Wellenlängen laufen schneller, die langen langsamer. Über einen optischen Zirkulator wird das Licht in ein gechirptes Faser-Bragg-Gitter gekoppelt.

Ein [Faser-Bragg-Gitter \(FBG\)](#) ist ein Bauelement, welches entlang des Faserkernes Brechzahlspünge hat. Diese bewirken Reflexionen. Je nach Abstand der Brechzahlspünge voneinander (Gitterperiode) wird eine ganz bestimmte Wellenlänge reflektiert. Bei einem gechirpten Faser-Bragg-Gitter ändert sich die Gitterperiode entlang des Gitters und so können unterschiedliche Wellenlängen reflektiert werden.

Das Gitter in Bild 7 hat eine allmählich abnehmende Gitterkonstante (stark übertriebene Darstellung). Der Gitteranfang ist dem langwelligeren Ende des Impulses angepasst (rot). Die Wellenlängenanteile vom hinteren Impulsende werden reflektiert. Der verbleibende Impuls dringt weiter in das Gitter ein. Etwa in der Mitte des Gitters werden die grünen und am Ende des Gitters die blauen Wellenlängenanteile reflektiert.



**Bild 8: Wirkungsweise des gechirpten Bragg-Gitters**

Da heißt die Wellenlängenanteile, die vornweg eilen, müssen einen längeren Weg zurücklegen als die Wellenlängenanteile, die hinterherhinken: Der Impuls wird schmaler. Das Licht wird wieder in den Zirkulator eingekoppelt. Der optische Zirkulator ist ein Bauelement, welches eine Richtungstrennung von hin- und zurücklaufendem Licht ermöglicht.

Trifft ein Wellenlängenmultiplex-Signal auf das Gitter wird jeweils der Kanal kompensiert, dessen Wellenlänge an das Raster des Gitters angepasst ist. Alle anderen Kanäle passieren diesen Abschnitt des Gitters ohne Dämpfung. Die weiteren Kanäle werden an anderen Stellen des Gitters kompensiert. Man unterscheidet zwei verschiedene Typen von gechirpten Bragg-Gittern:

**Kontinuierliches Gitter (DCM-CB):** Ist ein Bauelement, welches eine kontinuierliche Veränderung der Gitterkonstante über einen große Wellenlängenbereich realisiert. Es ist unabhängig vom Kanalplan (von genormten Wellenlängen) einsetzbar (Bild 9).

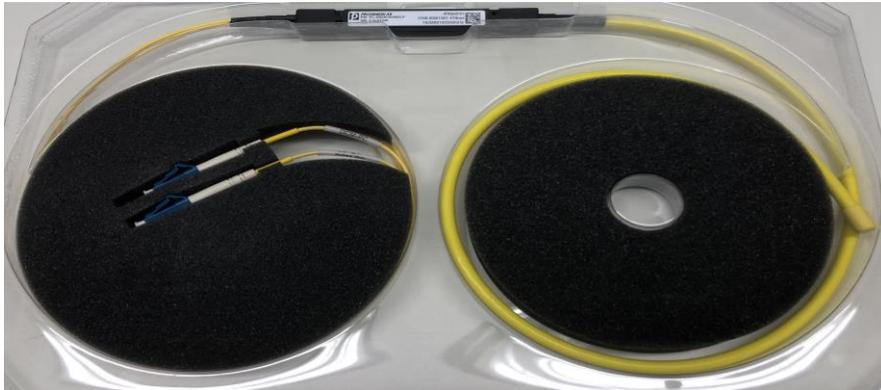


**Bild 9: Kontinuierliches Gitter (Quelle: Proximion)**

**Beispiel Parameter:**

- Kompensierbare Faserlänge: 10 km...120 km (G.652); 40 km...480 km (G.655)
- Wellenlängenbereich: C-Band
- Einfügedämpfung:  $\approx 3,7$  dB
- Abmessungen der Box: 197 mm x 212 mm x 22,5 mm

**Mehrkanal-Gitter** (DCM-ITU): Besteht aus vielen Gittern (zum Beispiel 40 oder 80), die an die jeweiligen ITU-Wellenlängen angepasst sind. Dieses Gitter ist auf einen bestimmten Kanalplan festgelegt (Bild 10).



**Bild 10: Mehrkanal-Gitter** (Quelle: Proximion)

**Beispiel Parameter:**

- Chromatische Dispersion: 640 ps/nm, 1020 ps/nm, 1360 ps/nm
- Einfügedämpfung:  $\approx 2$  dB

Die **Dämpfung** des Gitters ist deutlich geringer als die der dispersionskompensierenden Faser und annähernd unabhängig von der zu kompensierenden Länge. Die Dämpfung beim Gitter wird im Wesentlichen durch das zweimalige Durchlaufen des Zirkulators verursacht (Bild 8).

Die **Latenz** der DCF beträgt bei einer zu kompensierenden Länge von 100 km 60  $\mu$ s und ist beim Gitter (DCM) wegen des sehr kurzen Weges vernachlässigbar.

Die **Abmessungen** der Gitter sind wesentlich geringer als die der dispersionskompensierenden Faser.

Mit dem Gitter ist nicht nur eine Anpassung an die chromatische Dispersion der zu kompensierenden Faser möglich, sondern auch eine Anpassung an den Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion. So kann über einen breiten Wellenlängenbereich die chromatische Dispersion exakt kompensiert werden.

## 6 Ausblick

Die Längenbegrenzung durch chromatische Dispersion beim Standard-Singlemode-LWL ( $D_{CD} \leq 20$  ps/(nm·km) bei 1625 nm) beträgt entsprechend Gleichung (10):

- L = 923 km bei 2,5 Gbit/s
- L = 58 km bei 10 Gbit/s
- L = 3,6 km bei 40 Gbit/s
- L = 0,6 km bei 100 Gbit/s

Der Aufwand zur Kompensation der chromatischen Dispersion wächst mit wachsender Datenrate extrem an. Bei Nutzung moderner Modulationsverfahren wird der Einfluss der chromatischen Dispersion geringer (Beispiele für 100 Gbit/s):

- Herkömmliche NRZ-Modulation, extern modulierter Laser:  $|CD| \leq 11,5 \text{ ps/km}$   
(Gleichung (10.4)): Längenbegrenzung bei:  $L \leq 0,575 \text{ km}$
- DP-QPSK, 100 Gbit/s:  $|CD| \leq 140 \text{ ps/km}$ ; mit Gleichung (3) folgt:  $L \leq 7 \text{ km}$ .
- DP-QPSK, 100 Gbit/s, kohärent:  $|CD| \leq 50.000 \text{ ps/km}$  :  $L \leq 2500 \text{ km}$ .

## 7 Zusammenfassung und Ausblick Messung der chromatischen Dispersion

Die chromatische Dispersion ist die dominierende Dispersionsart im Singlemode-LWL. Sie ist physikalisch unvermeidbar und determiniert. Es gibt keine guten oder schlechten Fasern bezüglich der chromatischen Dispersion.

Ein bestimmter Fasertyp hat bei einer bestimmten Wellenlänge einen bestimmten Koeffizient der chromatischen Dispersion, der von Hersteller zu Hersteller sich nur wenig unterscheidet (Tabelle 5).

Die Kompensation der chromatischen Dispersion kann mit Fasern oder Gittern erfolgen. Bei Übertragung von DWDM-Signalen kann die Kompensation für ein breites Wellenlängenband optimiert werden.

Für die Messung der chromatischen Dispersion gibt es komfortable Messgeräte. Zu Beginn der Messungen sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

- Typ des Polynoms zur Kurvenanpassung (Abschnitt 2)
- Streckenlänge (beim zweiseitigen Verfahren)

Die Messung der relativen Gruppenlaufzeiten  $\tau(\lambda)$  erfolgt in einer Richtung über einen breiten Wellenlängenbereich

Daraus werden alle anderen Parameter berechnet: Koeffizient der chromatischen Dispersion, Anstieg des Koeffizienten der chromatischen Dispersion (jeweils in Abhängigkeit von der Wellenlänge) sowie die Nulldispersionswellenlänge.

Das Messergebnis kann unter zweierlei Gesichtspunkten interpretiert werden:

Der Koeffizient der chromatischen Dispersion dient der Charakterisierung der **Eigenschaften der Faser**. Beispiele:

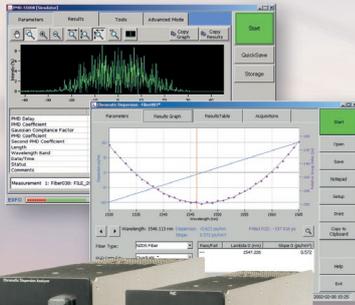
- $D_{CD}(\lambda = 1550 \text{ nm}) \approx 17 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  bei G.652-Faser
- $D_{CD}(\lambda = 1550 \text{ nm}) \approx 0 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  bei G.653-Faser

Durch Multiplikation mit der Streckenlänge erhält man die chromatische Dispersion (Gleichung (3)). Dieser Parameter dient der Charakterisierung der **Qualität der Übertragung**.

Die chromatische Dispersion darf die Dispersionstoleranz des Transceivers nicht überschreiten:  $DT(\lambda) \geq |CD(\lambda)|$ . Typische Werte für die Dispersionstoleranz sind bei herkömmlicher NRZ-Modulation:

- 10 Gbit/s-Transceiver:  $DT = 800 \text{ ps/nm}$ ;  $1600 \text{ ps/nm}$ ;  $2400 \text{ ps/nm}$ .
- 40 Gbit/s Transceiver:  $DT \approx 100 \text{ ps/nm}$ .

# Störungen in Highspeed (Langstrecken-) Netzen erkennen und beseitigen



## CD- & PMD-Analysatoren FTB-5800 / FTB-5500

Das FTB-5800 Modul bietet hohe Leistung bei allen CD- Testanforderungen. Es arbeitet mit der präzisen Phasenverschiebungsmethode zur Messung der chromatischen Dispersion (CD) in DWDM-, Weitverkehrsnetzen.

Das FTB-5500B Modul ist zusammen mit einem geeigneten Grundgerät der einzige PMD-Tester, der auch durch EDFAs (Erbium doped Fiber Amplifier) hindurch PMD messen kann. Dieses Modul zeichnet sich durch höchste Genauigkeit aus.



## Orstauflösender PMD-Analysator FTB-5600

PMD ist eine große Hürde bei Übertragungen mit hohen Datenraten. Die bestehenden LWL-Netze sind oft gewachsene Strukturen. Das führt zu einem Mix von hohen und niedrigen PMD-Raten auf einer Übertragungsstrecke. Daher ist es notwendig, zu lokalisieren wo genau kritische PMD auftritt.



## Einseitige CD- & PMD-Analyse mit dem FTB-5700

Kombiniertes CD-/PMD-Analysatormodul für einseitige Messungen geeignet! Das kompakte Modul FTB-5700 (SEDA) ermöglicht Ihnen einseitige Messungen und kombiniert CD- und PMD-Tests in nur einem Modul auf der kompakten FTB-2 Plattform - eine preiswerte und sehr portable Lösung!

## Spektrumanalysatoren FTBx-5245 und FTBx-5255

Leistungsstarke optische Spektrumanalysatoren für modernste Netze, universell einsetzbar für JEDE Form von WDM-Systemen bis 400G. Einzigartig mit einer portablen Lösung Pol-Mux Systeme IN-SERVICE zu analysieren mit einem Kanalabstand bis zu 12,5 GHz und In-Band OSNR-Messung.



## Ihr Lösungsanbieter für optische Spleiss- & Messtechnik

**Dr. Dieter Eberlein, Lichtwellenleiter-Technik**  
**D-01219 Dresden, Barlachstraße 11**  
**Tel.: +49-351-3129945, Fax: +49-351-3129947**  
**E-Mail: [LWLTechnik@t-online.de](mailto:LWLTechnik@t-online.de), Internet: [www.LWLTechnik.de](http://www.LWLTechnik.de)**  
**Dresden 21. April 2020**