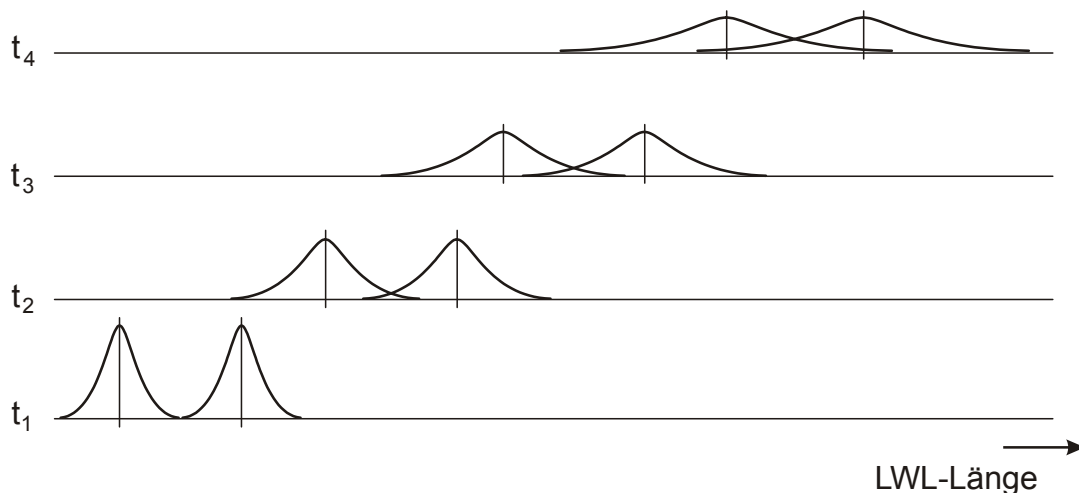


1 Grundlagen der Dispersion

Unter Dispersion versteht man alle Effekte, die zu einer Verbreiterung und Abflachung der Impulse während der Ausbreitung entlang des Lichtwellenleiters führen. Das kann dazu führen, dass sich benachbarte Impulse zunehmend überlappen. Der Empfänger kann die einzelnen Impulse nicht mehr trennen. Es kommt zu Übertragungsfehlern.

Bild 1.1 zeigt die Impulse zu vier verschiedenen Zeitpunkten t_1 , t_2 , t_3 und t_4 . Der Impuls läuft von links nach rechts und wird flacher und breiter. Die Überlappung ist besonders groß bei geringen Abständen zwischen den Impulsen, das heißt bei großen Datenraten bzw. Bandbreiten.

Bild 1.1: Impulsverbreiterung infolge Dispersion



Das betrifft Anwendungen im Multimodebereich, wo 10 Gbit/s, 40 Gbit/s bzw. 100 Gbit/s über mehrere hundert Meter Lichtwellenleiter übertragen werden. Über Singlemode-LWL müssen Datenraten von 40 Gbit/s bzw. 100 Gbit/s über Dutzende Kilometer ausbreitungsfähig sein.

Verschiedene Dispersionseffekte können eine Impulsverbreiterung verursachen:

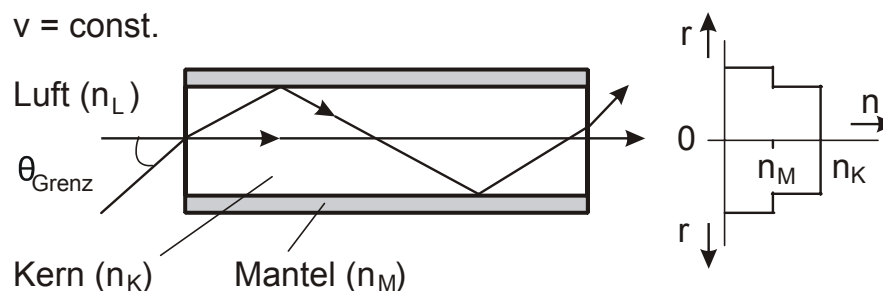
- **Modendispersion** im Multimode-Stufenprofil-LWL (Abschnitt 1.1.1).
- **Profildispersion** im Multimode-Parabelprofil-LWL (Abschnitt 1.1.2).
- **Materialdispersion** in allen LWL-Typen (Abschnitt 1.2). Sie ist im Multimode-LWL meist vernachlässigbar (außer bei großen Datenraten).
- **Wellenleiterdispersion** im Singlemode-LWL (Abschnitt 1.3.1).
- **Chromatische Dispersion** im Singlemode-LWL (Abschnitt 1.3.2): Summe aus Materialdispersion und Wellenleiterdispersion.
- **Polarisationsmodendispersion** im Singlemode-LWL bei sehr hohen Datenraten (Abschnitt 1.3.3).

1.1 Dispersion im Multimode-Lichtwellenleiter

1.1.1 Modendispersion im Stufenprofil-Lichtwellenleiter

Im Stufenprofil-LWL breiten sich sehr viele Strahlen (einige hundert) auf unterschiedlichen Wegen durch den Lichtwellenleiter aus (Bild 1.2 links). Jeder mögliche Ausbreitungsweg wird als Mode bezeichnet. Die Brechzahl n über dem Kernquerschnitt ist konstant. Sie fällt erst an der Kern-Mantel-Grenze abrupt auf einen kleineren Wert ab (Bild 1.2 rechts). Das bedeutet, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller Moden im Kern gleich groß ist.

Bild 1.2: Strahlausbreitung im Stufenprofil-LWL und Brechzahlprofil



Der Axialstrahl verläuft entlang der optischen Achse, legt den kürzesten Weg zurück und hat damit die geringste Laufzeit. Strahlen mit einem bestimmten Neigungswinkel gegen die optische Achse werden an der Kern-Mantel-Grenze reflektiert und müssen infolge der Zick-Zack-Ausbreitung einen wesentlich längeren Weg zurücklegen. Sie benötigen dafür eine längere Zeit.

Jede Mode transportiert einen bestimmten Anteil der eingekoppelten Leistung durch die Faser. Die Leistungsanteile treffen zu unterschiedlichen Zeiten am Empfänger ein. Dieser registriert einen zeitlich verbreiterten Impuls (Bild 1.1).

Die **Modendispersion** ist der gravierendste Dispersionseffekt im Lichtwellenleiter. Sie ist eine Eigenschaft der Faser und wird im Datenblatt durch den Parameter Bandbreite-Längen-Produkt BLP charakterisiert. Näherungsweise gilt:

$$\text{BLP} = B \cdot L \quad (1.1)$$

Bandbreite und Streckenlänge verhalten sich annähernd umgekehrt proportional zueinander. Wird der eine Parameter vergrößert, verkleinert sich der andere.

Beispiele: BLP = 30 MHz-km: Es kann eine Bandbreite von $B = 30$ MHz über eine Streckenlänge $L = 1$ km oder eine Bandbreite von $B = 3$ MHz über eine Streckenlänge von $L = 10$ km übertragen werden.

1.1.2 Profildispersion im Parabelprofil-Lichtwellenleiter

Die Laufzeitunterschiede zwischen den einzelnen Moden werden reduziert, indem man deren Geschwindigkeiten beeinflusst. Die Moden, die einen längeren Weg haben, müssen sich schneller ausbreiten als die Moden mit einem kürzeren Weg, damit alle Moden gleichzeitig am Faserende eintreffen.

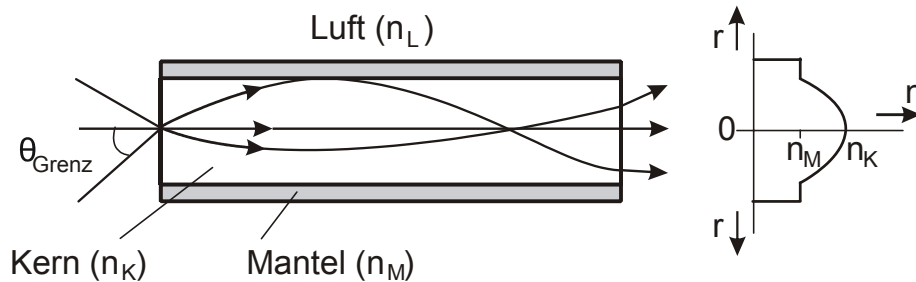
Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v in einem Medium mit der Brechzahl n gilt:

$$v = \frac{c}{n} \quad (1.2)$$

Dabei ist $c \approx 300.000 \text{ km/s}$ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum eine Naturkonstante und unveränderlich. Für die Brechzahl des Glases gilt $n \approx 1,5$. Daraus ergibt sich für die Lichtgeschwindigkeit im Glas $v \approx 200.000 \text{ km/s}$.

Aus Gleichung (1.2) ist ersichtlich, dass man die Ausbreitungsgeschwindigkeit beeinflussen kann, indem man die Brechzahl verändert. Im Gradientenprofil-LWL wird die Brechzahl mit wachsendem Radius reduziert. An der Kern-Mantel-Grenze ist die Kernbrechzahl bis auf den Wert der Mantelbrechzahl abgefallen (Bild 1.3 rechts).

Bild 1.3: Strahlausbreitung im Parabelprofil-LWL und Brechzahlprofil



Ein Lichtwellenleiter mit veränderlicher Brechzahl über dem Kernquerschnitt wird als **Gradientenprofil-LWL** bezeichnet. Praktische Bedeutung hat der **Parabelprofil-LWL** erlangt. Das ist ein Lichtwellenleiter mit annähernd parabelförmigem Brechzahlprofil im Bereich des Kernes. Mit diesem Profil gelingt es, die Laufzeitunterschiede zwischen den Moden zu minimieren.

Je weiter sich das Licht von der optischen Achse entfernt, umso geringer wird die Brechzahl und die Ausbreitungsgeschwindigkeit vergrößert sich. Das bedeutet, dass die Strahlen, die einen längeren Weg zurücklegen müssen, eine größere Ausbreitungsgeschwindigkeit haben und damit einen möglichen Laufzeitunterschied zur Grundmode wieder wettmachen.

Technologisch bedingt gibt es immer Abweichungen vom idealen Brechzahlprofil. Außerdem hängt das ideale Profil von der Wellenlänge ab. Da die Übertragungswellenlängen streuen und die Sender eine endliche spektrale Halbwertsbreite haben, ist die Wellenlänge nie ideal an das Profil angepasst.

Die verbleibende Dispersion ist die **Profildispersion**. Diese ist deutlich geringer als die Modendispersion im Stufenprofil-LWL. Auch die Profildispersion wird im Datenblatt durch den Parameter Bandbreite-Längen-Produkt beschrieben.

Beispiele: Typische Werte: $BLP = 400 \text{ MHz}\cdot\text{km}$ (herkömmliche Parabelprofil-LWL), $BLP = 4700 \text{ MHz}\cdot\text{km}$ (Parabelprofil-LWL mit optimiertem Brechzahlprofil: OM4-Faser).

1.2 Materialdispersion

Die Materialdispersion ist ein Effekt, der in jedem Glas auftritt. Deshalb wirkt Materialdispersion sowohl im Multimode-LWL als auch im Singlemode-LWL.

Die Impulsverbreiterung ergibt sich aus der Abhängigkeit der Brechzahl des LWL-Kernes von der Wellenlänge:

$$n = n(\lambda) \tag{1.3}$$

Entsprechend Gleichung (1.2) wird dadurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit wellenlängenabhängig:

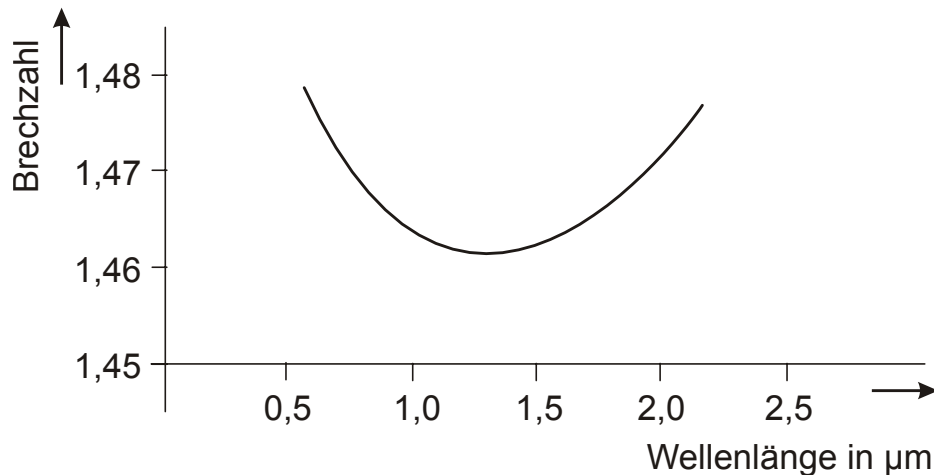
$$v(\lambda) = \frac{c}{n(\lambda)} \quad (1.4)$$

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 Halbwertsbreite von 30 nm bis 100 nm, eine gewinngeführte Laserdiode hat ein Linienspektrum mit einer Halbwertsbreite von wenigen Nanometern und ein unmodulierter DFB-Laser hat eine typische Halbwertsbreite von 10^{-4} nm.

Die einzelnen Wellenlängenanteile haben unterschiedliche Geschwindigkeiten im Lichtwellenleiter und treffen zu verschiedenen Zeiten am Empfänger ein. Es entstehen Laufzeitunterschiede und damit eine Impulsverbreiterung.

Bild 1.4: Abhängigkeit der Brechzahl des LWL-Kernes von der Wellenlänge



Im Minimum des Kurvenverlaufes hat die Brechzahl die geringste Abhängigkeit von der Wellenlänge und bewirkt damit die kleinste Dispersion. Außerhalb des Minimums wächst die Materialdispersion an.

Den Brechzahlverlauf und damit die Materialdispersion kann man durch Veränderung der Dotierung des Quarzglaskernes mit Fremdatomen nur wenig beeinflussen. Physikalisch bedingt liegt das Minimum im Bereich des zweiten optischen Fensters.

1.3 Dispersion im Singlemode-Lichtwellenleiter

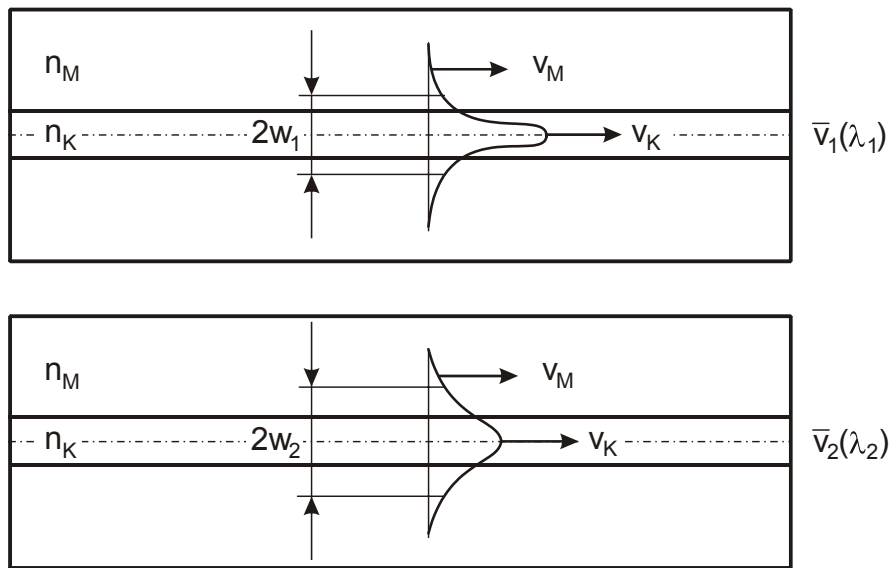
1.3.1 Wellenleiterdispersion

Die Wellenleiterdispersion ist eine typische Eigenschaft des Singlemode-LWL. Sie ist im Multimode-LWL vernachlässigbar.

Wellenleiterdispersion entsteht, weil die Grundmode im Singlemode-LWL eine annähernd gaußförmige Gestalt hat und bis in den Mantel hineinreicht.

Dadurch breitet sich ein Teil des Lichtes auch durch den LWL-Mantel aus. Je größer die Wellenlänge ist, umso breiter wird das Modenfeld (Bild 1.5).

Bild 1.5: Ausbreitung der Grundmode im Singlemode-LWL bei unterschiedlichen Wellenlängen ($\lambda_1 < \lambda_2$)



Der Mantel hat eine kleinere Brechzahl als der Kern ($n_M < n_K$). Laut Gleichung (1.2) breiten sich deshalb die Leistungsanteile im Mantel schneller aus als im Kern ($v_M > v_K$).

Am Ende der Strecke ergibt sich ein Mittelwert aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Kern und Mantel ($\bar{v}(\lambda)$). Dieser hängt von der Breite des Modenfeldes und damit von der Wellenlänge ab.

Je größer die Wellenlänge, umso breiter wird das Modenfeld, umso mehr Licht wird im Mantel geführt, umso größer ist der Anteil, der sich mit höherer Geschwindigkeit fortpflanzt:

$$\bar{v}_2(\lambda_2) > \bar{v}_1(\lambda_1) \text{ wobei } \lambda_2 > \lambda_1 \quad (1.5)$$

Die Breite des Modenfeldes und damit die Wellenleiterdispersion lassen sich stark durch eine Modifikation des Brechzahlprofils beeinflussen. Das wird realisiert mit unterschiedlichen LWL-Typen (Standard-Singlemode-LWL, dispersionsverschobener LWL, Non-Zero Dispersion Shifted (NZDS)-LWL usw.)

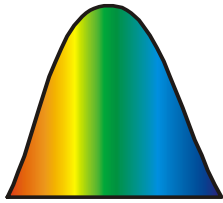
1.3.2 Chromatische Dispersion

Sowohl Materialdispersion als auch Wellenleiterdispersion verursachen eine Impulsverbreiterung durch unterschiedliche Geschwindigkeiten der verschiedenen Wellenlängenanteile. Die beiden Effekte treten nie einzeln auf.

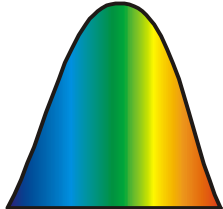
Die chromatische Dispersion ist die Summe aus Materialdispersion und Wellenleiterdispersion. Die beiden Anteile löschen sich teilweise oder ganz aus. So kann die chromatische Dispersion zu Null werden, obwohl Materialdispersion und Wellenleiterdispersion ungleich Null sind. Messbar (und damit gegebenenfalls störend) ist nur die Summe aus den beiden Anteilen, das heißt die chromatische Dispersion.

Die chromatische Dispersion (CD) äußert sich in einer Impulsverbreiterung durch die unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Wellenlängenanteile. Die einzelnen Wellenlängenanteile eines Impulses treffen zu verschiedenen Zeiten am Empfänger ein.

Bild 1.6: Impulsverbreiterung durch spektrale Aufspaltung



Hat der Lichtwellenleiter einen positiven Koeffizient der chromatischen Dispersion, laufen die größeren Wellenlängen langsamer als die kürzeren Wellenlängen. Koppelt man einen schmalen Impuls mit weißem (spektral breitbandigen) Licht in die Faser ein, wäre am Streckenende der Impulsanfang blau und das Impulsende rot.



Hat der Lichtwellenleiter einen negativen Koeffizient der chromatischen Dispersion, laufen die größeren Wellenlängen schneller als die kürzeren Wellenlängen: Bei weißem Licht wäre am Streckenende der Impulsanfang ist rot und das Impulsende blau.

Der Effekt der Aufspaltung des weißen Lichts (Sonnenlichts) in seine spektralen Anteile ist am Regenbogen oder am Prisma allgegenwärtig.

Tatsächlich kann im Lichtwellenleiter die Zerlegung des Lichts in seine Spektralanteile in der in Bild 1.6 dargestellten Form nicht beobachtet werden, da nicht mit spektral breitbandigem Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich, sondern mit spektral schmalbandigem Licht im nahen Infrarotbereich (unsichtbar!) gearbeitet wird.

Die Impulsverbreiterung hängt sowohl von den spektralen Eigenschaften des Senders (Zentralwellenlänge, Halbwertsbreite) als auch von den Eigenschaften des Lichtwellenleiters (Koeffizient der chromatischen Dispersion) ab.

1.3.3 Polarisationsmodendispersion

Die chromatische Dispersion ist die dominierende Dispersionsart im Singlemode-LWL. Sie ist physikalisch bedingt immer vorhanden.

Die Polarisationsmodendispersion ist ein sehr kleiner statistischer Effekt, der meist erst ab 10 Gbit/s und wenn die chromatische Dispersion hinreichend klein ist, eine Rolle spielen kann.

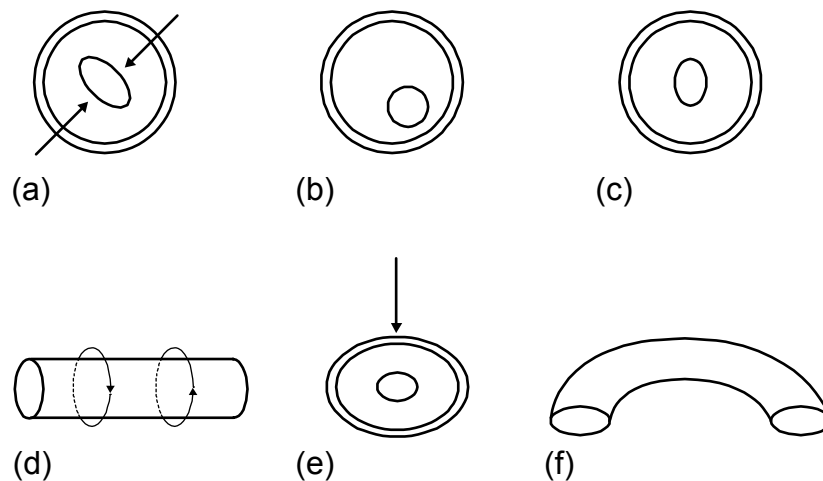
Die Grundmode des Singlemode-LWL besteht aus zwei zueinander senkrecht schwingenden Anteilen (Abschnitt 3.1). Diese beiden orthogonalen Hauptzustände der Polarisation (PSP: Principal States of Polarization) entsprechen der langsamen bzw. der schnellen Achse der Faser.

In realen Fasern verändern sich die orthogonalen Hauptzustände der Polarisation mit der Zeit. Das wird durch zufällige Änderungen der Temperatur und durch mechanische Unregelmäßigkeiten entlang der Faser bewirkt. Der Lichtwellenleiter wird doppelbrechend.

Darunter versteht man, dass sich die Brechzahlen in den beiden senkrecht zueinander schwingenden Ebenen unterscheiden. Es gilt:

- **Intrinsische Effekte** (infolge Faserherstellung): mechanische Beanspruchung des Faserkerns (Bild 1.7 (a)), Kern-Mantel-Exzentrizität (b), Abweichungen von der Rotationssymmetrie (c) sowie innere Spannungen (zum Beispiel durch Einfärben).
- **Extrinsische Effekte** (infolge Verkabelung oder Verlegung): Torsion (d), mechanische Beanspruchung der Faser (e), Biegung (f) sowie Dehnung.

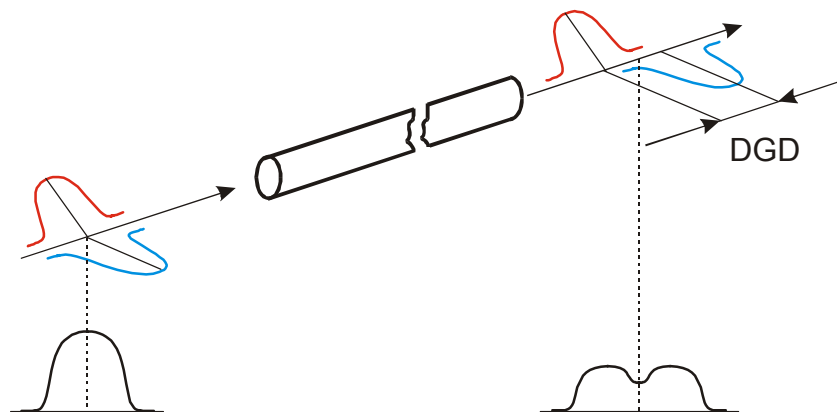
Bild 1.7: Ursachen der Polarisationsmodendispersion



Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Brechzahl abhängt, bewirken die geometrischen Unvollkommenheiten und Spannungen entlang des Lichtwellenleiters stark fluktuierende Ausbreitungsgeschwindigkeiten der beiden senkrecht zueinander schwingenden Moden.

Das heißt, es kann einmal die senkrecht schwingende Mode eine höhere Geschwindigkeit haben und einmal die waagrecht schwingende Mode. Die Änderungen der Geschwindigkeiten geschehen im Mikrosekundenbereich. Es entsteht ein Laufzeitunterschied zwischen den beiden Anteilen (Bild 1.8).

Bild 1.8: Laufzeitunterschied zwischen zwei orthogonal schwingenden Moden



Der augenblickliche Laufzeitunterschied zwischen den beiden orthogonalen Hauptzuständen der Polarisation (PSP) wird als **Differenzgruppenlaufzeit** $\Delta\tau$ bezeichnet (DGD: Differential Group Delay in ps). Diese verändert sich statistisch entsprechend einer Maxwellverteilung durch geringfügige Temperaturänderungen, Vibrationen, Spannungsänderungen und andere Effekte in Abhängigkeit von Zeit und Wellenlänge.

Die Differenzgruppenlaufzeit ist nicht direkt messbar, da alle Messverfahren eine endliche Messzeit benötigen und oft auch noch über einen bestimmten Wellenlängenbereich gemittelt wird. Das heißt, der statistische Charakter der Polarisationsmodendispersion kann durch eine Messung nicht nachvollzogen werden.

Messbar ist ein Mittelwert der Differenzgruppenlaufzeit bezüglich Zeit, Wellenlänge und Temperatur. Dieser Mittelwert wird als **PMD-Wert** (PMD-Delay: „PMD-Verzögerung“) oder einfach PMD bezeichnet und entspricht der mittleren Differenzgruppenlaufzeit bzw. dem Erwartungswert der Polarisationsmodendispersion $\langle \Delta\tau \rangle$.

PMD bezeichnet im allgemeinen Sinn den Effekt der Polarisationsmodendispersion und im speziellen Sinn den Erwartungswert der Impulsverbreiterung durch Polarisationsmodendispersion. Um Verwechslungen zu vermeiden wird im Folgenden der Erwartungswert der Polarisationsmodendispersion mit PMD-Wert bezeichnet.

Der PMD-Wert unterliegt für eine bestimmte Faser im Allgemeinen keinen großen Schwankungen.

Zur Planung benötigt man einen Parameter, der die Impulsverbreiterung in der Faser durch die Polarisationsmodendispersion charakterisiert. Das ist der **PMD-Koeffizient** erster Ordnung PMD_1 , der als Faserparameter in Datenblatt steht. Er ist folgendermaßen definiert (L: Faserlänge):

- bei **schwacher** Modenkopplung (kurze Faserstücken oder polarisationserhaltende Fasern): $\text{PMD}_1 = \frac{\langle \Delta\tau \rangle}{L}$ in ps/km (1.6)

- bei **starker** Modenkopplung (normale Telekommunikationsfasern): $\text{PMD}_1 = \frac{\langle \Delta\tau \rangle}{\sqrt{L}}$ in ps/ $\sqrt{\text{km}}$ (1.7)

Bei schwacher Modenkopplung wächst die Polarisationsmodendispersion proportional zur Streckenlänge, so wie das auch bei allen anderen Dispersionsarten geschieht. Bei starker Modenkopplung wächst die Polarisationsmodendispersion schwächer, nämlich nur proportional zur Wurzel der Länge.

Ursache hierfür sind die zufälligen Modenkopplungen und die Rotation der Achsen der Doppelbrechung entlang der Faser. Die zufälligen Modenkopplungen machen den Einfluss der Polarisationsmodendispersion kleiner.

1.4 Zusammenfassung

Dispersion beschreibt alle Effekte, die zu einer Impulsverbreiterung während der Ausbreitung des Impulses entlang des Lichtwellenleiters führen. Benachbarte Impulse können sich überlappen und Übertragungsfehler passieren.

Im Multimode-LWL wirken die Modendispersion bzw. die Profildispersion. Die Materialdispersion ist sowohl im Multimode- als auch im Singlemode-LWL vorhanden. Im Multimode-LWL ist sie meist gegenüber der sehr viel größeren Moden- bzw. Profildispersion vernachlässigbar. Die chromatische Dispersion und die Polarisationsmodendispersion verursachen Impulsverbreiterungen im Singlemode-LWL.

Die Dispersion im Singlemode-LWL ist wesentlich geringer als im Multimode-LWL. Deshalb kommen zur Übertragung großer Datenraten über große Streckenlängen generell Singlemode-LWL zum Einsatz.

Die Dispersionseffekte wachsen mit der Datenrate und der Streckenlänge. Der Einfluss der Dispersion bei 40 Gbit/s- bzw. 100 Gbit/s ist selbst im Singlemode-LWL gravierend. Die Dispersion muss gemessen und geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um sie zu reduzieren.