

Inhaltsverzeichnis:

Thema	Unterpunkt	Seite
Grundlagen	Besondere Merkmale von LWL	2-2
	Wellen-Teilchen-Dualismus	2-2
	Arten von Lichtstrahlung	2-2
	Wellenlängen des Lichtes	2-2
	Aufbau und Arten von LWL	2-3
	Brechungsindex eines Mediums	2-3
Brechung und Reflexion	Diagramme	2-4
	Berechnungen	2-4
	Brechungsindizes	2-4
	Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium	2-4
	Gruppenbrechzahl	2-5
	Gruppenlaufzeit	2-5
	spezifische Gruppenlaufzeit	2-5
Dispersion	Definition	2-5
	Materialdispersion	2-6
	spezifische Materialdispersion	2-6
	Lichtbandbreite	2-6
	Akzeptanzwinkel	2-7
	Numerische Apertur	2-7
	Moden-Definition	2-7
	Modendispersion	2-8
	spezifische Modendispersion	2-8
	Impulsdispersion (auch Gesamtdispersion)	2-8
	spezifische Impulsdispersion	2-8
Übertragungsrate	Definition	2-9
	Maximale Übertragungsrate	2-9
	BL-Produkt (auch spezifische Übertragungsrate)	2-9
Ausbreitungsfähige Moden	Strukturparameter	2-10
	Anzahl der Moden	2-10
Betriebswellenlängen	Kurzwelliger Bereich	2-10
	Bereich minimaler Materialdispersion	2-10
	Bereich minimaler Dämpfung	2-10
Dämpfung einer Faser	Berechnung	2-10
Überblick	Merkmale konventioneller LWL-Fasern	2-11

Besondere Merkmale von Lichtwellenleitern (LWL) als Übertragungsmedium:

- kein Nebensprechen
- hohe Übertragungskapazität
- geringe Dämpfung ($< 1 \frac{dB}{km}$ vgl.: Koax: $10-50 \frac{dB}{km}$)

Wellen-Teilchen-Dualismus:

Einige Merkmale der Ausbreitung des Lichtes lassen sich nur mit dem Teilchenmodell erklären wie z.B. die Brechung.

Andere Merkmale der Lichtausbreitung lassen sich nur mit dem Wellenmodell erklären, wie z.B. die Beugung des Lichtes.

Licht besitzt also Teilchen- und Wellennatur.

Arten von Lichtstrahlung:

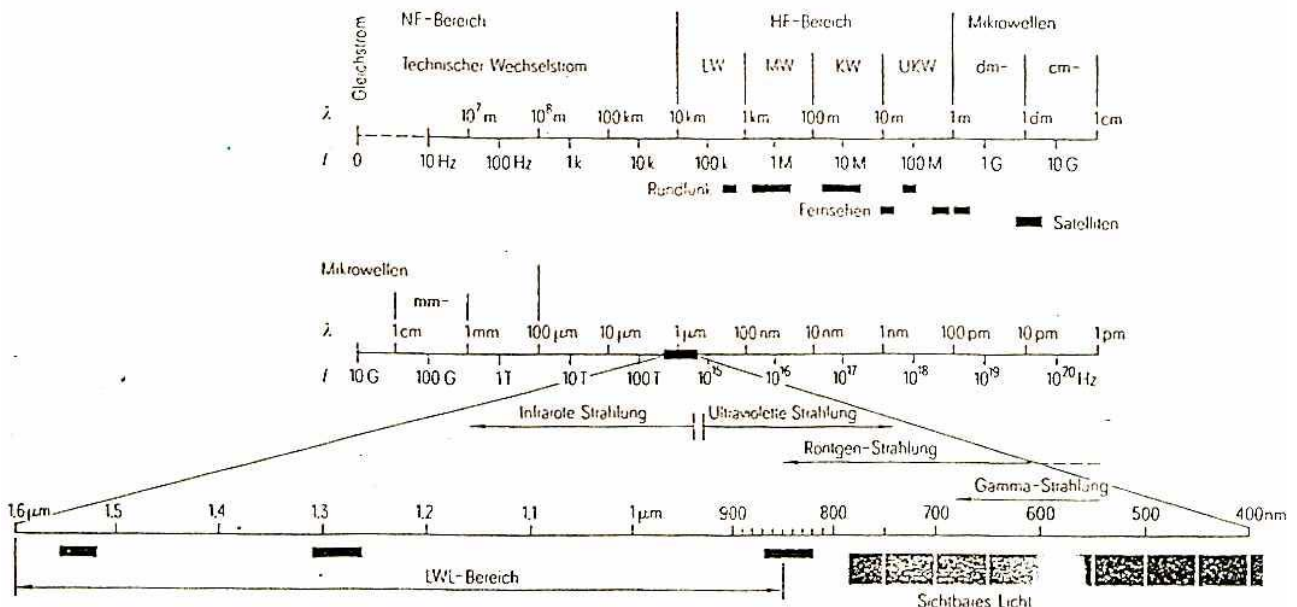
inkohärentes Licht:

Kontinuierliche Lichtstrahlung mit ständig wechselnder Phasenlage und konstanter Frequenz. **Meist ungeeignet für LWL-Übertragung**

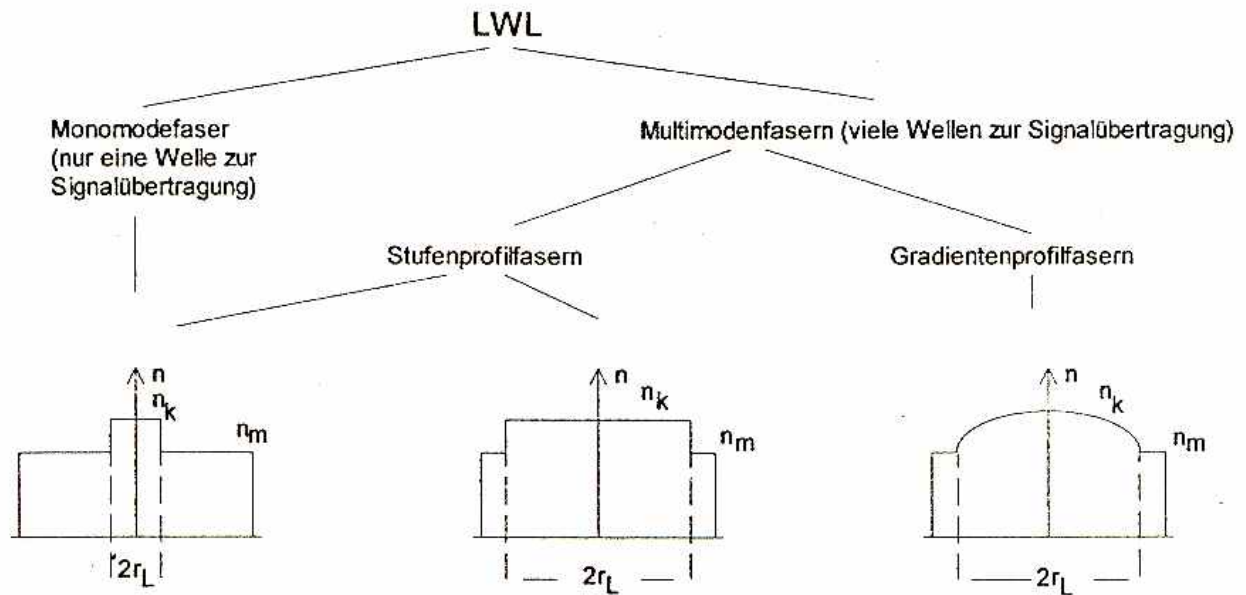
kohärentes Licht:

Kontinuierliche Lichtstrahlung mit konstanter Phasenlage und Frequenz. **Geeignet für LWL-Übertragung.**

Bevorzugte Wellenlängen für LWL-Übertragungen:



Aufbau und Arten von LWL's:



Stufenprofil-Fasern:

Die Brechzahl im Kernbereich (n_k) ist konstant
 Die Brechzahl im Mantelbereich (n_m) ist konstant

Gradientenprofil-Fasern:

Die Brechzahl im Kernbereich (n_k) nimmt zum äußeren Rand etwa quadratisch ab.
 Die Brechzahl im Mantelbereich (n_m) ist konstant.

$2 \cdot r_L$ = Durchmesser der Kernbereiches in m (meist in $\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ angegeben)

Es gilt generell:

$n_k > n_m$ (Totalreflexion des eingekoppelten Lichtes am Mantelglas)

Typische Kern- und Manteldurchmesser:

Monomode-Faser: Kern / Mantel = 10 / 125 μm

Multimode-Stufenprofil-Faser (Stufenindex-Faser) : Kern / Mantel = 200 / 380 μm

Multimode-Gradientenprofil-Faser (Gradienten-Faser): Kern / Mantel = 50 / 125 μm

Brechungsindex eines Mediums:

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1}$$

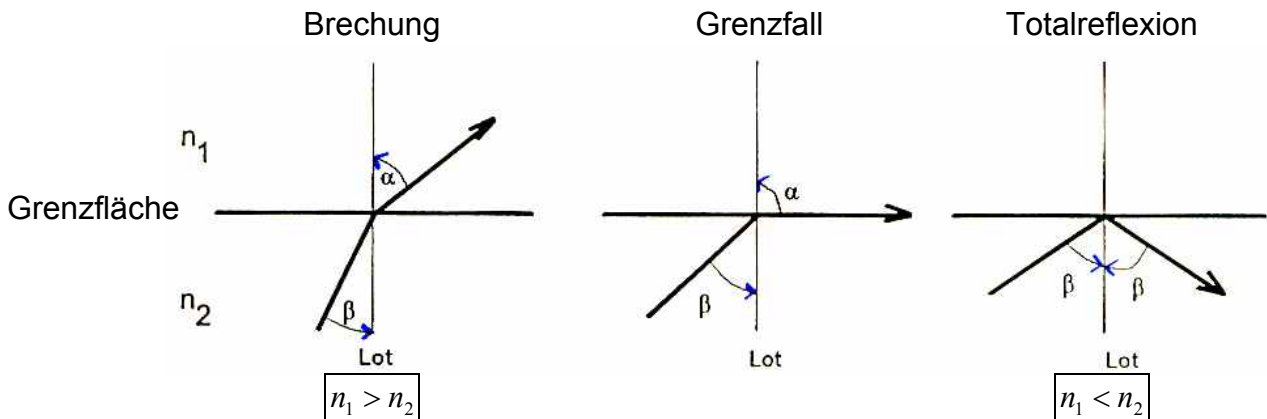
$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}$$

c_0 = Geschwindigkeit des Lichtes (Lichtgeschwindigkeit) im Vakuum = $2,99793 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

c_1 = Geschwindigkeit des Lichtes im Medium in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

n_1 = Brechungsindex des Medium (ohne Einheit !!)

Zusammenhang Einfallswinkel – Ausfallwinkel (Brechung oder Reflexion):



Wichtig !!!! Die Winkel werden immer zum Lot hin angegeben !!!!

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$n_1 = \frac{n_2 \cdot \sin \beta}{\sin \alpha}$$

$$n_2 = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$\beta_{Grenz} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$$

bei $n_2 > n_1 \Rightarrow$

$$\sin \beta_{Grenz} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_2 = \frac{n_1}{\sin \beta_{Grenz}}$$

$$n_1 = n_2 \cdot \sin \beta_{Grenz}$$

Bei $\beta > \beta_{Grenz}$ gilt: $\alpha = \beta$

Bei $\beta = \beta_{Grenz}$ gilt: $\alpha = 90^\circ$

d.h. der Strahl verläuft in der Grenzschicht zwischen Medium 1 und Medium 2

n_1 = Brechungsindex von Medium 1 (ohne Einheit !!)

n_2 = Brechungsindex von Medium 2 (ohne Einheit !!)

α = Brechungswinkel in $^\circ$ (auch Ausfallswinkel)

β = Einfallswinkel in $^\circ$

β_{Grenz} = Grenzwinkel in $^\circ$

Brechungsindizes einiger Materialien:

Luft: $n = 1$

Wasser: $n=1,333$

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht:

$$c_0 = \lambda \cdot f$$

$$f = \frac{c_0}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

$$c_0 = n_1 \cdot c_1$$

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{c_0}{c_1}$$

$$\lambda \cdot f = n_1 \cdot c_1$$

$$\lambda = \frac{n_1 \cdot c_1}{f}$$

$$f = \frac{n_1 \cdot c_1}{\lambda}$$

$$n_1 = \frac{\lambda \cdot f}{c_1}$$

$$c_1 = \frac{\lambda \cdot f}{n_1}$$

c_0 = Geschwindigkeit des Lichtes (Lichtgeschwindigkeit) im Vakuum = $2,99793 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$

λ = Wellenlänge des Lichtes in m (meist in nm = $10^{-9}m$ angegeben)

f = Frequenz des Lichtes in Hz

c_1 = Geschwindigkeit des Lichtes im Medium in $\frac{m}{s}$

n_1 = Brechungsindex des Medium (ohne Einheit !!)

Gruppenbrechzahl (Gruppenindex):

$$n_g = n_1 - \left(\lambda \cdot \frac{dn_1}{d\lambda} \right)$$

$$n_1 = n_g + \left(\lambda \cdot \frac{dn_1}{d\lambda} \right)$$

n_g = Gruppenbrechzahl (**Für Quarzglas bei $\lambda = 1300\text{nm}$ minimal !!**) (ohne Einheit !!)

n_1 = Brechungsindex des Mediums (ohne Einheit !!)

λ = Wellenlänge des Lichtes in m (meist in nm = 10^{-9}m angegeben)

$\frac{dn_1}{d\lambda}$ = Brechungsindex n_1 nach λ abgeleitet

Gruppenlaufzeit:

$$t_g = \frac{n_g \cdot l}{c}$$

$$c = \frac{n_g \cdot l}{t_g}$$

$$n_g = \frac{c \cdot t_g}{l}$$

$$l = \frac{c \cdot t_g}{n_g}$$

t_g = Gruppenlaufzeit in s

n_g = Gruppenbrechzahl, -index des Mediums (ohne Einheit !!)

c = Geschwindigkeit des Lichtes im Medium in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

l = zurückgelegter Weg in m

Spezifische Gruppenlaufzeit:

$$t_g^* = \frac{t_g}{l} \Rightarrow t_g^* = \frac{n_g}{c}$$

t_g = Gruppenlaufzeit in s

n_g = Gruppenbrechzahl, -index des Mediums (ohne Einheit !!)

c = Geschwindigkeit des Lichtes im Medium in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

l = zurückgelegter Weg in m

t_g^* = spezifische Gruppenlaufzeit in $\frac{\text{s}}{\text{m}}$

Materialdispersion (Gruppenlaufzeitunterschied):

Im Spektrum des eingespeisten Lichtimpulses befinden sich Lichtstrahlen mit verschiedenen Wellenlängen. Dies führt wiederum zu unterschiedlichen Laufzeiten und damit zur Impulsverbreiterung. Dies wird als Materialdispersion bezeichnet. Sie tritt bei allen Fasern auf, da sie vom Material des Kernglases abhängig ist.

Bei nicht zu großen Wellenlängenänderungen gilt näherungsweise:

$$\Delta t_{MA} \approx \left(\frac{dt_g}{d\lambda} \right) \cdot \Delta\lambda$$

Sonst gilt:

$$k(\lambda) = \frac{dt_g^*}{d\lambda}$$

$$\Delta t_{MA} = k(\lambda) \cdot l \cdot \Delta\lambda$$

Δt_{MA} = Materialdispersion (= Gruppenlaufzeitunterschied) in s

$\Delta\lambda$ = Wellenlängenänderung in m (Bandbreite des Lichtes)

$\frac{dt_g}{d\lambda}$ = Gruppenlaufzeit t_g abgeleitet nach Wellenlänge λ

l = Länge der Faser

$k(\lambda)$ = Materialdispersions-Koeffizient. Einheit: $[k(\lambda)] = \frac{ns}{km \cdot nm}$

Bei $\lambda = 1270 \text{ nm} \Rightarrow k(\lambda) = 0 \Rightarrow$ Keine Materialdispersion !!

Lichtbandbreiten:

Laserdiode(LD-Diode): $\Delta\lambda \approx 1 \text{ nm}$

LED: $\Delta\lambda \approx 30 \text{ nm}$

DFB (Distributed Feedback Laser): $\Delta\lambda \approx 0,0001 \text{ nm}$

spezifische Materialdispersion:

$$\Delta t_{MA}^* = \frac{\Delta t_{MA}}{l}$$

$$\Delta t_{MA}^* = k(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

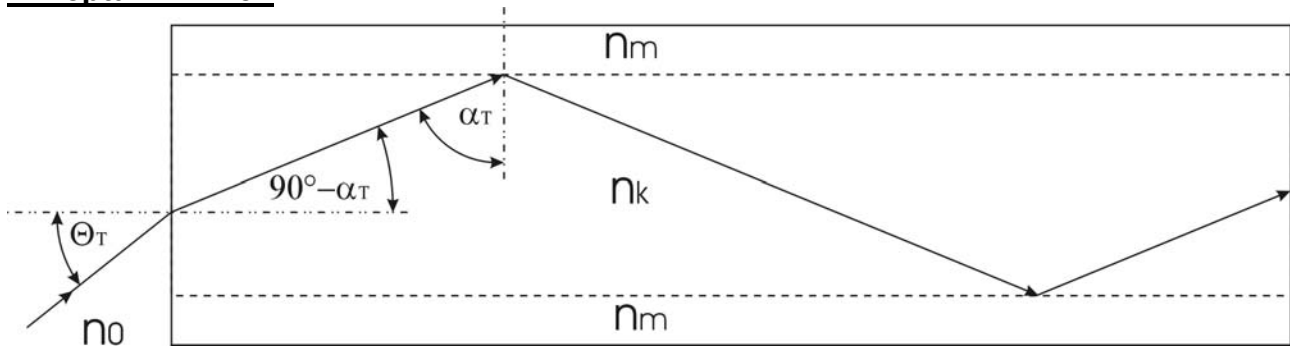
Δt_{MA}^* = spezifische Materialdispersion in $\frac{s}{m}$

Hinweis: $\frac{s}{m} = 10^3 \cdot \frac{s}{km}$

l = Länge der Faser in m

$k(\lambda)$ = Materialdispersions-Koeffizient. Einheit: $[k(\lambda)] = \frac{ns}{km \cdot nm}$

$\Delta\lambda$ = Wellenlängenänderung in m (Bandbreite des Lichtes)

Akzeptanzwinkel:

$$\sin \alpha_T = \frac{n_m}{n_k}$$

$$\alpha_T = \arcsin\left(\frac{n_m}{n_k}\right)$$

$$n_k = \frac{n_m}{\sin \alpha_T}$$

$$n_m = n_k \cdot \sin \alpha_T$$

Der Akzeptanzwinkel Θ_T ist der maximale Winkel, bei dem noch Totalreflexion herrscht.

Θ_T = Akzeptanzwinkel in $^\circ$

α_T = Reflexionswinkel in $^\circ$

n_m = Brechzahl des Mantelglas

n_k = Brechzahl des Kernglas

n_0 = Brechzahl des äußeren Mediums

Numerisch Apertur:

$$n_0 \cdot \sin \Theta_T = \sqrt{n_k^2 - n_m^2}$$

$$N.A. = n_0 \cdot \sin \Theta_T$$

$$N.A. = \sqrt{n_k^2 - n_m^2}$$

$$n_k = \sqrt{(n_0 \cdot \sin \Theta_T)^2 + n_m^2}$$

$$n_k = \sqrt{N.A.^2 + n_m^2}$$

$$n_m = \sqrt{n_k^2 - (n_0 \cdot \sin \Theta_T)^2}$$

$$n_m = \sqrt{n_k^2 - N.A.^2}$$

Θ_T = Akzeptanzwinkel in $^\circ$

N.A. = Numerische Apertur

n_m = Brechzahl des Mantelglas (Mantelmedium)

n_k = Brechzahl des Kernglas (Kernmedium)

n_0 = Brechzahl des äußeren Mediums

Je größer N.A. desto besser kann ein Lichtimpuls in die Faser eingekoppelt werden.

Moden:

Die Ausbreitungswege von Lichtstrahlen in einer LWL-Faser bezeichnet man als Moden.

Die Anzahl der Moden, die sich in einer LWL-Faser ausbreiten können ist vom Typ der LWL-Faser abhängig.

Der kürzeste Ausbreitungsweg in einer LWL-Faser wird als **Grundmode** bezeichnet.

Die anderen Moden bezeichnet man als **höhere Moden**.

Modendispersion:

Der, in eine LWL-Faser eingekoppelte, Lichtimpuls besteht aus mehreren ausbreitungsfähigen Lichtstrahlen, die in leicht unterschiedlichen Winkeln in die Faser eingekoppelt werden. Dadurch entsteht ein Laufzeitunterschied am Ende der Faser. Dies führt zu einer Impulsverbreiterung am Faserende. Dies nennt man Modendispersion.

Bei Multimode-Stufenindex-Fasern tritt dieser Effekt sehr stark auf !!

Bei Gradientenindex-Fasern ist dieser Effekt sehr klein. (Immer gleicher Brechungswinkel)

Bei Monomode-Fasern tritt der Effekt nicht auf. (Nur eine Mode!)

$$t_G = \frac{n_g}{c} \cdot \frac{l}{\cos \gamma}$$

$$t_{G \min} = \frac{n_g}{c} \cdot l$$

$$t_{G \max} = \frac{n_g}{c} \cdot \frac{l}{\cos(\gamma_{\max})} = \frac{n_g}{c} \cdot \frac{l}{\cos(90^\circ - \alpha_T)}$$

$$\Delta t_{MO} = t_{G \max} - t_{G \min}$$

$$\Delta = \frac{n_k - n_m}{n_k}$$

$$\Delta t_{MO} \approx \frac{n_g}{c} \cdot \Delta \cdot l$$

$$\Delta t_{MO} \approx \frac{n_g}{c} \cdot \frac{n_k - n_m}{n_k} \cdot l$$

t_G = Gruppenlaufzeit in s

$t_{G \min}$ = Minimale Gruppenlaufzeit in s (Grundmode=Axialstrahl)

$t_{G \max}$ = Maximale Gruppenlaufzeit in s

n_g = Gruppenbrechzahl des Mediums (Kernglas, Kernmedium)

c = Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Medium

l = Länge des Leiters in m

γ = Brechungswinkel im Medium in °

$\gamma_{\max} = 90^\circ - \alpha_T$ = Maximaler Brechungswinkel im Medium in °

α_T = Akzeptanzwinkel in °

Δt_{MO} = Modendispersion (auch: Gruppenlaufzeitdifferenz) in s

n_m = Brechzahl des Mantelglas (Mantelmedium)

n_k = Brechzahl des Kernglas (Kernmedium)

Δ = relative Brechzahldifferenz

Spezifische Modendispersion:

$$\Delta t_{MO}^* = \frac{\Delta t_{MO}}{l}$$

$$\Delta t_{MO}^* = \frac{n_g}{c} \cdot \Delta$$

$$\Delta = \frac{n_k - n_m}{n_k}$$

$$\Delta t_{MO}^* = \frac{n_g}{c} \cdot \frac{n_k - n_m}{n_k}$$

Δt_{MO}^* = spezifische Modendispersion in $\frac{s}{m}$

Hinweis: $\frac{s}{m} = 10^3 \cdot \frac{s}{km}$

Spezifische Impulsdispersion:

$$\Delta t_S = \Delta t_{MO} + \Delta t_{MA} + \Delta t_{WE} + \Delta t_{PR}$$

$$\Delta t_S^* = \frac{\Delta t_S}{l}$$

Δt_S = Impulsdispersion in s

Δt_{MO} = Modendispersion in s

Δt_{MA} = Materialdispersion in s

Δt_{WE} = Wellenleiterdispersion in s

(Impulsverbreiterung durch Laufzeitunterschiede des Lichtes in Kern und Mantel)

Δt_{PR} = Profildispersion in s (Bei Stufenindex-Fasern vernachlässigbar)

Δt_S^* = spezifische Impulsdispersion in $\frac{s}{m}$

Hinweis: $\frac{s}{m} = 10^3 \cdot \frac{s}{km}$

Maximale Übertragungsrate (max. übertragbare Bitrate):

Bei Einspeisung eines Rechtecksignals in eine LWL-Faser kann es ab einer bestimmten Länge der Faser dazu kommen, dass Impuls und Impulspause nicht mehr unterschieden werden können. Dadurch wird die maximale Frequenz, also die Bandbreite, die auf der Faser übertragen werden kann, begrenzt.

Wenn idealerweise gilt:

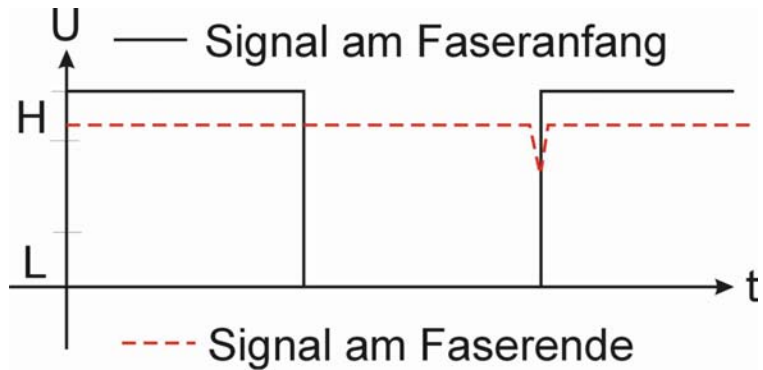
Impuls = Impulspause

⇒ maximale Dispersion $\Delta t_{\max} = \frac{T}{2}$

$$B = f = \frac{1}{T}$$

$$B = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}$$

$$B_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t_{\max}}$$



B_{\max} = Maximale Übertragungsrate. Einheit: $[B_{\max}] = \frac{\text{bit}}{\text{s}}$

f_{\max} = maximale Frequenz des Signals in $\frac{1}{\text{s}}$

T = Periodendauer in s

Δt_{\max} = maximale gesamte Dispersion (Laufzeitverzögerung) in s

In der Praxis wird B_{\max} oftmals um den Faktor 1,5 oder 2 kleiner gewählt.

BL-Produkt (spezifische Übertragungsrate):

$$BL = B \cdot l$$

⇒

$$BL = \frac{l}{2 \cdot \Delta t}$$

⇒

$$BL = \frac{1}{2 \cdot \frac{\Delta t}{l}}$$

⇒

$$BL = \frac{1}{2 \cdot \Delta t_s^*}$$

BL = spezifische Übertragungsrate. Einheit: $[BL] = \frac{\text{bit} \cdot \text{m}}{\text{s}}$

l = Länge der Faser in m

Δt = gesamte Dispersion (Laufzeitverzögerung) in s

Δt^* = spezifische Dispersion in s

Richtwerte:

Multimode-Stufenindex-Faser: $\approx 10 \frac{\text{MBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$

Multimode-Gradientenindex-Faser: $\approx 1 \frac{\text{GBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$

Monomode-Faser: $\approx 100 \frac{\text{GBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$

Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden:

Die Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden in einer Stufenindex- oder Gradientenfaser ist von den technischen Daten der Faser abhängig. Die Anzahl der Moden lässt sich wie folgt berechnen:

Strukturparameter:

$$V = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot r_k \cdot [N.A.(r=0)]$$

V = Strukturparameter

λ = Wellenlänge des Lichtes in m

r_k = Radius des Kernmediums in m

N.A.(r=0) = Numerische Apertur der Grundmode

Anzahl der ausbreitungsfähigen Moden:

$$N = \frac{\alpha}{2 \cdot (\alpha + 2)} \cdot V^2$$

N = Anzahl der Moden

α = Potenzparameter (Teilweise auch g)

V = Strukturparameter

Bei Gradientenfaser: $\alpha \approx 2$

$$\Rightarrow N_{\text{Gradienten}} = \frac{1}{4} \cdot V^2$$

Bei Stufenindexfaser: $\alpha \approx \infty$

$$\Rightarrow N_{\text{Stufenindex}} = \frac{1}{2} \cdot V^2$$

Ab einem Wert von $V_c \geq 2,405$ ist nur noch eine Mode ausbreitungsfähig.

\Rightarrow **Monomode-Betrieb.** ($r_k \approx 8\mu\text{m}$)

Betriebswellenlängen:**Kurzweiliger Arbeitsbereich: $\lambda \approx 850 \text{ nm}$**

Hier ist die Dispersion und Dämpfung groß. Es stehen aber preisgünstige Sende- und Empfangsanlagen zur Verfügung. Wird für Kurzstrecken-Übertragungen verwendet.

Bereich minimaler Materialdispersion: $\lambda \approx 1270 \text{ nm}$

Wird für Langstrecken-Übertragungen bevorzugt.

Bereich minimaler Dämpfung: $\lambda \approx 1550 \text{ nm}$

Wird für Langstrecken-Übertragungen bevorzugt.

Dämpfung einer LWL-Faser:

$$P_x = P_0 \cdot 10^{-\frac{\alpha \cdot x}{10 \text{ dB}}}$$

$$\alpha \cdot x = -10 \cdot \ln\left(\frac{P_x}{P_0}\right)$$

P_x = Optische Leistung an der Stelle x der Faser

P_0 = Optische Bezugsleistung (= 1mW)

α = Dämpfungsbelag der LWL-Faser in $\frac{\text{dB}}{\text{km}}$

x = Entfernung vom Anfang der Faser in km

Bezugsleistung ist 1mW \Rightarrow absolute Pegel !!

Merkmale konventioneller LWL-Fasern:

	Stufenindex-Faser	Gradientenindex-Faser	Monomode-Faser
Durchmesser Kern / Mantel in μm	200 / 380	50 / 125	10 / 125
Akzeptanzwinkel Θ_T	z.B. 18°	z.B. 11°	z.B. 5°
Impulsdispersion	groß wegen großer Modendispersion	klein wegen geringer Modendispersion	sehr klein wegen fehlender Modendispersion
BL-Produkt	klein $\approx 10 \frac{\text{MBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$	groß $\approx 1 \frac{\text{GBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$	sehr groß $\approx 100 \frac{\text{GBit} \cdot \text{km}}{\text{s}}$
Strahlungsquelle	LED	Mittelstrecken: LED Langstrecken: LD	LD
Einsatzgebiet	kurze Strecken < 1 km	mittlere und lange Strecken 1 5 km	lange Strecken > 5 km