LED – optische Eigenschaften

(Definition von interner, externer, Extraktions- und Leistungseffizienz)

Interne Quantum Effizienz

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\#\,der\ Photonen\,emittiert\,von\,Fläche\ pro\,Sekunde}{\#\,der\ Elektronen\,injiziert\,in\,die\,LED\ pro\,Sekunde} = \frac{P_{\text{int}}/\hbar\omega}{I/e}$$

Extraktionseffizienz

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\#\,der\ Photonen\,emittiert\,in\,den\ freien\,Raum\ pro\,Sekunde}{\#\,der\ Photonen\,emittiert\,von\,Fläche\ pro\,Sekunde} = \frac{P/\hbar\omega}{P_{\text{int}}/\hbar\omega}$$

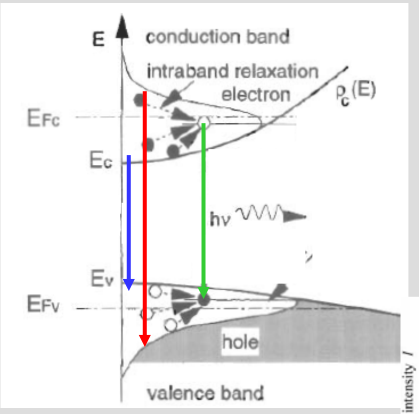
Externe Quantum Effizienz

$$\eta_{ext} = \frac{\#\,der\ Photonen\,emittiert\,in\,den\ freien\,Raum\ pro\,Sekunde}{\#\,der\ Elektronen\,injiziert\,in\,die\,LED\ pro\,Sekunde} = \frac{P/\hbar\omega}{I/e} = \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{Extraktion}$$

Leistungseffizienz

$$\eta_{\text{int}} = \frac{optische\,Leistung}{elektrische\,Leistung} = \frac{P}{I \cdot V}$$

Theoretisches Emissionsspektrum einer LED



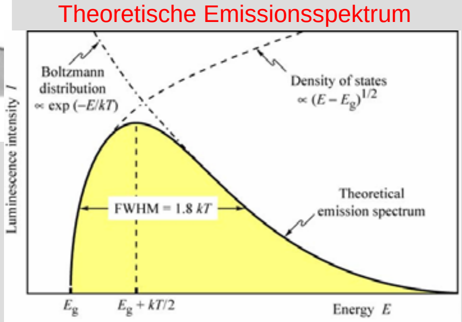
Zusammenhang zw.Photonenenergie und Elektronen- bzw. Löcherenergien:

$$\boxed{\hbar\omega - E_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2} \cdot \left[\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right] = \frac{\hbar^2 k^2}{2 \cdot m_r^*}}$$

Joint density of states

$$\boxed{N_{CV}(\hbar\omega) = \sqrt{2}\,\frac{(m_r^*)^{3/2} \cdot (\hbar\omega - E_g)^{1/2}}{\pi^2 \hbar^3}}$$

Theoretische Emissionsspektrum



Energie maximaler Intensität:
$E_{max} = ½.\ k_B T$

Linienbreite einer LED

$$\Delta E = 1.8 \cdot kT \ \ oder\ \ \Delta\lambda = \frac{1.8 \cdot kT \cdot \lambda^2}{hc}$$

Verlustmechanismen

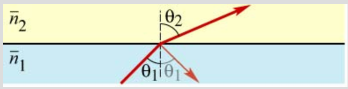
Die 3 hauptsächlichen Verlustmechanismen für emittierende Photonen sind:

a) Reabsorption des Photons und damit Erzeugung eines e-h Paars
b) Reflexion an der Halbleiter – Luft Grenzfläche
c) Totalreflexion für Photonen mit Einfallswinkel größer als der kritische Winkel

ad a) Um die Absorption zu verringern ist es notwendig, daß die Emission nahe der Oberfläche erfolgt ($\alpha \sim 10^4 - 10^5 \text{cm}^{-1}$)

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot x)$$

ad b) Photonen, die es schaffen zur Oberfläche vorzudringen, erleiden dort Reflexion.



Reflexion

Für senkrechte und parallele Polarisationsrichtung und den Einfallswinkel α und Brechungswinkel β gilt für den Reflexionskoeffizient der Intensität:

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cos\beta}{n_1 \cos\alpha + n_2 \cos\beta} \right)^2 \qquad R_p = \left(\frac{n_2 \cos\alpha - n_1 \cos\beta}{n_2 \cos\alpha + n_1 \cos\beta} \right)^2$$

Für α=0 (also senkrechter Einfallswinkel) gilt für beide Polarisationen:

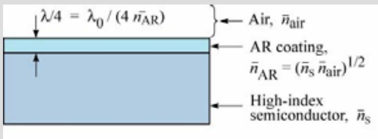
$$R(\alpha = 0) = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Die Fresnelverluste aufgrund der Reflexion können ganz beachtlich sein:
z.B. für GaAs: mit n_{GaAs}= 3.66 und n_{Luft}=1 wird für senkrechten Einfall R=0.33, d.h. 33% der Photonen werden reflektiert und kommen nicht heraus.

$\longrightarrow$ Einfügen von Zwischenschichten als Antireflektionsschicht

Antireflexionsschicht - Epoxieeinkapselung

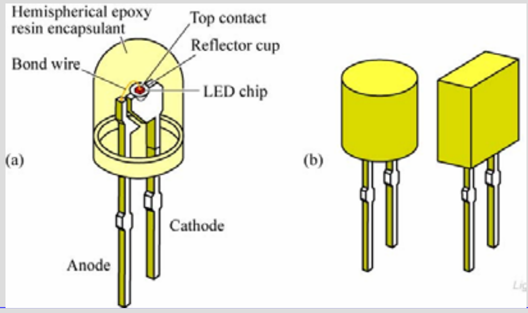
Für senkrechten Einfall unter zu Hilfenahme der Wellennatur des Lichts kann durch Einfügen einer Zwischenschicht bei folgenden Bedingungen für die Wellenlänge λ Antireflexion erreicht werden:



Schichtdicke: $$\boxed{\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda_0}{4 \cdot n_{AR}}}$$

Brechungsindex: $$\boxed{n_{AR} = \sqrt{n_s \cdot n_{Luft}}}$$

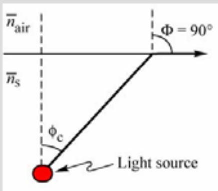
Vollständige Einkapselung des Bauelements in Epoxieharz



$$n_{LED} > n_{Epox} > n_{Luft}$$

Totalreflexion

ad c) Schließlich haben wir noch Verluste aufgund der Totalreflexion.



Fällt Licht auf eine Oberfläche aus einem Bereich eines hohen Brechungsindex (n_2>n_1) (d.h. aus optisch dichterem Medium) so wird es total reflektiert wenn der Einfallswinkel größer als ein kritischer Winkel Θ_c ist.

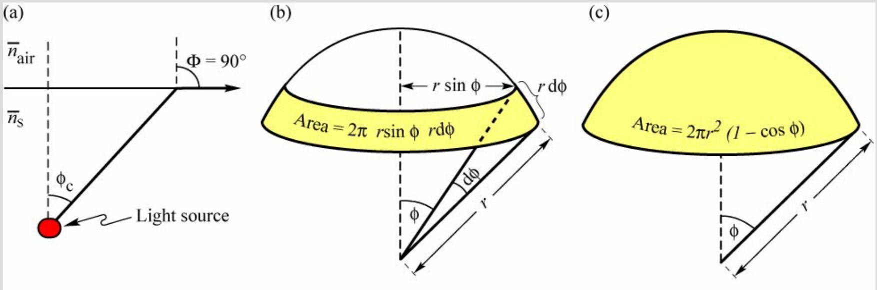
$$\boxed{\Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right)}$$

Für GaAs-Luft Oberfläche ist der kritische Winkel damit Θ_c=15.9°

Auch dieser Effekt kann durch Einkapselung wieder stark unterdrückt werden.

Lichtaustrittskegel 7

Definition des Austrittskegels durch den kritischen Winkel Θ_c



Da der Brechungsindex der Halbleiter sehr hoch ist, kann für Q_s folgende Näherung gemacht werden:

$$\Theta_c = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right) \approx \frac{n_{Luft}}{n_S}$$

Als nächstes berechnen wir die Oberfläche des sphärischen Kegels, die durch folgendes Integral gegeben ist

$$A = \int dA = \int_0^{\Theta_c} 2\pi r \sin\theta r d\theta = 2\pi r^2 \left(1 - \cos\Theta_c\right)$$

Lichtaustrittsleistung 8

Für das Licht einer punktförmigen Quelle mit einer gesamten Leistng P_{source} ist dann die austretende Leistung P_{escape}

$$\boxed{P_{escape} = P_{source} \cdot \frac{2\pi r^2 \left(1 - \cos\Theta_c\right)}{4\pi r^2}}$$

Damit wird klar, dass nur ein Bruchteil des Lichts das innerhalb einer Halbeiters emittiert wird, aus dem Halbleiter austreten kann, nämlich

$$\boxed{\frac{P_{escape}}{P_{source}} = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\Theta_c\right) \approx \frac{1}{2}\left[1 - \left(1 - \frac{\Theta_c^2}{2}\right)\right] = \frac{1}{4}\Theta_c^2 = \frac{1}{4}\cdot\frac{n_{Luft}^2}{n_S^2}}$$

Das Austrittsproblem ist für hocheffiziente LED sehr wichtig.

	n_S	Θ_c	escaped Light
GaAs	3.4	17.1°	2.21%
GaN	2.5	23.6°	4.18%
Polymer	1.5	41.8°	12.7%

Das Problem ist weniger signifikant für Halbleiter mit kleinen Brechungsindexes. Bei GaAs kann durch Polymereinkapselung eine Verbesserung von ca. 232 % erreicht werden

Abstrahlcharakteristik - Fernfeld 9

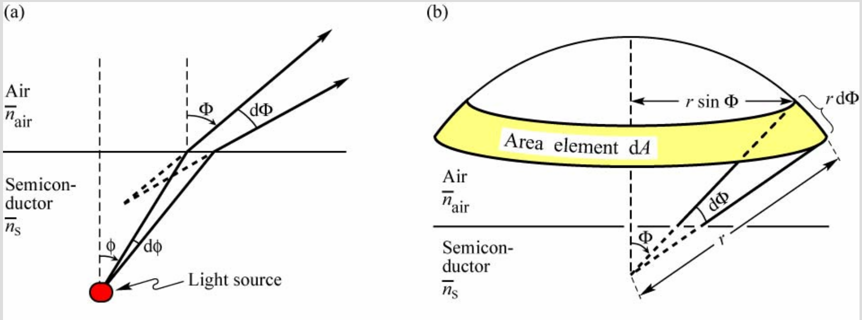
LEDs haben ein bestimmtes Abstrahl- oder Fernfeldmuster. Die Intensität in W/cm² gemessen, hängt von dem lonitudinalen und Azimuthwinkel und von der Entfernung von der LED ab. Die gesamte emittierte optische Leistung einer LED wird durch Intgeration über die Kugelfläche erhalten.

$$P = \int_A \int_\lambda I(\lambda)\, d\lambda\, dA$$

Mit I(λ) der spektralen Lichtintensität (gemessen in W/(nm cm²)) und A der Oberfläche der Kugel.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Geometrisches Modell für Lambert´sche Emissionsmusters 10



Mit Hilfe des Snellius Gesetzes ($n_S \sin\phi \sim n_S\phi = n_{Luft}\sin\Phi$) emittiert in ein Winkelelement dΦ in Luft

$$d\Phi = \frac{n_S}{n_{Luft}} \frac{1}{\cos\Phi} d\phi$$

Erhaltung der Leistung erfordert:

$$I_S dA_S = I_{Luft} dA_{Luft}$$

Mit I_S und I_{luft} den Lichtintensitäten im Halbleiter und an Luft (gemessen in W/m²)

apl.Prof. Dr. D.J. As

Lambert´sche Emissionsmusters

Das Flächenelement in der Luft

$$dA_{Luft} = 2\pi r \sin\Phi \cdot r d\Phi = 2\pi r^2 \frac{n_S^2}{n_{Luft}^2} \frac{1}{\cos\Phi} \phi d\phi$$

Und analog dem Flächenelement im Halbleiter:

$$dA_S = 2\pi r \sin\phi \cdot r d\phi \approx 2\pi r^2 \phi d\phi$$

Die Lichtintensität im Halbleiter in einer Entfernung von r ist die Gesamtquellen-leistung geteilt durch die Oberfläche der Kugel mit dem Radius r

$$I_S = \frac{P_{Source}}{4\pi r^2}$$

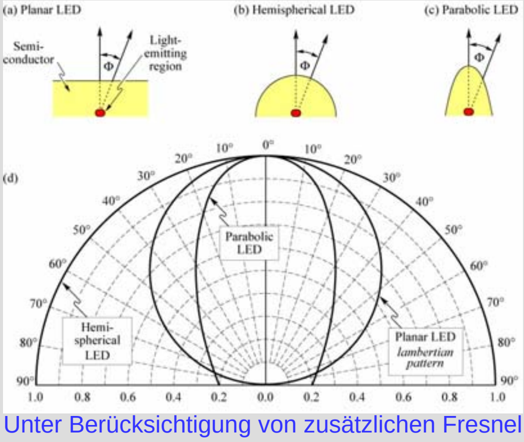
Für die Lichtintensität in Luft ergibt sich dann das Lambert´sche Emissionsmuster zu:

$$\boxed{I_{Luft} = \frac{P_{Source}}{4\pi r^2} \frac{n_{Luft}^2}{n_S^2} \cos\Phi}$$

Das Lambert´sche Emissionspattern hat eine Kosinus Φ Abhängigkeit

Einfluss der Oberflächen auf Abstrahlcharakteristik

Einige andere Oberflächenformen und ihre Abstrahlcharkteristika sind unten dargestellt. Ein isotropes Emissionsmuster erhält man für hemisphärische Form.



Die gesamte in Luft emittierte Leistung ist damit

$$P_{Luft} = \int_{\Phi=0}^{90°} I_{Luft} 2\pi r \sin\Phi r d\Phi$$

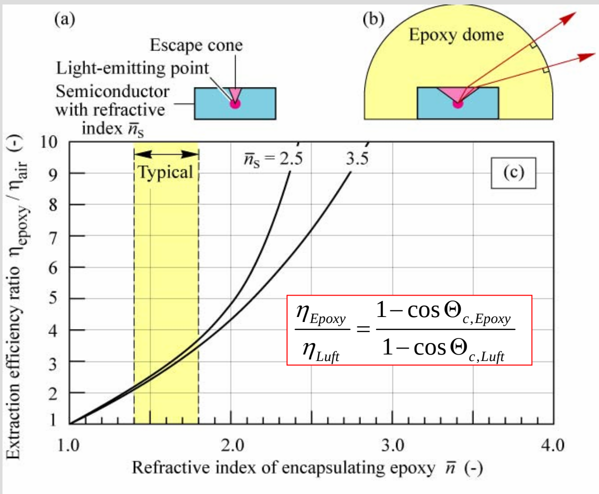
Für eine Lambert´sches Emissionsmuster und mit cosΦsinΦ=1/2sin(2Φ) kann das Integral berechnet werden und ergibt

$$\boxed{P_{Luft} = \frac{P_{source}}{4} \cdot \frac{n_{Luft}^2}{n_S^2}}$$

Unter Berücksichtigung von zusätzlichen Fresnel Reflexionen and der Grenzfläche ergibt sich für die Leistungstransmittanz

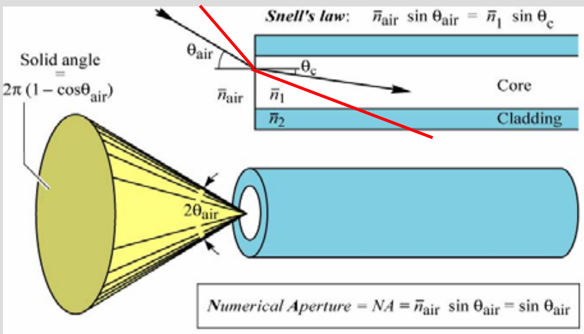
$$\boxed{T = 1 - R = 1 - \left(\frac{n_S - n_{Luft}}{n_S + n_{Luft}}\right)^2 = P_{Luft} = \frac{4 \cdot n_s n_{Luft}}{\left(n_S + n_{Luft}\right)^2}}$$

Extraktionseffizienz mit und ohne Einkapselung



Die Lichtextraktionseffizienz kann durch eine domförmige Einkapselung mit einem Material mit großem Brechungsindex erhöht werden. Typische Brechungsindizes von Epoxyharze sind zwischen 1.4 und 1.8. Fortschrittliche Einkapselungen haben auch graded-index Einkapselungen.

Lichteinkopplung in Glasfaser



wobei für $n_1 \sim n_2$ gilt, dass

$$NA = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Akzeptanzwinkel Θ_A: $\boxed{\Theta_A = \arcsin\left(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}\right) = \arcsin(NA)}$

Der Lichtakzeptanzwinkel in Luft ist 11.5° für eine numerische Apertur von NA=0.2

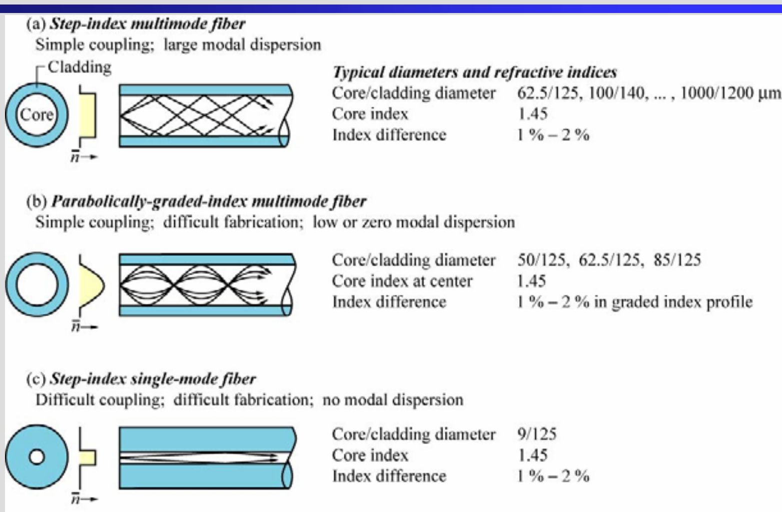
Einkoppeleffizienz η_{Faser} in Faser:

$$\boxed{\eta_{Faser} = \frac{\int_0^{\Theta_A} I_{ph}(\Theta) \cdot \sin\Theta d\Theta}{\int_0^{\pi/2} I_{ph}(\Theta) \cdot \sin\Theta d\Theta} = \sin^2\Theta_A}$$

~ 0.29

Verschiedene Glasfasern

15

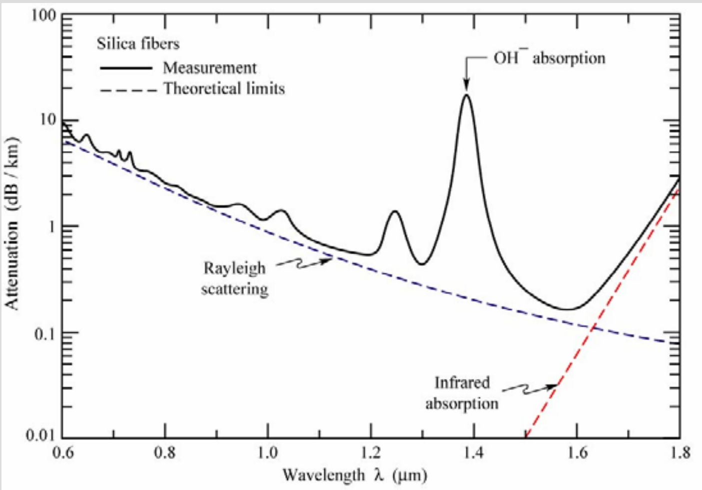


(a) Step-index multimode fibers allow for the propagation of several optical modes. (b) Parabolically graded-index multimode fibers allow for the propagation of several modes with similar propagation constant. Graded-index multimode fibers have a lower modal dispersion than step-index multimode fibers. (c) Step-index single-mode fibers have a small core diameter and no modal dispersion.

apl.Prof. Dr. D.J. As

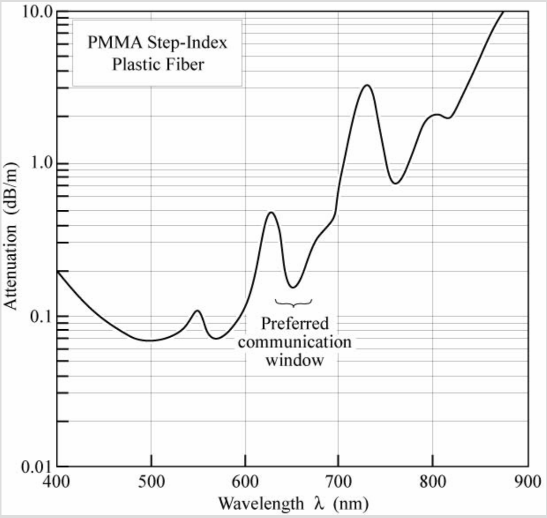
Abschwächung in einer Glasfaser

16

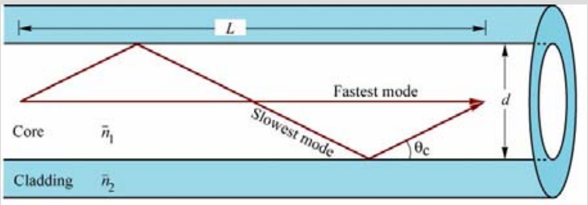


Measured attenuation in silica fibers (solid line) and theoretical limits (dashed lines) given by Rayleigh scattering in the short-wavelength region, and by molecular vibrations (infrared absorption) in the infrared spectral region.

apl.Prof. Dr. D.J. As



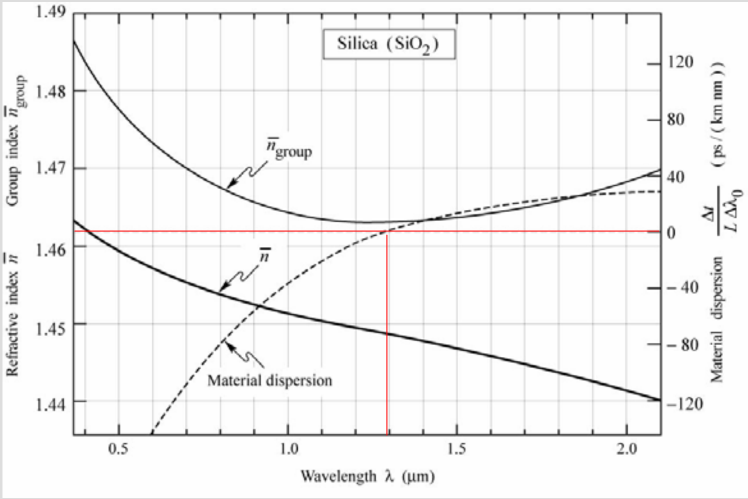
Attenuation of a PMMA step-index plastic optical fiber. At 650 nm, the preferred communication wavelength, the attenuation is about 150 dB/km (after data sheet of Toray Industries Ltd., 2002).



Geometry used for calculation of the modal dispersion in a multimode fiber waveguide.

Glasfaser- Brechungsindex, Gruppenindex und Materialdispersion

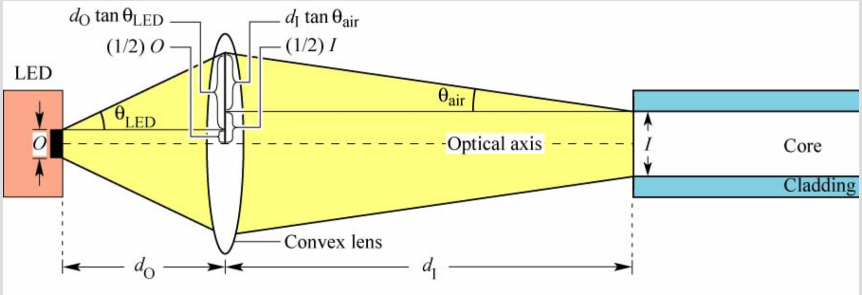
19



Refractive index, group index, and material dispersion of a silica fibers for an optical signal spectral width $\Delta\lambda_0$ in vacuum. The material dispersion of regular silica fibers is zero at $\lambda = 1.3$ µm.

Einkoppelung LED-Glasfaser

20



Schematic illustration of coupling with a lens by imaging the light-emitting region of an LED onto the core of an optical fiber. The LED has a circular emission region with diameter O (Object). The emission region is imaged onto the fiber core with diameter I (Image) using a convex lens with focal length f.