Abstrahlungseigenschaften von Halbleiterdioden

Vortragender:
Dipl.-Phys. Dr.-Ing Olaf Ziemann
Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg
Polymerfaser-Anwendungszentrum
T-Nova GmbH, Technologiezentrum

e-mail: olaf.ziemann@telekom.de
olaf.ziemann@pofac.de

Problemstellung

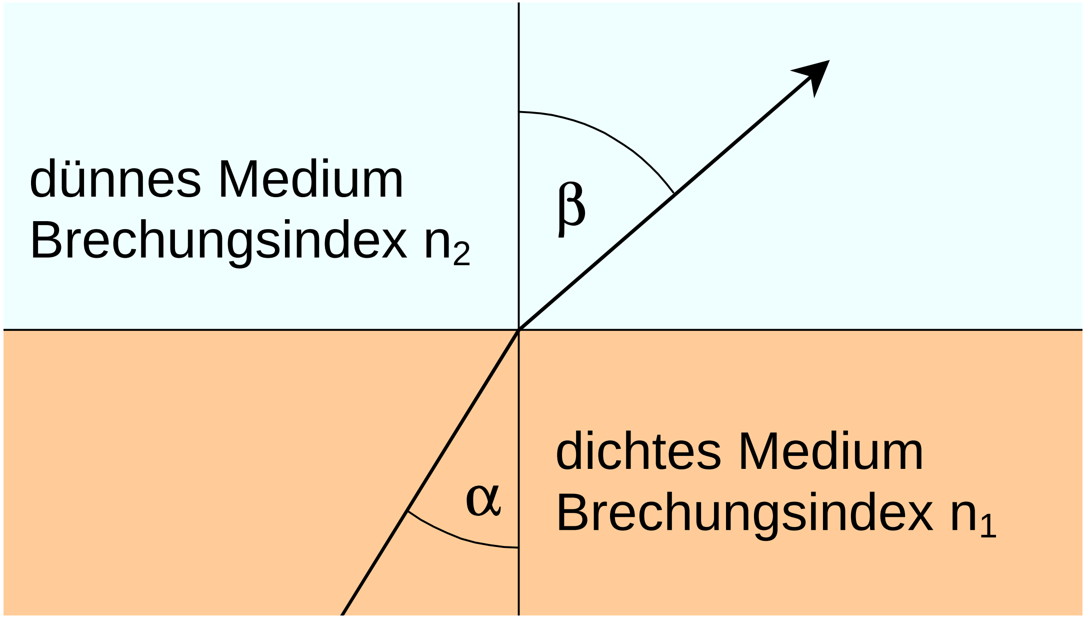
- typische Halbleiter haben hohe Brechungsindizes ($n \approx 3{,}5$)
- Das Licht wird im Material isotrop abgestrahlt
- An der Halbleiter-Luft-Grenzfläche tritt Reflexion auf

- Wie sieht dann die Abstrahlungscharakteristik insgesamt aus ?
- Wie kann der Wirkungsgrad verbessert werden ?
- Wie wirkt sich Entspiegelung der Grenzfläche aus ?
- Wozu dient der Kunststoff-Dom auf der LED ?

Beispiele für praktische Konzepte:

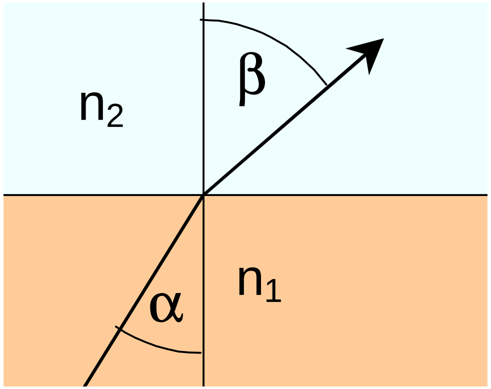
- Pyramiden-LED
- Resonant-Cavity LED
- Non-Resonant-Cavity-LED

Ausgangspunkt Brechungsgesetz



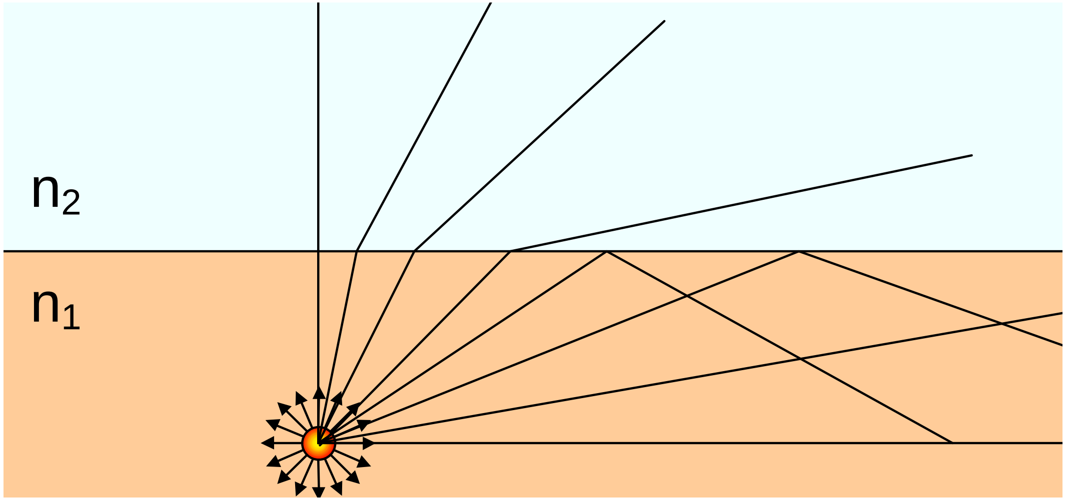
$$\frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{n_1}{n_2}$$

Totalreflexion



bei $n_2 = 1$:

$\beta = \arcsin(\sin\alpha \cdot n_1)$



Grenzwinkel der Totalreflexion:
$\beta = 90°$; $\sin\beta = 1$

$$\alpha_{max} = \arcsin(n_2/n_1)$$

$$\arcsin(1{,}0\,/\,3{,}5) = 16{,}6°$$

Reflexion an Grenzflächen

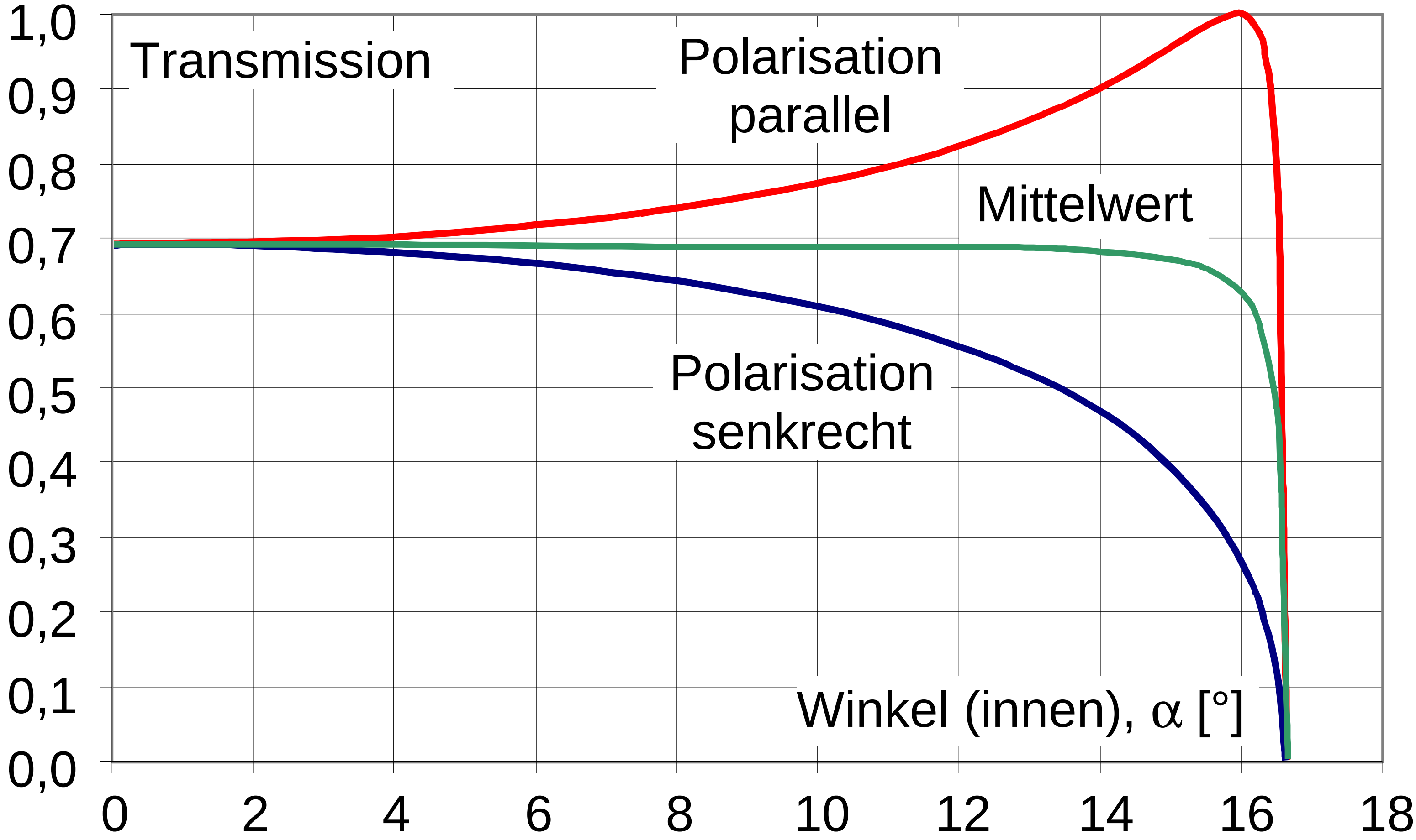
$$R_S = \left(\frac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cdot \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}}{n_1 \cos\alpha + n_2 \cdot \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}} \right)^2$$

$$R_p = \left(\frac{{n_2}^2 \cos\alpha - n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - {n_1}^2 \sin^2\alpha}}{{n_2}^2 \cos\alpha + n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - {n_1}^2 \sin^2\alpha}} \right)^2$$

Licht, welches die Grenzfläche mit einem Winkel oberhalb α_{max} trifft, wird total reflektiert. Licht mit einem kleineren Winkel wird teilweise reflektiert, abhängig von der Polarisationsrichtung.

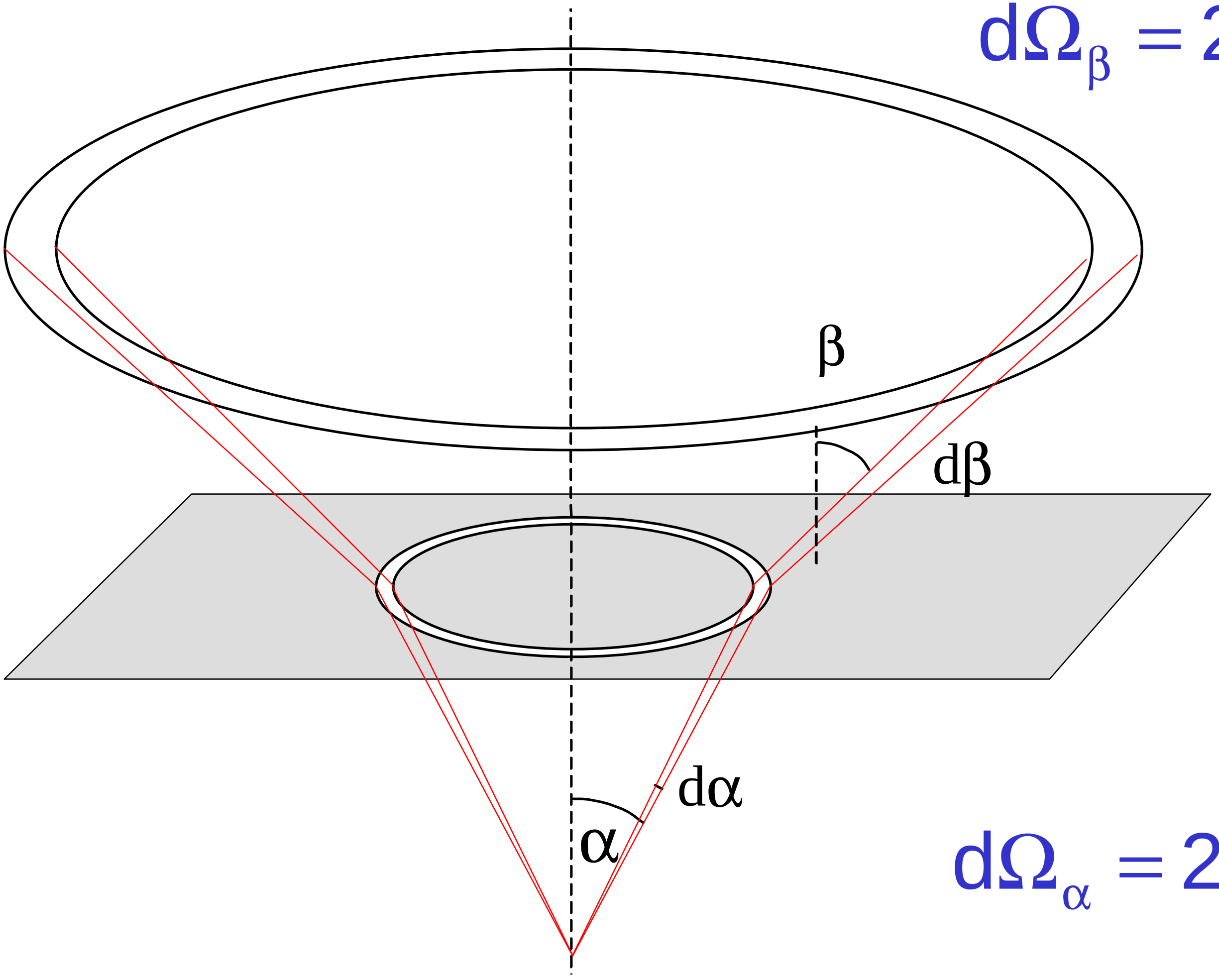
Reflexion an einer Grenzfläche

(n_1 = 3,5, n_2 = 1,0)



Transformation des Raumwinkels I

$$d\Omega_\beta = 2\pi \cdot \sin\beta \cdot d\beta$$



$$d\Omega_\alpha = 2\pi \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha$$

Transformation des Raumwinkels II

$$\beta = \arcsin\left(\sin\alpha \cdot n_1/n_2\right)$$

Raumwinkel im HL: $d\Omega_\alpha = 2 \cdot \pi \sin\alpha \cdot d\alpha$

Raumwinkel außen: $d\Omega_\beta = 2 \cdot \pi \sin\beta \cdot d\beta$

Änderung des Raumwinkels:

$$\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} = \frac{2 \cdot \pi \sin\beta \cdot d\beta}{2 \cdot \pi \sin\alpha \cdot d\alpha} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} \cdot \frac{d\beta}{d\alpha} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{d}{d\alpha}\left(\arcsin\left(\sin\alpha \cdot \frac{n_1}{n_2}\right)\right)$$

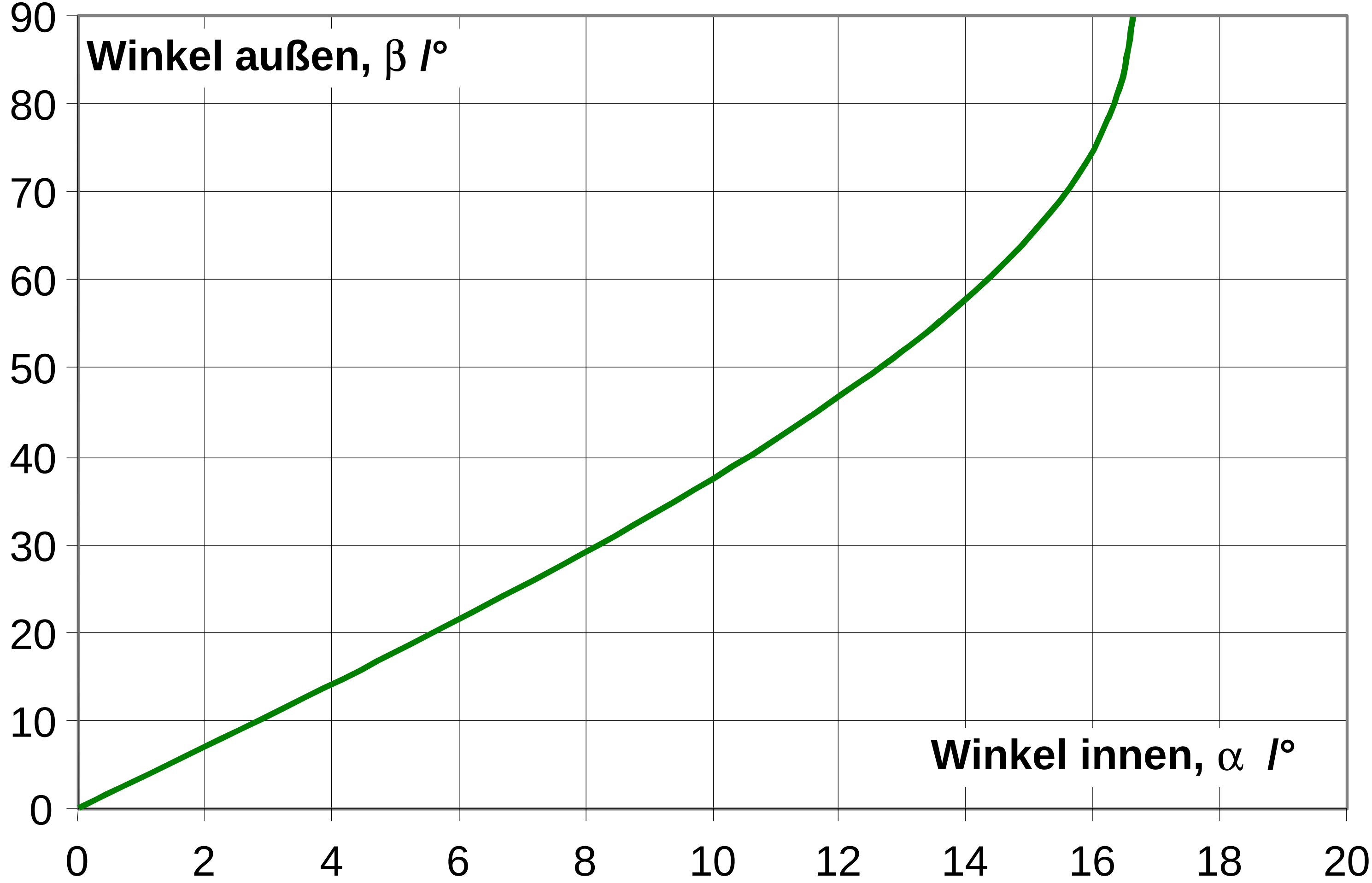
$$\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(\sin\alpha \cdot n_1/n_2)^2}} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \cos\alpha$$

$$\frac{d}{dz}\arcsin z = \frac{1}{\sqrt{1-z^2}}$$

$$\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \cdot \frac{\cos\alpha}{\sqrt{1-(\sin\alpha \cdot n_1/n_2)^2}}$$

$$\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} = \frac{n_1^2 \cdot \cos\alpha}{\sqrt{1-(\sin\alpha \cdot n_1)^2}}$$

Transformation des Winkels



Exakte Formel für die Abstrahlung

$$R_S = \left(\frac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cdot \sqrt{1-(n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}}{n_1 \cos\alpha + n_2 \sqrt{1-(n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}} \right)^2$$

$$\frac{d\Omega_\alpha}{d\Omega_\beta} = \frac{\cos\beta}{n_1^2 \cdot \sqrt{1-(\sin\beta / n_1)^2}}$$

$$R_p = \left(\frac{{n_2}^2 \cos\alpha - n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - {n_1}^2 \sin^2\alpha}}{{n_2}^2 \cos\alpha + n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - {n_1}^2 \sin^2\alpha}} \right)^2$$

$$\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} = \frac{n_1^2 \cdot \cos\alpha}{\sqrt{1-(\sin\alpha \cdot n_1)^2}}$$

$$I_{e1}(\beta) = I_{e0} \cdot \left(1 - \frac{R_P + R_S}{2} \right) \Bigg/ \left(\frac{d\Omega_\beta}{d\Omega_\alpha} \right)$$

Vereinfachte Herleitung

$$R_S = \left(\frac{n_1 \cos\alpha - n_2 \cdot \sqrt{1-(n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}}{n_1 \cos\alpha + n_2 \sqrt{1-(n_1/n_2)^2 \sin^2\alpha}} \right)^2$$

$$R_p = \left(\frac{n_2^{\,2} \cos\alpha - n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^{\,2} \sin^2\alpha}}{n_2^{\,2} \cos\alpha + n_1 \cdot \sqrt{n_2^2 - n_1^{\,2} \sin^2\alpha}} \right)^2$$

für $\alpha = 0$ und $n_2 = 1$ gilt:

$$R_p = \left(\frac{1-n_1}{1+n_1} \right)^2$$

$$R_S = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2$$

Transmission für senkrechten Durchgang:

$$T = 1 - R = 1 - \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2$$

Raumwinkel:

$\sin\alpha / \sin\beta = 1/n$

$n \cdot \sin\alpha = \sin\beta$

$d(n \cdot \sin\alpha) = d(\sin\beta)$

$n \cos\alpha \, d\alpha = \cos\beta \, d\beta$

$$\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{\cos\beta}{n \cdot \sqrt{1 - (\sin\beta / n)^2}}$$

$$\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}$$

mit $\cos\alpha \approx 1$:

$$\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{\cos\beta}{n}$$

Ergebnis der Näherung

$$T = 1 - R = 1 - \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2$$

$$\frac{d\alpha}{d\beta} = \frac{\cos\beta}{n}$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{1}{n}$$

Emission von einer Punktquelle: J_0 = const.

Abstrahlung von der Oberfläche: $J(\beta)$

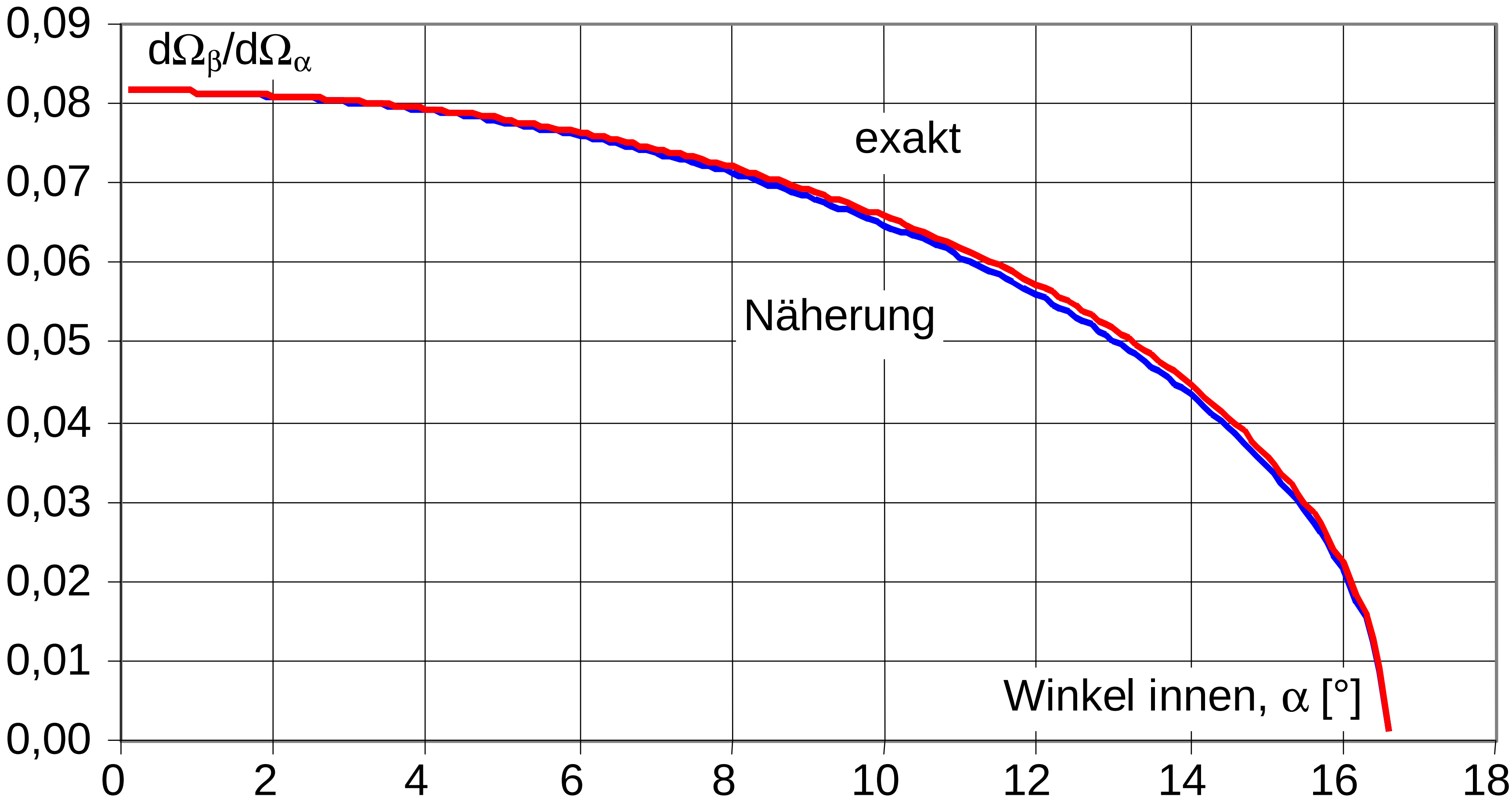
$$I_{e1}(\beta)\, d\Omega_\beta = T \cdot I_{e0}\, d\Omega_\alpha$$

$$I_{e1}(\beta) \cdot 2\pi \cdot \sin\beta \cdot d\beta = T \cdot I_{e0} \cdot 2\pi \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha$$

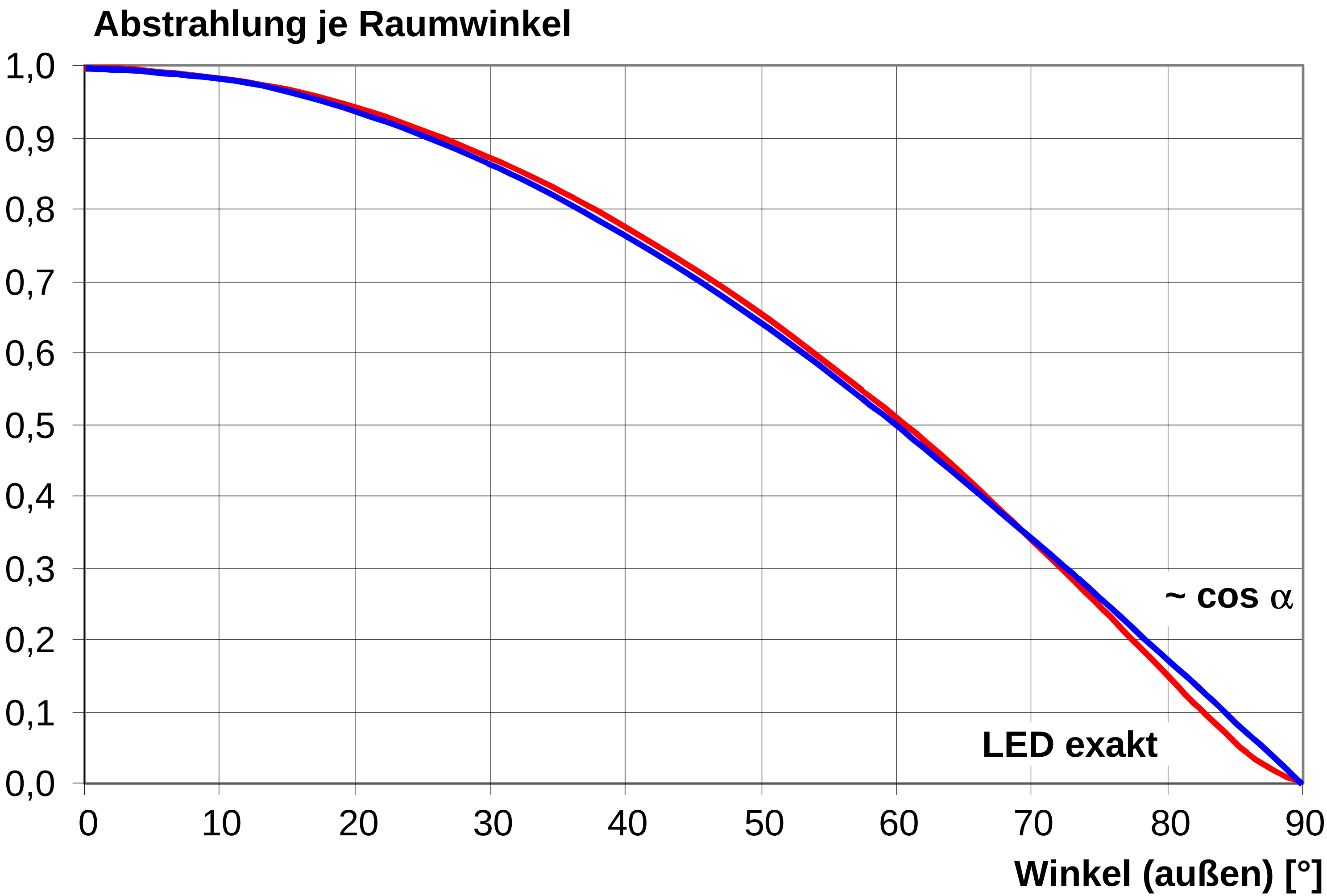
$$I_{e1}(\beta) = T \cdot I_{e0} \cdot \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \cdot \frac{d\alpha}{d\beta}$$

$$I_{e1}(\beta) = \frac{1-R}{n^2} \cdot I_{e0} \cos\beta$$

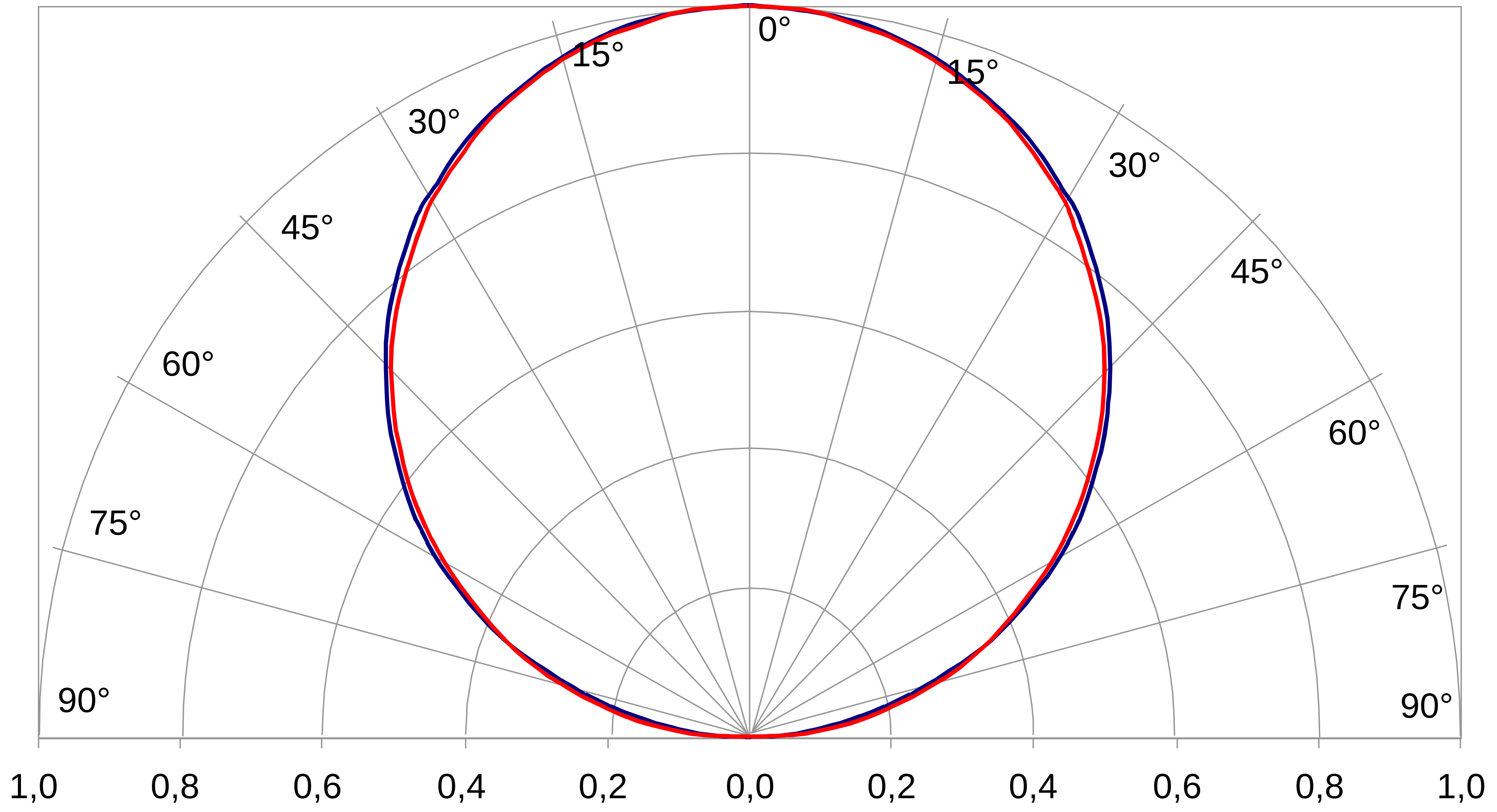
Änderung des Raumwinkels



Normierte Abstrahlung



Abstrahlung (Polarkoordinaten)



Wirkungsgrad der LED

komplette Leistung (oberer Halbraum):

$$P_0 = \int\limits_{\alpha=0}^{\alpha=\pi/2} \int\limits_{\phi=0}^{\phi=2\pi} I_{e0} \sin\alpha \, d\alpha d\phi = 2\pi \cdot I_{e0}$$

emittierte Leistung (oberer Halbraum):

$$P = \int\limits_{\beta=0}^{\beta=\pi/2} \int\limits_{\phi=0}^{\phi=2\pi} I_{e1}(\beta) \sin\beta \, d\beta d\phi = \int\limits_{\beta=0}^{\beta=\pi/2} \int\limits_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \frac{(1-R)}{n^2} I_{e0} \cos\beta \cdot \sin\beta \, d\beta d\phi$$

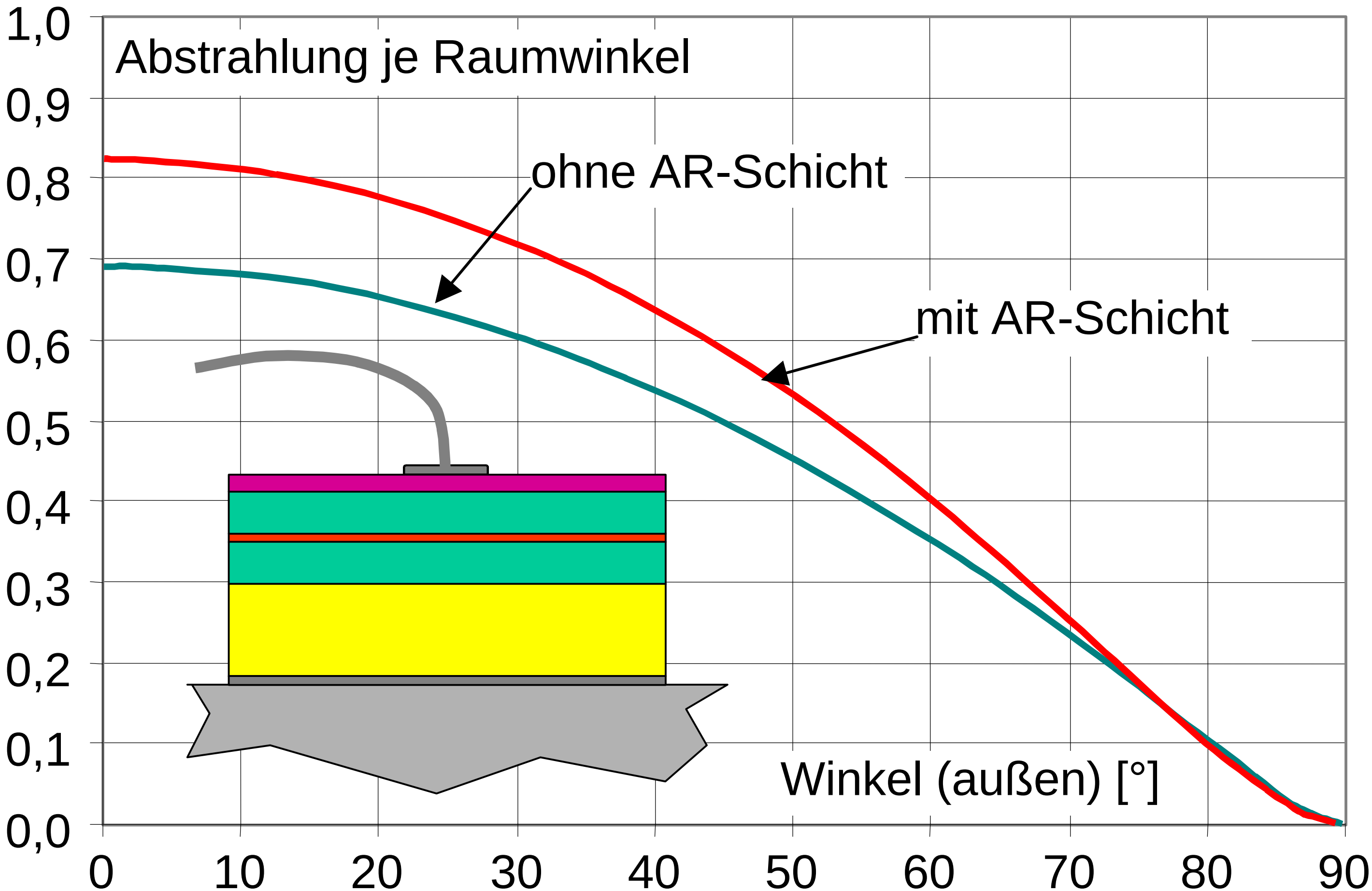
$$= 2\pi \cdot I_{e0} \cdot (1-R)/n^2 \cdot 1/2 = P_0 \cdot \left(1 - \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2\right) \frac{1}{2n^2} = 0{,}0282 \cdot P_0$$

Möglichkeiten zur Erhöhung des Auskoppel-Wirkungsgrades

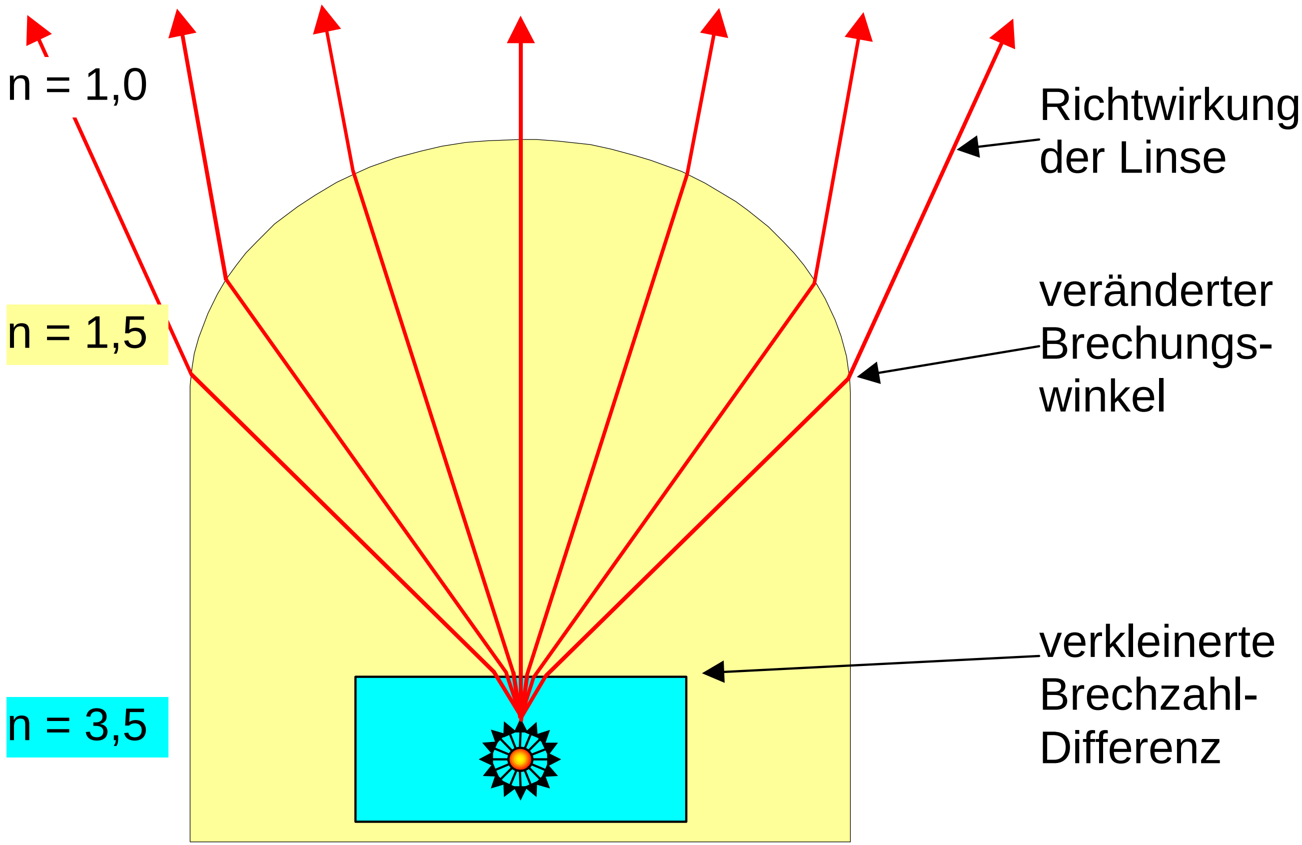
- LED-Gehäuseformen
- Rückseiten-Verspiegelung
- Entspiegelung der oberen Fläche
- Nutzung der seitlichen Abstrahlung
- Pyramiden-LED
- Resonant Cavity LED
- Non Resonant Cavity LED

Wirkung einer Entspiegelung

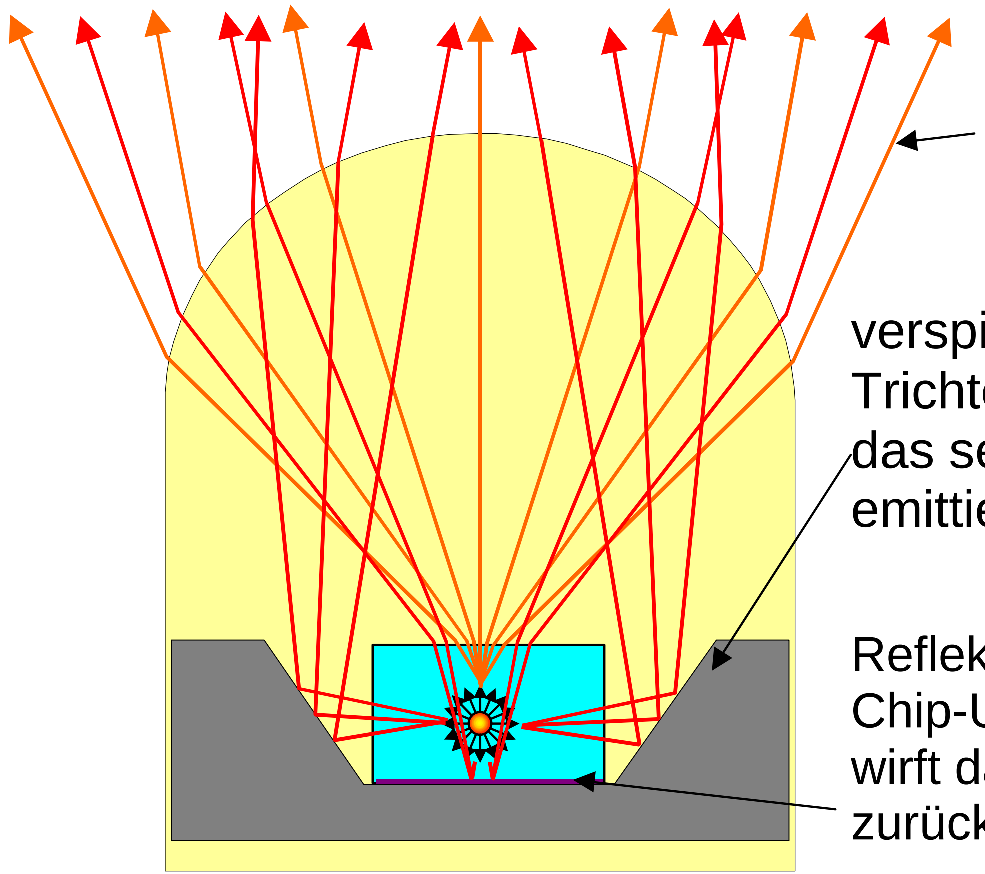
($n_{zwischenschicht}$ = 2,0)



Auskopplung und Bündelung mit Linsenabdeckung



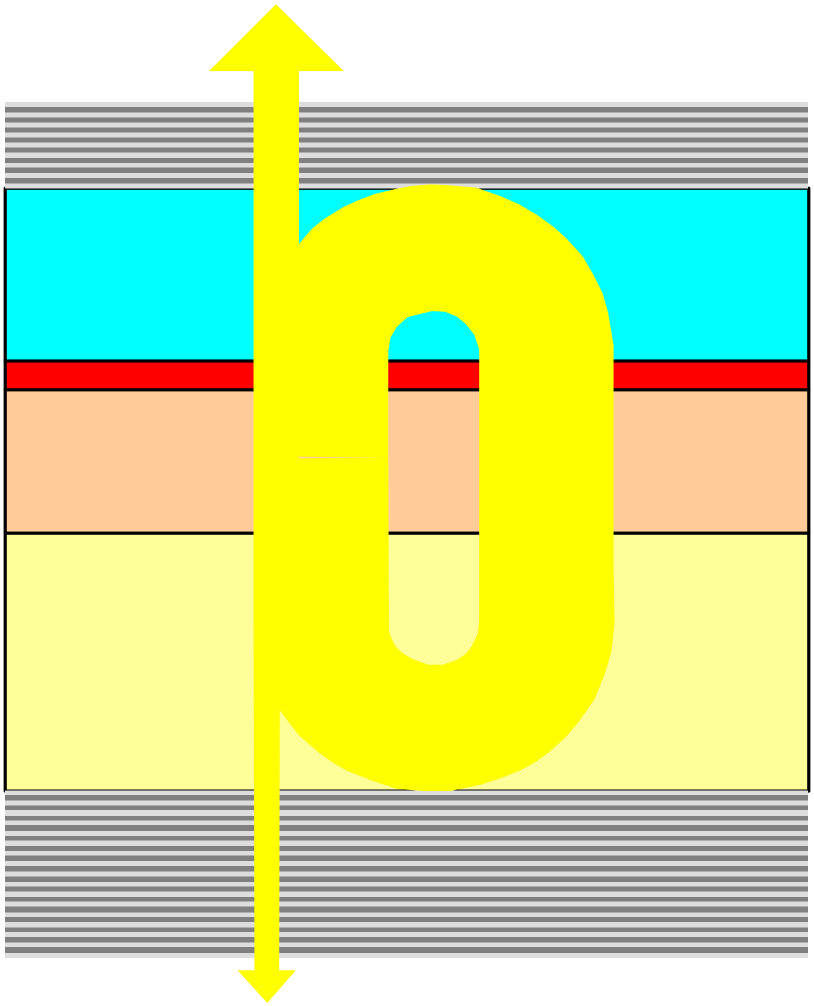
Rückseitenverspiegelung und Nutzung der seitlichen Abstrahlung



verspiegelter Trichter nutzt das seitlich emittierte Licht

Reflektor auf der Chip-Unterseite wirft das Licht zurück

Resonant Cavity LED



oberer Spiegel

n-Cladding Layer

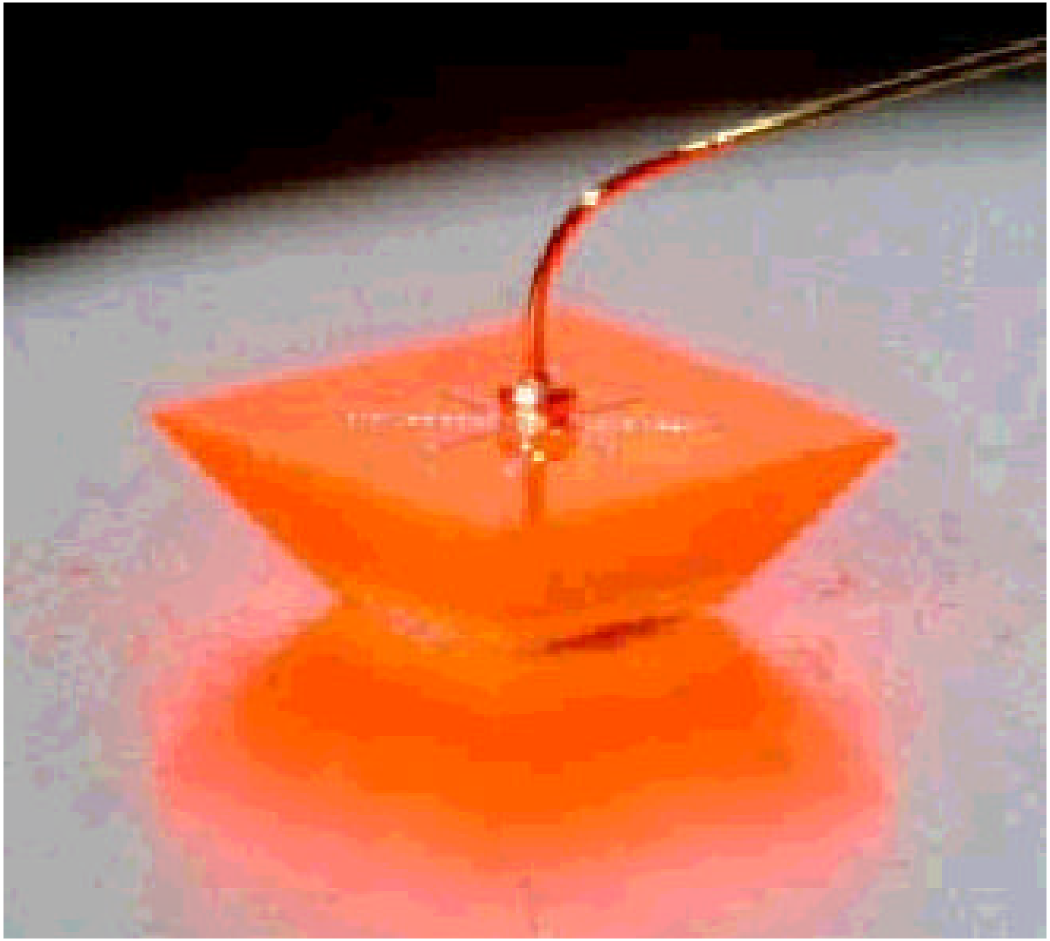
aktive Schicht

p-Cladding Layer

Substrat

unterer Spiegel

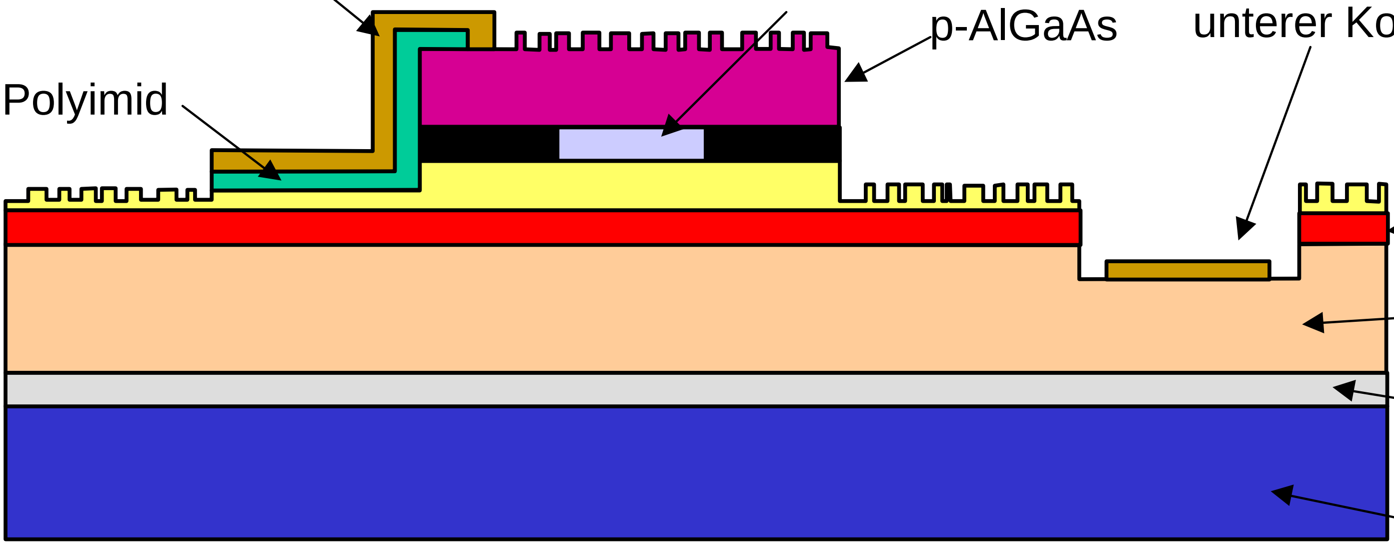
Pyramiden-LED



Derzeit effizienteste LED der Welt

55% externer Wirkungsgrad bei 650 nm

Non Resonant Cavity LED



Prinzip: Eine mikrostrukturierte Oberfläche streut das Licht in verschiedene Winkel, so daß es nach wenigen Reflexionen ausgekoppelt werden kann.

Zusammenfassung

- LED sind näherungsweise Lambertstrahler
- bei n=3,5 werden ca 2,8% des Lichtes (aus einem Kegel mit ±17°) ausgekoppelt
- Entspiegelung kann die Auskopplung etwas vergrößern (3,2% mit einer Schicht)
- Das LED-Gehäuse verbessert die Lichtauskopplung und bündelt das Licht
- Pyramiden-LED, Resonant Cavity LED und Non Resonant Cavity LED können die Auskopplung um eine Größenordnung verbessern (aktueller Bestwert: 55% externer Wirkungsgrad)