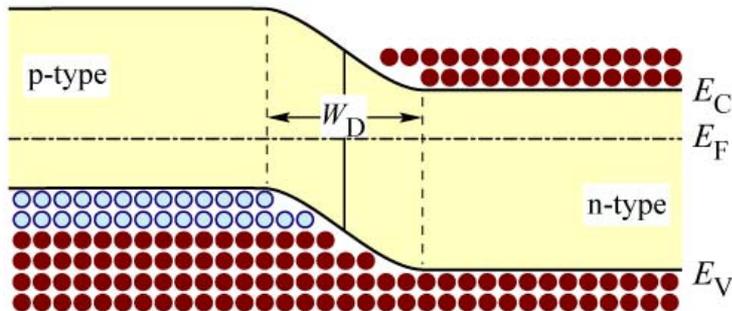


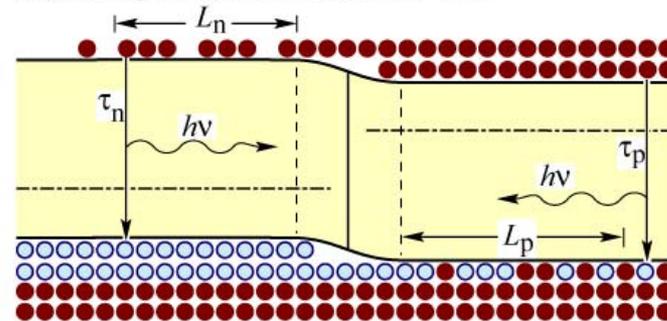
Heterodiode vs Homodiode

- Mit modernen Epitaxieverfahren lassen sich Heterodioden herstellen
- Dies kann die Rekombinationseffizienz erhöhen. Ist vor allem für LD wichtig (Nobelpreis für Störmer und Alferov)

(a) Homojunction under zero bias



(b) Homojunction under forward bias



(c) Heterojunction under forward bias

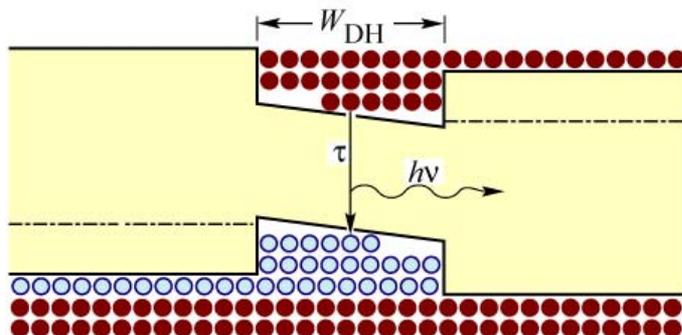


Fig. 4.6. P-n homojunction under (a) zero and (b) forward bias. (c) P-n heterojunction under forward bias. In homojunctions, carriers diffuse, on average, over the diffusion lengths L_n and L_p before recombining. In heterojunctions, carriers are confined by the heterojunction barriers.

Abrupter vs gradueller Heteroübergang

- Graduell als Wort praktisch nicht gebräuchlich „graded“

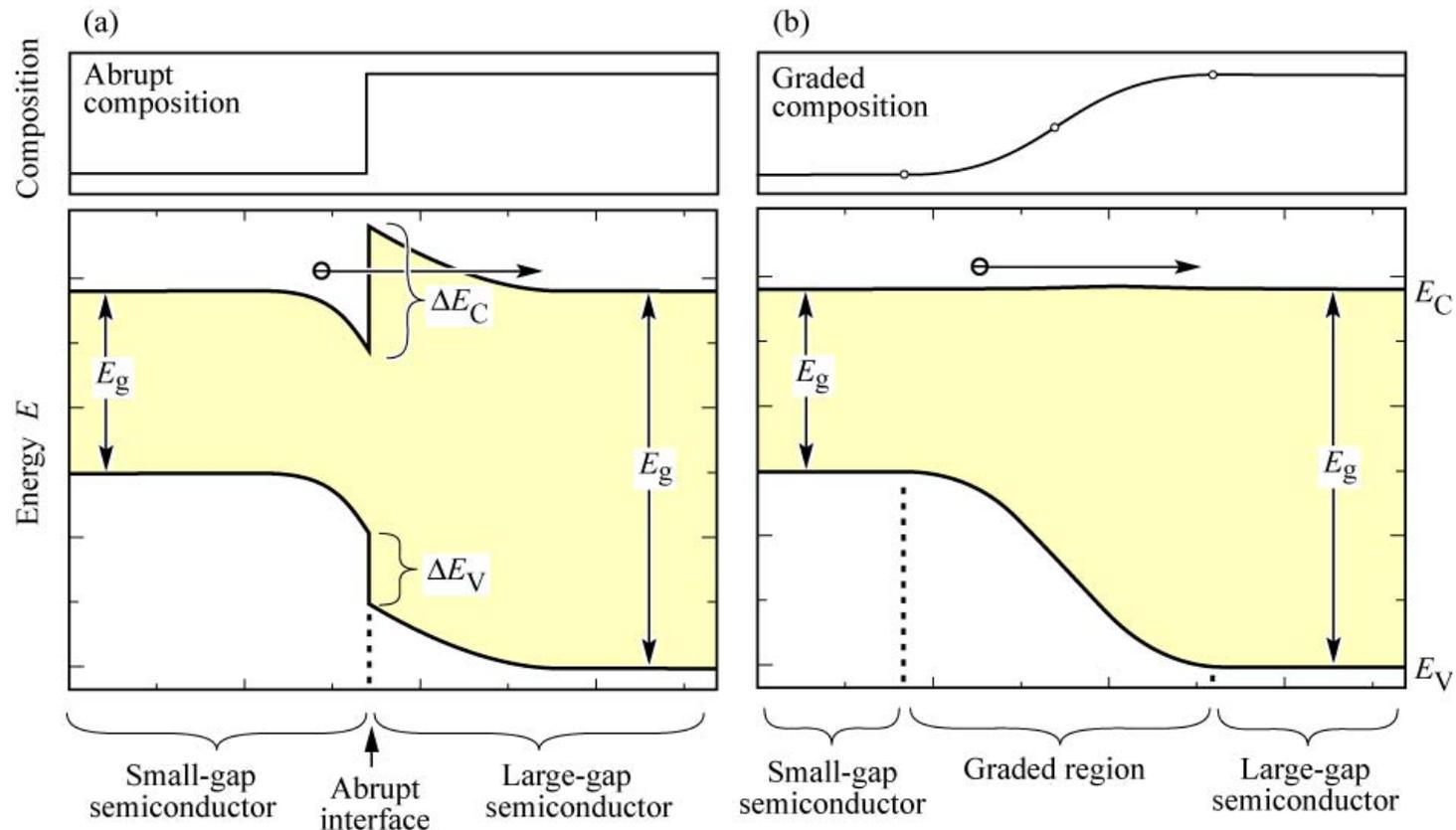
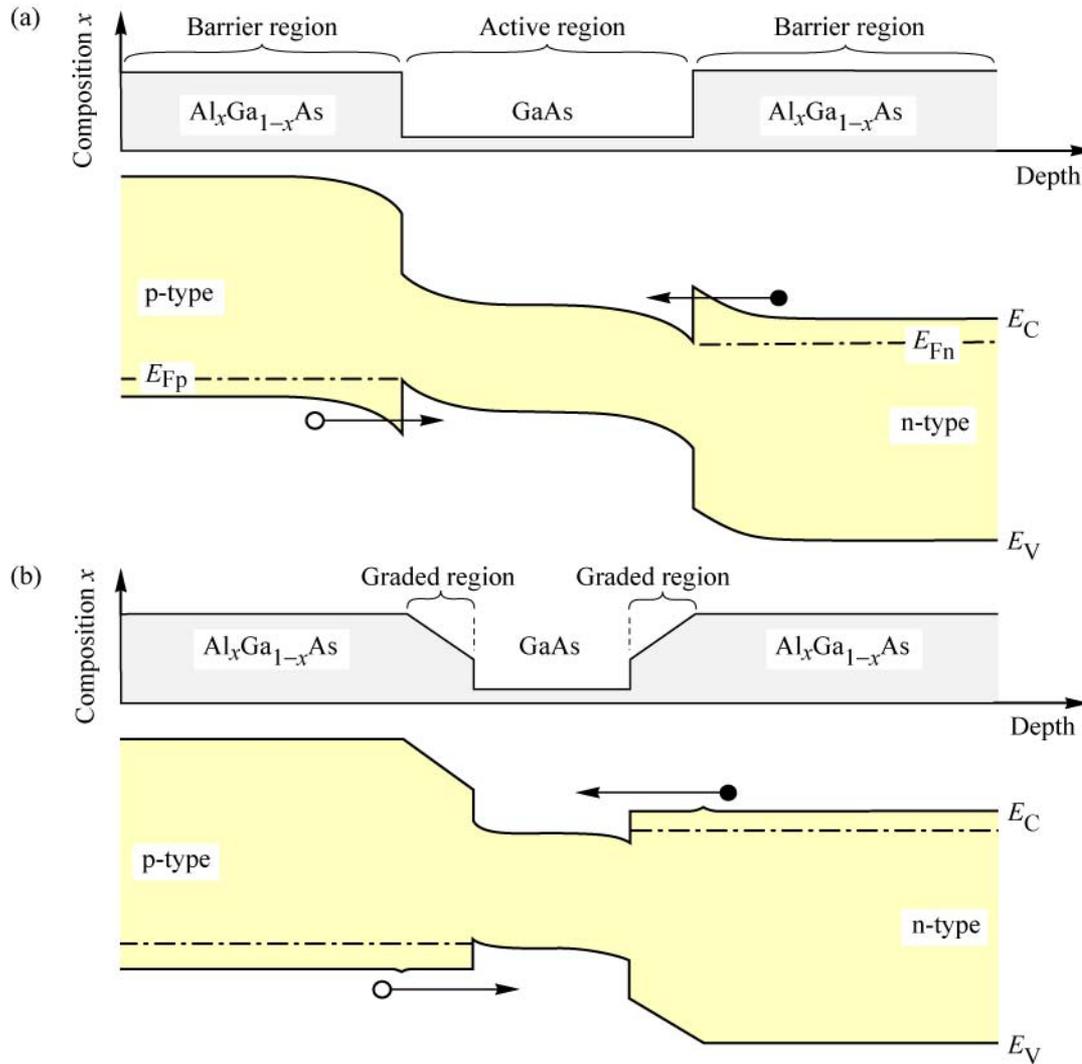


Fig. 4.7. Band diagram of (a) an abrupt n-type–n-type heterojunction and (b) a graded heterojunction of two semiconductors with different bandgap energy. The abrupt junction is more resistive than the graded junction due to the electron barrier forming at the abrupt junctions (after Schubert *et al.*, 1992).

E. F. Schubert

Doppelheterostruktur



- Einschluss der injizierten Ladungsträger in einem kleinen Raumbereich => hohe Dichten => hohe Rekombinationswahrscheinlichkeit
- Inversion lässt sich so gut erzeugen

Ladungsträgereinfang und -austritt

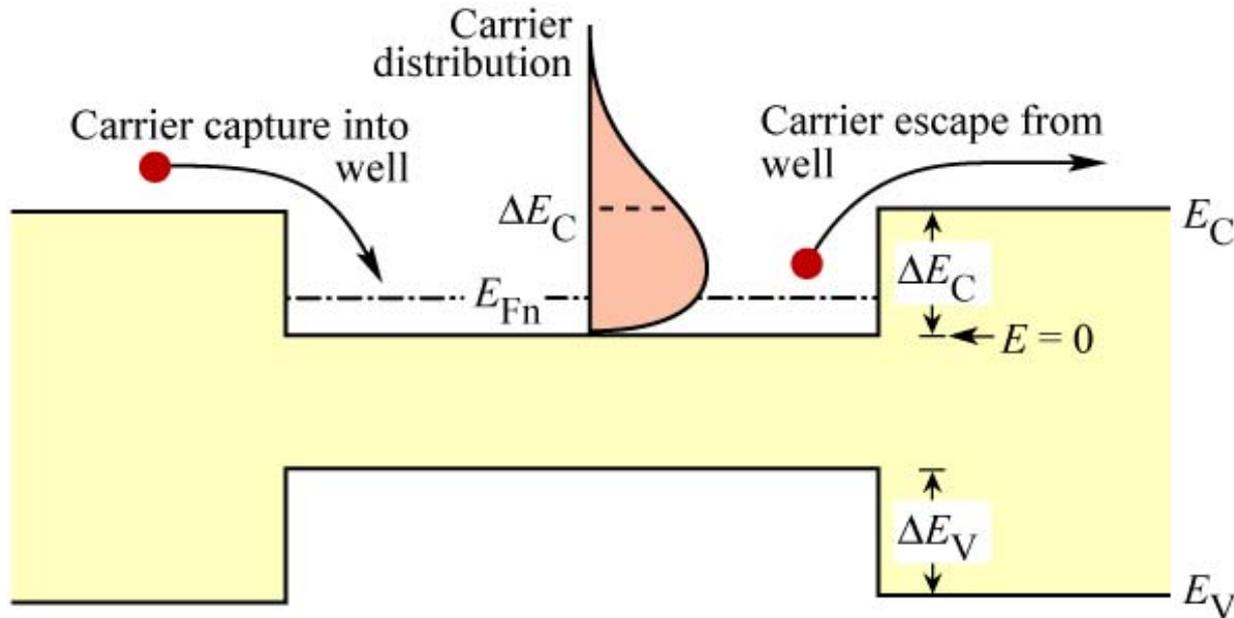
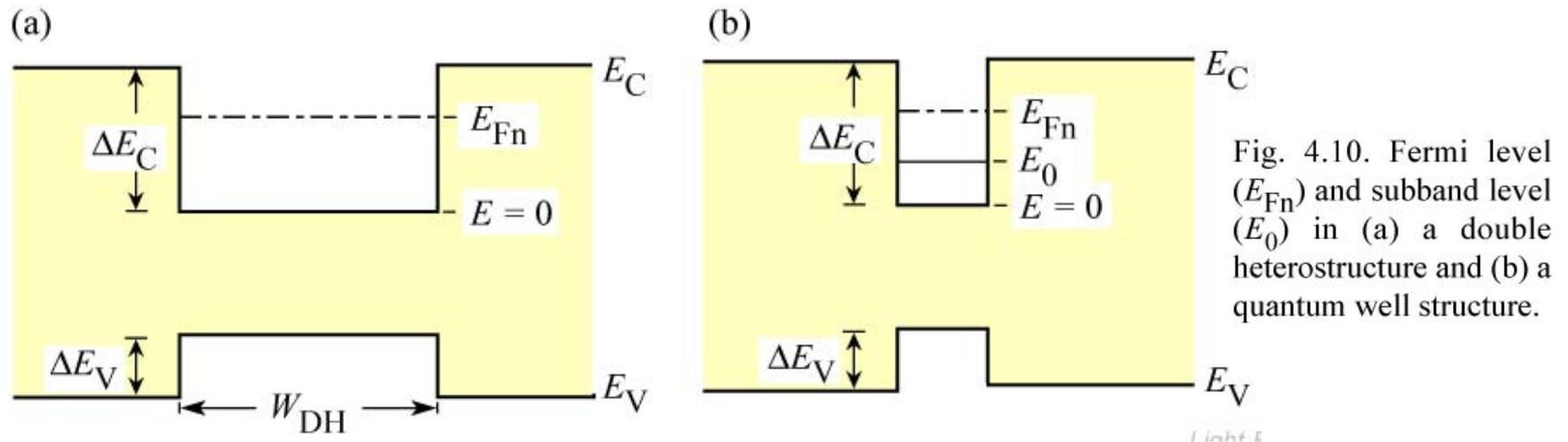


Fig. 4.9. Carrier capture and escape in a double heterostructure. Also shown is the carrier distribution in the active layer.

- Je größer ΔE_C desto geringer die Austrittswahrscheinlichkeit

DHS vs QW-Struktur



- Für W_{DH} im Bereich der deBroglie-Wellenlänge (~ 10 nm) treten Quantisierungseffekte auf
- Man spricht dann von Quantentöpfen (engl. quantum wells)
- Es bilden sich Subbänder aus (Einschluss nur in eine Richtung)

Elektronenblockierschicht

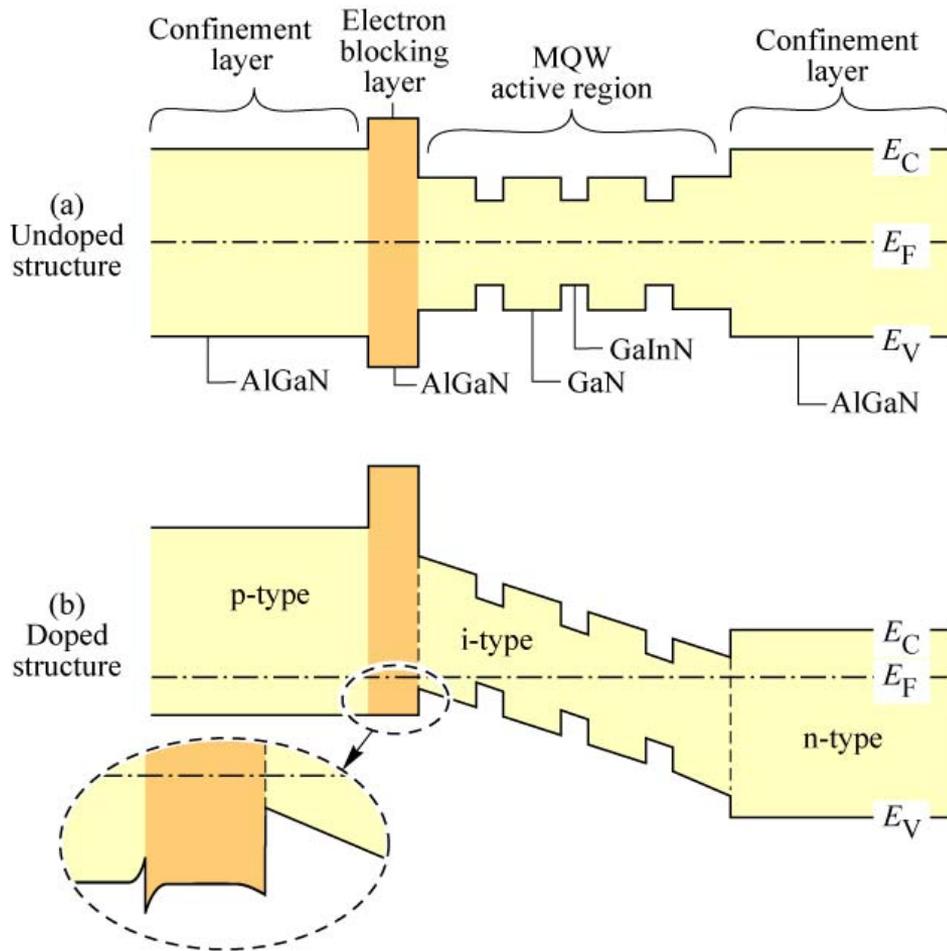


Fig. 4.12. AlGaIn current-blocking layer in an AlGaIn/GaN/GaInN multi quantum well structure. (a) Band diagram without doping. (b) Band diagram with doping. The Al content in the electron-blocking layer is higher than in the p-type confinement layer.

- Blockierschicht hält Elektronen im Bereich der QWs
- Beachte: für QW-Emission Reabsorption gering!

Einzel- vs. Multi-QW-Strukturen

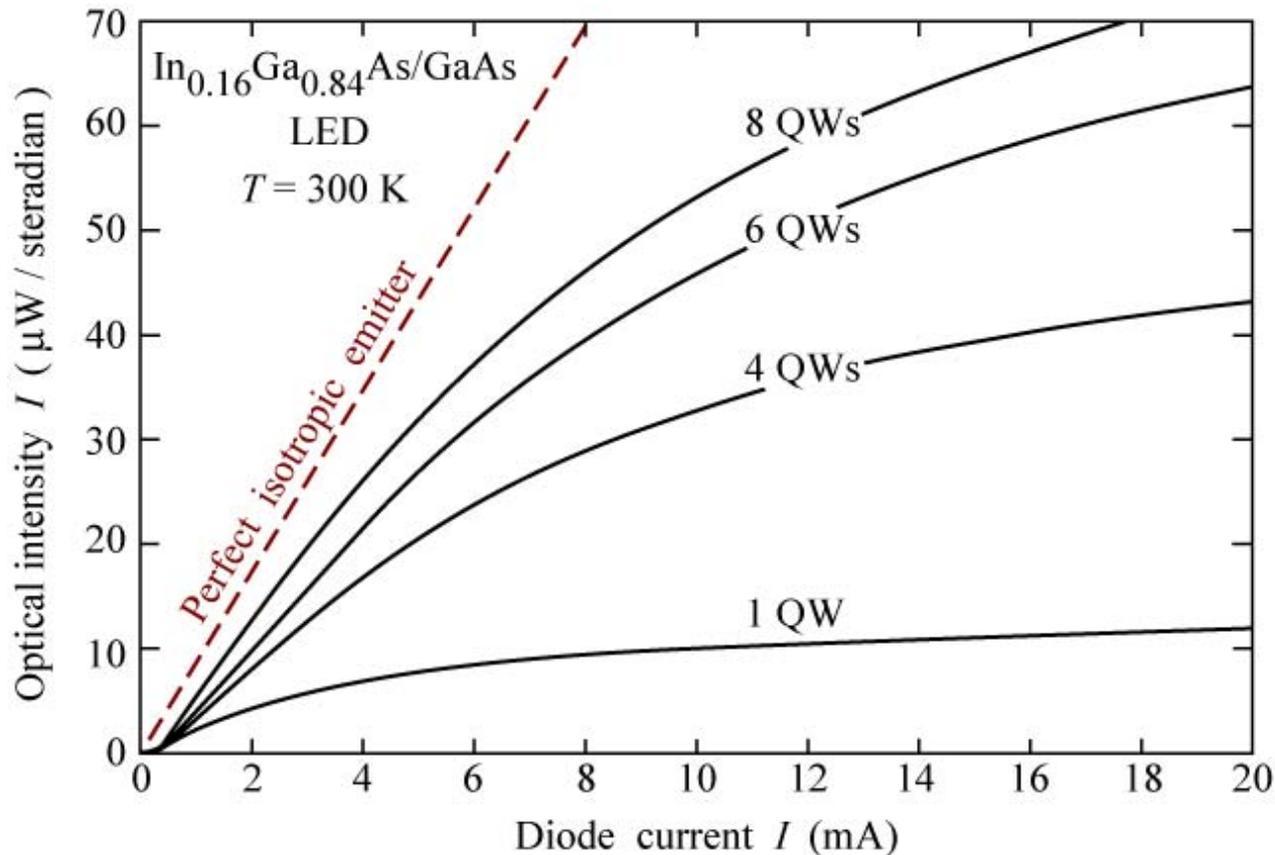


Fig. 4.11. Optical intensity emitted by $\text{In}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{GaAs}$ LEDs with active regions consisting of one, four, six, and eight quantum wells and theoretical intensity of a perfect isotropic emitter (dashed line) (after Hunt *et al.*, 1992).

- Ein QW kann nicht alle injizierten Ladungsträger rekombinieren!
- 6-8 QW sind schon sehr effektiv!

Energieverluste in QW-Strukturen

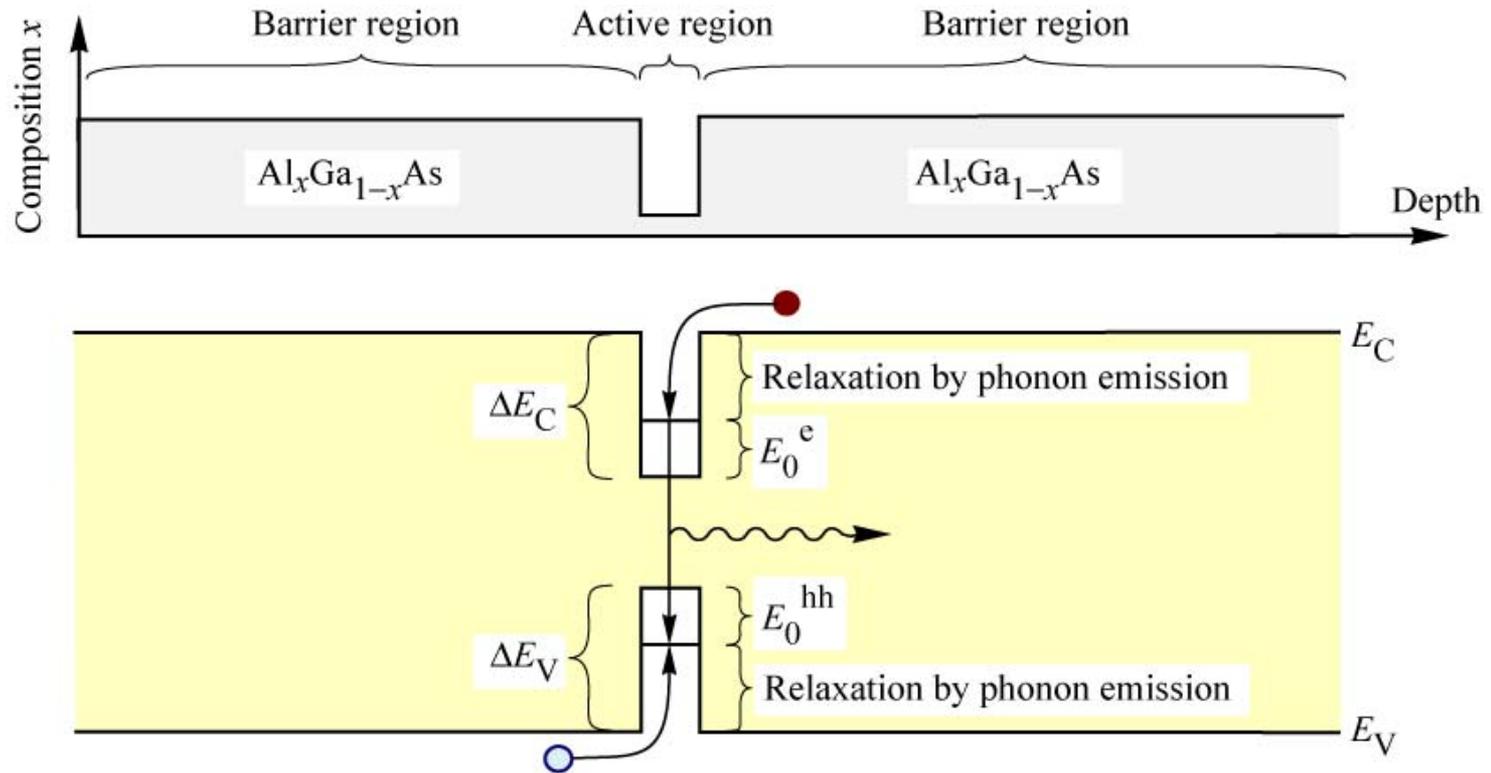


Fig. 4.13. (a) Chemical composition and (b) band diagram of a quantum well structure, illustrating the energy loss of carriers as they are captured into the quantum well.

- Durch die Relaxation geht ein Teil der Ladungsträgerenergie „verloren“, d. h. wird nicht in optische Leistung verwandelt (stattdessen Wärme)
- Auch ohne nicht-strahlende Rekombination geht Energie verloren!

Kennzahlen für LEDs

Um die Leistungsfähigkeit einer LED zu beschreiben, sind verschiedene Kennzahlen gebräuchlich:

Interne Quanten Effizienz

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

Gibt an, wie viele Photonen in der aktiven Zone pro injiziertes Elektron erzeugt werden.

Extraktionseffizienz

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

Gibt an, welcher Bruchteil der in der aktiven Zone erzeugten Photonen das Bauelement in den freien Raum verlassen.

Kennzahlen für LEDs

Um die Leistungsfähigkeit einer LED zu beschreiben, sind verschiedene Kennzahlen gebräuchlich:

Externe Quanten Effizienz

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

Gibt an, wie viele Photonen pro injiziertes Elektron in den freien Raum emittiert werden. „Gesamteffizienz“

Leistungseffizienz

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

Gibt das Verhältnis zwischen optischer Leistung im Außenraum und elektrischer Leistung in der LED an.

Emissionsspektrum LED

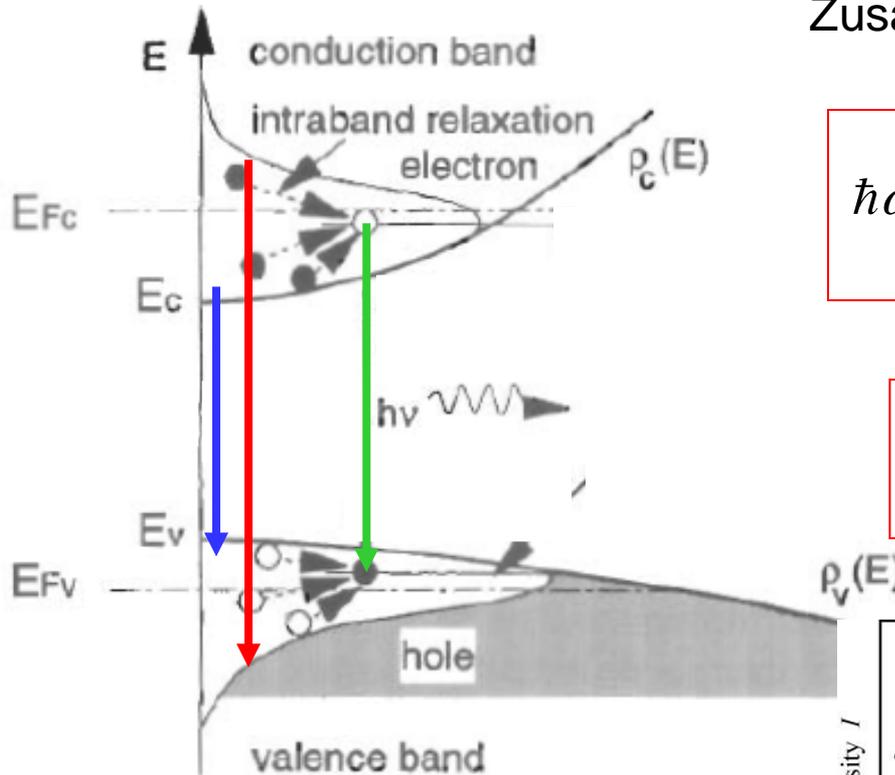
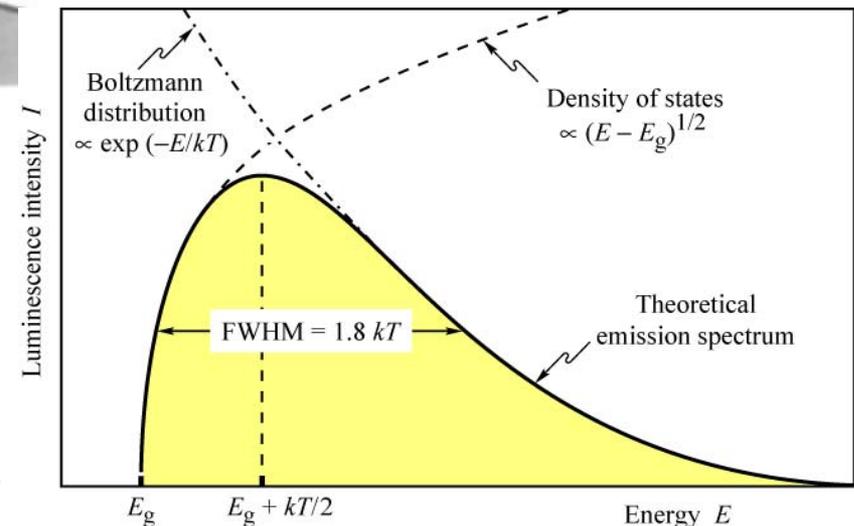
Zusammenhang zw. Photonenenergie und Elektronen- bzw. Löcherenergien:

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

Joint density of states

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

Theoretisches Emissionsspektrum



Energie maximaler Intensität:

$$E_{\max} = E_g + \frac{1}{2} \times k_B T$$

Linienbreite einer LED

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

Verlustmechanismen

Die 3 hauptsächlichsten Verlustmechanismen für emittierte Photonen sind:

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

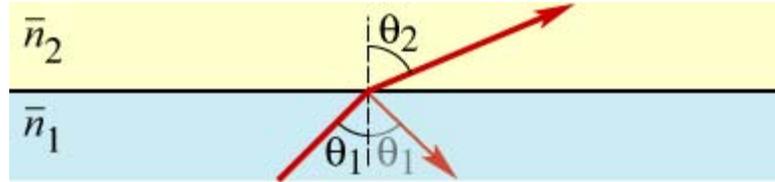
ad a) Um die Absorption zu verringern ist es notwendig, dass die Emission nahe der Oberfläche erfolgt ($\alpha \sim 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$)

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

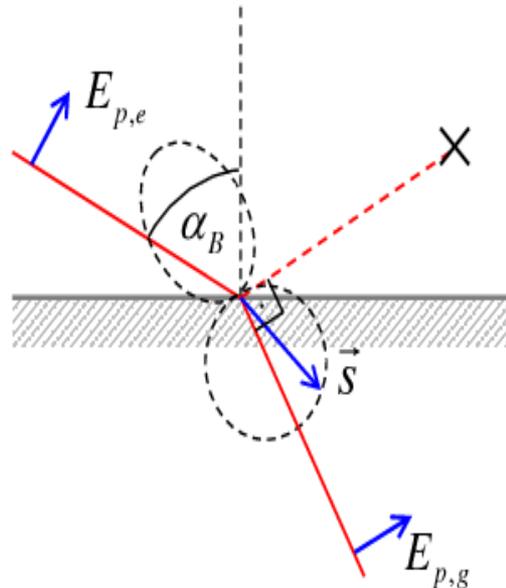
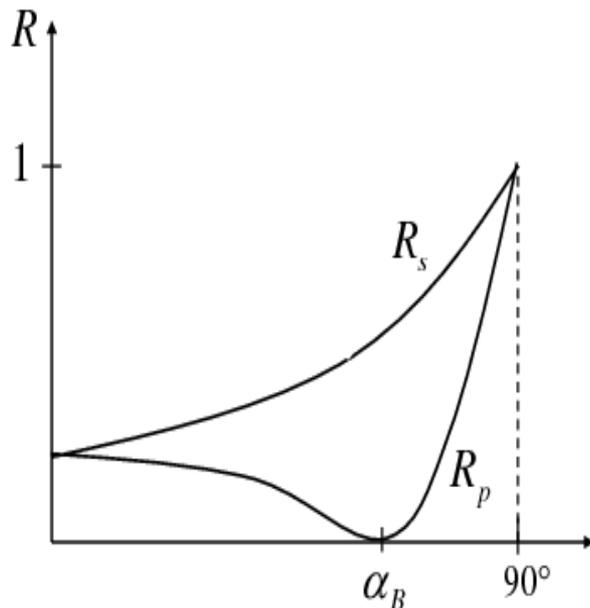
- e-h-Paare können wieder strahlend rekombinieren => nicht jedes reabsorbierte Photon ist zwangsläufig verloren
- Emission sollte nicht weiter als 100 nm unter Oberfläche erfolgen
- QW-Strukturen vermeiden das Problem weitgehend
- schlechte Materialqualität kann auch für QWs zu Reabsorption führen

Verlustmechanismen: Reflexion

Photonen, die es schaffen zur Oberfläche vorzudringen werden dort teilweise reflektiert.



Für senkrechte und parallele Polarisationsrichtung und den Einfallswinkel α und Brechungswinkel β gilt für den Reflexionskoeffizient der Intensität (Fresnel-Gleichungen):



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

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

Verlustmechanismen: Reflexion

Für $\alpha = 0$ (also senkrechter Einfallswinkel) gilt für beide Polarisierungen:

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

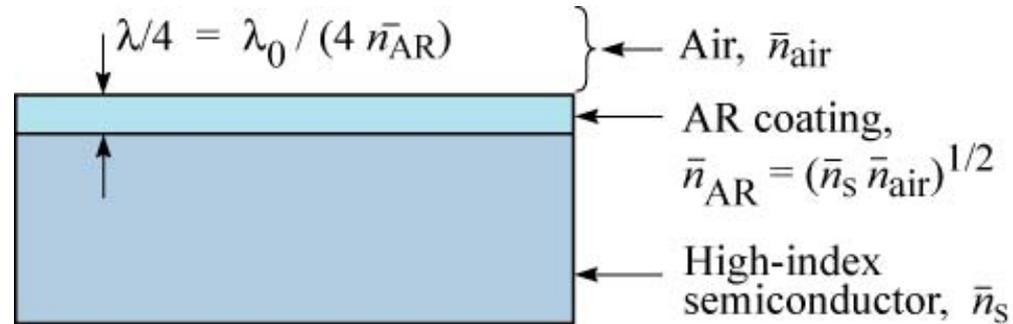
Die Fresnelverluste aufgrund der Reflexion können ganz beachtlich sein:
z.B. für GaAs: mit $n_{\text{GaAs}} = 3.66$ und $n_{\text{Luft}} = 1$ wird für senkrechten Einfall $R = 0.33$,
d.h. 33% der Photonen werden reflektiert und kommen nicht heraus.

→ Einfügen von Zwischenschichten als Antireflectionsschicht

Beachte: LEDs sind Massenbauelemente => Kosten sind wichtig!!

Anti-Reflexionsbeschichtung

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:

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

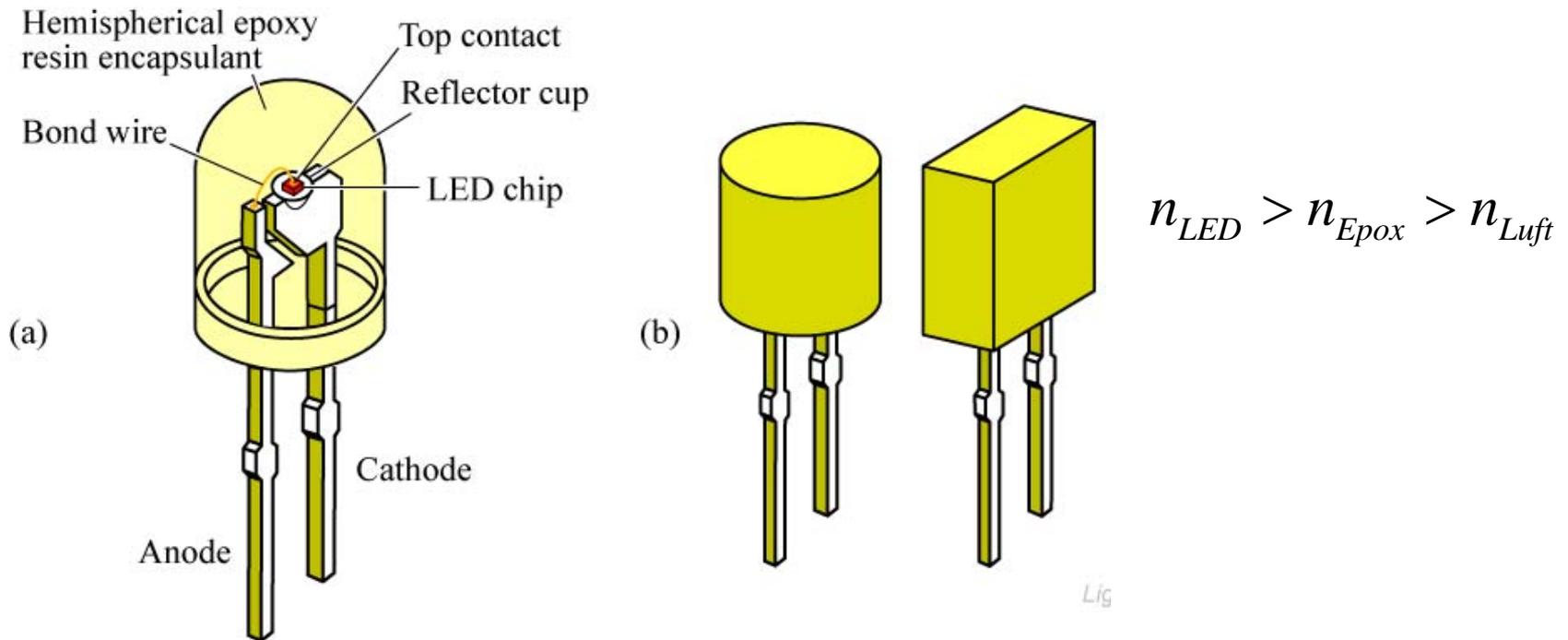
Brechungsindex:

$$n_{AR} = \sqrt{n_s \cdot n_{Luft}}$$

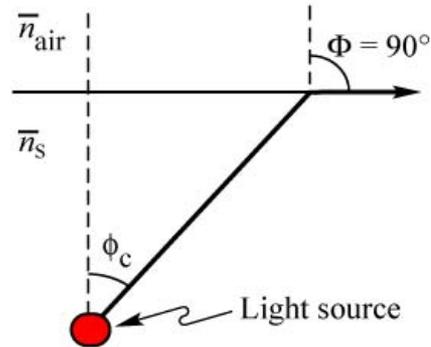
Epoxid-Einkapslung

- Eine Einkapslung in Epoxidharz erhöht die Lichtauskopplung, da der Brechungsindexkontrast minimiert wird ($n_{\text{Epoxie}} = 1,5$).
- Effekt ist kleiner als für Antireflexbeschichtung.
- Schützt auch das Bauelement

Vollständige Einkapselung des Bauelements in Epoxidharz



Totalreflexion



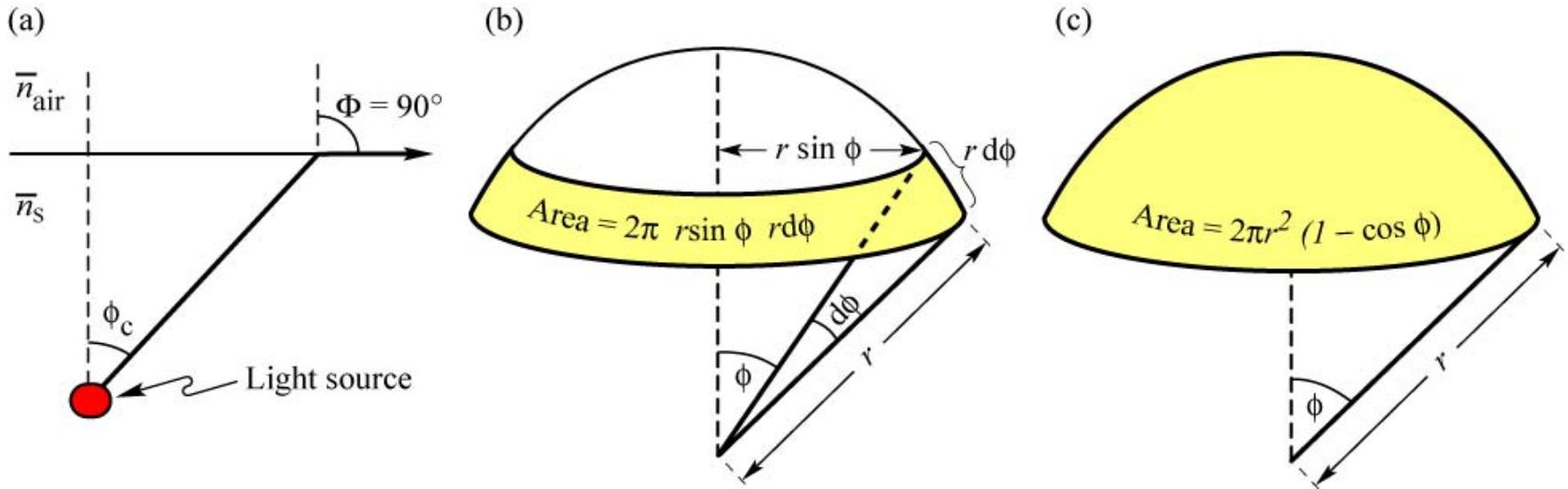
Fällt Licht auf eine Oberfläche aus einem Bereich eines hohen Brechungsindex ($n_2 > n_1$) (d.h. aus optisch dichterem Medium) so wird es total reflektiert wenn der Einfallswinkel größer als ein **kritischer Winkel** Θ_c ist.

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

- Für GaAs-Luft Oberfläche ist der kritische Winkel damit $\Theta_c = 15.9^\circ$
- Beträchtlicher Teil geht verloren!
- Auch dieser Effekt kann durch Einkapselung reduziert werden.

Totalreflexion: Lichtaustrittskegel

Definition des Austrittskegels durch den kritischen Winkel Θ_c



Da der Brechungsindex der Halbleiter sehr hoch ist, kann für Θ_c 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

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

Totalreflexion: Lichtaustrittsleistung

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

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

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

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

Totalreflexion: Lichtaustrittsleistung

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

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%

- Entscheidend ist der Brechungsindexsprung (geht quadratisch ein!)
- Das Problem ist weniger signifikant für Halbleiter mit kleinem Brechungsindex.
- Polymereinkapselung reduziert den Brechungsindexsprung deutlich.
- GaAs/Polymer (3.4/1.5) => 4,9 % kommen raus => mehr als verdoppelt
- Beachte: Polymer/Luft schränkt den Kegel nicht weiter ein (kleinerer Brechungsindexsprung und Form)

Abstrahlcharakteristik Fernfeld

- LEDs haben ein bestimmtes Abstrahl- oder Fernfeldmuster. Die Intensität in W/cm^2 gemessen, hängt von dem longitudinalen und Azimutwinkel und von der Entfernung von der LED ab.
- Klartext: Nicht in alle Raumrichtungen wird die gleiche Leistung abgestrahlt.
- In der Regel hängt die Abstrahlcharakteristik nur schwach von der Wellenlänge ab.

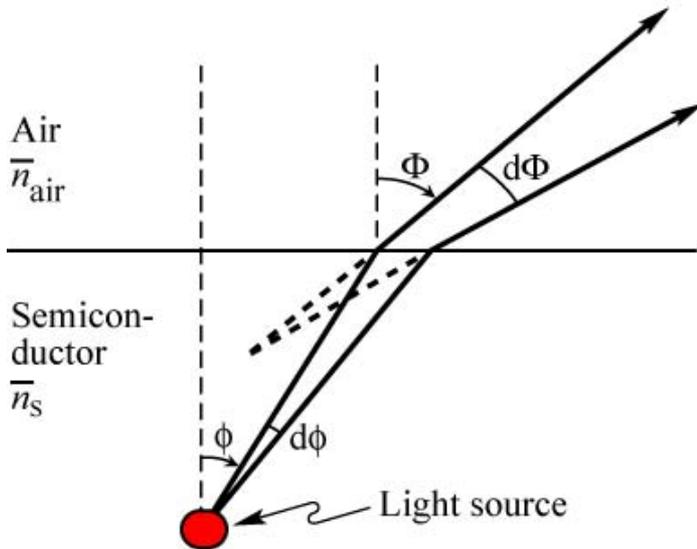
Die gesamte emittierte optische Leistung einer LED wird durch Integration über die Kugel­fläche erhalten.

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

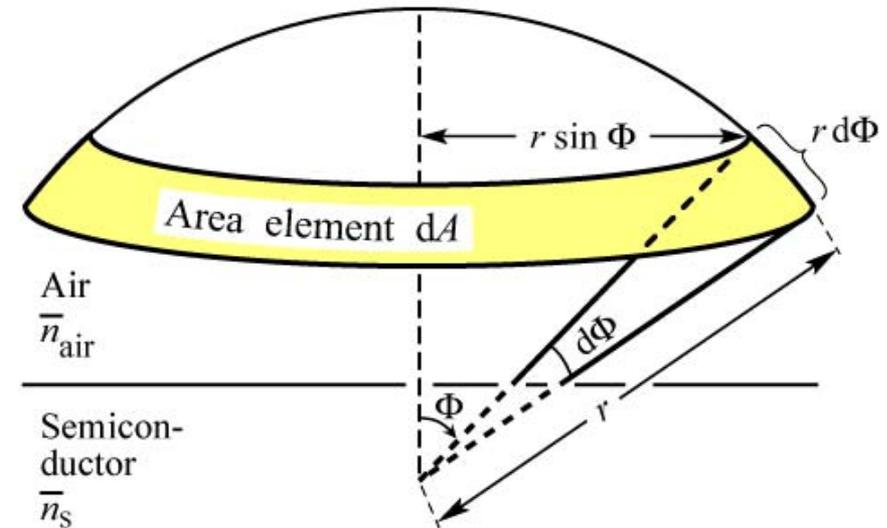
Mit $I(\lambda)$ der spektralen Lichtintensität (gemessen in $W/(nm\ cm^2)$) und A der Oberfläche der Kugel.

Geometrisches Modell des Lambertschen Emissionsmusters

(a)



(b)



Mit Hilfe des Snellius Gesetzes ($n_s \sin \phi \sim n_s \phi = n_{Luft} \sin \Phi$) emittiert in ein Winkelement $d\Phi$ in Luft

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

Erhaltung der Energie 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/m^2).

Lambertsches Emissionsmusters

Für das Flächenelement in der Luft gilt:

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

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 Gesamtquellenleistung 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 **Lambertsche Emissionsmuster** zu:

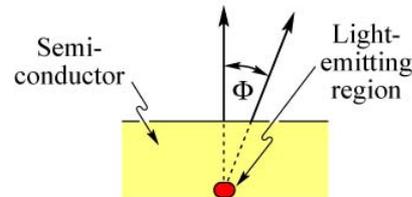
$$I_{Luft} = \frac{P_{Source}}{4\pi r^2} \frac{n_{Luft}^2}{n_S^2} \cos \Phi$$

Das Lambertsche Emissionspattern hat eine **Kosinus Φ Abhängigkeit**

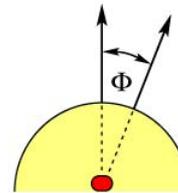
Abstrahlcharakteristika

- Einige andere Oberflächenformen und ihre Abstrahlcharakteristika sind unten dargestellt. Ein isotropes Emissionsmuster erhält man für die hemisphärische Form.
- Beachte: Totalreflexion ist mit berücksichtigt (für hemisphärische LED nicht vorhanden)

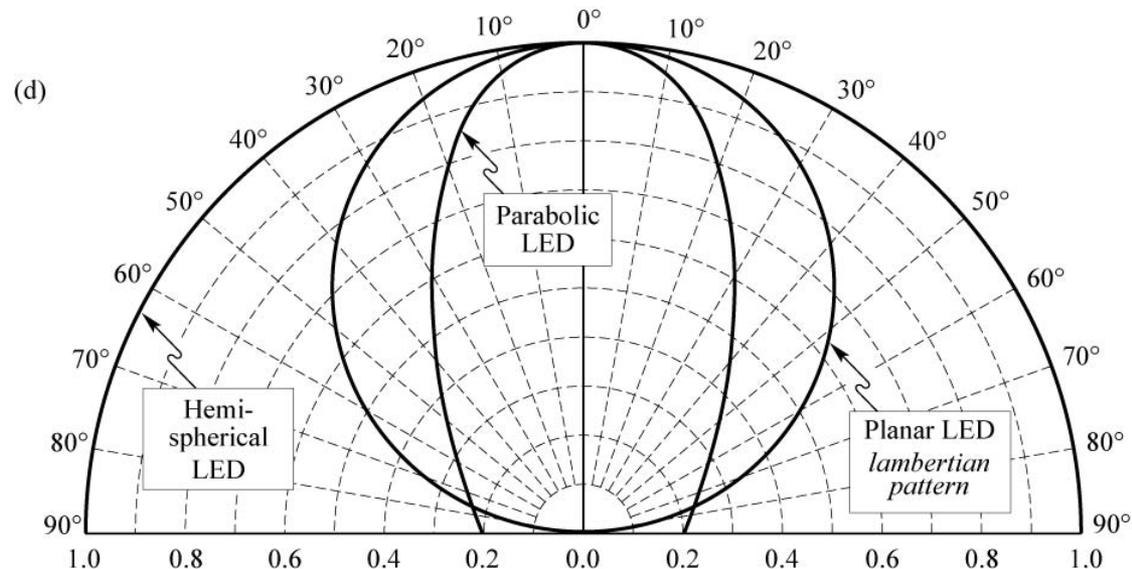
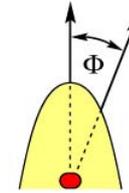
(a) Planar LED



(b) Hemispherical LED



(c) Parabolic LED



Abstrahlcharakteristik: Leistung in Luft

Die gesamte in Luft emittierte Leistung lässt sich aus der Abstrahlcharakteristik wie folgt berechnen:

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

Für ein Lambertsches Emissionsmuster und mit $\cos\Phi \sin\Phi = 1/2 \sin(2\Phi)$ kann das Integral berechnet werden und ergibt

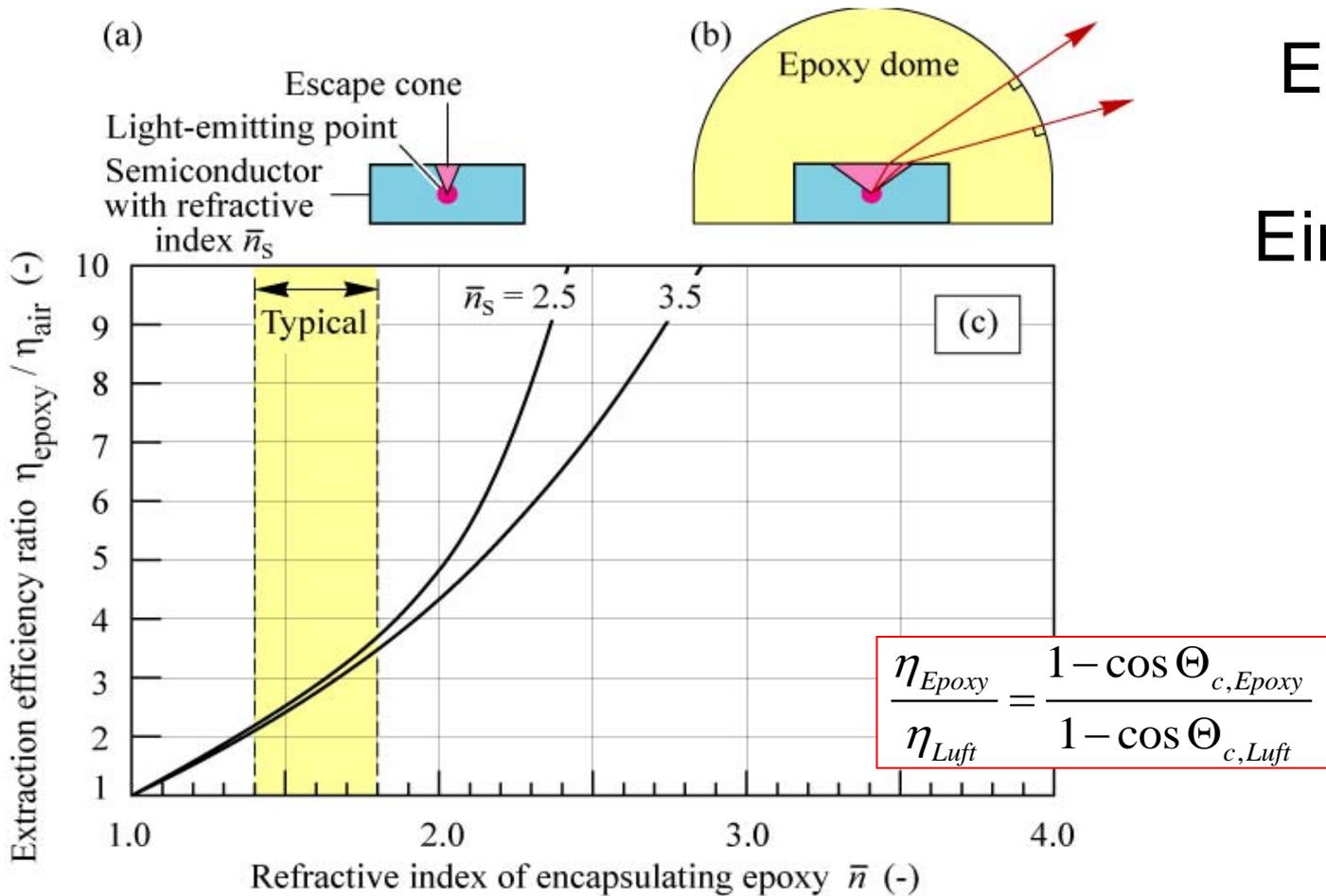
$$P_{Luft} = \frac{P_{source}}{4} \cdot \frac{n_{Luft}^2}{n_S^2}$$

Die deckt sich genau mit der Formel für die Leistung die den HL aufgrund der Totalreflexion verlassen kann!!

Durch Fresnel-Reflexionen an der Grenzfläche verringert sich die Leistungstransmittanz weiter. Für (nahezu) senkrechten Einfall gilt

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

Extraktions- effizienz: Einkapselung



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