

## 2. Physikalische Grundlagen

### 2.1 Photonen

Elektromagnetisches Spektrum:

Wahrnehmung des menschlichen Auges: 400nm bis 800nm, sehr ungleich in Intensität

Unterscheidung Physikalische Größen ↔ Photometrie (physiologische Wahrnehmung)

Dualistische Betrachtung:

Der Wellenvektor beschreibt die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle mit der Amplitude:

$$A(x, t) = A_0 \cdot e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}$$

Lichtteilchen (Photon) hat Energie:  
Geschwindigkeit  $c$ , Ruhemasse 0

$$e = \hbar\omega = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar|\vec{k}|c$$

Impuls und Wellenvektor:

$$|\vec{p}| = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar|\vec{k}| = \frac{h}{\lambda}, \quad \hbar = h/2\pi \quad \begin{array}{l} c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\ c = c_0 / n \end{array}$$

Wellenbild

→ Beugung, Interferenz (für kleine Wellenlänge → Strahlenmodell)

Teilchenbild

→ Quantenhaften Transport von Energie

### 2.1 Planck'sches Strahlungsgesetz, Photonendichte

Schwarzer Strahler (z.B. Sonne)

$$\alpha(\hbar\omega) = 1$$

Photonendichte:

$$dn_\gamma(\hbar\omega) = D_\gamma(\hbar\omega) f_\gamma(\hbar\omega) d(\hbar\omega)$$

Zustandsdichte:

(Zahl der Zustände pro Vol. und Energieintervall)

$$D_\gamma(\hbar\omega) = \frac{1}{V} \frac{dN(\hbar\omega)}{d(\hbar\omega)} = \frac{(\hbar\omega)^2 d\Omega}{4\pi^3 \hbar^3 c^3}$$

Photonen haben ganzzahligen Spin. Es gilt die Bose-Einstein-Verteilung, die angibt mit welcher Wahrscheinlichkeit Zustände für Photonen besetzt sind:

$$f_\gamma(\hbar\omega) = \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega - \mu_\gamma}{kT}} - 1}$$

$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$  die Boltzmannkonstante,  $\mu_\gamma$  ist das chemische Potenzial der Photonen, das für die Sonnenstrahlung, wie allgemein für Wärmestrahlung, den Wert 0 hat.

Planck'sche Strahlungsgesetz:

$$dn_\gamma(\hbar\omega) = D_\gamma(\hbar\omega) d(\hbar\omega) / (e^{\hbar\omega/kT} - 1) = \frac{(\hbar\omega)^2 d\Omega}{4\pi^3 \hbar^3 c^3} \cdot \frac{d(\hbar\omega)}{e^{\hbar\omega/kT} - 1}$$

Energie pro Photon:

$$de_\gamma(\hbar\omega) = \hbar\omega \cdot dn_\gamma(\hbar\omega)$$

Umrechnung Photonenenergie in Wellenlänge:

$$\hbar\omega\lambda = hc = 1,241 \text{ eV}\mu\text{m}, \quad e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\longrightarrow 1 \text{ eV entspricht } 1241 \text{ nm}$$

Gesamtstrahlungsenergie pro Volumen (Energiedichte)

$$E_\gamma / V = e = \int_0^\infty \frac{(\hbar\omega)^3 d\hbar\omega}{4\pi^3 \hbar^3 c^3 (e^{\hbar\omega/kT} - 1)} \cdot \int_0^{4\pi} d\Omega$$

Mit  $x = \hbar\omega / kT, \quad \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \pi^4 / 15$

Energiedichte  $e = \frac{(kT)^4}{4\pi^3 \hbar^3 c^3} \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} 4\pi = \frac{\pi^2 k^4}{15 \hbar^3 c^3} \cdot T^4$

Energiedichte pro Raumwinkel  $e_\Omega = e / 4\pi$

Energiestromdichte am Ort der emittierenden Fläche dA:  $j_E = e_\Omega c \pi$

Stefan-Boltzmann-Gesetz  $j_E = \sigma \cdot T^4$

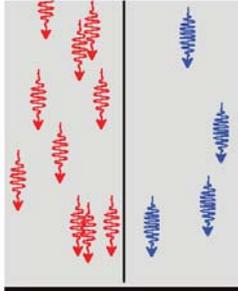
Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$

Energiestrom  $I_E$  in [W]

Energiestromdichte  $j_E$  in [W/m<sup>2</sup>]

Photonenfluss:  $\Phi$  Zahl der Photonen pro s und m<sup>2</sup>

Für den selben Energiestrom müssen mehr „rote“ als „blaue“ Photonen fließen! („Die Energie wird durch die Frequenz bestimmt - die „Intensität“ durch die Anzahl.)



<http://pveducation.org>

Für monochromatisches

Licht gilt:

$$j_E \left( W / m^2 \right) = \Phi E(J) = q e_\gamma (eV) \Phi = q \Phi \frac{1,24}{\lambda}$$

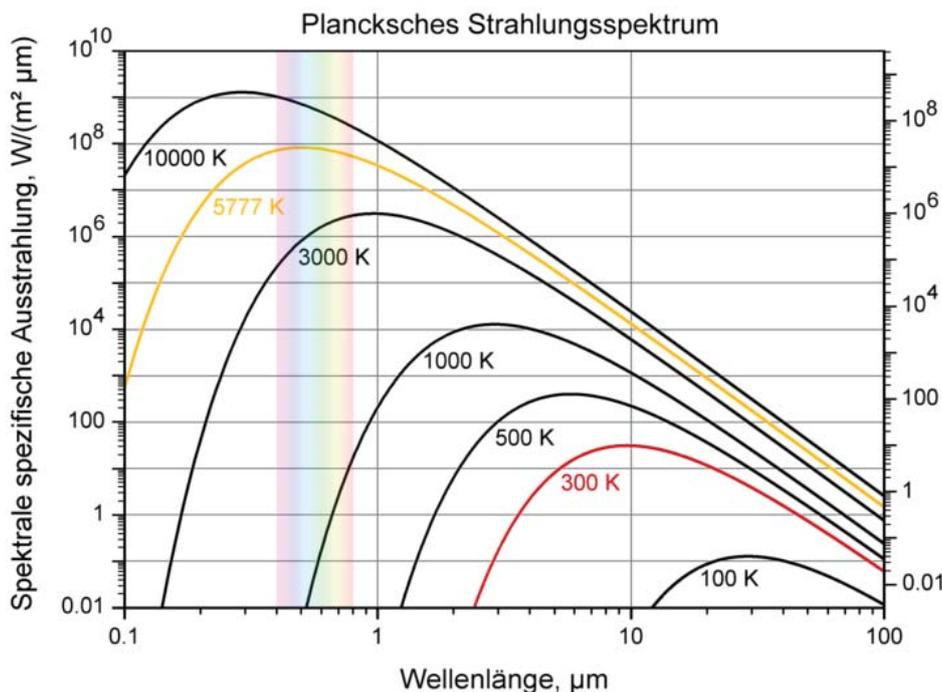
Beispiel (q Elektronenladung):

$$\Phi = 3 \cdot 10^{21} / m^2 / s$$

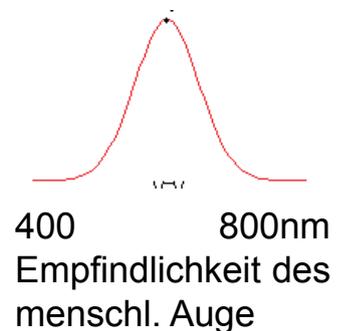
$$e_\gamma = 2eV$$

$$\longrightarrow j_E = 961,2 W / m^2$$

### Die Position des Maximums variiert linear mit 1/T. Wiensches Verschiebungsgesetz



$$\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m \cdot K}{T}$$



Bei T=300K wird kein sichtbares Licht abgestrahlt

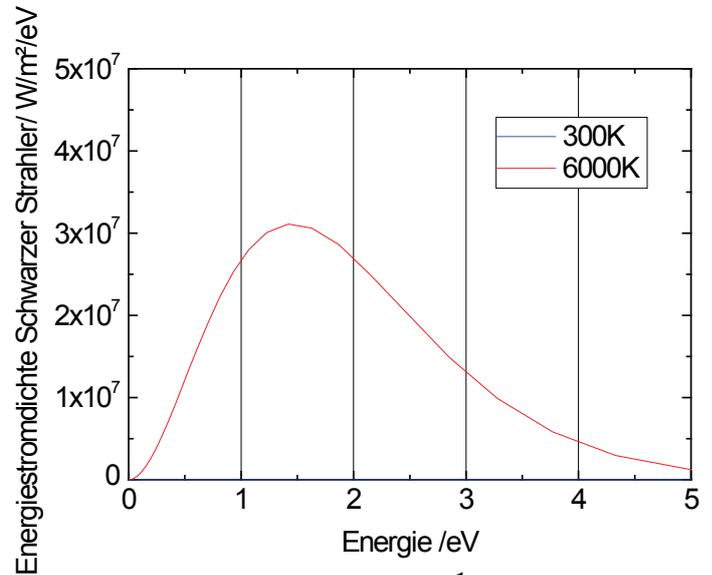
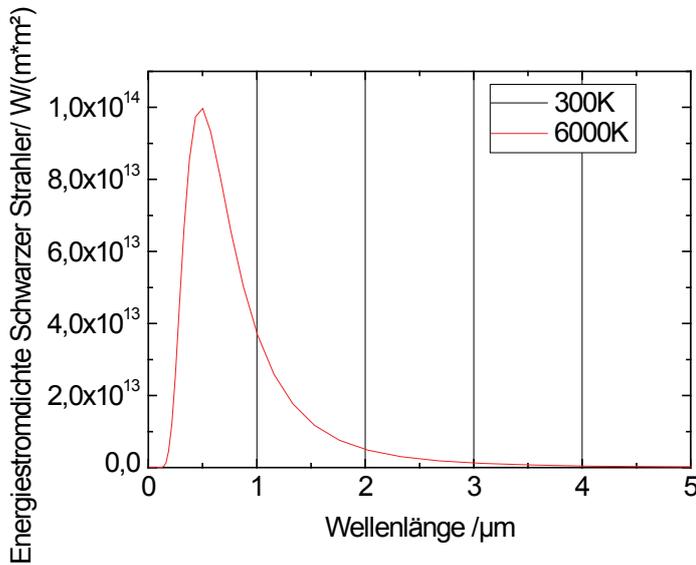
Bei T=3000K erscheint Licht rot

Bei T= 6000K weiß

Beachte: Von der Wärmestrahlung zu unterscheiden ist die Fluoreszenzstrahlung!!

# Die Position des Maximums ist abhängig von der Auftragung bzw. Darstellung

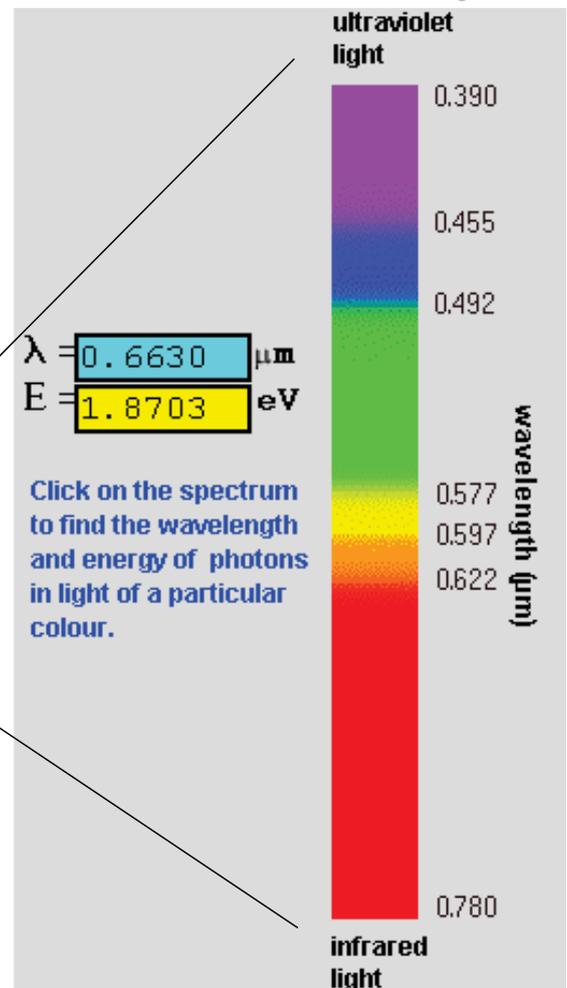
$$\nu_{\max} \neq \frac{c}{\lambda_{\max}} \quad \text{sondern} \quad \nu_{\max} = 0,568 \cdot \frac{c}{\lambda_{\max}}$$



$$de_{\gamma}(\hbar\omega) = \frac{d\Omega}{4\pi^3 \hbar^3 c^3} \cdot \frac{(\hbar\omega)^3}{e^{\hbar\omega/kT} - 1} d(\hbar\omega)$$

$$de(\lambda) = 2hc^2 d\Omega \frac{1}{\frac{hc}{\lambda}} \frac{\lambda^5}{e^{\lambda kT} - 1} d\lambda$$

Wavelength (nm)	
$10^{12}$	Long wave
$10^{11}$	Medium wave
$10^{10}$	Short wave
$10^9$	Microwave
$10^8$	
$10^7$	
$10^6$	Infrared
$10^5$	
$10^4$	
800	Visible
400	
$10^2$	Ultraviolet
$10^1$	X-rays
$10^0$	
$10^{-1}$	
$10^{-2}$	Gamma Radiation
$10^{-3}$	
$10^{-4}$	Cosmic Radiation
$10^{-5}$	

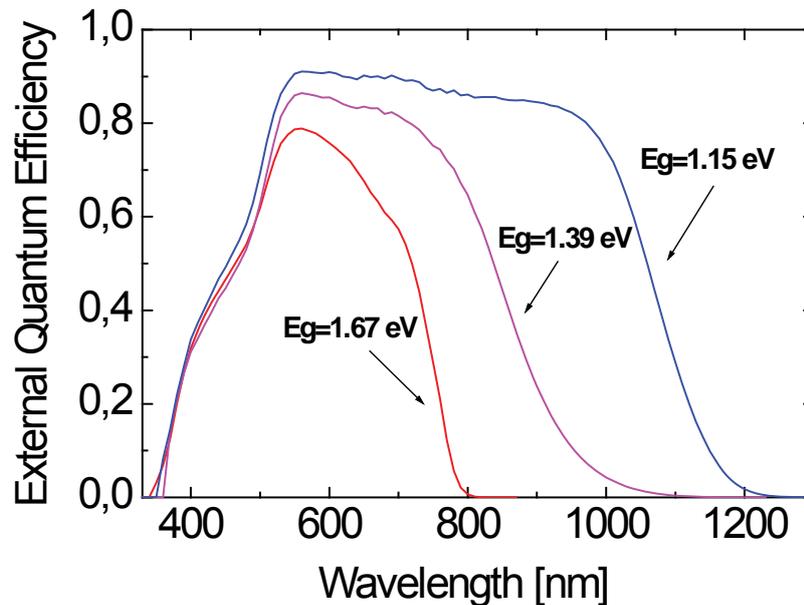


$$E = 1,24 / \lambda$$

# Beispiel für die spektrale Empfindlichkeit von Solarzellen

## Quantenausbeute von $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ Zellen

mit erhöhtem Bandabstand aus der ZSW-Modul-Linie (In-Line-Prozess)



Sample	x	$E_g(\text{QE})$ [eV]	$V_{oc}/\text{Zelle}$ [mV]	$E_g/q-V_{oc}$ [mV]	$j_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	FF [%]	$\eta$ [%]
A	0.3	1.15	625	525	30,8	73,5	14,1
B	0.68	1.39	764	626	20,9	74,2	11,8
C	1	1.67	844	826	13,3	57	6,4

## 2.2 Die Sonne als Strahlungsquelle

Welche „Erneuerbare“ Energieströme sind nicht von der Sonne?  
Gezeiten (ca. 109 kW), Geothermie (ca. 1010 kW)

- T – Sonne 20 Mio. K  $\rightarrow$  Fusion H-He  $\rightarrow$  Oberfläche  $5762 \pm 50\text{K}$ , Maximum bei  $0,5033 \mu\text{m}$   $\rightarrow$  Raumwinkel  $\sim 1/4\pi R^2$
- Die Sonne strahlt  $1,5 \cdot 10^{18}$  kWh/a zur Erde (ca.  $10^{14}$  kW) auf der Erde ca.  $1 \text{ kW/m}^2$ , außerhalb  $1,36 \text{ kW/m}^2$
- Der Gesamtprimärenergieverbrauch der menschlichen Zivilisation ist ungefähr  $10^{14}$  kWh pro Jahr
- Der Energiestrom von der Sonne ist 15.000 mal größer als der Energieverbrauch der Menschheit

Auf  $1 \text{ m}^2$  würde ausreichend Energie zur Verfügung stehen für 1 Menschen  
1 Deutscher bräuchte ca.  $4 \text{ m}^2$

oder

in 30 Min. strahlt die Sonne den Jahresbedarf an Primärenergie auf die Erde

Die Symbole für die Einstrahlung sind:

$G_b$  [W/m<sup>2</sup>] für direkte Strahlung  
 $G_d$  [W/m<sup>2</sup>] für diffuse Strahlung  
 $G$  [W/m<sup>2</sup>] =  $G_b + G_d$  für globale Strahlung

### Reflexionsgrade für Solarstrahlung

Neuschnee	0,75 - 0,95
Altschnee	0,40 - 0,70
Sandboden	0,15 - 0,40
Wiesen und Felder	0,12 - 0,30
Straßen und Häuser	0,15 - 0,25
Wälder	0,05 - 0,20
dunkler Fußboden	0,07 - 0,10
Wasser	0,03 - 0,10

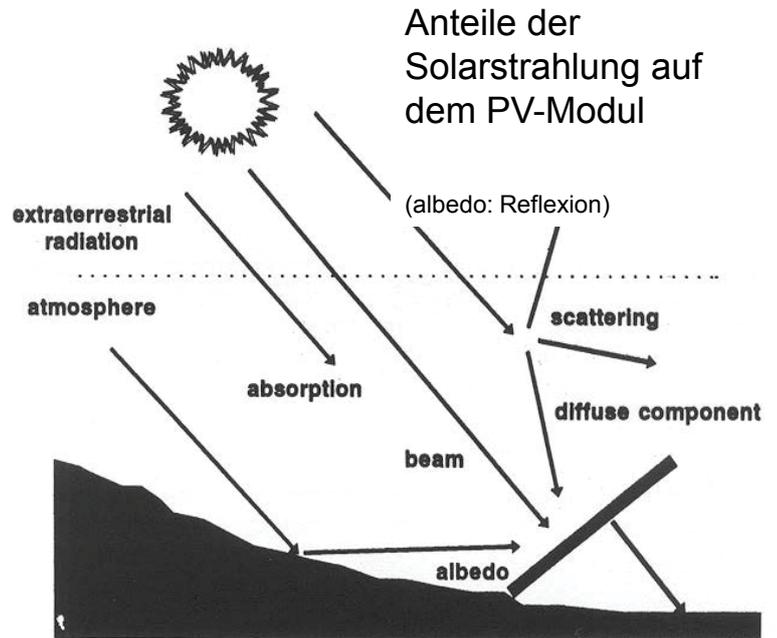
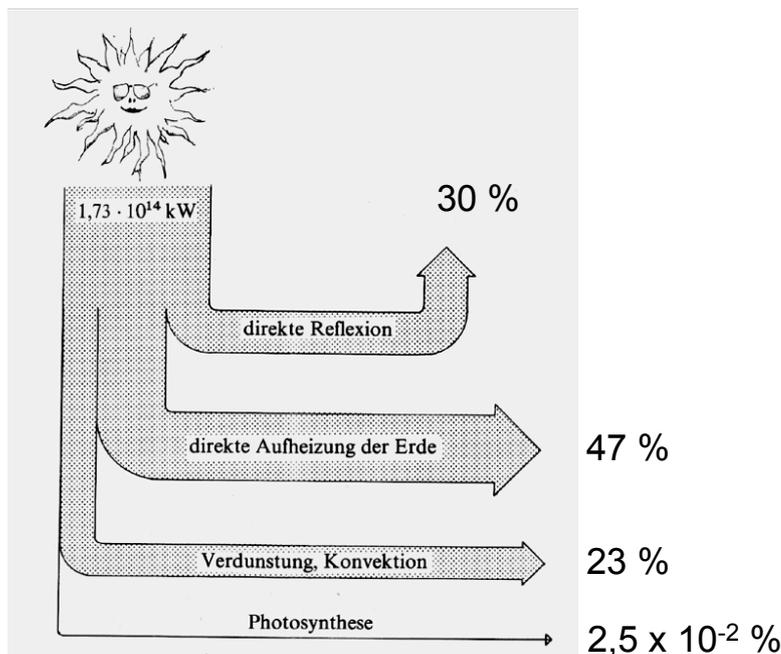


Fig. 2.1 Solar radiation in the atmosphere

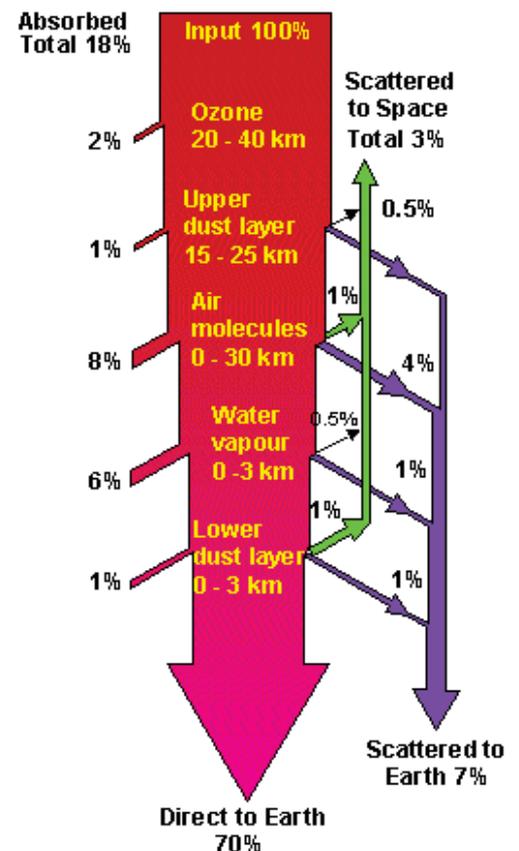
Source: Solar electricity, T. Markvart, 1997

Gesamtenergiestrom:  
Sonne → Erde  $1,73 \cdot 10^{14}$  kW davon

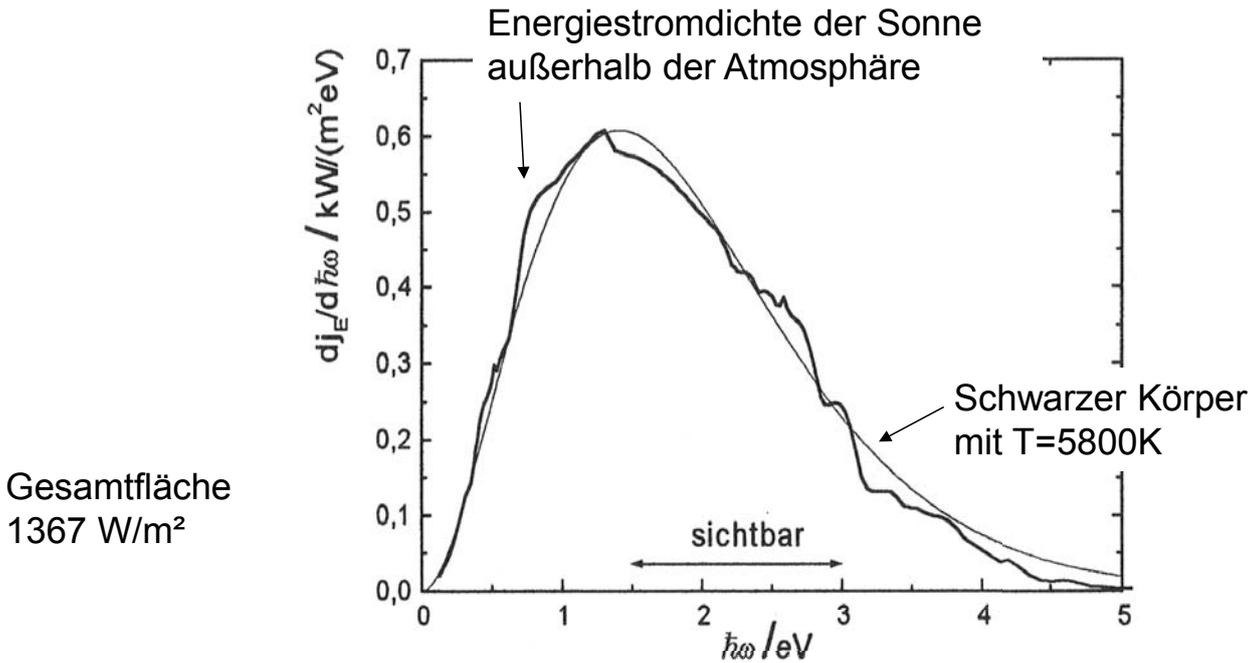


- ca. 30% direkte Reflexion
- ca. 47% direkte Aufheizung der Erde
- ca. 23% Verdunstung, Konvektion
- ca. 2,5 x 10<sup>-2</sup> % Photosynthese

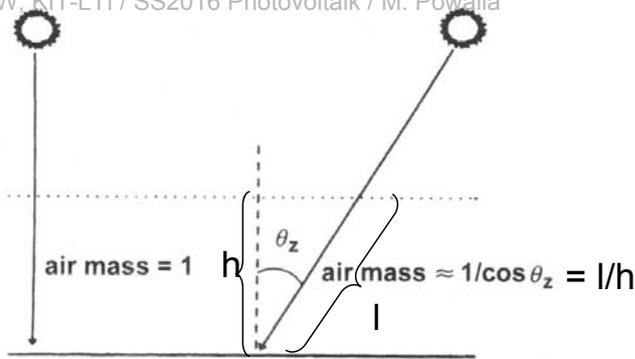
Absorption an einem typischen klaren Tag und Streuung des einfallenden Sonnenlichts (nach Hu and White, 1983)



# Sonnenspektrum



Sonne ist näherungsweise ein schwarzer Strahler,  $T_s = 5800 \text{ K}$ , ( $kT_s = 0.5 \text{ eV}$ )  
 Maximum bei  $2,8 kT_s = 1,41 \text{ eV}$   
 sichtbar von  $1,5 \text{ eV}$  bis  $3 \text{ eV}$   
 mittlere Energie der Photonen:  $1,35 \text{ eV}$   
 Beachte: Über der Wellenlänge aufgetragen ergibt sich das Max. bei  $550 \text{ nm}$ !



Der AM-Faktor beschreibt das Verhältnis der Längen der durchstrahlten Atmosphäre bzw. des Lichtweges.

Außerhalb der Atmosphäre: AM0

am Äquator  $\theta = 0$  ; AM1

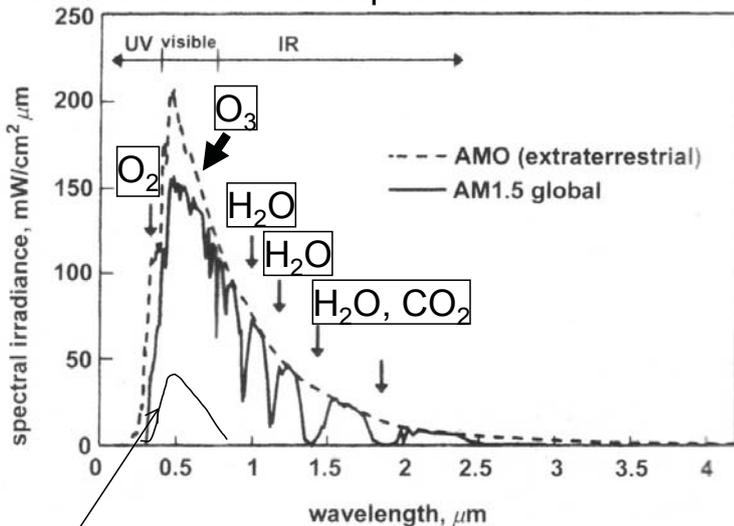
Deutschland Mittag  $\theta = 48,2$  ; AM1,5

Deutschland Abend  $\theta = 60^\circ$  ; AM2

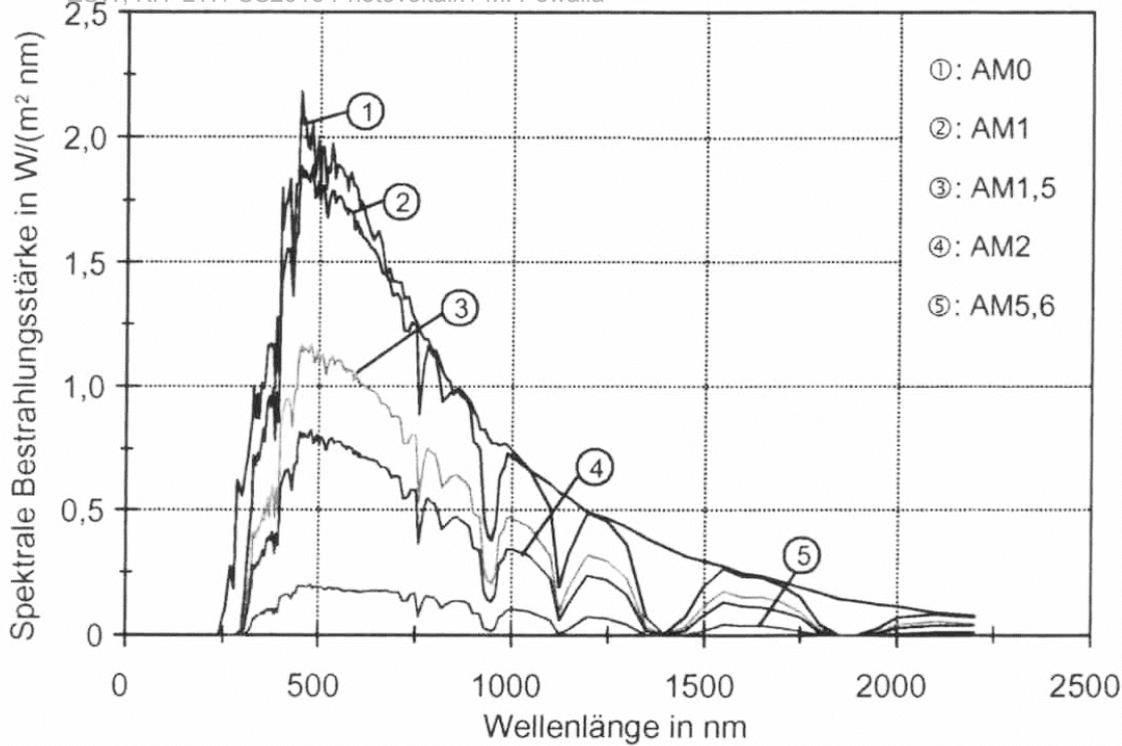
Experimentell:  
 $G_b = 1,353(0,7^{AM})^{0,678} \text{ kW/m}^2$

Transmission  $\sim 70\%$   
 diffus  $\sim 10\%$

$G \sim 1,1 \times G_b$



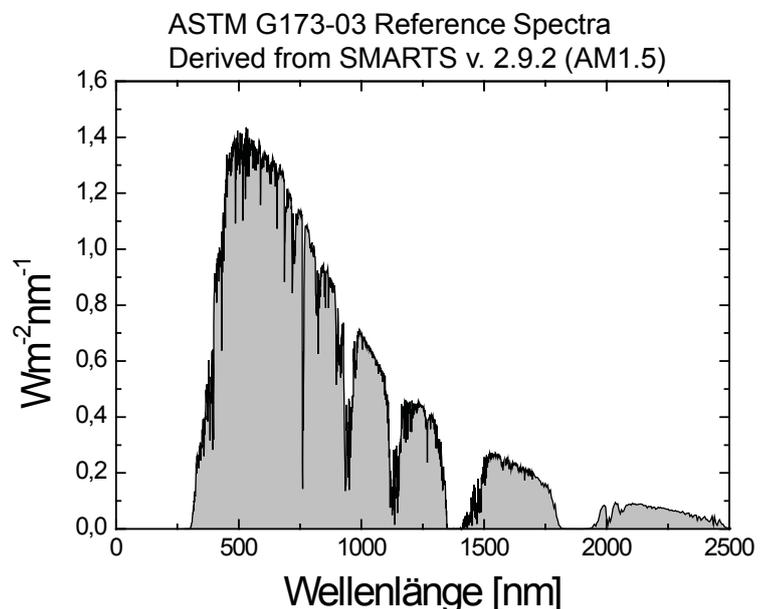
Diffusanteil: An bewölkten Tagen vorwiegend diffuse Strahlung im Sichtbaren



Spektrale Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche für verschiedene AM-Werte nach CIE-Publikation Nr. 85 /3.4/ (opt. Dicke Aerosol bei 500 nm = 0,2, optische Dicke Ozon = 0,3 atm-cm, Wasserdampfgehalt = 2,0 cm, Albedo = 0,2)

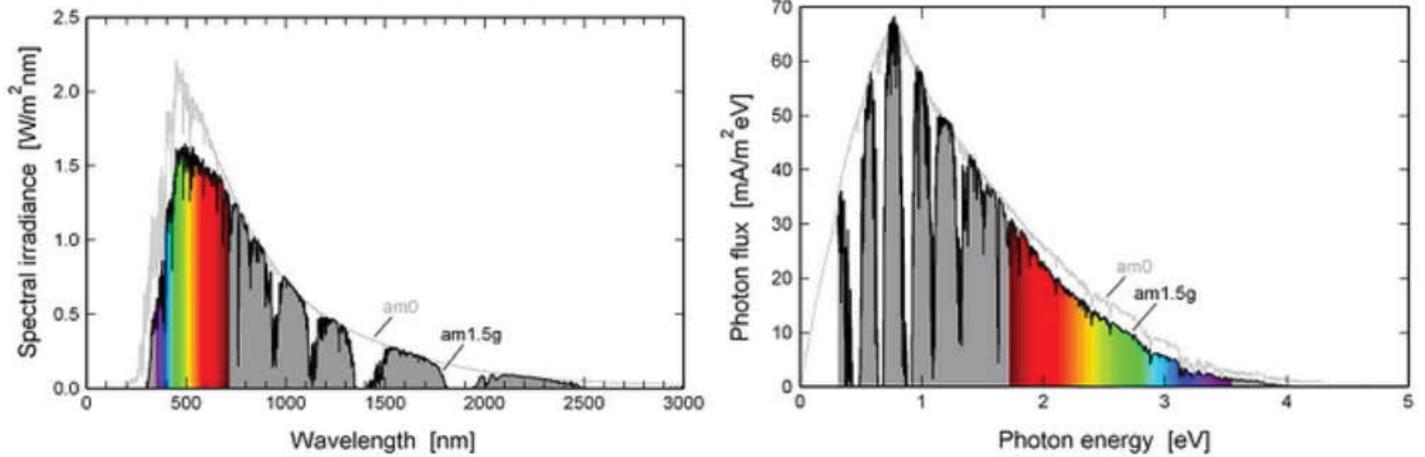
→ Rotverschiebung bei hohen AM Werten

- **Ozonschicht** ( $O_3$ ) in der Stratosphäre filtert Strahlung unter 300 nm heraus
- **Spurengase** ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ , Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Aerosole) in der Troposphäre **absorbieren** im Infraroten
- **Rayleigh-Streuung** erfolgt i. w. an den Luftmolekülen (mit Durchmesser  $< \lambda$ ).  
Streuquerschnitt proportional zu  $\lambda^{-4}$   
→ Blaue Strahlung wird stärker herausgestreut als rote
- **Mie-Streuung** an Staubteilchen und Verunreinigungen der Luft (Aerosole) mit Durchmesser  $> \lambda$   
- im Hochgebirge gering, stärker in Industriegebieten



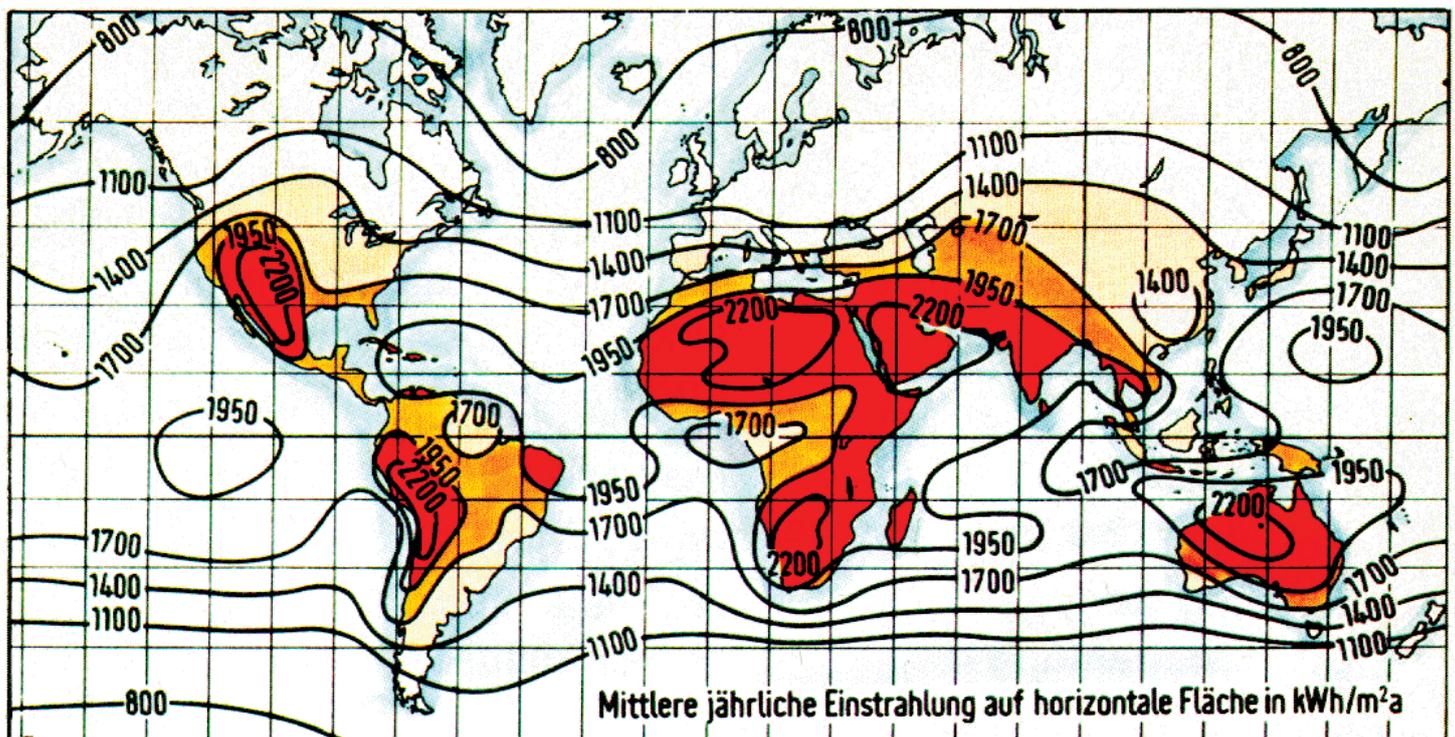
# Mehr als die Hälfte der Photonen ist im Bereich des IR

Spektrale Strahlung im Vergleich zum Photonenfluss



Aus diesem Vergleich wird klar warum in der PV große Anstrengungen unternommen werden auch das IR sehr gut auszuwerten. (Jedes Photon erzeugt ein „freies“ Elektron/Loch Paar.)

## Typische Werte der Globalstrahlung der Erde

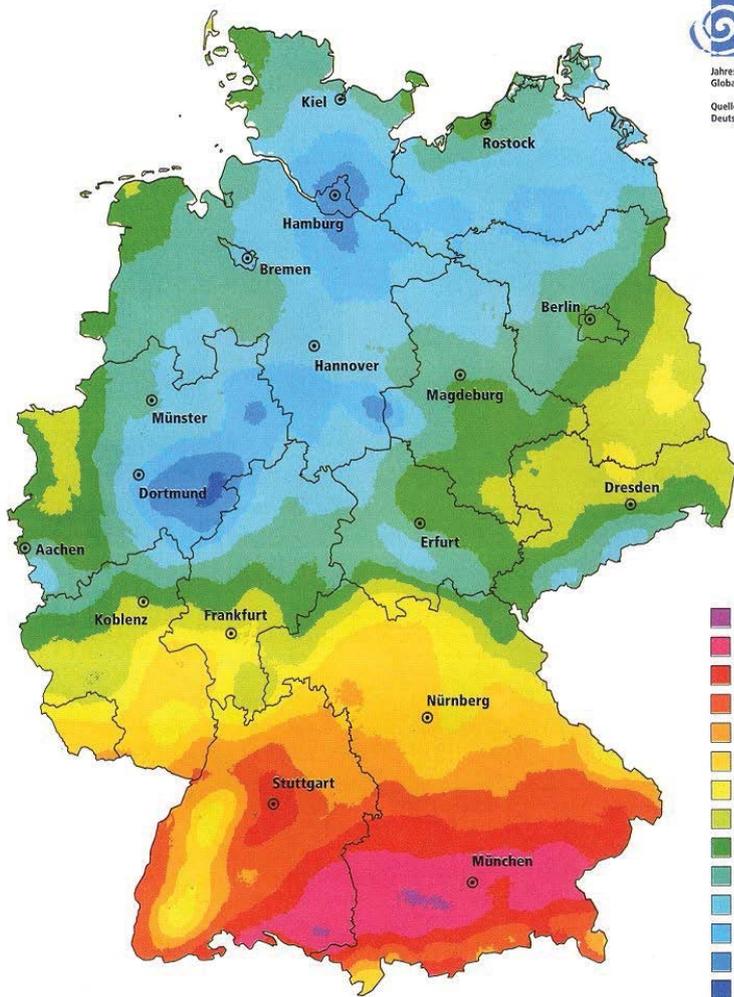
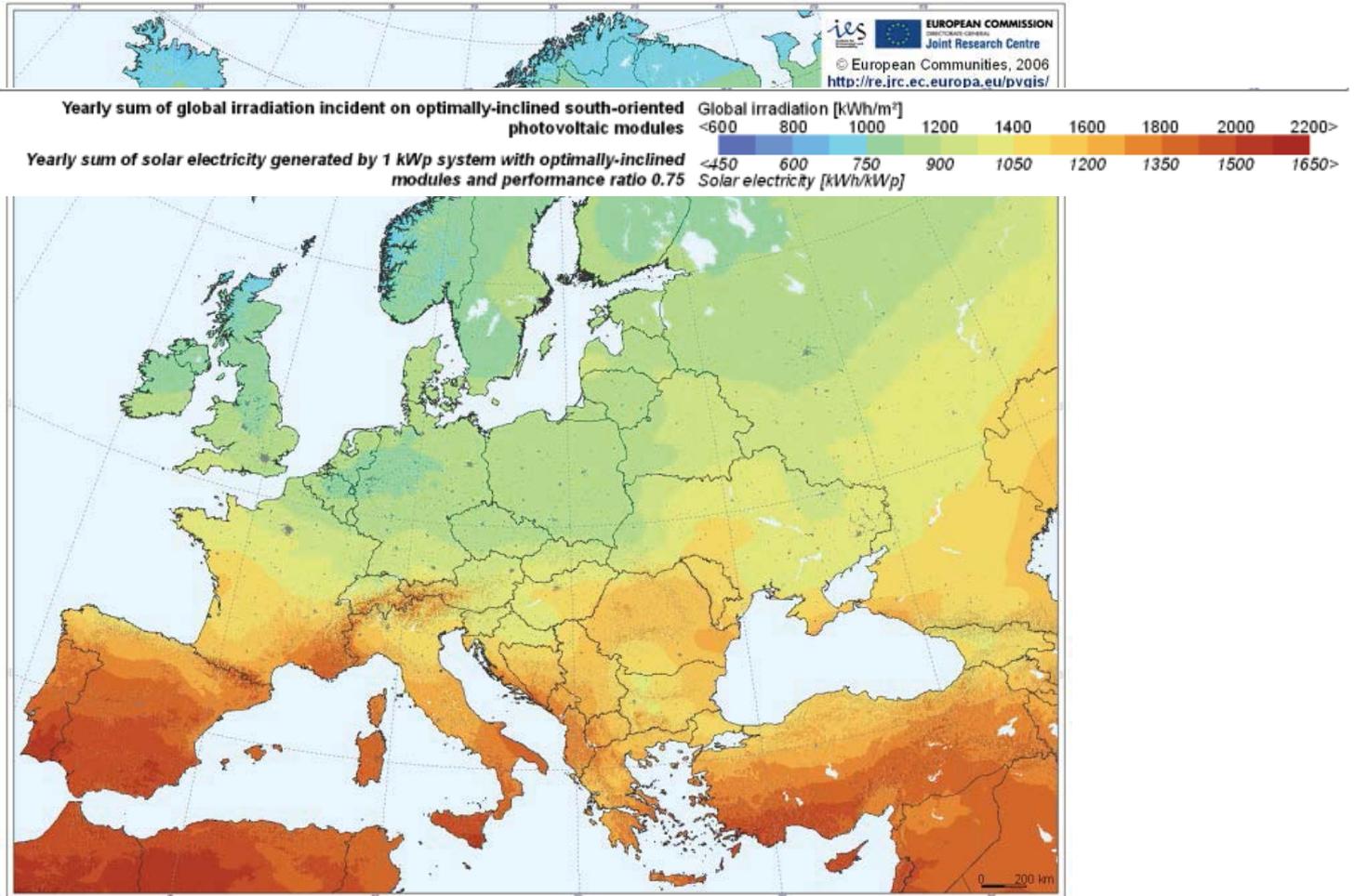


Mittlere jährliche Einstrahlung auf horizontale Fläche in kWh/m<sup>2</sup>/a

Mitteleuropa: ca. 2.200 kWh/m<sup>2</sup>/a

Afrika ca. 1.100 kWh/m<sup>2</sup>/a

ZSW, KIT-LTI / SS2016 Photovoltaik / M. Powalla  
 Europa: Mittlere jährliche Einstrahlung auf optimal südorientierte Fläche in kWh/m<sup>2</sup>/a  
 PV Potenzial



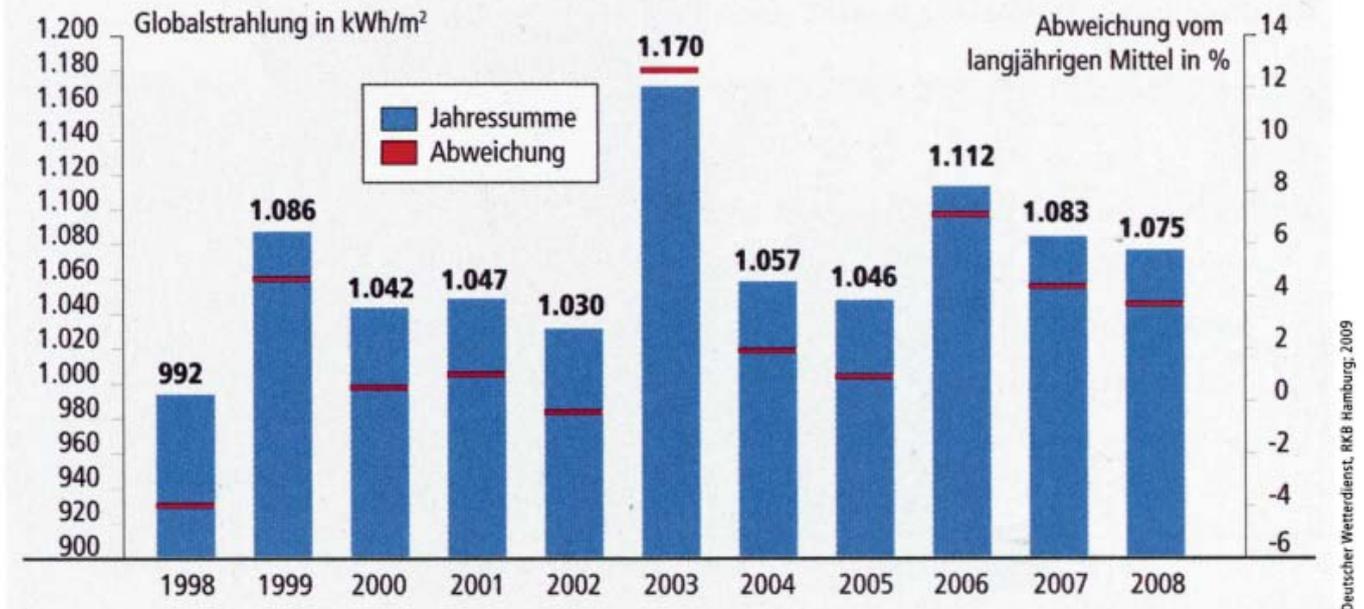
Jahressumme der  
 Globalstrahlung in kWh/m<sup>2</sup>  
 Quelle:  
 Deutscher Wetterdienst

Karte der Globalstrahlung  
 in Deutschland,  
 Jahreswerte 2002 in kWh/m<sup>2</sup>

Quelle: DWD / Photon



## Entwicklung der Solarstrahlung in Deutschland

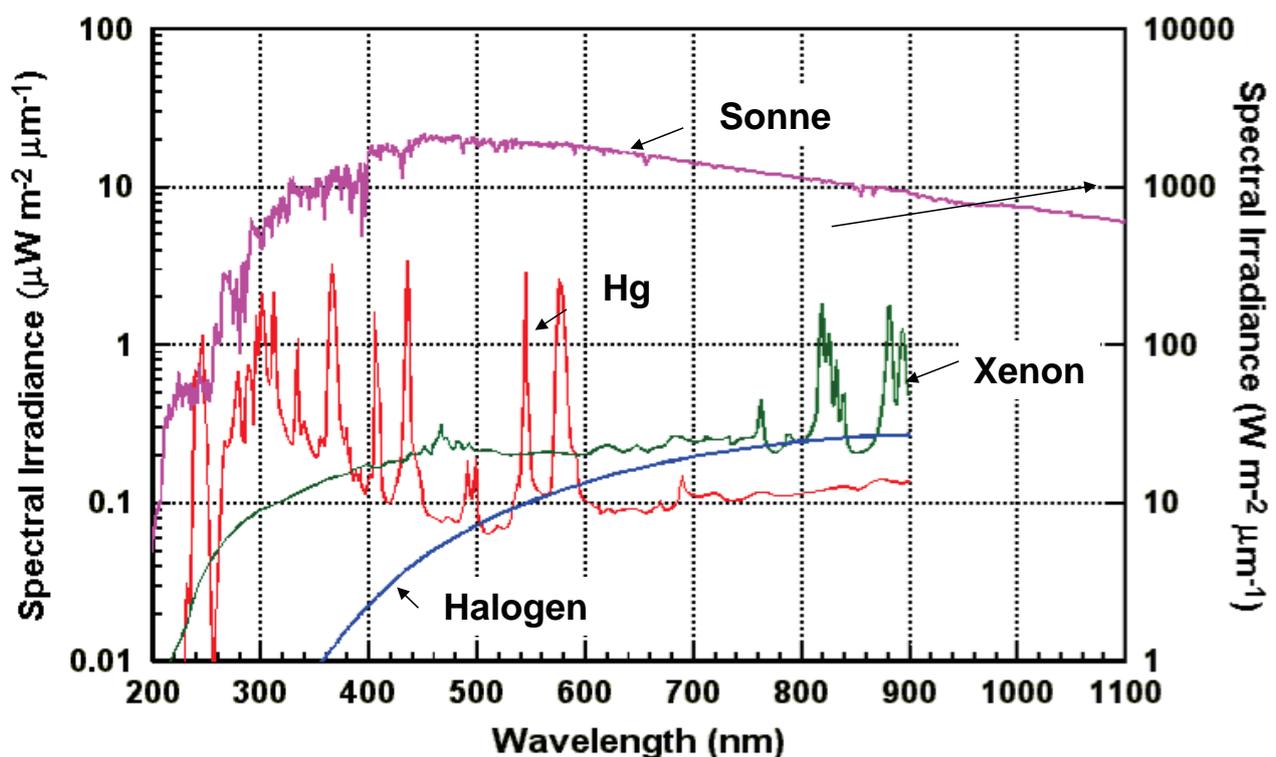


Die Grafik fasst die jährlichen Entwicklungen der Einstrahlungsverhältnisse in Deutschland seit 1998 zusammen, indem die Jahressummen und deren Abweichungen vom vieljährigen Mittelwert aufgezeigt werden

Quelle: Photon 2/2009

- Bei Bewertungen von PV Anlagen müssen diese Schwankungen berücksichtigt werden.
- Die tageszeitlichen und jahreszeitlichen Änderungen, siehe Kapitel 7.

## Vergleich verschiedener Strahlungsquellen



## Das Referenzspektrum für die terrestrische Photovoltaik:

IEC-Norm (im Wesentlichen von ASTM übernommen)

Standardspektrum der Globalstrahlung (Zenitwinkel der Sonne 48,19°)

Empfängerfläche 37° geneigt

==> Einfallswinkel Sonnenstrahlung/Empfängerfläche 11,19°

**Air Mass: 1,5** (opt. Dicke: Ozon = 0,34atm-cm, Aerosol bei 500 nm 0,27 atm-cm)

Albedo = 0,2, Luftdruck 1013 mbar, Wasserdampfgehalt 1,42 cm

**Gesamtenergiestromdichte: 1000 W/m<sup>2</sup>**

**(Für Weltraumanwendungen wird AM0 verwendet.)**

Warum?

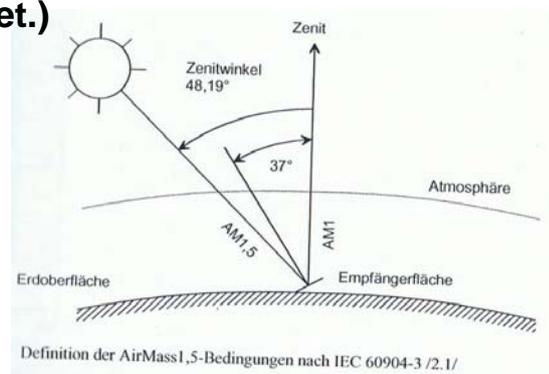
37° entspricht der mittleren geografischen

Breite aller 48 US-Staaten

50 % der Energieeinstrahlung in US auf

eine nach Süden geneigte Fläche mit

Winkelbereich >AM 1,5



Quelle: TÜV, Herrmann

Von der Erde aus gesehen hat die Sonne einen Winkeldurchmesser  $\alpha_S = 32'$

Raumwinkel:  $\Omega_S = 6,8 \cdot 10^{-5}$

→ Es ist also fast parallel.

Der Energiestrom zur Erde ist genauso groß wie von einer Scheibe mit dem Radius der Sonne.

### Strahlung in unserem Sonnensystem

Planet	Distance (x 10 <sup>9</sup> m)	Solar Constant (W/m <sup>2</sup> )
Mercury	57	8908.0
Venus	108	2481.3
Earth	150	1286.3
Mars	227	561.7
Jupiter	778	47.8
Saturn	1426	14.2
Uranus	2868	3.5
Neptune	4497	1.4
Pluto	5806	0.9

## 2.3 Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz

Wie verhalten sich nicht-schwarze Strahler?

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

$\varepsilon$  Emissionsgrad

$r$  Reflektionsgrad

$t$  Transmissionsgrad  
( $0 < \dots < 1$ )

Einfallende Strahlung wird entweder reflektiert, absorbiert oder transmittiert:  
(a: Absorptionsgrad)

$$r + t + a = 1$$

Die Strahlung wird entweder reflektiert, transmittiert oder absorbiert.

Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz:

Im thermischen Gleichgewicht gilt:  
Emissionsgrad gleich Absorptionsgrad!

$$\varepsilon(\hbar\omega) = a(\hbar\omega)$$

Ein nicht-schwarzer Körper strahlt im Energieintervall  $d(\hbar\omega)$   
in den Raumwinkel  $d\Omega$

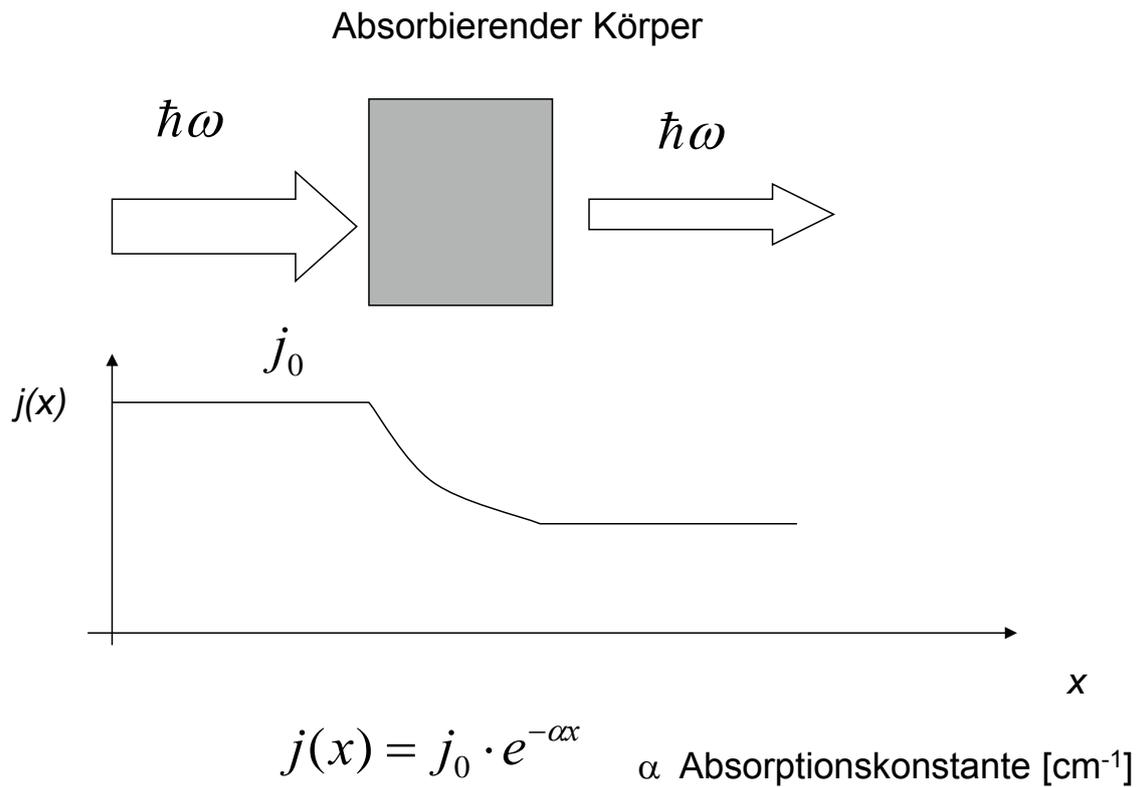
$$dj_E(\hbar\omega) = \frac{a(\hbar\omega)d\Omega}{4\pi\hbar^3c^2} \cdot \frac{(\hbar\omega)^3}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$$

Der Absorptionsgrad  $a(\hbar\omega)$  hängt mit der Absorptionskonstanten  $\alpha(\hbar\omega)$  zusammen.

$\alpha(\hbar\omega)$  Absorptionskonstante: Materialeigenschaften

$a(\hbar\omega)$  Absorptionsgrad: Körpereigenschaften inkl. Geometrie

## Beer'sches Gesetz



Unter Vernachlässigung von Vielfachreflektion gilt für die Transmission einer Platte mit der Dicke  $d$ :

$$t(\hbar\omega) = [1 - r(\hbar\omega)] \cdot e^{-\alpha(\hbar\omega)d}$$

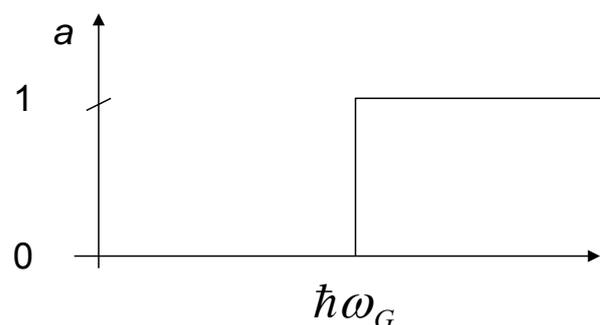
$$a = 1 - r - t$$

$$\Rightarrow a(\hbar\omega) = [1 - r(\hbar\omega)] \cdot (1 - e^{-\alpha(\hbar\omega)d})$$

Bei Halbleitern gibt es eine „Grenzenergie“:

$$a(\hbar\omega \geq \hbar\omega_G) = 1$$

$$a(\hbar\omega \leq \hbar\omega_G) = 0$$

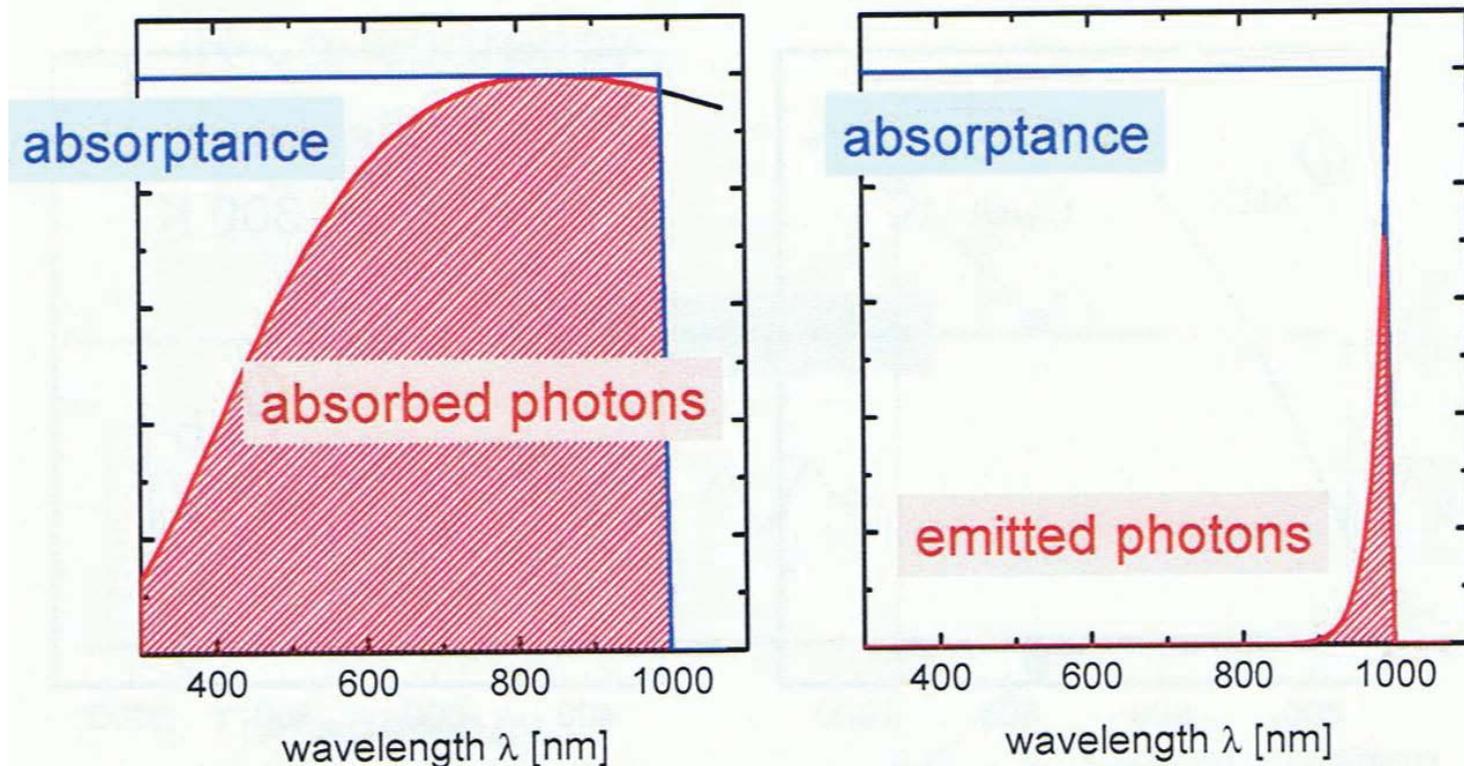


Umkehrung: Ein HL strahlt wie ein schwarzer Strahler dessen Spektrum für  $\hbar\omega \leq \hbar\omega_G$  abgeschnitten ist.

Wie sieht die Bilanz bei einem HL aus?

(Achtung: y-Achsen unterschiedlich skaliert!)

Die Sonne strahlt mit  $T \approx 6000\text{K}$ , der Halbleiter mit  $T \approx 300\text{K}$ .



Quelle: T. Kirchartz

## Vielfachreflexion, Fresnelgleichungen

Beschreibung von Licht mit elektrischen und magnetischen Feldern, die zeitlich und räumlich oszillieren.

$$E = E_0 \cdot e^{-i(\omega t - kx)} \quad , k = \frac{2\pi}{\lambda}, c = \frac{\omega}{k} \quad , E = E_0 \cdot e^{-i\omega\left(t - \frac{n}{c}x\right)}$$

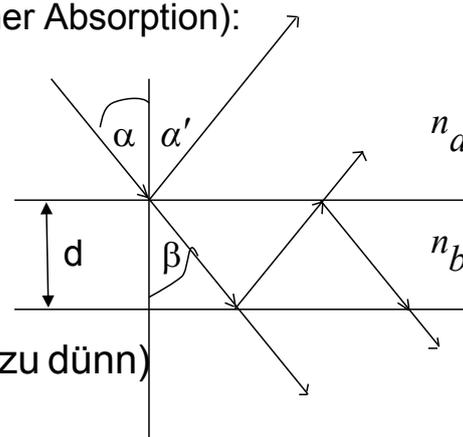
Reflexionsgesetz:  $\alpha = \alpha'$

Brechungsgesetz:  $n_a \sin \alpha = n_b \sin \beta$

Reflexion/Transmission an einer Grenzfläche (schwacher Absorption):

$$R = \left[ \frac{\cos \alpha - \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}}{\cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right]^2 \stackrel{\alpha=0}{=} \frac{(1-n)^2}{(1+n)^2}$$

$$T = \left[ \frac{2 \cos \alpha}{\cos \alpha + \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right]^2 \stackrel{\alpha=0}{=} \left( \frac{2}{1+n} \right)^2 \quad , n = \frac{n_b}{n_a}$$



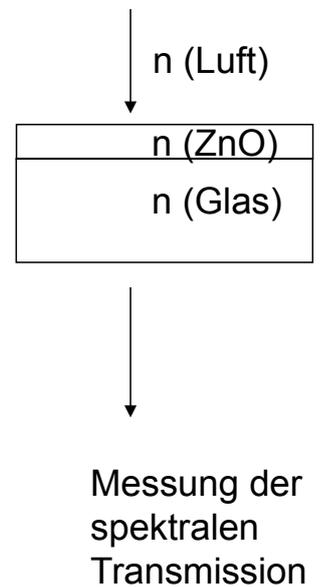
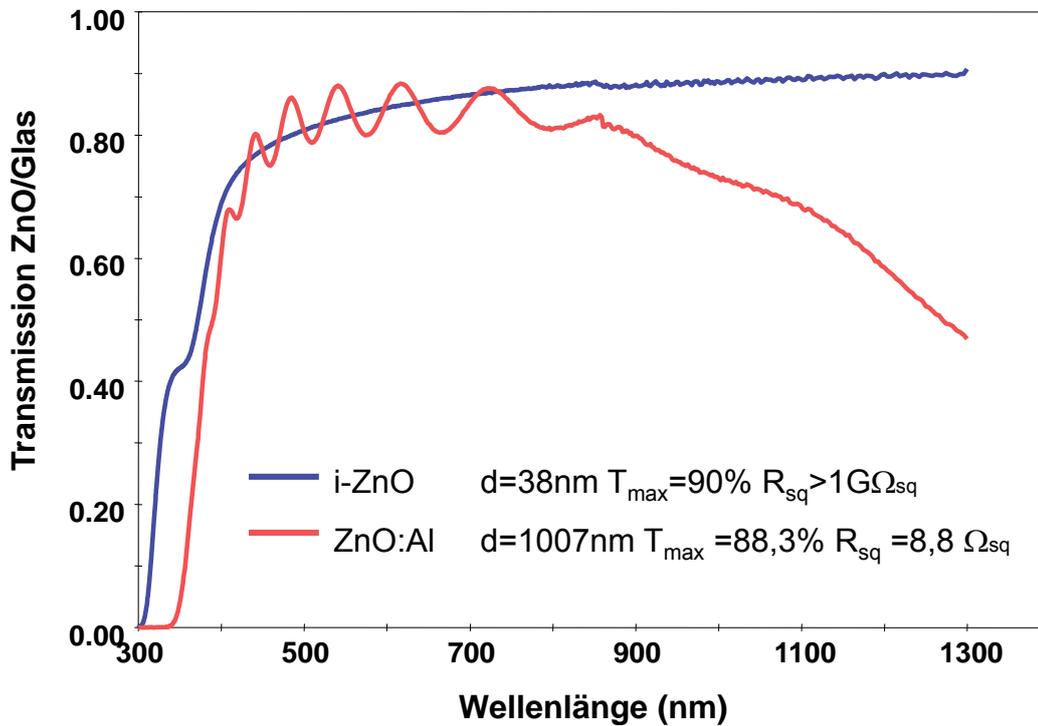
Totalreflexion (nur im Übergang von optisch dicht zu dünn)

$$\sin \alpha_G = n \quad (n_a > n_b)$$

# ZnO – Schicht auf Glas: Entstehung von Interferenzen

**i-ZnO:** niedrig dotiert ca.  $10^{18}/\text{cm}^3$ , dünn

**ZnO:Al:** hoch dotiert ca.  $10^{20}/\text{cm}^3$ , dick



## Antireflexschichten:

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$

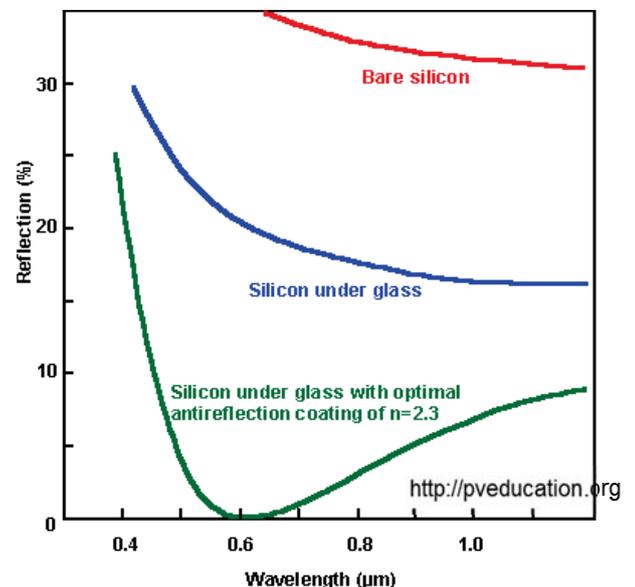
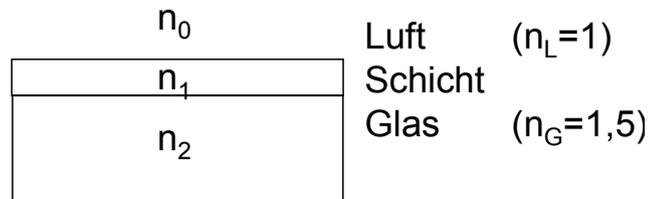
$$R_{\min} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_0 n_2}{n_1^2 + n_0 n_2}} \quad n_1^2 = n_0 n_2$$

$$\Rightarrow n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$$

$R_{\min} = 0$  für bestimmte Wellenlängen und Schichtdicken („ $\lambda/4n$  Plättchen“)

Beispiel:

	n
Si	3,5
SiO <sub>2</sub> :	1,4 - 1,5
MgF <sub>2</sub> :	1,3 - 1,4



Vorbild Natur: Mottenaugeneffekt  $n_{\text{eff}}$  (Strukturgrößen ca. 300nm („Nanotechn.“))  
 Verbesserung der Lichteinkopplung durch Schrägeinfall + Totalreflektion

## 2.4 Basisgleichungen

Die Ladungsdichte  $\rho(\vec{r}, t)$  und die Stromdichte  $\vec{j}(\vec{r}, t)$  legen die Felder  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  und  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  fest durch ihre Quellen (div) und Wirbelstärken (rot).

Poisson, Amper'sches Gesetz sind 2 der 4 Maxwellgleichungen

1.  $\text{div } \vec{B} = 0$  keine magnetische Ladungen; geschlossene Linien

2.  $\text{div } \vec{D} = \rho \xrightarrow{\text{1d}} \epsilon_r \frac{d\vec{E}}{dx} = \rho(x)$  (Poissongleichung) ( $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$ )  
Die Ladung (Ladungsdichte  $\rho$ ) ist Quelle des elektrischen Feldes.

$$\epsilon_r \frac{d\vec{E}}{dx} = \rho(x) = q(n_D(x) + n_e(x) - N_A(x) - n_h(x))$$

Integration ergibt elektrisches Feld – Verarmungszone – typisches Beispiel

3.  $\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  Induktionsgesetz

4.  $\text{rot } \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} = \vec{J}_{\text{tot}}$  Ampère'sches Gesetz ( $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$ )

(Strom hat 2 Teile: 1. Der Leitungsstrom wird durch den Fluss von elektrischen Ladungsträgern wie Elektronen oder Ionen getragen.

2. Der Verschiebungsstrom wird durch die zeitliche Änderungsrate des elektrischen Flusses bestimmt.

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_h$$

$$q \mu_{e,h} n \vec{E} + q D_{e,h} \frac{dn_{e,h}}{dx}; \quad D_{n,h} = \frac{kT}{q} \mu_{e,h} \quad (\mu = \text{Beweglichkeit})$$

Aus den Maxwellgleichungen ist die Ausbreitung von Licht (Wellengleichung), Brechung (Fresnell-Gl.) herleitbar. In Materie gelten sie in modifizierter Form.

Kontinuitätsgleichung (Ladungserhaltung)  
in Maxwell enthalten:

$$\text{div } \vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ladung im Volumen kann sich nur ändern wenn sie rein oder raus fließt})$$

Sie ändert sich aber z. B. wenn e oder h generiert werden oder wenn sie rekombinieren.

In Materie:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} - \vec{P}(\vec{E}) \quad \mu_0 \vec{H} = \vec{B} - \mu_0 \vec{M}(\vec{B})$$

Im Vakuum gilt:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad \vec{E} \perp \vec{B}$$

Energiestromdichte:

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad \propto \vec{E}(\vec{r}, t) \times \vec{B}(\vec{r}, t)$$