



Solarenergie

Optik

Überblick für Heute: Optik

- Was ist Licht?
- Lichtstrahlen
 - Fermat'sches Prinzip
 - Reflexion und Brechung (Snellius'sches Gesetz)
- Eigenschaften optische Medien
 - Dispersion
 - Absorption
- Fresnel'sche Formeln
 - Polarisation
 - Reflexionsgrad
- Anti-Reflex-Schichten

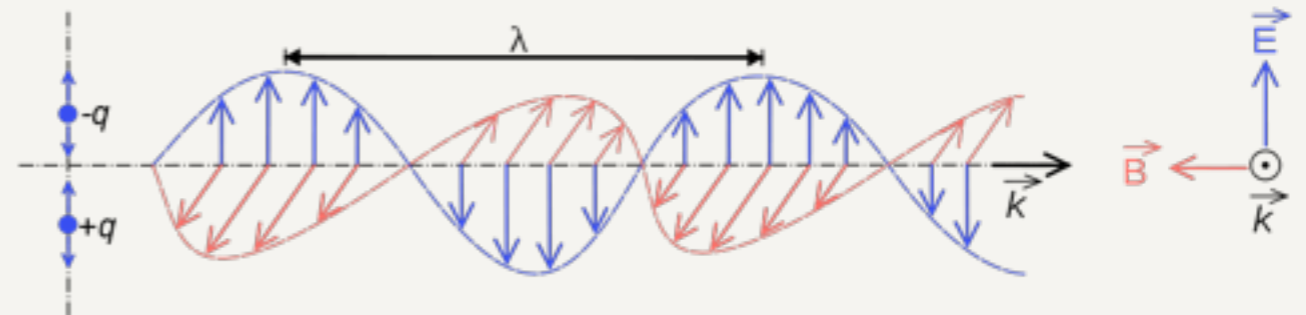
Was ist Licht?

Technische Erklärung

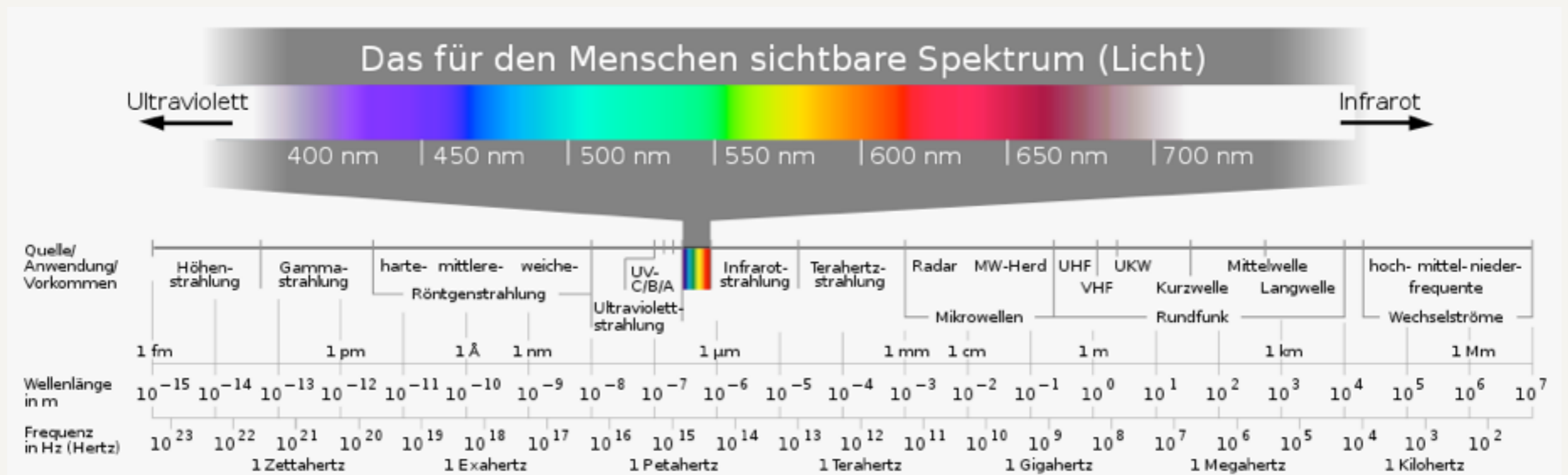
Quelle: Wikipedia
de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_Welle



- Elektromagnetische Welle
- Transversalwelle
- Polarisation

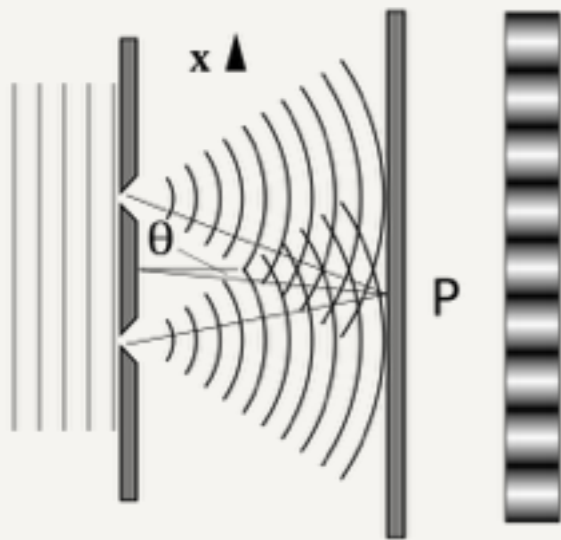


$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)}$$

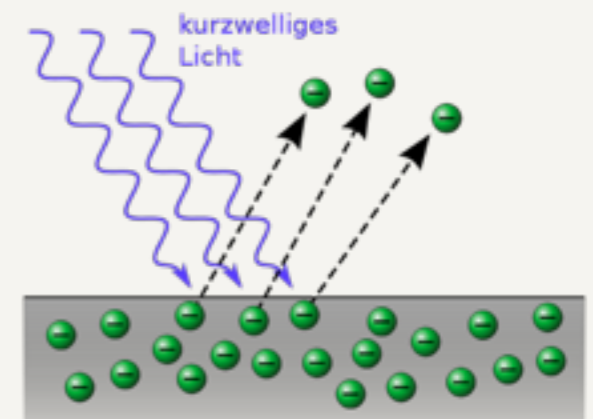


Was ist Licht?

Grundsätzliche Erklärung

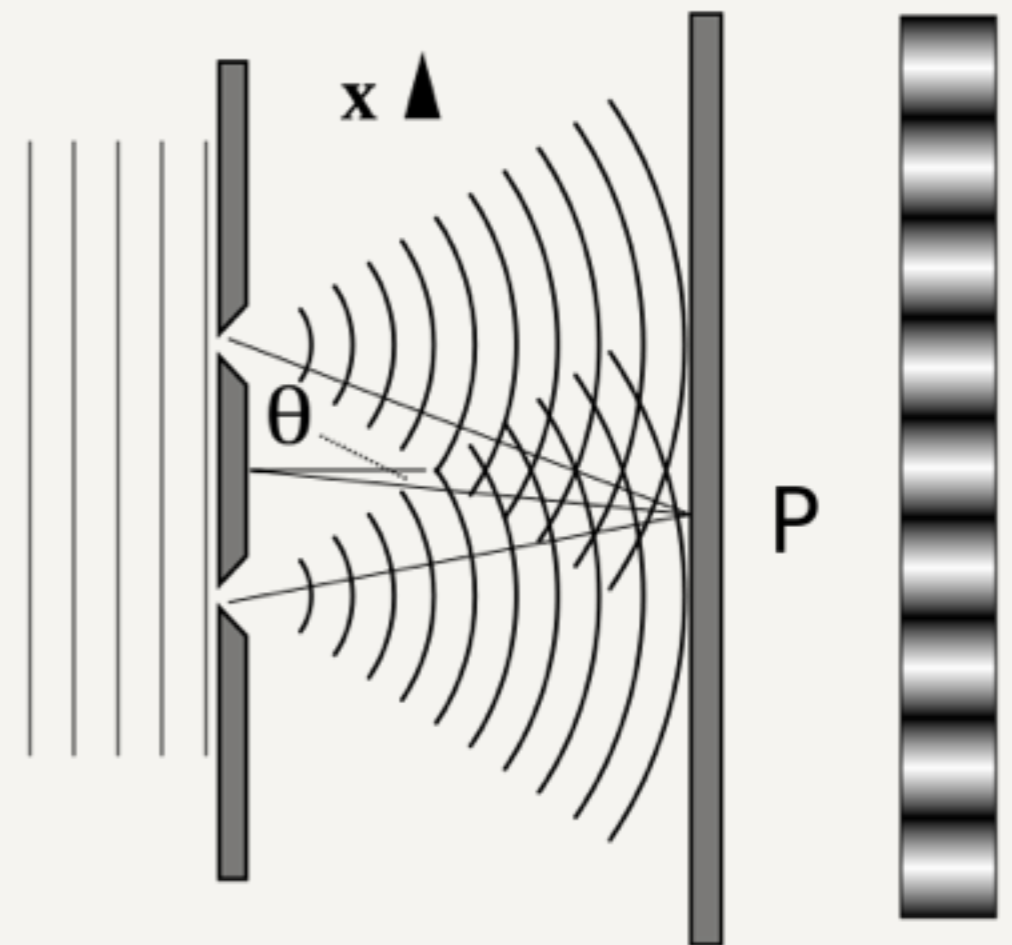


- Welle-Teilchen-Dualismus
 - Welle: Young'scher Doppelspalt (1802)
 - Teilchen: Einstein'scher Photoeffekt (1905)



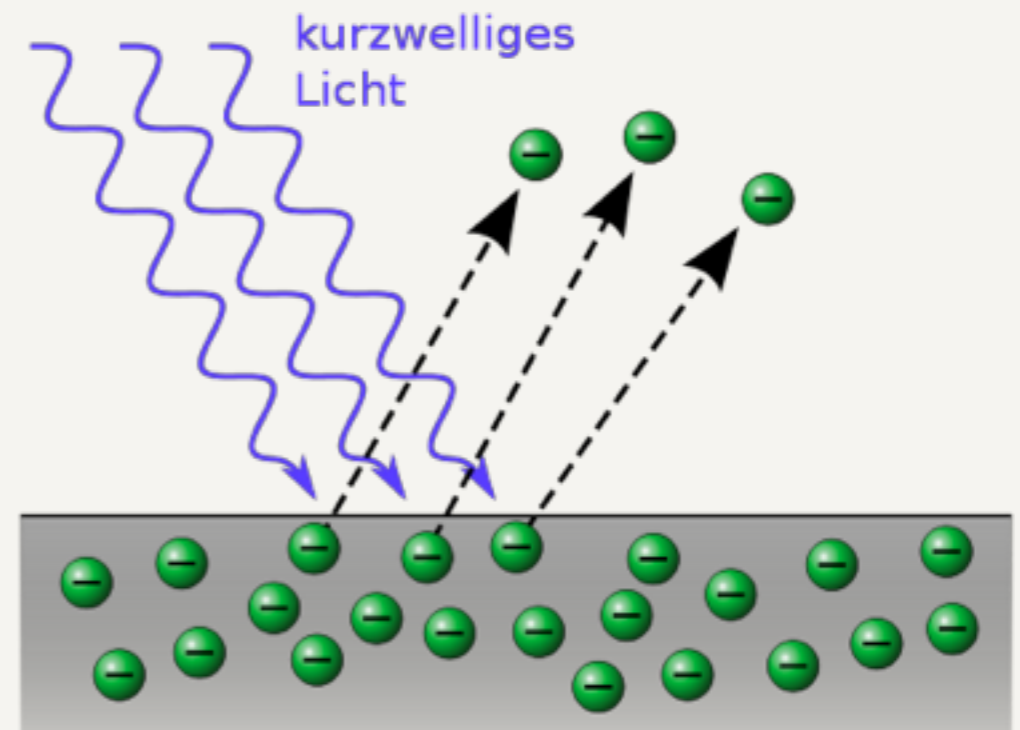
Young'sches Doppelspaltexperiment

- Zwei Elementarwellen gehen von den Spalten aus
- Aufgrund unterschiedlicher Phasen am Punkt P interferieren sie konstruktiv oder destruktiv
- Es entsteht ein Streifenmuster auf dem Schirm



Photoelektrischer Effekt nach Einstein

- Austrittsgeschwindigkeit der Elektronen hängt nicht von der Intensität sondern der Frequenz des Lichtes ab.
- Licht besteht aus Teilchen - den Photonen - mit einem Impuls.



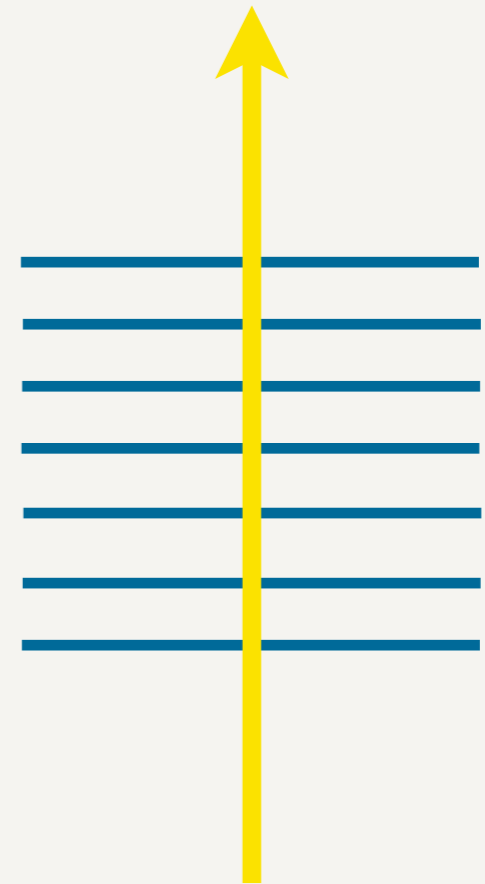
$$E = h\nu$$

$$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$$



Lichtstrahlen

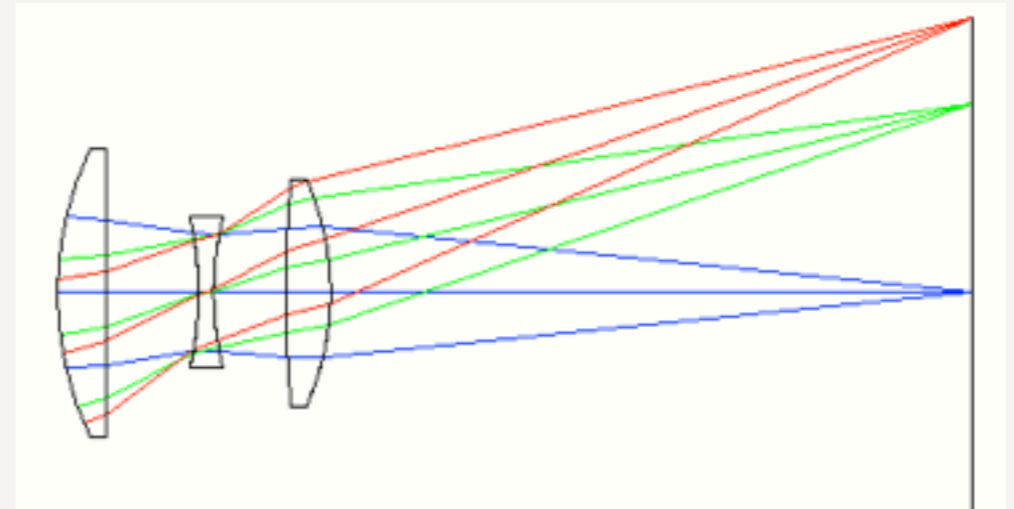
- Es gibt keine Lichtstrahlen!
- Lichtstrahlen sind ein sehr praktisches Hilfskonstrukt zur Veranschaulichung.
- Sie stellen den physikalisch wichtigen Grenzfall der ebenen Welle dar.
- Lichtstrahlen können gebraucht werden, wenn alle relevanten Maße des optischen Systems groß im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts sind.



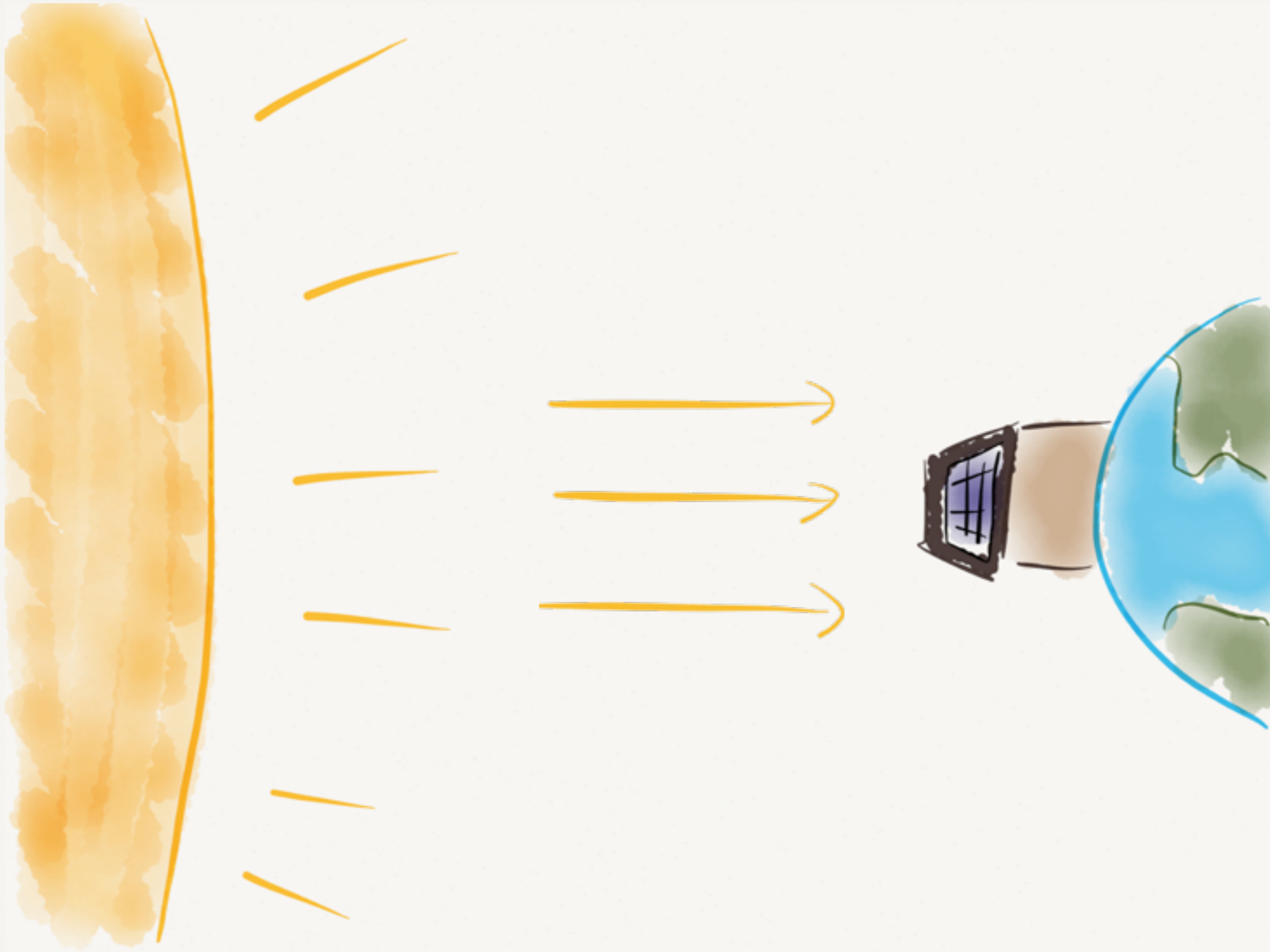
Lichtstrahlen

Quelle: Zemax Corp.

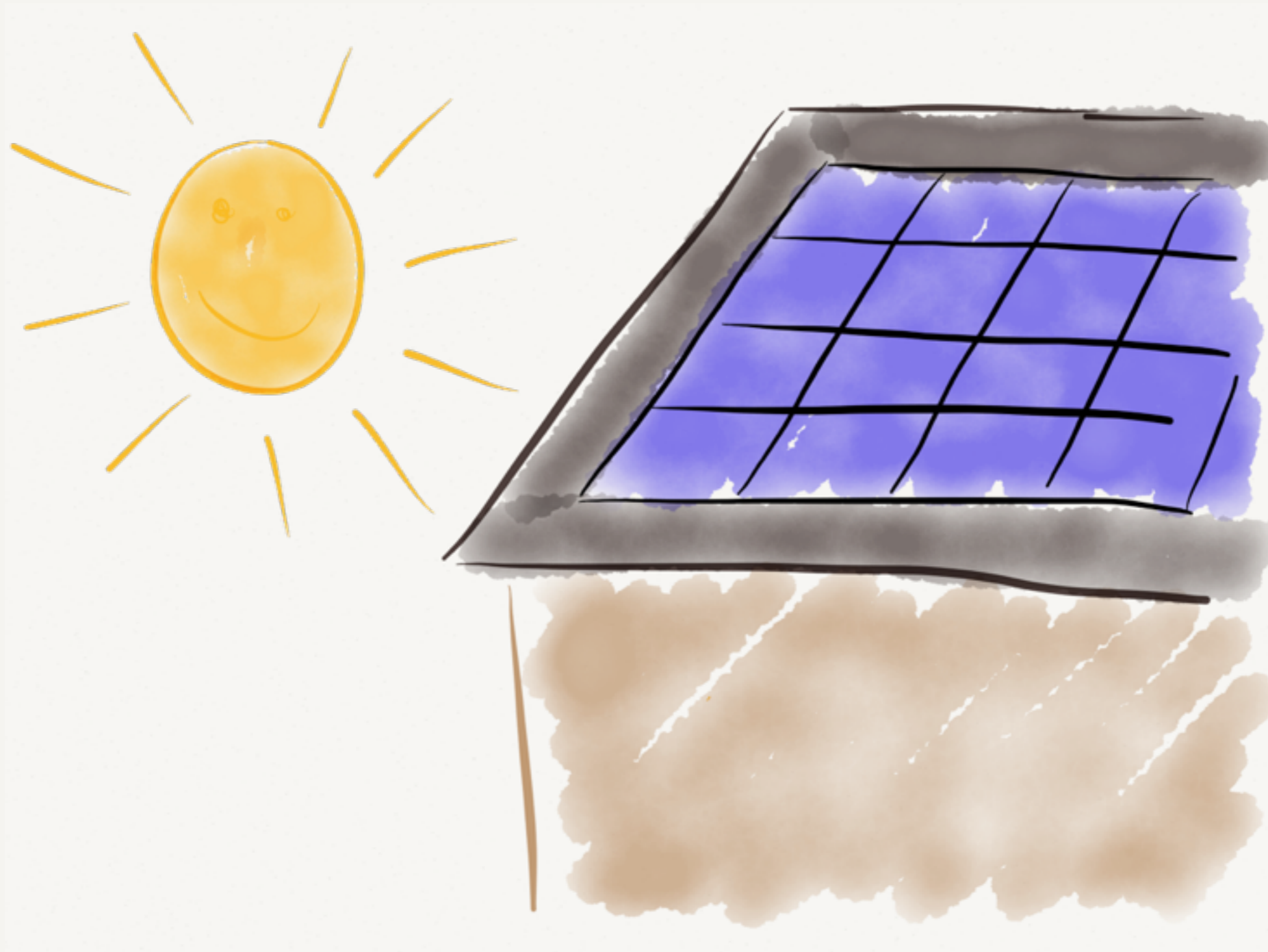
- Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge von 400nm bis fast 800nm.
- Beispiel für Lichtstrahlen: Kameraobjektiv
- Gegenbeispiel: CD in Reflexion betrachtet. Die Bits sind 1 bis 2 μm groß.



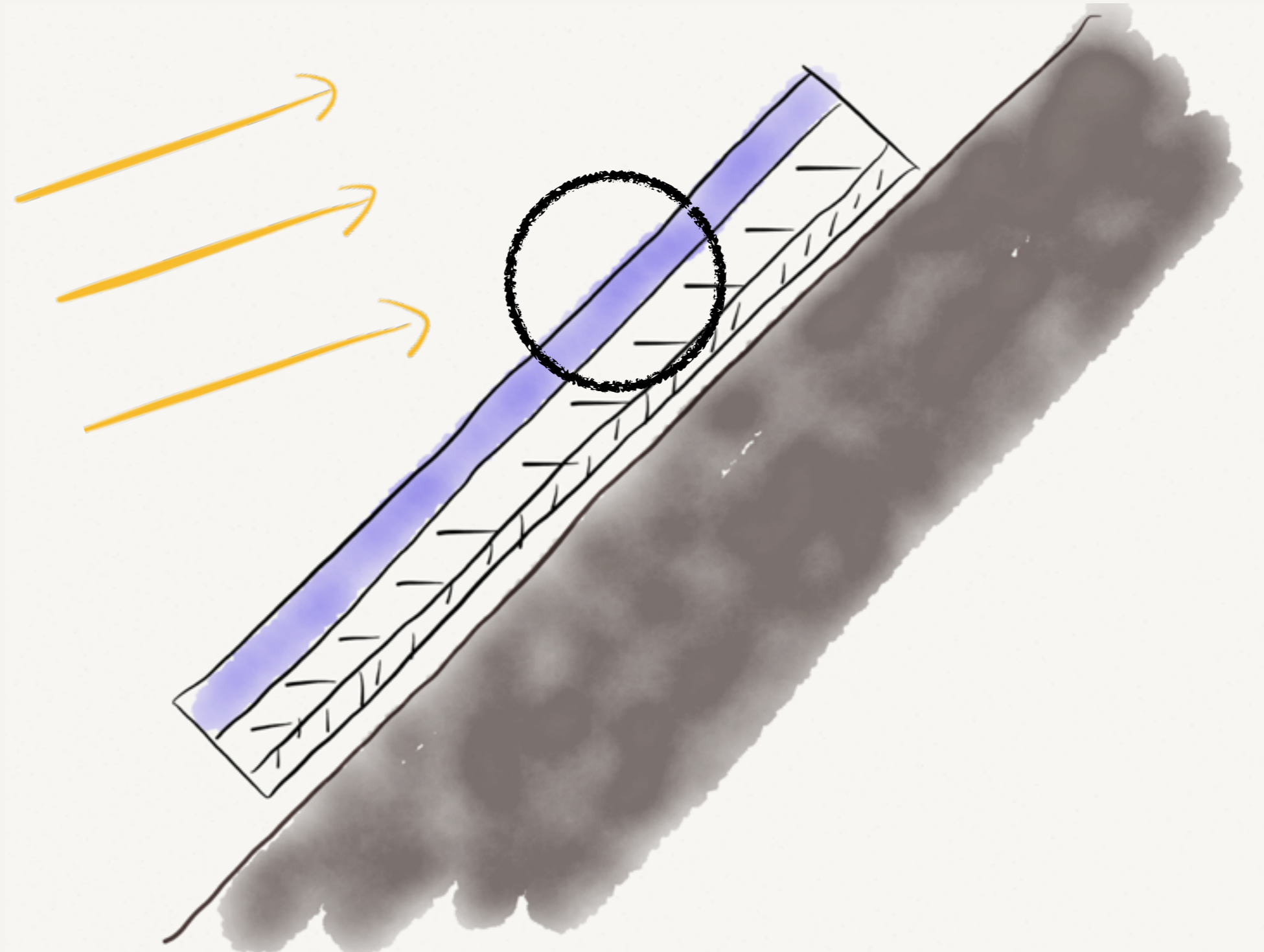
Optik und Solar



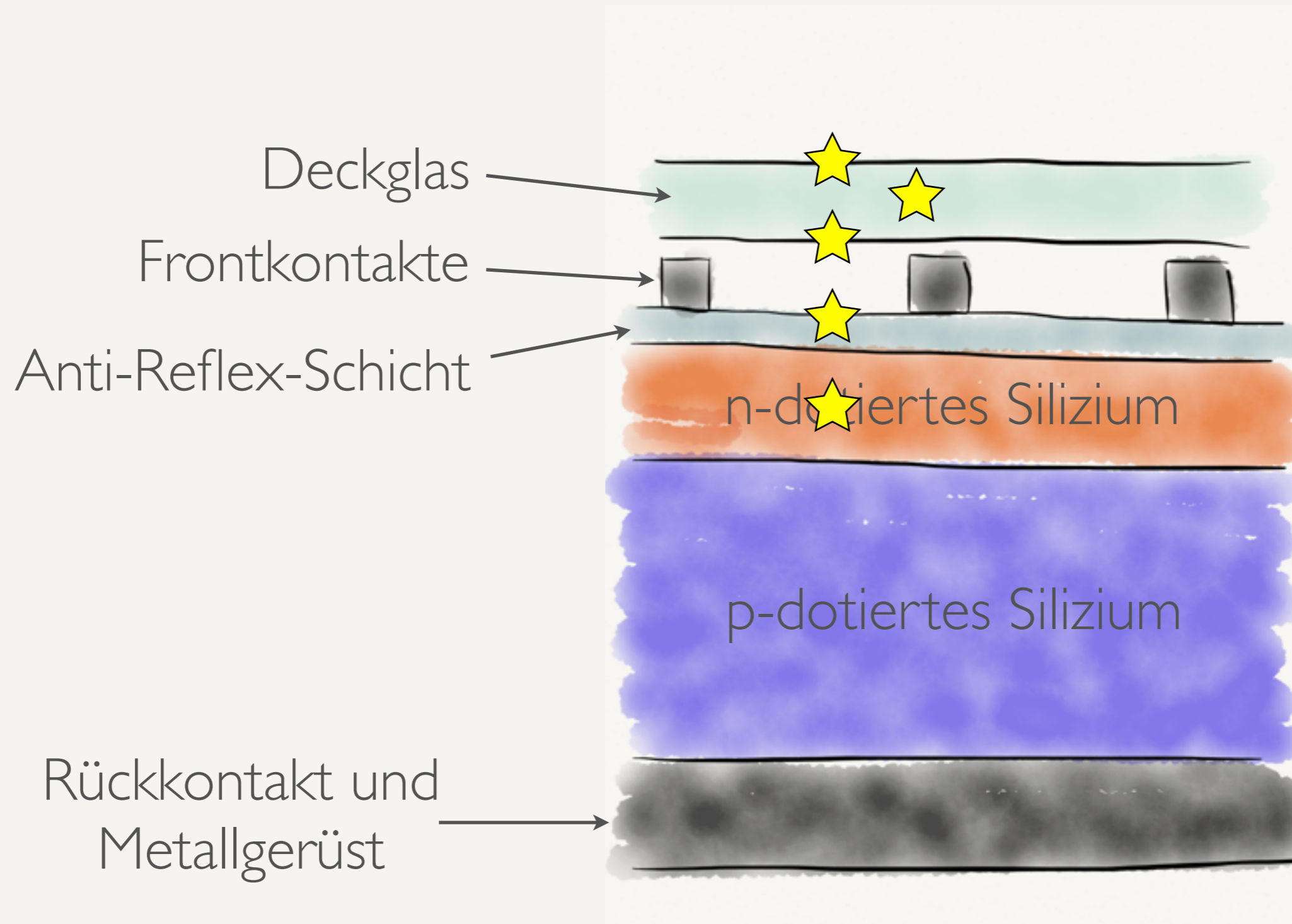
Optik und Solar



Optik und Solar



Optik und Photovoltaik



Fermat'sches Prinzip

Quelle: Wikipedia



- Welchen Weg nehmen die Lichtstrahlen?
- Schon bei den alten Griechen bekannt: Licht nimmt bei Reflexion die kürzeste Strecke
- Das inspirierte Pierre de Fermat im 17. Jahrhundert zu der Formulierung des Prinzips:



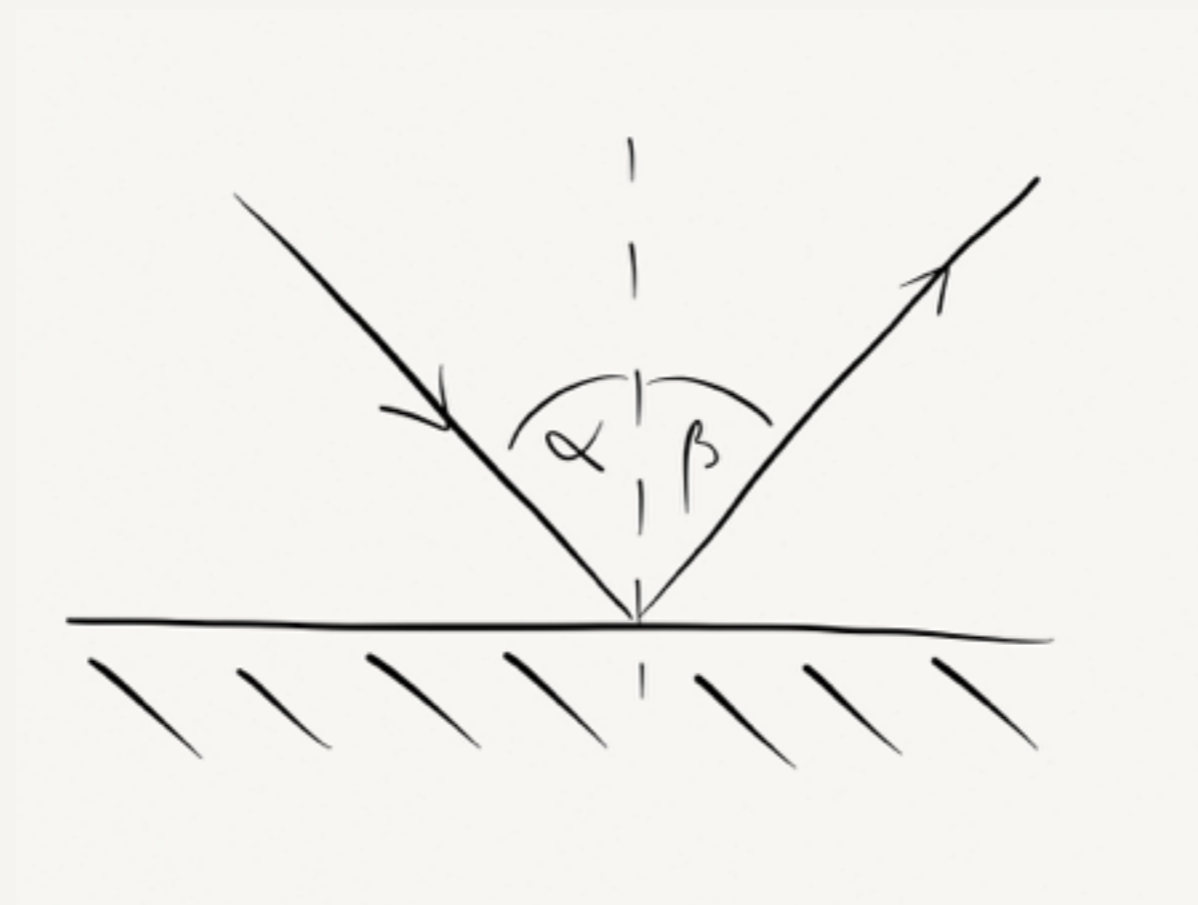
Licht nimmt immer den Weg, der am wenigsten Zeit benötigt.

Reflexionsgesetz

- Reflexionsgesetz:

$$\alpha = \beta$$

- Einfallswinkel = Ausfallswinkel



Lichtgeschwindigkeit in Medien

- In unterschiedlichen Materialien (Glas, Wasser) ändert sich die Lichtgeschwindigkeit:

$$c_0 = n \cdot c_M$$

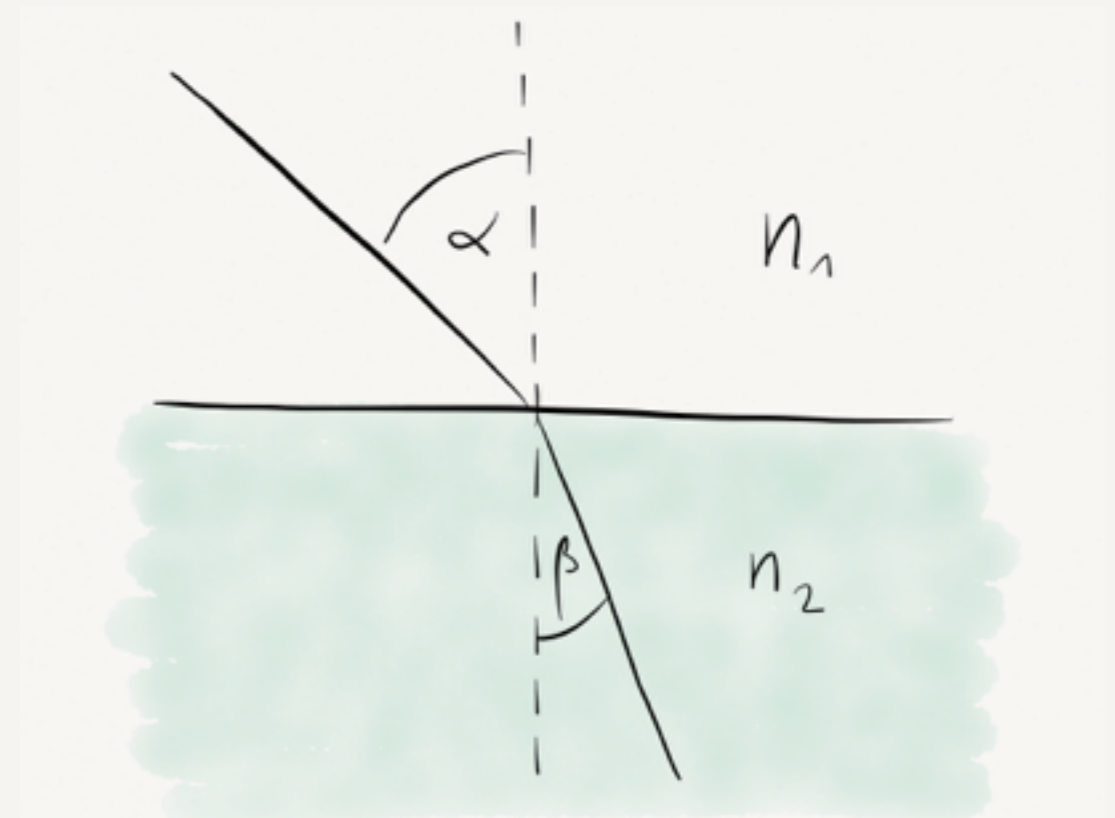
- Die Proportionalitätskonstante n nennt man „Brechungsindex“

Material	Brechungsindex
Luft	1.00
Wasser	1.33
Glas	1.52
Diamant	2.42

Medien mit hohem Brechungsindex nennt man optisch dicht.

Snellius'sches Brechungsgesetz

- Lichtgeschwindigkeit in einem Medium ist langsamer als im Vakuum
- Darum ist die schnellste Strecke nicht mehr eine Gerade
- Merkbeispiel: Rettungsschwimmer rettet ertrinkenden Schwimmer (am Strand schneller als im Wasser).



$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

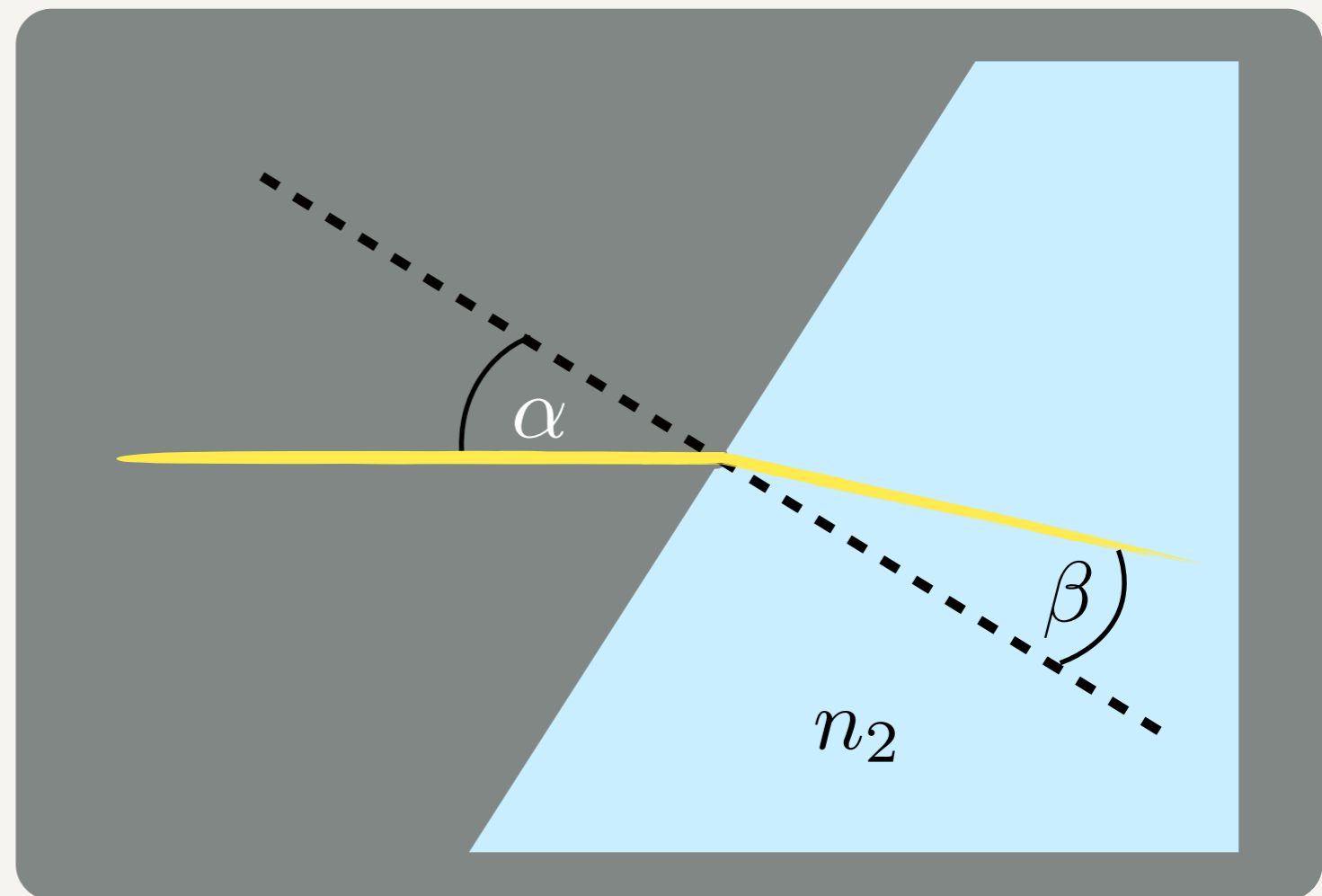
Brechungsgesetz I

Vom dünnen ins dichte Medium

Snellius'sches
Brechungsgesetz:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

- Vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium wird zum Lot hin gebrochen.
- *Von dünn nach dicht zum Lot sich bricht.*



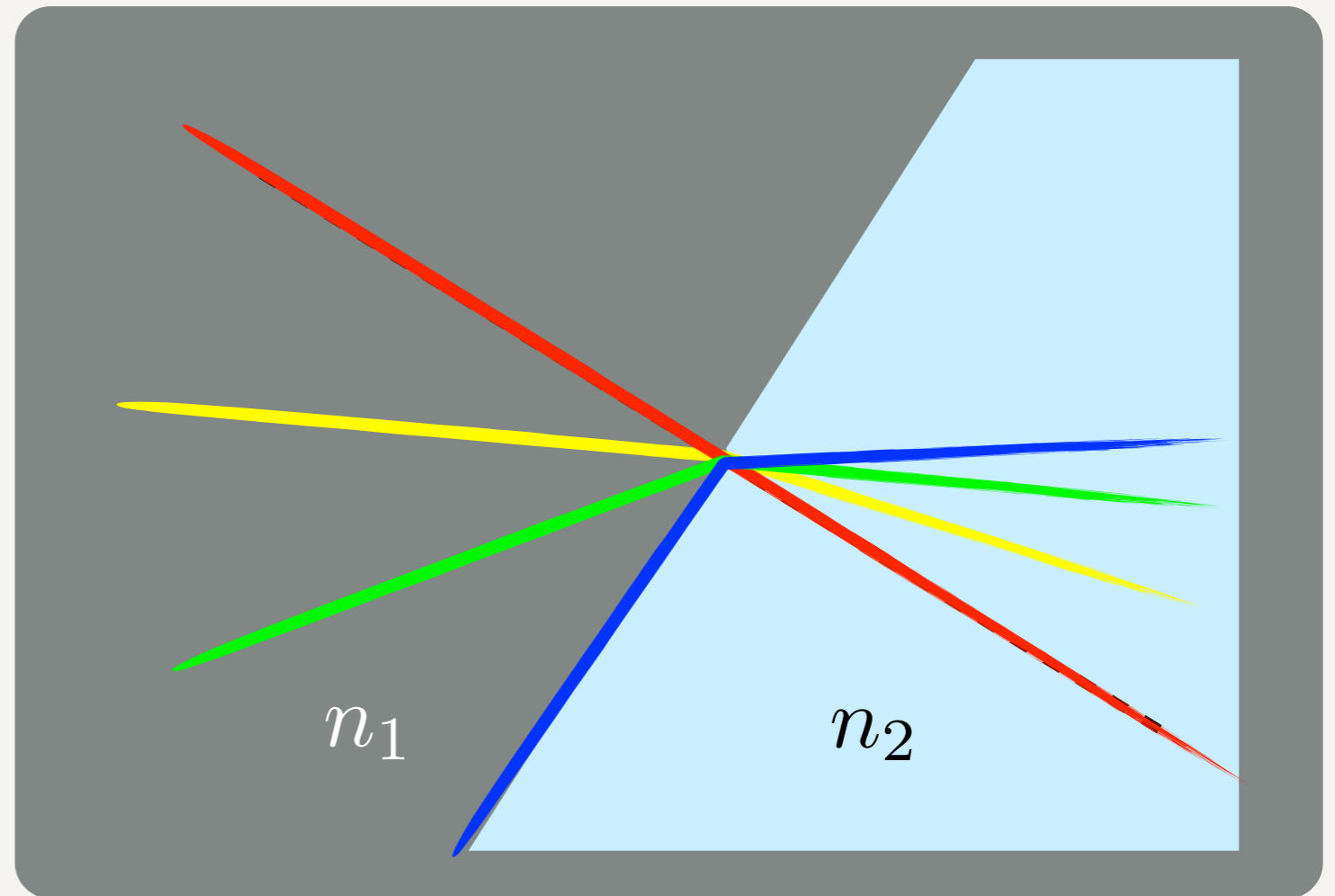
$$n_1 < n_2$$

Brechungsgesetz I

Vom dünnen ins dichte Medium

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Luft	Glas
α	β
0°	0°
30°	19.2°
60°	34.7°
89.9°	41.1°



$$n_1 < n_2$$

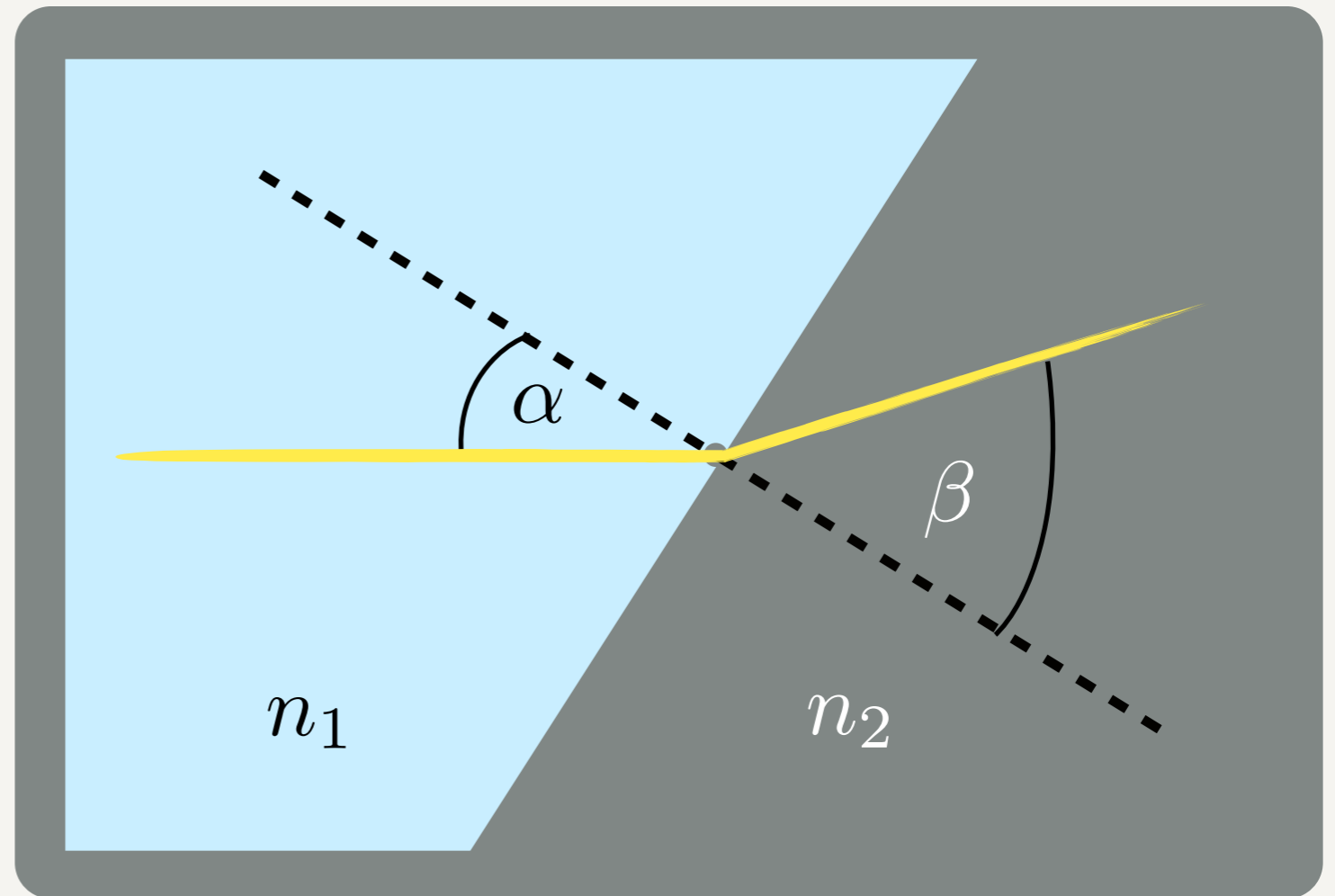
Brechungsgesetz II

Vom dichten ins dünne Medium

Snellius'sches
Brechungsgesetz:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

- Vom optisch dichten ins optisch dünne Medium wird vom Lot weg gebrochen.



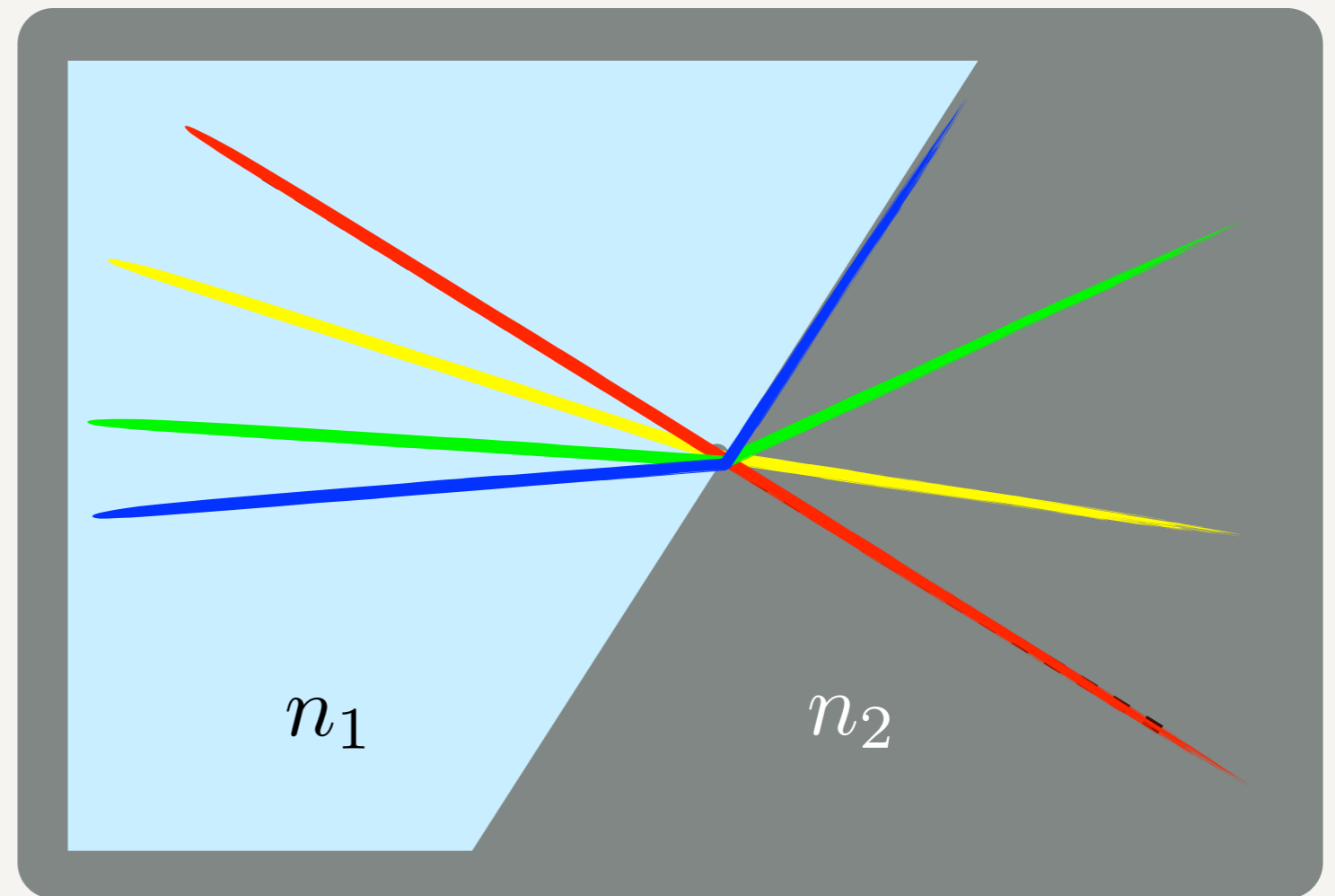
$$n_1 > n_2$$

Brechungsgesetz II

Vom dichten ins dünne Medium

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

Glas	Luft
α	β
0°	0°
19.2°	30°
34.7°	60°
41.1°	89.9°



$$n_1 > n_2$$

Der Lichtweg ist immer umkehrbar!

Totalreflexion

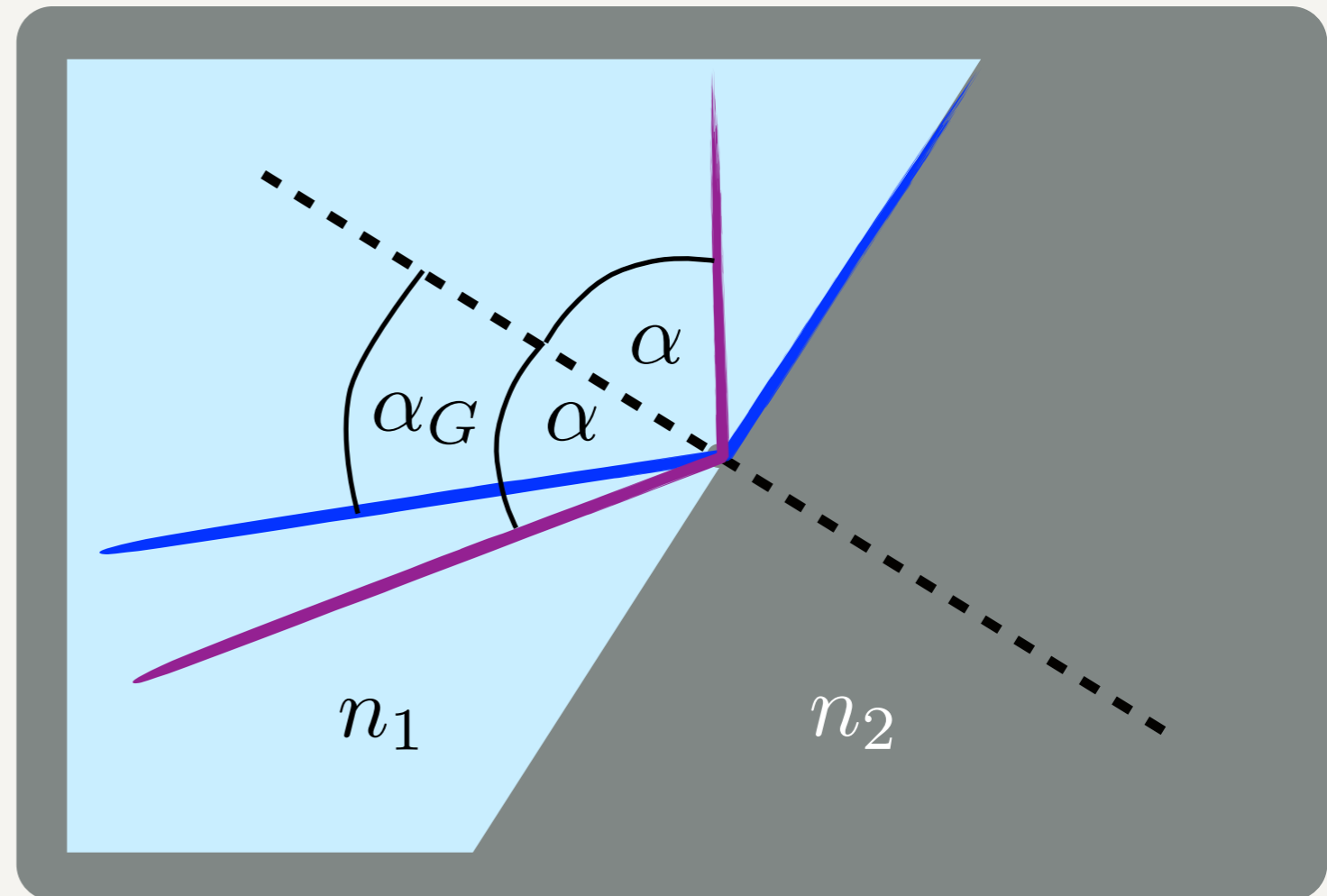
Ab einem Grenzwinkel kann der Lichtstrahl nicht nach außen brechen.

$$n_1 \cdot \sin \alpha_G = n_2 \cdot \sin 90^\circ$$
$$\Rightarrow \alpha_G = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Alle Lichtstrahlen mit

$$\alpha > \alpha_G$$

werden vollständig reflektiert.



$$n_1 > n_2$$

Aufgabe

- Wenn Sie die Sonne am Horizont untergehen sehen ist sie aus geometrischer Sicht bereits seit einigen Minuten unter dem Horizont. Diskutieren Sie in Gruppen und erklären das Phänomenen.
- Denken Sie dabei an Fermat!

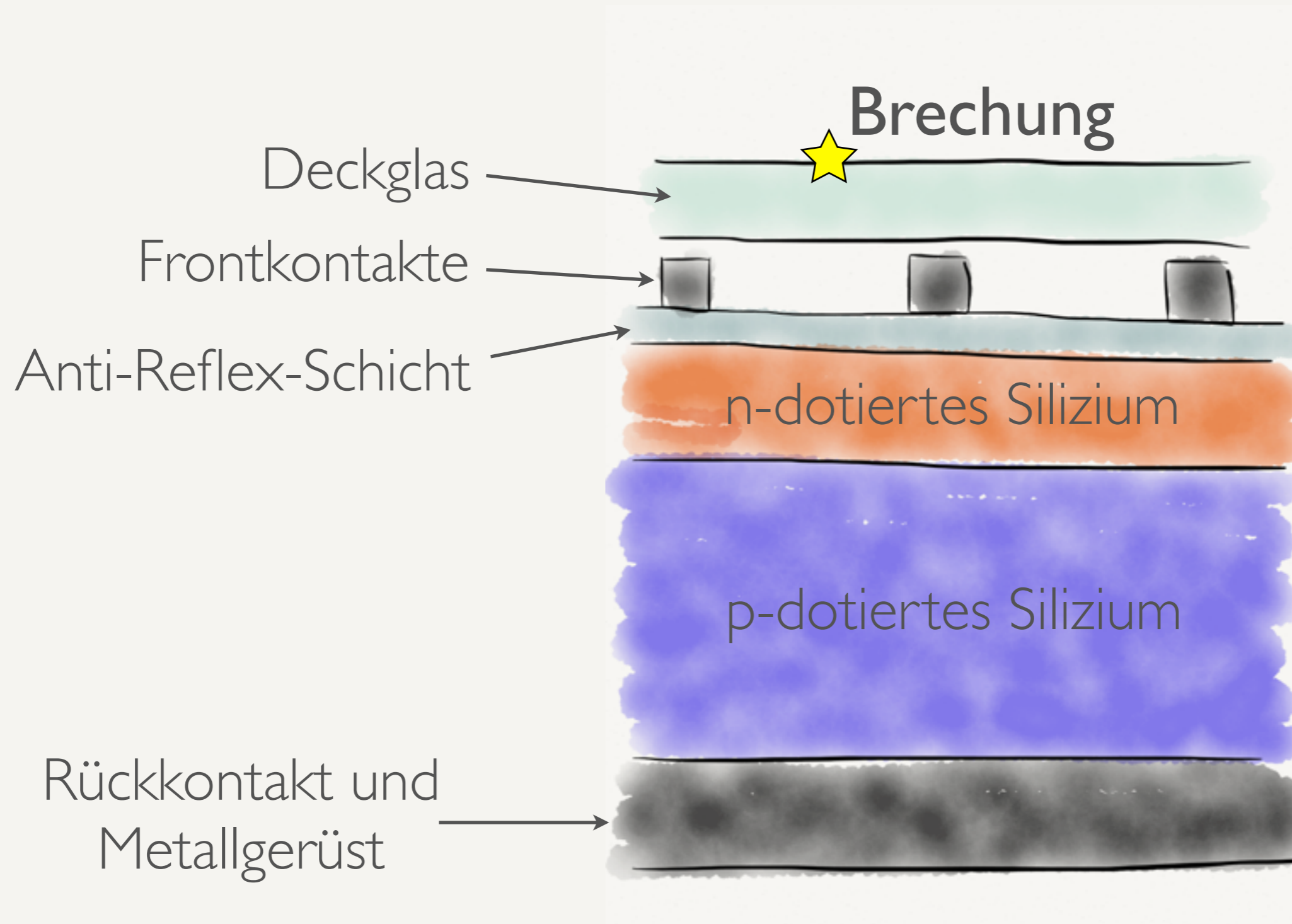
Zusammenfassung Lichtstrahlen

- Fermat'sches Prinzip: kürzeste Zeit
- Reflexionsgesetz: $\alpha = \beta$
- Brechungsgesetz: $n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$
- Totalreflexion: $\alpha_G = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$

Aufgaben

- Berechnen Sie die Lichtgeschwindigkeit in kristallinem Silizium. Schlagen Sie den Brechungsindex auf refractiveindex.info nach. Berechnen Sie diesen Wert für Licht der Wellenlängen 400 nm, 600 nm und 800 nm.
- Nehmen Sie die Brechungsindizes von oben. Berechnen Sie, wie stark ein Lichtstrahl gebrochen wird, der unter einem Winkel von 30° zum Lot auf kristallines Silizium trifft.

Optik und Photovoltaik

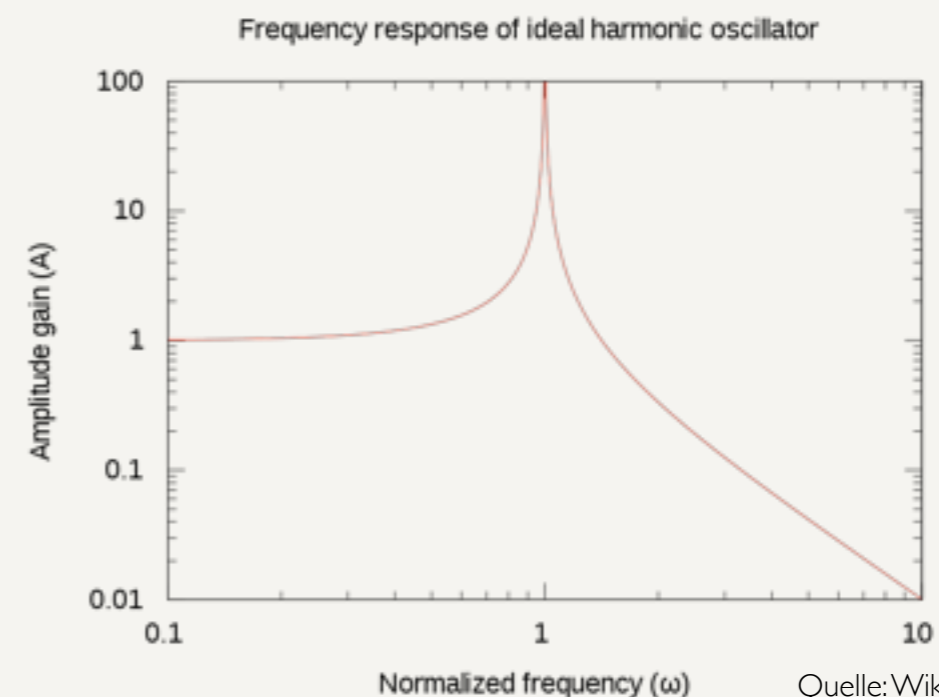
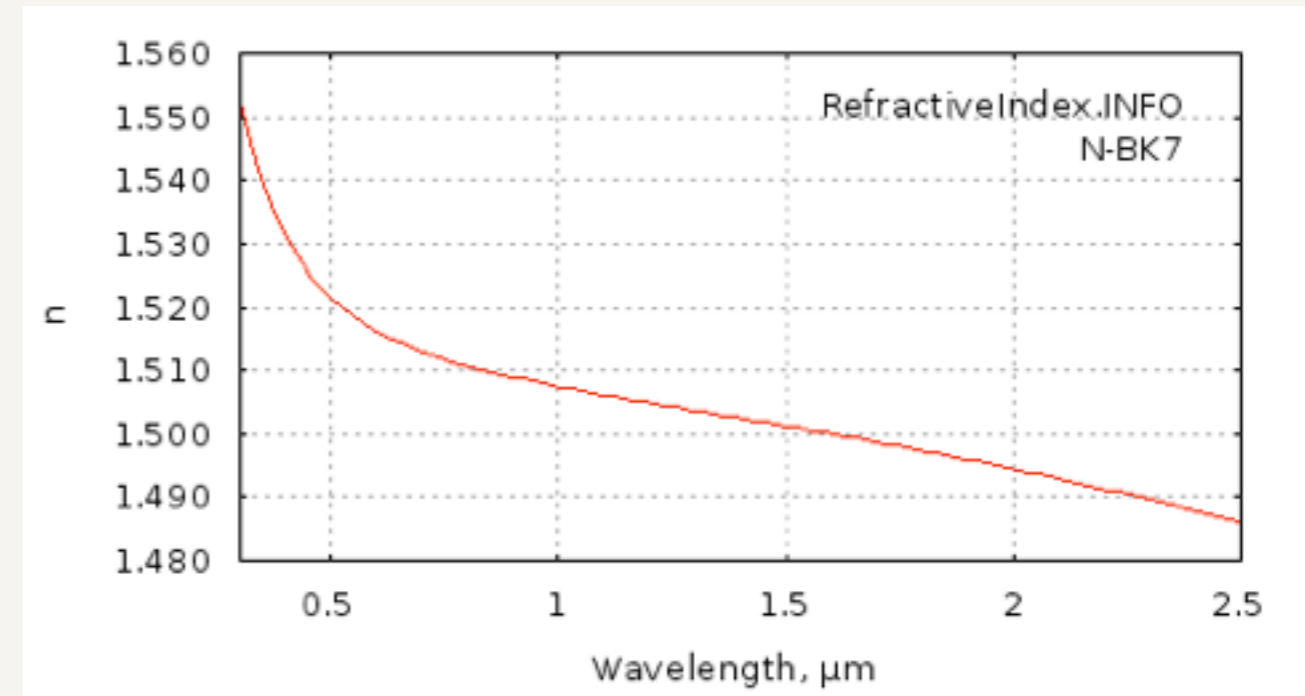


Eigenschaften optischer Medien

- Dispersion: Brechungsindex hängt von der Wellenlänge des Materials ab.
- Absorption: Licht wird im Material absorbiert und i.A. in Wärme (d.h. Bewegungsenergie der Atome) umgewandelt.

Dispersion

- Lichtgeschwindigkeit im Medium hängt von der Wellenlänge des Lichts ab
- Analogie: Resonanz eines getriebenen harmonischen Oszillators (z.B. LC-Schwingkreis)
- Ursache: Schwingendes System Elektron - Kern mit Coulomb-Anziehung als Federkraft.

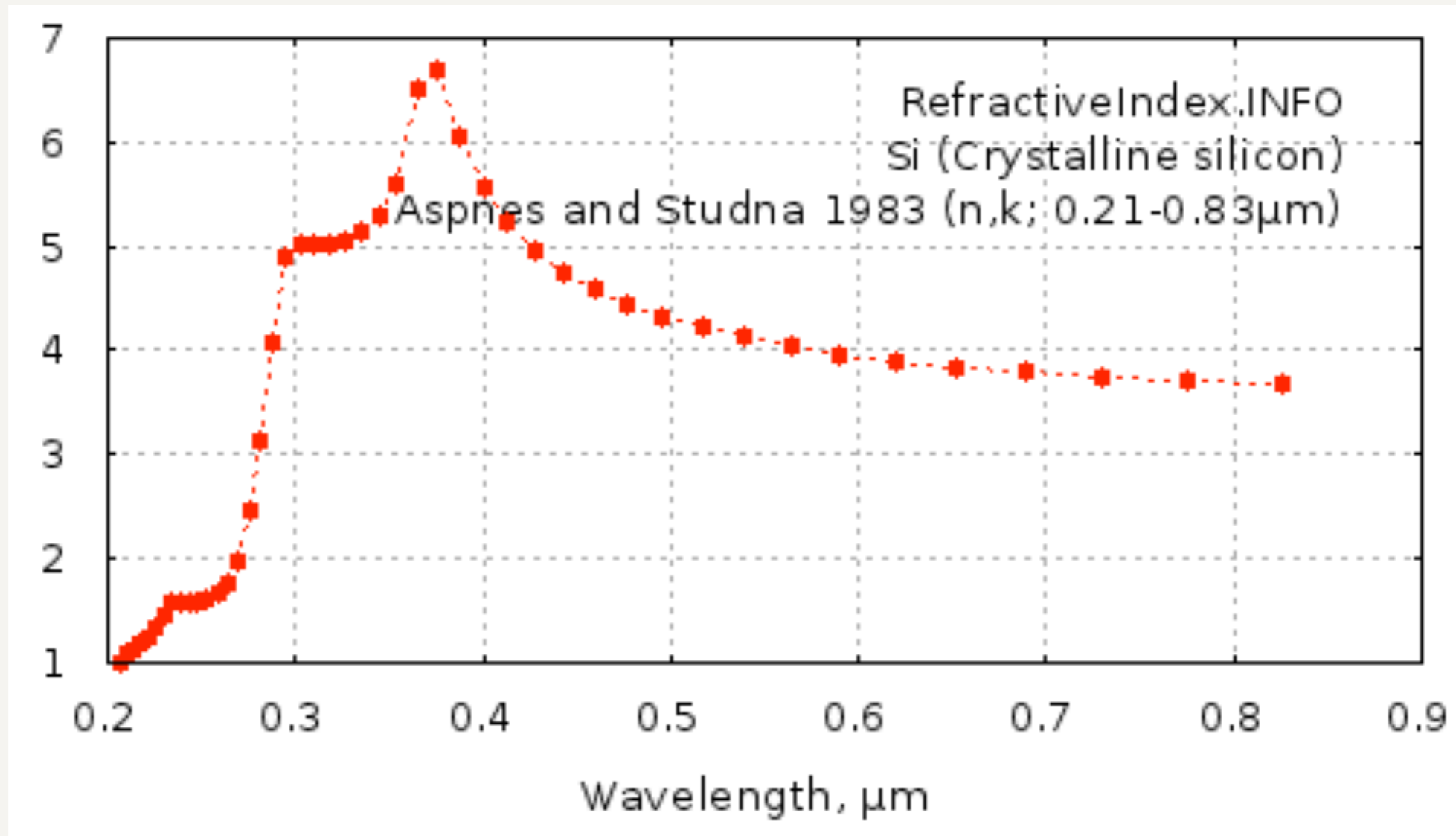


Quelle: Wikipedia



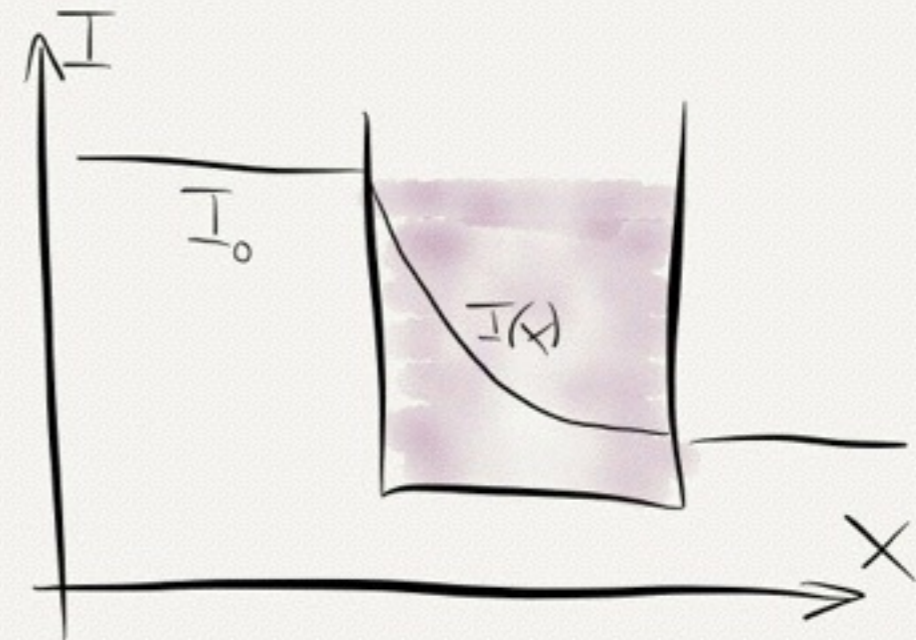
Dispersion von Silizium

<http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=Si>



Transmission und Absorption

- Absorption eines Photons und Umwandlung der Energie in Wärme
- Lambert-Beer'sches Gesetz
- Genau wie der Brechungsindex abhängig von der Wellenlänge
- Gilt für alle Materialien (später: komplexer Brechungsindex)



$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

Lambert-Beer'sches Gesetz

[Herleitung bei Chemgapedia](#)

Transmission und Absorption

- Transmission gibt an, wie viel Prozent der Strahlung durchgelassen wird.
- Absorption ist grad der Teil, der nicht transmittiert wurde.
- Im allgemeinen ist der Absorptionskoeffizient abhängig von der Wellenlänge

Lambert-Beer $I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$

Transmission $T = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha x}$

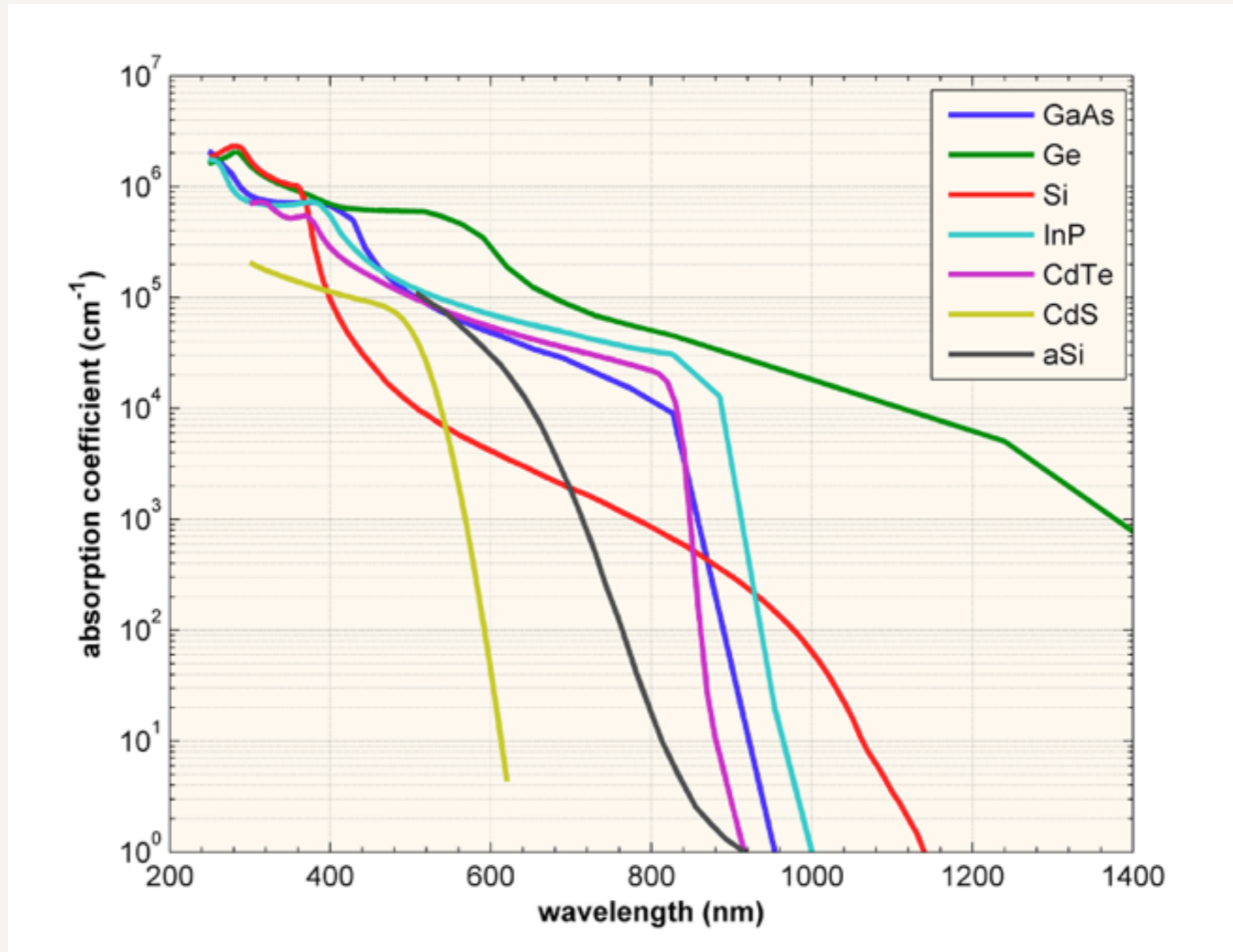
Absorption $A = 1 - T$

l.a. $\alpha = \alpha(\lambda)$

$$\Rightarrow I(x, \lambda) = I_0 \cdot e^{-\alpha(\lambda)x}$$

$$T(\lambda) = e^{-\alpha(\lambda)x}$$

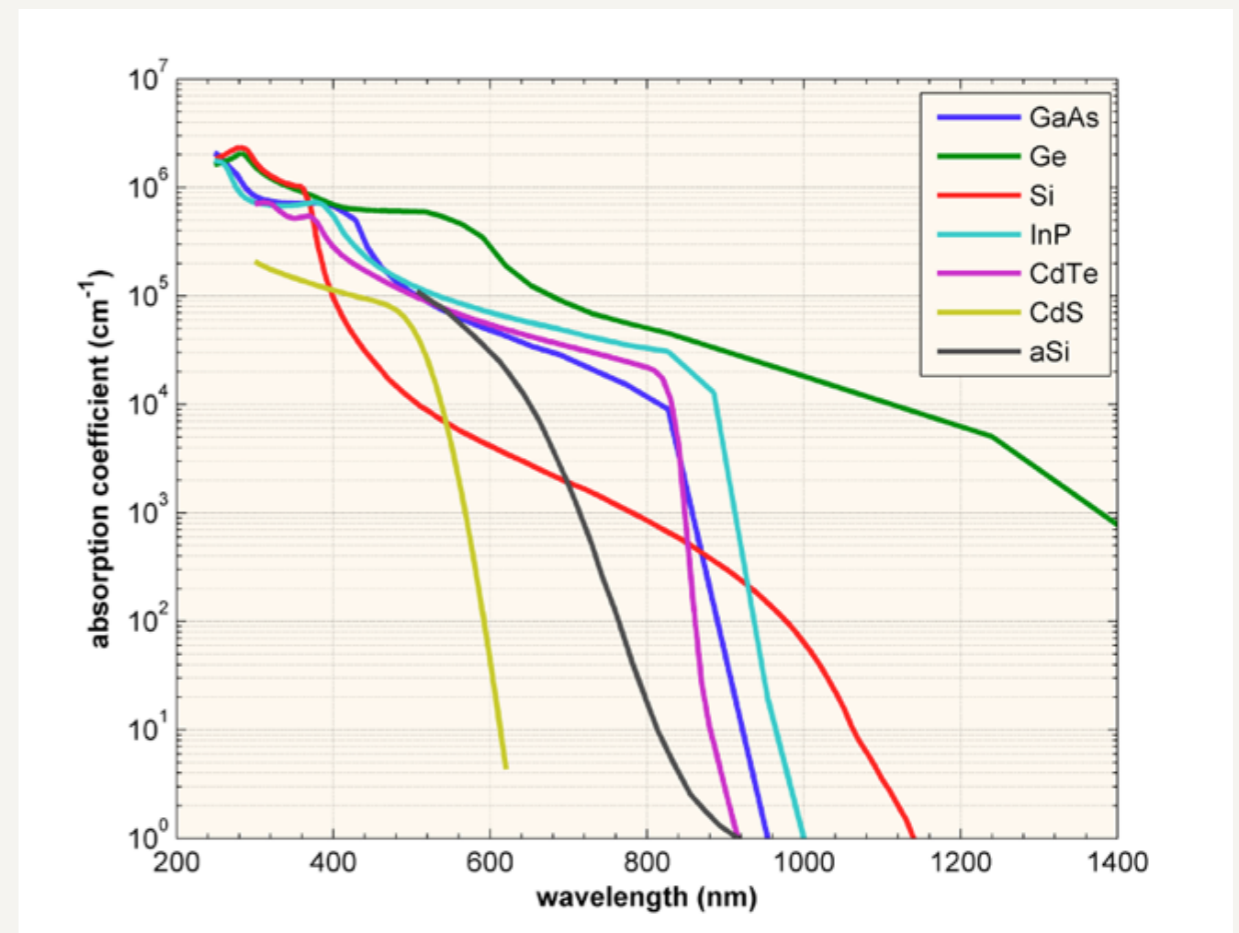
Transmission und Absorption



<http://pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/absorption-coefficient>

Aufgabe

- Schlagen Sie den Absorptionskoeffizienten für kristallines Silizium bei einer Wellenlänge von 800nm im Diagramm nach.
- Berechnen Sie, wie stark dieses rote Licht bei einer typischen Schichtdicke des Siliziums von $200\mu\text{m}$ absorbiert wird.
- Dann berechnen Sie den gleichen Wert für Gallium-Arsenid (GaAs).Vergleich Sie die Werte.
- Dann überlegen Sie qualitativ: wie ändert sich die Situation für größere Wellenlängen?



Transmission und Absorption

Kristallines Silizium (c-Si)

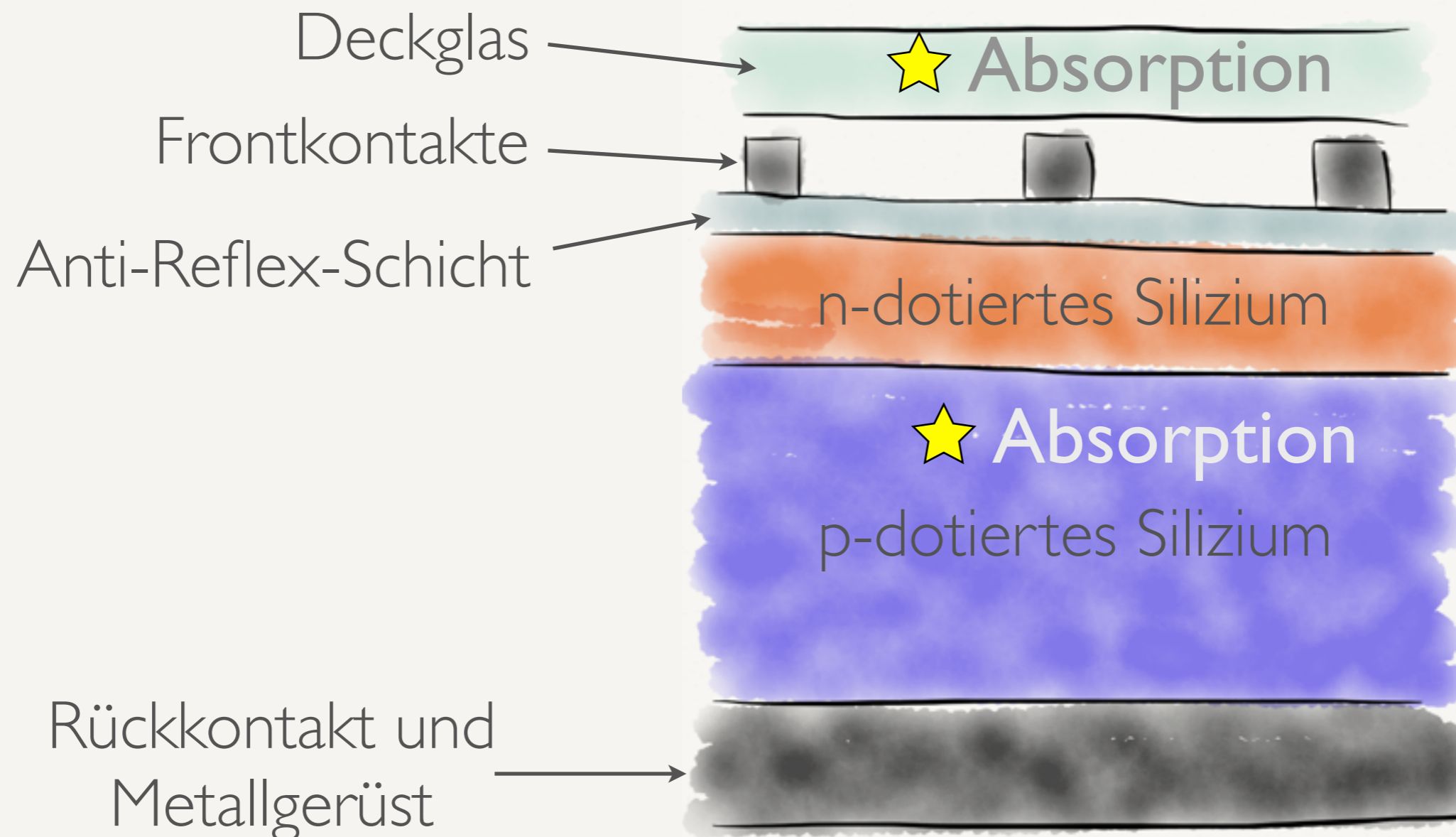
Wellenlänge (nm)	α (cm ⁻¹)	Mittlere Eindringtiefe (μm)
500	10000	1
750	2000	5
1000	60	166

Transmission und Absorption

Amorphes Silizium (a-Si)

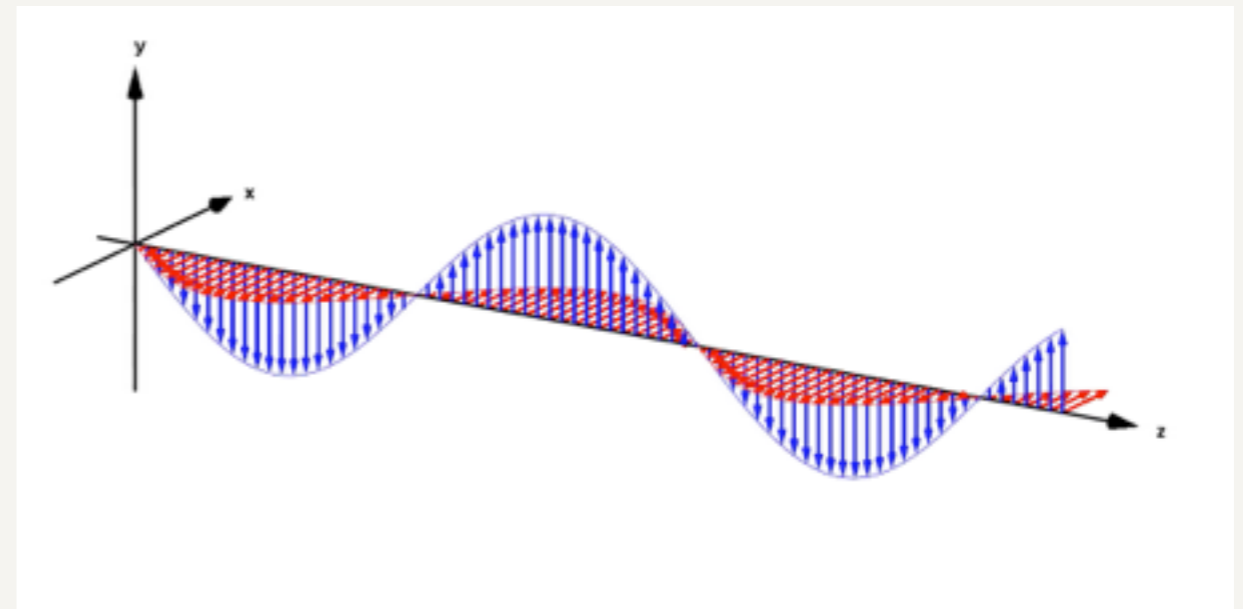
Wellenlänge (nm)	α (cm ⁻¹)	Mittlere Eindringtiefe (μm)
500	1 000 000	0.1
750	2000	5
1000	N/A	„Unendlich“

Transmission und Absorption



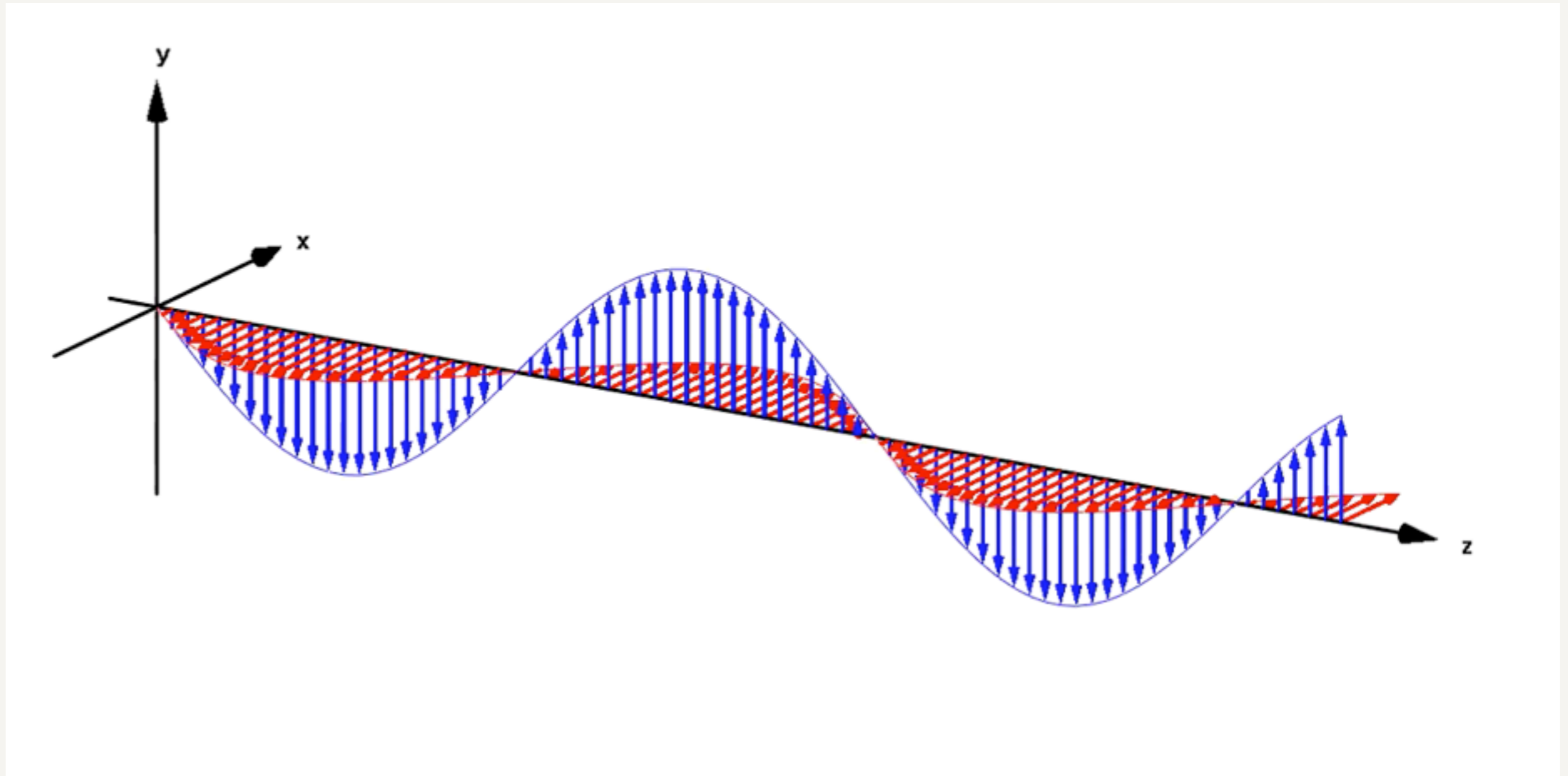
Polarisation

- Ebene Welle die sich in z -Richtung ausbreitet
- Zerlegung in x - und y -Komponenten
- Zunächst allgemeine Phase φ



Polarisation

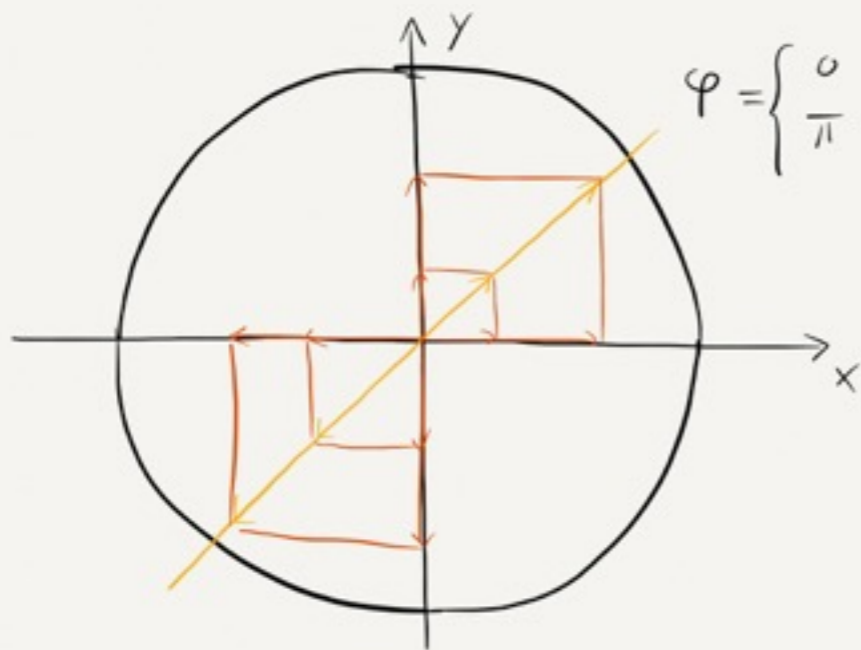
Lineare Polarisation



Polarisation

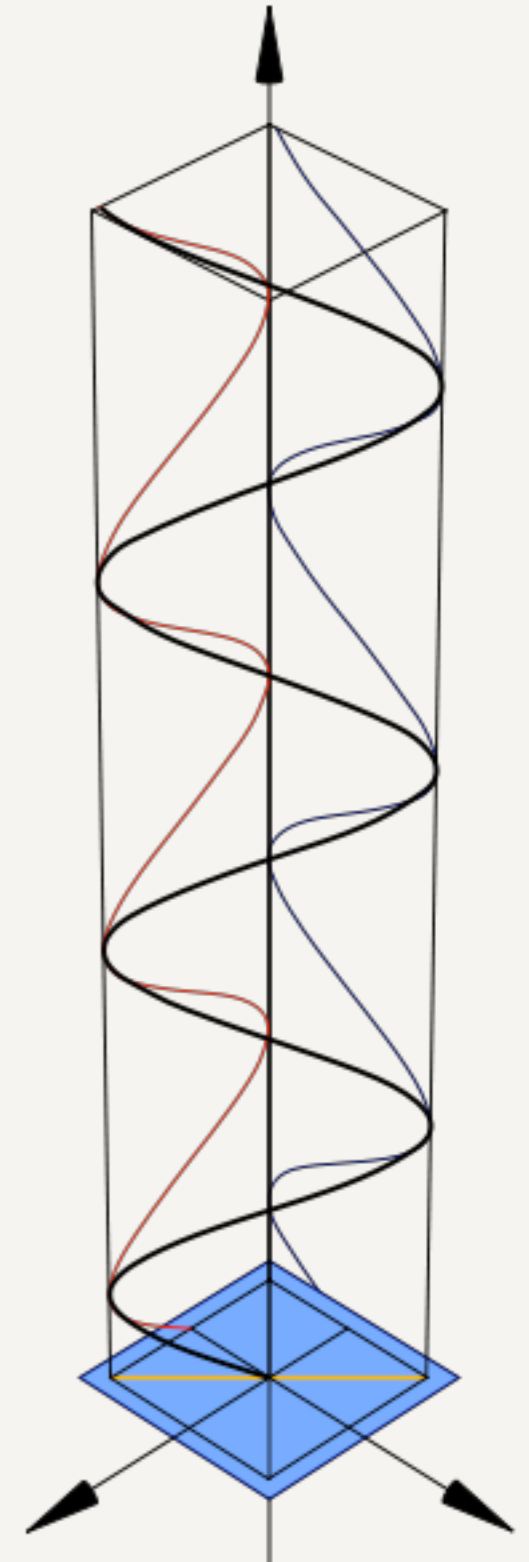
Lineare Polarisation

- Das elektrische Feld schwingt nur in einer festen Ebene
- Die Projektion in Blickrichtung ist eine Linie



$$\varphi = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$

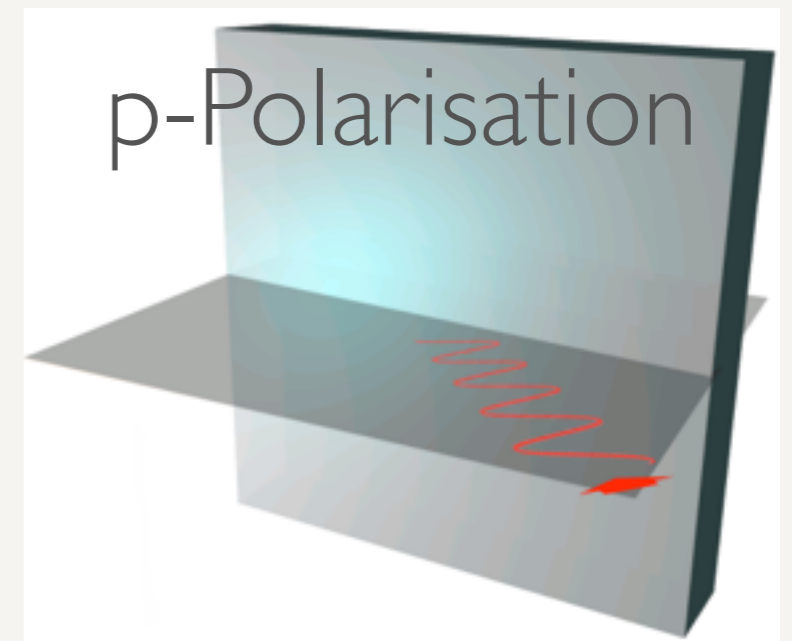
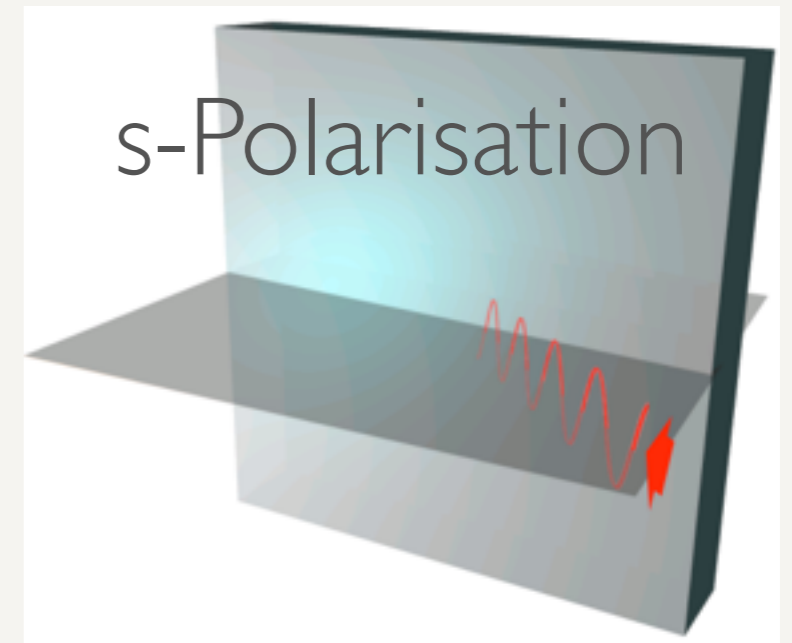
$$\varphi = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$



Fresnel'sche Formeln

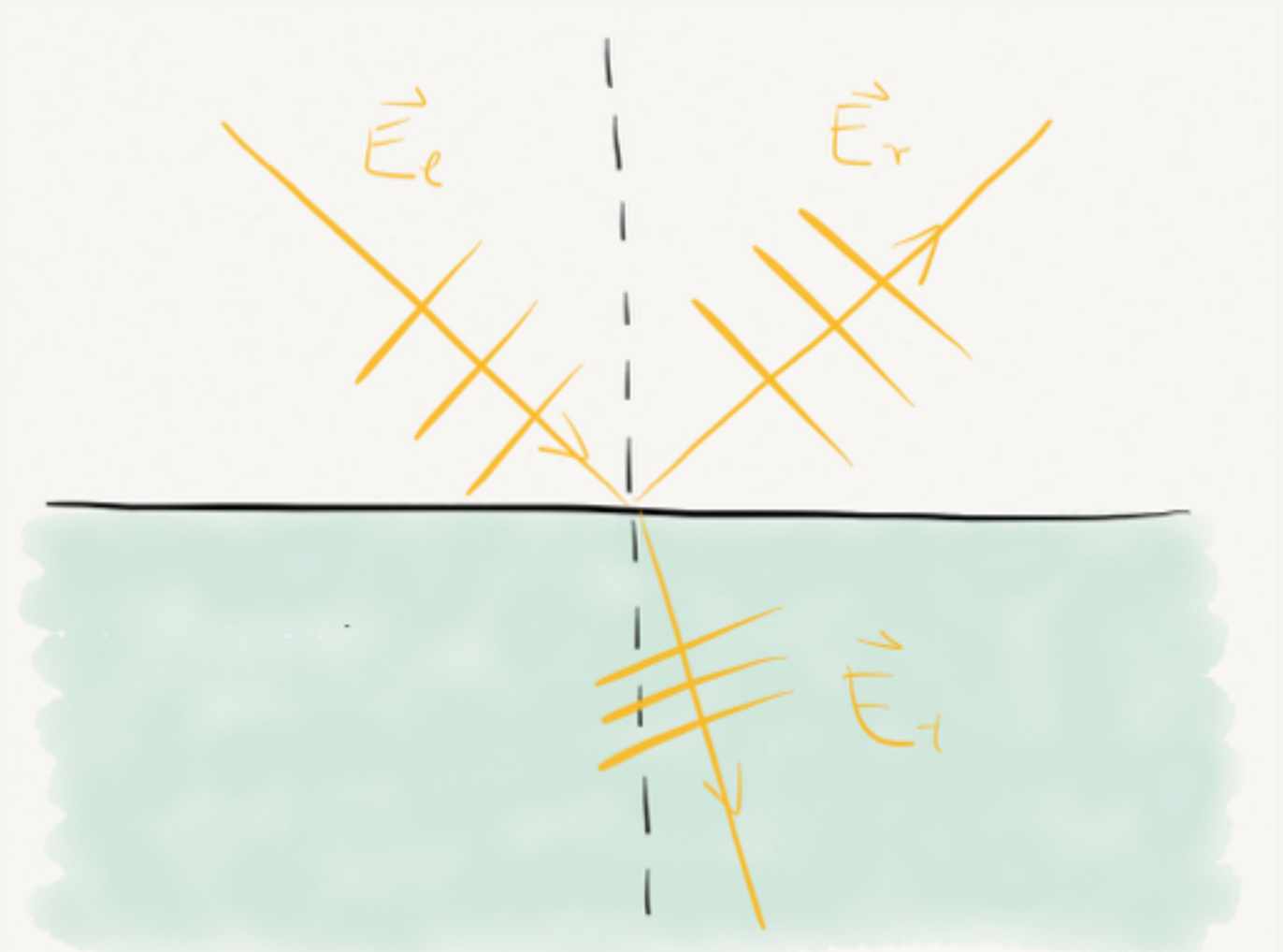
Überblick

- Beschreiben das Verhalten von elektromagnetischen Wellen an Grenzflächen
- Trennung in senkrechte und parallele Polarisations-Komponente des Lichts
- Über die Stetigkeitsbedingung für das elektrische und magnetische Feld ergeben sich die Fresnel'schen Formeln für die Amplituden des elektromagnetischen Feldes.
- Die reflektierte oder transmittierte Licht-Intensität ist proportional zum Quadrat der Amplitude.
- Randbedingung: keine Absorption, nicht-magnetische Materialien.



Fresnel'sche Formeln

- Elektromagnetische Welle
- Drei Wellen:
 - ➔ einlaufende Welle \mathbf{E}_e
 - ➔ reflektierte Welle \mathbf{E}_r
 - ➔ transmittierte Welle \mathbf{E}_t



Fresnel'schen Formeln

Intensitätskoeffizienten

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2 = \left(\frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_2 \cos \alpha + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$

$$R_{\perp} = r_{\perp}^2 = \left(\frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_1 \cos \alpha + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$

Energieerhaltung:

$$T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel}$$

$$T_{\perp} = 1 - R_{\perp}$$

Eigentlich:

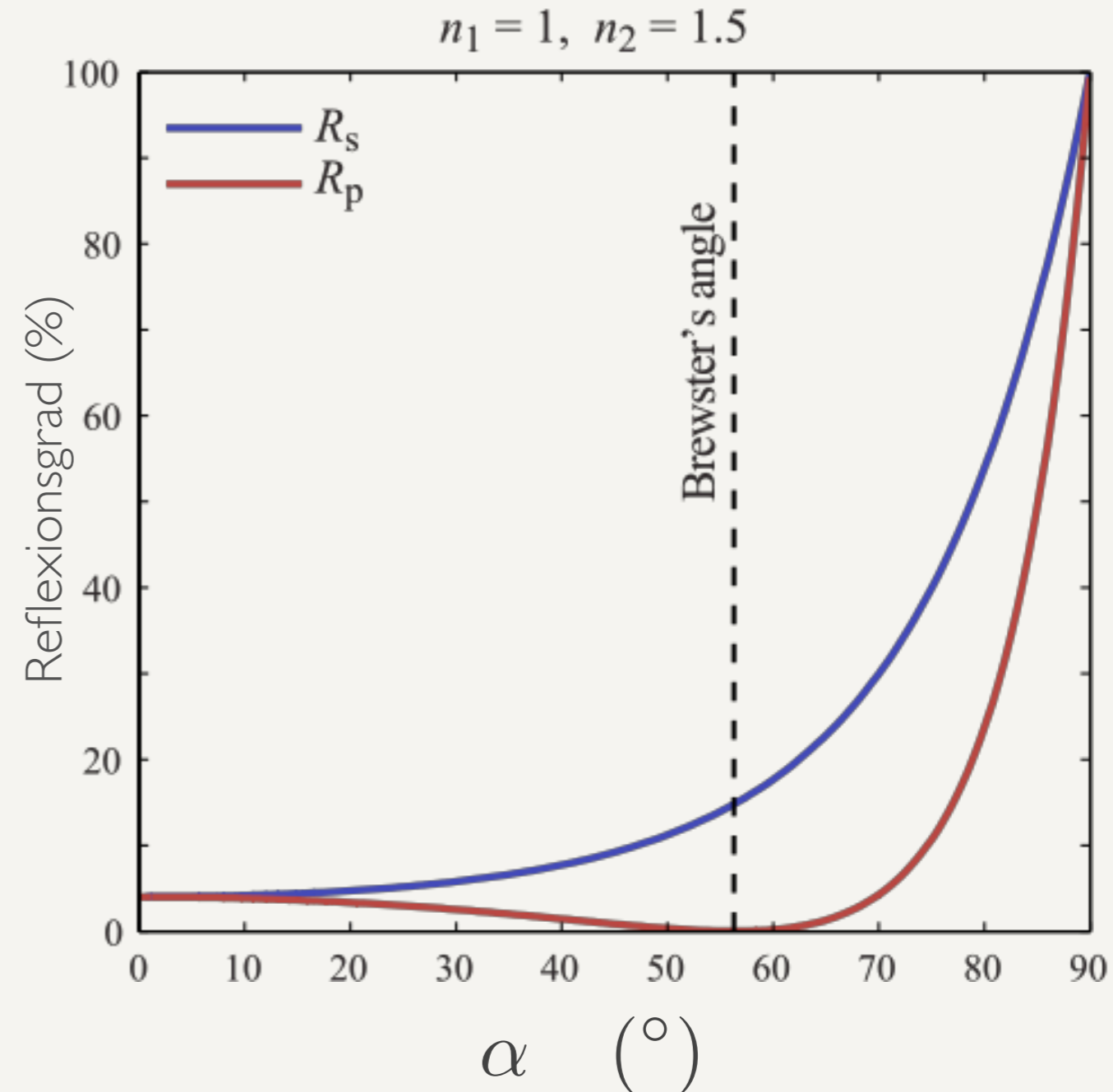
$$T_{\parallel, \perp} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot t_{\parallel, \perp}^2$$

⇒ Zu kompliziert

Reflexionsgrad I

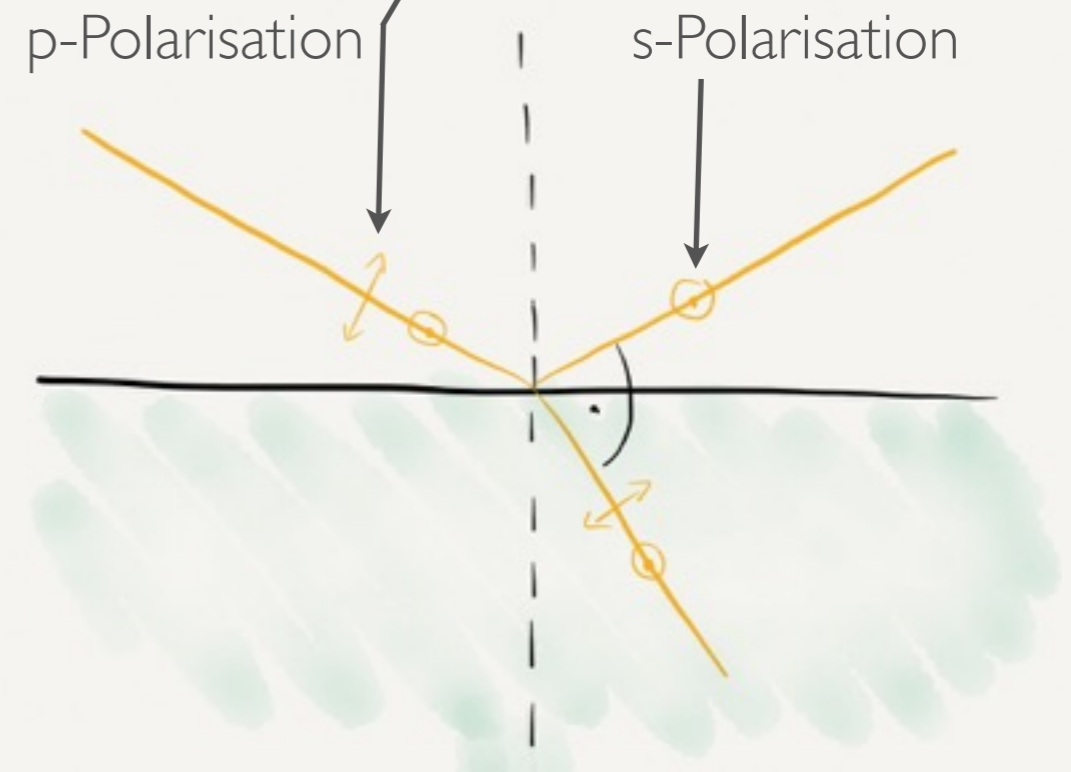
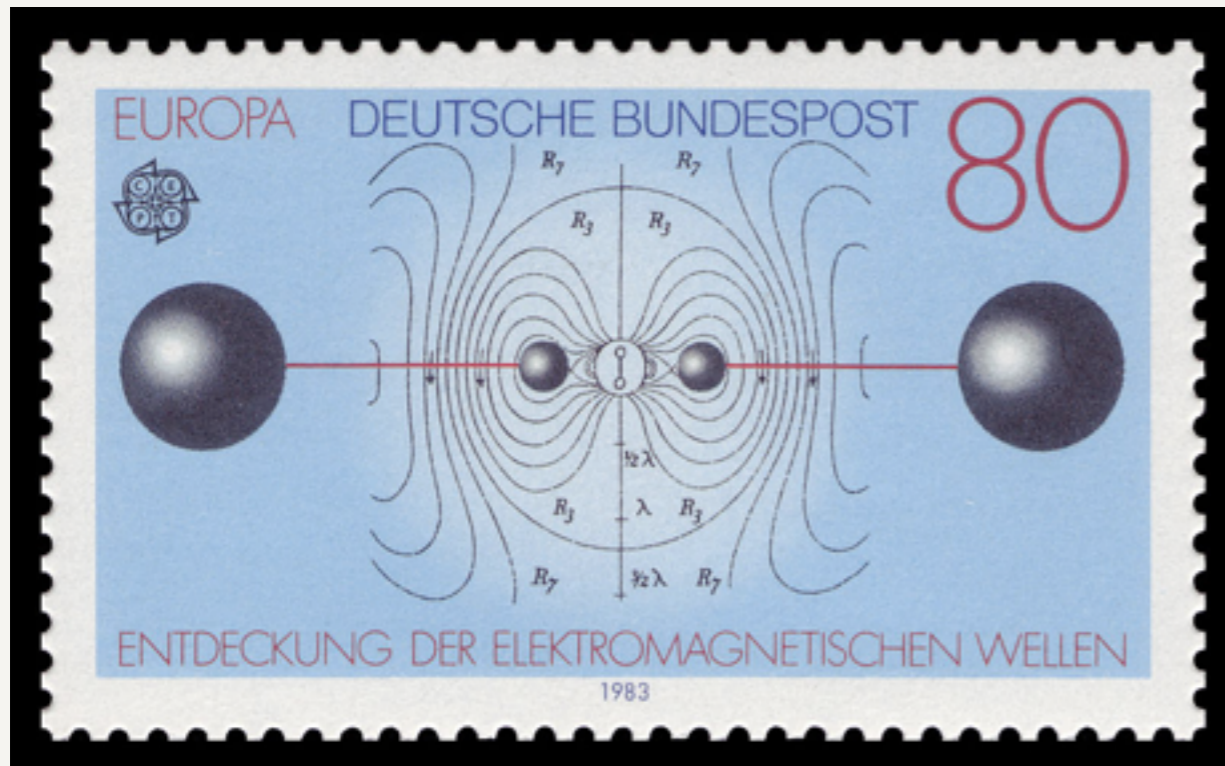
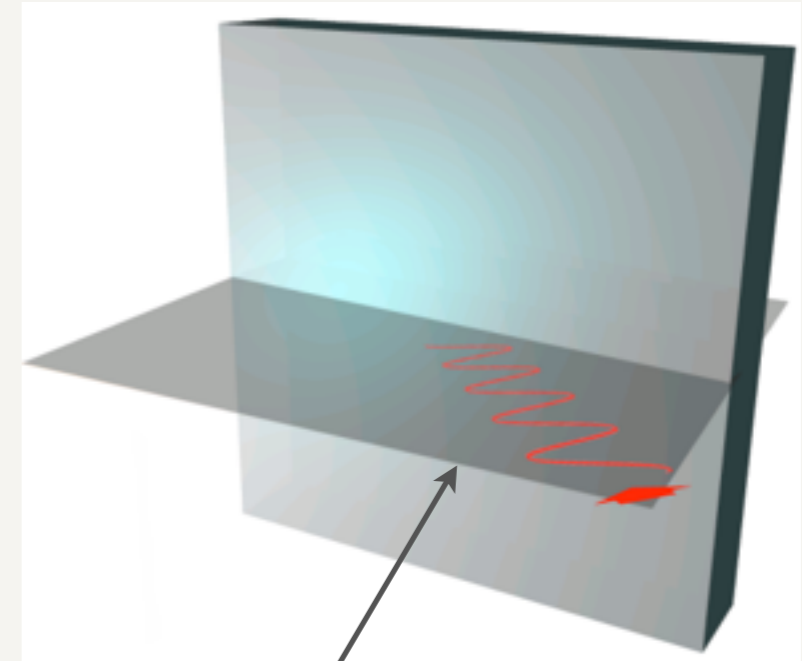
Vom dünnen ins dichte Medium

- Reflexion nimmt stetig bis 100% zu großen Winkeln zu
- Bei „normalem“ Glas ca. 4% Reflexe
- „Alles“ reflektiert bei flachen Winkeln
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet



Brewster-Winkel

- Hertz'scher Dipol: strahlt nicht in Schwingungsrichtung



Brewster-Winkel

Summe der Winkel:

$$180^\circ = 90^\circ + \alpha + \beta$$

$$\Rightarrow \beta = 90^\circ - \alpha$$

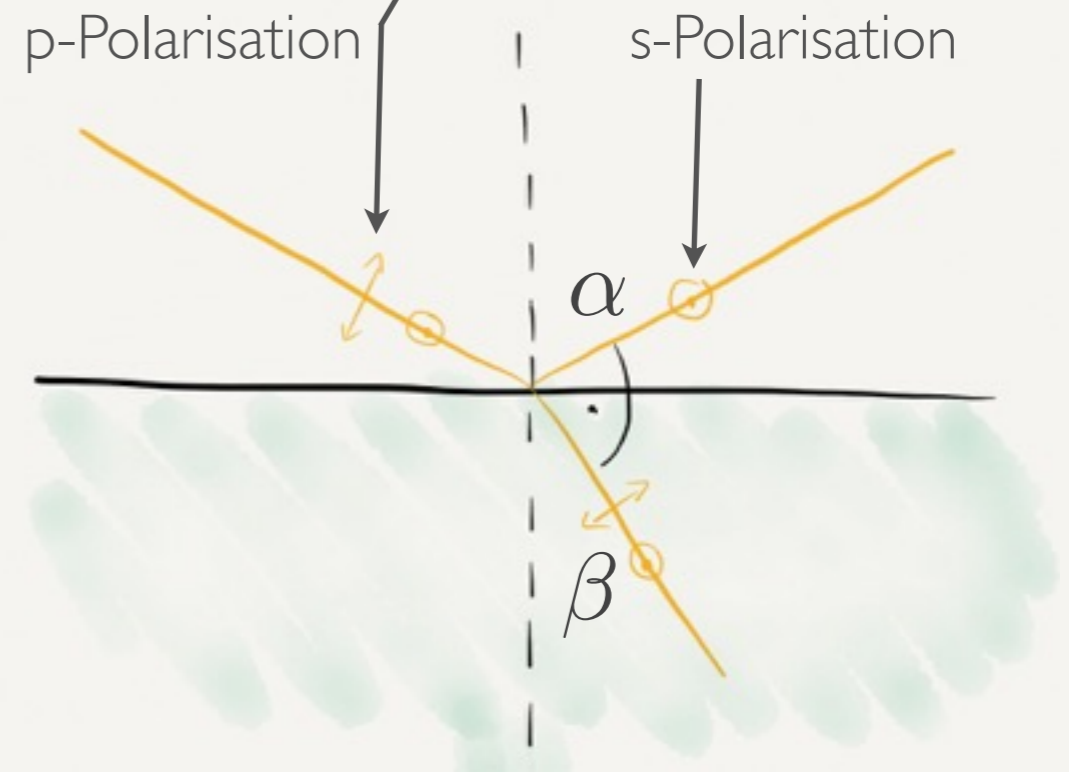
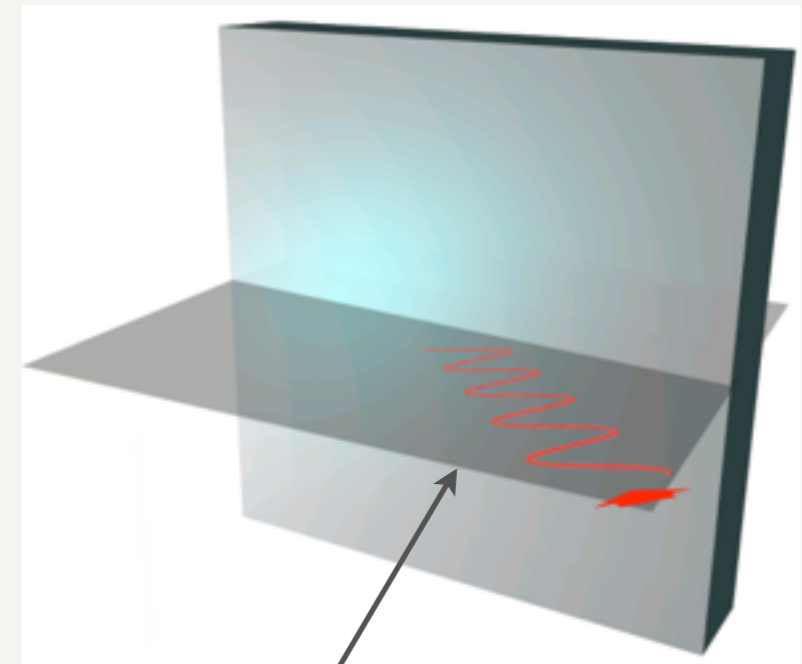
Also:

$$\sin \beta = \sin(90^\circ - \alpha) = \cos \alpha$$

Für den Brewster-Winkel α_B :

$$n_1 \sin \alpha_B = n_2 \cos \alpha_B$$

$$\Rightarrow \tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$

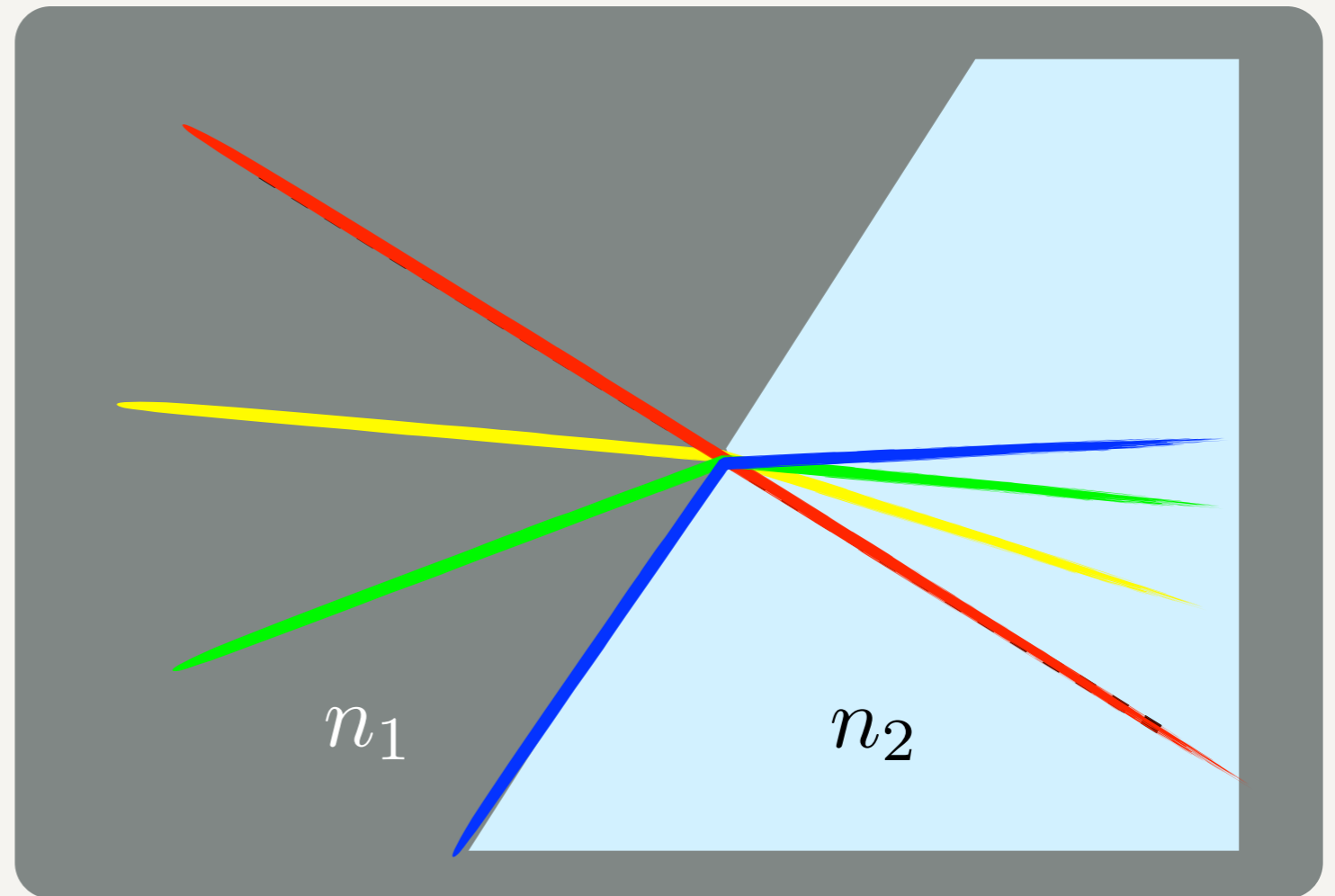


Reflexionsgrad I

Vom dünnen ins dichte Medium

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Luft	Glas	Reflexionsgrad	
α	β	s	p
0°	0°	4.3	4.3
30°	19.2°	6.1	2.7
60°	34.7°	18.3	1.5
89.9°	41.1°	99.3	98.6

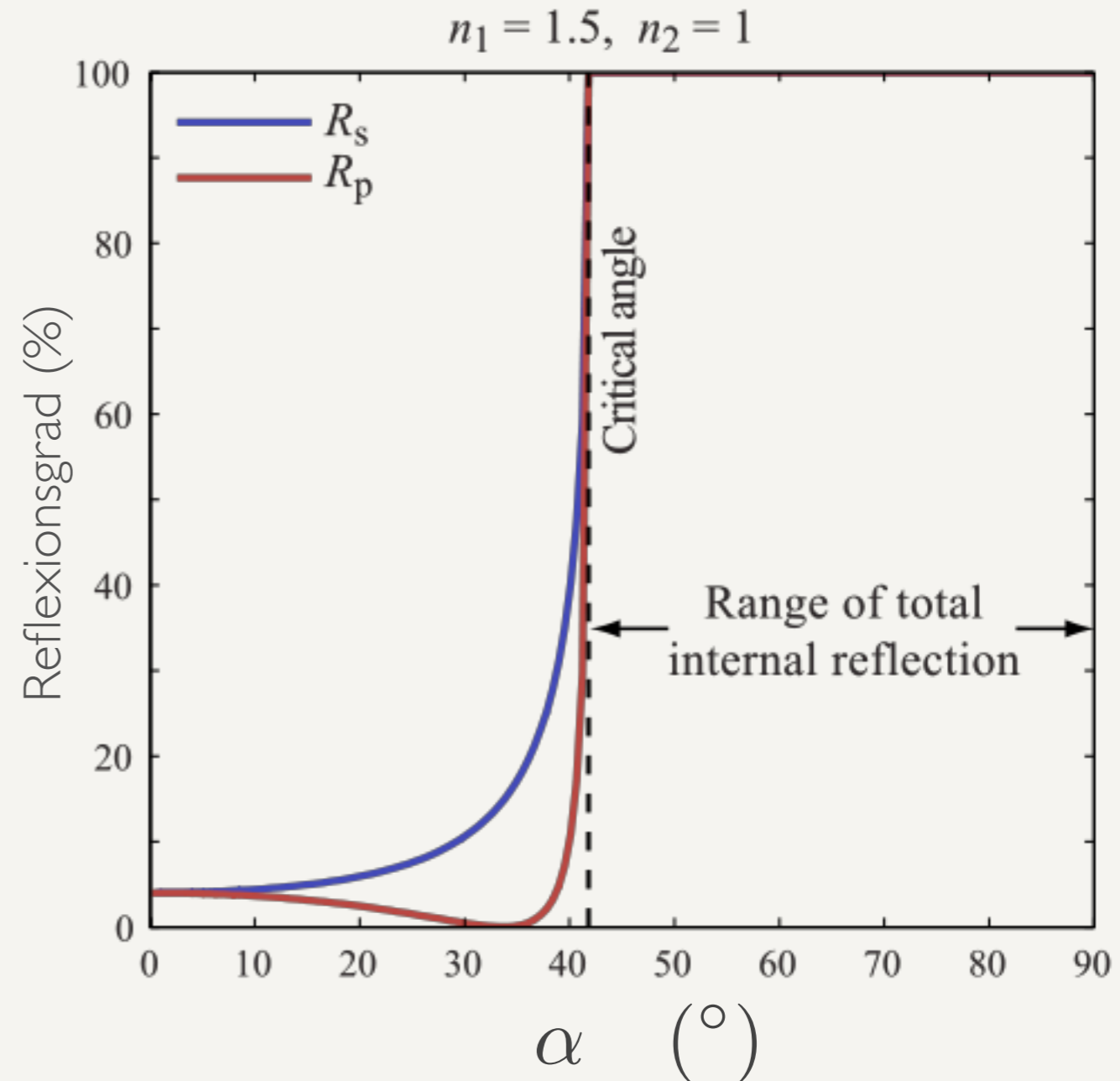


$$n_1 < n_2$$

Reflexionsgrad II

Vom dichten ins dünne Medium

- Reflexion nimmt stetig und schnell bis 100% beim Winkel der Totalreflexion zu.
- Für Winkel oberhalb des Grenzwinkels wird das Licht zu 100% (total-) reflektiert.
- Bei „normalem“ Glas ca. 4% Reflexe
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet

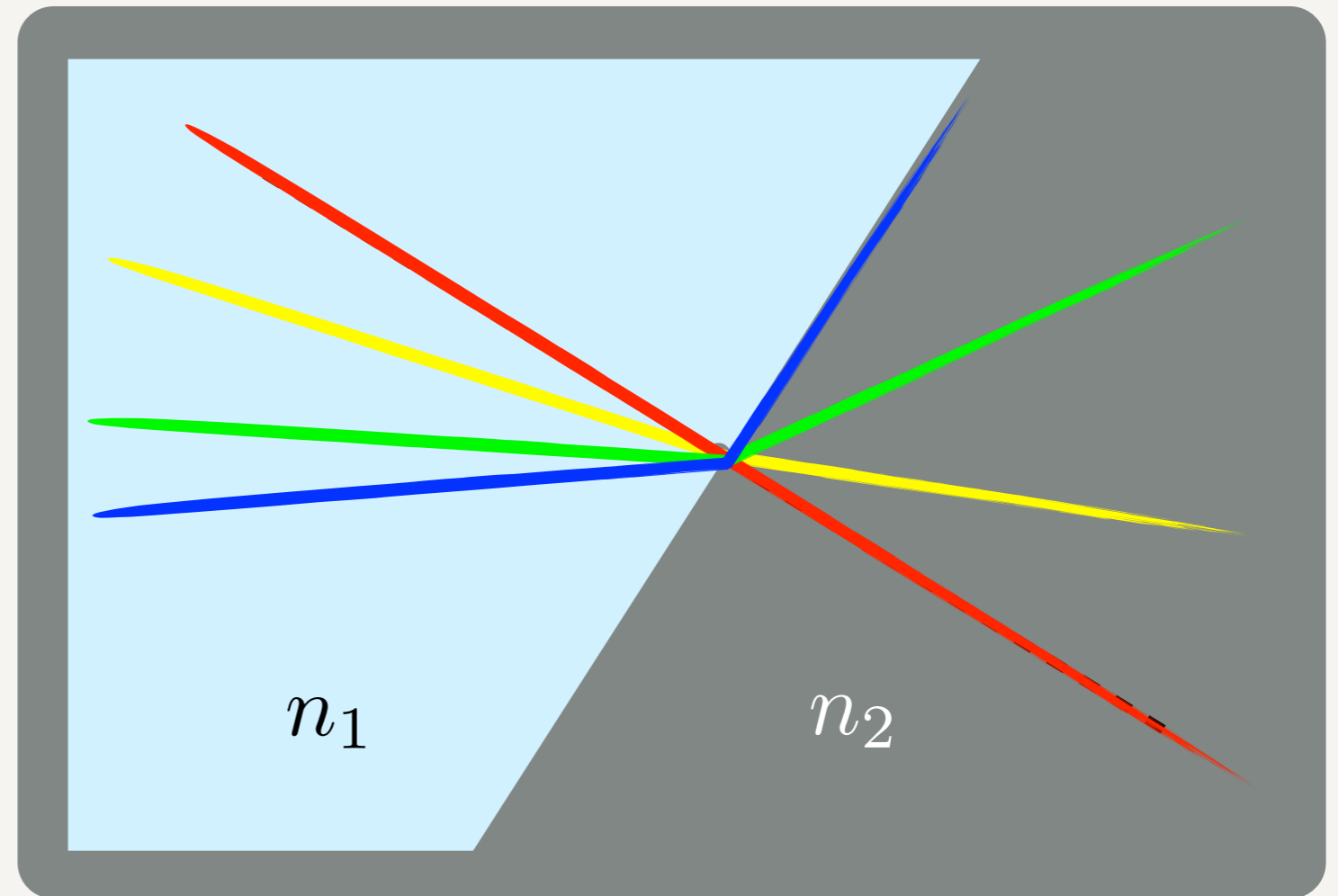


Reflexionsgrad II

Vom dichten ins dünne Medium

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta$$

Glas	Luft	Reflexionsgrad	
α	β	s	p
0°	0°	4.3	4.3
19.2°	30°	6.1	2.7
34.7°	60°	18.3	1.5
41.1°	89.9°	99.8	99.5



$$n_1 > n_2$$

Fresnel'schen Formeln

Zusammenfassung

- Zwei Polarisationsrichtungen: senkrecht und parallel zur Einfallsebene des Lichtes
- Vier Formeln für die Amplitudenverhältnisse
- Intensitätskoeffizienten berechnen sich als Quadrat der Amplituden und mit der Energieerhaltung
- Brewster-Winkel: p-Polarisation verschwindet in Reflexion
- Bei unpolarisiertem Licht kann der Mittelwert gebildet werden

Amplituden

$$r = E_r / E_e \quad (|| \text{ und } \perp)$$

$$t = E_t / E_e \quad (|| \text{ und } \perp)$$

Intensitäten

$$R = r^2 \quad (|| \text{ und } \perp)$$

$$T = 1 - R \quad (|| \text{ und } \perp)$$

Unpolarisiert

$$R = (R_{||} + R_{\perp}) / 2$$

$$T = 1 - R$$

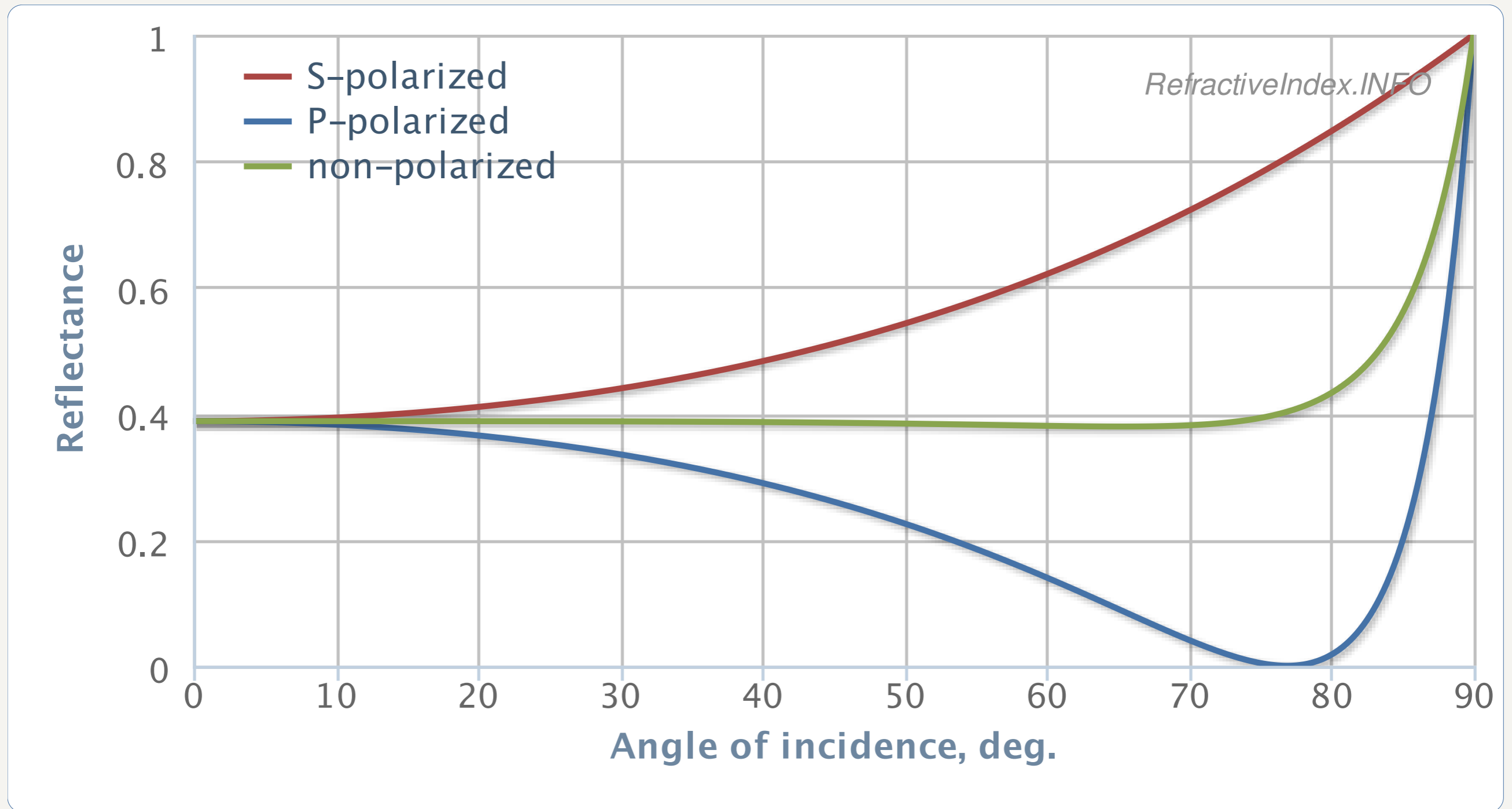
Aufgabe

- Berechnen Sie mit Hilfe der Fresnel'schen Formeln die Reflexion von Sonnenlicht an Silizium bei senkrechten Lichteinfall.

$$R_{\parallel} = r_{\parallel}^2 = \left(\frac{n_2 \cos \alpha - n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_2 \cos \alpha + n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$

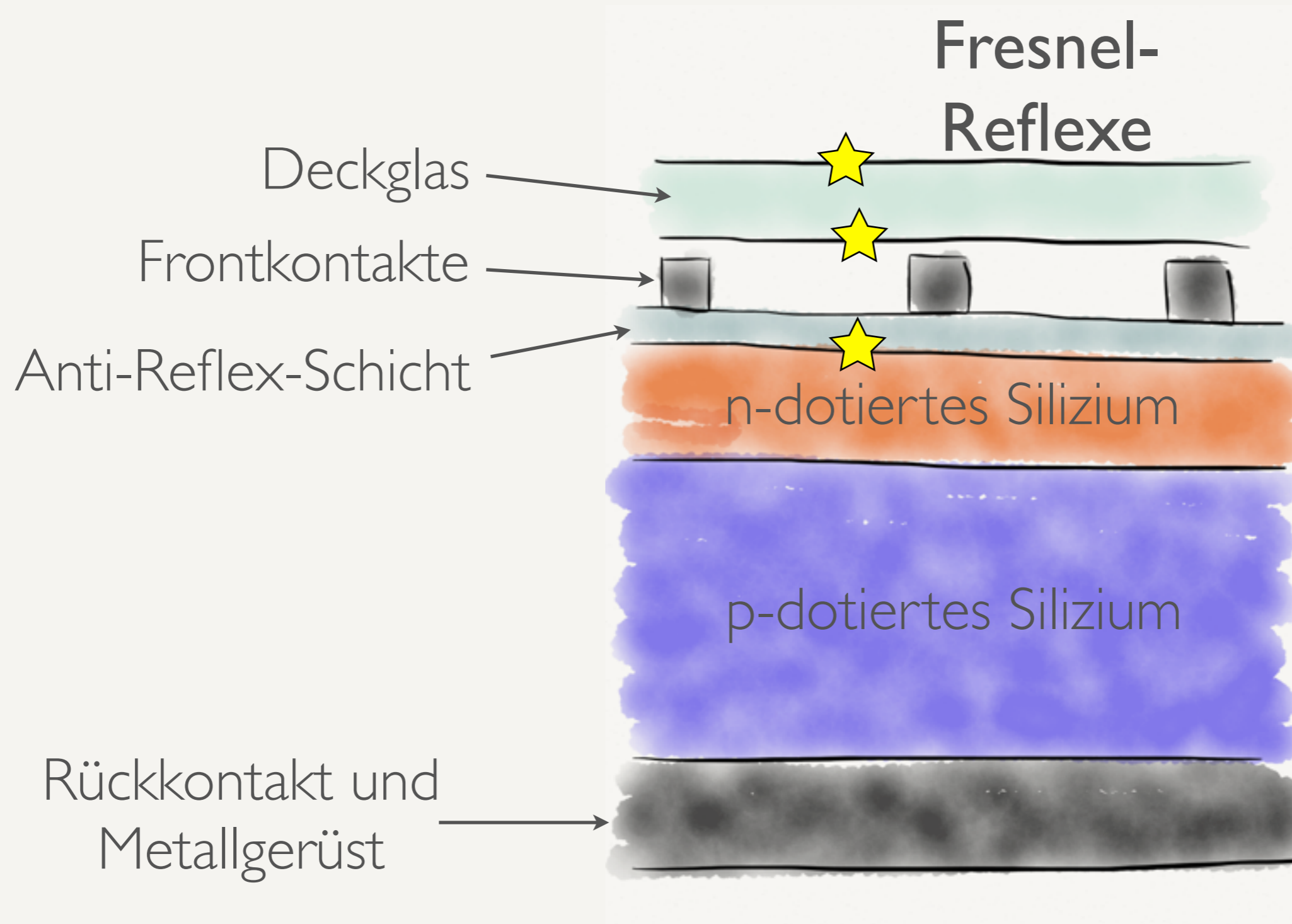
$$R_{\perp} = r_{\perp}^2 = \left(\frac{n_1 \cos \alpha - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}}{n_1 \cos \alpha + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha\right)^2}} \right)^2$$

Fresnel und Silizium



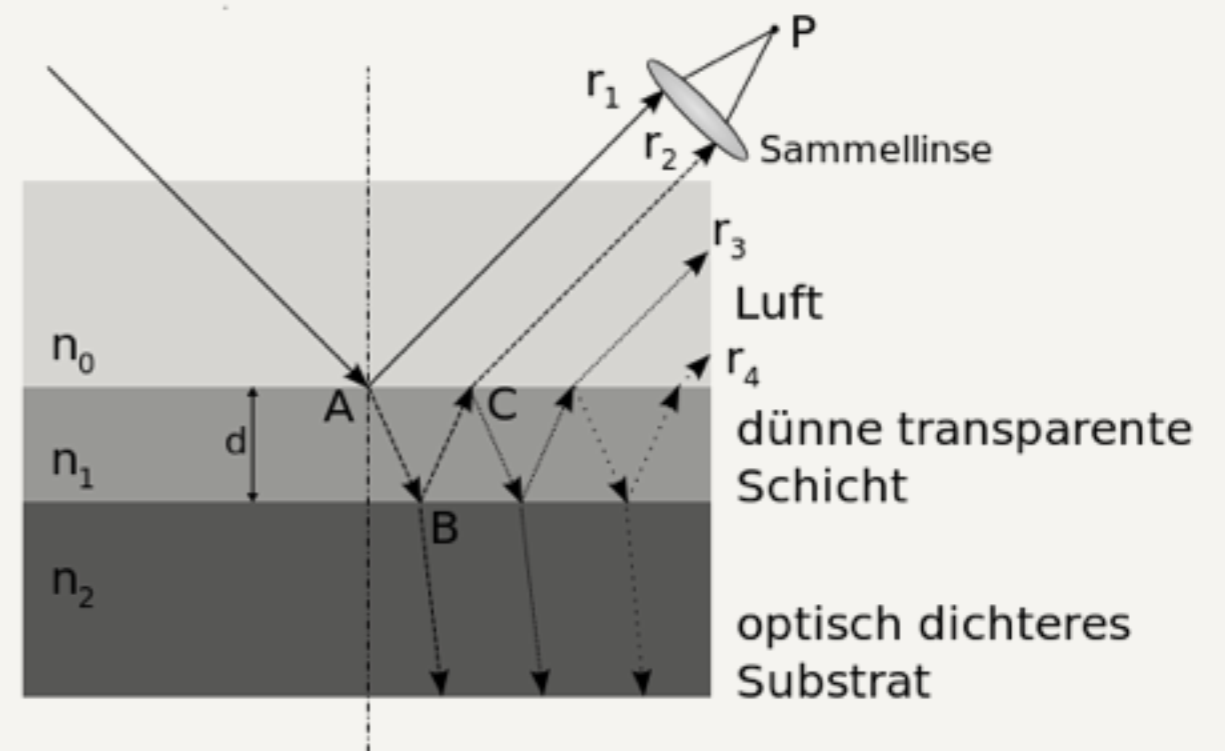
<http://refractiveindex.info/?group=CRYSTALS&material=Si>

Optik und Photovoltaik



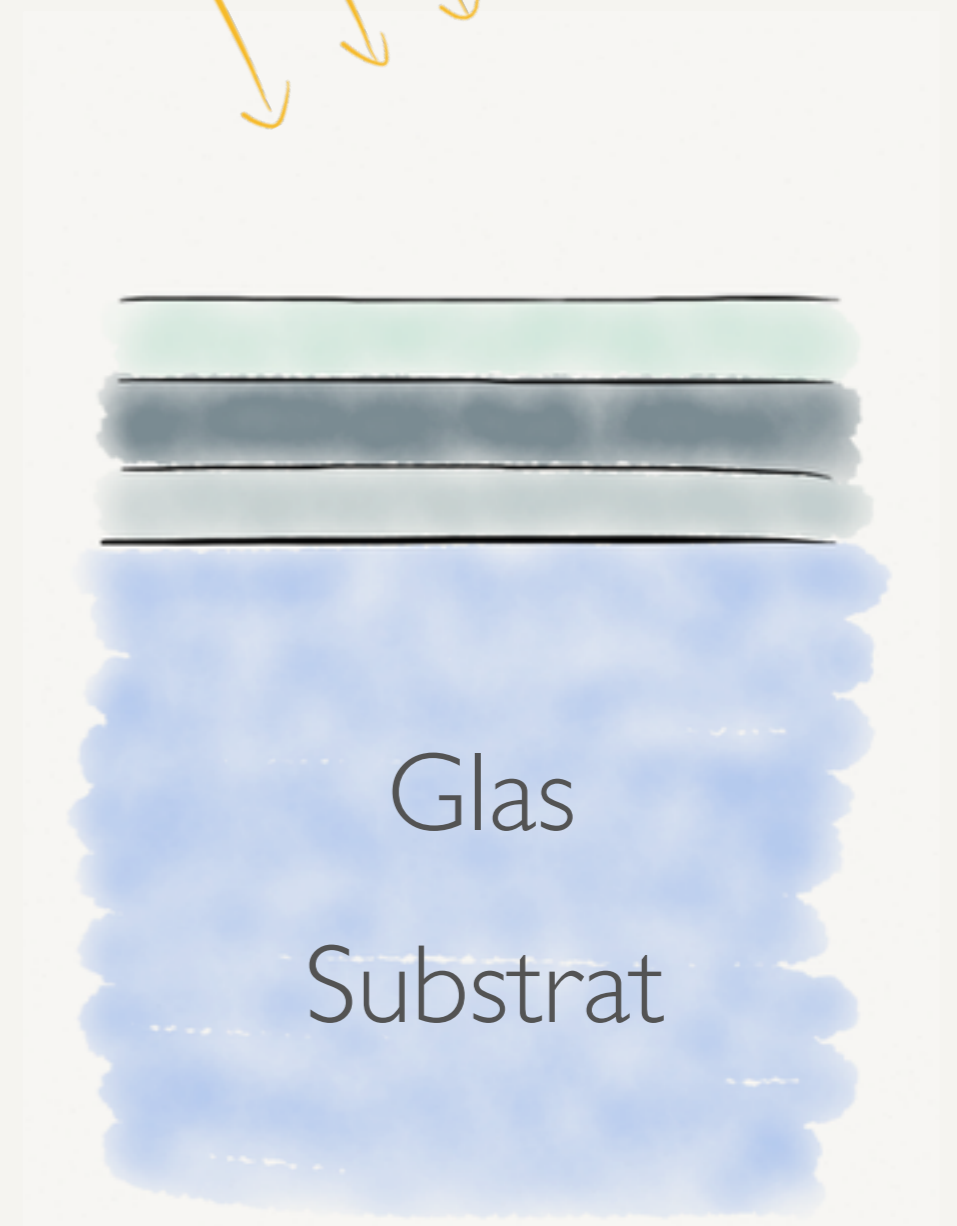
Anti-Reflex-Beschichtung

- Idee: Destruktive Interferenz von reflektierten Wellen
- Eine zusätzliche dünne Schicht auf einem Substrat erzeugt einen zweiten Reflex
- Schichtdicke bestimmt Wellenlänge und Richtung der reflexmindernden Interferenz

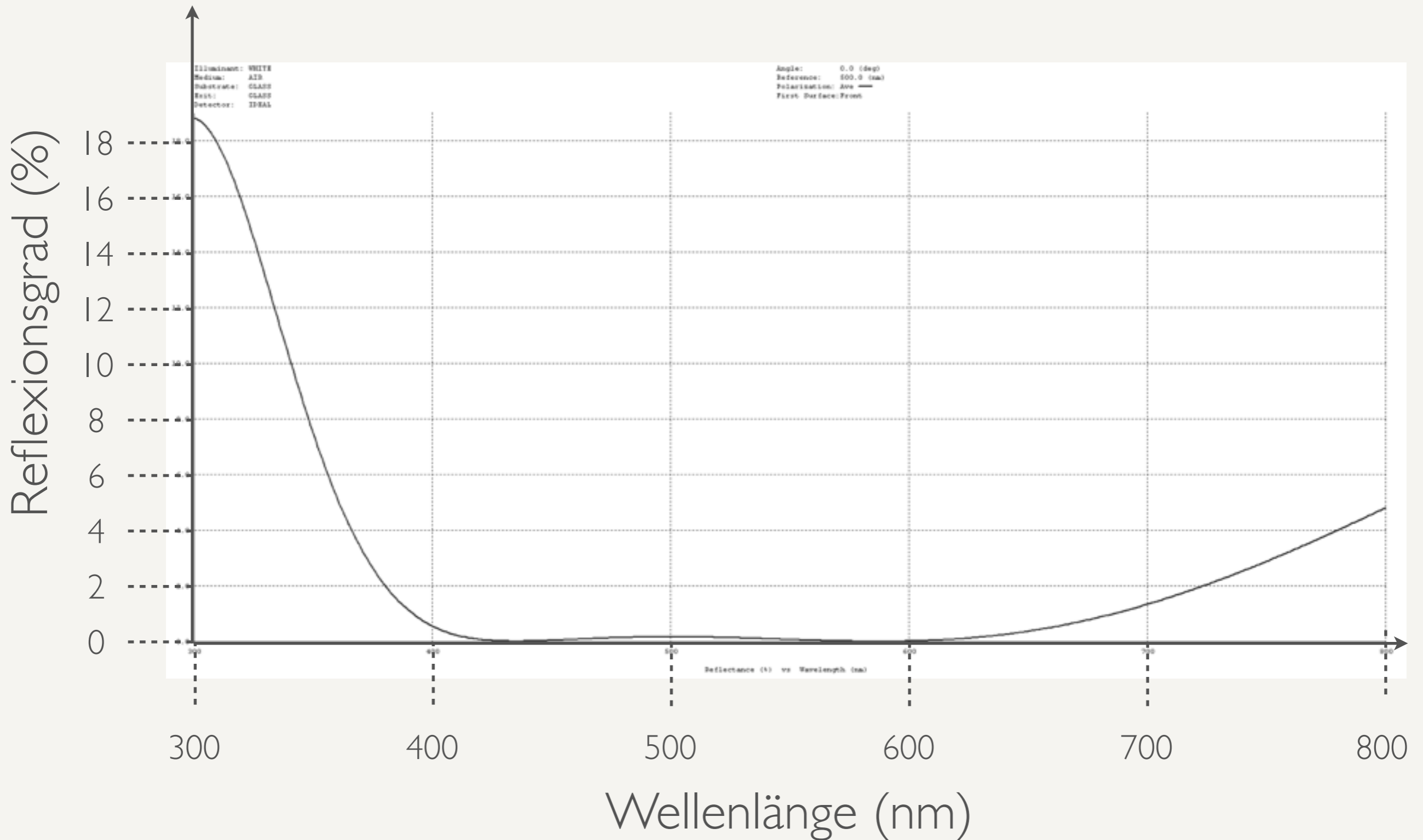


Beispiel: Breitband AR-Schicht

Name	Brechungsindex	Dicke (nm)
MgF ₂	1.38	90.6
TiO ₂	2.15	115.9
Al ₂ O ₃	1.63	76.6
Glas	1.52	Substrat

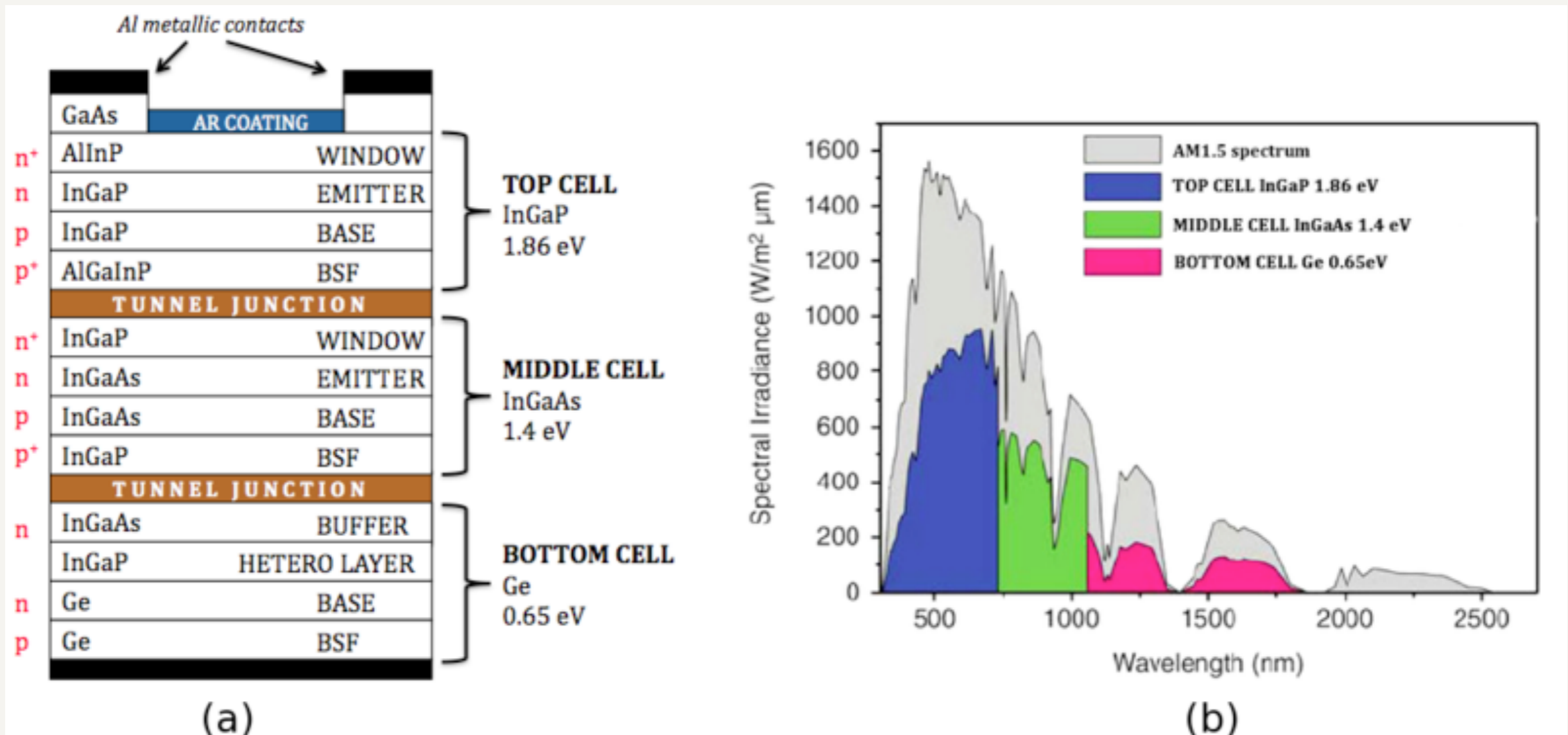


Beispiel: Breitband AR-Schicht



Rekorde

Tandem- oder Stapelzellen



Tandem- oder Stapelzellen

- Stapeln von Materialien mit unterschiedlichen Bandlücken erhöhen den Wirkungsgrad enorm.
- Sehr aufwändig in der Herstellung. Daher oft in Kombination mit konzentrierender Photovoltaik.
- Damit Weltrekord 41.9% (2009) am Fraunhofer-Institut in Freiburg.
- Doch nicht: 44% von der Fa. Solar Junction, USA, Oktober 2012
- Ganz neu: Fraunhofer wieder vorne: 44.9% (2013).

