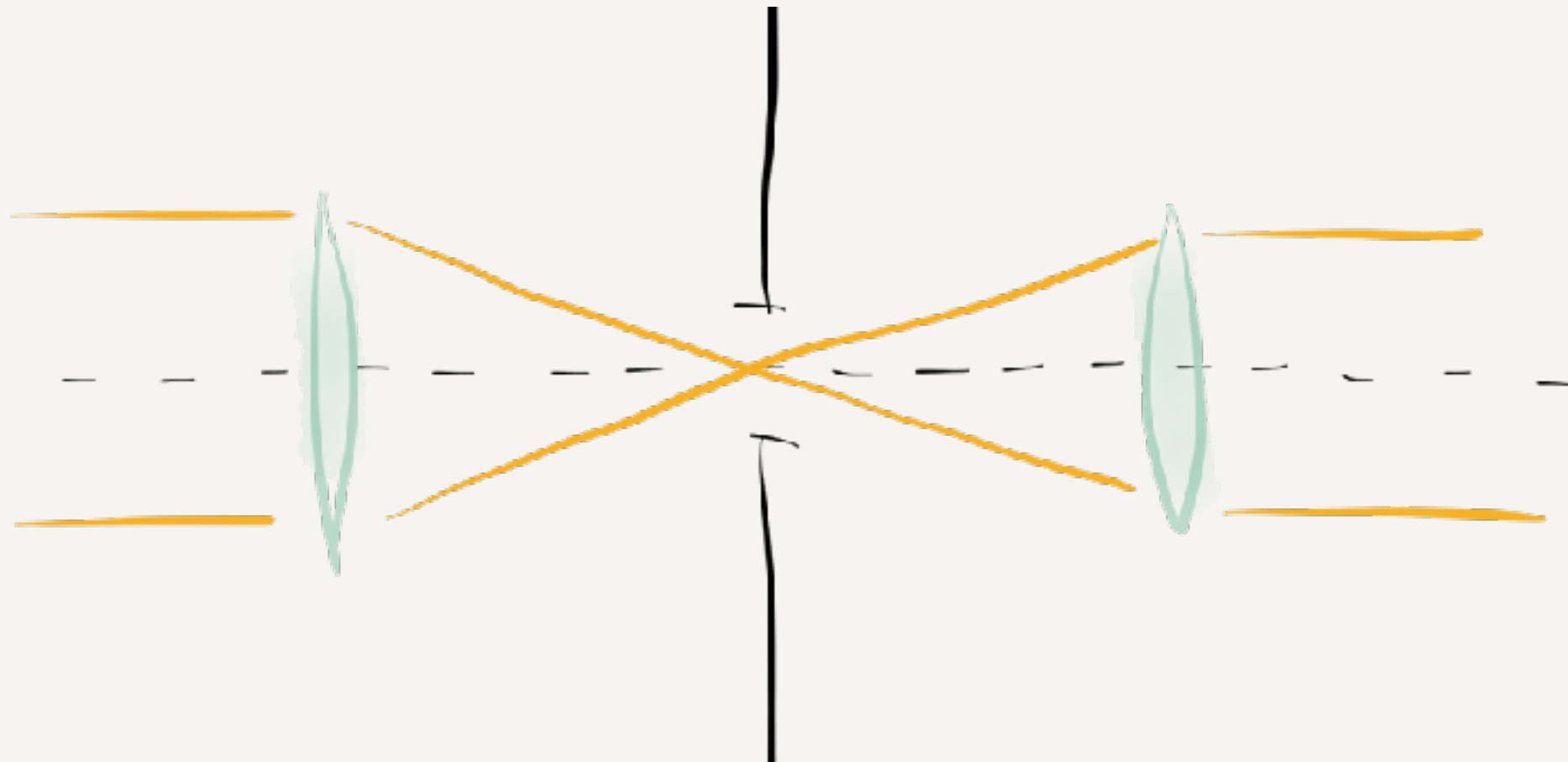


# Fortgeschrittene Photonik

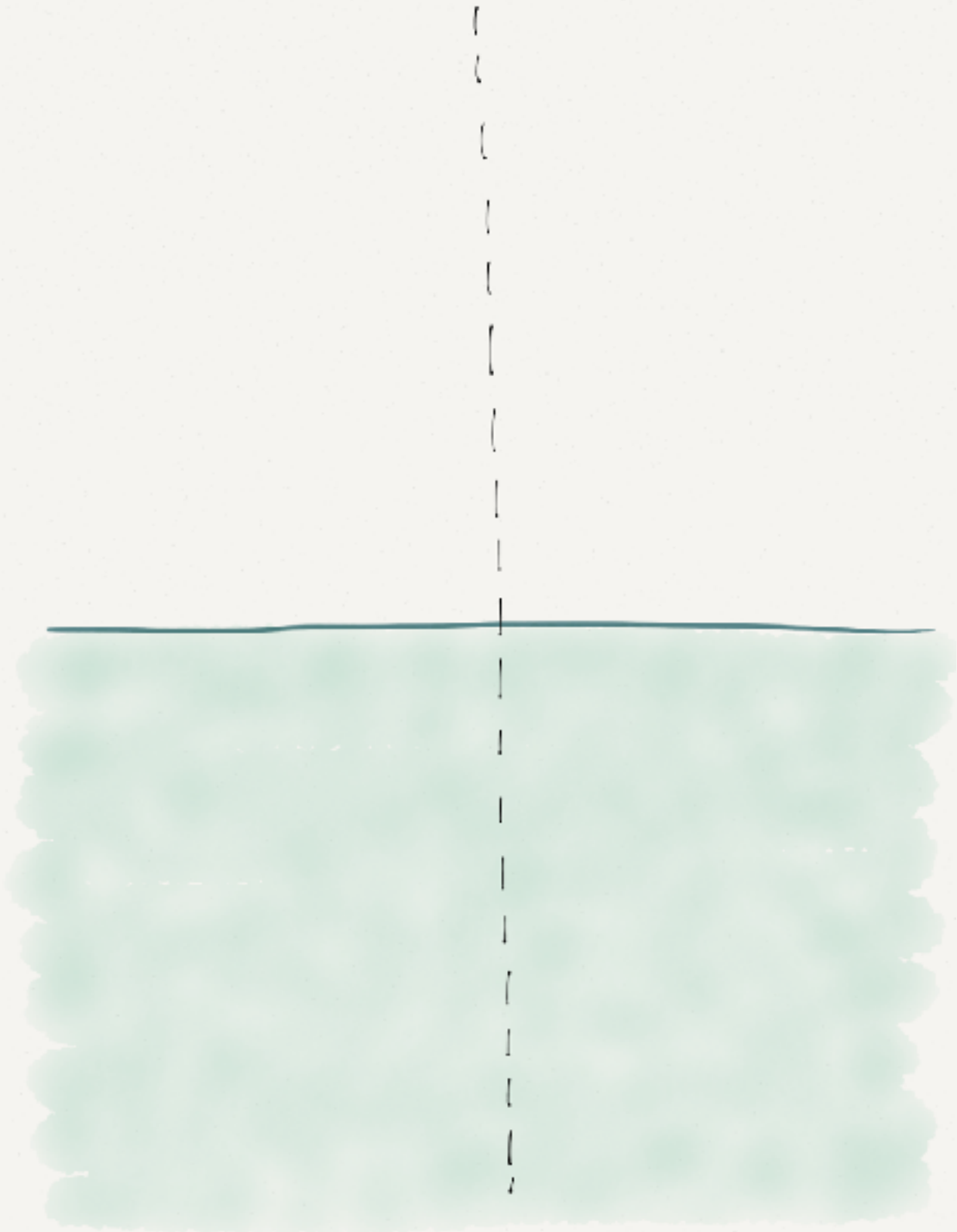
## Technische Nutzung von Licht

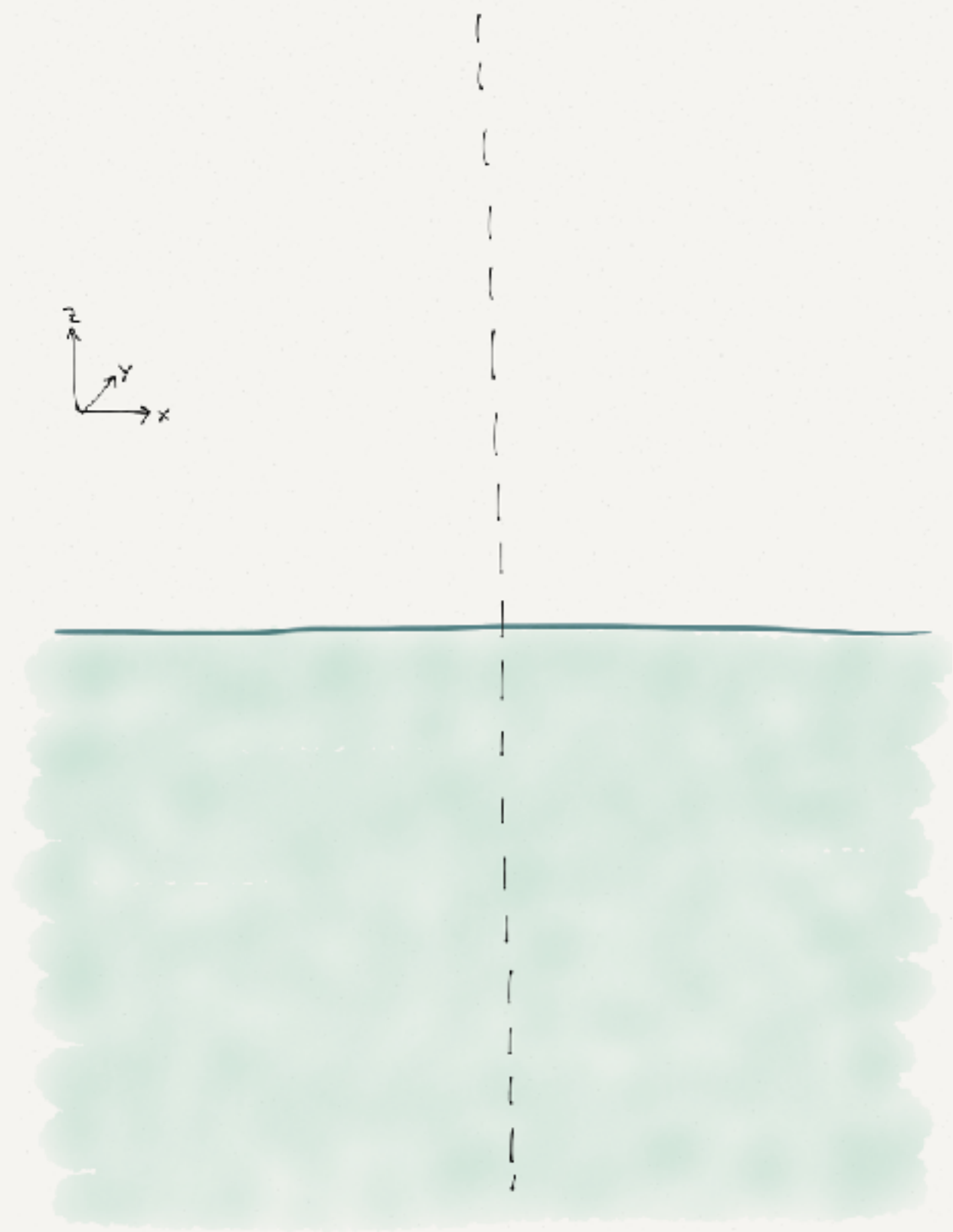


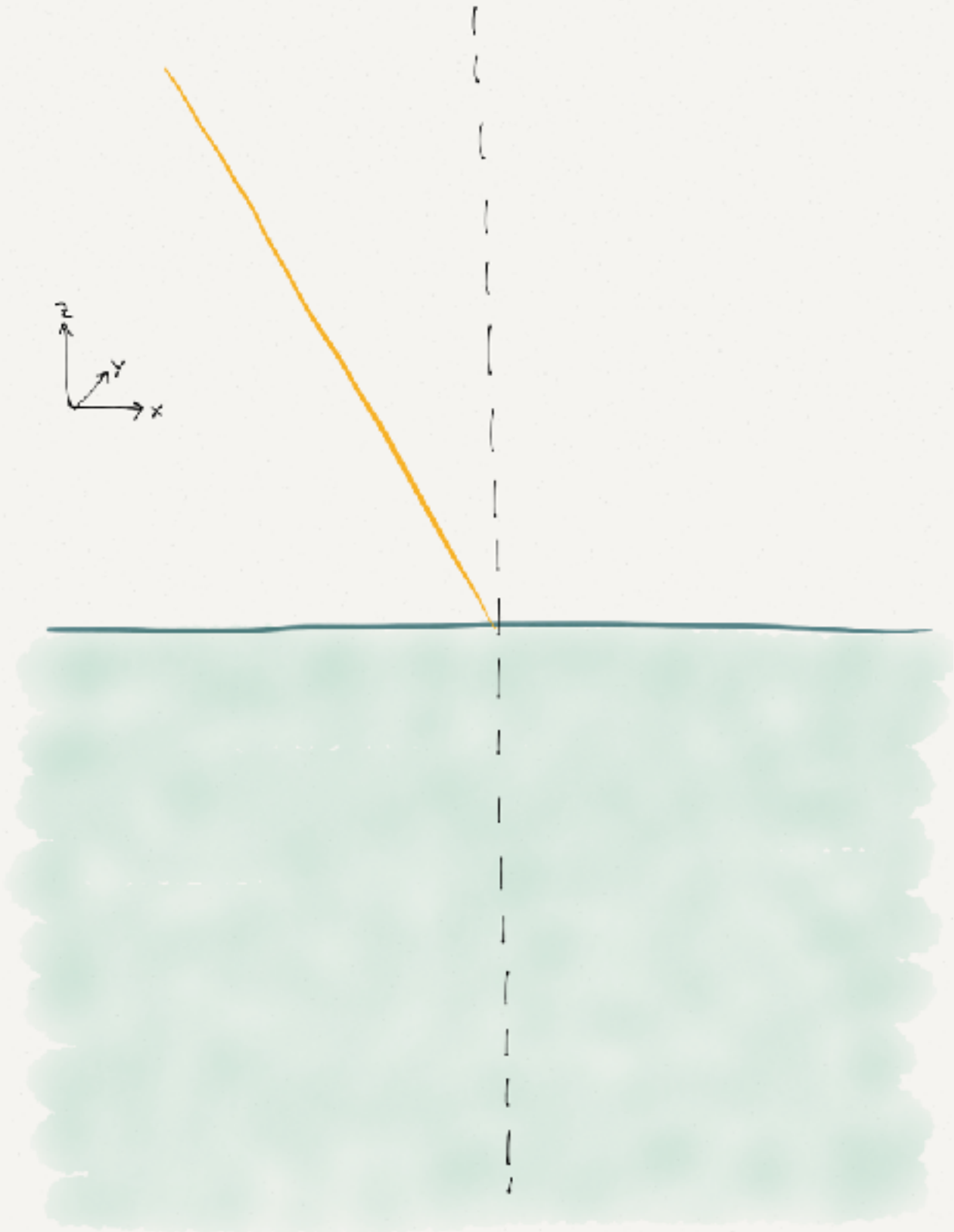
Fresnel Formeln

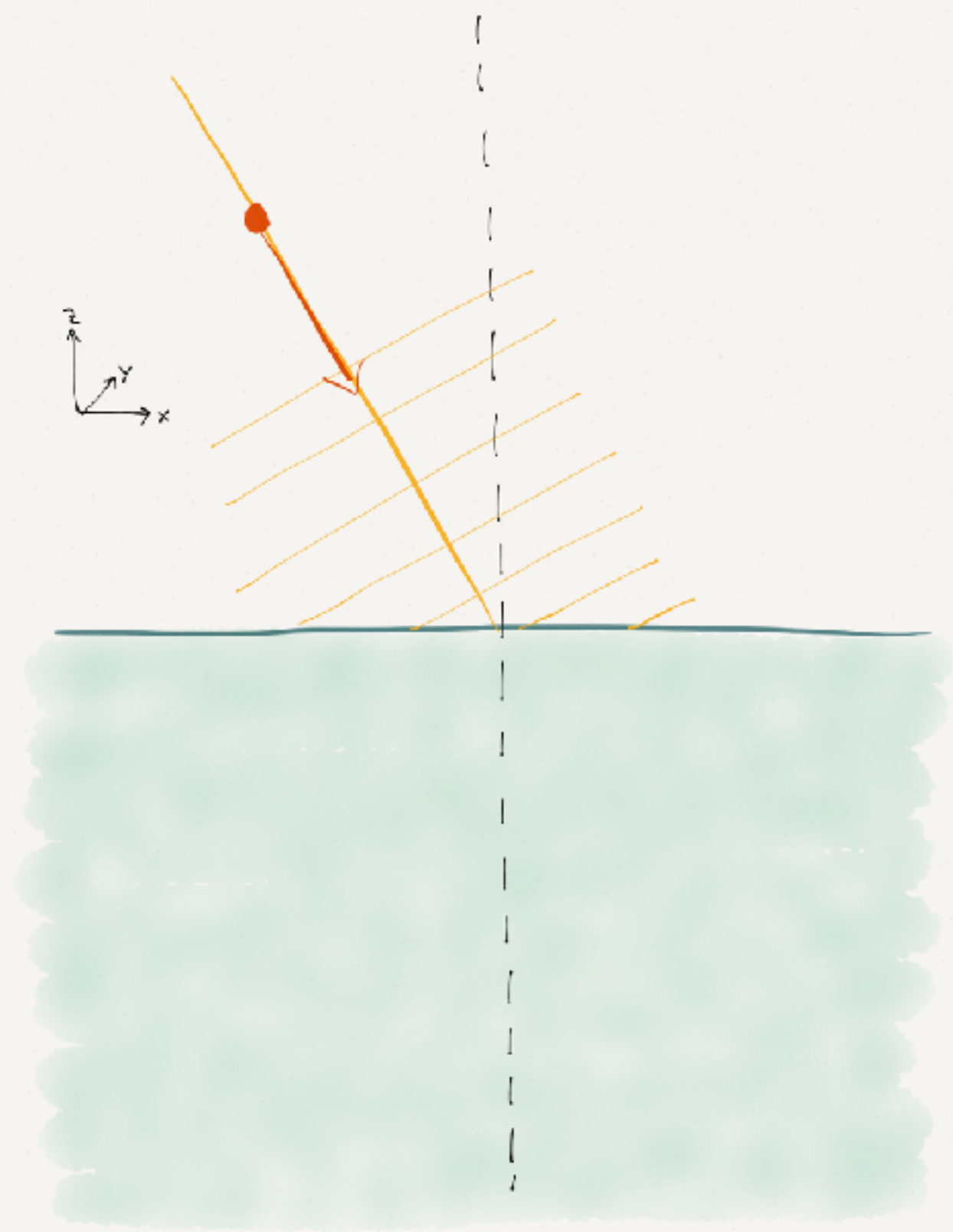
# Fresnel'sche Formeln

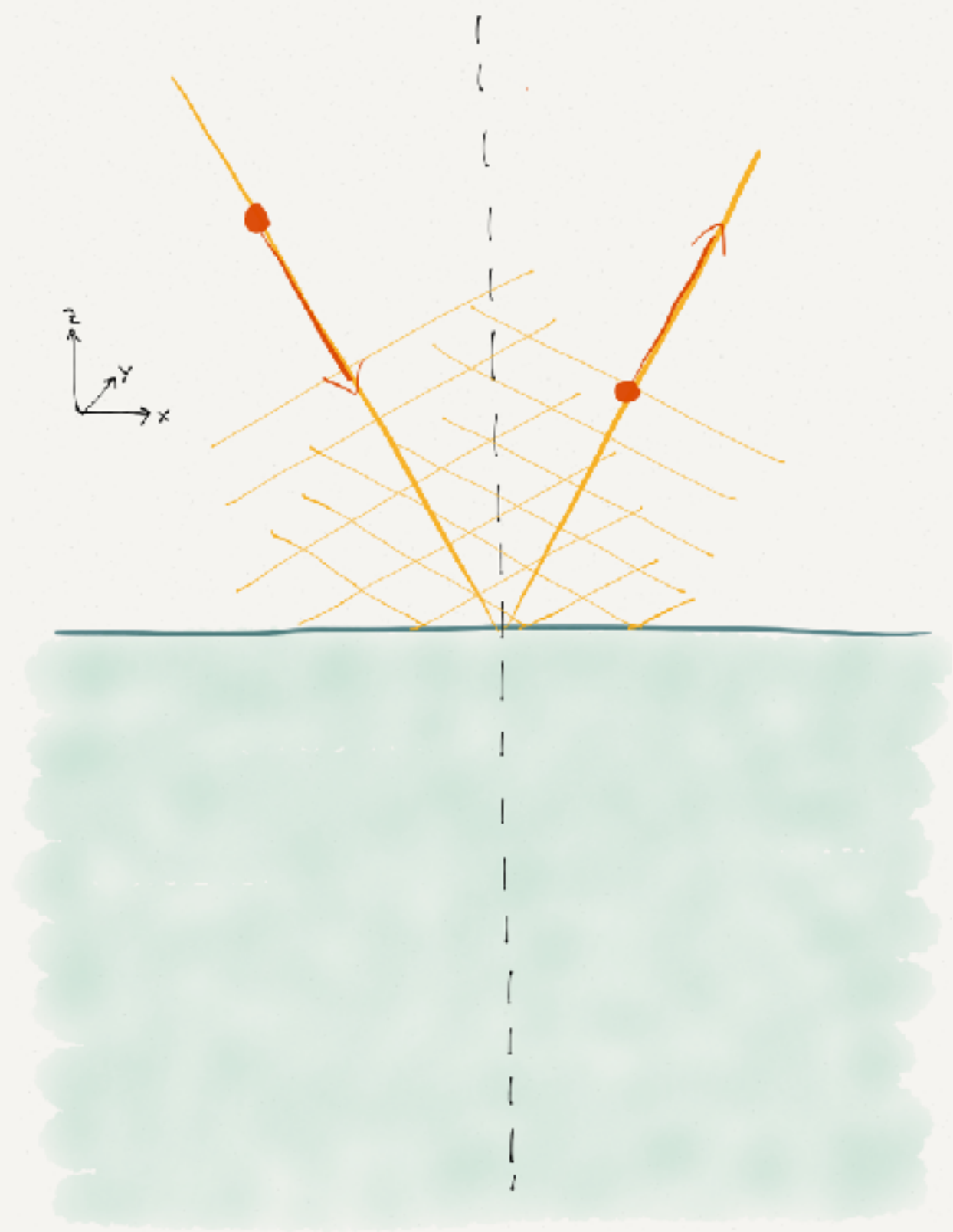
## Anschaulich

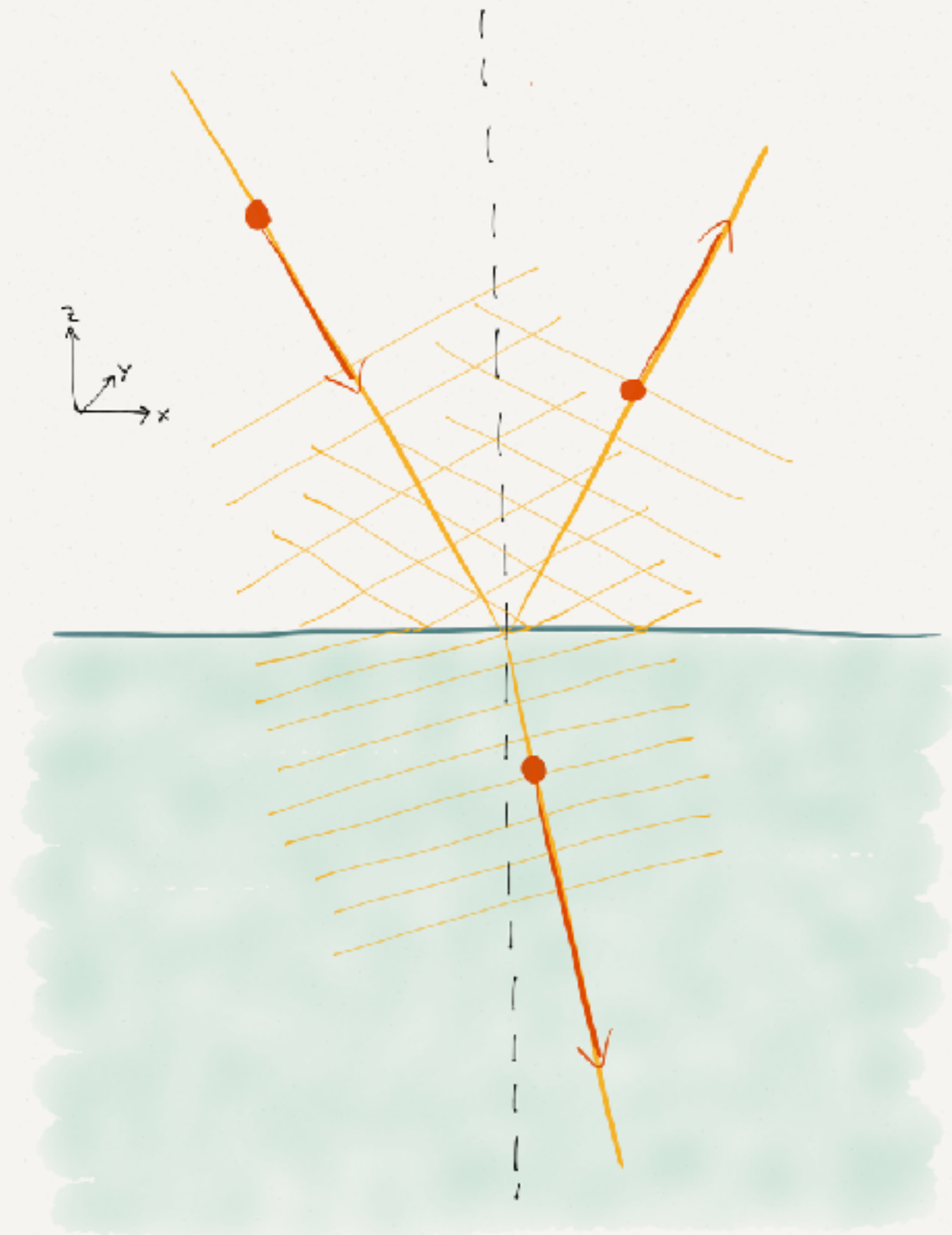




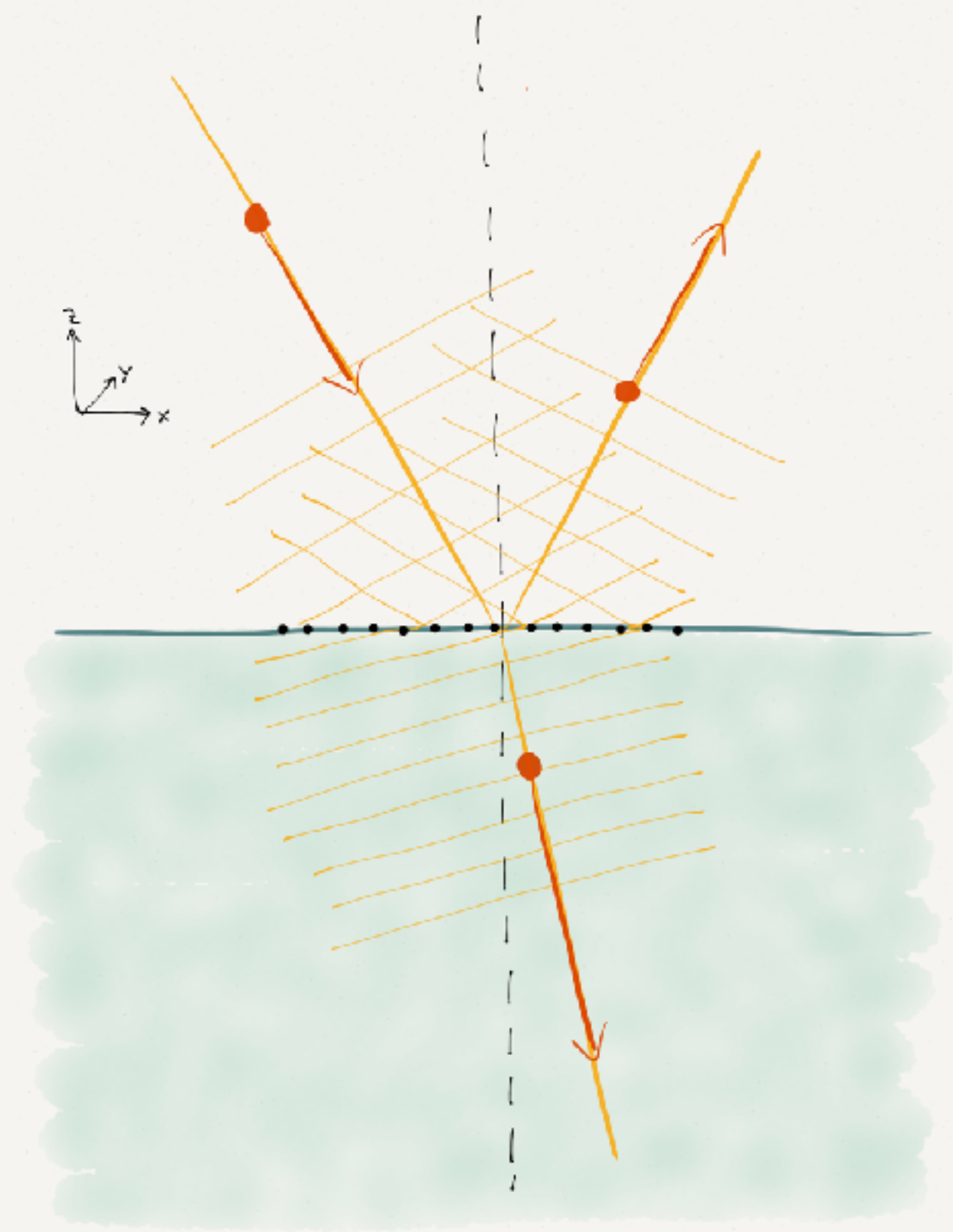


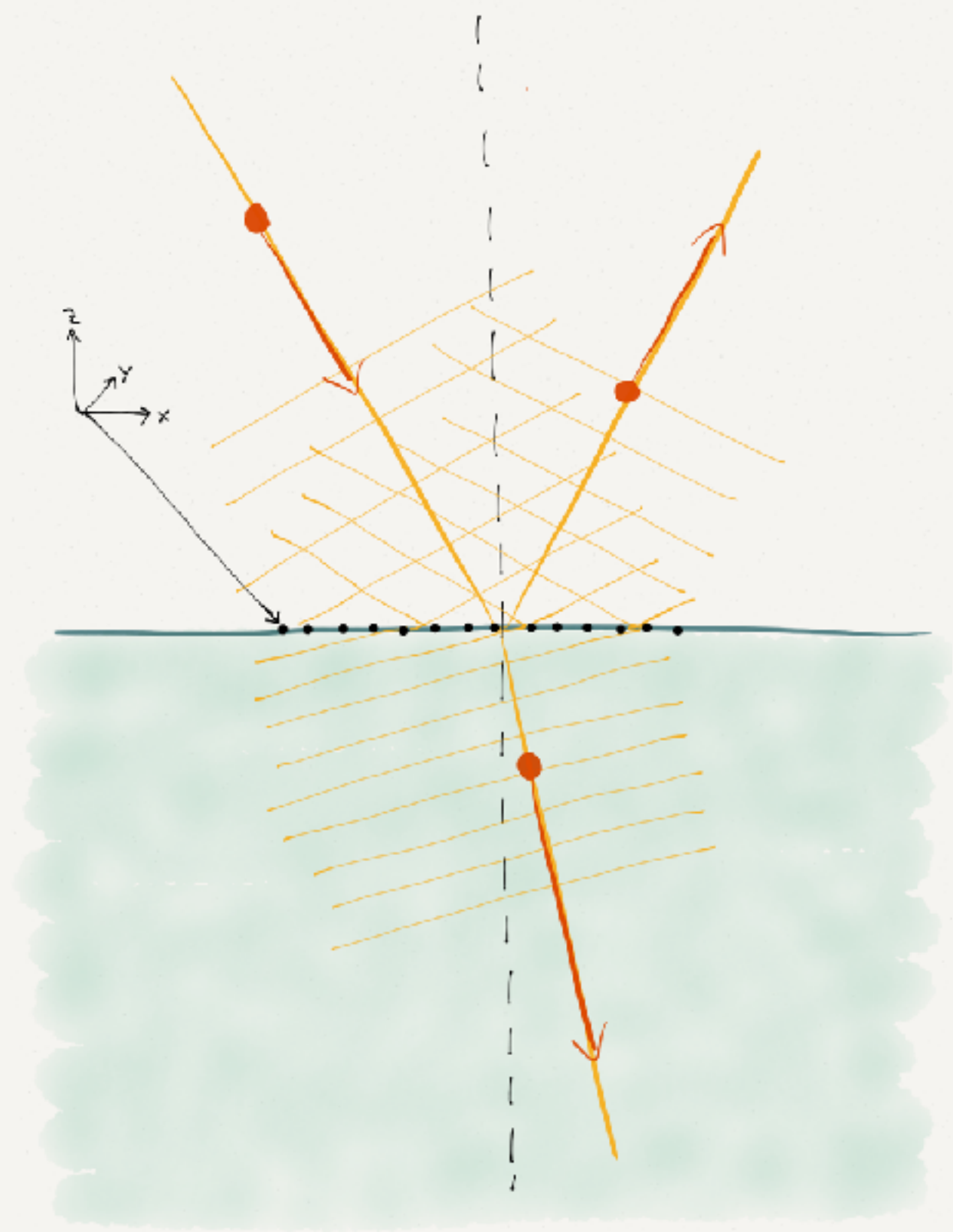












# Fresnel'sche Formeln

## Formeln

# 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:

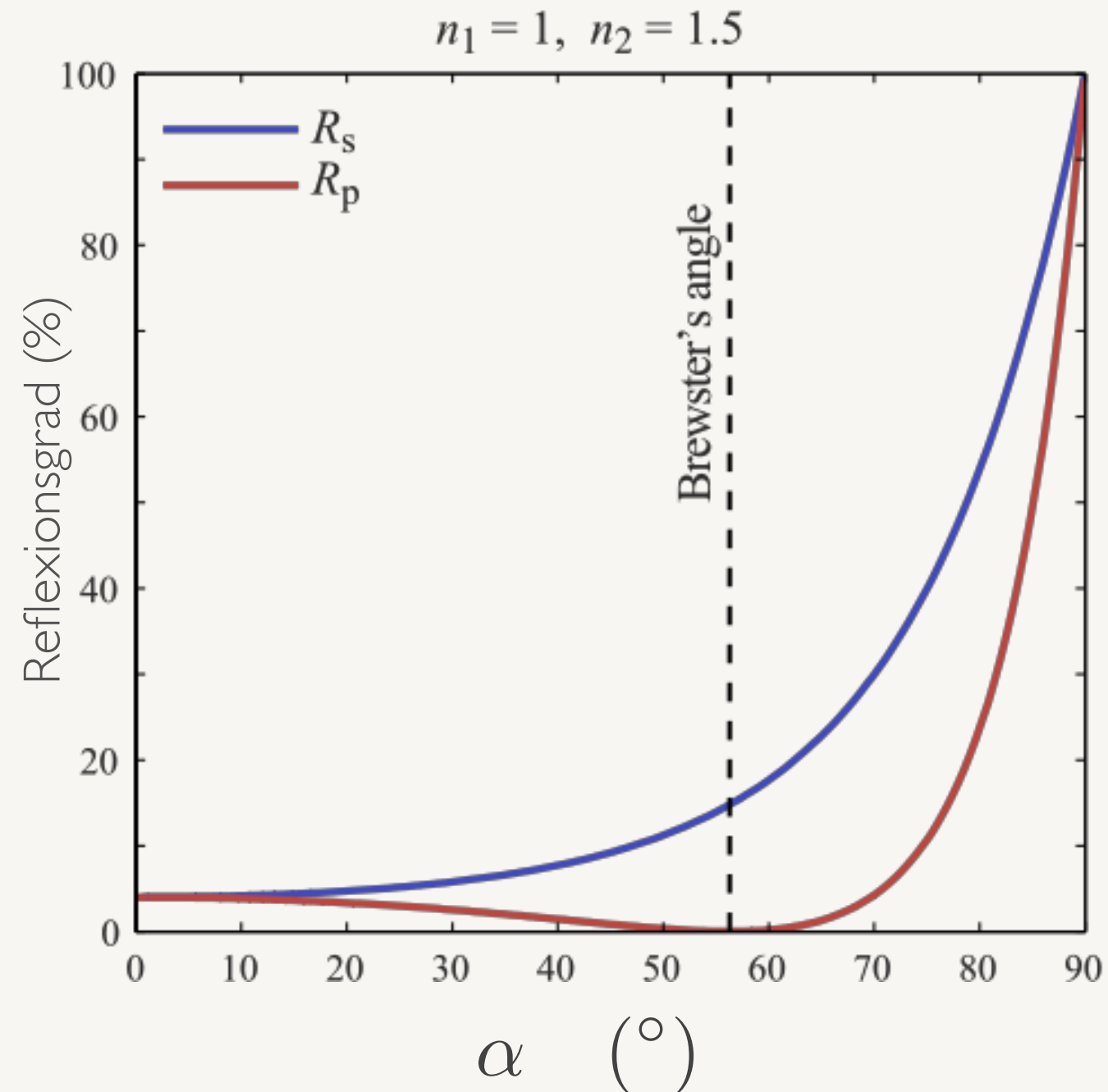
$$T_{\parallel, \perp} = \frac{n_2 \cos \beta}{n_1 \cos \alpha} \cdot t_{\parallel, \perp}^2$$

⇒ Zu kompliziert

# Reflexionsgrad I

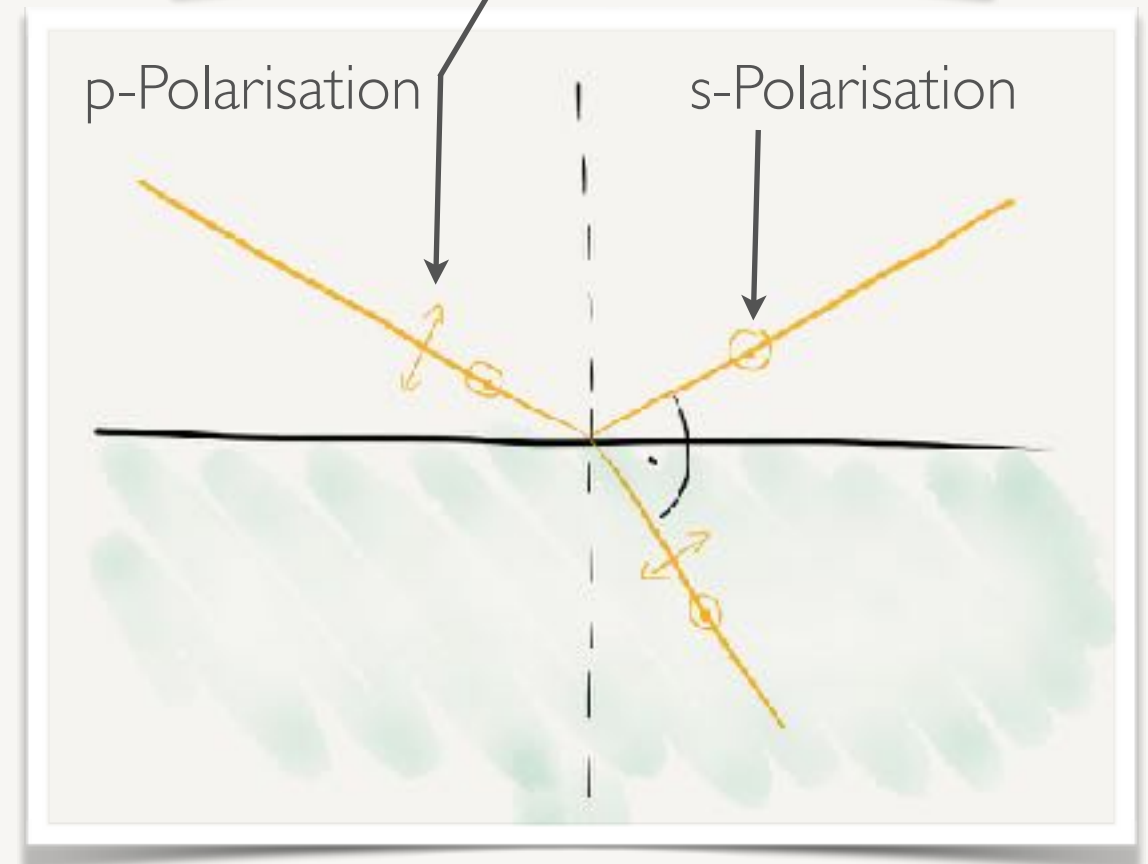
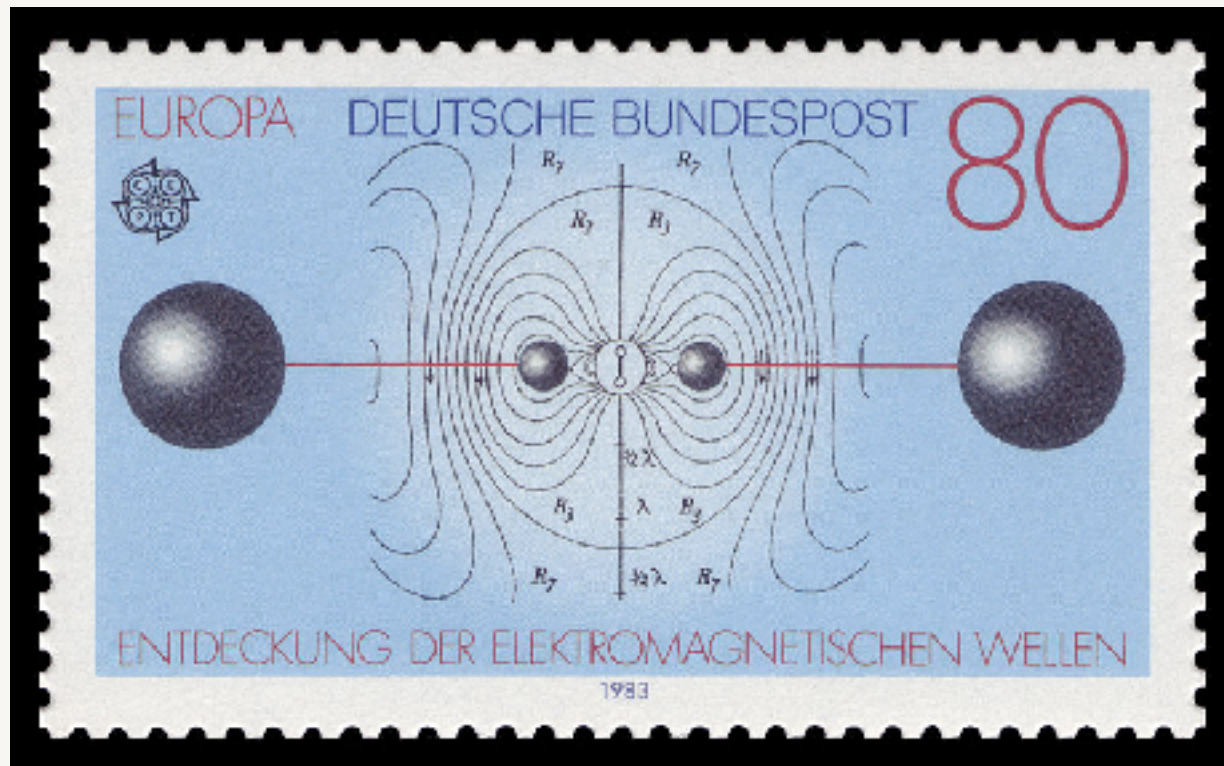
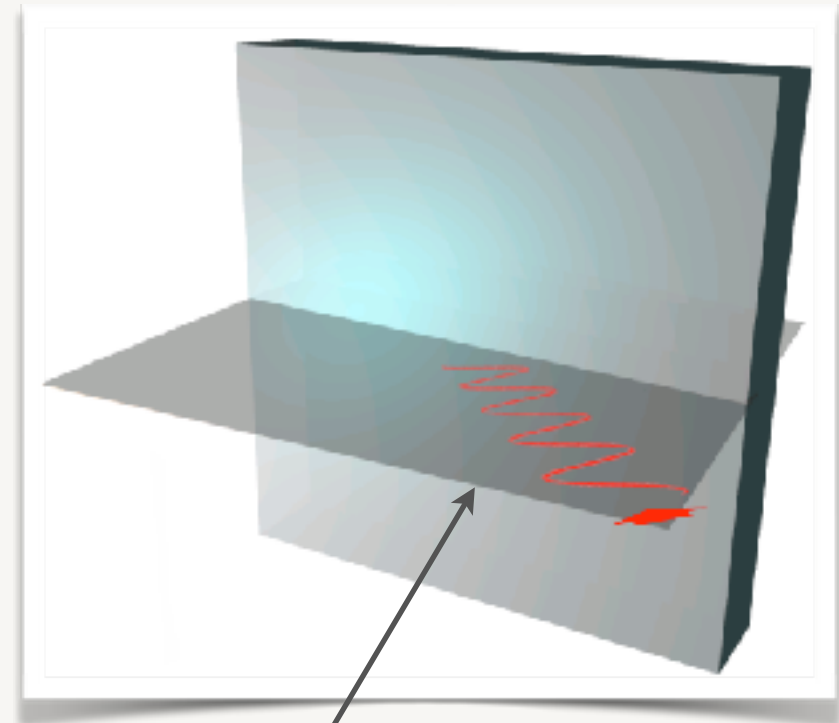
## Vom dünnen ins dichte Medium

- 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:

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

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

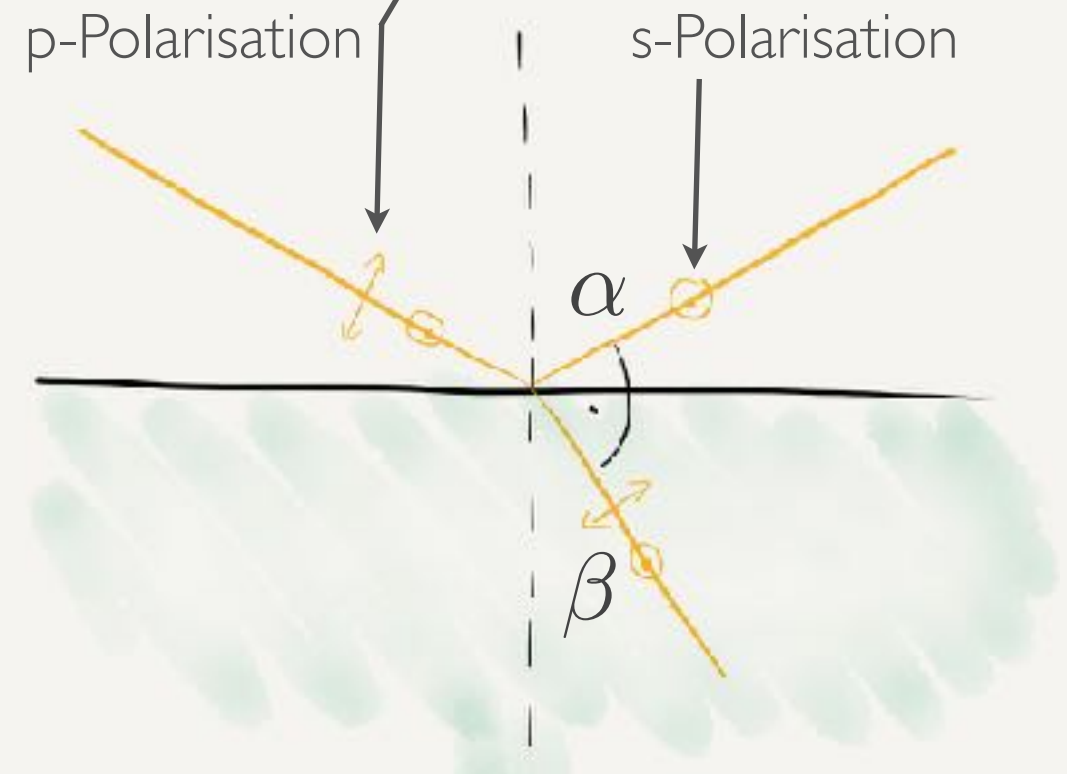
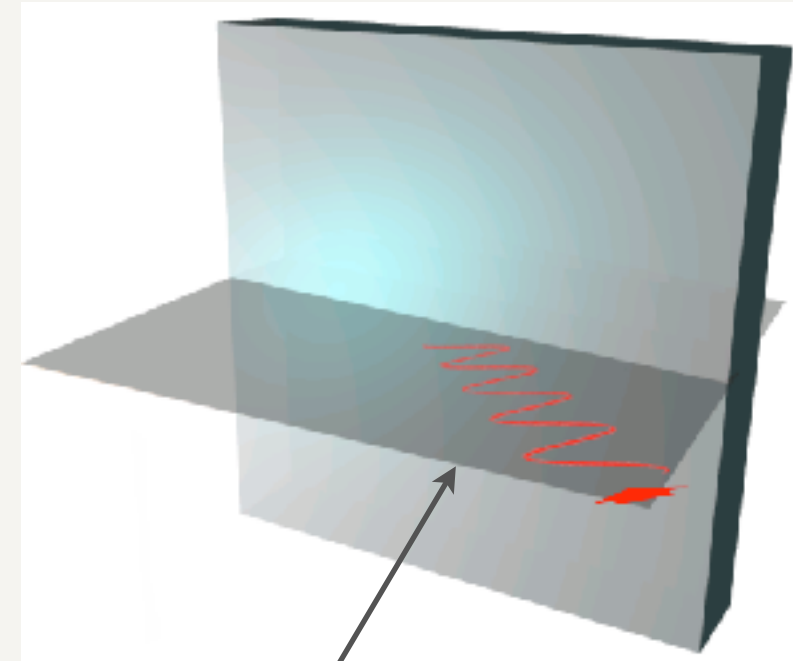
Also:

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

Für den Brewster-Winkel  $\alpha_B$ :

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

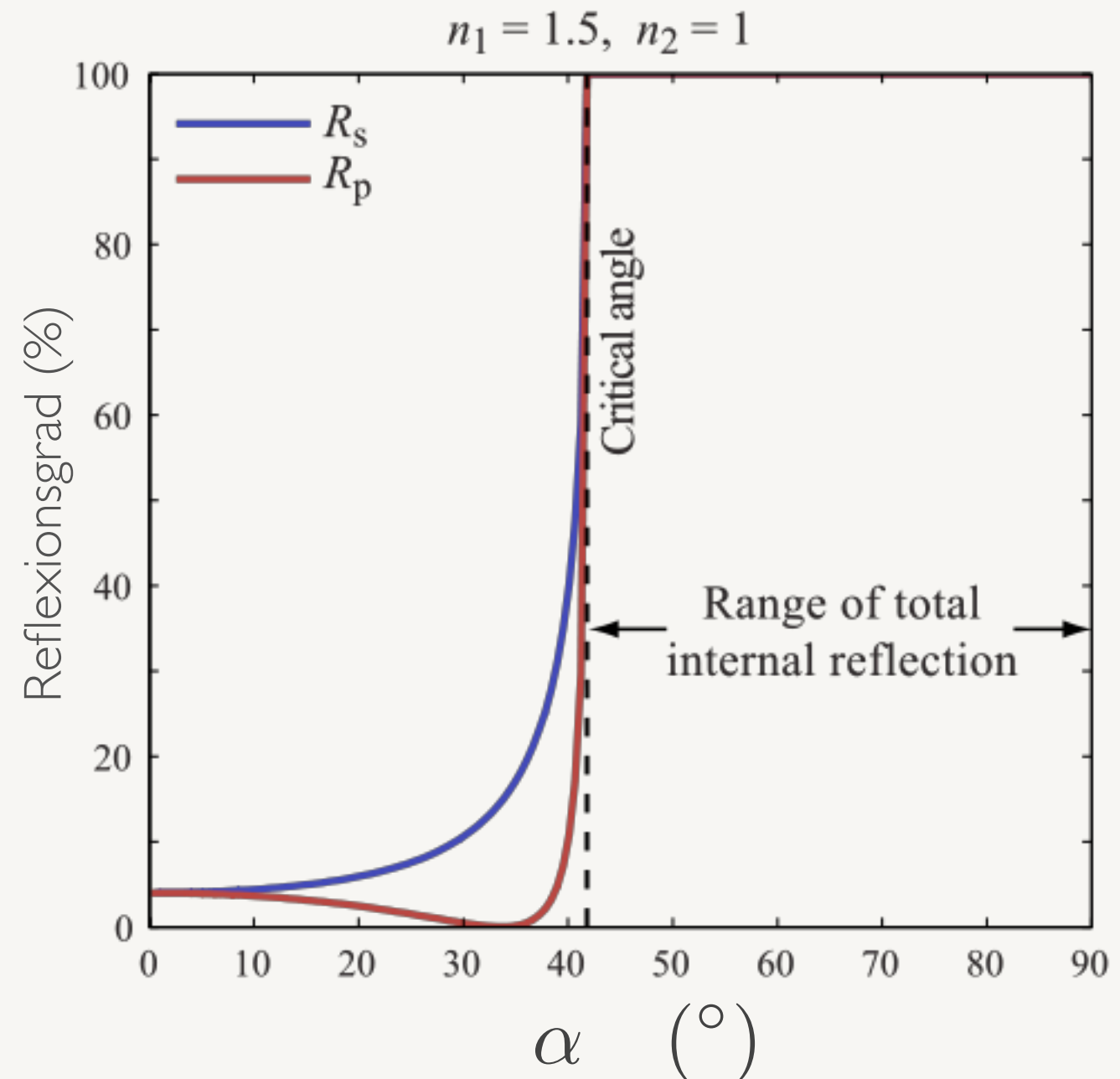
$$\Rightarrow \tan \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$



# Reflexionsgrad II

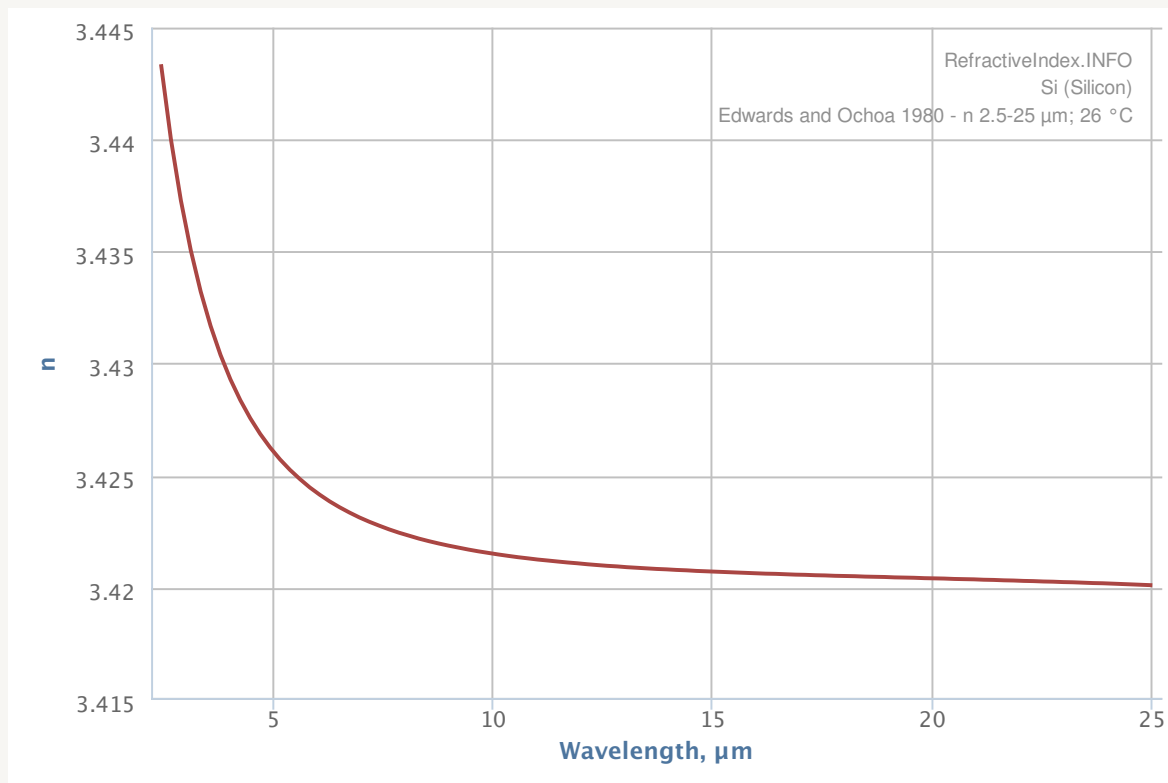
## Vom dichten ins dünne Medium

- 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

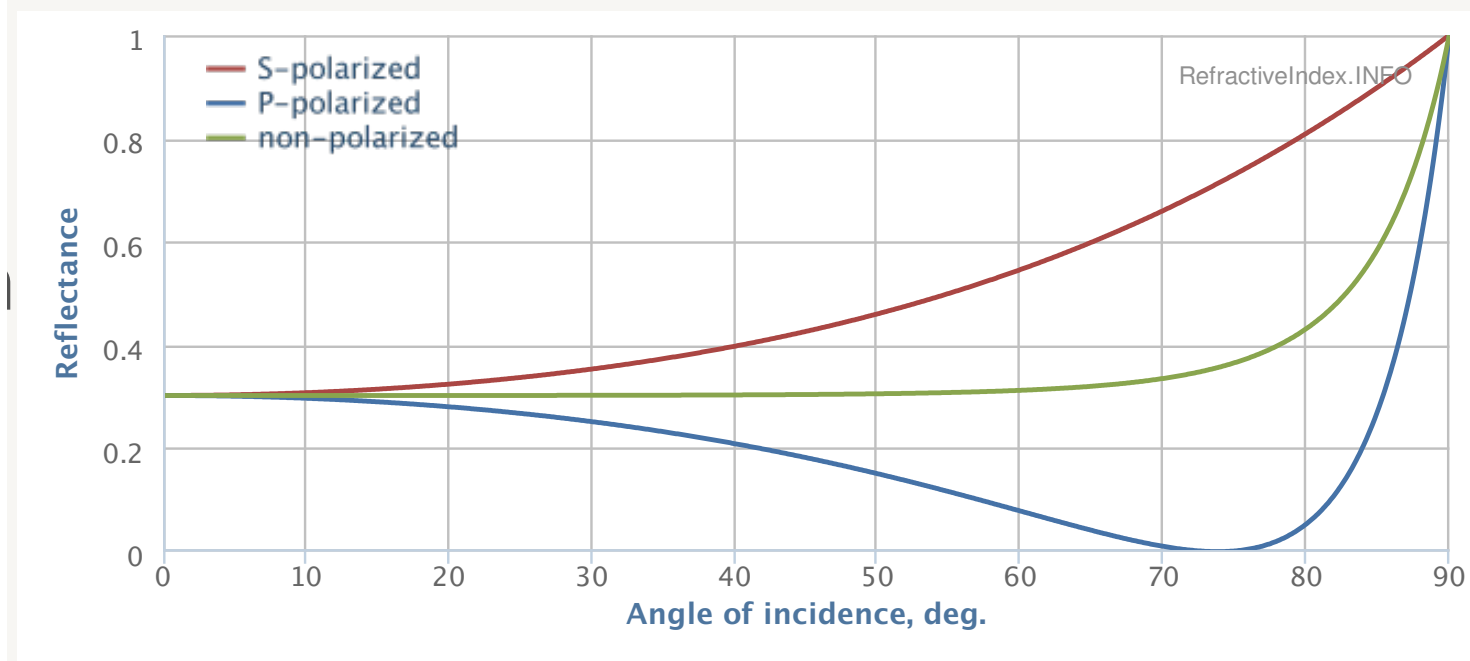




# Nachschlagen



Brechungsindex Silizium



Reflexionsgrad nach Fresnel von Silizium

# Fresnel'sche Formeln

## Absorption

# Intensität

- Intensität ist definiert als Energie pro Fläche und Zeit.
- Energiedichte des E-Feldes ist:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

- Energiedichte des B-Feldes ist:

$$u_B = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad \underset{E=cB}{=} \quad \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

- Zusammen:

$$u = u_E + u_B = \epsilon E^2$$

$$\text{Intensität} = \frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$$

Instantane Intensität

$$I = c \cdot u = c \cdot \epsilon E^2$$

# Intensität

- Die durch die Welle transportierte Energie ist proportional zu  $E^2$ .
- Kein Detektor ist schnell genug um diesen Zeitverlauf zu folgen.
- Daher ist eine Intensitätsmessung eine Mittelwertbildung über viele Schwingungen  $N$  der Welle.

$$E^2 \sim \sin^2 \omega t$$

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t$$

$$\begin{aligned} \overline{\sin^2 \omega t} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) dt \\ &= \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$I = \overline{c \cdot \epsilon E^2}$$

$$I = \frac{1}{2} c \cdot \epsilon E_0^2$$

# Poynting-Vektor

- Der Poynting-Vektor gibt den Energiefluss an.
- Dies ist gerade die vektorielle Darstellung der instantanen Intensität.
- Der Poynting-Vektor zeigt in die gleiche Richtung wie der  $k$ -Vektor.

$$\begin{aligned}\vec{S} &= \vec{E} \times \vec{H} \\ &= \varepsilon c^2 \vec{E} \times \vec{B}\end{aligned}$$

# Komplexer Brechungsindex

- Eine Möglichkeit die Absorption von Wellen darzustellen ist über einen komplexen Brechungsindex.
- Der Imaginärteil führt zu einem exponentiellen Abfall des E-Feldes und mithin zum...
- Lambert-Beert'schen Gesetz

$$n^* = n + i\kappa$$

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = e^{-\kappa k_0 x} e^{i(kx - \omega t)}$$

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

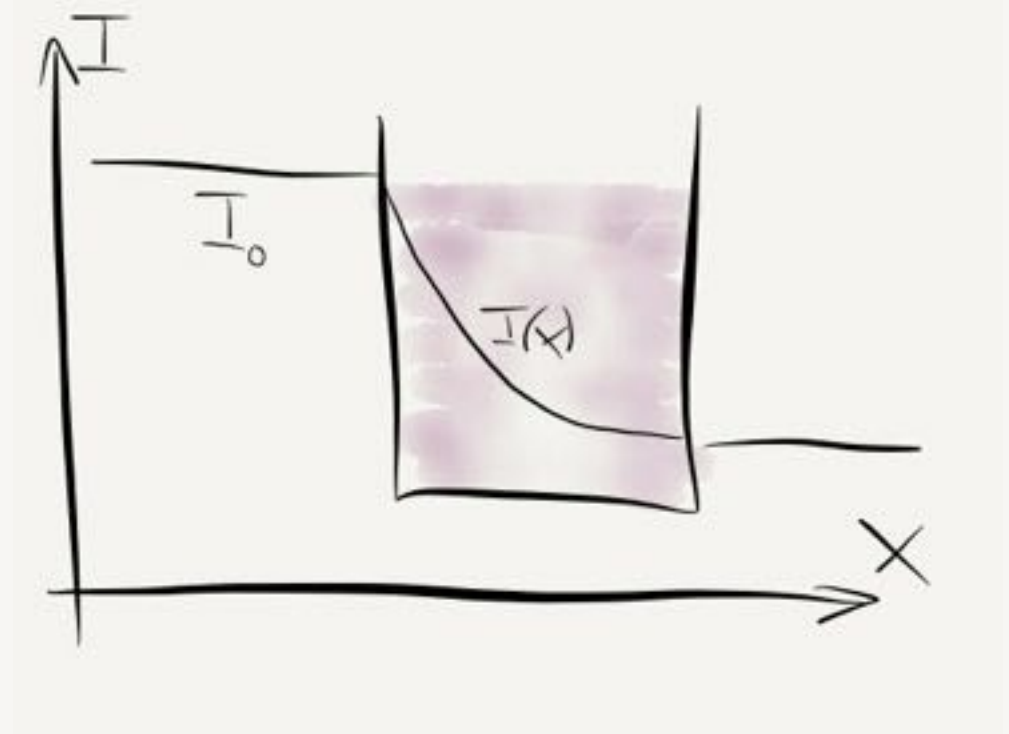
$$\text{mit } \alpha = 2\kappa k_0 = 2\kappa \frac{\omega}{c_0}$$

# Transmission und Absorption

## Vorlesung 01

- 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)

[Herleitung bei Chemgapedia](#)



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

Lambert-Beer'sches Gesetz

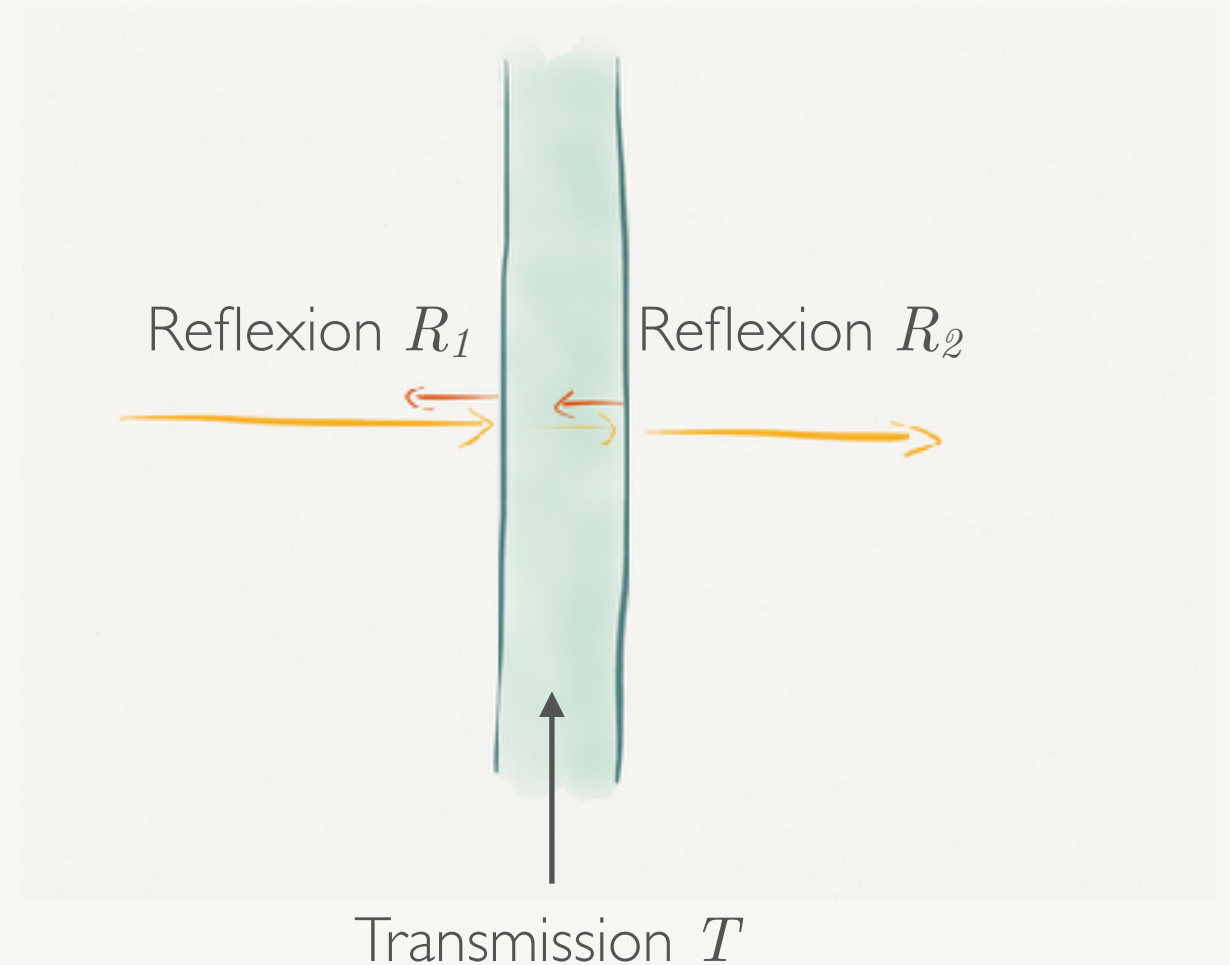
# Fresnel'sche Formeln

## Anwendungen



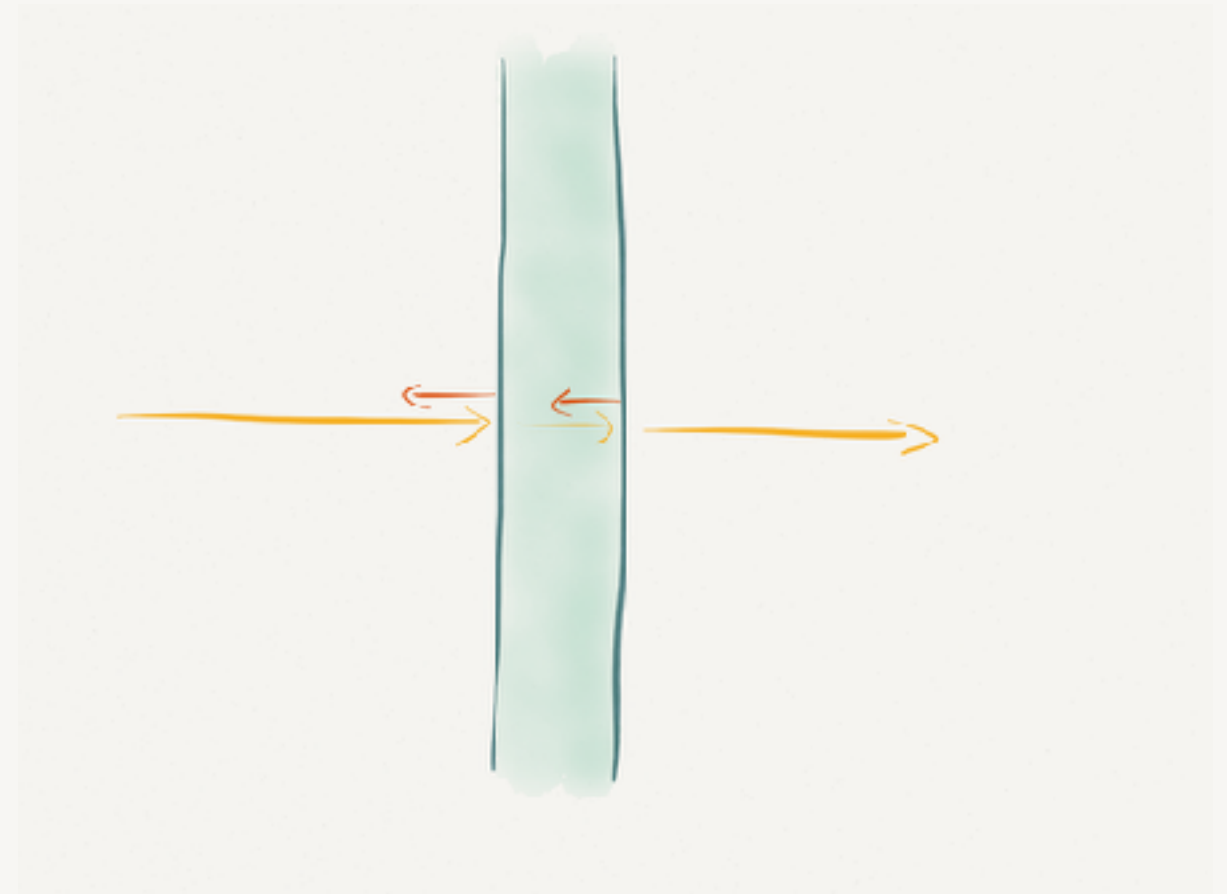
# Transmissionsmessung

- Eine Transmissionsmessung macht zwei Messungen:
  - ▶ Referenz (ohne Probe)
  - ▶ Probe
- Das Verhältnis der Intensitäten ist die Transmission.
- Auch hier müssen die Fresnel-Reflexe berücksichtigt werden.
- Das gilt insbesondere für winkelaufgelöste Messungen.



# Transmissionsmessung

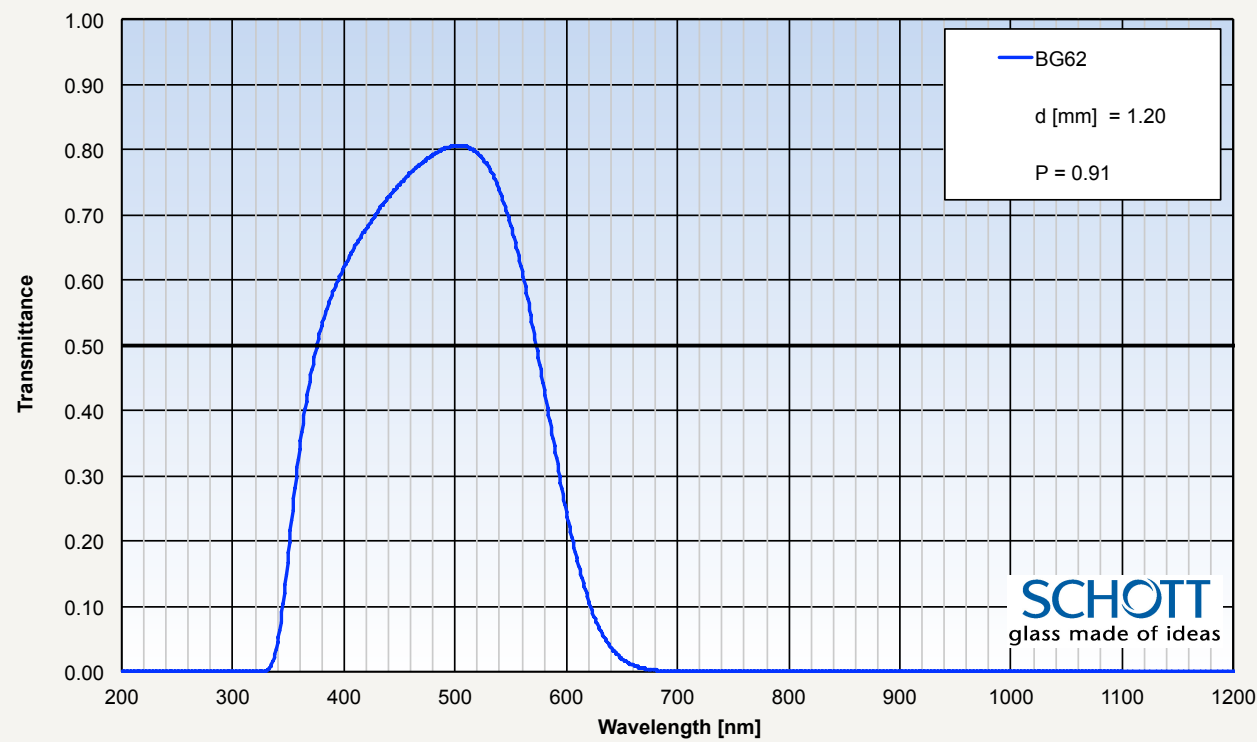
- Eine Transmissionsmessung macht zwei Messungen:
  - ▶ Referenz (ohne Probe)
  - ▶ Probe
- Das Verhältnis der Intensitäten ist die Transmission.
- Auch hier müssen die Fresnel-Reflexe berücksichtigt werden.
- Das gilt insbesondere für winkelaufgelöste Messungen.



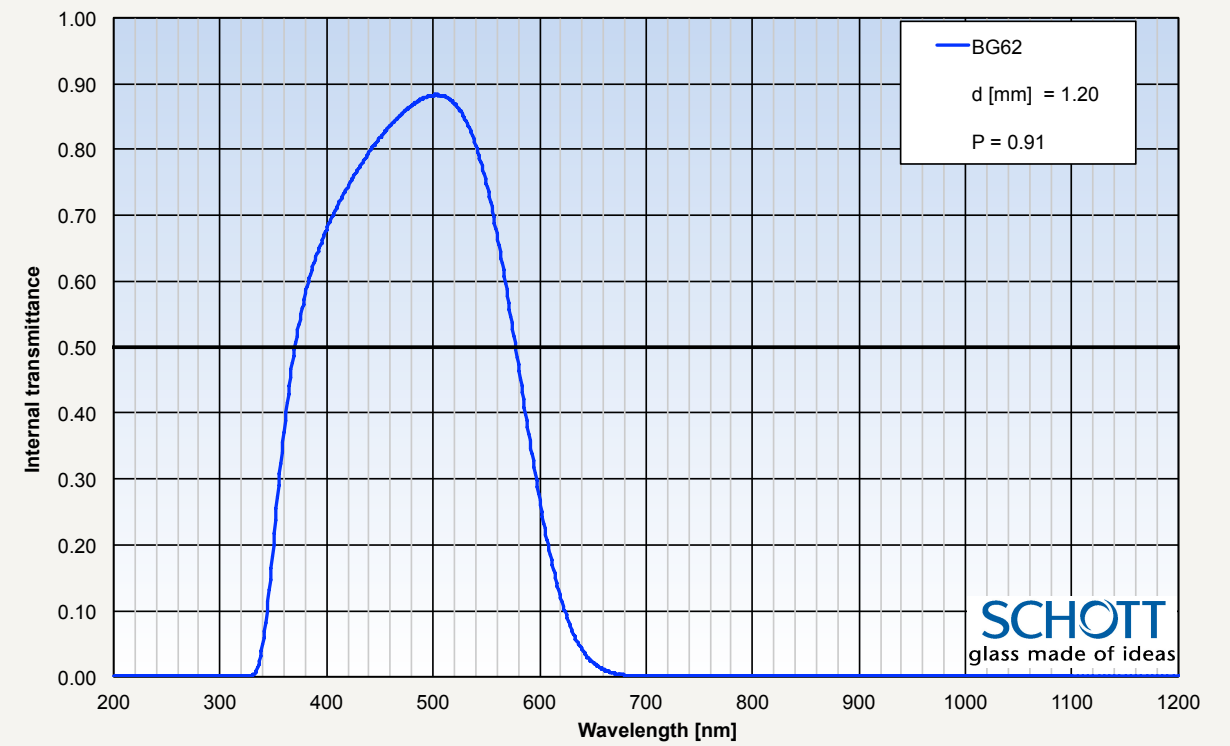
$$\tau = (1 - R_1) \cdot e^{-kx} \cdot (1 - R_2)$$

# Transmissionsmessung

## Transmission



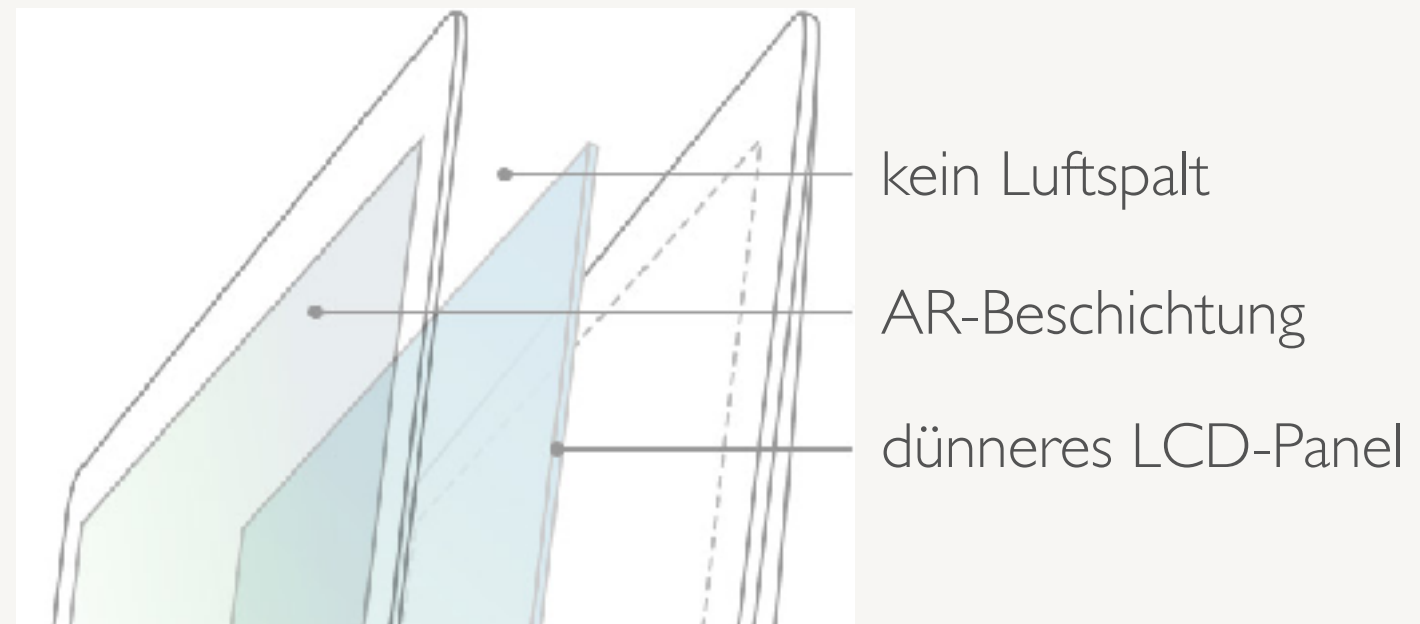
## Reintransmission



Quelle: [http://www.us.schott.com/advanced\\_optics](http://www.us.schott.com/advanced_optics)

# Reflex-Minderung an Displays

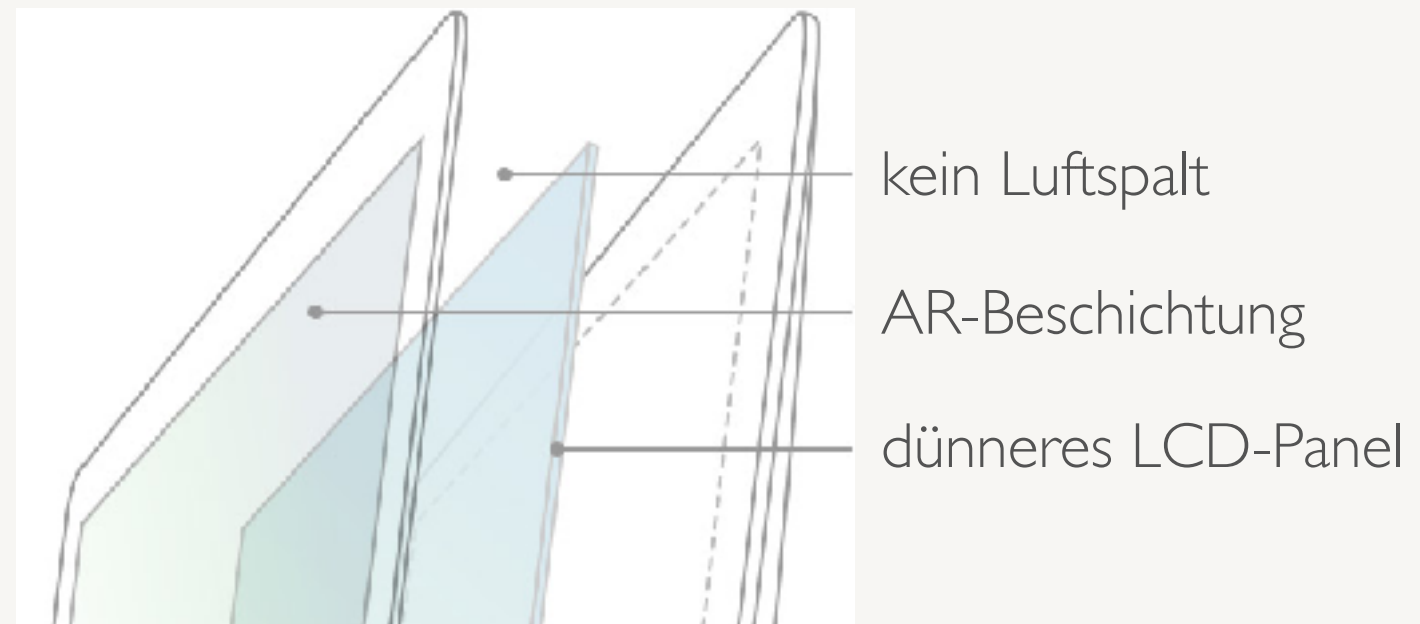
- Das LCD-Panel wird direkt (ohne Luftspalt) an das Display laminiert.
- Dadurch werden Fresnel-Reflexe deutlich unterdrückt.



Quelle: <https://www.apple.com/imac/design/>

# Reflex-Minderung an Displays

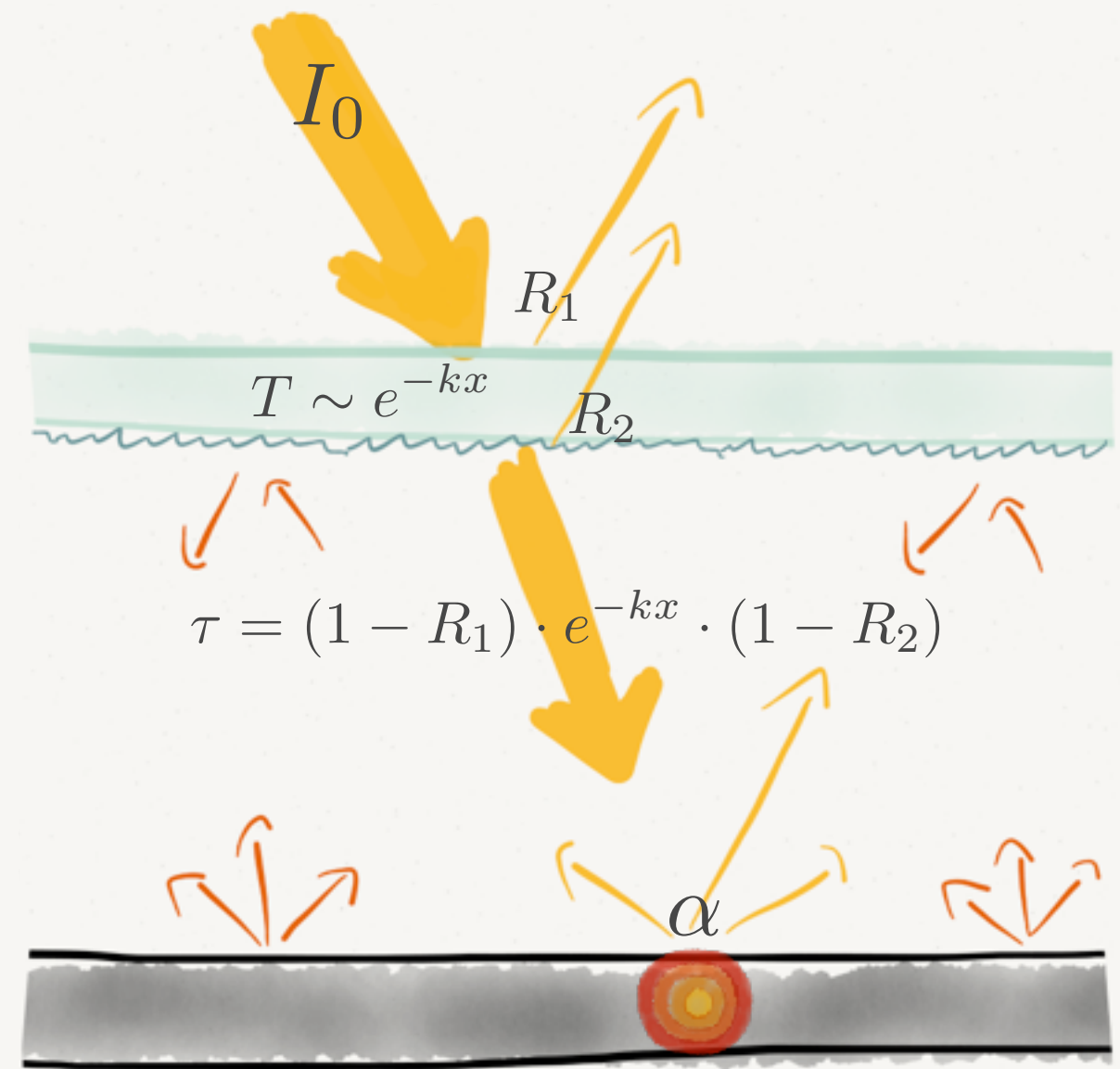
- Aufgabe: machen Sie eine Skizze und nehmen Sie einmal mit und einmal ohne Luftspalt an.
- Nehmen Sie folgende Brechungsindizes an:
  - Glas: 1.5
  - LCD: 1.5
  - Laminat: 1.4
  - Luft: 1.0



Quelle: <https://www.apple.com/ibook/design/>

# Strahlungsbilanz Solarkollektor

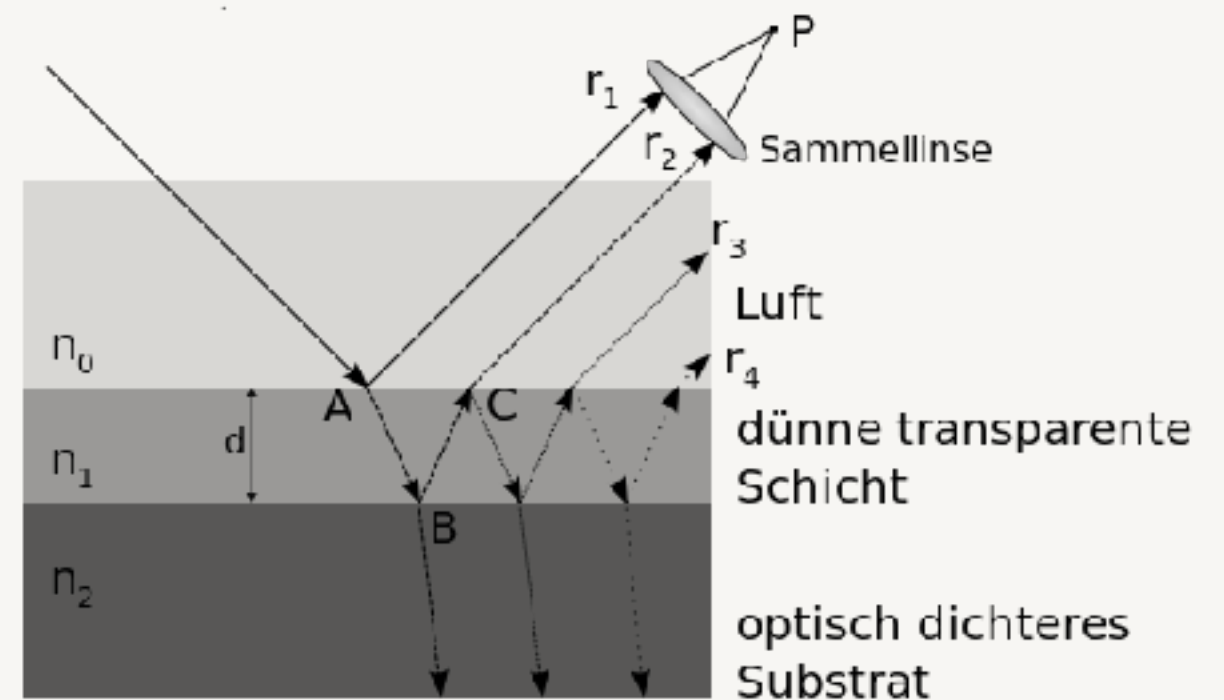
- Reflexions- und Transmissionsverluste am Deckglass.
- Teilweise Absorption, geringe Reflexion am Absorber.
- Wärmestrahlung vom Absorber.
- Produkt aus Gesamttransmission Deckglass und Absorption ist der **optische Wirkungsgrad**.
- Selektive Schicht auf dem Absorber reduziert Wärmestrahlung.
- Selektive AR-Schicht auf der Innenseite des Deckglases reflektiert Wärmestrahlung.



$\tau$  Gesamttransmission Deckglass  
 $\alpha \cdot \tau$  Optischer Wirkungsgrad

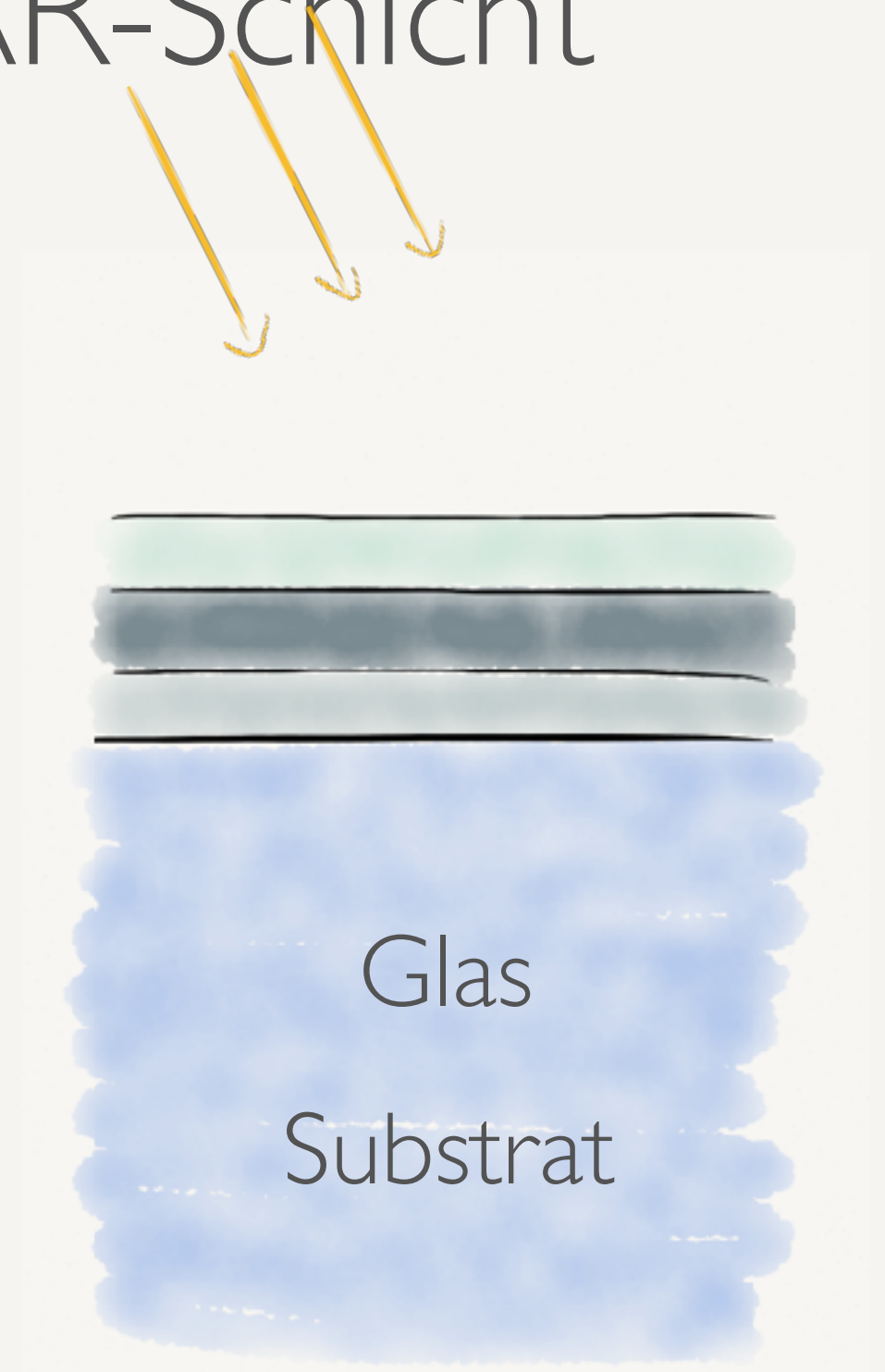
# Anti-Reflex-Beschichtung

- 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



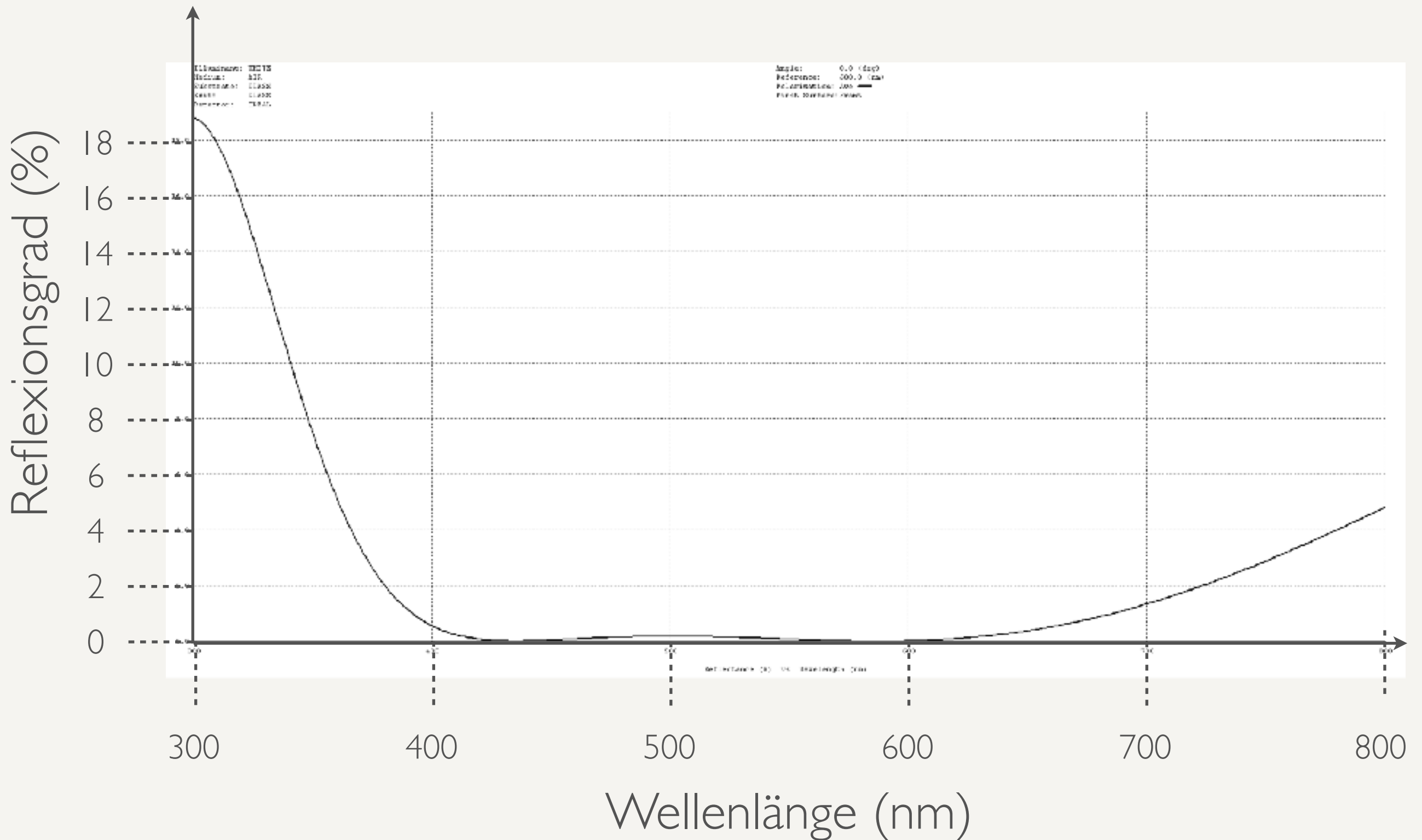
# Beispiel: Breitband AR-Schicht

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





# Beispiel: Breitband AR-Schicht



# AR-Schicht für Sonnenkollektoren

Company / Firma / Société	Viessmann Werke GmbH & Co. KG	Country/Land/Pays	Germany
Street / Straße / Rue	Viessmannstraße 1	Website	<a href="http://www.viessmann.com">www.viessmann.com</a>
Postal Code, Place / PLZ, Ort / Code postal, Place	35107 Allendorf	E-mail	
		Tel. / Fax	+49 (0)6452 70 0

Collector Type / Kollektorbauart / type de capteur	Flat plate / Flachkollektor / Capteur plan
To be roof integrated / für Dachintegration / pour être intégré dans le toit	No / nein / non

Produktbezeichnung Modell	Power output per collector unit Leistung je Kollektormodul				
	0 K	10 K	30 K	50 K	70 K
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
Vitosol 200-F SV2A	1 842	1 744	1 522	1 266	977
Vitosol 200-F SH2A	1 842	1 744	1 522	1 266	977

Collector efficiency Kollektorleistung Paramètres de rendement	$\eta_{0a}$	0.793	-
Stagnation temperature Stagnationtemperatur Température de stagnation	$a_{1a}$	4.04	W/(m <sup>2</sup> K)
	$a_{2a}$	0.0182	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )

Company / Firma / Société	Viessmann Werke GmbH & Co. KG	Country/Land/Pays	Germany
Street / Straße / Rue	Viessmannstraße 1	Website	<a href="http://www.viessmann.com">www.viessmann.com</a>
Postal Code, Place / PLZ, Ort / Code postal, Place	35107 Allendorf	E-mail	
		Tel. / Fax	+49 (0)6452 70 0

Collector Type / Kollektorbauart / type de capteur	Flat plate / Flachkollektor / Capteur plan
To be roof integrated / für Dachintegration / pour être intégré dans le toit	No / nein / non

Produktbezeichnung Modell	Power output per collector unit Leistung je Kollektormodul				
	0 K	10 K	30 K	50 K	70 K
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
Vitosol 300-F SV3A	1 938	1 849	1 647	1 414	1 150
Vitosol 300-F SH3A	1 938	1 849	1 647	1 414	1 150

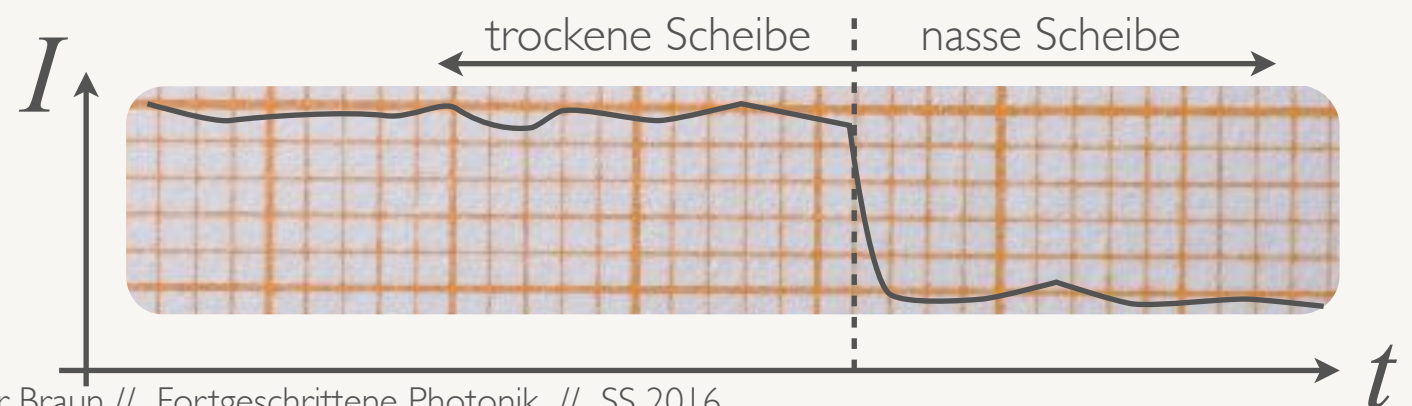
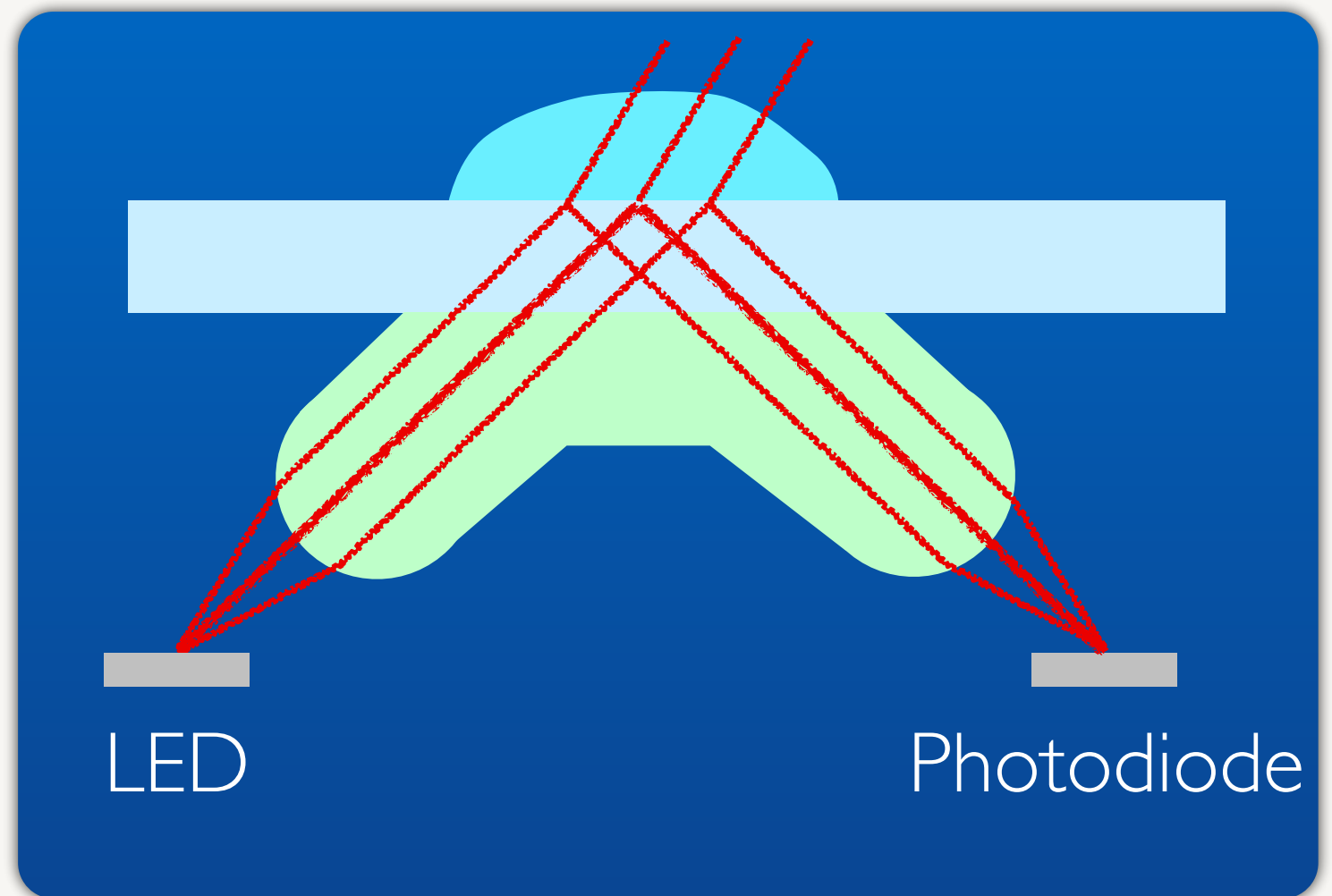
Collector efficiency Kollektorleistung Paramètres de rendement	$\eta_{0a}$	0.833	-
Stagnation temperature Stagnationtemperatur Température de stagnation	$a_{1a}$	3.66	W/(m <sup>2</sup> K)
	$a_{2a}$	0.0169	W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )

<http://www.dincertco.de/logos/011-7S1126%20F.pdf>

<http://www.dincertco.de/logos/011-7S1129%20F.pdf>

# Regensensor Funktionsprinzip

- Im trockenen Zustand Totalreflexion an der Windschutzscheiben-Außenseite
- Wassertropfen hebt die Bedingung für Totalreflexion durch höheren Brechungsindex ( $n = 1.33$ ) auf.
- Das Signal der Photodiode verringert sich.



# Regensensor Funktionsprinzip

- Aufgabe: Berechnen Sie im nassen Fall den Restreflex an der Grenzfläche Glas-Wasser (unter  $45^\circ$ )

