

Grundgesetze der Optik



Willebrord Snel van Royen (Snellius)
1580-1626 (Bild: Haasbroek, Neth. Geod. Comm., 1968)



Christiaan Huygens 1629-1695
(Bild: Université de Nantes)

Optik, Strahlung, Fernerkundung
Sommersemester 2018

Stefan Bühler

Meteorologisches Institut

Universität Hamburg



Augustin Fresnel 1788-1827
(Bild: Université de Nantes)

Übersicht – alle Kapitel

Einleitung

1. Orbits und Satelliten
2. Elektromagnetische Wellen
3. Grundgesetze der Optik
4. Natürliche Oberflächen
5. Thermische Strahlung
6. Strahlungstransfergleichung
7. Streuung

Prüfungsvorbereitung

Prüfung

Quellen

- ▶ Heute viel Wikipedia (bei diesem Thema meines Erachtens verlässlich)
- ▶ Gertsen Kneser Vogel
- ▶ Bohren & Clothiaux
- ▶ Petty

Anonymer Fragebogen

- ▶ In einem Satz: Was ist Brechung?
- ▶ In einem Satz: Was ist Beugung?
- ▶ Brechung auf Englisch?
- ▶ Beugung auf Englisch?

Anonymer Fragebogen

In einem Satz: Was ist Brechung?

Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Welle aufgrund einer räumlichen Änderung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit (Def. Wikipedia)



In einem Satz: Was ist Beugung?

Ablenkung von Wellen an einem Hindernis. (Def. Wikipedia)



Brechung auf Englisch?

Refraction



Beugung auf Englisch?

Diffraction



Beides lässt sich durch Wellennatur des Lichts erklären

Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ Beugungslimit
- ▶ Zusammenfassung

In diesem Kapitel geht es hauptsächlich um $\text{Re}(n)$, der Imaginärteil kommt kaum vor.

Übersicht

- ▶ **Strahlenoptik**
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ Beugungslimit
- ▶ Zusammenfassung

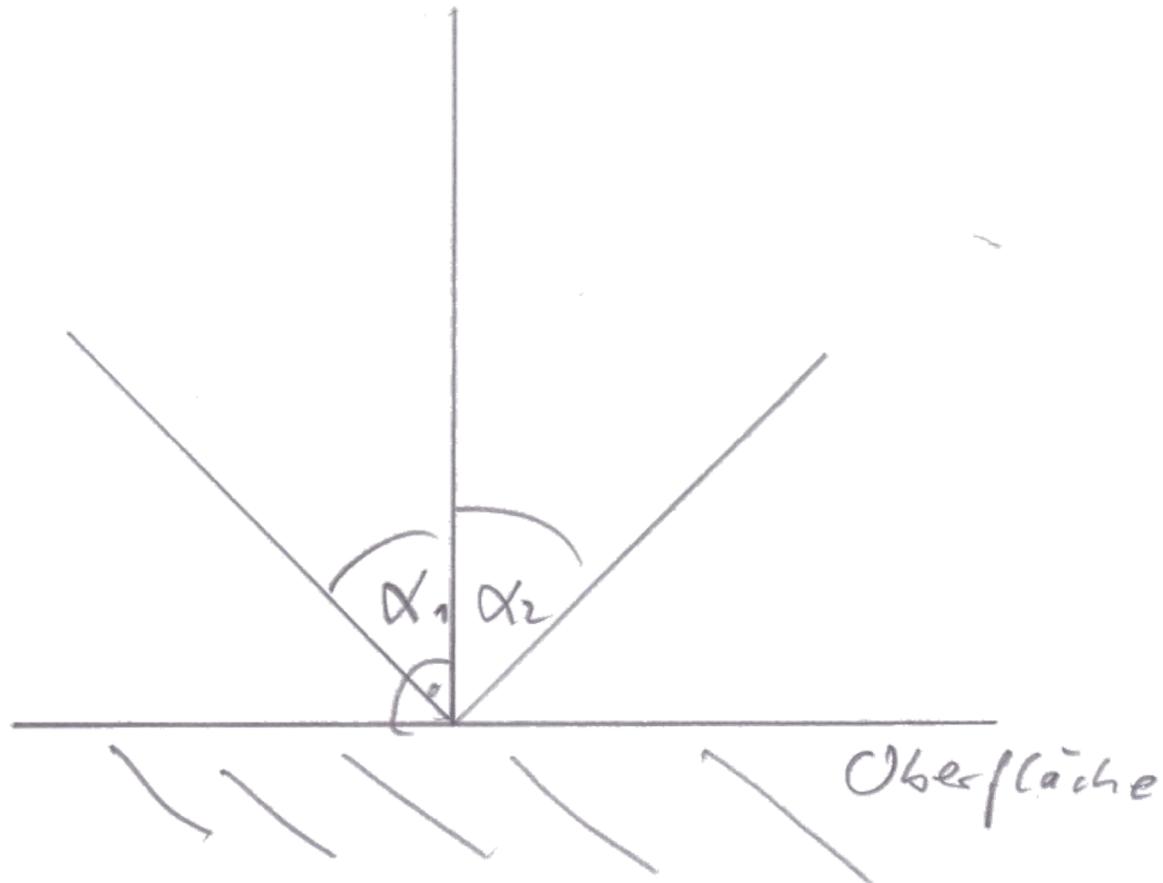
Strahlenoptik (geometrische Optik)

- ▶ Man stellt sich das Licht (die Strahlung) als sich geradlinig ausbreitende Strahlen vor.
- ▶ Axiome (Wikipedia):
 - ▶ 1. In homogenem Material sind die Lichtstrahlen gerade.
 - ▶ 2. An der Grenze zwischen zwei homogenen isotropen Materialien wird das Licht im Allgemeinen nach dem Reflexionsgesetz reflektiert und nach dem Brechungsgesetz gebrochen.
 - ▶ 3. Der Strahlengang ist umkehrbar, die Lichtrichtung auf einem Lichtstrahl ist belanglos.
 - ▶ 4. Die Lichtstrahlen durchkreuzen einander, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.



Reflektionsgesetz

- ▶ Einfallswinkel = Ausfallswinkel

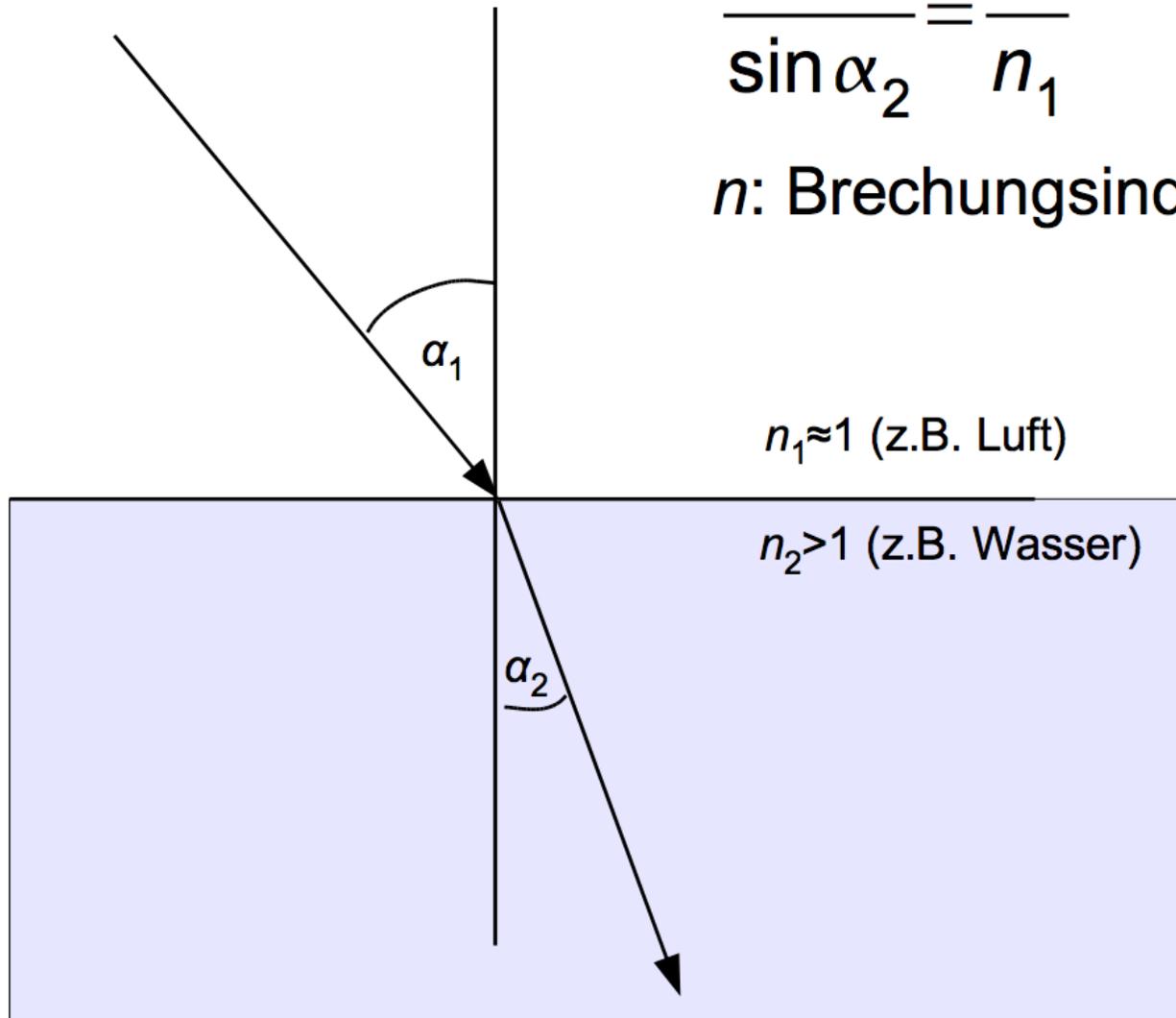


Brechungsgesetz (Gesetz von Snellius)



$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

n : Brechungsindex



Willebrord Snel van Royen (Snellius)
1580-1626

Bild: Haasbroek,
Neth. Geod.
Comm., 1968



Bild: www.robinwood.com

Stefan Bühler



Grundgesetze der Optik

Bild: Cranbrook School 11

Eine andere Sichtweise auf Snellius

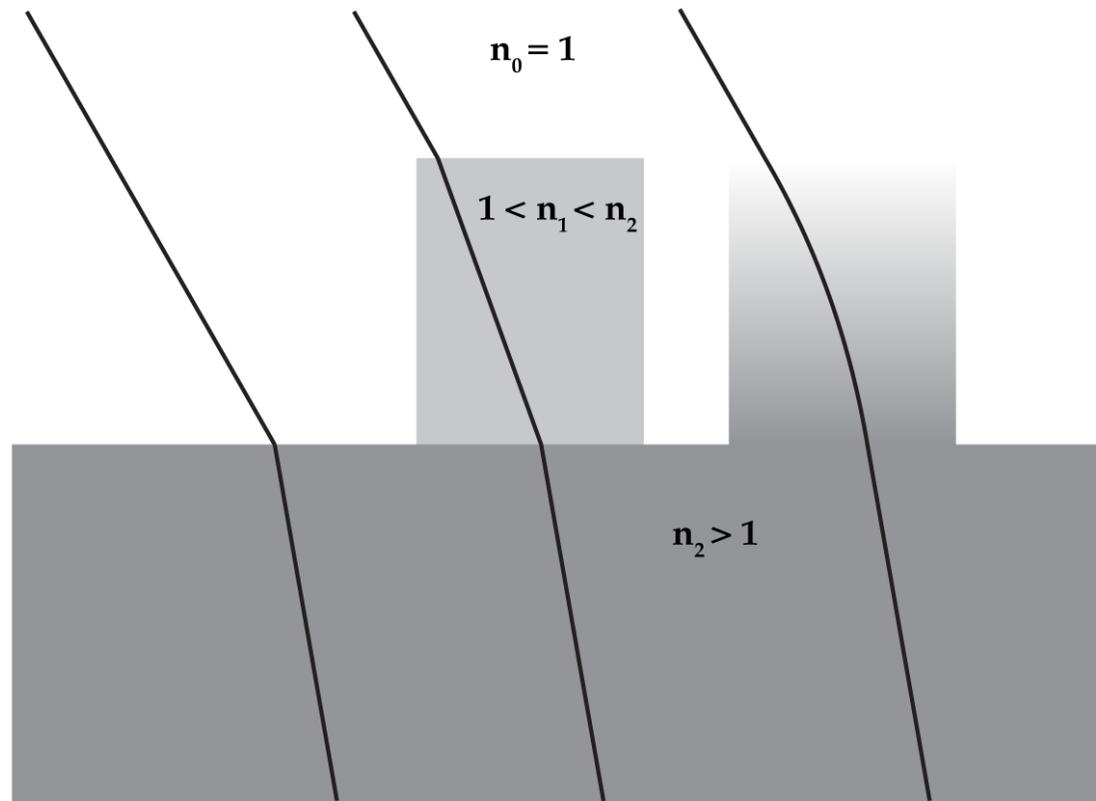
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 = n_i \sin \alpha_i$$

$$\text{Oder: } n_i \sin \alpha_i = \text{const}$$

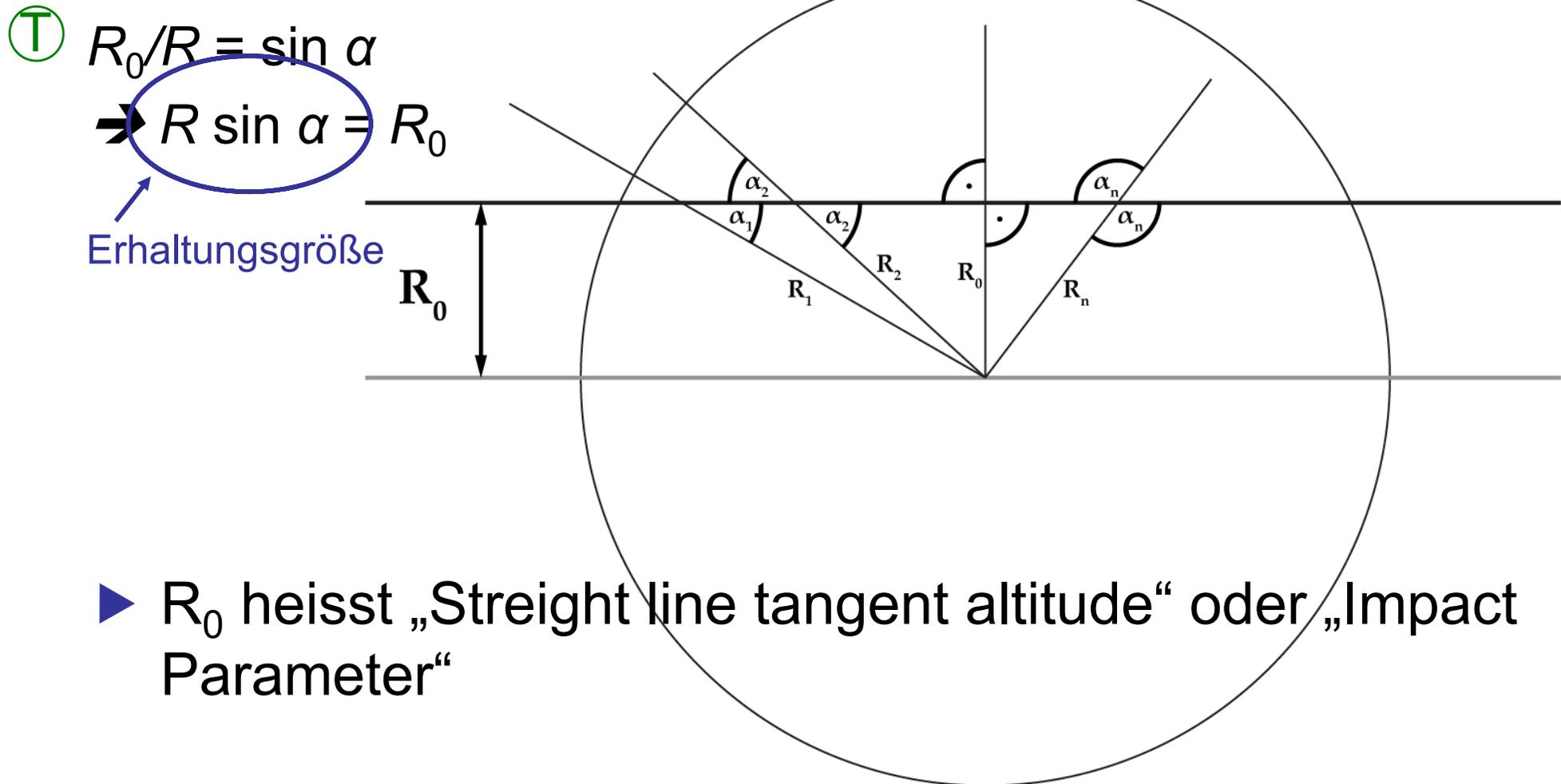
$n \sin(\alpha)$ ist eine
Erhaltungsgröße

Vorgeschichte für Winkel
nicht wichtig



Geometrischer Strahlenweg in sphärischer Geometrie

- ▶ Wichtig für die Atmosphäre (Anwendung: Limb-Sounding, Radio-Occultation):



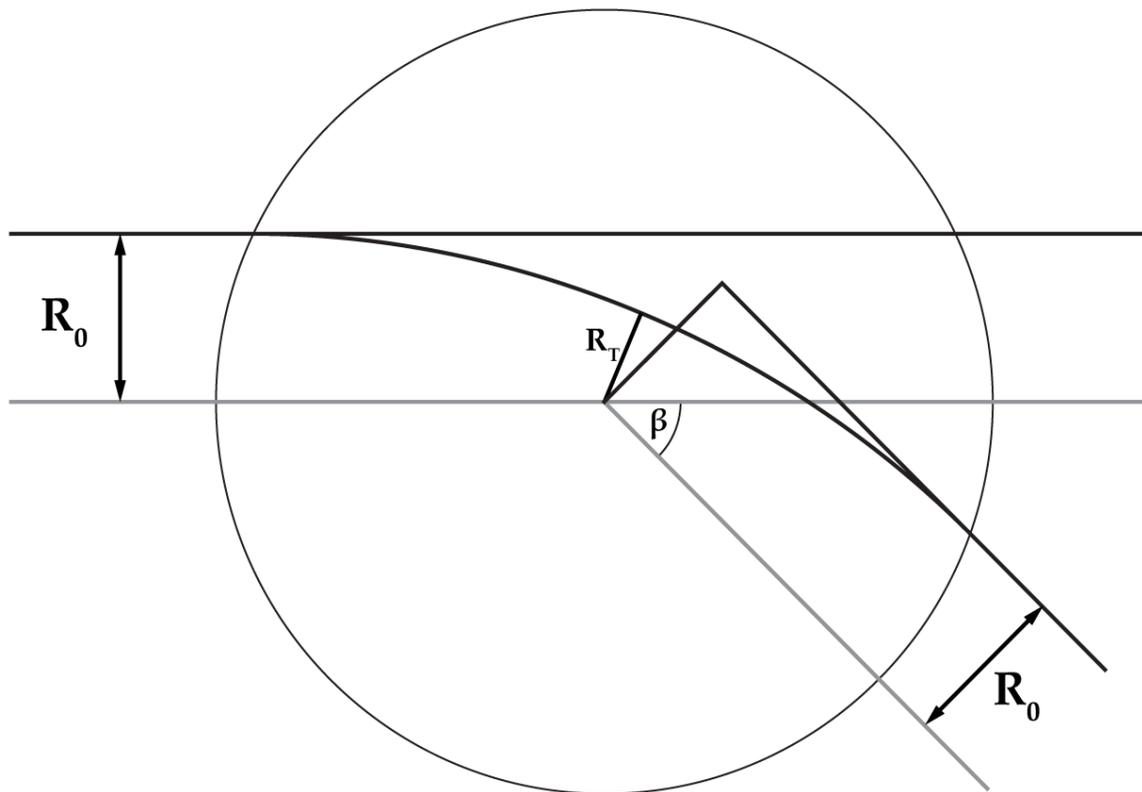
- ▶ R_0 heisst „Straight line tangent altitude“ oder „Impact Parameter“

Snellius in sphärischer Geometrie

Plan paralleler Snellius: $n \sin \alpha = \text{const}$

Pure sphärische Geometrie: $R \sin \alpha = R_0$

Beides zusammen: $R n \sin \alpha = R_0$



Grenzfälle



$n=1$: reine Geometrie

$\alpha=90^\circ$: $R = R_T = R_0/n$

Was bedeutet das?

Der Winkel zum Lot ist in sphärischer Geometrie nicht erhalten, daher funktioniert der normale Snell nicht.

Der Winkel beta heisst „Bending Angle“. Er wird bei GPS Occultation (GRAS auf Metop) gemessen.

Satellit des Tages

Heute: Das GRAS Instrument auf MetOp.
(Anderer Slide File.)

Linsen

- ▶ Nutzen gekrümmte Oberflächen um Strahlung zu fokussieren
- ▶ Um paralleles Licht auf einen Punkt zu fokussieren, kann man eine Hyperbelförmige Linse verwenden.

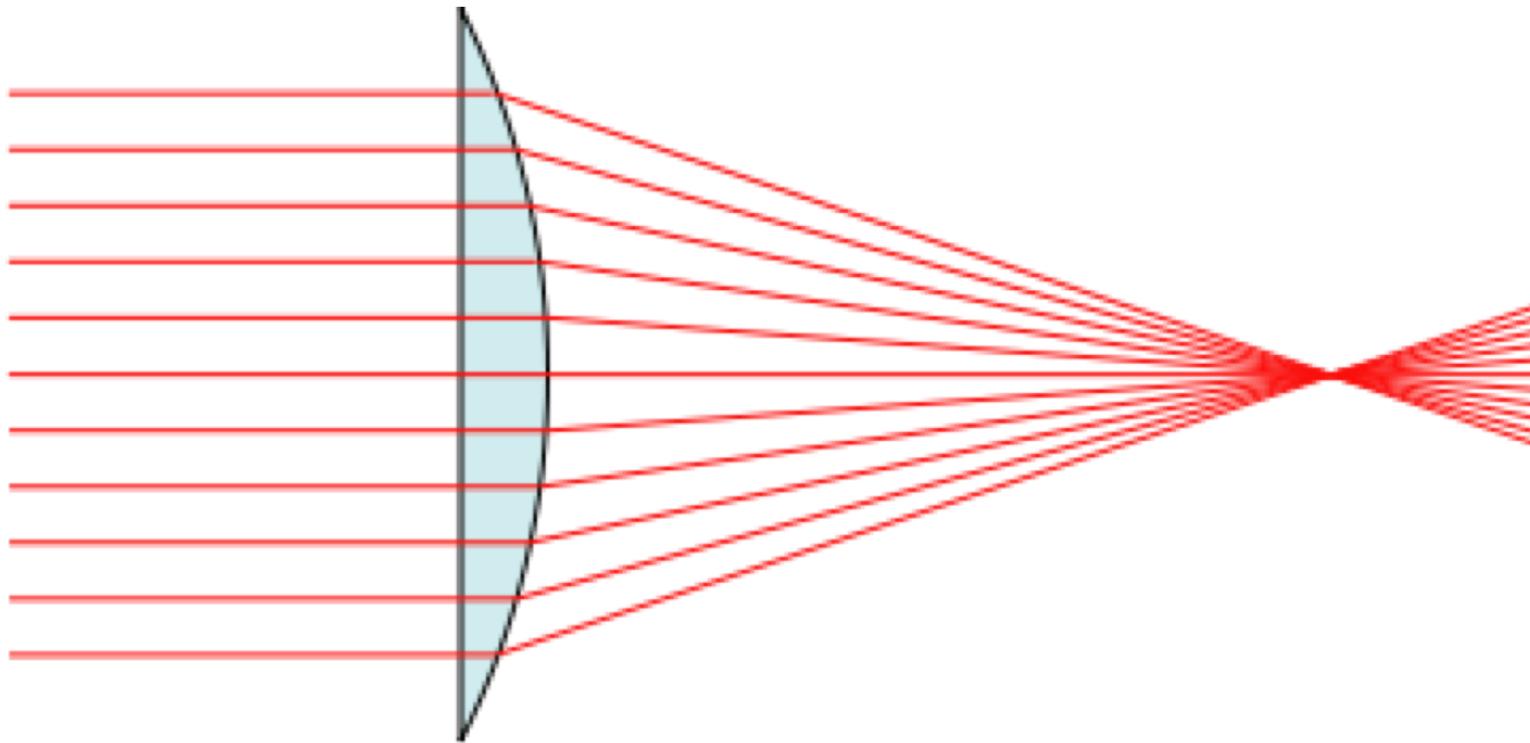


Bild: Wikipedia

Voraussetzung für starke Linse

- ▶ Was braucht man für eine starke Linse (kurze Brennweite)?
- ② ▶ Starke Krümmung (→ Dickes Material, oder Fresnel-Linse)
- ▶ Hoher Brechungsindex

Fresnel Linse



Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ **Wellenoptik**
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ Beugungslimit
- ▶ Zusammenfassung

Wikipedia on Huygens and Fresnel

„In **1678**, **Huygens** proposed that every point which a luminous disturbance reaches becomes a source of a spherical wave; the sum of these secondary waves determines the form of the wave at any subsequent time. He assumed that the secondary waves travelled only in the "forward" direction and it is not explained in the theory why this is the case. He was able to provide a qualitative explanation of linear and spherical wave propagation, and to derive the laws of reflection and refraction using this principle, but could not explain the deviations from rectilinear propagation that occur when light encounters edges, apertures and screens, commonly known as diffraction effects.

In **1816**, **Fresnel** showed that Huygens' principle, together with his own principle of interference could explain both the rectilinear propagation of light and also diffraction effects. To obtain agreement with experimental results, he had to include additional arbitrary assumptions about the phase and amplitude of the secondary waves, and also an obliquity factor. These assumptions have no obvious physical foundation but led to predictions that agreed with many experimental observations, including the Arago spot.

[...]

Kirchhoff's diffraction formula provides a rigorous mathematical foundation for diffraction, based on the wave equation. The arbitrary assumptions made by Fresnel to arrive at the Huygens–Fresnel equation emerge automatically from the mathematics in this derivation.“

→ Sowohl Brechung als auch Beugung lassen sich als Grenzfälle einer allgemeinen mathematischen Theorie zur Lösung der Wellengleichung verstehen.

Wellenfront

Eine Fläche aller Orte, wo die Welle die gleiche Phase hat. (Z.B. Wo ist das E-Feld gerade maximal?)

Für ebene Wellen sind die Wellenfronten Ebenen parallel zur Ausbreitungsrichtung

Für Kugelwellen sind es Kugeln, etc..

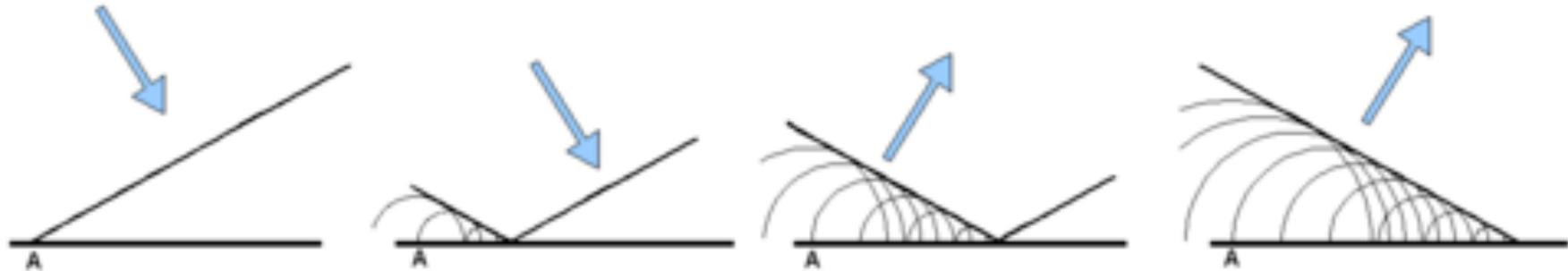
Huygens-Fresnel Prinzip am Beispiel ebene Welle



- ▶ Wenn die Wellenfront unendlich ausgedehnt ist, bleibt die Welle immer eben.
- ▶ An den Rändern passieren aber seltsame Sachen (Beugung, siehe später).
- ▶ Wann gilt die einfachere Strahlenoptik?
 - ▶ Geometrischer Durchmesser des Lichtstrahls sehr viel größer als Wellenlänge → Lichtstrahl breitet sich geradlinig aus.
 - ▶ Alle Spiegel, Linsen, etc. müssen ebenfalls viel größer als die Wellenlänge sein.

(Spekulare) Reflektion

- ▶ Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel



- ▶ Text und Bild Wikipedia: Eine auftreffende Wellenfront erzeugt kreisförmige Elementarwellen um den jeweiligen Auftreffpunkt, deren Radius sich proportional zur Zeit vergrößert. In den folgenden Bildern sieht man, wie die ersten Kreise angewachsen sind, während der aktuelle Auftreffpunkt nach rechts wandert. Die Tangente an die Kreise stellen eine neue Wellenfront dar, welche die reflektierende Ebene nach rechts oben verlässt. Die Winkel zwischen Wellenfront und Ebene sind gleich.

Wann gilt spekulare Reflektion

Gilt für glatte Oberflächen (Spiegel)

Nicht bei rauen Oberflächen. Warum nicht?

Viele verschiedene Oberflächenwinkel (Strahlenbild)

Was heißt ‚glatt‘?

Unregelmäßigkeiten klein im Vergleich zur Wellenlänge

Antennen, optische Spiegel, etc.

- ▶ Durch geeignete Form der spiegelnden Oberfläche, kann ich z. B. eine ebene Welle auf einen Punkt fokussieren.
- ▶ Oder aus einer Punktquelle eine ebene Welle machen (Reziprozitätsprinzip, sehr nützlich für Antennen)
 - ▶ Man redet von Antennenkeule (Engl. Antenna Beam), auch bei Empfangsantennen, obwohl die Nomenklatur vom Senden kommt.

Wie muss die Oberfläche geformt sein?

- ▶ Lichtwege A, B, C müssen alle gleich lang sein.
- ▶ Wikipedia: „Eine Parabel ist der geometrische Ort aller Punkte P , deren Abstand zu einem speziellen festen Punkt – dem Brennpunkt F – gleich dem zu einer speziellen Geraden – der Leitgeraden l – ist.“

➔ Parabolspiegel, Parabolantenne

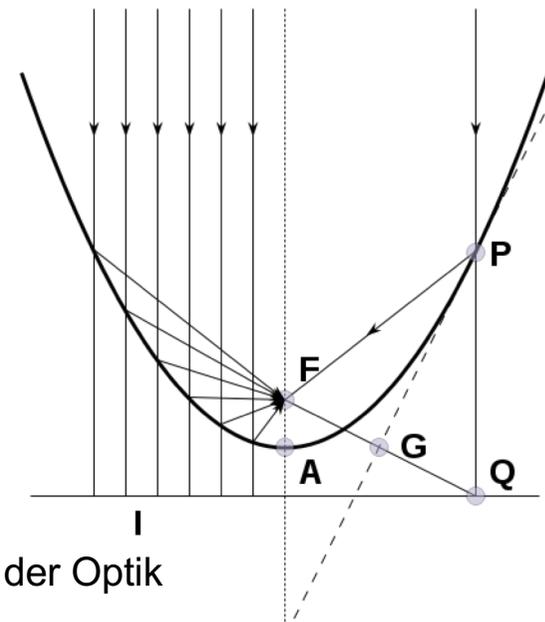
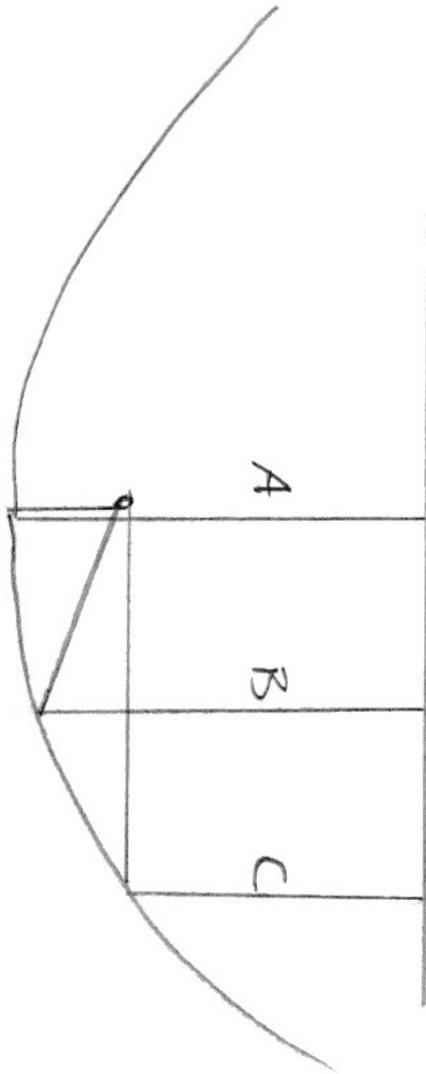
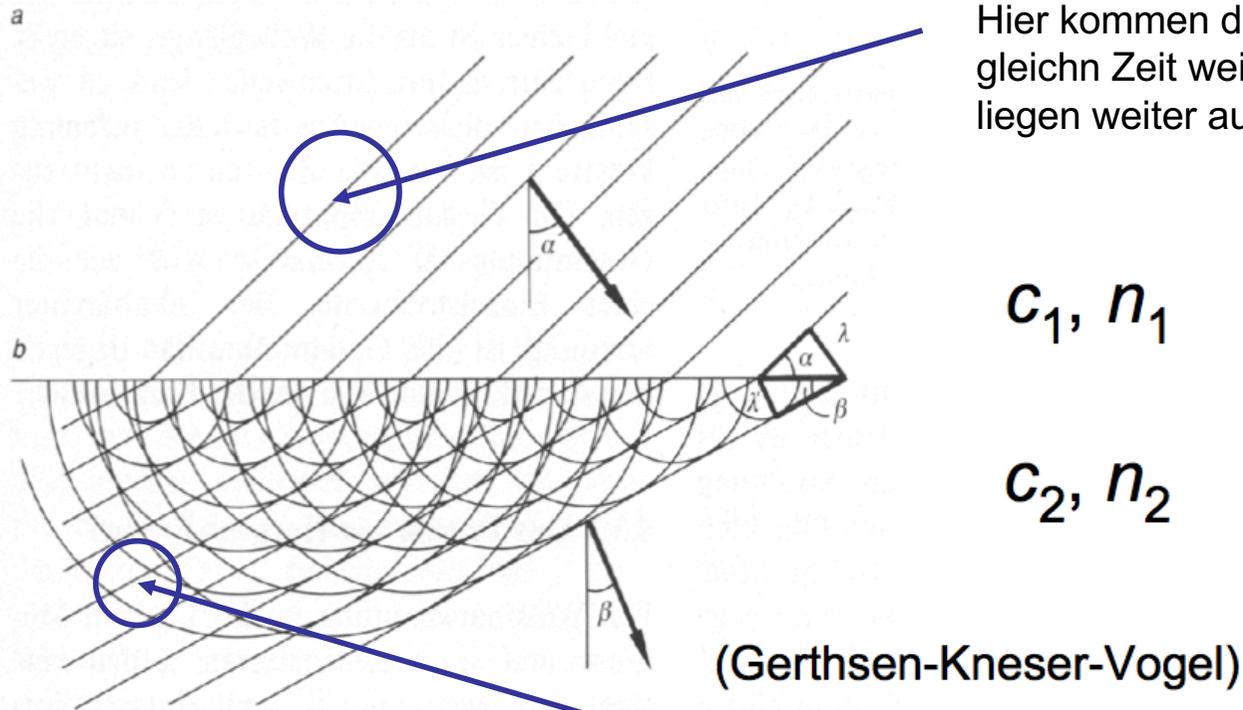


Bild: Wikipedia

Brechung erklärt mit Huygens-Fresnel



Hier kommen die Wellen in der gleichen Zeit weiter \rightarrow Wellenfronten liegen weiter auseinander.

c_1, n_1

c_2, n_2

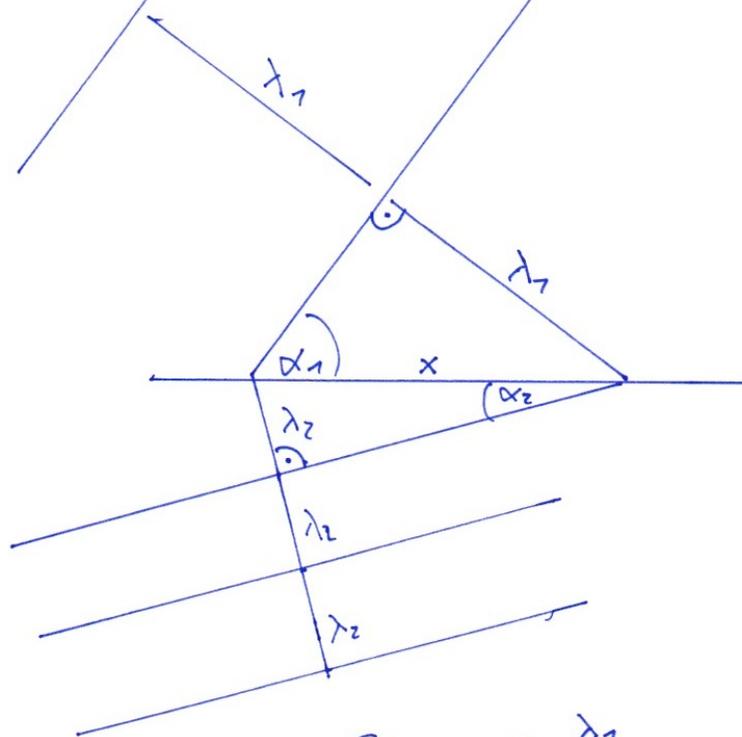
(Gerthsen-Kneser-Vogel)

Sekundärwellen an jedem Punkt der Wellenfront

Welle läuft im Medium langsamer

Hier läuft die Welle langsamer.

Geometrische Herleitung des Brechungsgesetzes



$$n_1$$

$$\lambda_1$$

$$n_2 > n_1$$

$$\lambda_2 < \lambda_1$$

$$\left(\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \right)$$

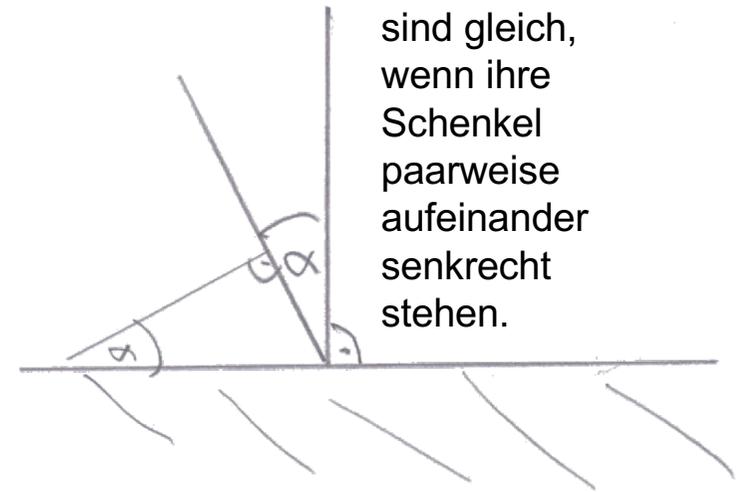
$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda_1}{x}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{\lambda_2}{x}$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda_1}{\sin \alpha_1} = \frac{\lambda_2}{\sin \alpha_2}$$

$$\frac{\lambda_0}{n_1 \sin \alpha_1} = \frac{\lambda_0}{n_2 \sin \alpha_2}$$

$$\Rightarrow \boxed{n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2} \quad \begin{array}{l} \text{Brechungsgesetz} \\ \text{(Snellius)} \end{array}$$



Zwei Winkel sind gleich, wenn ihre Schenkel paarweise aufeinander senkrecht stehen.

Übersicht

Strahlenoptik

Wellenoptik

Anwendung 1: Luftspiegelungen

Mehr zu Reflektion und Transmission

Beugung

Anwendung 2: Irisierende Wolken

Beugungslimit

Zusammenfassung



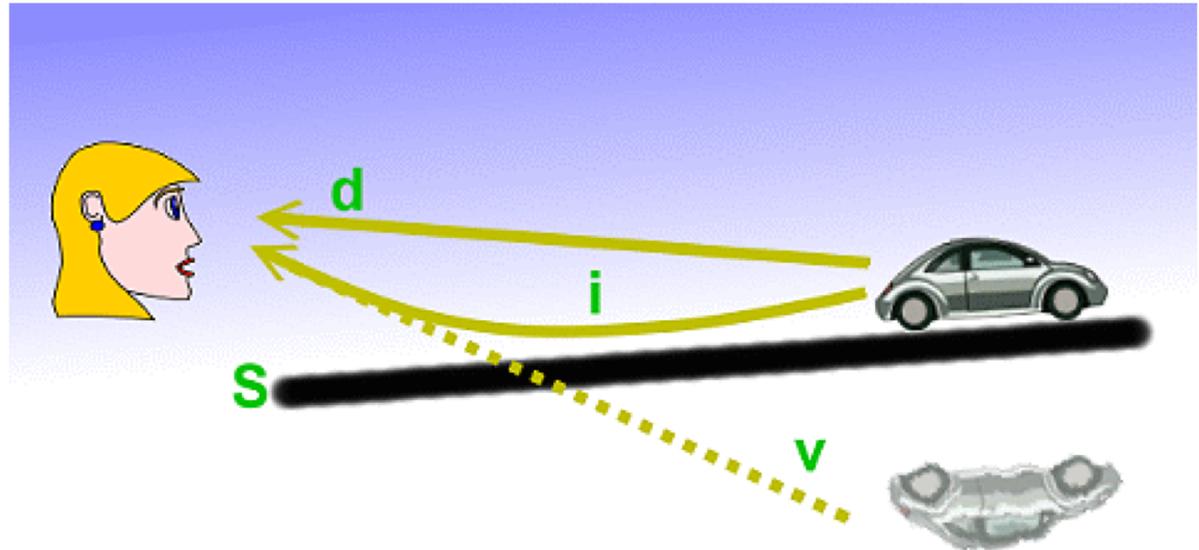
Entstehung

Brechungsindex n
proportional zur
Dichte (bei
konstantem Druck
daher
Temperaturabhängig)

Normalerweise
nimmt n mit der Höhe
ab

Kann sich bei starken
Tempera-
turgradienten
umkehren

Strahlenweg ‚i‘ in Abb.
folgt aus Snellius‘
Gesetz, analog zur
Hausaufgabe



Wikipedia

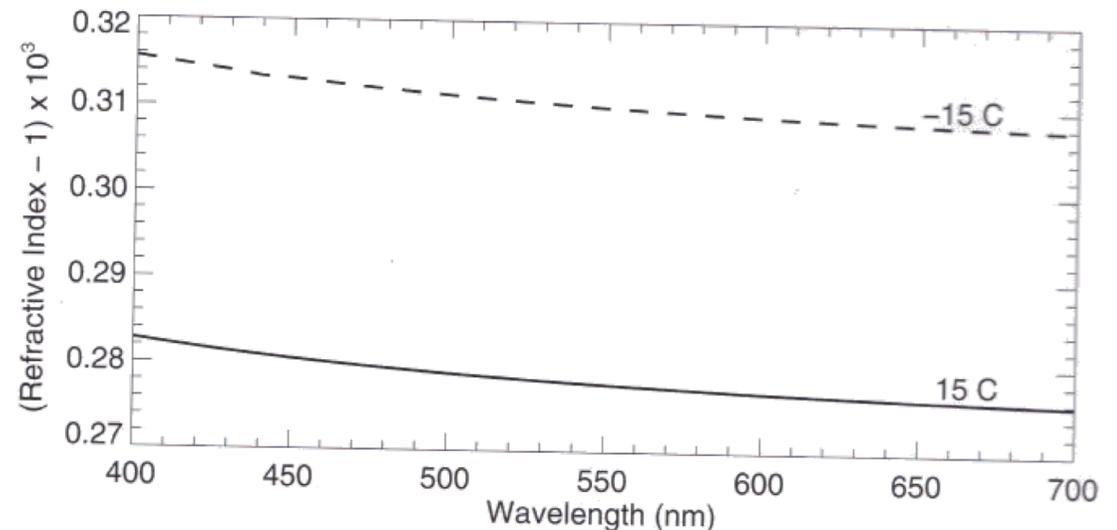


Figure 8.17: Refractive index of dry air at a pressure of one atmosphere and for the two temperatures noted. From the compilation by Penndorf (1957).

Bohren&Clothiaux

Das grüne Leuchten



Wie kann man das erklären?

Bild: Wikipedia

Zwei ‚Zutaten‘

1. Dispersion

(Brechungsindex n
im sichtbaren
Bereich (leicht)
frequenzabhängig)

→ grüner Rand

an der Oberkante der

Sonne, wenn sie am Horizont steht (normalerweise
mit bloßem Auge nicht sichtbar)

2. **Luftspiegelung**, die zufällig genau diesen
schmalen grünen Winkelbereich vergrößert

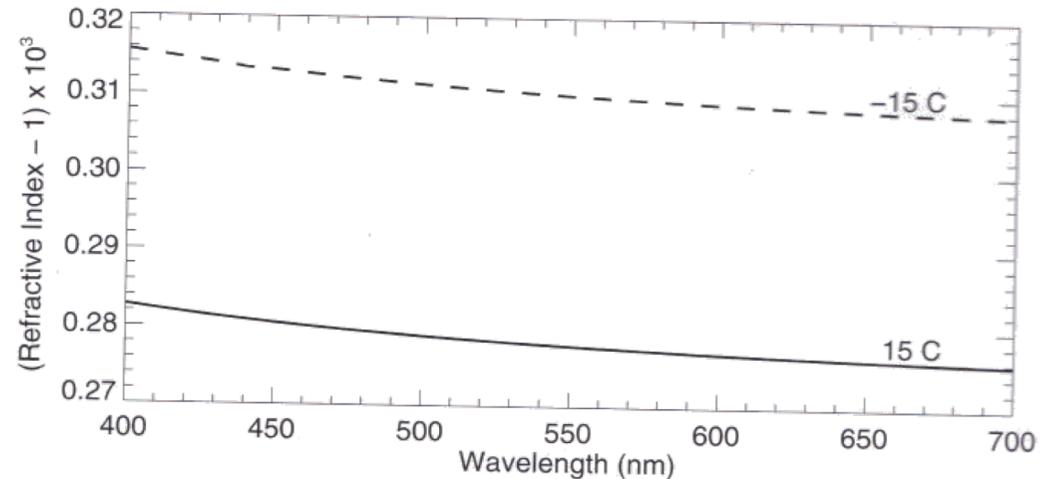


Figure 8.17: Refractive index of dry air at a pressure of one atmosphere and for the two temperatures noted. From the compilation by Penndorf (1957).

Bohren&Clothiaux

Der Wasserkocher-Film

- ▶ Dichteabhängigkeit des Brechungsindex von Wasser kann man bei gläsernen Wasserkochern gut als Schlieren sehen
- ▶ Für Luft auch gut über Heizkörpern zu beobachten

(Film im Verzeichnis
Wasserkocherfilm)



Übersicht

Strahlenoptik

Wellenoptik

Anwendung 1: Luftspiegelungen

Mehr zu Reflektion und Transmission

Beugung

Anwendung 2: Irisierende Wolken

Beugungslimit

Zusammenfassung

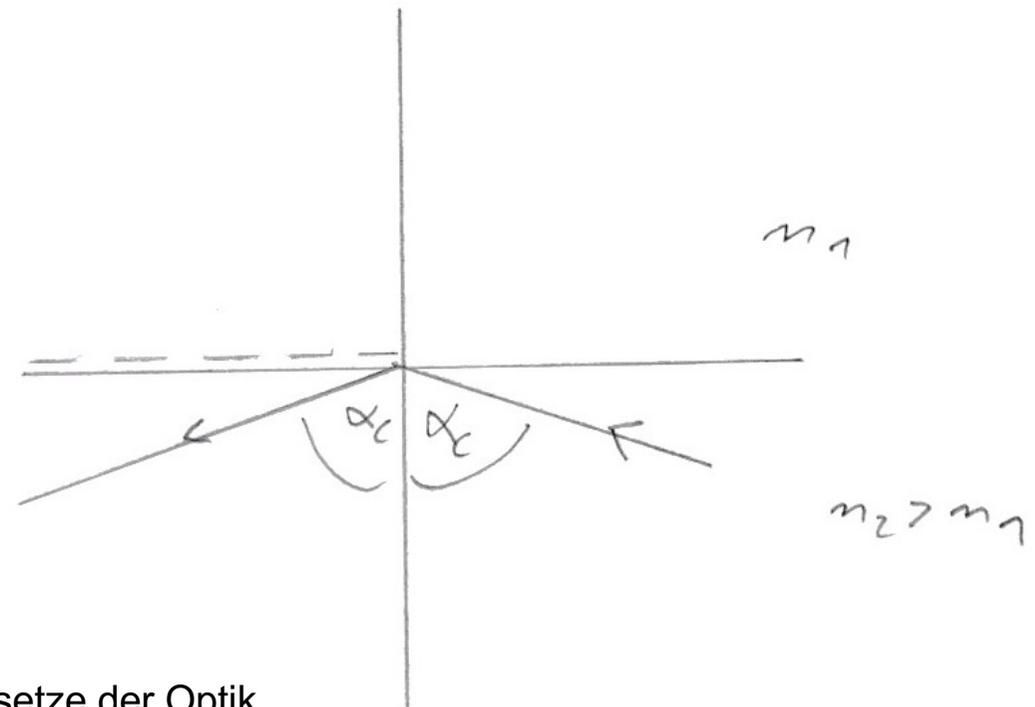
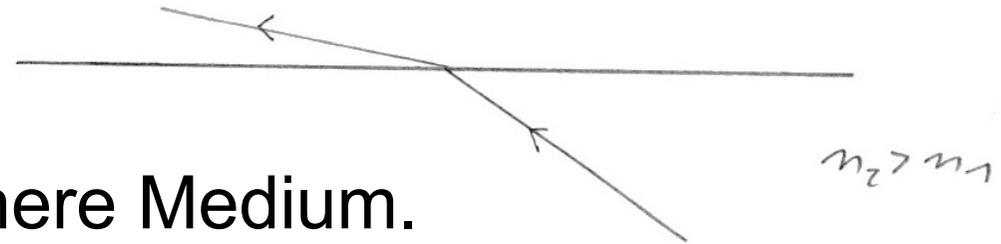
Kritischer Winkel



- ▶ Betrachte Lichtstrahl vom dichteren ins dünnere Medium.
- ▶ Lasse α immer größer werden. Irgendwann liegt der transmittierte Strahl parallel zur Oberfläche
- ▶ Was passiert?
 - ▶ Totalreflektion
- ▶ Kritischer Winkel α_c :

$$n_2 \sin(\alpha_c) = n_1 \sin(90^\circ)$$

$$\Rightarrow \sin(\alpha_c) = \frac{n_1}{n_2}$$



Fischperspektive

- ▶ $n_{\text{Wasser}} \approx 1.3$ (für sichtbares Licht)
- ▶ $n_{\text{Luft}} \approx 1.0$
- ▶ Kritischer Winkel?

?

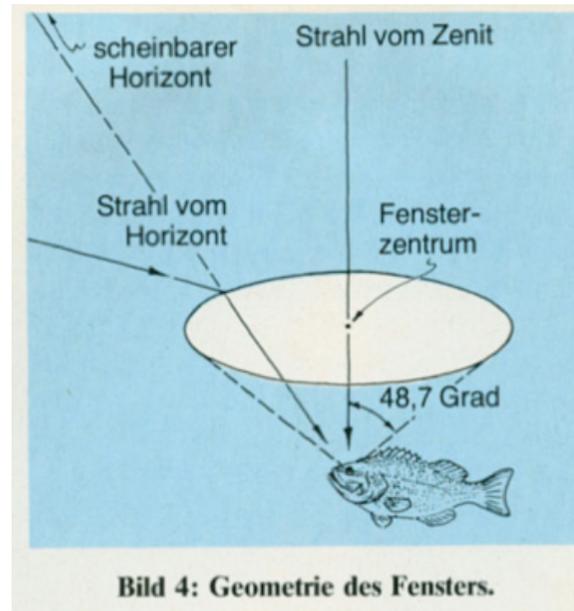
- ▶ Ca. 49°

- ▶ Wie sieht ein Fisch die Welt über Wasser?

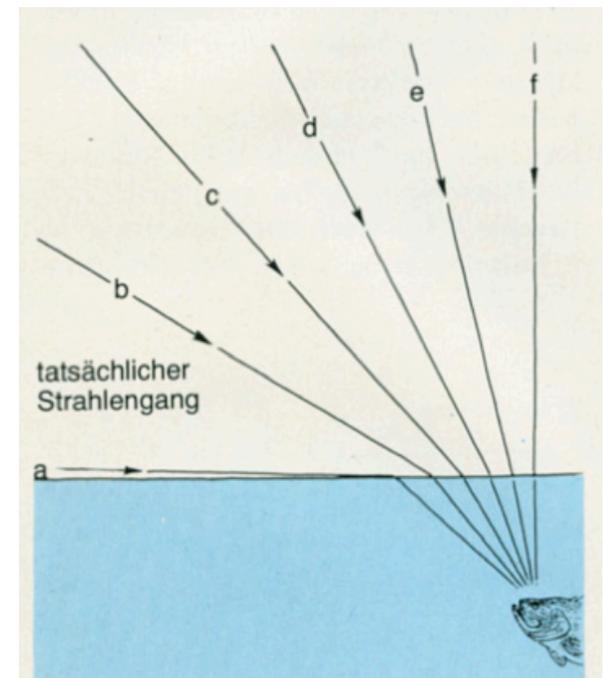
?

- ▶ Ganze Hemisphäre auf ein Fenster abgebildet
→ „Fischaugenobjektiv“ (extremes Weitwinkel-Objektiv in der Photographie)

$$\sin(\alpha_c) = \frac{n_1}{n_2}$$



Spektrum der Wissenschaft,
Juni 1984
Grundgesetze der Optik



Himmel erscheint zur Hälfte in diesem Winkelbereich.

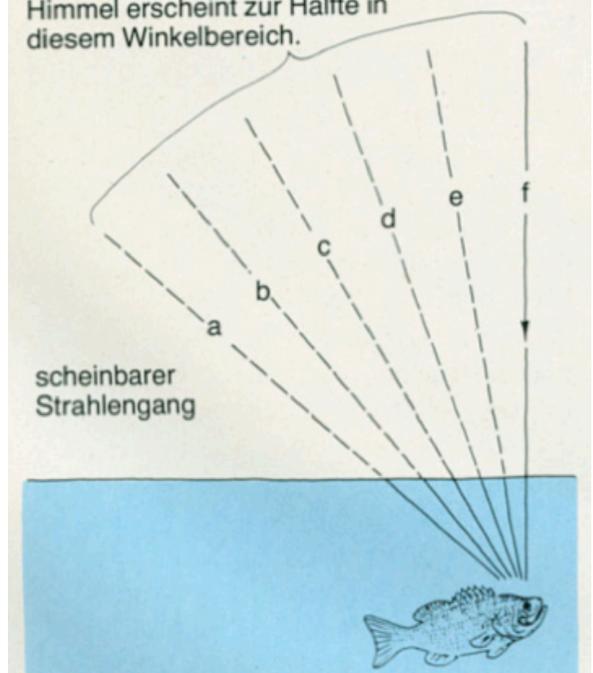


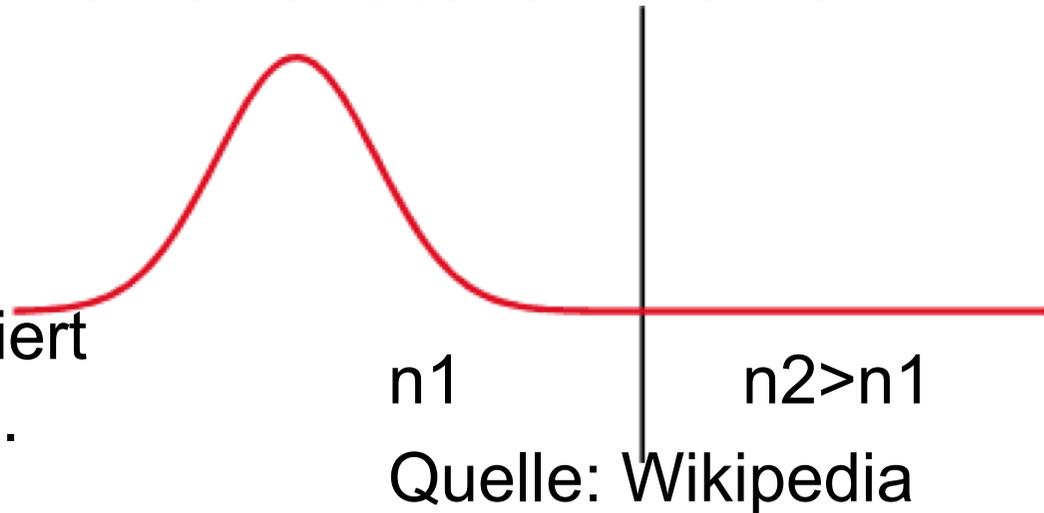
Bild 3: Tatsächliche und scheinbare Richtung der Lichtstrahlen.

Totalreflexion



Reflektion und Transmission an einer ebenen Grenze

- ▶ **Reflektivität** und **Transmissivität**: Anteil der **Leistung** ($((\text{Amplitude})^2)$) der reflektiert oder durchgelassen wird.

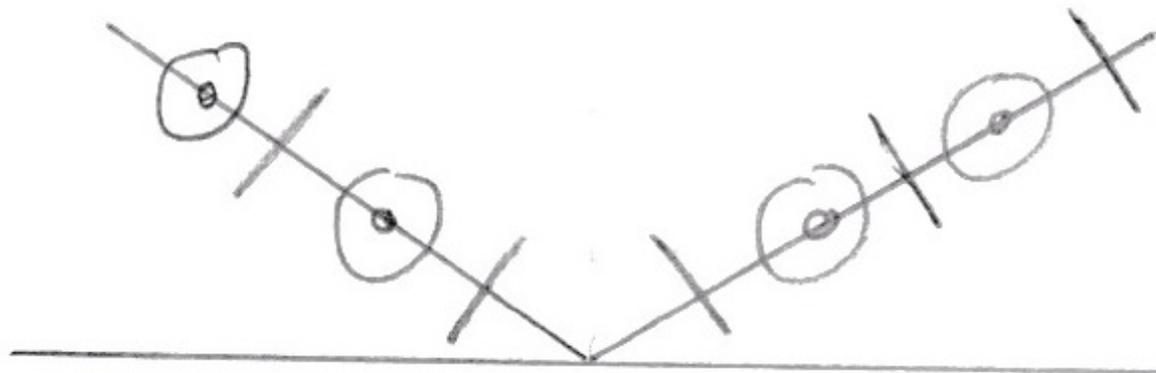


$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \vartheta_t - n_2 \cos \vartheta_i}{n_1 \cos \vartheta_t + n_2 \cos \vartheta_i} \right|^2 \quad R_s = \left| \frac{n_1 \cos \vartheta_i - n_2 \cos \vartheta_t}{n_1 \cos \vartheta_i + n_2 \cos \vartheta_t} \right|^2 \quad \text{Fresnel Formeln}$$

- ▶ R_x : Reflektivitäten
 ϑ_i : Einfallswinkel
 ϑ_t : Winkel des transmittierten Lichtstrahls
- ▶ Warum zwei verschiedene Reflektivitäten?
 - ② ▶ Polarisation spielt hier eine Rolle!

Parallele und senkrechte Polarisation

\vec{E} -Vektor $\left\{ \begin{array}{l} \odot \text{ Senkrecht (s)} \\ | \text{ Parallel (p)} \end{array} \right.$



- ▶ Parallel und senkrecht bezieht sich auf die Lage des E-Vektors zur Ebene die von einfallendem und reflektiertem Strahl gebildet wird.

Mehr zu den Fresnel Formeln

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \vartheta_t - n_2 \cos \vartheta_i}{n_1 \cos \vartheta_t + n_2 \cos \vartheta_i} \right|^2 \quad R_s = \left| \frac{n_1 \cos \vartheta_i - n_2 \cos \vartheta_t}{n_1 \cos \vartheta_i + n_2 \cos \vartheta_t} \right|^2$$

$$m = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{relativer Brechungsindex})$$

$$R_p = \left| \frac{\cos \vartheta_t - m \cos \vartheta_i}{\cos \vartheta_t + m \cos \vartheta_i} \right|^2 \quad R_s = \text{analog}$$

Aus Snellius:

$$n_1 \sin \vartheta_i = n_2 \sin \vartheta_t$$

$$\sin^2 \vartheta_t = \left(\frac{\sin \vartheta_i}{m} \right)^2$$

$$\text{Generell: } \sin^2 + \cos^2 = 1$$

$$1 - \cos^2 \vartheta_t = (\dots)^2$$

$$\cos \vartheta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \vartheta_i}{m} \right)^2}$$

Letztendlich kann ich R_p und R_s also als Funktion von nur ϑ_i und m schreiben.

(Die Formeln sehen dann aber längst nicht mehr so schön aus.)

Tipp: Das brauchen Sie für die Hausaufgabe.

Beispiel normaler Einfall

$$\vartheta_i = \vartheta_t = 0$$

$$\cos \vartheta_i = \cos \vartheta_t = 1$$

$$R_s = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2$$

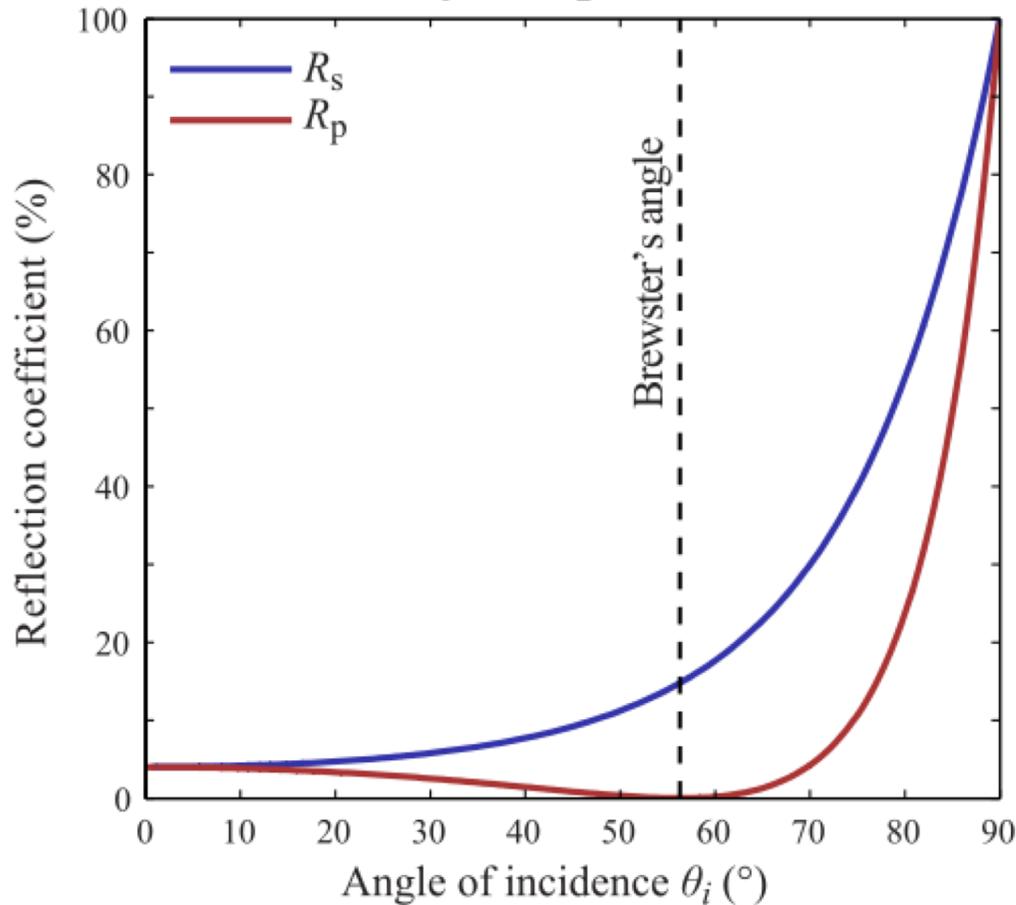
$$R_p = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 = R_s$$

- ▶ Für normalen Einfall (senkrecht zur Reflektionsebene) ist die Polarisation (logischerweise) egal.
- ▶ Weniger offensichtlich: Reflektivität vom dünneren ins dichtere Medium und andersherum sind gleich. (Je größer der (relative) Unterschied im Brechungsindex, desto mehr Reflektion.)

Verlauf der Reflektionskurven

dünn \rightarrow dicht

$$n_1 = 1, n_2 = 1.5$$



dicht \rightarrow dünn

$$n_1 = 1.5, n_2 = 1$$

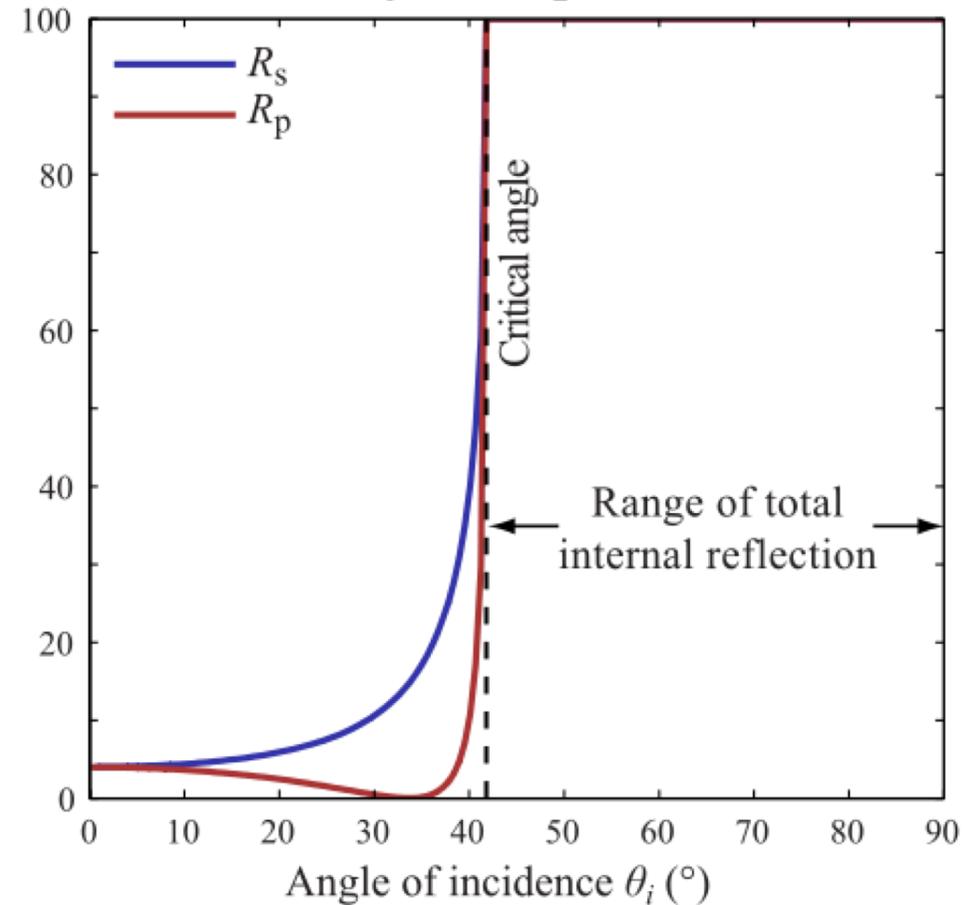


Bild: Wikipedia

Brewster Winkel

- ▶ Reflektiertes Licht ist beim Brewster-Winkel am stärksten polarisiert.
- ▶ Vollständig polarisiert, wenn Absorption vernachlässigbar ist (n reell).
- ▶ Auch bei anderen Winkeln ist Reflektiertes Licht teilweise polarisiert.
- ▶ Anwendung: Polarisationssonnenbrille entfernt das am Wasser reflektierte Sonnenlicht.

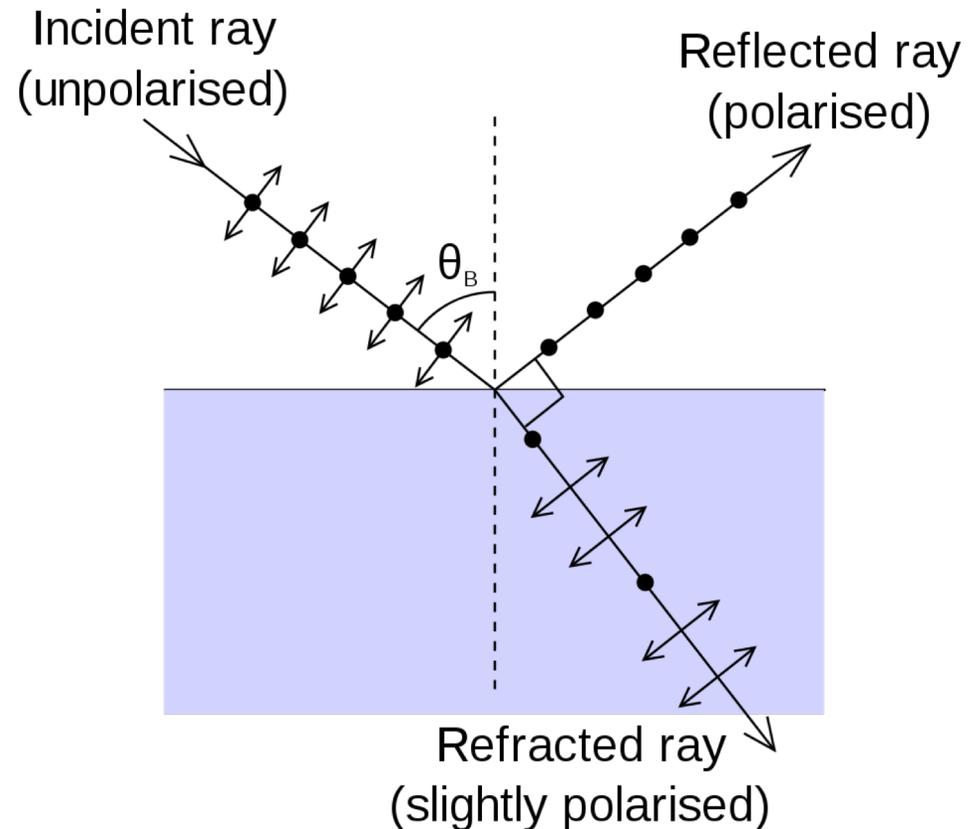


Bild: Wikipedia

Horizontale und vertikale Polarisation

- ▶ In der Fernerkundung:
Reflektierende Flächen liegen typischerweise horizontal, z.B. Wasserflächen wie Seen, Meere,...
- ▶ Die **parallele** Polarisation heißt daher **vertikale** Polarisation,
die **senkrechte** Polarisation heißt **horizontale** Polarisation
- ▶ Achtung Verwirrungspotential!

Reflektivität von Wasser für sichtbares Licht und Mikrowellen

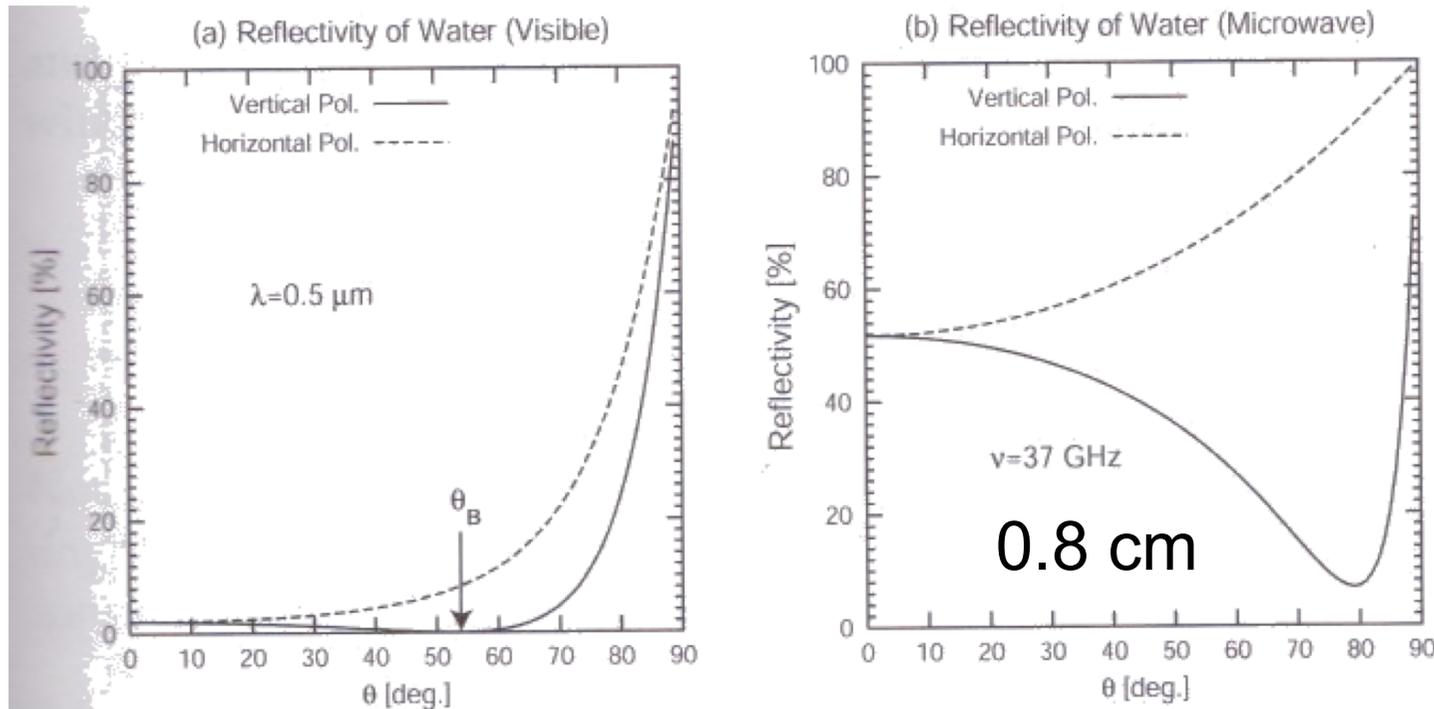


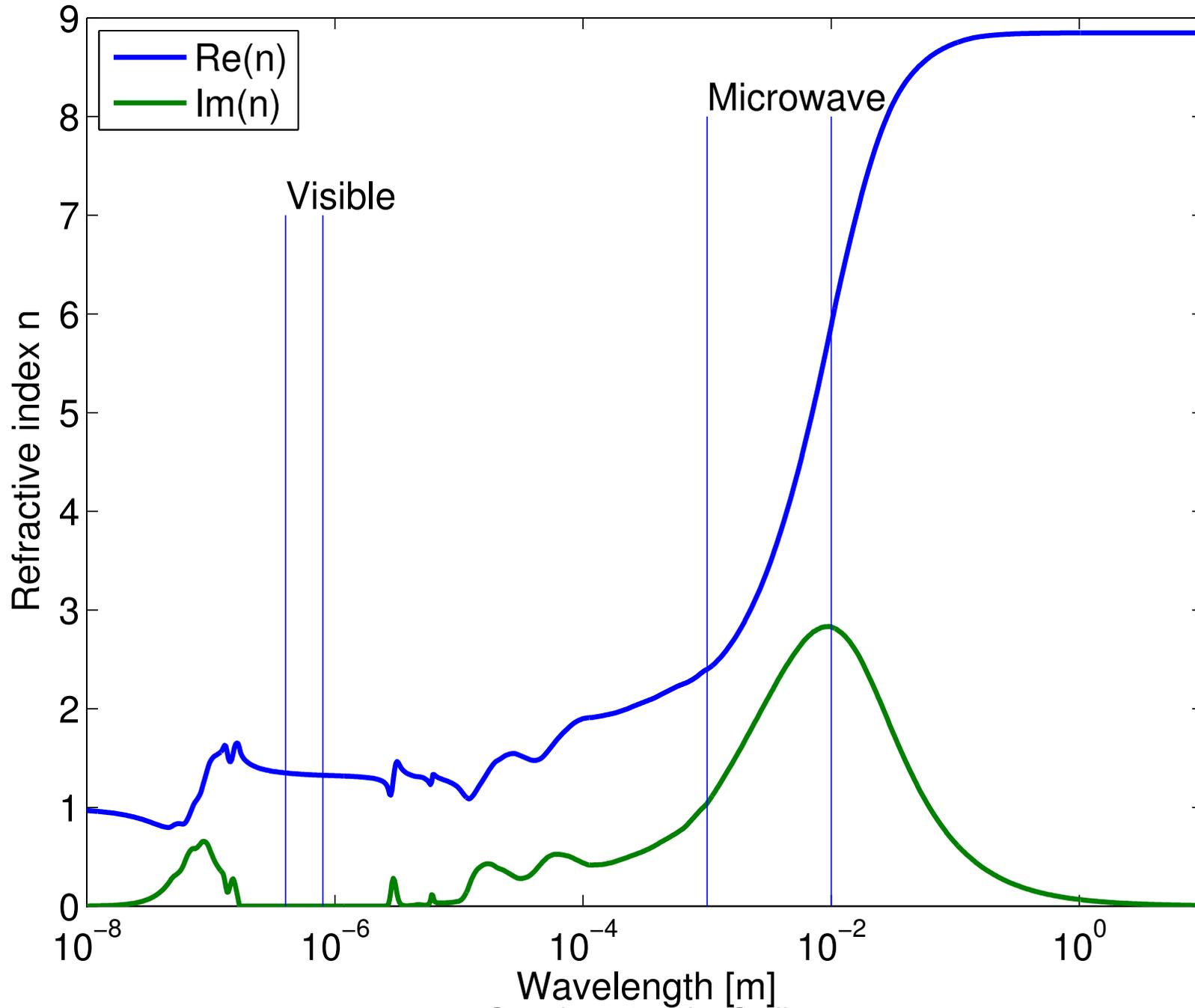
Fig. 4.5: Examples of the specular reflectivity of water as a function of incidence angle. (a) Visible band. (b) Microwave band.

Bild: Petty

► Mikrowelle:

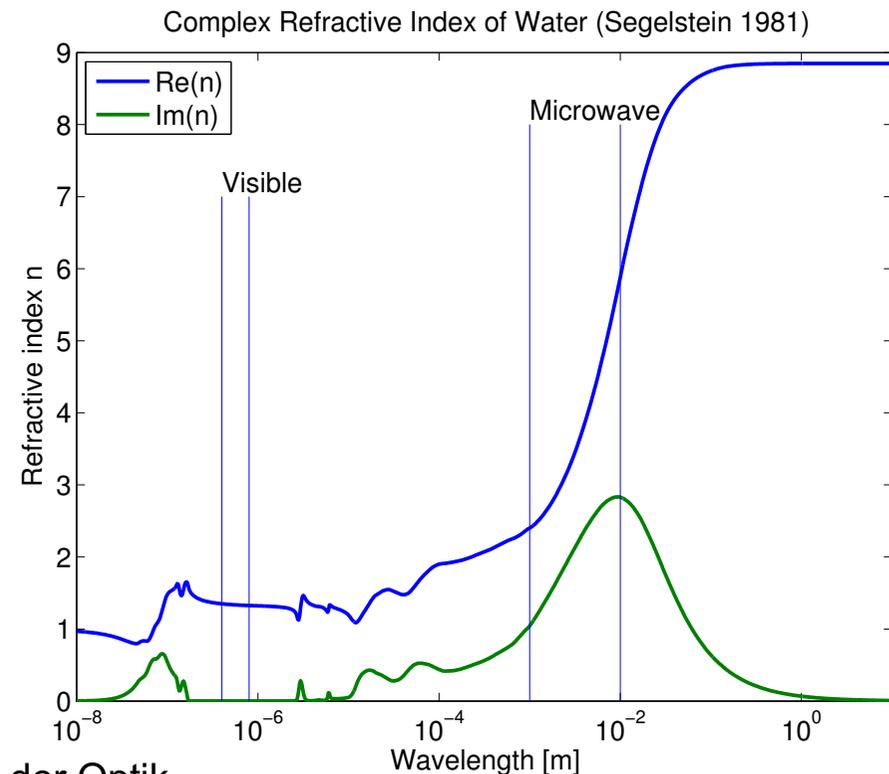
- Höhere Reflektivität
- größerer Brewster-Winkel
- Vertikale Reflektivität geht nicht auf Null

Complex Refractive Index of Water (Segelstein 1981)



Komplexer Brechungsindex von Wasser

- ▶ Quelle: ATMLAB (Original: Segelstein, D., 1981: "The Complex Refractive Index of Water", M.S. Thesis, University of Missouri--Kansas City).
- ▶ Brechung (Re) viel stärker für Mikrowelle als für Sichtbar.
- ▶ Aber auch mehr Absorption.
- ▶ Eigentlich auch Temperaturabhängig (aber bei Segelstein nicht enthalten).



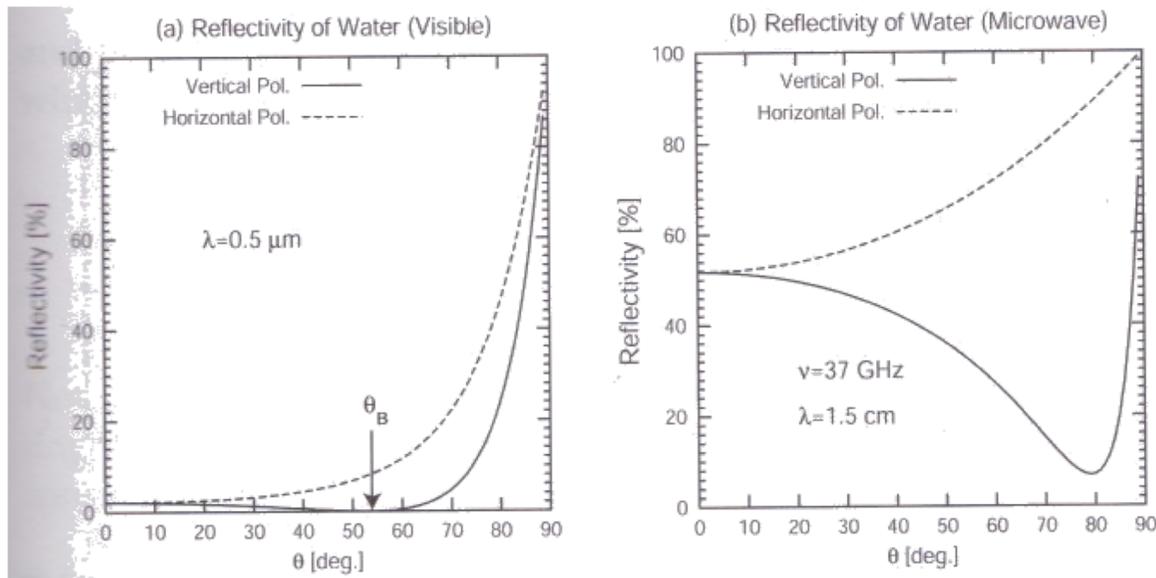
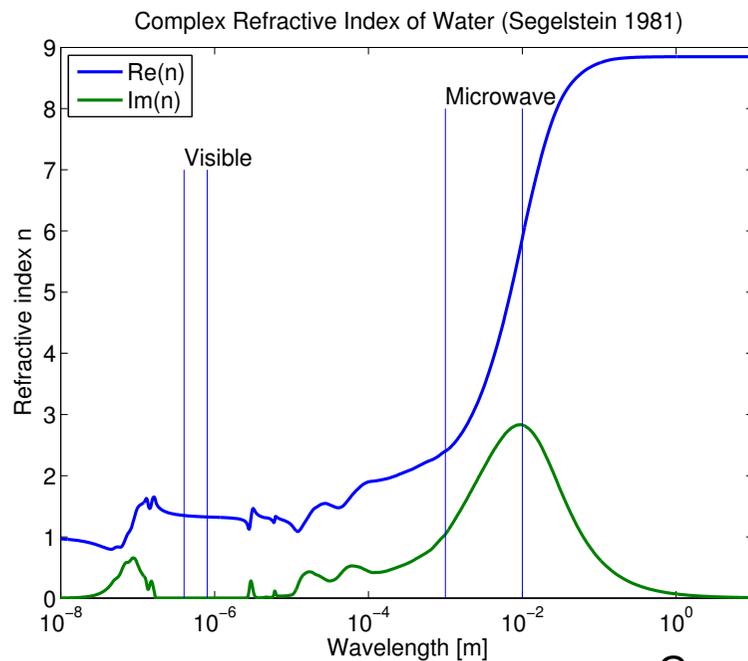
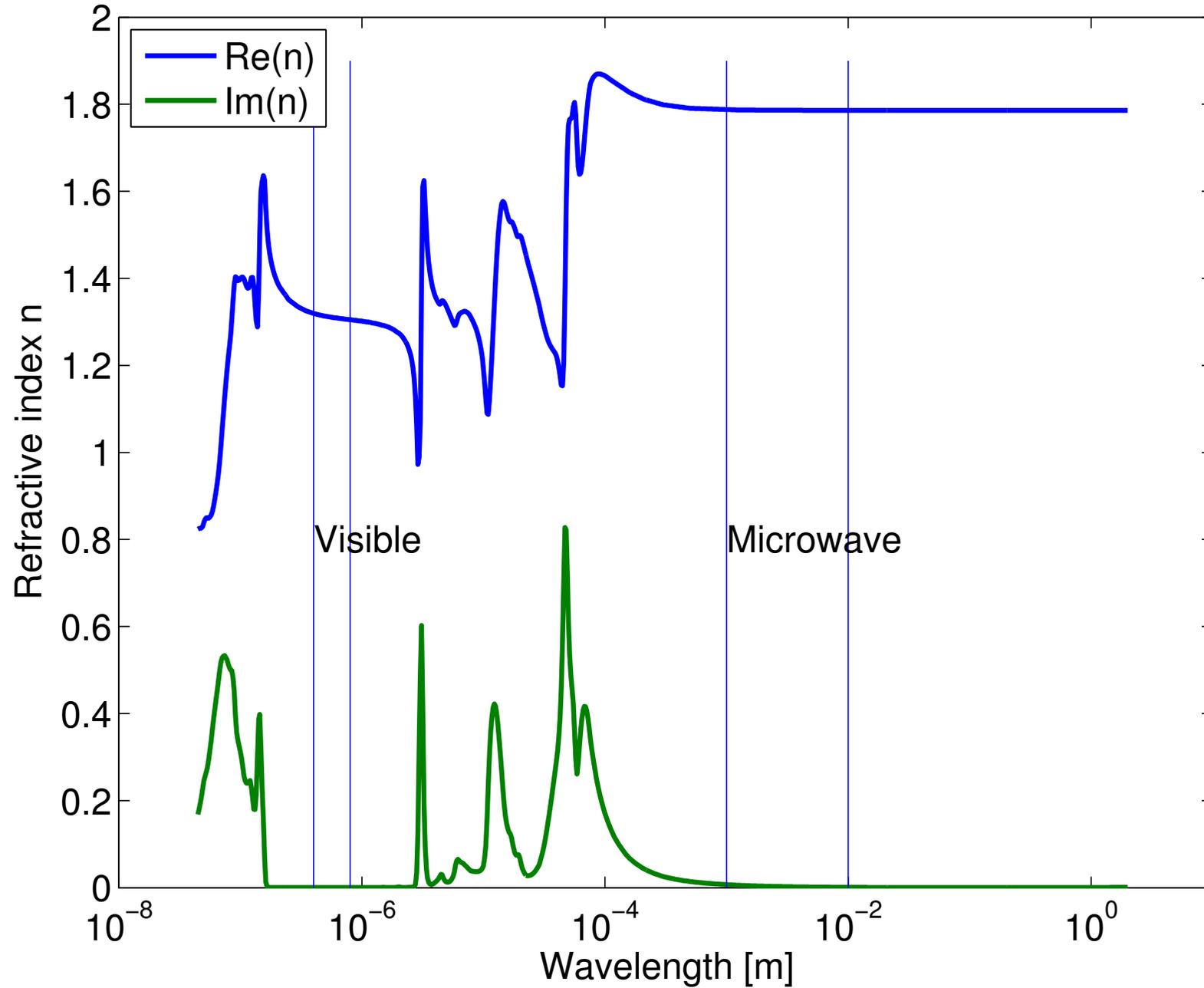


Fig. 4.5: Examples of the specular reflectivity of water as a function of incidence angle. (a) Visible band. (b) Microwave band.



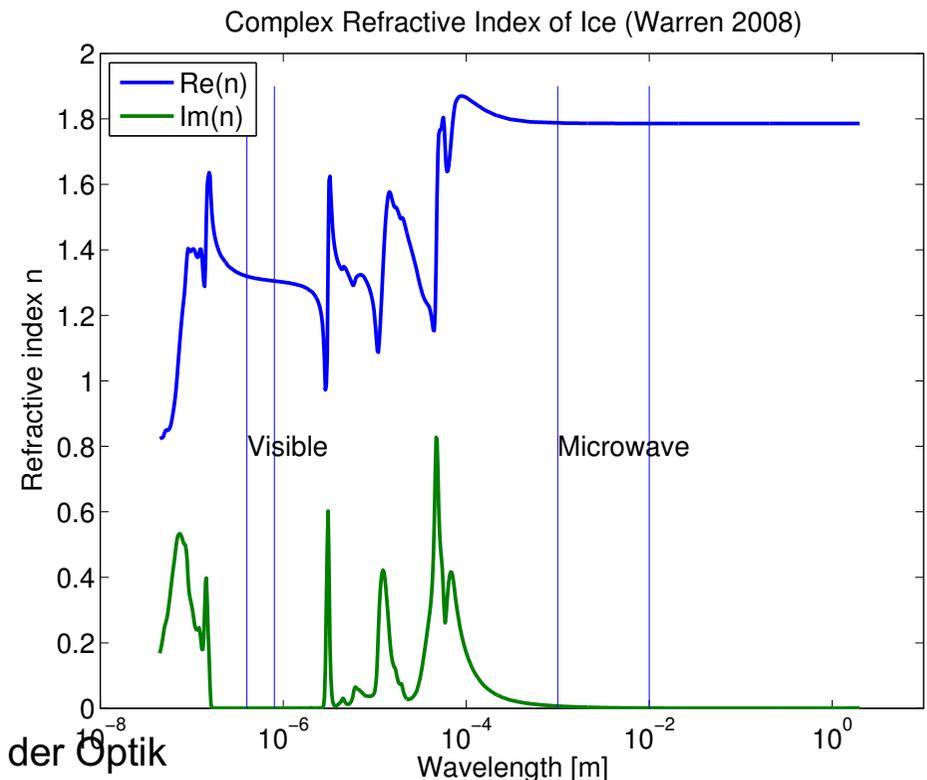
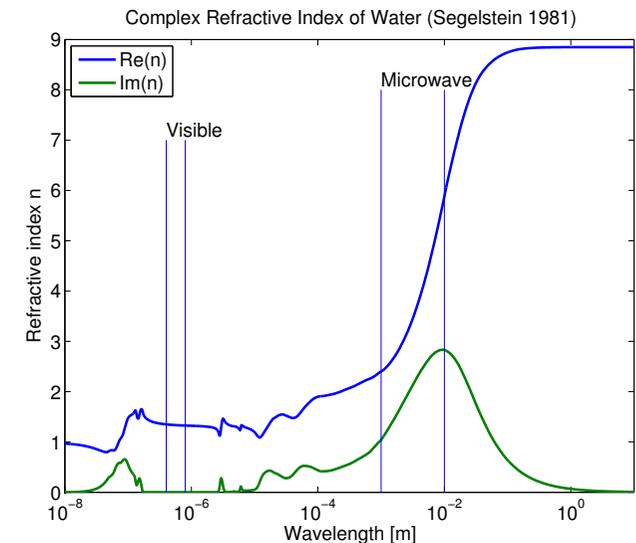
Mikrowelle:
 $\text{Re}(n)$ größer $\rightarrow R$ größer
 $\text{Re}(n)$ größer $\rightarrow \theta_B$ größer
 $\text{Im}(n)$ größer $\rightarrow R_{\text{vert}}$ bei θ_B nicht Null

Complex Refractive Index of Ice (Warren 2008)



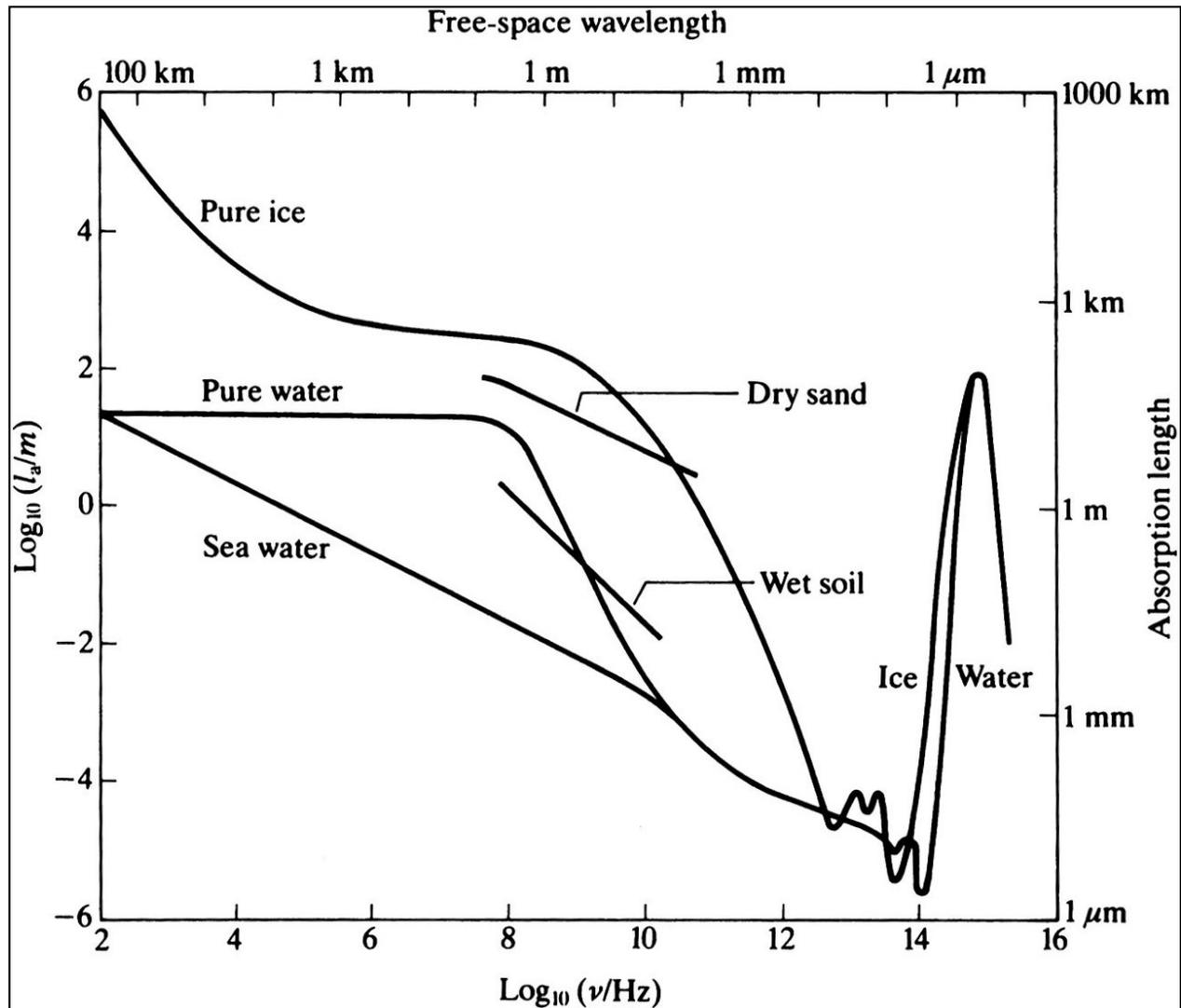
Komplexer Brechungsindex von Eis

- ▶ Quelle: ATMLAB (Original: Warren, S. G. and R. E. Brandt (2008), **Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: A revised compilation**, *J. Geophys. Res.*, **113**, D14220, doi:10.1029/2007JD009744).
- ▶ Im Sichtbaren kein großer Unterschied Eis/Wasser.
- ▶ Im Mikrowellenbereich ist $\text{Im}(n)$, also die Absorption von Eis, sehr niedrig.
→ Interessante Konsequenzen für die Fernerkundung von Eiswolken (niedrige Absorption heißt auch niedrige Emission, die Temperatur der Eiswolke spielt daher für die Mikrowellenstrahlung keine Rolle, die von flüssigen Wolkentröpfchen schon).
- ▶ Im Infraroten ist mehr Absorption, Sensoren sehen die Temperatur der Eiswolke.



Eindringtiefe, Einfluß von gelöstem Salz

- Im sichtbaren ist Wasser ziemlich durchsichtig
- Reines Wasser und Eis bei langen Wellenlängen (1 cm und mehr) auch
- Einfach aus Brechungsindex zu rechnen → Hausaufgabe



Rees 3.1: Absorptionslänge (Eindringtiefe) für verschiedene Materialien. Salzwasser absorbiert lange Wellenlängen wesentlich stärker als Süßwasser.

Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ **Beugung**
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ Beugungslimit
- ▶ Zusammenfassung

Der Arago Fleck (Poisson Fleck)

Wikipedia: Poisson was a member of the French Academy, which reviewed Fresnel's work. He used Fresnel's theory to predict that a bright spot will appear in the center of the shadow of a small disc and deduced from this that the theory was incorrect. However, **Arago**, another member of the committee, performed the experiment and showed that the prediction was correct. (**Lisle** had actually observed this fifty years earlier.) This was one of the investigations that led to the victory of the wave theory of light over the then predominant corpuscular theory.

Bild: Wikipedia

„Poisson Spot showing in the shadow of a 2-mm-diameter disc at a distance of 1 m from the disc. The point source has a wavelength of 633 nm (e.g. He-Ne Laser) and is located 1 m from the disc.“

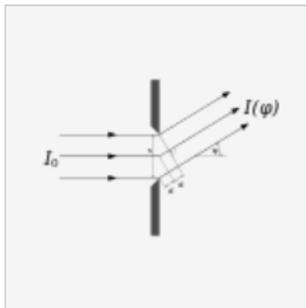


Generelle Idee der Beugung

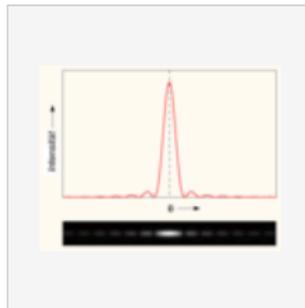
Bei kleinen Hindernissen oder kleinen Öffnungen wird die Wellennatur des Lichts sichtbar.

Beispiele für Beugung an Blenden [\[Bearbeiten\]](#)

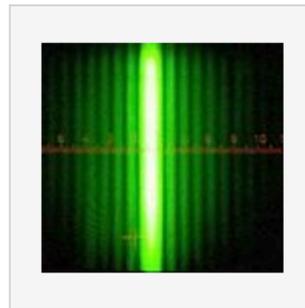
Beugung am **Einfachspalt**: Teilt man in Gedanken ein Lichtbündel, das an einem Einfachspalt in eine bestimmte Richtung abgelenkt wird, in zwei Hälften, können sich diese beiden Anteile des Lichtbündels konstruktiv oder destruktiv überlagern. An einem Spalt ergibt sich so wieder eine Reihe von Beugungsmaxima.



Beugung am Einfachspalt: Das Bild dient der Herleitung des ersten Minimums, bei dem die Strahlen der oberen und die der unteren Hälfte sich im Unendlichen auslöschen^[2]



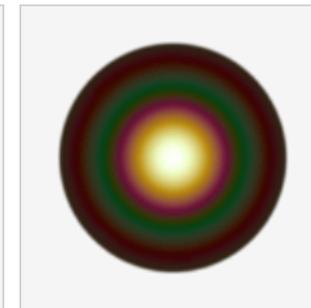
Beugung am Einfachspalt



Beugung am Einfachspalt – Licht längerer Wellenlänge (grün) wird stärker gebeugt, das Beugungsbild ist weiter aufgefächert



Beugung am Einfachspalt – Licht kürzerer Wellenlänge (blau) wird bei gleicher Spaltbreite weniger stark gebeugt, das Beugungsbild ist enger



Beugung an einer kreisförmigen Lochblende mit weißem Licht - je kürzer die Wellenlänge, desto geringer werden die entsprechenden Farbanteile gebeugt

Gitterspektrometer

- ▶ Man geht ins erste Nebenmaximum des Beugungsbildes.
- ▶ Lage frequenzabhängig → Kann zur Spektralanalyse verwendet werden.

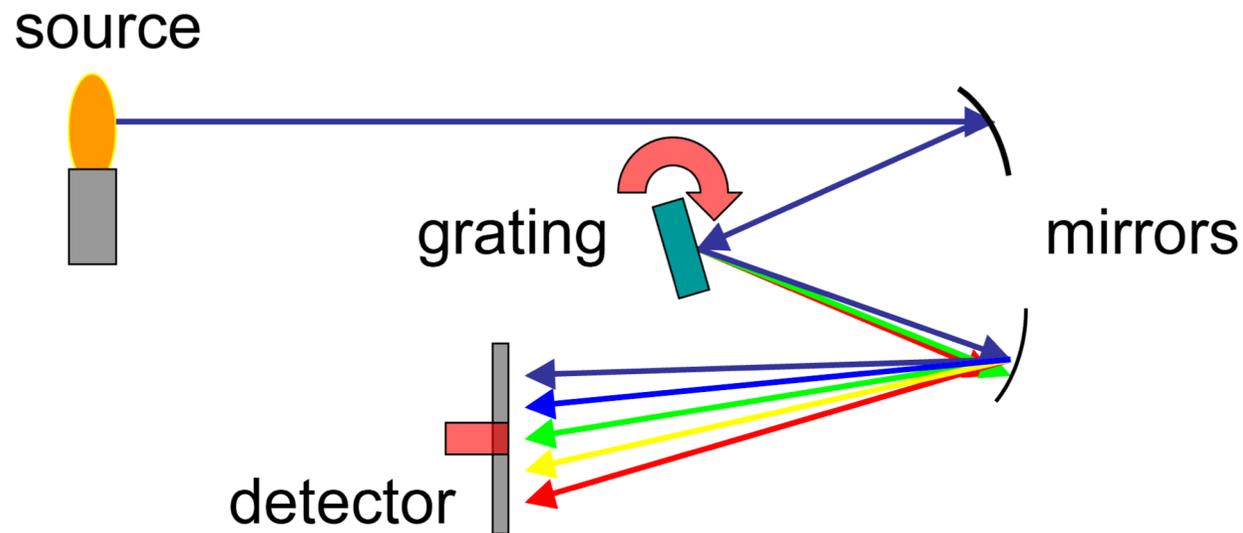


Bild: Wikipedia

Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ **Anwendung 2: Irisierende Wolken**
- ▶ Beugungslimit
- ▶ Zusammenfassung



**Polare Stratosphärenwolke (PSC)
in Kiruna (Bild Oliver Lemke)**

Erklärung mit Beugung

- ▶ Näherungsweise Beugung an einem runden Hindernis (Mie Streuung wäre die korrektere Theorie)
- ▶ Minima und Maxima, analog zur Beugung am Spalt
- ▶ Lage frequenzabhängig. Warum?



- ▶ Verhältnis Wellenlänge zur Größe des Hindernisses

- ▶ Verschiedene Farben in verschiedenen Richtungen

- ▶ Welche Eigenschaft müssen die Wolken haben, damit das klappt?



- ▶ Alle Tröpfchen (fast) gleich groß, ansonsten liegen die Maxima und Minima an verschiedenen Stellen und mitteln sich raus.

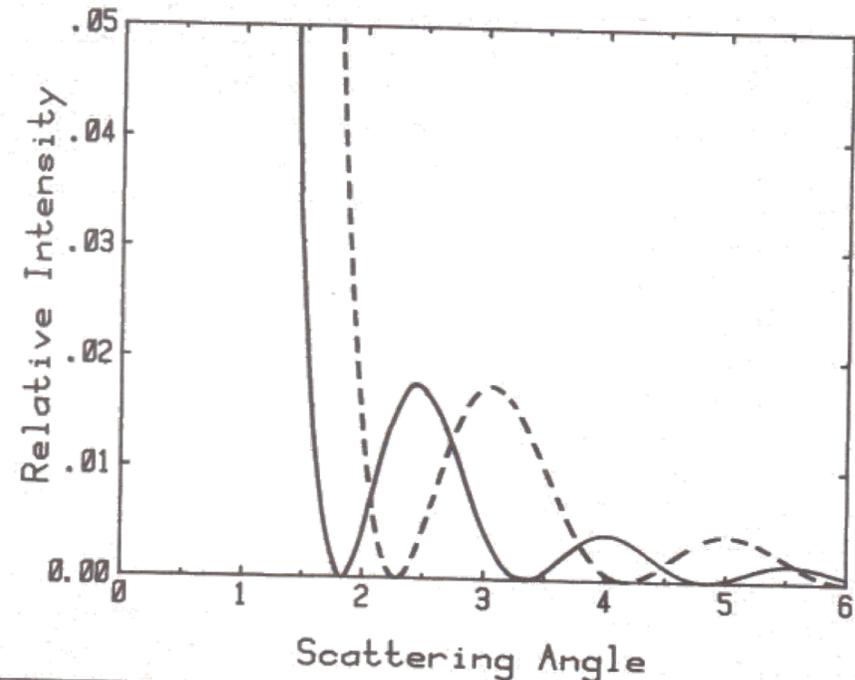


Figure 17.2 A small water droplet (radius $10 \mu\text{m}$) scatters light in all directions but in some more than in others. The scattering diagram for red incident light (broken line) is shifted relative to that for green (solid line), hence providing a mechanism for color separation of white light.

Bohren, Clouds in a glass of beer.

Coronas

- Physik wie irisierende Wolken
- Gleichmäßige Wolkenschicht
- Bild: Wikipedia (Corona über der Golden Gate Bridge)

Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ **Beugungslimit**
- ▶ Zusammenfassung

Beugungslimit

Zwei wichtige Konsequenzen der Wellennatur des Lichts:

1. Objekte die kleiner als die Wellenlänge sind, sind nicht aufzulösen. (Abbe Limit für Mikroskope)
2. Die Winkelauflösung einer Antenne oder Linse hängt von ihrer Größe ab.

$$\Delta\vartheta \propto \frac{\lambda}{D}$$

$\Delta\vartheta$: Winkelauflösung

λ : Wellenlänge

D : Durchmesser der Antenne, des Spiegels, oder der Linse

Der Durchmesser D ist so wichtig, dass es einen eigenen Fachterminus für ihn gibt. Wie? (Auflösung nächste Seite.)



Apertur bei Wikipedia

Apertur oder **Öffnungsweite** einer Optik oder einer Antenne bezeichnet die freie Öffnung oder deren Durchmesser, durch welche die Lichtstrahlen oder Radiowellen ausgesendet oder empfangen werden. Das bestimmende Bauteil wird Aperturblende genannt und ist in der Fotografie oft verstellbar, siehe fotografische Blende / Blendenzahl.

Wegen der Wellenbeugung hängt die Winkelauflösung vom Durchmesser im Verhältnis zur Wellenlänge der verwendeten Strahlung ab. So hat eine Radarantenne vom 1000-fachen Durchmesser der Pupille nur ein Zehntel des Auflösungsvermögens, weil die Wellenlänge des Radars 10.000-mal so groß ist wie die des sichtbaren Lichts (für die quantitative Beziehung siehe Rayleigh-Kriterium). Durch kohärente Überlagerung lassen sich mehrere Aperturen auflösungssteigernd kombinieren, für Beispiele im optischen Bereich siehe die Kategorie Interferometrisches Teleskop. Durch die im Radiofrequenzbereich gegebene Möglichkeit kohärenter Signalverarbeitung lassen sich auch weit entfernte Aperturen kombinieren, siehe Langbasisinterferometrie, und aus dem Signal einer gegenüber einem starren Objekt bewegten Antenne eine synthetische Apertur berechnen.

Satellitenbilder: „Footprint size“ oder Pixelgröße

- ▶ Räumliche Auflösung von Satellitenbildern wichtig
- ▶ Bei gegebenem Abstand heißt

kleines Pixel =
schmale Antennenkeule =
hohe Winkelauflösung der
Antenne

- ▶ Technische schwer für
lange Wellenlängen

Holl, G., S. Eliasson, J. Mendrok, and S. A. Buehler (2014), **SPARE-ICE: synergistic Ice Water Path from passive operational sensors**, *J. Geophys. Res.*, **119**(3), 1504–1523, doi:[10.1002/2013JD020759](https://doi.org/10.1002/2013JD020759).

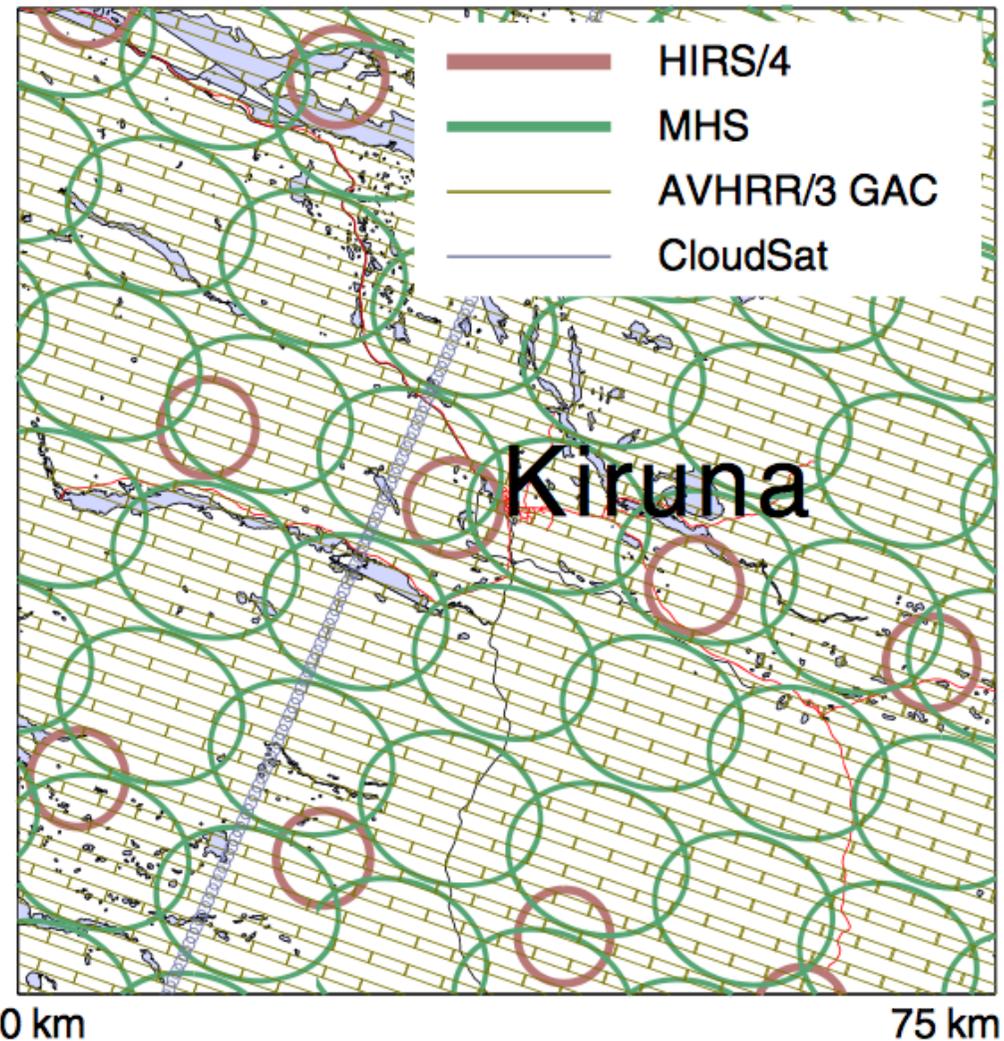


Figure 2. Illustration of various footprint sizes. Adapted from *Holl et al.* [2010]. Not shown is CALIPSO, which is smaller than CloudSat and falls mostly within the latter footprint.

Antennendiagramme

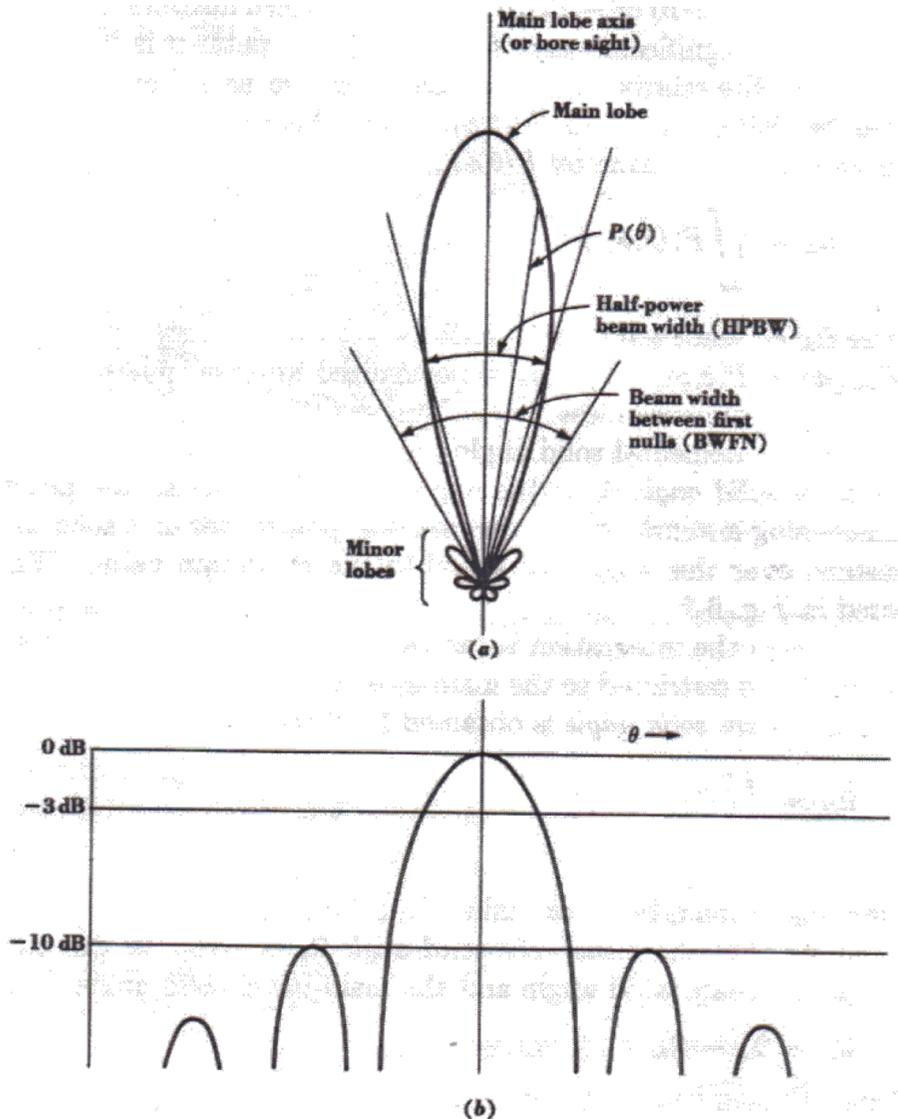


Fig. 6-1. (a) Antenna pattern in polar coordinates and linear power scale; (b) antenna pattern in rectangular coordinates and decibel power scale.

Figure 2.1: From Kraus [1986].

- ▶ Man stellt sich vor, mit der Antenne zu senden.
- ▶ Wie viel der Intensität geht in welchen Winkelbereich?
- ▶ Wichtige Begriffe:
 - ▶ Hauptkeule
 - ▶ Nebenkeulen
 - ▶ Half-Power Beamwidth (das was ich oben Winkelauflösung genannt habe)

Idee des Beugungslimits bei Antennen

- ▶ Eine ebene Welle muss eigentlich unendlich ausgedehnt sein.
- ▶ Näherungsweise erfüllt, wenn die Apertur groß im Vergleich zur Wellenlänge ist.
- ▶ Ist die Antenne zu klein, läuft die Welle auseinander.
- ▶ Gilt auch für Spiegel und Linsen.
- ▶ **Quasioptik**: Optik (Spiegel, etc.) bei der die Aperturen nicht groß genug sind, so dass man nicht mit geraden Strahlen rechnen kann. Zum Beispiel in Mikrowellenradiometern.

Strahleffizienz und Aperturreffizienz

- ▶ Strahleffizienz: Verhältnis Leistung in der Hauptkeule zur gesamten Leistung (wie gut sind Nebenkeulen unterdrückt)
- ▶ Aperturreffizienz: Verhältnis scheinbare Apertur zur geometrischen Apertur (wie gut nutze ich meine Antenne aus)
- ▶ Leider können nicht beide hoch (nahe an 1 sein)
- ▶ Design der Antenne bestimmt den Trade-Off, und damit die Konstante C

$$\Delta\vartheta = C \frac{\lambda}{D}$$

$\Delta\vartheta$: Winkelauflösung

λ : Wellenlänge

D : Apertur

C : Konstante

Ausleuchtung der Apertur und Antennendiagramm

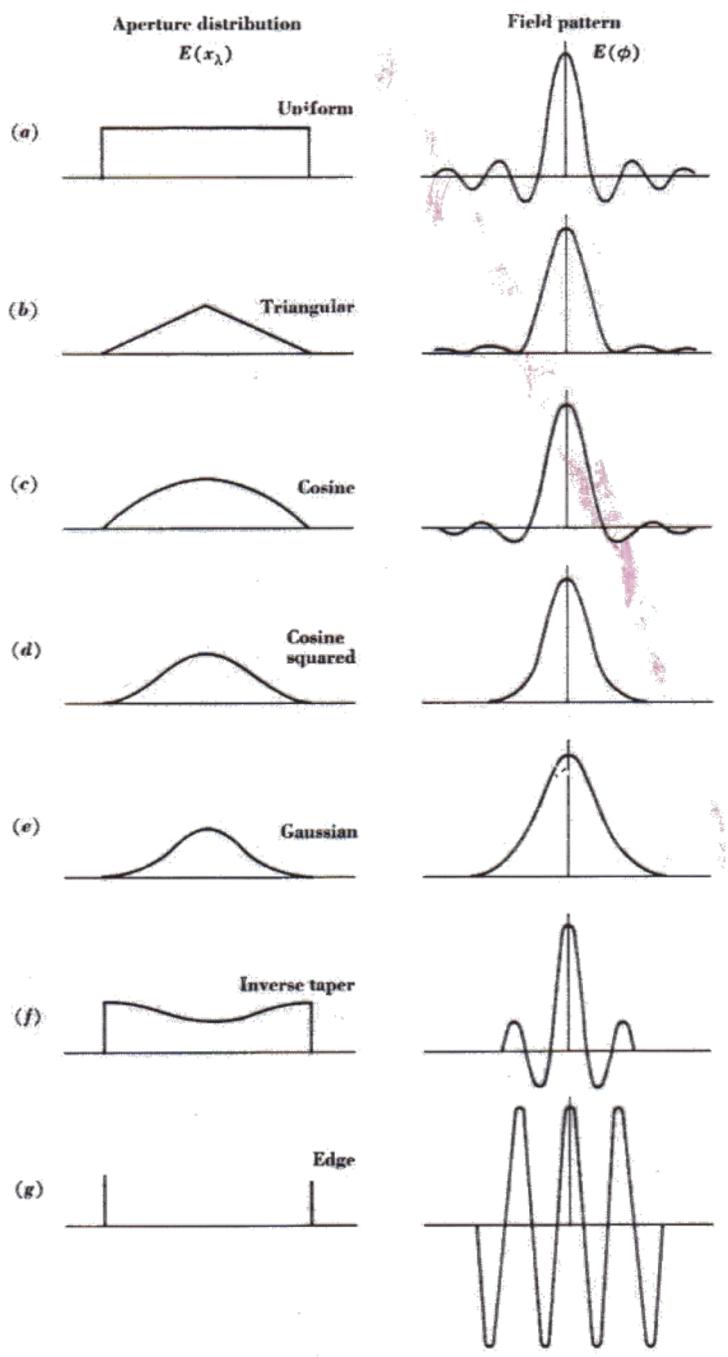
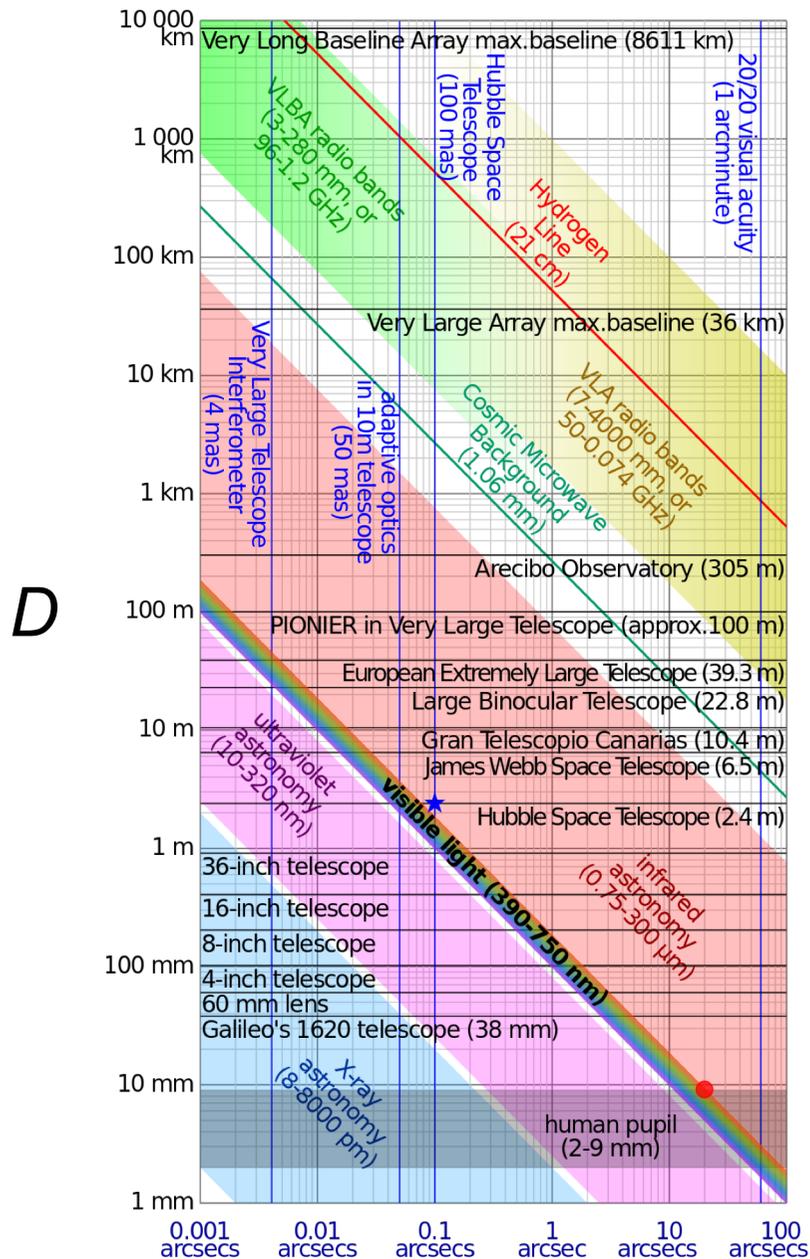


Fig. 6-9. Different aperture distributions with associated antenna patterns.

Stefan Bühler

Figure 2.2: From Kraus [1986].

$$\Delta\vartheta \propto \frac{\lambda}{D} \Rightarrow D = \frac{\lambda}{\Delta\vartheta}$$



$$3600 \text{ arcsec} = 1^\circ$$

$$\Rightarrow 100 \text{ arcsec} = 0.0277777^\circ$$

$$\frac{d/2}{H} = \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$d = 2H \tan \frac{\alpha}{2}$$

d: Pixelgröße

H: Orbithöhe

α: Winkelauflösung

$$H = 500 \text{e}3 \text{ m (niedriger Orbit)}$$

$$\alpha = 0.0277777^\circ \text{ (100 arcsec)}$$

$$\Rightarrow d \approx 240 \text{ m}$$

Wikipedia: „Log-log plot of aperture diameter vs angular resolution at the diffraction limit for various light wavelengths compared with various astronomical instruments. For example, the blue star shows that the Hubble Space Telescope is almost diffraction-limited in the visible spectrum at 0.1 arcsecs, whereas the red circle shows that the human eye should have a resolving power of 20 arcsecs in theory, though normally only 60 arcsecs.“

Übersicht

- ▶ Strahlenoptik
- ▶ Wellenoptik
- ▶ Anwendung 1: Luftspiegelungen
- ▶ Mehr zu Reflektion und Transmission
- ▶ Beugung
- ▶ Anwendung 2: Irisierende Wolken
- ▶ Beugungslimit
- ▶ **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- ▶ „Klassische“ Optik:
 - ▶ Betonung des sichtbaren Bereichs (mehr allgemein, Wellenlänge klein im Vergleich zu betrachteten Strukturen)
 - ▶ Keine Emission (keine Wärmestrahlung)
 - ▶ Glatte Flächen (für Reflektion, Brechung)
 - ▶ Betonung des Wellencharakters des Lichts, mit Strahlenoptik als Näherung
 - ▶ Beugungslimit
- ▶ Wichtigste Größe:
Brechungsindex

Intensität / Amplitude

Amplitude

- ▶ Charakterisiert „Stärke“ kohärenter Strahlung im Wellenbild
- ▶ Amplitude + Phase nötig zur Erklärung von Interferenzphänomenen (Beugung)

Intensität

- ▶ Zeitlich gemittelt Quadrat der Amplitude (plus Vorfaktoren)
- ▶ Vor allem im Strahlenbild und vor allem für inkohärente Strahlung wesentlich geeigneter als Amplitude
- ▶ Inkohärent: Licht + Licht = 2* Licht
- ▶ Kohärent: Licht + Licht = [Dunkelheit bis 4* Licht]
- ▶ **Intensität im Rest der Vorlesung im Vordergrund!**

Leseempfehlung

- ▶ Petty, Kapitel 4.