

LICHT

Tipler-Mosca
Physik

31. Eigenschaften des Lichts (Properties of Light)

31.1 Welle-Teilchen-Dualismus (Wave-particle duality)

31.2 Lichtspektren (Light spectra)

31.3 Lichtquellen (Sources of Light)

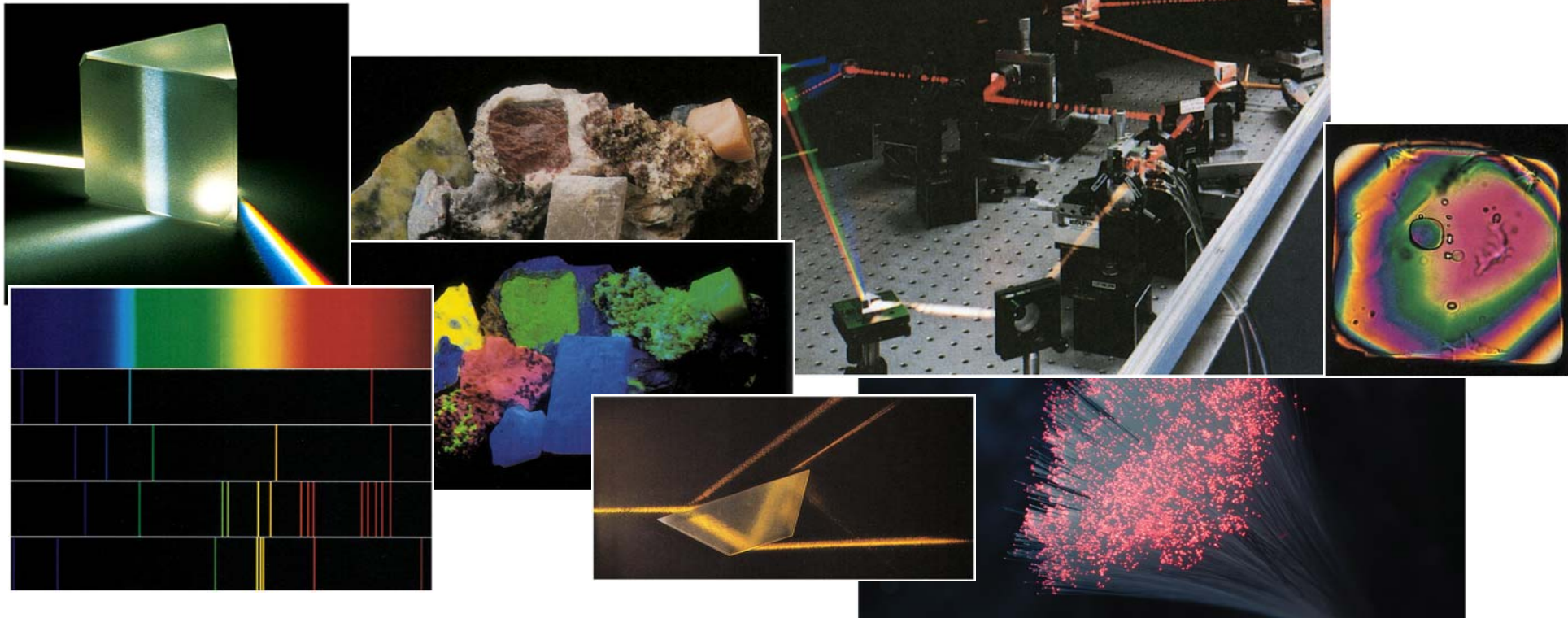
31.4 Die Lichtgeschwindigkeit (The speed of light)

31.5 Die Ausbreitung des Lichts (The propagation of light)

31.6 Reflexion und Brechung (Reflection and refractions)

31.7 Polarisation (Polarisation)

31.8 Ableitung des Reflexions- und des Brechungsgesetzes (Derivation of the laws of reflection and refractions)



31.1 Welle-Teilchen-Dualismus (Wave-particle duality)

Wellennatur des Lichtes erstmals 1802 von Thomas Young mit einem Doppelspaltversuch demonstriert \Leftrightarrow Interferenzmuster zweier kohärenter Lichtquellen.

Maxwell stellt 1860 die Theorie der elektromagnetischen Wellen auf.

Die Teilchenatur des Lichts wurde im Jahr 1905 von Albert Einstein in seiner Erklärung des Photoeffektes postuliert, siehe Teil 34.2, \Rightarrow Ein Lichtteilchen, Photon, hat eine Energie, die von der Frequenz ν bzw. von der

Wellenlänge λ abhängt: $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

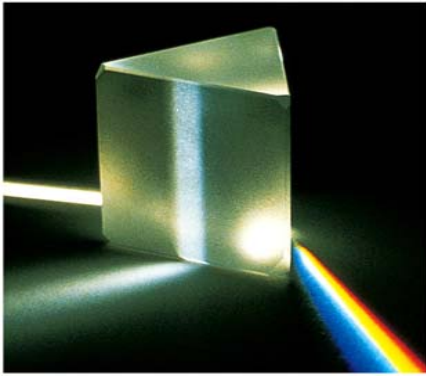
mit dem Planck'schen Wirkungsquantum $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J s} = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s}$,
da Energien oft in Elektronenvolt und Wellenlängen in nm angegeben werden \Rightarrow
oft zweckmäßig $hc = 1240 \text{ eV nm}$

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad 31-1$$

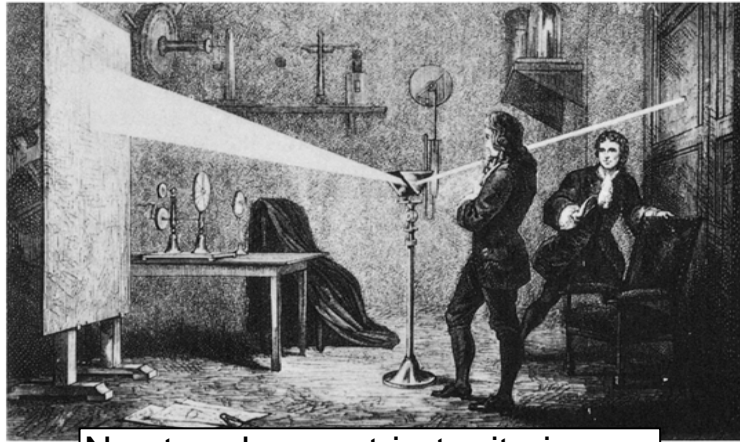
EINSTEIN'S EQUATION FOR PHOTON ENERGY

Die Ausbreitung des Lichts kann durch seine Welleneigenschaften erklärt werden,
der Austausch von Energie zwischen Licht und Materie kann durch seine Teilcheneigenschaften erklärt werden \Rightarrow Wellen-Teilchen-Dualismus \Leftrightarrow allgemeine Eigenschaft der Materie

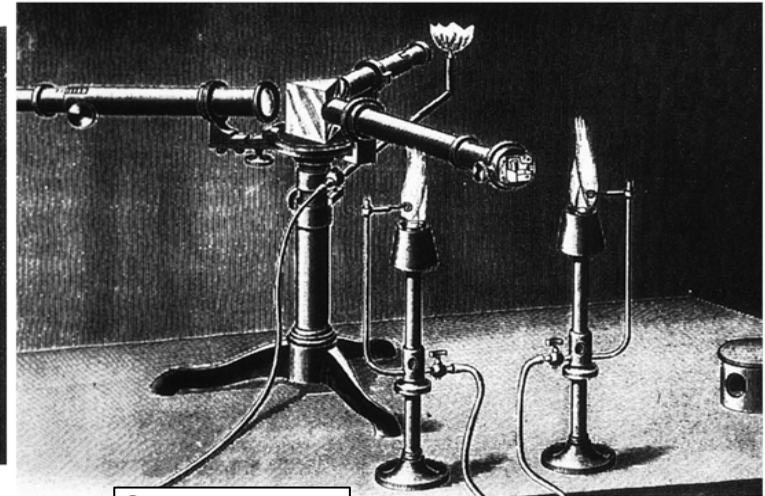
31.2 Lichtspektren (Light spectra)



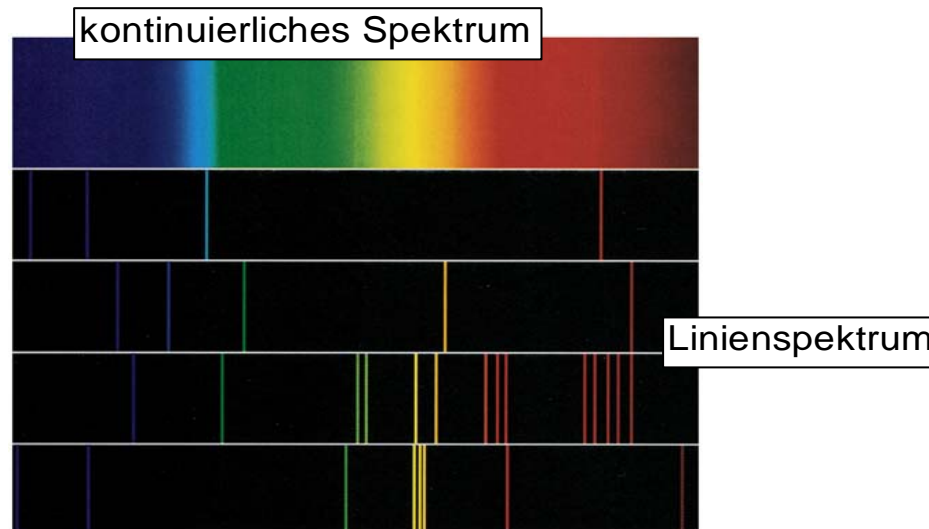
Spektrale Zerlegung von Licht mit einem Prisma



Newton demonstriert mit einem Prisma das Spektrum der Sonne



Spektroskop



31.3 Lichtquellen (Sources of Light)

Linienpektren

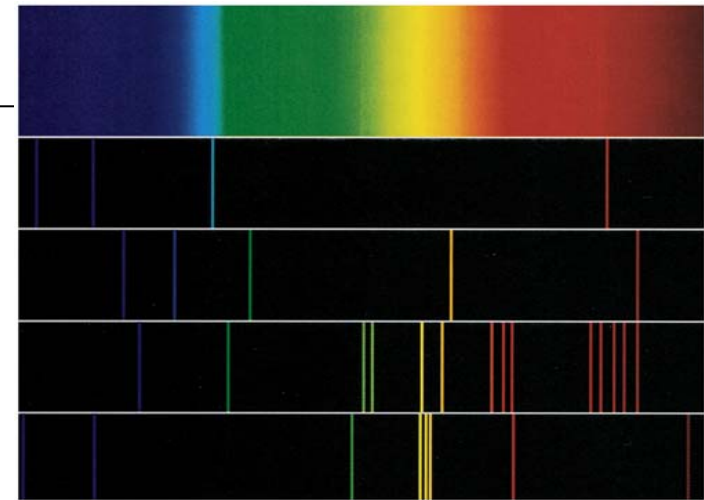
Die äußeren Elektronen in der Elektronenschale eines Atoms oder Moleküls sind verantwortlich für die Energieänderungen im Atom, die zur Emission oder Absorption von sichtbarem Licht führen: durch Stoß oder Aufnahme von elektromagnetischer Strahlung können äußere Elektronen in Zustände höherer Energie gebracht werden (Anregung) \Rightarrow innerhalb von 10^{-8} s geht ein äußeres Elektron wieder in einem Zustand geringerer Energie über \Leftrightarrow spontane Emission eines Photons mit Energie $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1 \Rightarrow$ Prozess erfolgt nicht geordnet

\Leftrightarrow das emittierte Licht ist inkohärent, Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{hc}{\Delta E}$ (siehe auch Teil 36.1 bzw. 36.2 bzw. 36.7);

Photonenenergie im sichtbaren Bereich des Spektrums:

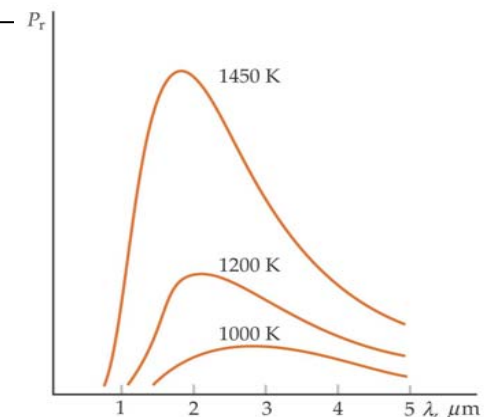
$$E_{400 \text{ nm}} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{400 \text{ nm}} = 3.10 \text{ eV} \quad E_{700 \text{ nm}} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{700 \text{ nm}} = 1.77 \text{ eV},$$

Energieniveaus in Atomen haben keine beliebige Zwischenwerte \Rightarrow diskrete Werte der Energie der emittierten Photonen \Rightarrow Spektrallinien

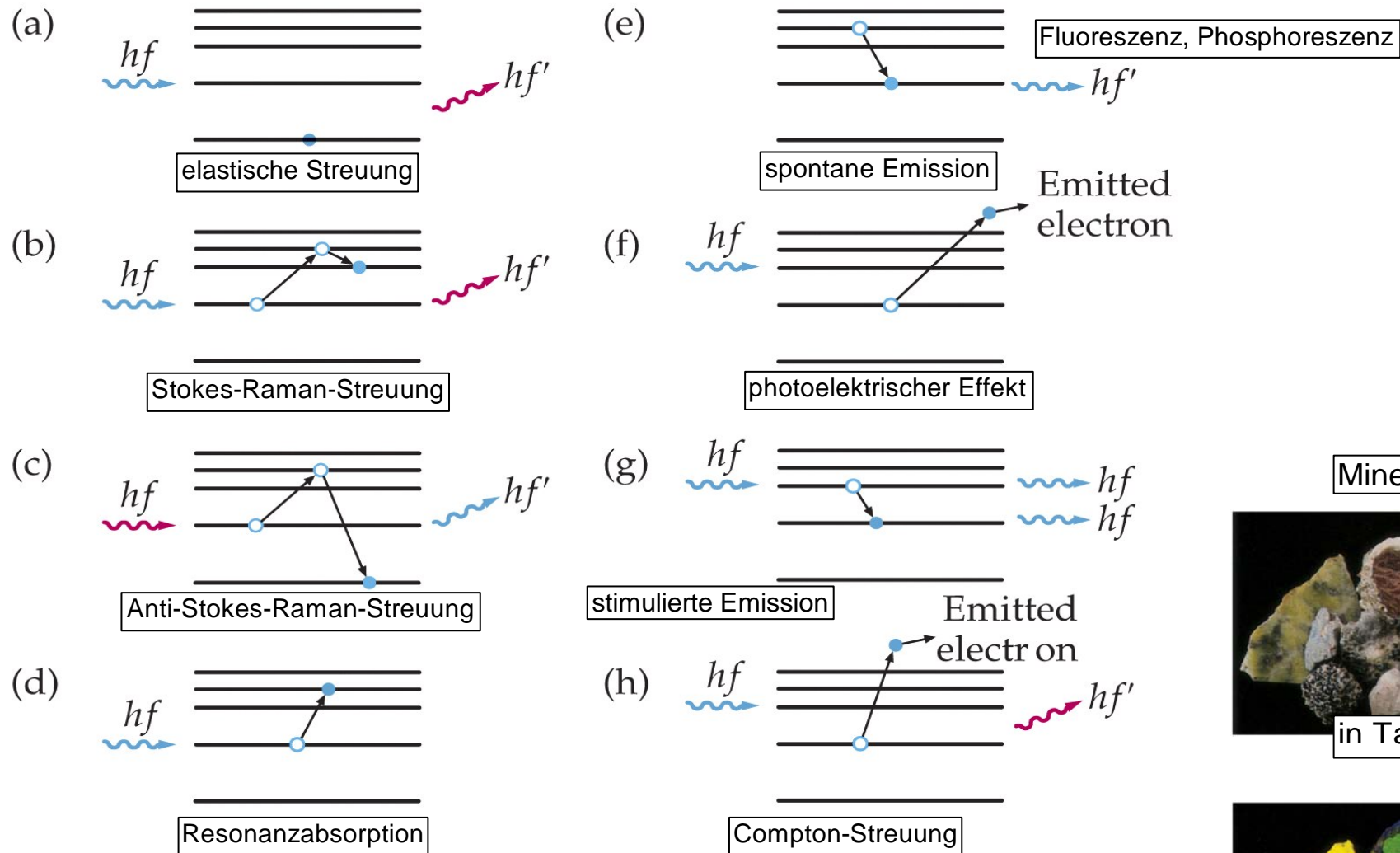


Kontinuierliche Spektren

In Flüssigkeiten und Festkörpern sind die Atome eng benachbart \Leftrightarrow starke Wechselwirkungen miteinander \Rightarrow Verbreiterung der Energieniveaus \Rightarrow eventuell Überlap von Energiebereichen \Rightarrow Emissionsspektrum kontinuierlich, z.B. metallischer Glühfaden einer Lampe (siehe auch Teil 20.4 Wärmestrahlung); Körper bei Temperaturen $< 600^\circ\text{C} \Leftrightarrow$ emittiert in infraroten Spektralgebiet



Absorption, Streuung, spontane Emission und stimulierte Emission

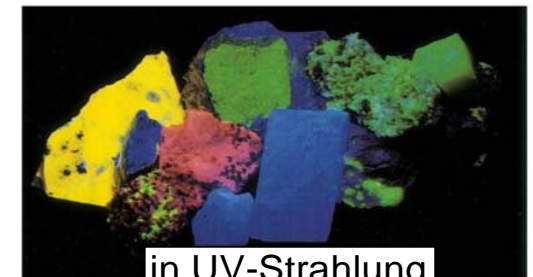


Photon-Atomwechselwirkungen und Photon-Molekülwechselwirkungen

Mineralien



in Tageslicht



in UV-Strahlung

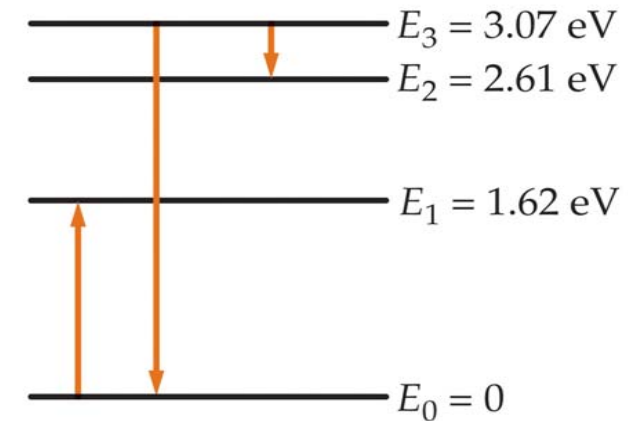
Beispiel 31.1 Resonanzemission Absorption und Emission

Kalium-Atom, Energieniveaus siehe Schema; gesucht a) Wellenlänge des Überganges vom Grundzustand E_0 in den ersten angeregten Zustand E_1 (Resonanzabsorption), Wellenlänge für den Übergang b) von E_2 nach E_0 , c) von E_3 nach $E_2 \Rightarrow$ aus Gl. (31.3) $\lambda = \frac{hc}{|\Delta E|}$

Teil a) $\lambda = \frac{hc}{|E_1 - E_0|} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{|(1.62 \text{ eV}) - (0 \text{ eV})|} = 765 \text{ nm},$

Teil b) $\lambda = \frac{hc}{|E_2 - E_0|} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{|(2.61 \text{ eV}) - (0 \text{ eV})|} = 475 \text{ nm},$

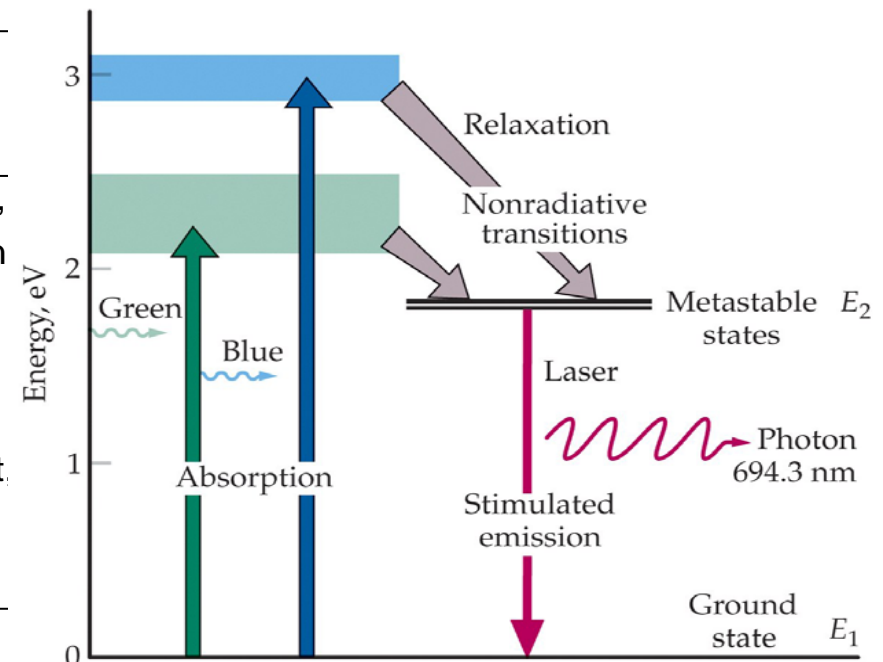
Teil c) $\lambda = \frac{hc}{|E_3 - E_2|} = \frac{1240 \text{ eV nm}}{|(3.07 \text{ eV}) - (2.61 \text{ eV})|} = 2696 \text{ nm},$



[Link NIST](#)

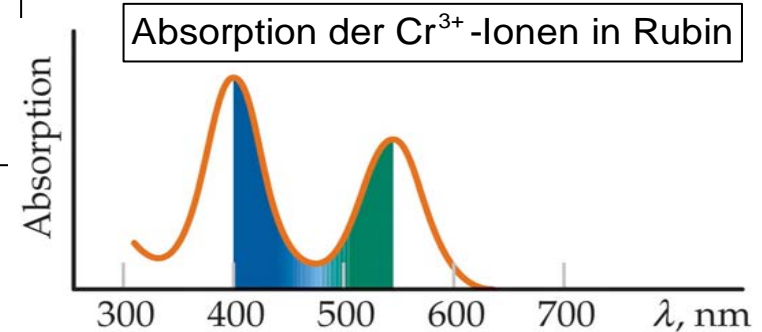
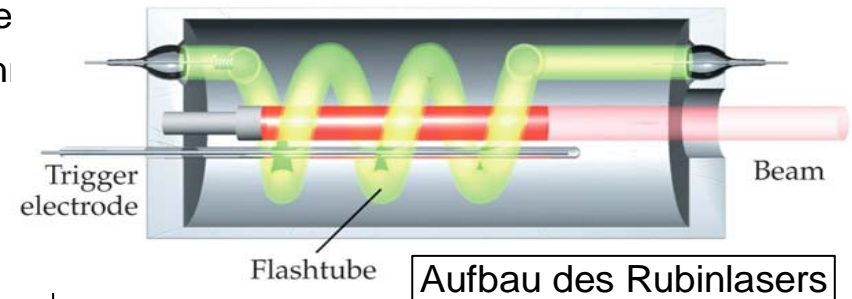
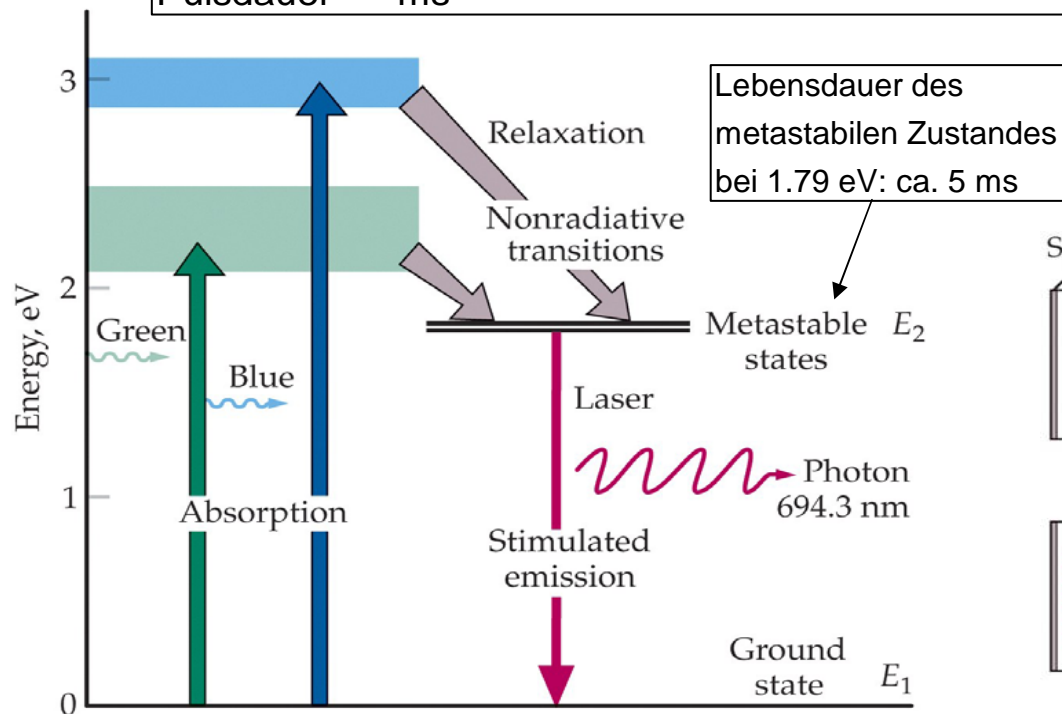
Laser

Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, beruht auf den Effekt der stimulierten Emission in einem aktiven Medium. Gegeben: Atomen mit Grundzustand E_1 und angeregten, metastabilen, Zustand $E_2 \Rightarrow$ Photonen mit $h\nu = E_2 - E_1$ eingestrahlt \Rightarrow Absorption \Leftrightarrow Atom von Zustand E_1 zum Zustand E_2 angeregt, und/oder stimulierte Emission \Leftrightarrow Atom vom Zustand E_2 zum Zustand E_1 abgeregt

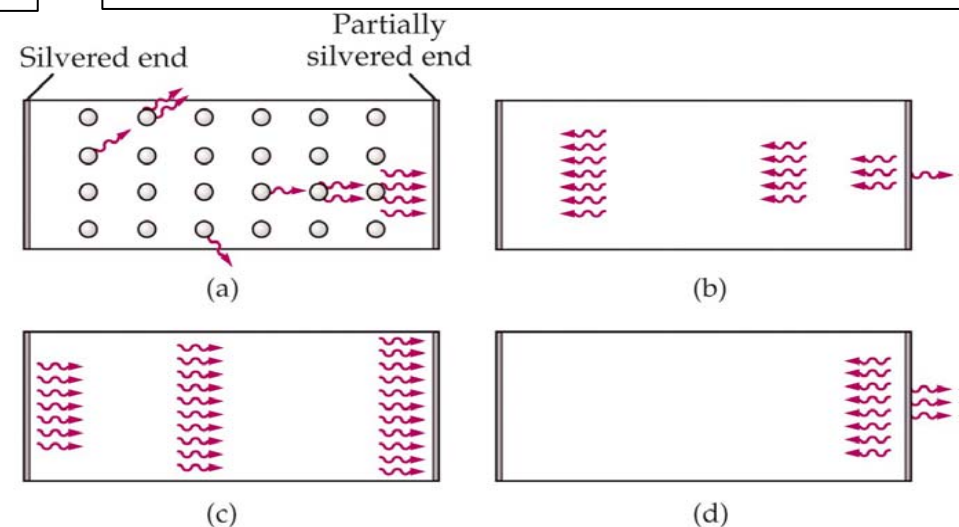


Die relative Wahrscheinlichkeiten der Absorption und der stimulierte Emission sind gleich. Bei Raumtemperatur fast alle Atome zu Beginn in den Grundzustand \Rightarrow Absorption vorherrschend;
 Besetzungsinversion (mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand) erreicht man durch optisches Pumpen \Rightarrow
 durch spontane Übergänge wird stimulierte Emission induziert \Rightarrow
 der Prozess der stimulierten Emission herrscht nur vor, solange die Besetzung der metastabilen Zustände höher ist als die des Grundzustandes.

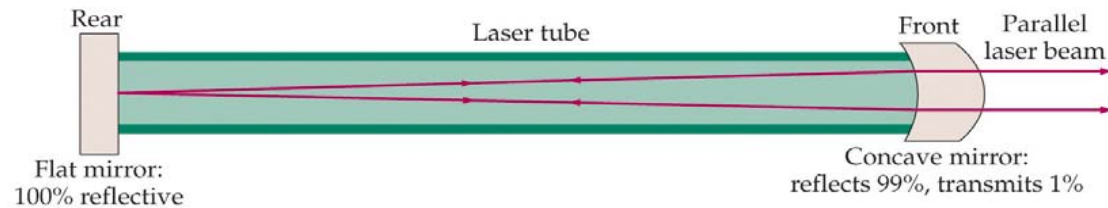
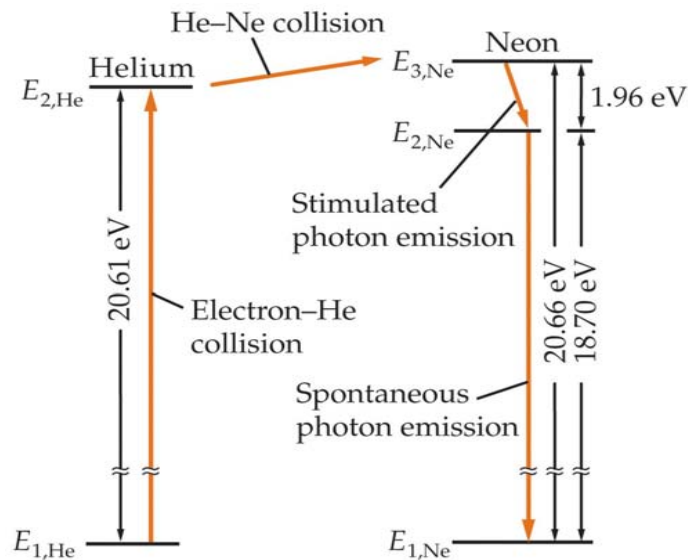
Rubinlaser: Pulsbetrieb, Energie pro Puls 50 bis 100 J, Pulsdauer \sim ms



Entstehung des Photonenstrahls in einem Laser



Im kontinuierlich arbeitenden He-Ne-Laser wird die Besetzungsinversion mittels Anregung durch eine elektrische Gasentladung erzeugt.



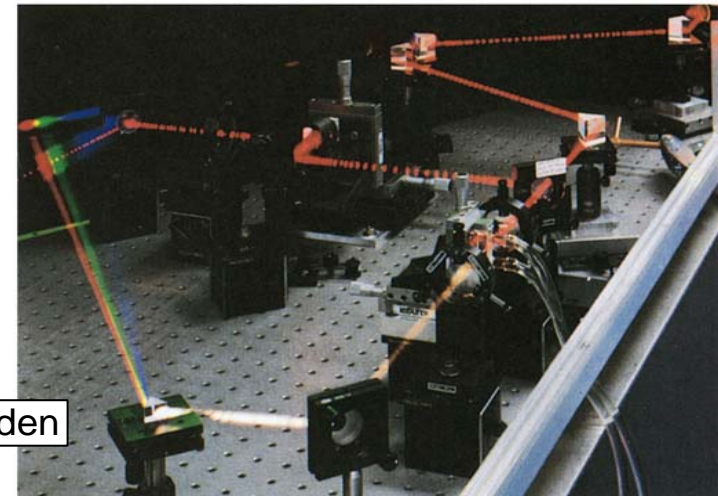
Aufbau eines He-Ne-Lasers

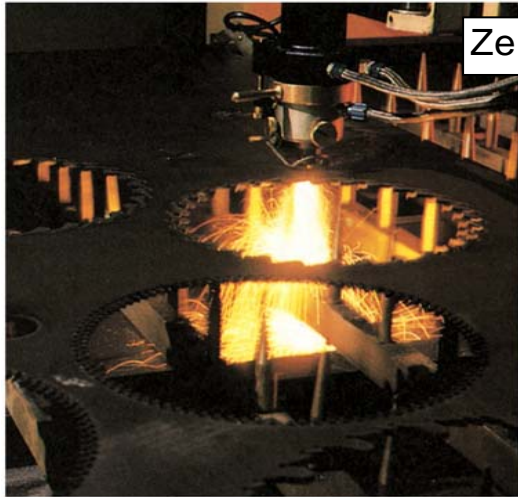
An der Funktion des He-Ne-Lasers sind vier Energieniveaus beteiligt
 \Leftrightarrow Besetzungsinversion leichter erreichbar;
 beim Rubinlaser dagegen sind nur drei Energieniveaus beteiligt.

Strahlen eines Krypton- und eines Argon-Ionenlasers, aufgetrennt in ihre Komponenten



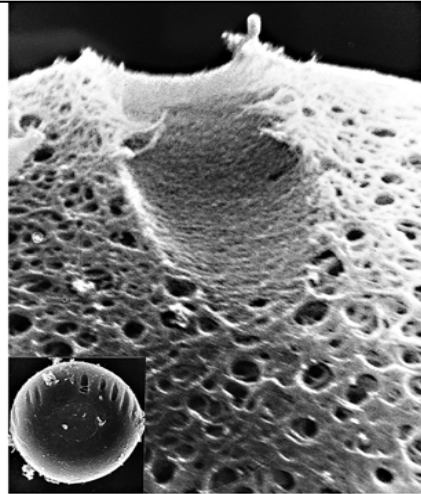
Pulslaser mit Pulsdauer in von Femtosekunden



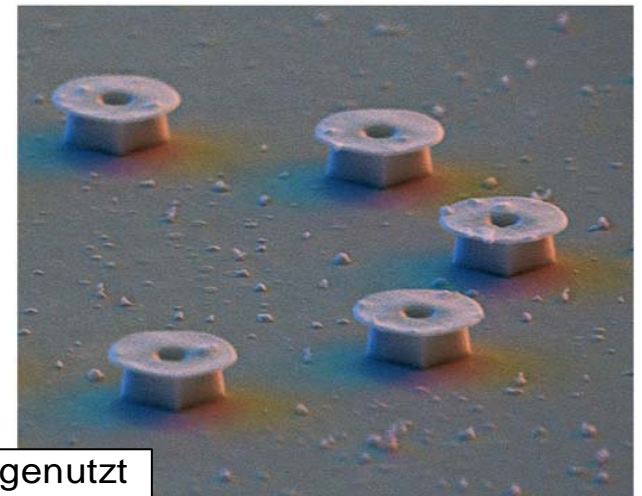


Zerschneiden von Stahl mit einem CO₂-Laser

Schnitt in der äußeren Zellmembran der Eizelle einer Maus mit einer Laserschere

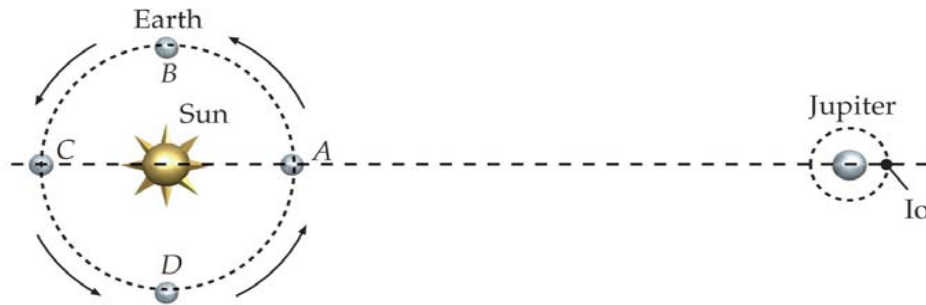


LASER 2007



Scheibenförmige Halbleiter als Nanolaser ⇔ Quanteneffekte werden ausgenutzt

31.4 Die Lichtgeschwindigkeit (The speed of light)



Römers Methode zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit aus der Zeitspanne zwischen den Verfinsterungen des Jupitermondes Io:

Dauer der Verfinsterung 42.5 h, nimmt zu auf der Bahn ABC, und nimmt ab auf der Bahn CDA.

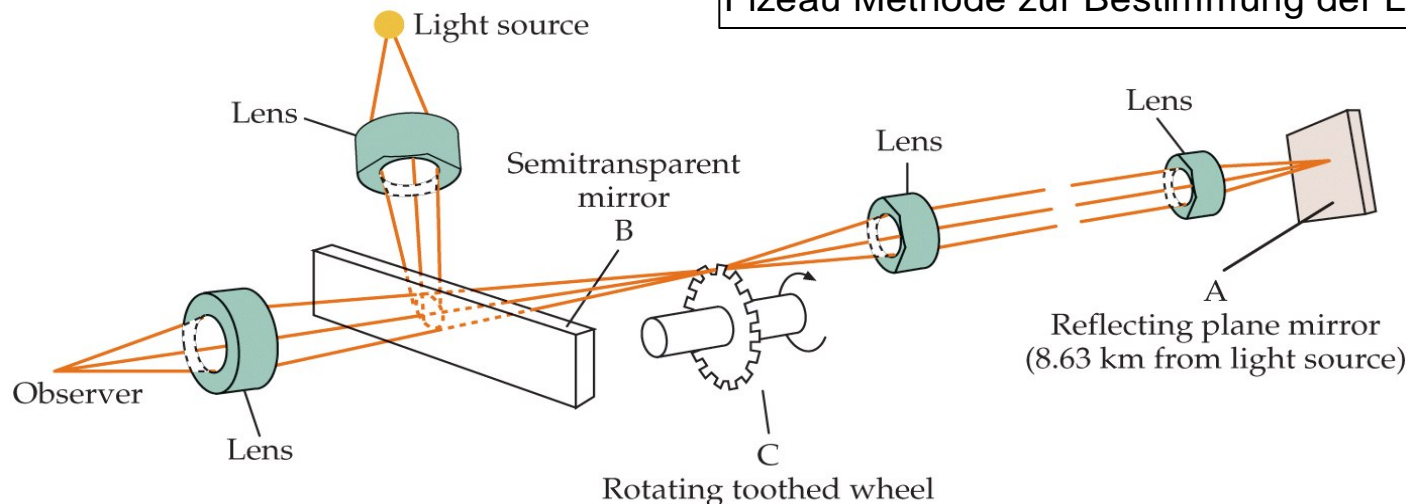
Unterschied in der Periode der Verfinsterung im Fall A und im Fall C $\hat{=}$ Erdbahndurchmesser: ca. 16.6 Minuten

Beispiel 31.2: Die Lichtgeschwindigkeit

Mittlerer Durchmesser der Erdbahn 3×10^{11} m, das Licht benötigt 16.6 Minuten \Rightarrow gesucht: Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{16.6 \text{ min}} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{996 \text{ s}} = 3.01 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Fizeau Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit:



sie wird bestimmt aus der Winkelgeschwindigkeit des Zahnrads, bei der das vom Spiegel A reflektierte Licht gerade die nächste Lücke im Zahnrad passiert und den Beobachter erreicht.

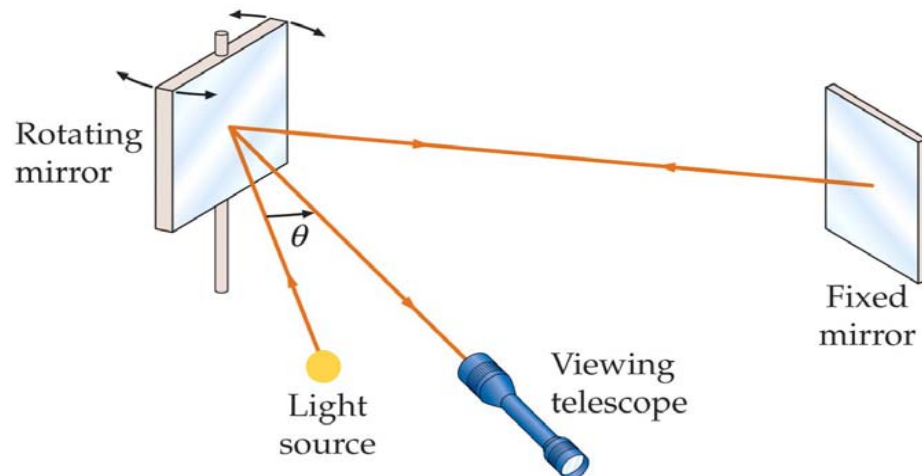
Beispiel 31.3: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau

Zahnrad mit 720 Zähne, Winkelgeschwindigkeit $\omega = 25.2$ Umdrehungen pro Sekunde, Entfernung ℓ vom Zahnrad

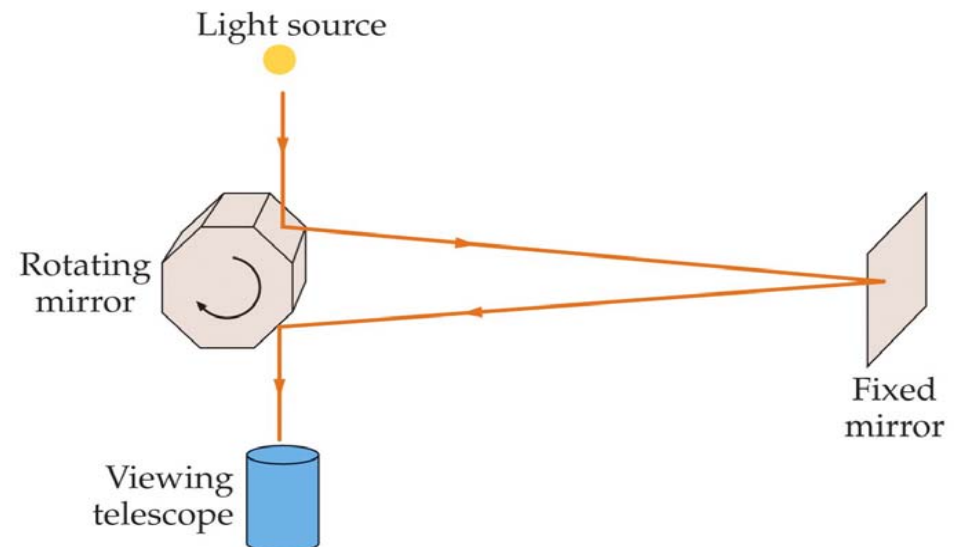
zum Spiegel 8.63 km \Rightarrow gesucht: Lichtgeschwindigkeit $c = \frac{2\ell}{\Delta t}$

$$\text{mit } \omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta\theta}{\omega} \Rightarrow c = \frac{2\ell}{\Delta t} = \frac{2\ell}{\Delta\theta} \omega = \frac{2(8.63 \text{ km})}{(2\pi/720)} (2\pi) (25.2 \text{ s}^{-1}) = 3.13 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

Foucault'sche Methode mit Drehspiegel



Michelson'sche Methode mit einem achteckigen Drehspiegel



$$c = 299,792,458 \text{ m/s}$$

31-5

DEFINITION—SPEED OF LIGHT

\Leftrightarrow die heutige Festlegung der SI-Einheit Meter beruht auf diesen Wert: $1 \text{ m} = (1/299792458) \text{ s}$

31.5 Die Ausbreitung des Lichts (The propagation of light)

Die Ausbreitung von Licht wird durch die Wellengleichung beschrieben;
 ältere Modelle zur Ausbreitung: das Huygens'sche Prinzip, das Fermat'sche Prinzip

Das Huygens'sche Prinzip

Die Wellenfront ist der geometrische Ort aller Punkte mit gleicher Phase der Welle

Each point on a primary wavefront serves as the source of spherical secondary wavelets that advance with a speed and frequency equal to those of the primary wave. The primary wavefront at some later time is the envelope of these wavelets.

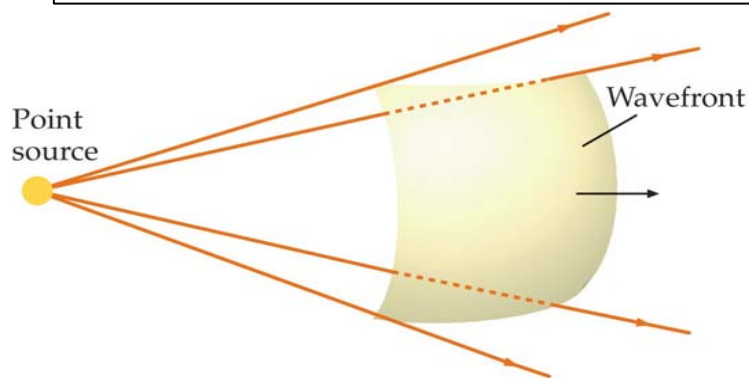
HUYGENS'S PRINCIPLE

Die Huygens'sche Konstruktion mit Hilfe der Elementarwellen für die Ausbreitung nach rechts

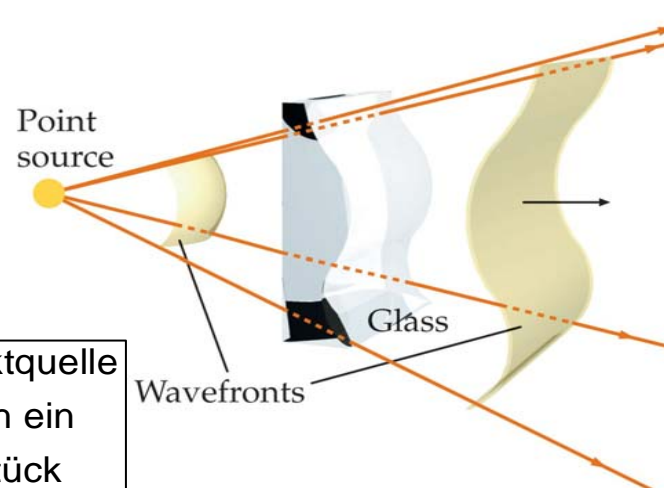
einer ebenen Welle

einer kugelförmigen Welle

Kugelförmige Wellenfront, die von einer Punktquelle ausgeht



Wellenfront, die von einer Punktquelle ausgeht, nach Durchgang durch ein unregelmäßig geformtes Glasstück



Das Fermat'sche Prinzip

The path taken by light traveling from one point to another is such that the time of travel is a minimum.[†]

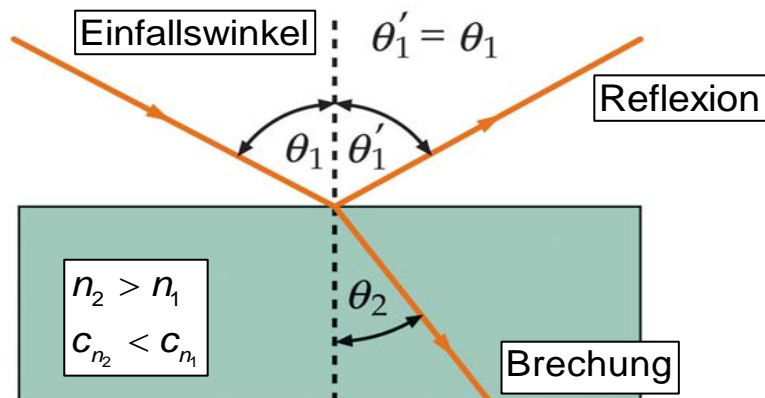
FERMAT'S PRINCIPLE

31.6 Reflexion und Brechung (Reflection and refractions)

Die Lichtgeschwindigkeit $c_n = v$ in einem durchsichtigem Medium (wie Luft, Wasser, Glas) ist geringer als die Lichtgeschwindigkeit c im Vakuum:

$$n = \frac{c}{v} \quad 31-7$$

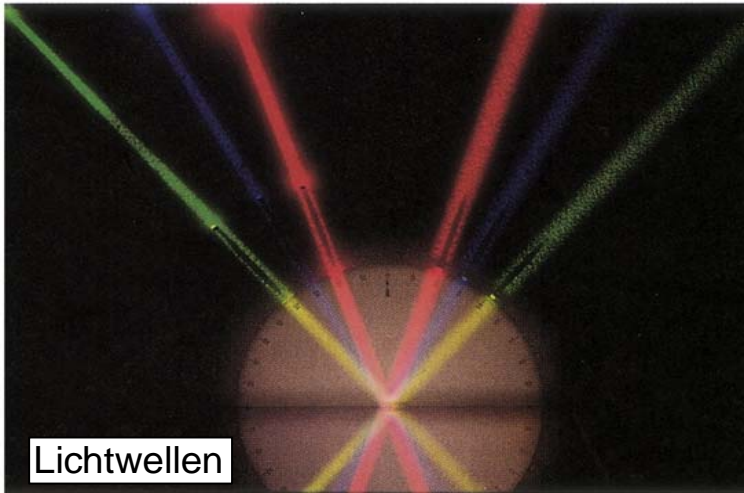
DEFINITION—INDEX OF REFRACTION



$$\theta'_1 = \theta_1 \quad 31-8$$

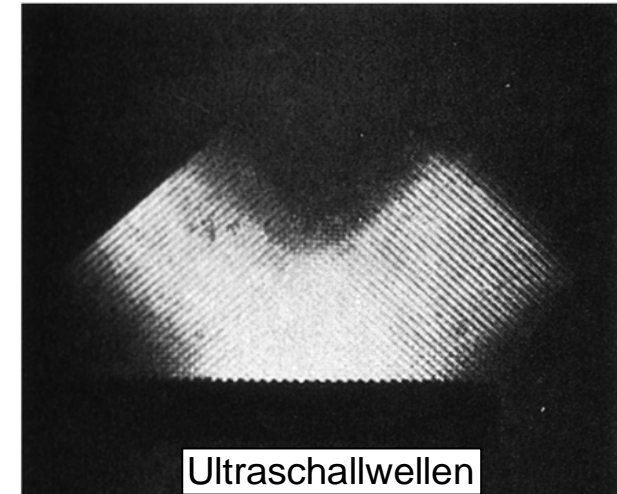
LAW OF REFLECTION

Der reflektierte Strahl liegt in der Einfallsebene

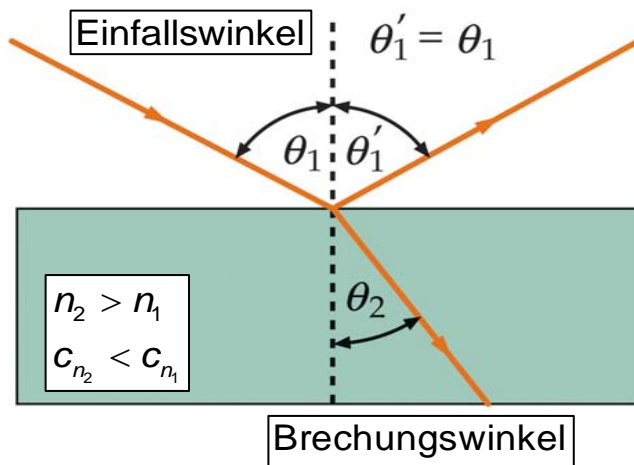


Lichtwellen

Das Reflexionsgesetz gilt
für alle Arten von Wellen



Ultraschallwellen



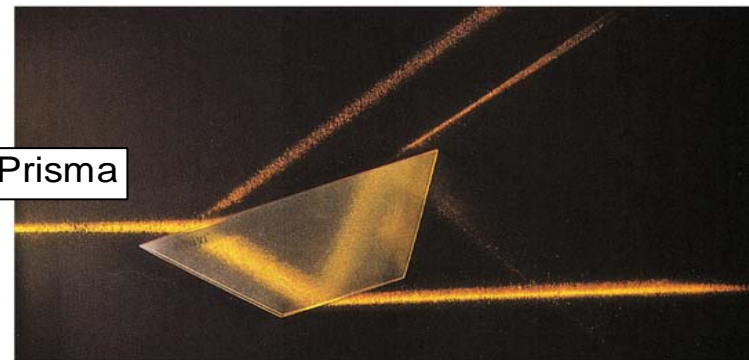
Der Brechungswinkel hängt vom Einfallswinkel θ_1 ab und vom Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten c_{n_2}/c_{n_1} in beiden Medien ab \Rightarrow
mit Gl. (31.7) $n = c/c_n \Rightarrow$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

31-9b

SNELL'S LAW OF REFRACTION

Reflexion und Brechung eines Lichtstrahls an einem Prisma

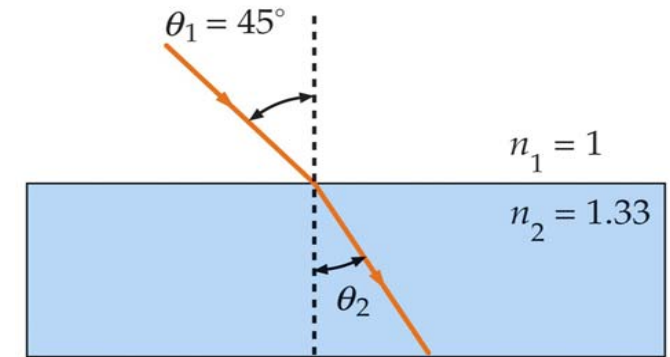


Beispiel 31.4: Brechung von Luft zu Wasser

Lichtstrahl tritt aus der Luft in Wasser, $n_2 = 1.33$, Einfallswinkel $\theta_1 = 45^\circ$; gesucht: Brechungswinkel $\theta_2 \Rightarrow$

aus Gl. (31.9b) $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow \sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \Rightarrow$

$$\theta_2 = \text{asin}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right) = \text{asin}\left(\frac{1}{1.33} \sin(45^\circ)\right) = \text{asin}(0.532) = 32.1^\circ$$



Physikalische Mechanismen bei Reflexion und Brechung

Die physikalischen Mechanismen zur Reflexion und Brechung kann man verstehen, wenn man die Absorption und Re-Emission von Licht durch die Atome im reflektierenden bzw. brechenden Medium betrachtet.

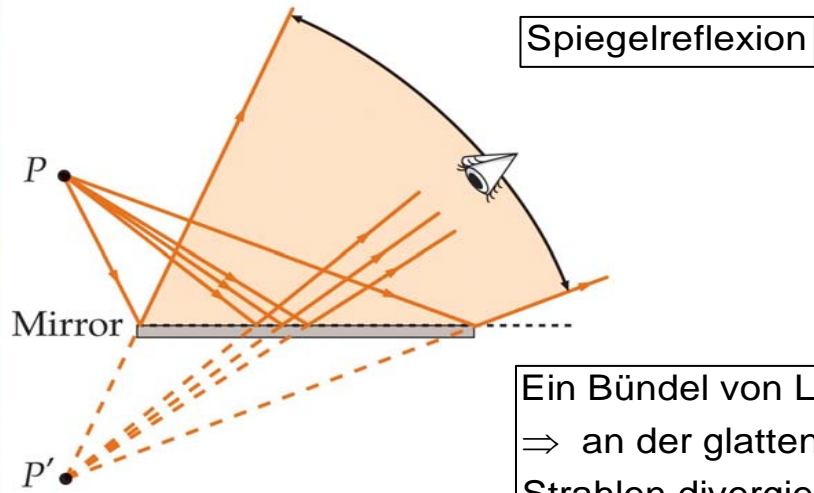
Licht aus der Luft (n_1) trifft auf eine Glasoberfläche (n_2) \Rightarrow von den Atomen an der Oberfläche absorbiert und mit gleicher Frequenz in allen Richtungen abgestrahlt \Rightarrow konstruktive Interferenz der dadurch entstehenden Wellen bei $\theta_1 = \theta_1'$.

Die in das Glas eintretende Welle entsteht durch Interferenz der einfallenden Welle und der phasenverzögerten Welle, die durch Absorption und Re-Emission von Licht durch die Atome in Glas erzeugt wird \Rightarrow ein Wellenberg der vom Medium durchgelassenen Welle tritt später auf als ein Wellenberg der einfallenden Welle \Rightarrow ein Wellenberg der durchgelassenen Welle bewegt sich in derselben Zeitspanne weniger weit als ein Wellenberg der einfallenden Welle

$$\Rightarrow c_{n_2} < c_{n_1} \Rightarrow n_2 > n_1 \Rightarrow \text{da } \nu_2 = \nu_1 \Rightarrow \text{mit } c = \lambda \nu \Rightarrow \frac{c_{n_2}}{\lambda_2} = \frac{c_{n_1}}{\lambda_1} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{\lambda_1}{c_{n_2}/c_{n_1}} = \frac{\lambda_1}{n}$$

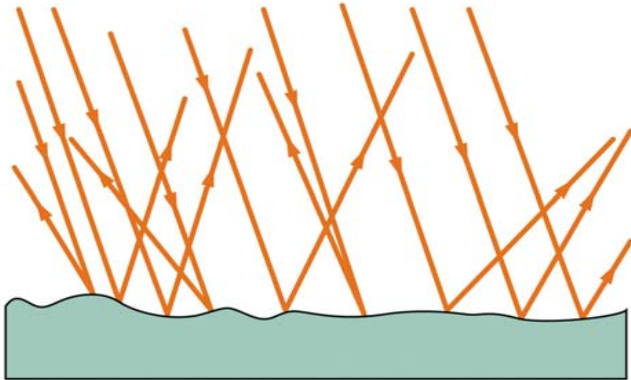
Spiegelreflexion und diffuse Reflexion

Spiegelung an einer glatten Oberfläche



Ein Bündel von Lichtstrahlen geht von der Punktquelle P aus
 \Rightarrow an der glatten Oberfläche reflektiert \Rightarrow die reflektierten Strahlen divergieren so, als ob sie von P' (Bildpunkt) kämen.

Diffuse Reflexion



Spectralon

Relative Intensität von reflektiertem und durchgelassenem Licht

Der Anteil der Lichtintensität, der an einer Grenzfläche reflektiert wird, hängt von mehreren Größen ab: Einfallswinkel, Polarisation (Orientierung des elektrischen Feldvektors der Welle), Brechzahl der beiden Medien.

Spezialfall senkrechter Lichteinfall ($\theta_1 = \theta_1' = 0$) \Rightarrow Intensität der reflektierten Welle: $I = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 I_0$

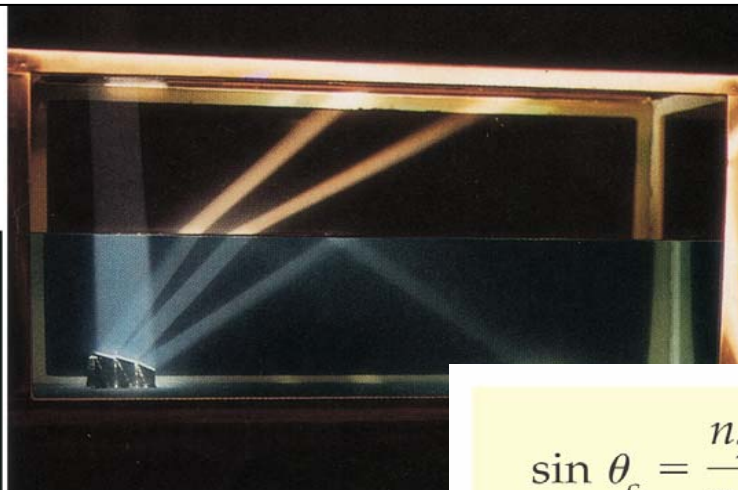
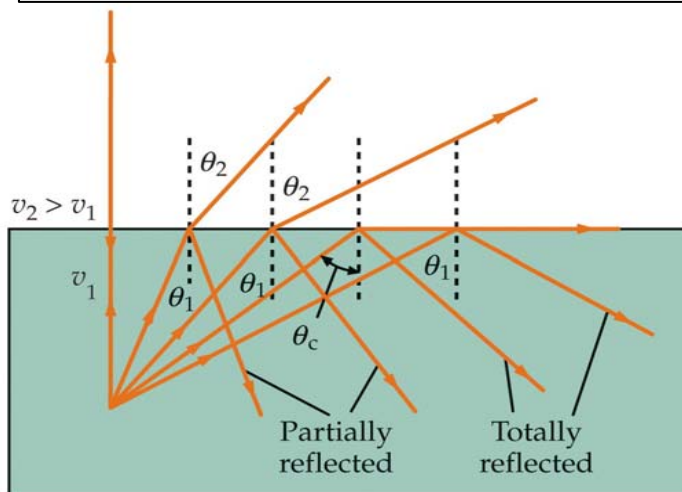
wobei I_0 einfallende Intensität \Rightarrow Luft-Glas-Grenzfläche $I/I_0 = 4\%$

Totalreflexion

Mit steigendem Einfallswinkel θ_1 nimmt der Brechungswinkel θ_2 zu, bis der kritische θ_k erreicht wird $\Rightarrow \theta_2 = 90^\circ$;

aus Gl. (31.9b) $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \Rightarrow n_1 \sin \theta_k = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow \sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1}$;

bei $\theta_1 > \theta_k$ tritt kein gebrochener Strahl im Medium mit $n_2 < n_1 \Leftrightarrow$ Totalreflexion



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1} \quad 31-12$$

CRITICAL ANGLE FOR TOTAL INTERNAL REFLECTION

Totalreflexion an einem Glasprisma, Brechzahl von Glas $n = 1.5 \Rightarrow \theta_k = 41.8^\circ$:

Licht tritt senkrecht auf eine Kathetenseite des Glasprismas auf \Rightarrow trifft unter $\theta_1 = 45^\circ$ auf die Hypotenusenfläche

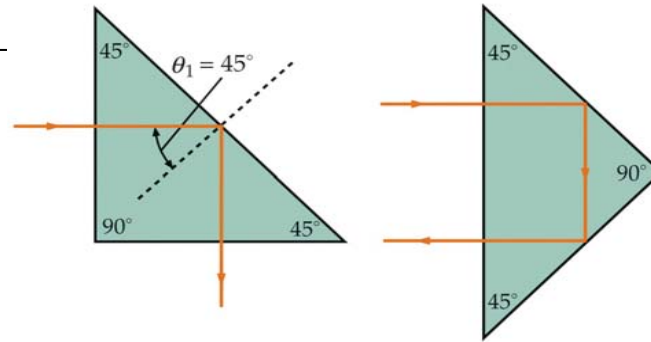
\Rightarrow Totalreflexion \Rightarrow Licht tritt durch die andere Kathetenseite wieder aus;

Licht tritt senkrecht auf die Hypotenusenenseite des Glasprismas auf \Rightarrow trifft unter $\theta_1 = 45^\circ$ an eine Kathetenseite

\Rightarrow Totalreflexion \Rightarrow trifft unter $\theta_1 = 45^\circ$ an die zweite Kathetenseite \Rightarrow Totalreflexion \Rightarrow Licht tritt durch die Hypotenusenenseite wieder aus

Anwendung:

Feldstecher, Retroreflektor,
Brillantschliff, Faseroptik

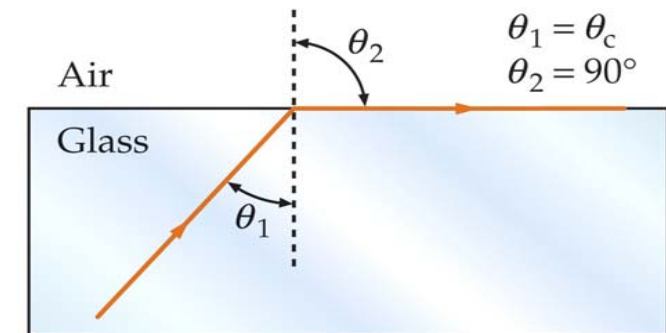


Beispiel 31.5: Totalreflexion

Gegeben: Glassorte mit $n_1 = 1.50$; gesucht: kritischer Winkel der Totalreflexion θ_k bei Austritt des Lichtes in Luft $n_2 = 1.00 \Rightarrow$

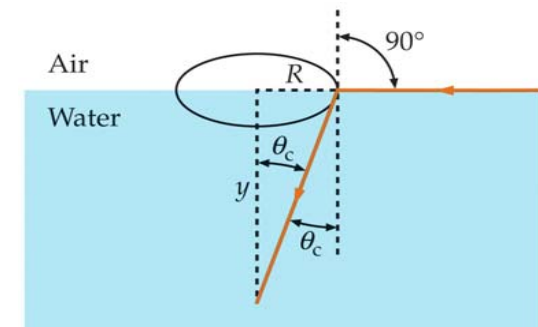
$$\text{aus Gl. (31.12) } \sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \theta_k = \frac{1.00}{1.50} = 0.667 \Rightarrow$$

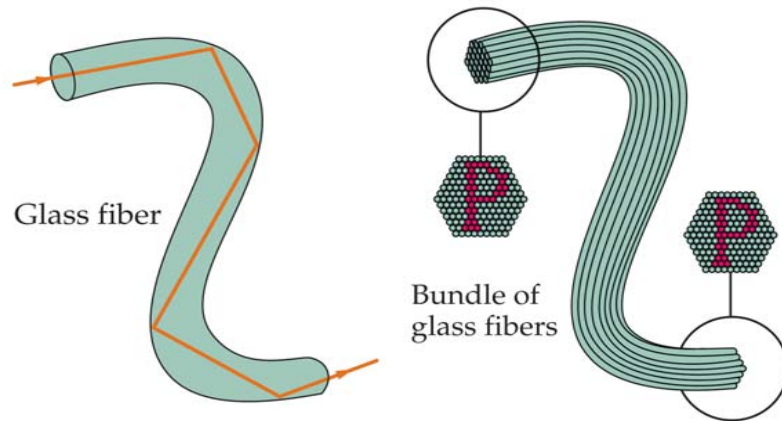
$$\theta_k = 41.8^\circ$$



Beispiel 31.6: Tauchtiefe und Gesichtskreis

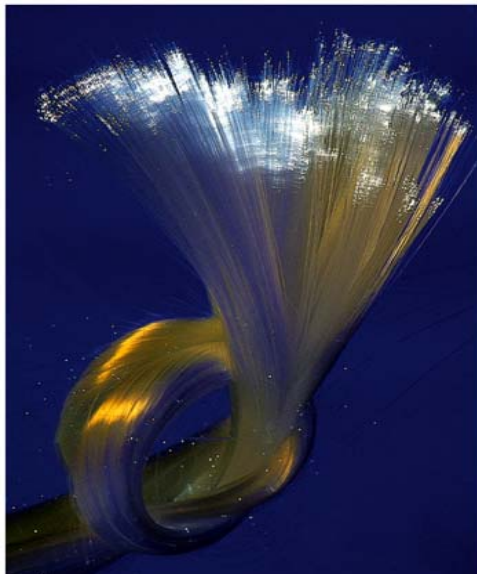
mögliches Prüfungsbeispiel



Faseroptik

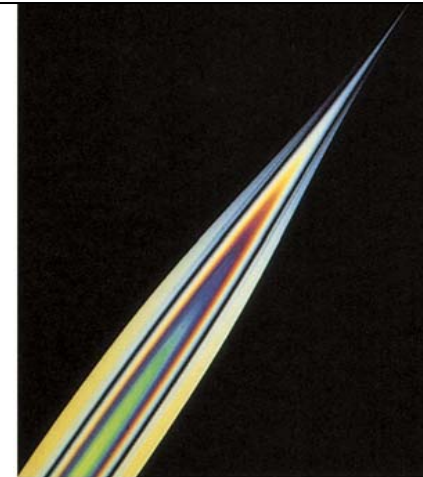
Anwendungen: Endoskope, Telekommunikation

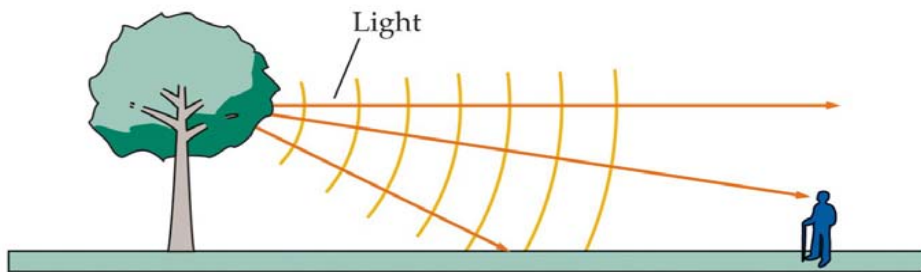
Glasfaser (Lichtleiter): In einer Faser trifft der Lichtstrahl gewöhnlich mit $\theta_1 > \theta_k$ auf die Wandung.
 Bündel von Glasfasern: Bild des Gegenstandes kann am anderen Ende des Faserbündels betrachtet werden.



Aus einem Glasfaserbündel austretendes Licht

Dünne Glasfaser: Die Brechzahl wird von innen nach außen etwas kleiner \Rightarrow bessere Führung des Lichtstrahls in der Faser

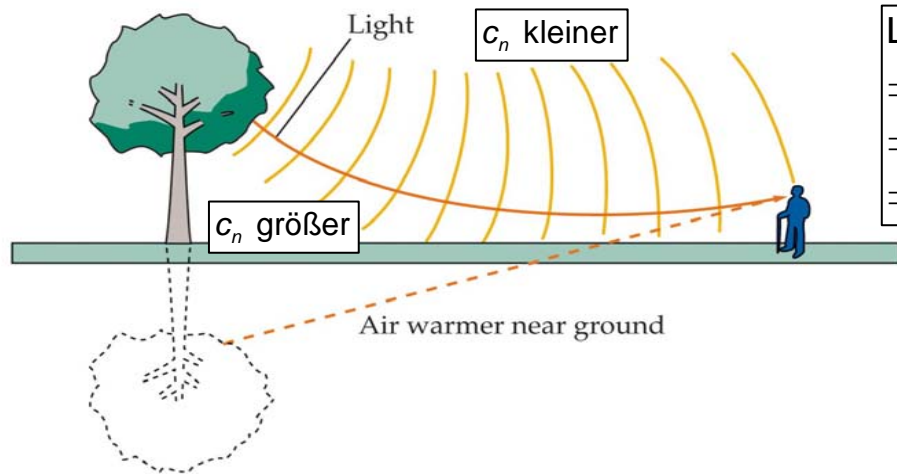


Luftspiegelung

Die Luft hat überall die gleiche Temperatur

⇒ Wellenfronten kugelförmig

⇒ Lichtstrahlen verlaufen geradlinig



Luft am Boden wärmer (geringere Dichte ⇒ c_n größer)

⇒ Wellenfronten nicht kugelförmig

⇒ das vom Baum ausgehende Licht wird gebrochen

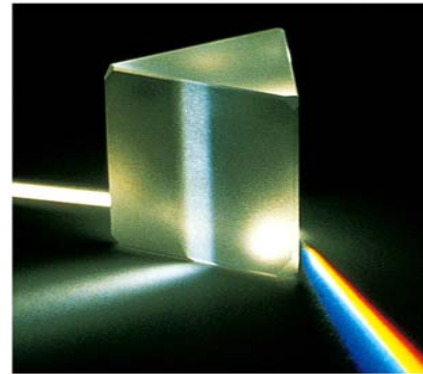
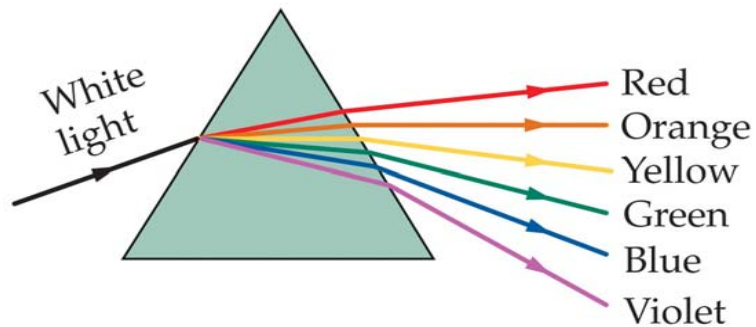
⇒ Luftspiegelung



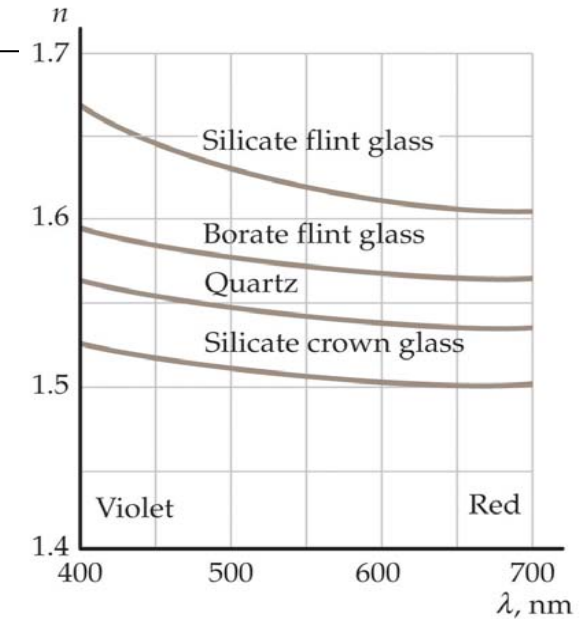
Luftspiegelung bei einer heißen Fahrbahn

Dispersion

Die Brechzahl einer Substanz ist von der Lichtwellenlänge abhängig (meistens abfallend mit steigender Wellenlänge) \Rightarrow Dispersion



Weißes Licht wird durch ein Glasprisma spektral zerlegt; die Brechzahl ist für größere Wellenlängen geringer \Rightarrow rotes Licht schwächer gebrochen als violettes Licht



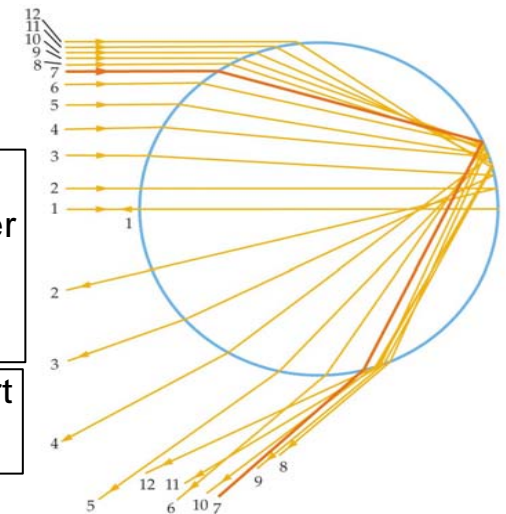
Swarowski

Der Regenbogen

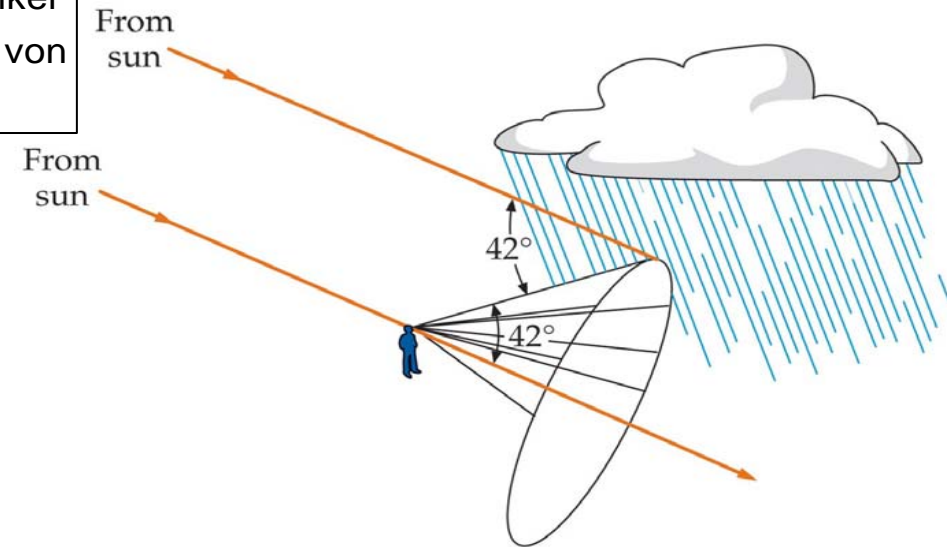
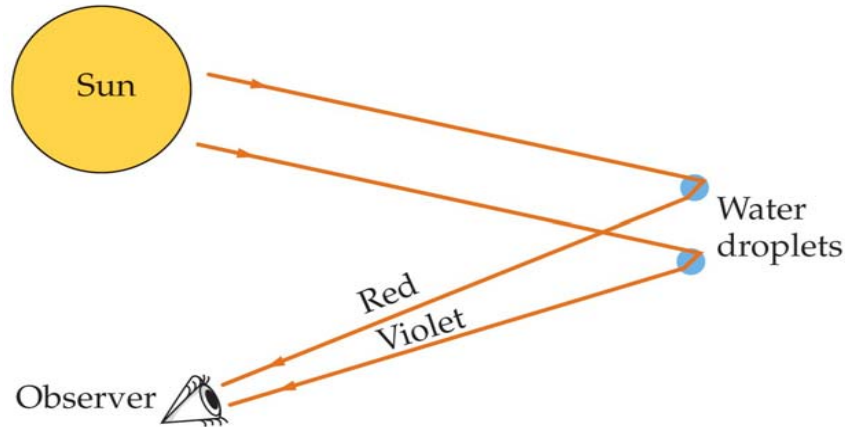
Regenbogen als Beispiel für Dispersion von Sonnenlicht durch Wassertropfchen

Descartes' Konstruktion zur Erklärung des Regenbogens: paralleles Sonnenlicht trifft auf kugelförmige Wassertropfen \Rightarrow die eintretenden Strahlen werden gebrochen \Rightarrow an der rückwertigen Wasser-Luft-Grenzfläche werden die Strahlen reflektiert \Rightarrow an der vorderen Grenzfläche werden die Strahlen erneut gebrochen

Die Häufung der Strahlen um den maximalen Austrittswinkel (Strahl 7) führt letztendlich zum Regenbogen

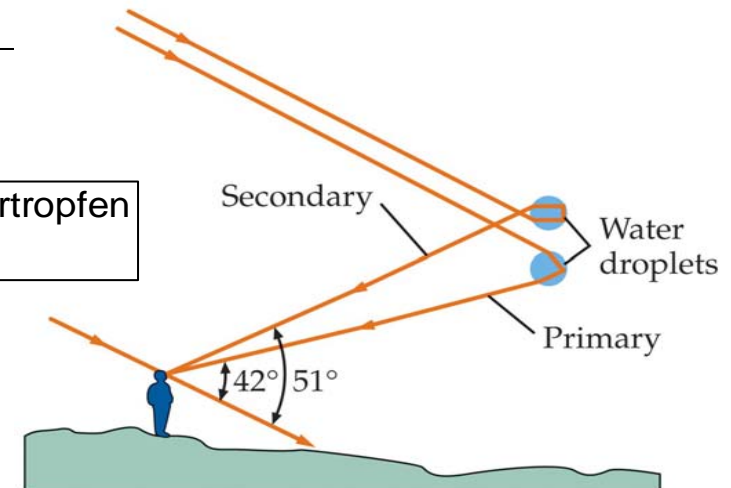


Ein Regenbogen erscheint unter einem Beobachtungswinkel von 42° gegen die Richtung des Sonnenlichts (das dabei von hinten kommt)



Der gesamte Regenbogen setzt sich aus Lichtstrahlen zusammen, die in sehr vielen Wassertröpfchen gebrochen und reflektiert werden. Die Auftrennung der Farben erfolgt durch die Dispersion im Wasser \Rightarrow der Beobachtungswinkel des Regenbogens ändert sich geringfügig mit der Wellenlänge \Rightarrow $n_{\text{rot}} < n_{\text{violett}}$ \Rightarrow roter Streifen des Regenbogens bei etwas größerem Beobachtungswinkel als der blaue Streifen.

Der sekundäre Bogen entsteht durch Lichtstrahlen, die in den Wassertropfen zweimal reflektiert werden



Berechnung des Beobachtungswinkel beim Regenbogen

Lichtstrahl im Punkt A: mit Gl. (31.9b) $n_{\text{Luft}} \sin \theta_1 = n_{\text{Wasser}} \sin \theta_2$;

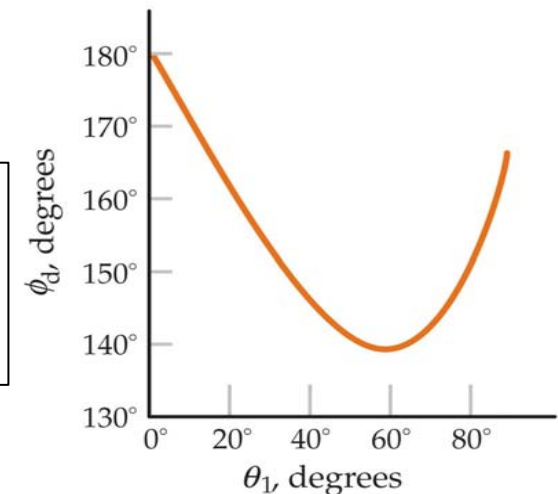
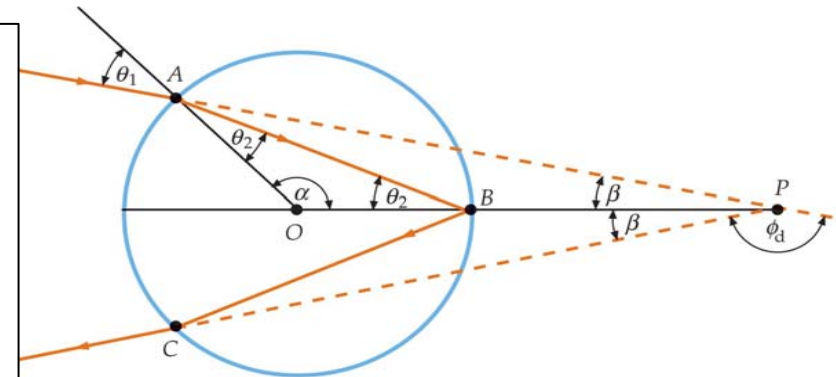
Punkt P: Schnittpunkt der Verlängerungen des einfallenden und des letztlich austretenden Strahles $\Rightarrow \Phi_d$ Ablenkwinkel des Strahls \Rightarrow es gilt $\Phi_d + 2\beta = \pi$, es gilt für Dreieck AOC: $2\theta_2 + \alpha = \pi$, es gilt für Dreieck AOP: $\theta_1 + \alpha + \beta = \pi \Rightarrow \beta = \pi - \theta_1 - \alpha \Rightarrow \alpha$ wird eliminiert $\Rightarrow \beta = \pi - \theta_1 - (\pi - 2\theta_2) = 2\theta_2 - \theta_1 \Rightarrow$ eingesetzt in $\Phi_d + 2\beta = \pi \Rightarrow \Phi_d = \pi - 2\beta = \pi - 4\theta_2 + 2\theta_1 \Rightarrow$ mit Brechungsgesetz \Rightarrow

$$\theta_2 = a \sin \left(\frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{Wasser}}} \sin \theta_1 \right) \Rightarrow \Phi_d = \pi - 4a \sin \left(\frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{Wasser}}} \sin \theta_1 \right) + 2\theta_1 \Rightarrow$$

Ablenkwinkel Φ_d in Abhängigkeit vom Einfallswinkel $\theta_1 \Rightarrow$

Minimum bei $\frac{d\Phi_d}{d\theta_1} = 0 \Rightarrow \theta_1 = 60^\circ \Rightarrow \Phi_d = 138^\circ \Rightarrow$

aus $\Phi_d + 2\beta_{\text{max}} = \pi \Rightarrow 2\beta_{\text{max}} = \pi - \Phi_d = 42^\circ$



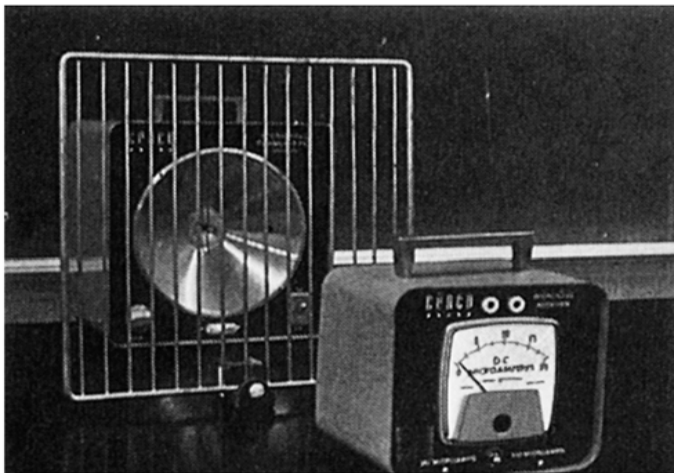
Lichtbrechung durch hexagonale Eiskristalle \Rightarrow 22°-Halo falls die Kristalle regellos verteilt sind; Nebensonnen falls die Grundfläche der Kristalle in etwa waagrecht liegt



31.7 Polarisation (Polarisation)

Bei einer transversalen mechanischen Welle steht die Schwingungsrichtung senkrecht auf die Ausbreitungsrichtung der Welle \Rightarrow wenn die Auslenkungen der Schwingung stets parallel zu einer einzigen Ebene verlaufen, dann nennt man die Welle polarisiert \Rightarrow eine linear polarisierte elektromagnetische Welle liegt vor, wenn \vec{E} stets parallel zu einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingt.

Die von den meisten Lichtquellen erzeugten Wellen sind unpolarisiert.



Versuch zur Polarisation von Mikrowellen: Elektrischer Feldvektor \vec{E} verläuft vertikal, parallel zur Dipolantenne:
 \Rightarrow wenn Metalldrähte des Absorbers vertikal stehen \Rightarrow Ströme induziert \Rightarrow Mikrowelle bzw. dessen Energie absorbiert \Rightarrow kein Ausschlag am Detektor;
 \Rightarrow wenn Metalldrähte des Absorbers horizontal stehen \Rightarrow keine Ströme induziert \Rightarrow Mikrowelle bzw. dessen Energie wird nicht absorbiert \Rightarrow Ausschlag am Detektor.

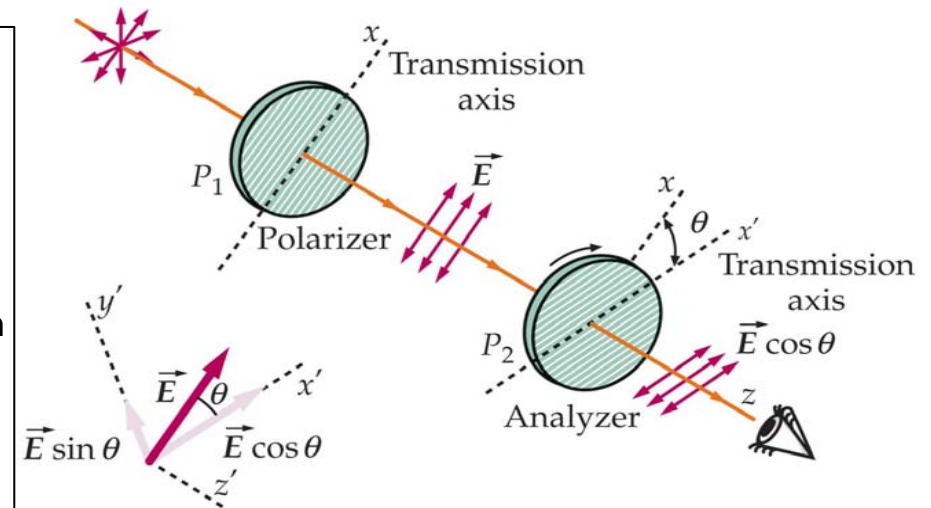
Aus unpolarisierte elektromagnetische Wellen können polarisierte magnetische Wellen durch vier Effekte erzeugt werden: Absorption, Reflexion, Streuung, Doppelbrechung

Polarisation durch Absorption

Mehrere Materialien haben die Eigenschaft, daß Licht auf unterschiedlicher Weise transmittiert oder absorbiert wird, je nach dessen Polarisation:

Unpolarisierter Lichtstrahl mit Intensität I_0 fällt auf eine Polarisationsfolie mit Transmissionsachse \parallel x-Achse \Rightarrow Folie lässt polarisiertes Licht mit Intensität I_1 und mit elektrischen Feldvektor $\vec{E}_1 \parallel$ Transmissionsachse durch \Rightarrow das polarisierte Licht gelangt auf die zweite Polarisationsfolie mit Transmissionsachse mit Winkel θ bezogen auf x-Achse \Rightarrow nur die Feldkomponente $E_1 \cos \theta$ durchgelassen \Rightarrow Intensität des durchgelassenen Lichtes $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$.

Unpolarisiertes Licht mit Intensität $I_0 \Rightarrow$ Richtung von \vec{E} zeitlich und räumlich völlig regellos \Rightarrow im Mittel beträgt der Winkel zwischen Transmissionsachse und \vec{E} $45^\circ \Rightarrow$ Intensität des vom Polarisator durchgelassenen Strahls $I_1 = I_0 \cos^2 45^\circ = I_0/2$



$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

31-20

LAW OF MALUS

Flüssigkristall-Display: das Flüssigkristall befindet sich zwischen gekreuzte Polarisatoren;



gekreuzte Polarisatoren

Polaroid

ohne Spannung am Kristall wird die Polarisationssebene vom Kristall um 90° gedreht \Rightarrow gleichmäßiger Hintergrund;



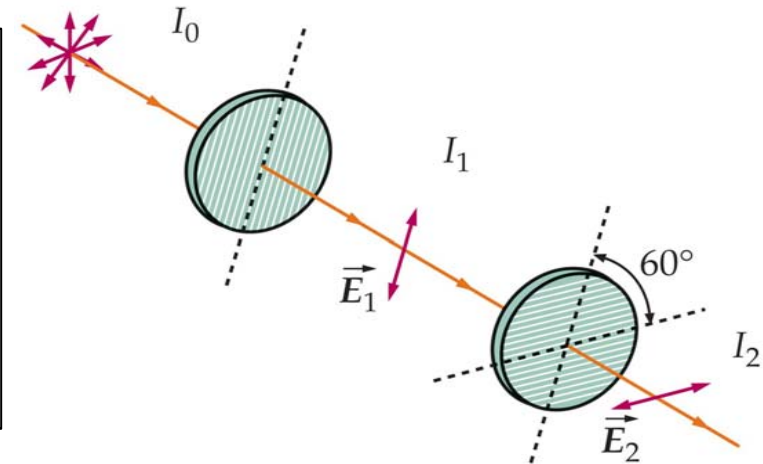
mit Spannung am Kristall wird die Polarisationssebene vom Kristall nicht gedreht \Rightarrow das Licht wird nicht durchgelassen \Rightarrow schwarz.

Beispiel 31.7: Analysator und Polarisator

Unpolarisiertes Licht fällt mit Intensität $I_0 = 3.0 \text{ W m}^{-2}$ auf Polarisationsfolie (Polarisator); die Transmissionsachse der zweiten Folie (Analysator) steht $\theta = 60^\circ$ zur Achse des Polarisators \Rightarrow gesucht: Intensität des vom Analysator durchgelassenen Lichts:

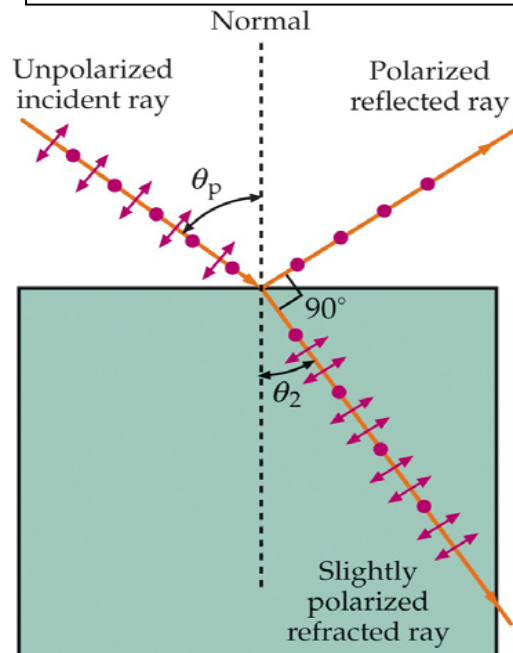
Mit $I_1 = I_0/2$ und $I_2 = I_1 \cos^2 \theta \Rightarrow$

$$I_2 = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta = \frac{(3.0 \text{ W m}^{-2})}{2} \cos^2 60^\circ = 0.375 \text{ W m}^{-2}$$



Polarisation durch Reflexion

Wenn unpolarisiertes Licht an einer ebenen Grenzfläche zwischen zwei durchsichtigen Medien reflektiert wird, dann ist das reflektierte Licht teilweise polarisiert. Ausmaß der Polarisation abhängig vom Einfallswinkel und vom Verhältnis der Wellenschwindigkeiten in den beiden Medien ab.



Beim Polarisationswinkel θ_p ist das reflektierte Licht sogar vollständig linear polarisiert mit dem elektrischen Feldvektor senkrecht auf der Einfallsebene, wobei reflektierter und gebrochener Strahl senkrecht aufeinander stehen:

aus $n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2$ mit $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \Rightarrow$

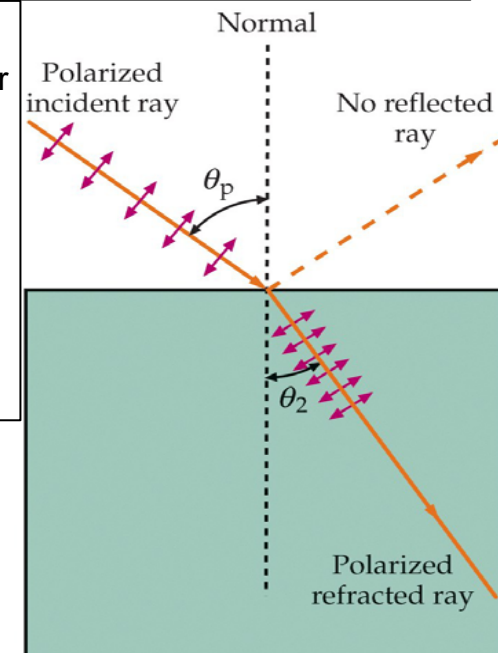
$\theta_2 = 90^\circ - \theta_p \Rightarrow n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin(90^\circ - \theta_p) = n_2 \cos \theta_p \Rightarrow$

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\tan \theta_p = \frac{n_2}{n_1}$$

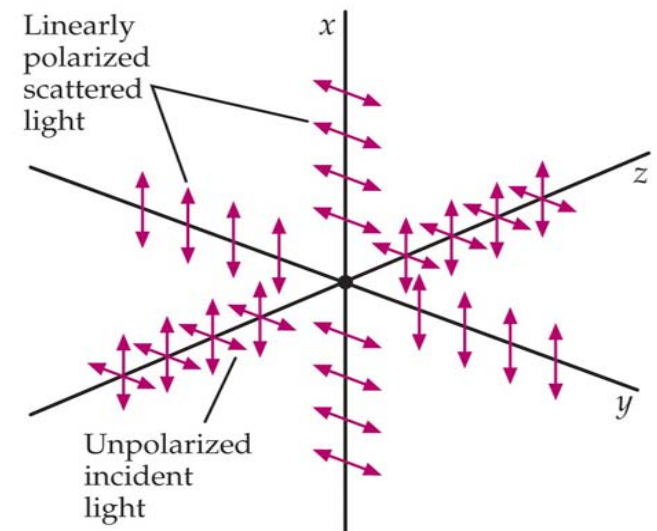
31-21

POLARIZING ANGLE



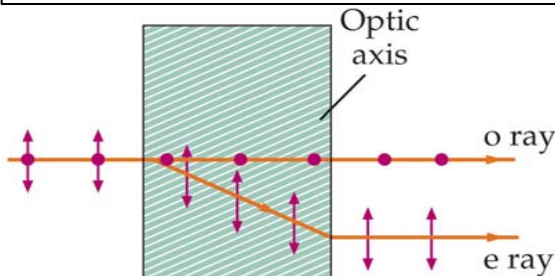
Polarisation durch Streuung

Das Phänomen der Absorption und Wiederabstrahlung wird als Streuung bezeichnet. Die Polarisation durch Streuung kann verstanden werden, wenn das streuende Molekül als elektrische Dipolantenne aufgefasst wird. Unpolarisiertes Licht breitet sich in z-Richtung aus und trifft im Koordinatenursprung auf ein Molekül als Streuzentrum \Rightarrow in der $z = 0$ -Ebene werden im Molekül Ladungsschwingungen induziert \Rightarrow Schwingungen in x-Richtung strahlen nicht in x-Richtung, bzw. Schwingungen in y-Richtung strahlen nicht in y-Richtung \Rightarrow das senkrecht zum einfallenden Strahl gestreute Licht ist so polarisiert, daß sein elektrisches Feld sowohl auf dem einfallenden Strahl als auch auf der Ausbreitungsrichtung des gestreuten Lichts senkrecht steht.



Polarisation durch Doppelbrechung

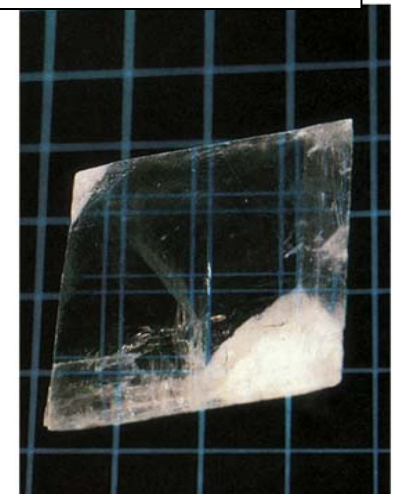
Die meisten durchsichtigen Materialien sind isotrop \Leftrightarrow die Lichtgeschwindigkeit ist in ihnen in jeder Richtung gleich groß; doppelbrechende Materialien sind aufgrund ihrer Gitterstruktur anisotrop \Leftrightarrow die Lichtgeschwindigkeit in ihnen hängt von der Polarisationssebene und von der Ausbreitungsrichtung des Lichts ab.

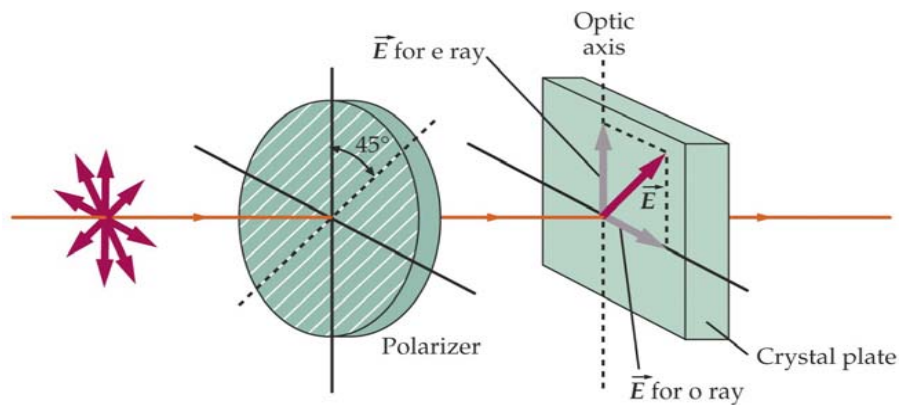


Ein Lichtstrahl tritt in einem doppelbrechenden Kristall \Rightarrow der Lichtstrahl wird in zwei Strahlen aufgespalten: in den ordentlichen Strahl (o-Strahl) und den außerordentlichen Strahl (e-Strahl, oder ao-Strahl), wobei deren Polarisationssebenen senkrecht aufeinander stehen.

Optische Achse: Richtung in einem doppelbrechenden Material, in der ordentlicher und außerordentlicher Strahl dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit haben.

Je nach relativer Orientierung des Materialstücks und des einfallenden Lichtstrahls können der ordentliche und der außerordentliche Strahl verschiedene Richtungen haben.



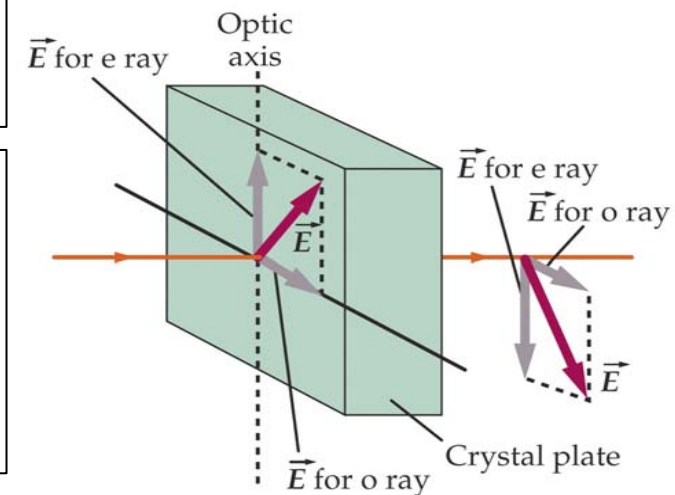


Licht trifft senkrecht auf die Oberfläche einer Platte aus doppelbrechendem Material und senkrecht zur optischen Achse \Rightarrow ordentlicher und außerordentlicher Strahl haben dieselbe Richtung, aber unterschiedliche Geschwindigkeit \Rightarrow ihre Wellenlängen ($\lambda = c_n/n$) sind unterschiedlich \Rightarrow die Strahlen treten mit einer Phasendifferenz aus der Platte, die von der Schichtdicke und von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängt \Rightarrow

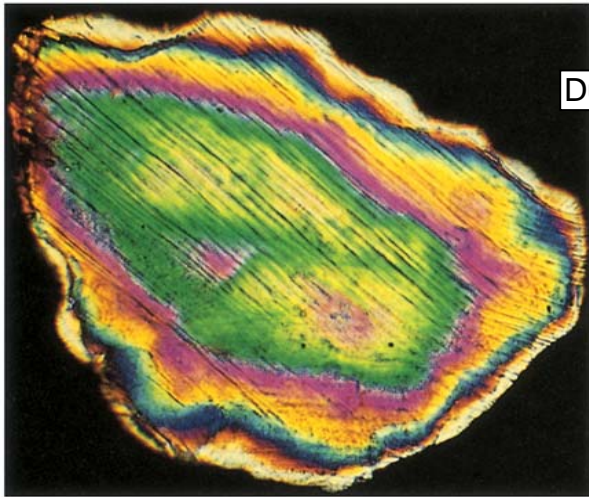
$\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen: Phasendifferenz 90° , $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen: Phasendifferenz 180°

Linear polarisiertes Licht gelangt auf ein $\frac{\lambda}{4}$ -Plättchen mit optischer Achse in 45° zur Polarisationsrichtung \Rightarrow zu Beginn ordentlicher und außerordentlicher Strahl in Phase und mit gleicher Amplitude \Rightarrow nach Durchlaufen der Platte Phasendifferenz von $90^\circ \Rightarrow E_x = E_0 \sin \omega t$ und $E_y = E_0 \sin(\omega t + 90^\circ) = E_0 \cos \omega t \Rightarrow$ das elektrische Feldvektor rotiert auf einem Kreis \Leftrightarrow die Welle ist zirkular polarisiert

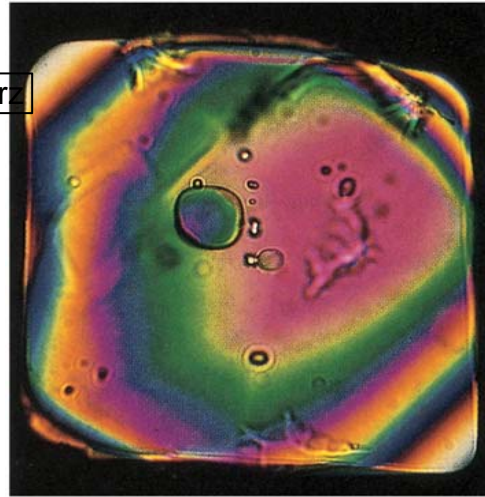
Linear polarisiertes Licht gelangt auf ein $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen mit optischer Achse in 45° zur Polarisationsrichtung \Rightarrow nach Durchlaufen der Platte Phasendifferenz von $180^\circ \Rightarrow E_x = E_0 \sin \omega t$ und $E_y = E_0 \sin(\omega t + 180^\circ) = -E_0 \sin \omega t \Rightarrow$ die Polarisationsrichtung der Welle ist um 90° gegen die des einfallenden Lichts gedreht, die Welle ist linear polarisiert.



Doppelbrechende Materialien zwischen gekreuzten Polarisatoren



Dünnschliffe aus Quarz



Dünnschliff eines Eiskerns aus dem antarktischen Eisfeld



Spannungsmuster an einem Modell des Mittelschiffs der Kathedrale von Chartres

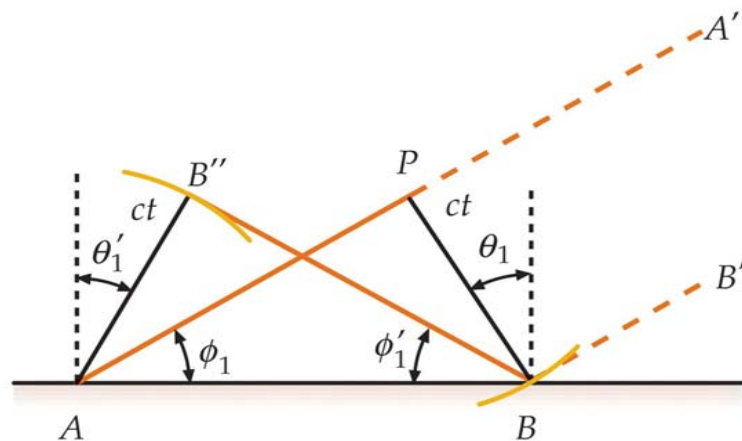
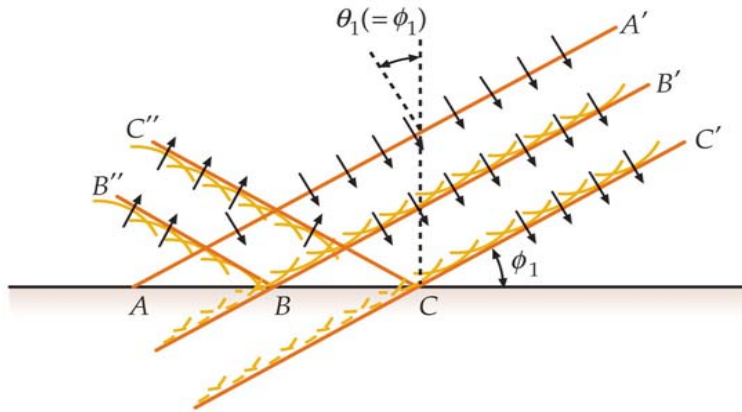


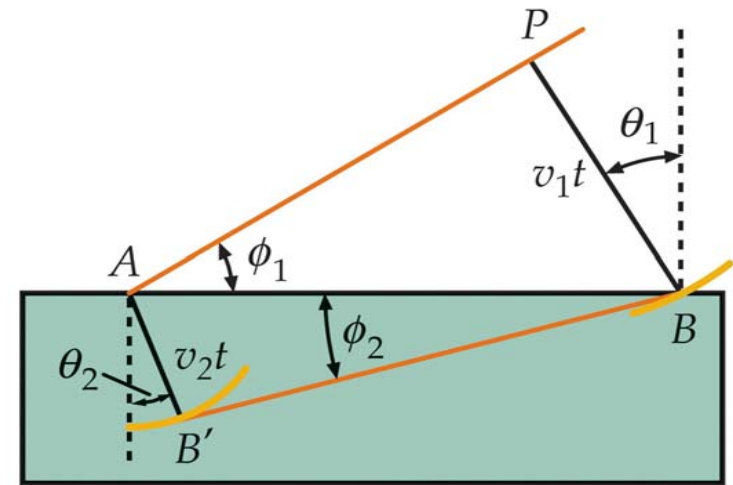
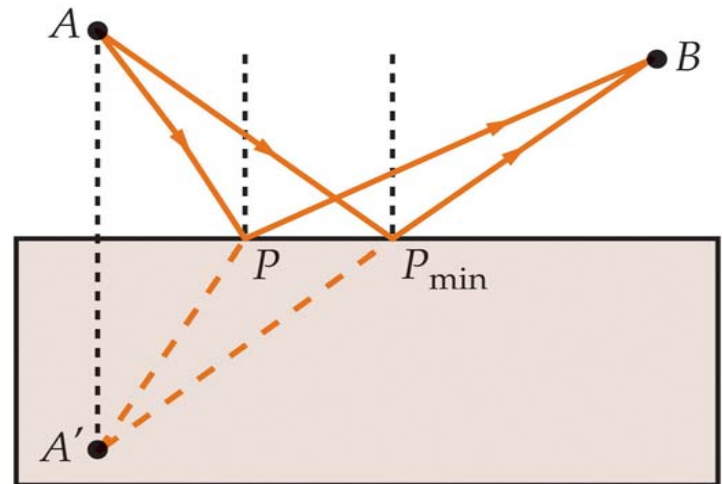
31.8 Ableitung des Reflexions- und des Brechungsgesetzes (Derivation of the laws of reflection and refractions)

Huygens'sches Prinzip

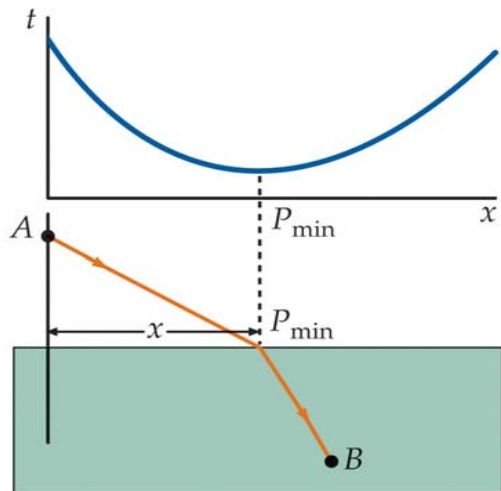
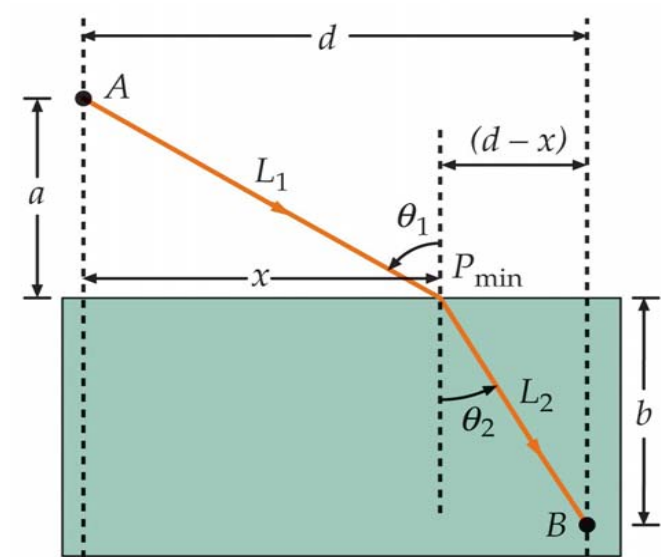
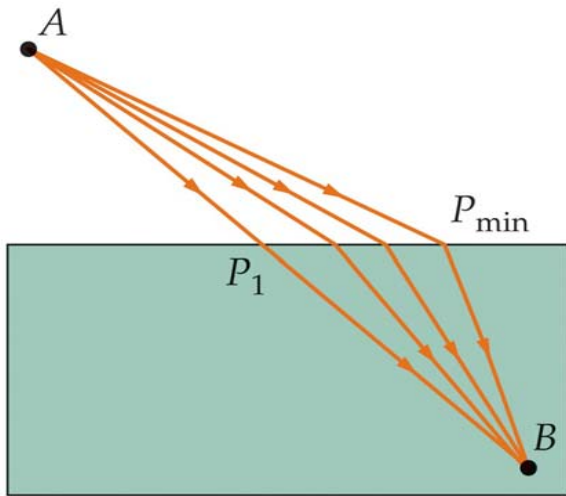
Reflexion

Ebene Welle trifft im Punkt A auf einen Spiegel $\Rightarrow \theta_1 = \phi_1 \Rightarrow$ Anwendung des Huygens'schen Prinzips



Brechung**Fermat'sches Prinzip****Reflexion**

Brechung



Alonso-Finn

31. Strahlungsübergänge

31.1 Einführung

31.2 Stationäre Zustände

31.3 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

31.4 Atomspektren

31.5 Molekülspektren

31.6 Strahlungsübergänge in Festkörper

31.7 Spontane und stimulierte Strahlungsübergänge

31.8 Maser und Laser

31.9 Schwarzkörperstrahlung