

Beleuchtung



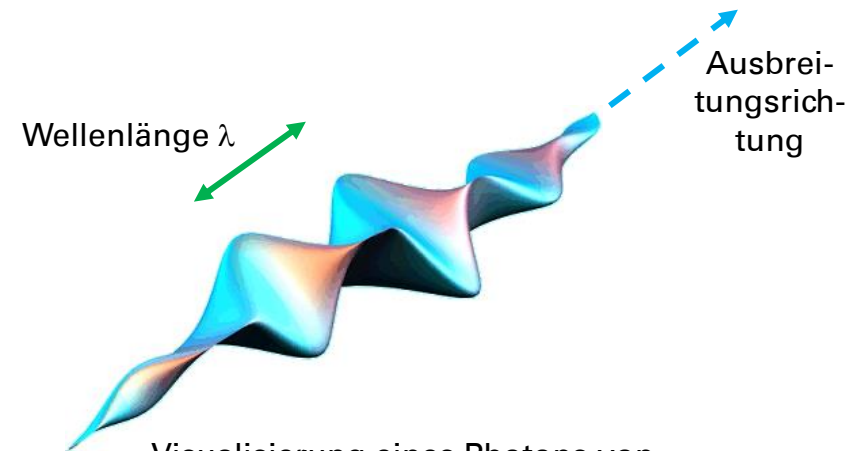


Inhalt

- Licht
 - Eigenschaften
 - Repräsentation
 - Lichtquellen
- Beleuchtungsmodelle
 - lokal
 - BRDF
 - diffus
 - spekulär
 - ambient
 - global

Was ist Licht?

- Eine elektromagnetische Welle im Wellenlängenbereich $\lambda \in [390, 700]nm$ gequantelt in Photonen.
- Photonen fliegen im Vakuum entlang von geraden Bahnen mit Lichtgeschwindigkeit
- Photonen beeinflussen sich nicht gegenseitig (keine Teilchenkollisionen)
- wichtige Eigenschaften:
 - Wellenlänge / Frequenz / Energie (definiert Farbe)
 - Polarisation (linear / zirkular)



Visualisierung eines Photons von
<http://superstruny.aspweb.cz/images/fyzika/foton.gif>

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s} = 1.079.252.848 \frac{km}{h}$$

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = \nu \lambda$$

Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit Frequenz und Wellenlänge

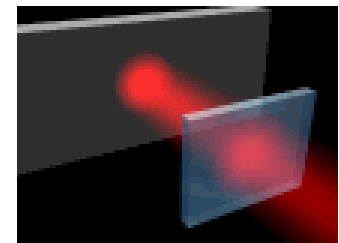
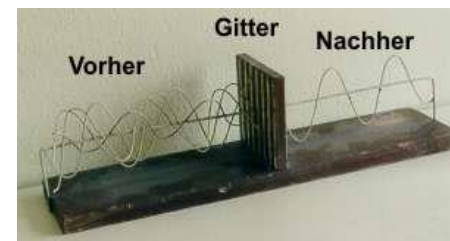


Illustration linearer Polarisation ©www.leifiphysik.de

Licht

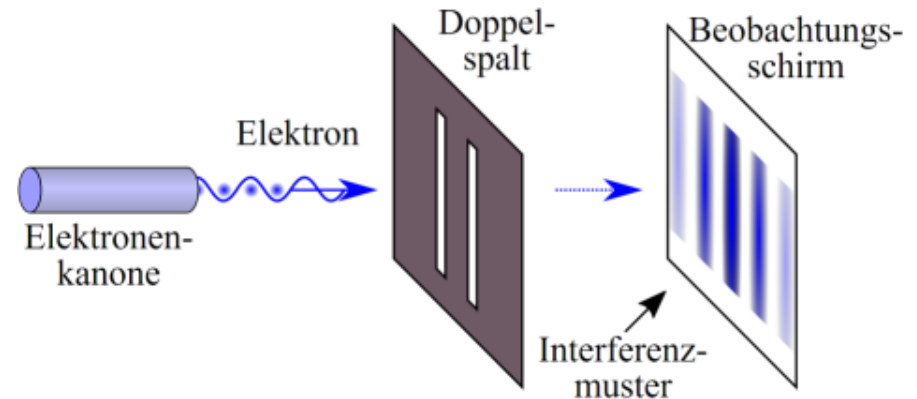
Welle-Teilchen-Dualismus



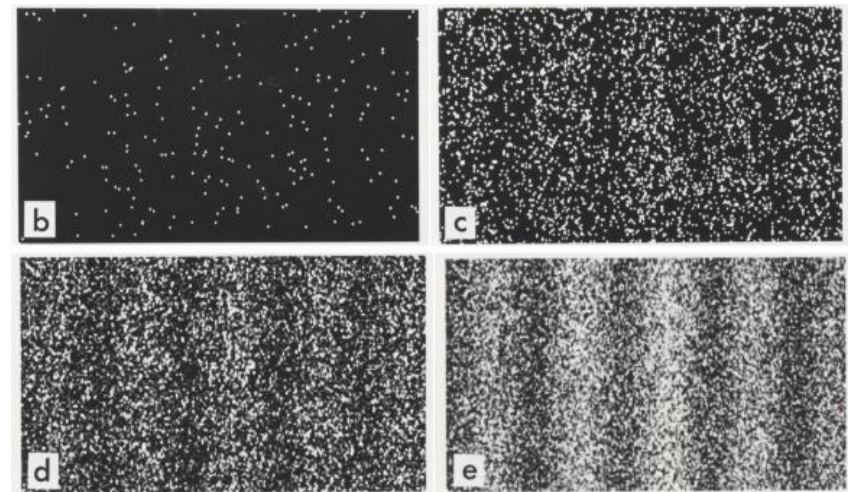
- Die Bahnen der Photonen variieren stochastisch
- Die Amplitude der Welle definiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung

Beispiel Doppelspaltexperiment:

- Teilchenquelle emittiert einzelne Teilchen, die durch zwei Spalte können
- Auf dem Schirm trifft jedes Teilchen an einer Stelle ein
- Über die Zeit ergibt sich ein Interferenzmuster, das aus der Welleneigenschaft abgeleitet werden kann



Aufbau Doppelspaltexperiment für Elektronen
Selber Aufbau für Photonen © Wikipedia



Messung der Teilchen auf Beobachtungsschirm



- Licht kann man messen, indem man Photonen zählt
- Jedes Photon trägt die Energie
 $E_\nu = h \cdot \nu$ mit $h = 6.626 \cdot 10^{-34} Js$
- Im sichtbaren Bereich ist
 $\nu \in [430, 770] THz$ und $E_\nu \in [2.8, 5.1] \cdot 10^{-19} J$
- Für eine Menge von n Photonen unterschiedlicher Frequenzen ν_i ergibt sich die Gesamtenergie zu

$$E = \sum_{i=1}^n h \cdot \nu_i$$

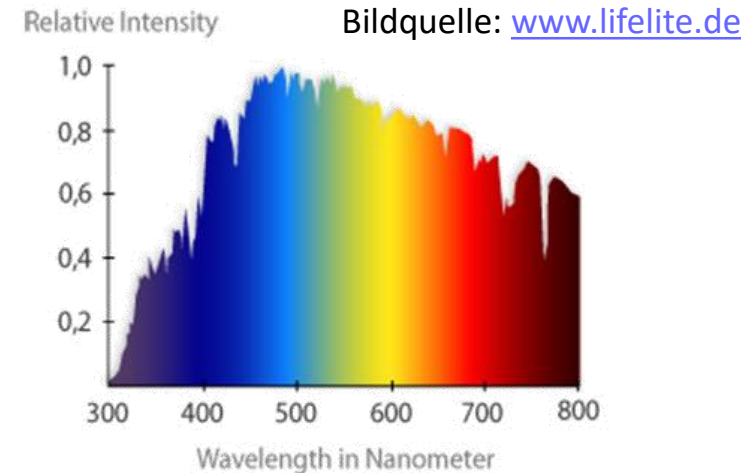
- Misst man die Energie pro Zeit ergibt sich die Lichtleistung in Watt
- Die Sonne bestrahlt die Erde im Schnitt mit 160 Watt/m² (zur Mittagszeit bis zu 1000 Watt/m²)

Licht

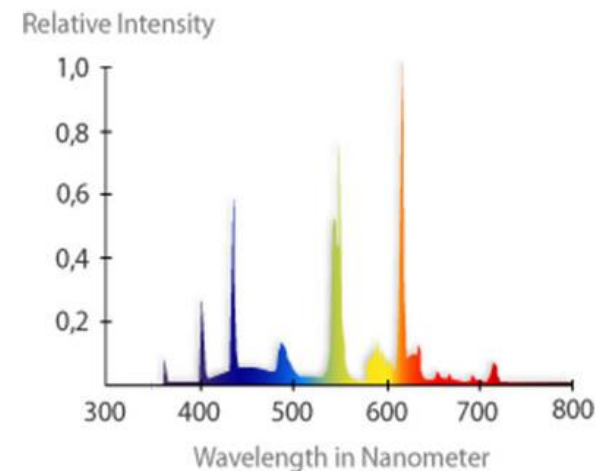
Leistungsspektrum



- Ein Laser produziert Licht, das aus Photonen fast derselben Wellenlänge zusammengesetzt ist.
- Bei den meisten anderen Lichtquellen ist das Licht aus verschiedenfarbigen Photonen zusammengesetzt.
- Das Licht einer Lichtquelle kann über das Leistungsspektrum charakterisiert werden. Dazu werden meist die Leistungswerte so normiert, dass der Maximalwert 1,0 ist.



Sonnenlicht über Deutschland – Juli 2005
5850° Kelvin – Ra 99



Gewöhnliche Leuchtstoffröhre
4200° Kelvin – Ra 83

Licht

Einfluss auf Farbe von Objekten



- Die Farben von Gegenständen sind relativ zur Beleuchtung.
- Wenn zum Beispiel ein Gegenstand mit einer roten Lichtquelle beleuchtet wird, so kann er auch nur rotes Licht reflektieren.
- Für die Messung von Farben gibt es deshalb standardisierte Lichtquellen mit fest vorgegebenem Leistungsspektrum

© http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/objects_under_different_lights/illuminants.jpg



ph-ulm



sol-3500



sol-3500+3202



sol-4100



sol-4100+3202



sol-4700



sol-4700+3202



syl-50MR16Q



syl-50MR16Q+3202



syl-cwf

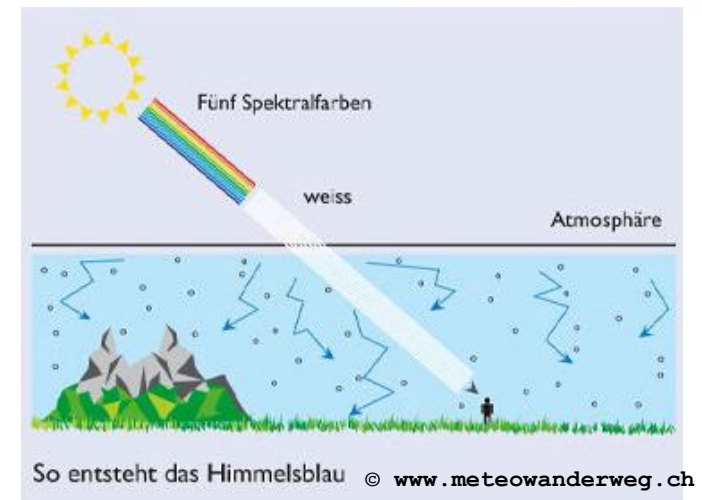
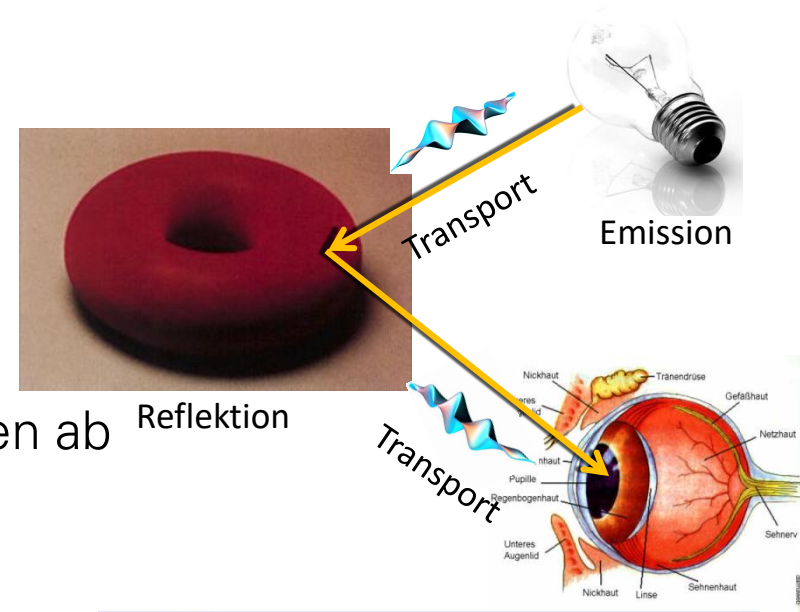


syl-wwf

The cruncheritos
object as seen under all 11
test illuminants.

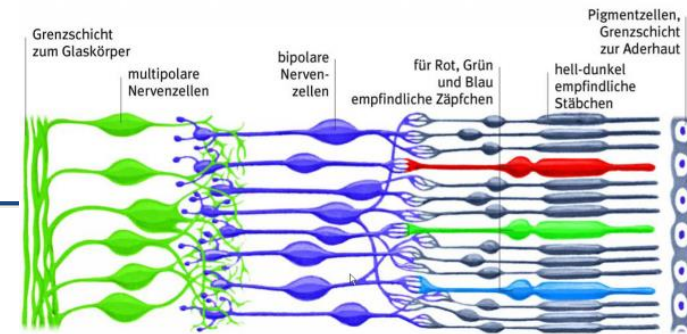
Prozesse der Lichtausbreitung

- Emission ... eine Lichtquelle wandelt z.B. elektrische Energie in Licht um
- Transport ... im Vakuum bewegen sich Photonen auf geraden Bahnen
- Streuung ... in transparenten Medien (z.B. Gase) prallen Photonen an Atomen ab
- Reflektion ... an Oberflächen werden Photonen reflektiert
- Refraktion ... transparente Oberflächen (z.B. Glas) lassen Photonen durch
- Absorption ... in transparenten Medien und an Oberflächen werden Photonen absorbiert
- Detektion ... im Auge oder Bildsensor werden Photonen absorbiert und gezählt



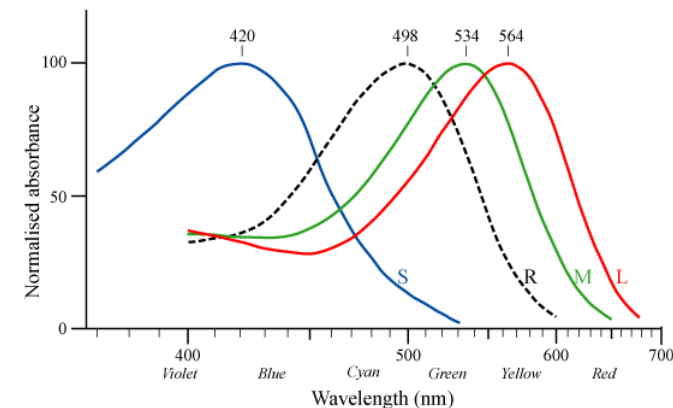
Licht Detektion im Auge

- Das menschliche Auge hat vier Farbrezeptortypen:
 - Zäpfen: S, M, L (Tag)
 - Stäbchen: R (Nacht)
- Lichtempfindlichkeit der Rezeptoren variiert mit Wellenlänge der Photonen
- Summe der Zapfenempfindlichkeiten ergibt die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges die den Helligkeitskanal Y von Farbmodellen definiert
- Maximum von Y bei 555nm
- Die wahrgenommene Lichtleistung wird in **Lumen (lm)** gemessen.
- 1 Watt von Licht der Wellenlänge 555nm entspricht 683 Lumen.

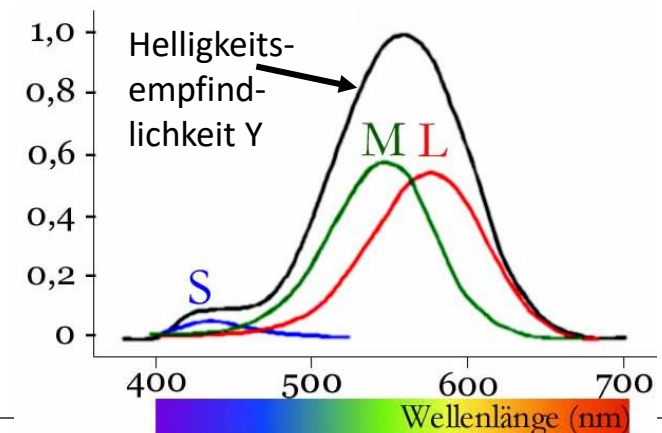


Aufbau der Retina mit Visualisierung der Zapfen

Bildquelle: www.jameda.de/gesundheitslexikon/retina



relative Lichtempfindlichkeit (pro Rezeptor normierte)





Wolfram Glühbirne

Lichtausbeute: ca. 10 Lumen/Watt



Energiesparlampe

Lichtausbeute: ca. 75 Lumen/Watt



organische LED (Flächenlichtquelle)

Lichtausbeute: bis 124 Lumen/Watt (5'09)



verschiedenfarbige LEDs



Nichia Chip on Board Modul Serie 130

Nichia Hochleistungs-LED

Lichtausbeute: bis 147 Lumen/Watt
3195-8650 Lumen bei 21.4-74,4 W

Licht

Lichtausbeute



- Lichtausbeute ist definiert als Quotient der wahrgenommenen Lichtleistung in Lumen über der zugeführten Leistung in Watt
- Die wahrgenommene Leistung ist abhängig von der Wellenlängen und ist bei grünem Licht (555nm) am höchsten

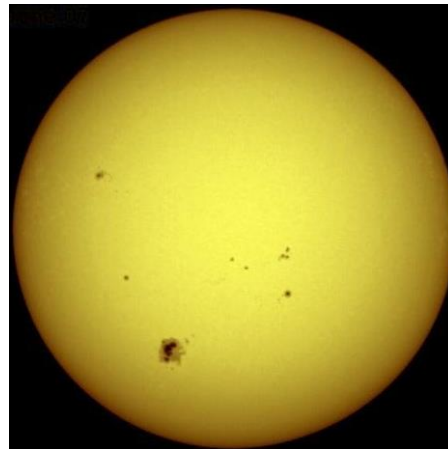
Typ	Lichtausbeute [lm/W]	Lebensdauer [h]	Ra	Startzeit
Glühlampe	5 .. 16	750 .. 1000	>90	Sofort
Halogenlampe ¹	14 .. 25	25 .. 4000	>90	Sofort
weiße Leuchtdiode	10 .. 100 ²	.. 100.000	90	Sofort
Energiesparlampe	35 .. 75	8000 .. 15000	>82	schnell
Leuchtstofflampe	50 .. 105	8000 .. 20000	80 .. 100	schnell
Kaltkathodenröhre	40 .. 80	30000 .. 50000	>90	schnell
Halogenmetall dampf	60 .. 100	9000 .. 15000	90	3 min ³
Hochdruck-Quecksilberdampf	30 .. 60	10000	45 .. 58	5 min ³
Natriumhochdruck	70 .. 150	20000 .. 32000	25 .. 40	8 min ³
Natriumniederdruck	100 .. 200	12000 .. 18000	25	15 min ³
Induktionslampe	80 .. 100	50.000 .. 100.000	80 .. 89	schnell

(Stand: April 2010)

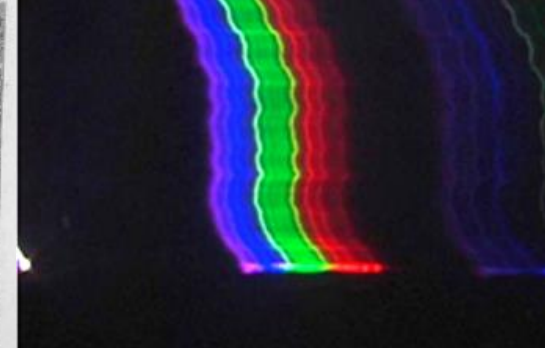


Natürliche Lichtquellen

- Sonne, Mond (indirekt)
- Blitz, Wetterleuchten (indirekt), Kugelblitz
- Leuchtkäfer (95% Wirkungsgrad)



bis 2012 kannte man Kugelblitze nur aus Erzählungen oder Experimenten



2012 wurde zum ersten mal ein Kugelblitz mit dessen Spektrum

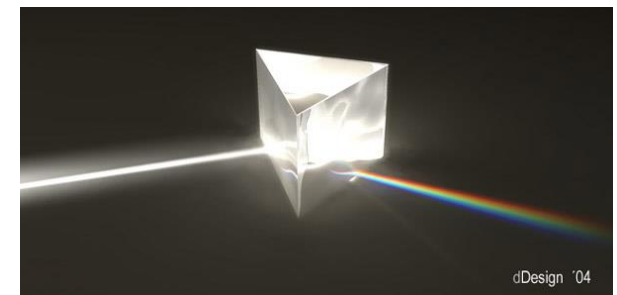
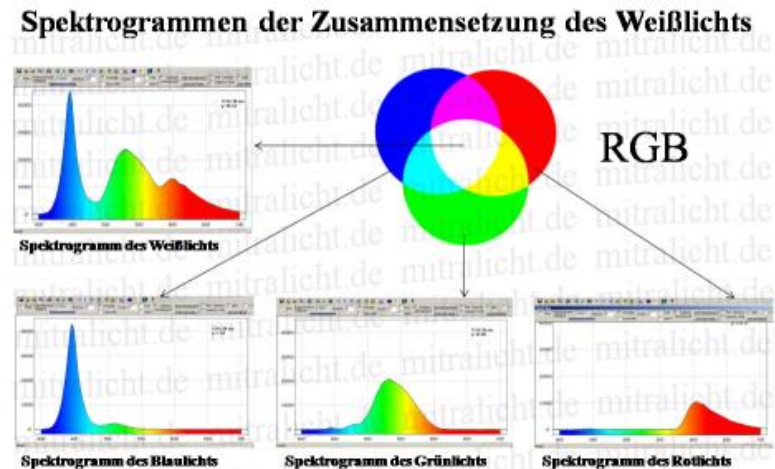
in der Natur erfasst
<http://physics.aps.org/articles/v7/5>
und in Phys.Rev.Lett. publiziert:
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.035001>



Licht

Diskretisierung des Spektrums

- Um den Farbreiz beliebiger Spektren anzunähern, nutzen Displays pro Pixel drei verschiedenfarbige Lichtquellen, die über drei Farbkanäle (meist RGB) angesprochen werden.
- Notation für Farbe: $\ddot{\mathbf{L}} = (R, G, B)$
- Die Richtungsänderung von Photonen bei Streuung und Refraktion sind jedoch von der Wellenlängen abhängig, so dass bei der Simulation der Lichtausbreitung auch oft mehr als drei Farbkanäle verwendet werden



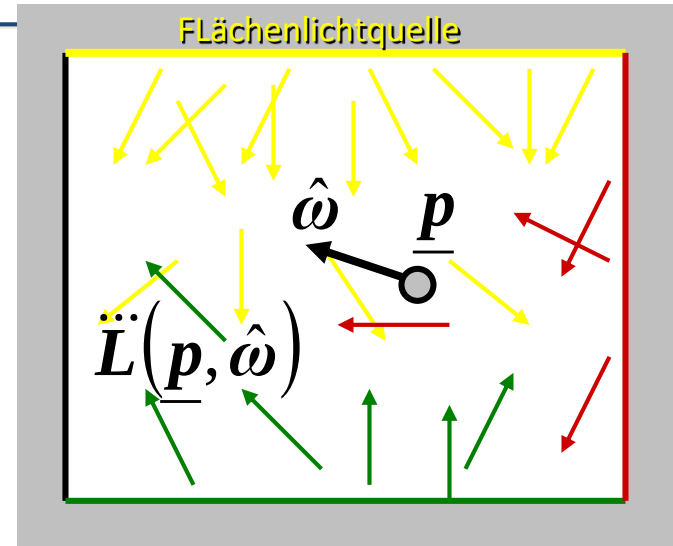
Wirkung eines Prismas zur Aufspaltung von Licht
Bildquelle: www.ddesignmedia.de

Licht

Lichtausbreitung



- Weil die Lichtgeschwindigkeit sehr hoch ist, bildet sich in einer Szenerie mit Lichtquellen in kurzer Zeit ein Strahlungsgleichgewicht bei dem gleich viele Photonen absorbiert oder aus der Szenerie entkommen wie neue Photonen produziert oder in die Szenerie hineinfliegen
- Die aktuelle Strahlungssituation kann man an jedem Punkt $\underline{p}$ in jeder Richtung $\hat{\omega}$ beschreiben durch die Lichtleistung, die alle Photonen transportieren, die bei $\underline{p}$ in Richtung $\hat{\omega}$ fliegen



- Die gerichtete Lichtleistung $\underline{L}$ misst Leistung pro Richtung und Fläche senkrecht zur Richtung und wird Strahldichte (bzw. Leuchtdichte bei Gewichtung mit Helligkeitsempfindlichkeit) genannt
- Im Vakuum ist Lichtleistung entlang von Strahlen konstant

Licht

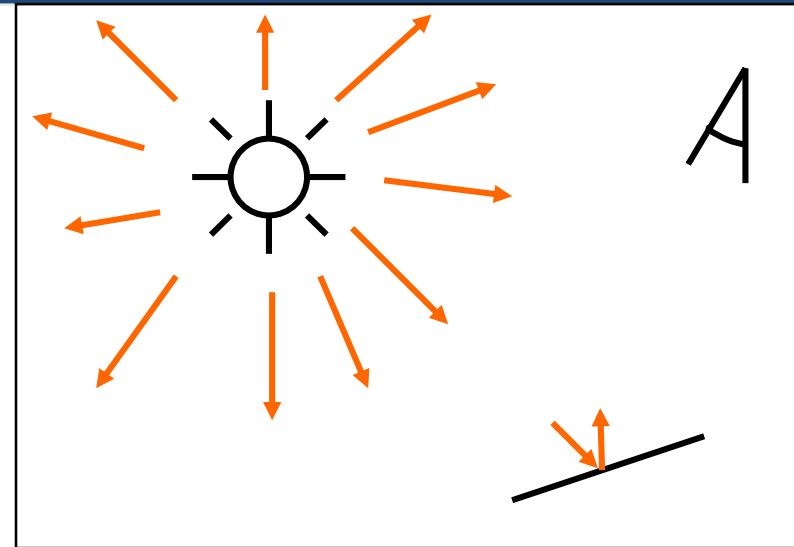
Beleuchtungssimulation



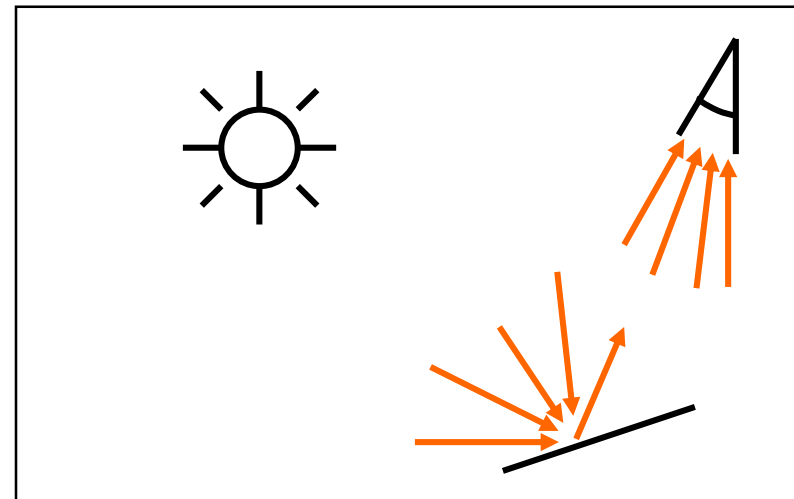
- In vielen Ansätzen zur Beleuchtungs-simulation wird die Strahl- oder Leuchtdichte bestimmt und zur Vereinfachung volumetrische Streuung nicht betrachtet
- Photonen durchlaufen dann Pfade von
 - Emission
 - mehrere Reflektionen oder Refraktionen bis hin zur
 - Absorption bzw. Detektion

Man unterscheidet:

- Light Tracing ... das Verfolgen von Photonenpfad ausgehend von der Lichtquelle
- Visibility Tracing ... das Verfolgen von Pfaden in umgekehrter Richtung vom Auge ausgehend



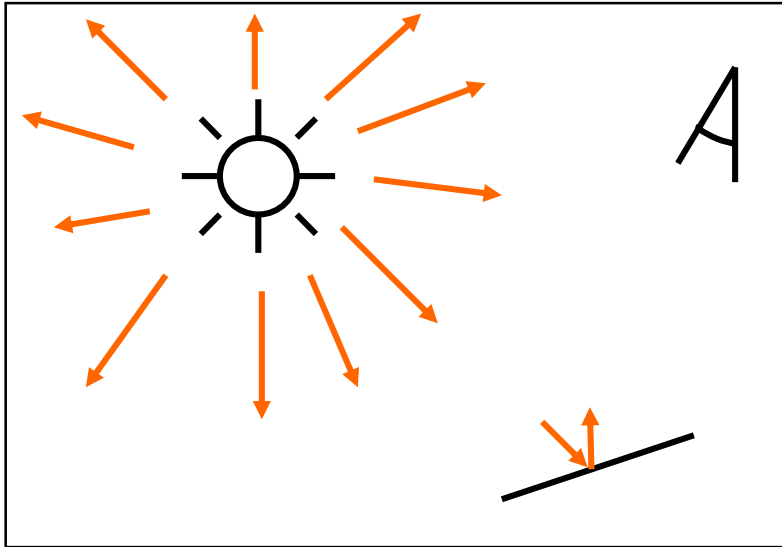
Light Tracing



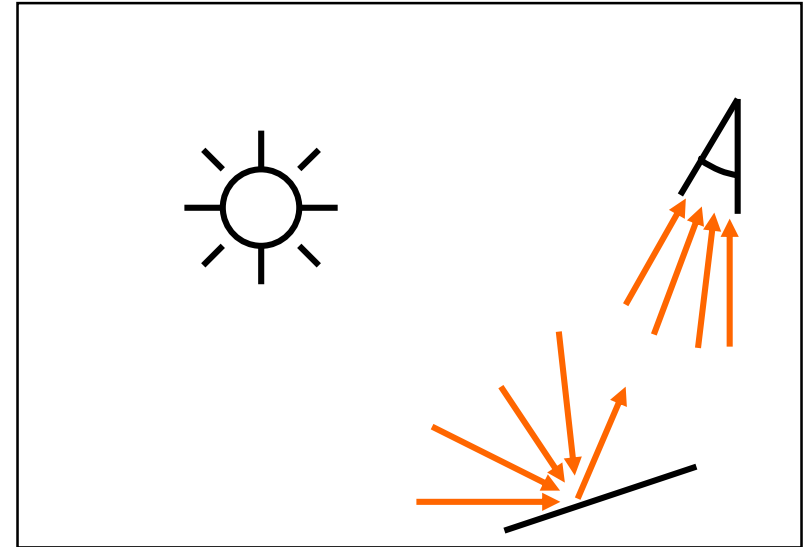
Visibility Tracing



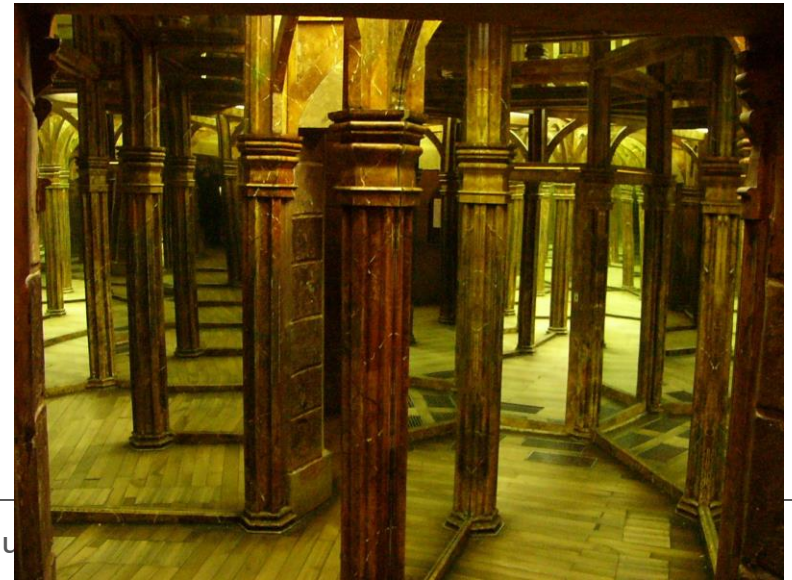
Abtastung entlang von Strahlen



Light Tracing



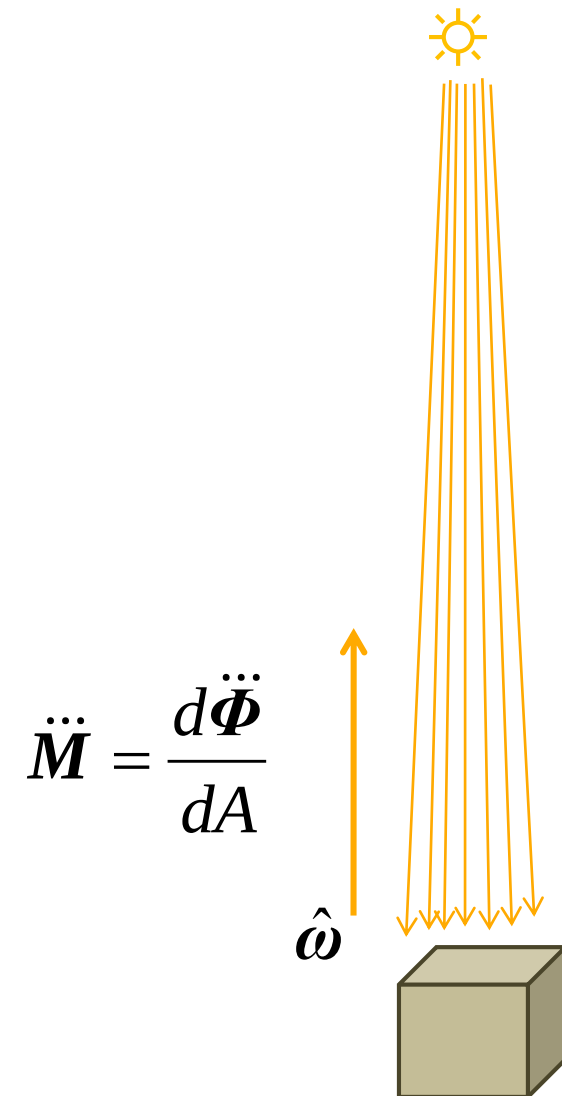
Visibility Tracing



Lichtquellen

Richtungslichtquelle

- Einfachste Lichtquelle; dient als Approximation sehr weit entfernter Lichtquelle (z. B. die Sonne)
- definiert durch Richtung ω zur Lichtquelle und Lichtausstrahlung $\mathbf{\ddot{M}}$ (Leistung pro Fläche)
- In OpenGL wird Richtung durch homogenen Vektor mit einer Null in der w-Komponente repräsentiert, d.h. es handelt sich um eine unendlich weit entfernte Punktlichtquelle

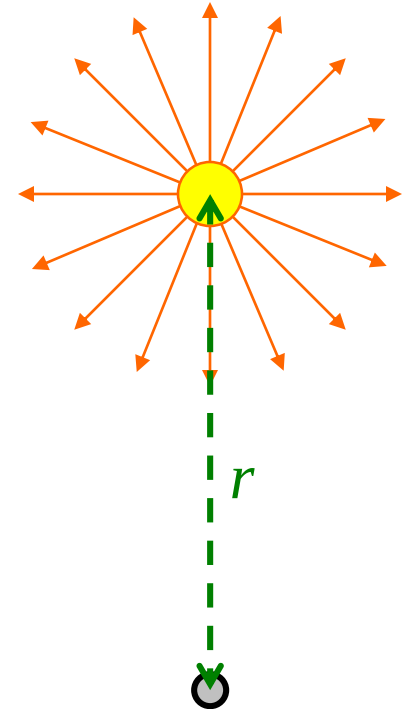


Lichtquellen

Punktlichtquelle



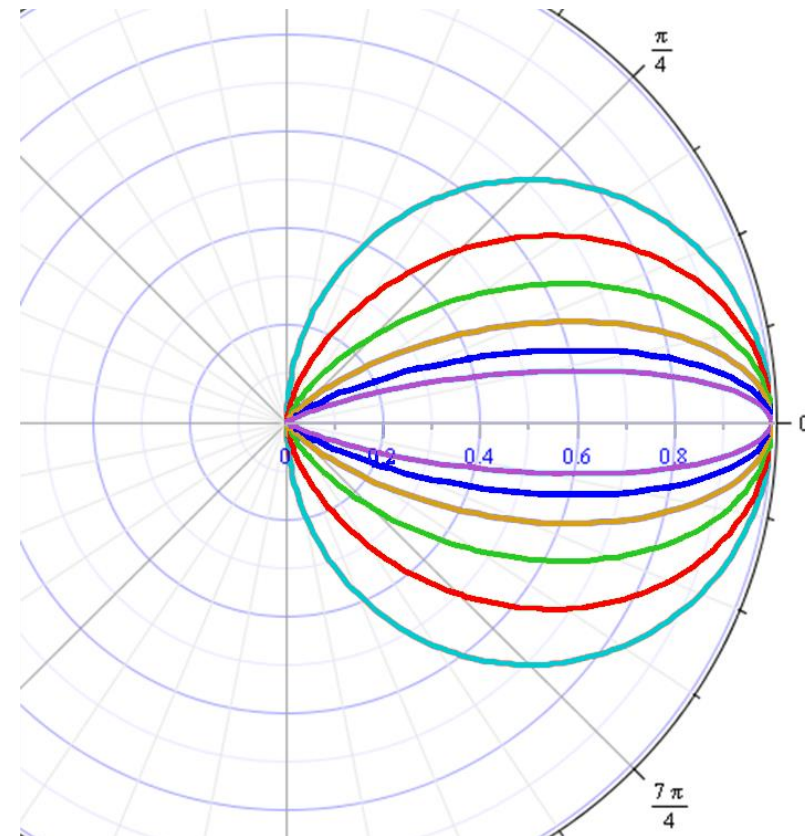
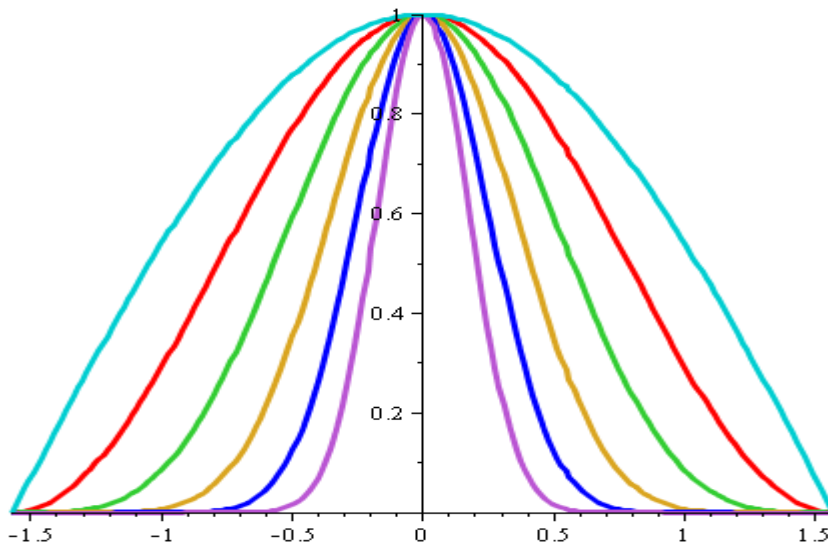
- sendet Licht in alle Richtungen mit gleicher Stärke (isotrop) aus
- Definition: Position, Lichtstärke $\mathbf{I}$ [Candela] (Leistung pro Richtung) unabhängig von Richtung
- weit entfernte Punktlichtquelle verhält sich wie eine Richtungslichtquelle
- Die Strahldichte nimmt mit dem Abstand r zur Lichtquelle quadratisch ab (verteilt sich auf wachsenden Kugelschalen)



$$\ddot{L}(r) \propto \frac{1}{r^2} \ddot{I}_0$$

polarer Plot

$$\cos^n x$$
$$n = 1, 2, 4, 8, 16, 32$$

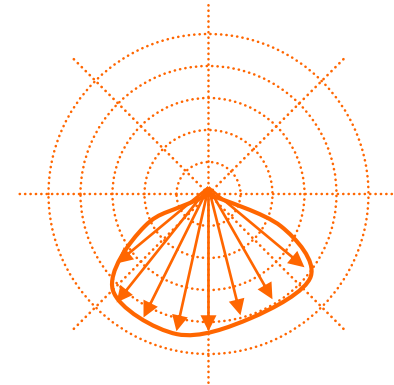


How to read this plot: find x on the outer circle of the coordinate system and connect a straight line from this point to the origin. The function value of x is where the function plot intersects this line. For example the line from $\pi/4$ to the origin is intersected by the cyan plot ($\cos(x)$) at approx. 0,7 units of this line.



Goniometrische Lichtquelle

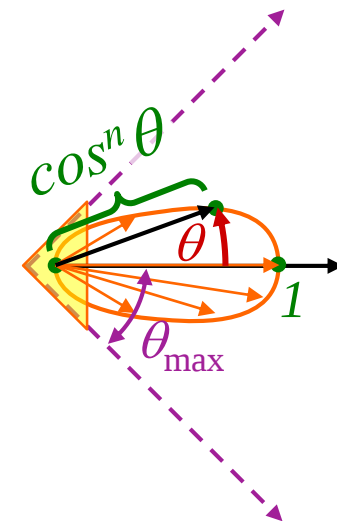
- Lichtintensität ist abhängig von Abstrahlrichtung: $I(\varphi, \theta)$
- Lichtintensität wird tabelliert



Strahler (engl. spot)

- Spezielle Richtungsabhängigkeit, die Lichtkegel erzeugt
- Intensität:
$$\ddot{\mathbf{I}}(\varphi, \theta) = \ddot{\mathbf{I}}_0 \cdot \begin{cases} (\cos \theta)^n & |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

in Klausur gegeben
- Exponent n bestimmt die Stärke der Lichtbündelung.
- Öffnungswinkel: $\theta_{\max}$
- Im OpenGL-Standard enthalten

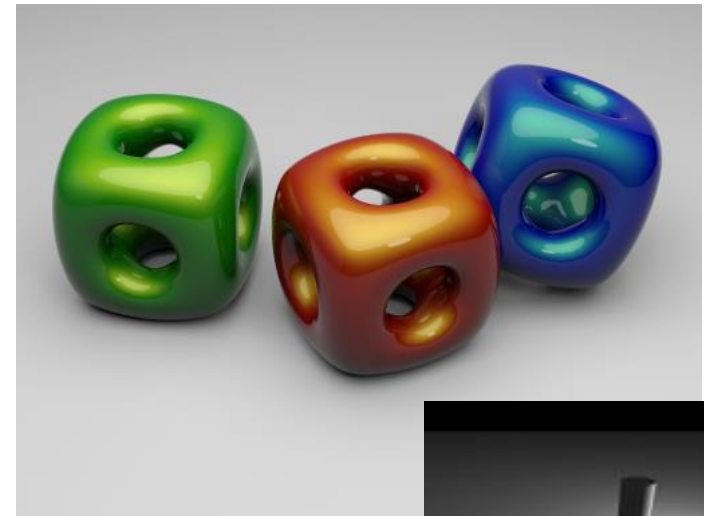


Lichtquellen

Flächenlichtquelle

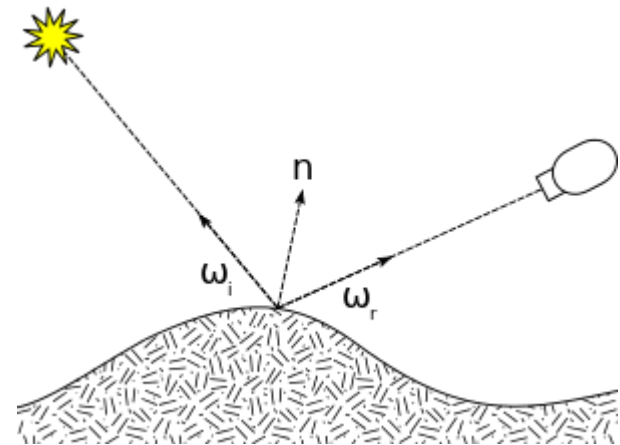


- ◆ allgemeinsten Fall ist die ausgedehnte Lichtquelle
- ◆ Wird durch Oberflächengeometrie und Abstrahlleistung pro Richtung und Fläche definiert – oft isotrop (d.h. an allen Oberflächenpunkten in alle Richtungen gleich hell)
- ◆ aufwendig bei der Simulation; kann durch viele Punktlichtquellen approximiert werden
- ◆ Erzeugt weiche Schatten

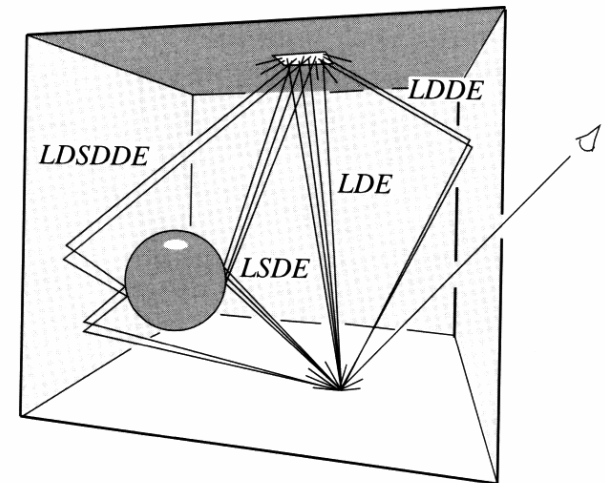


Man unterscheidet

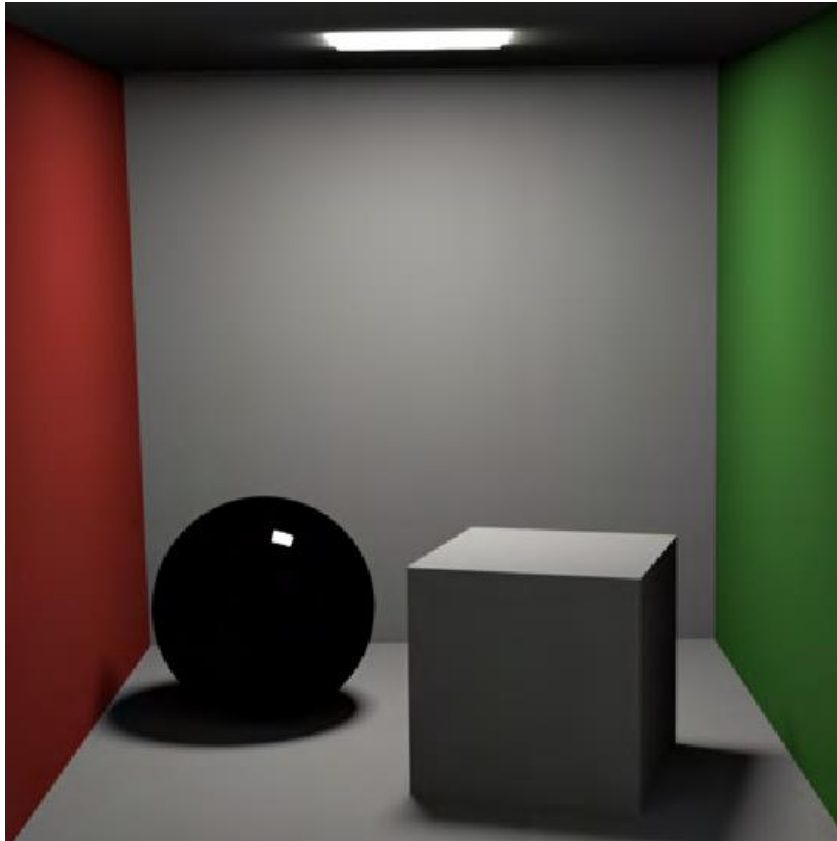
- lokale Beleuchtungsmodelle ... beschreiben das Reflektions-, Refraktions- und Absorptionsverhalten von Licht an Oberflächen
- globale Beleuchtungsmodelle ... simulieren die Lichtausbreitung entlang von Lichtpfaden über mehrere Reflektionen und Refraktionen
- Die Echtzeitgraphik baut auf lokalen Beleuchtungsmodellen auf und emuliert globale Effekte der Lichtausbreitung teilweise wo dies effizient möglich ist (Schatten, Spiegel)



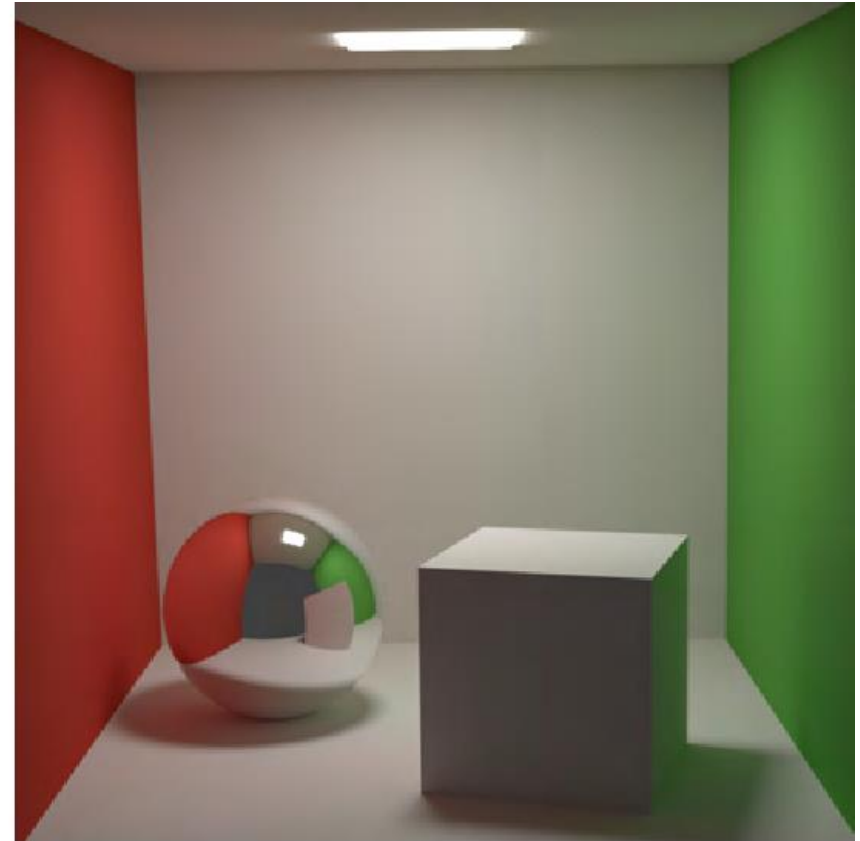
lokales Reflektionsverhalten wird durch BRDF beschrieben



globale Beleuchtungsmodelle berücksichtigen alle Pfade der Lichtausbreitung



(a) Local Illumination

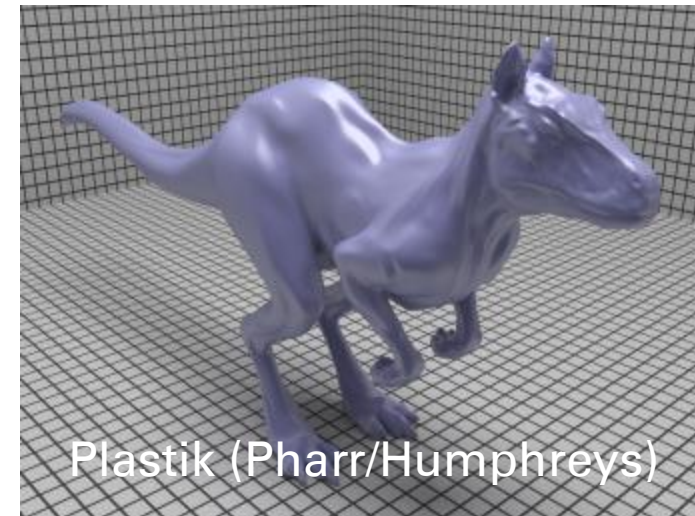


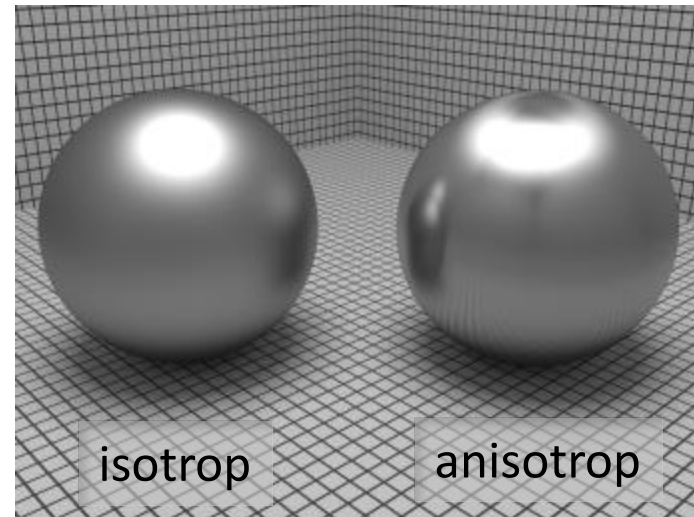
(b) Global Illumination

Figure taken from *Arnebäck, E. (2017). Comparing a Clipmap to a Sparse Voxel Octree for Global Illumination.*

Beleuchtungsmodelle

Materialien – Beispiele I





Brechung und Refraktion nach
den Fresnel'schen Formeln

Beleuchtungsmodelle

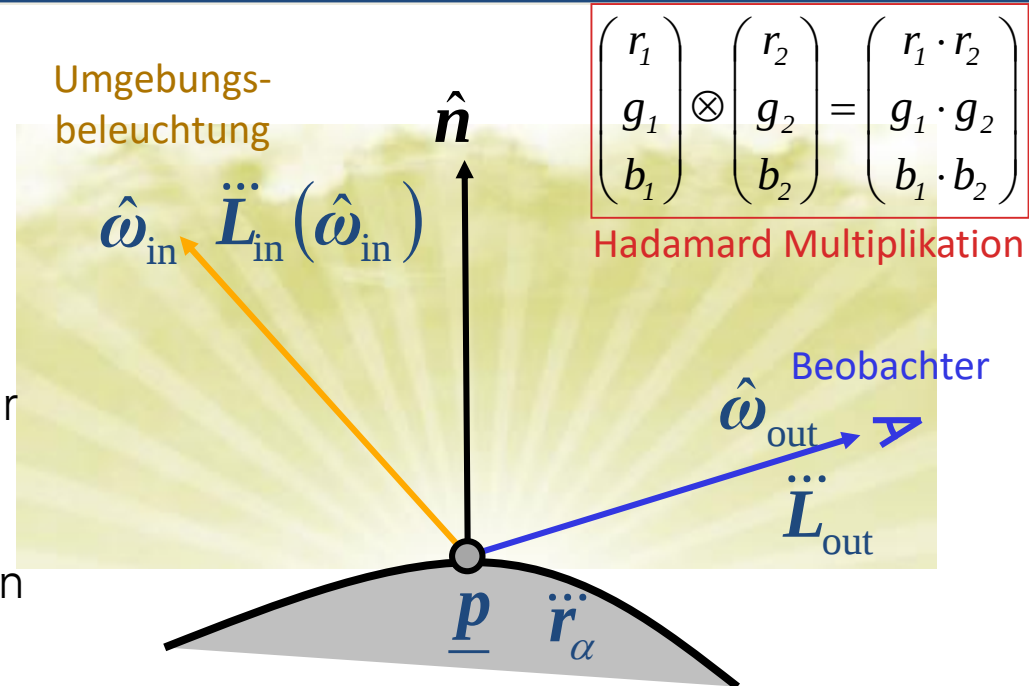
lokal – BRDF – Definition



- Lokale Beleuchtungsmodelle berechnen an einem Oberflächenpunkt $\underline{p}$ in einem an der Normalen $\hat{n}$ ausgerichteten Koordinatensystem aus
 - Richtung ω_{in} zur Lichtquelle
 - Richtung ω_{out} zum Beobachter
 - der einfallenden Strahldichte $\underline{L}_{in}$
 - mehreren Materialparametern $\underline{r}_\alpha$ wie Reflektionsfarbe, Rauigkeit

die Strahldichte $\underline{L}_{out}$ des Lichts, die zum Beobachter reflektiert wird:

- Die Funktion $\underline{f}(\omega_{out}, \omega_{in})$ nennt man BRDF / bidirektionale Reflektionsverteilungsfunktion

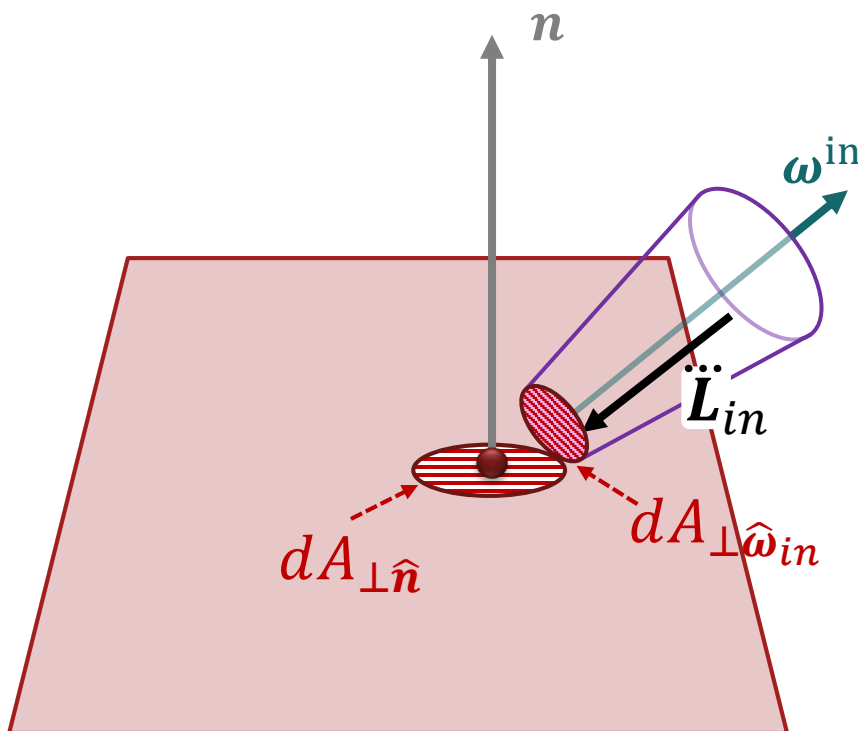


in Klausur gegeben

$$\underbrace{\ddot{L}_{out}}_{\text{Beobachter}} = \int_{\hat{\omega}_{in} \in \Omega_+} \underbrace{\ddot{f}_{\underline{p}, \hat{n}, \ddot{r}}}_{\text{Oberfläche}} \underbrace{(\hat{\omega}_{out}, \hat{\omega}_{in})}_{\text{Beobachter}} \underbrace{\otimes \ddot{L}_{in}}_{\text{Umgebungsbeleuchtung}} \underbrace{\cdot \langle \hat{\omega}_{in}, \hat{n} \rangle}_{\text{Oberfläche}} d\hat{\omega}_{in} \underbrace{\omega_{in}}_{\text{Umgebungslicht}}$$

Integration über Halbkugel

- Der Kosinusterm $\langle \hat{\omega}_{in}, \hat{n} \rangle$ dient zur Umrechnung der Lichtleistung pro Richtung und Fläche senkrecht zur Richtung in die Lichtleistung pro Richtung und Fläche senkrecht zur Oberflächennormale



$$\langle \hat{\omega}_{in}, \hat{n} \rangle = \frac{dA_{\perp \hat{\omega}_{in}}}{dA_{\perp \hat{n}}}$$

$$\ddot{L}_{in \perp \hat{\omega}_{in}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Richtung} \cdot dA_{\perp \hat{\omega}_{in}}}$$

$$\begin{aligned} \ddot{L}_{in \perp \hat{n}} &= \frac{\text{Leistung}}{\text{Richtung} \cdot dA_{\perp \hat{n}}} \\ &= \ddot{L}_{in \perp \hat{\omega}_{in}} \langle \hat{\omega}_{in}, \hat{n} \rangle \end{aligned}$$

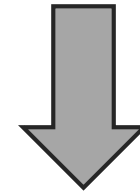
Beleuchtungsmodelle

lokal – BRDF – für Punktlichtquellen



- Bei Punkt- und Richtungslichtquellen, wird das Integral zu einer Summe über alle von der Oberfläche sichtbaren Lichtquellen

$$\ddot{\mathbf{L}}_{\text{out}} = \int_{\hat{\omega}_{\text{in}} \in \Omega_+} \ddot{\mathbf{f}}_{\underline{p}, \hat{\mathbf{n}}, \underline{\mathbf{r}}}(\hat{\omega}_{\text{out}}, \hat{\omega}_{\text{in}}) \otimes \ddot{\mathbf{L}}_{\text{in}} \cdot \langle \hat{\omega}_{\text{in}}, \hat{\mathbf{n}} \rangle d\hat{\omega}_{\text{in}}$$

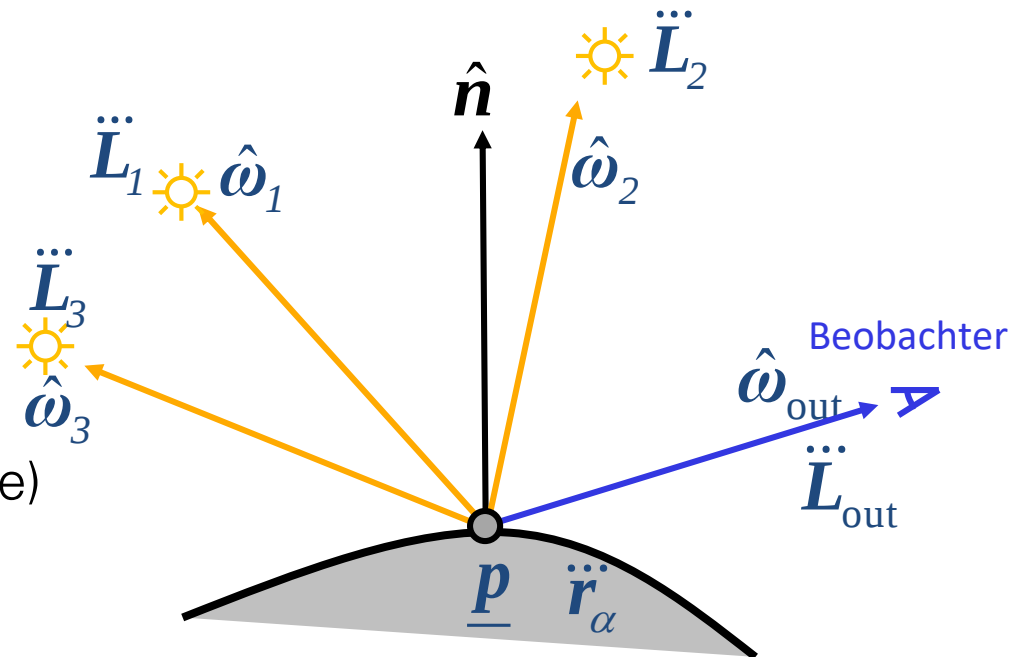


- Im Folgenden betrachten wir die BRDF bei Beleuchtung mit nur einer Punktlichtquelle. Damit kann die Summation weggelassen werden.

$$\ddot{\mathbf{L}}_{\text{out}} = \sum_i \ddot{\mathbf{f}}_{\underline{p}, \hat{\mathbf{n}}, \underline{\mathbf{r}}}(\hat{\omega}_{\text{out}}, \hat{\omega}_i) \otimes \ddot{\mathbf{L}}_i \cdot \langle \hat{\omega}_i, \hat{\mathbf{n}} \rangle$$

in Klausur gegeben

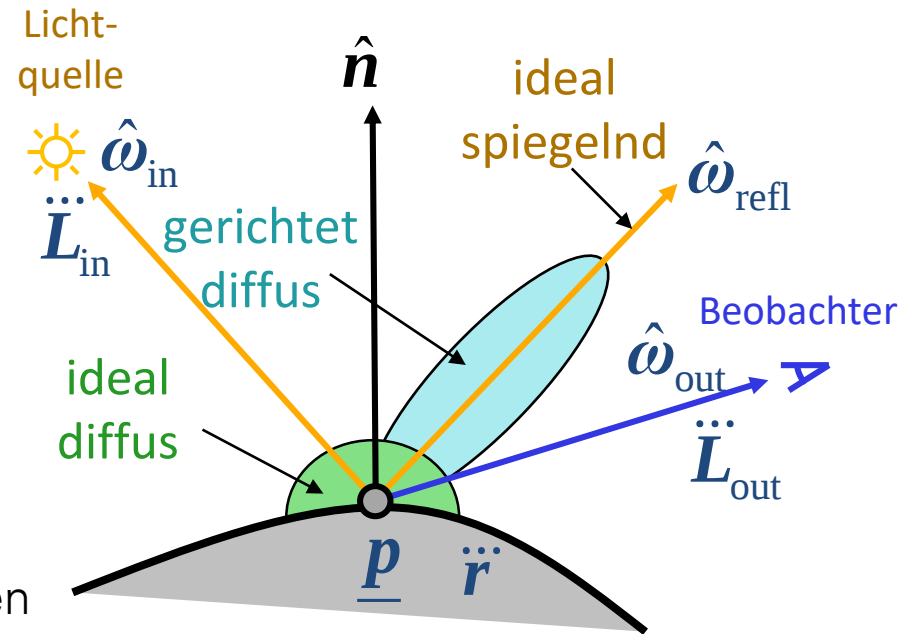
- Die Berechnung der Leuchtdichte für diesen Fall wird auch das lokale Beleuchtungsmodell genannt, weil nur eine (lokale) Reflektion betrachtet wird.



Beleuchtungsmodelle

lokal – Zerlegung

- Das lokale Beleuchtungsmodell wird meist aufgrund der Reflektionseigenschaften in drei Bestandteile zerlegt
 - diffuse Reflektion ... Anteil hängt nicht von Beobachter ab. Das eingefallene Licht wird in alle Richtungen gleich reflektiert
 - gerichtet diffus (oft spekular genannt) ... Anteil ist am stärksten wenn der Beobachter aus der an der Normalen gespiegelten Einfallsrichtung $\hat{\omega}_{\text{refl}}$ schaut und fällt mit dem Winkel zu $\hat{\omega}_{\text{refl}}$ ab
 - spiegelnd ... nur ein Beitrag, wenn der Beobachter genau aus $\hat{\omega}_{\text{refl}}$ schaut



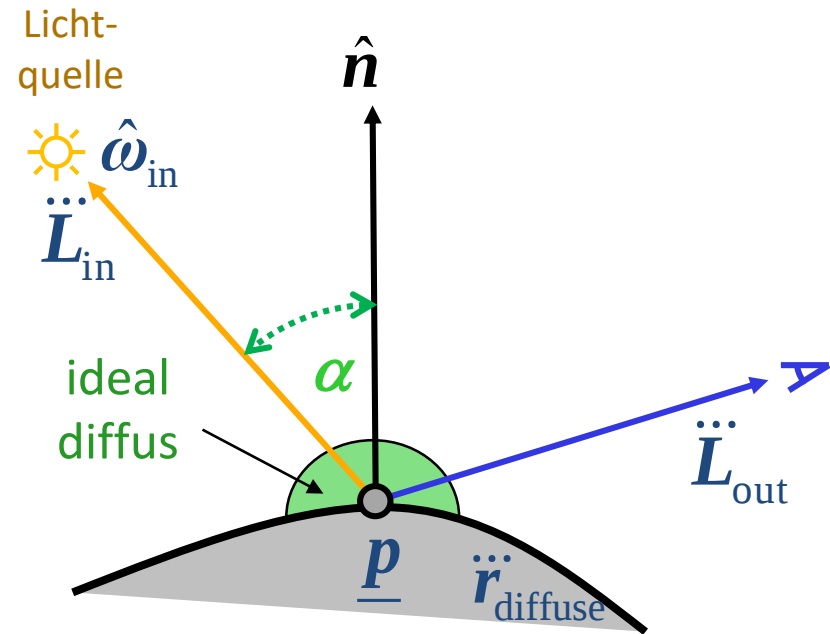
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{\text{refl}} &= \hat{\omega}_{\text{in}} + 2(\langle \hat{n}, \hat{\omega}_{\text{in}} \rangle \hat{n} - \hat{\omega}_{\text{in}}) \\ &= 2\langle \hat{n}, \hat{\omega}_{\text{in}} \rangle \hat{n} - \hat{\omega}_{\text{in}}\end{aligned}$$

Beleuchtungsmodelle

lokal – Diffuse Reflektion



- In allen lokalen Beleuchtungsmodellen wird der diffuse Anteil gleich modelliert
- Die BRDF ist dabei eine konstante Farbe, die auch Albedo der Fläche genannt wird.
- Der Kosinusterm in der Definition der reflektierten Lichtintensität macht die Helligkeit der Reflektion abhängig von der Einfallsrichtung des Lichts – je senkrechter der Einfall desto heller
- Bei der Implementierung setzt man negative Werte auf Null damit die Oberfläche nicht von innen beleuchtet wird



$$\begin{aligned} \ddot{f} &\equiv \ddot{r}_{\text{diffuse}} \Rightarrow \\ \ddot{L}_{\text{out}} &= \ddot{r}_{\text{diffuse}} \otimes \ddot{L}_{\text{in}} \cos_+ \alpha \\ &= \ddot{r}_{\text{diffuse}} \otimes \ddot{L}_{\text{in}} \langle \hat{\omega}_{\text{in}}, \hat{n} \rangle_+ \end{aligned}$$

in Klausur gegeben

mit $g_+(x) = \begin{cases} g(x) & g(x) > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Beleuchtungsmodelle

lokal – Spekulare Reflektion

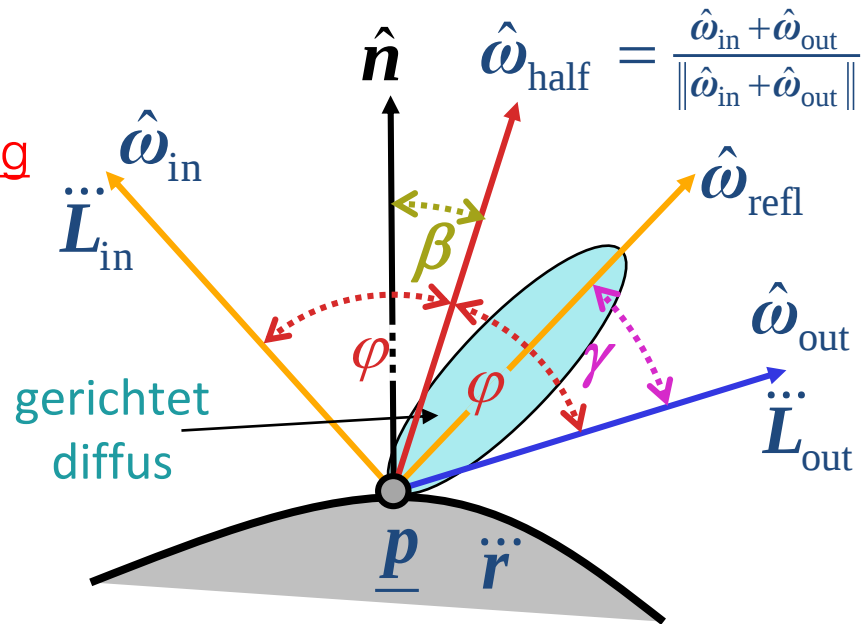


- Für die spekulare Komponente wurden zuerst die Modelle nach Phong und bzw. nach Blinn-Phong (Standardmodell in OpenGL) entwickelt. Später kamen komplexere und physikalisch plausiblere Modelle hinzu.
- Bei Phong und bei Blinn-Phong wird die Glattheit der Oberfläche über einen Exponenten m , der shininess genannt wird, definiert. Mit größerem m werden die Glanzlichter kleiner

in Klausur gegeben

$$\vec{L}_{\text{out}} = \vec{r}_{\text{diffuse}} \otimes \vec{L}_{\text{in}} \langle \hat{\omega}_{\text{in}}, \hat{n} \rangle_+ + v \vec{r}_{\text{specular}} \otimes \vec{L}_{\text{in}} \cdot \begin{cases} \langle \hat{\omega}_{\text{out}}, \hat{\omega}_{\text{refl}} \rangle_+^m & \dots \text{Phong} \\ \langle \hat{\omega}_{\text{half}}, \hat{n} \rangle_+^m & \dots \text{Blinn-Phong} \end{cases}$$

mit $v = \begin{cases} 1 & \langle \hat{\omega}_{\text{in}}, \hat{n} \rangle \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$



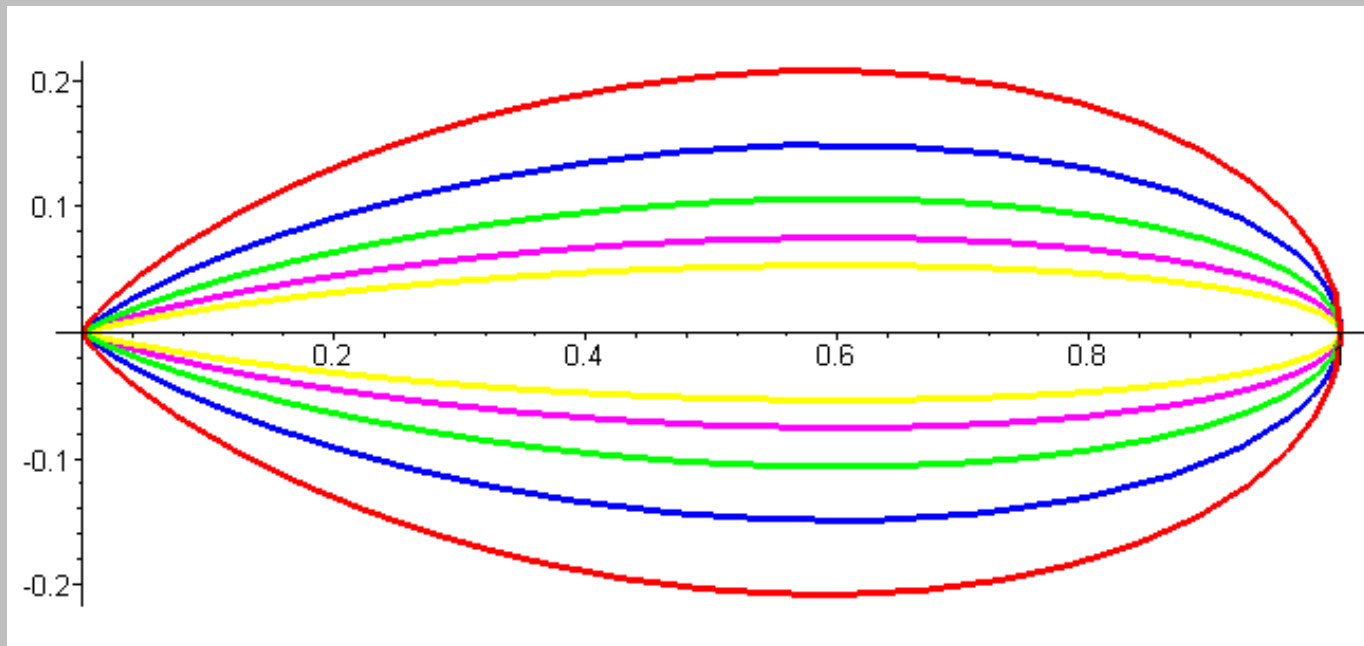
Beleuchtungsmodelle

lokal – Bündelung des Lichts



- Plot von $\cos^m x$ für $m=8,16,32,64,128$ in Polarkoordinaten.

$\cos^{128} x$
 $\cos^{64} x$
 $\cos^{32} x$
 $\cos^{16} x$
 $\cos^8 x$



Beleuchtungsmodelle

lokal – Phong vs Blinn-Phong

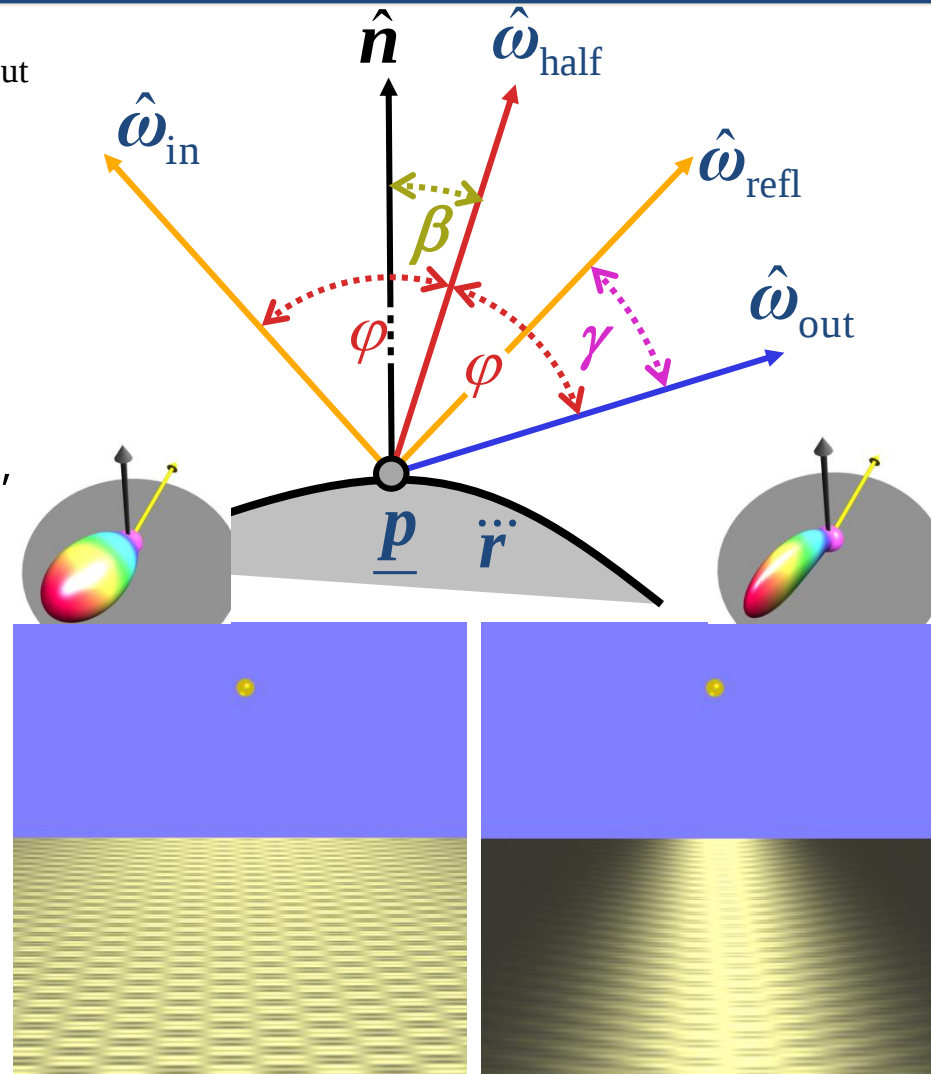


- Liegen die Vektoren $\mathbf{n}$, $\hat{\omega}_{\text{in}}$ und $\hat{\omega}_{\text{out}}$ in einer Ebene, so gilt

$$\gamma = 2\beta$$

und Phong und Blinn-Phong sollten ungefähr dasselbe Ergebnis liefern

- Schaut man flach auf eine Fläche, die von der gegenüberliegenden Seite beleuchtet wird, so liegen die Vektoren nicht mehr in einer Ebene – je weiter man aus der Mitte kommt, desto weniger. Dann unterscheiden sich die Modelle und man erkennt, dass das Blinn-Phong Modell realistischer aussieht



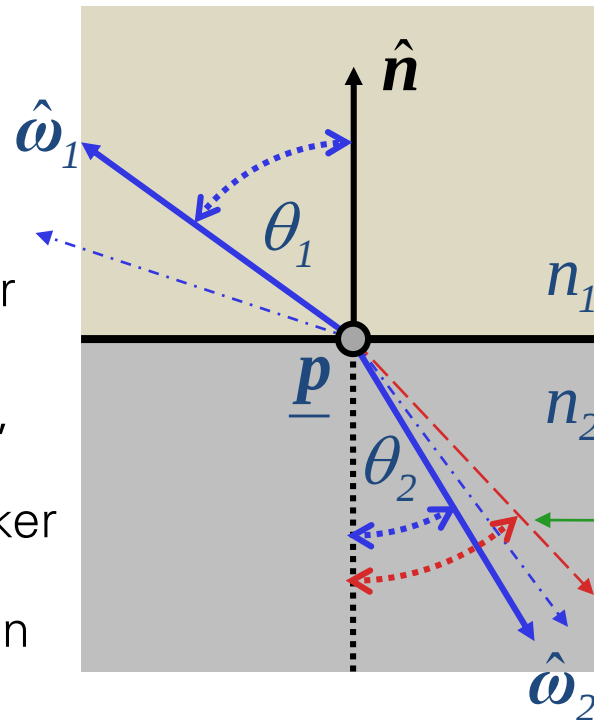
Phong Modell

Blinn-Phong Modell

Beleuchtungsmodell lokal – Refraktion



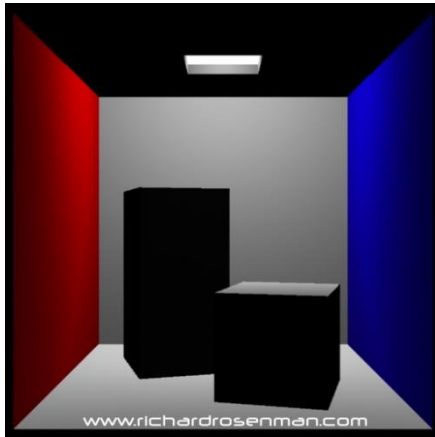
- Für die Brechung bzw. Refraktion wird meist nur die ideale Brechung nach dem Gesetz von Snellius berücksichtigt
- Ausgangspunkt sind die Brechungsindizes n_1 und n_2 zweier aneinander grenzender transparenter Materialien
- Je höher der Brechungsindex, desto langsamer breiten sich Photonen aus und desto stärker wird der Lichtstrahl zur Normalen der Grenzschicht hin gebrochen (abgelenkt).
- Beim Übergang in ein Medium mit kleinerem Brechungsindex gibt es einen Grenzwinkel, ab dem das gesamte Licht total reflektiert wird



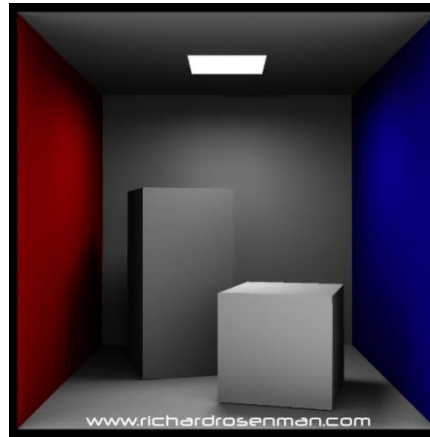
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Brechungsgesetz nach Snellius

Mehrfachreflektion und Streuung



1 Reflektion



2 Reflektionen



beliebig viele
Reflektionen



© Wikipedia



© Markus Billeter et al 2012

volumetrische Streuung

Beleuchtungsmodelle

lokal – Ambiente Beleuchtung



- Die Simulation von Streulicht ist sehr aufwendig und die resultierenden Effekte werden meist nur approximiert
- In der einfachsten Variante wie sie in OpenGL unterstützt ist, geht man davon aus dass das Streulicht an jedem Punkt im Raum und in jede Richtung gleich stark ist und auch in jede Beobachtungsrichtung gleich viel reflektiert wird. Deshalb erhält jede Lichtquelle und die Gesamtszene jeweils eine ambiente Emmissionskomponente (rgb) und jedes Material einen ambienten Reflektionsparameter (rgb)



ambient



ambient & diffuse

$$\begin{aligned}
 c_{pri} &= e_{cm} && \text{Emission} \\
 &+ a_{cm} * a_{cs} && \text{ambiante Szenenbeleuchtung} \\
 &+ \sum_{i=0}^{n-1} (att_i)(spot_i) [a_{cm} * a_{cli} && \text{ambient pro Lichtquelle} \\
 &\quad + (\mathbf{n} \odot \overrightarrow{\mathbf{VP}_{pli}}) \mathbf{d}_{cm} * \mathbf{d}_{cli} && \text{diffus} \\
 &\quad + (f_i)(\mathbf{n} \odot \hat{\mathbf{h}}_i)^{s_{rm}} \mathbf{s}_{cm} * \mathbf{s}_{cli}] && \text{spekular} \\
 &&& \text{(Blinn-Phong)}
 \end{aligned}$$

↗ Abschwächung
 ↗ Strahler

<https://www.opengl.org/documentation/specs/version1.1/gl-spec1.1/node32.html>

$$f_i = \begin{cases} 1, & \mathbf{n} \odot \overrightarrow{\mathbf{VP}_{pli}} \neq 0, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$att_i = \begin{cases} \frac{1}{k_{0i} + k_{1i} \|\overrightarrow{\mathbf{VP}_{pli}}\| + k_{2i} \|\overrightarrow{\mathbf{VP}_{pli}}\|^2}, & \text{if } \mathbf{P}_{pli} \text{'s } w \neq 0, \\ 1.0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

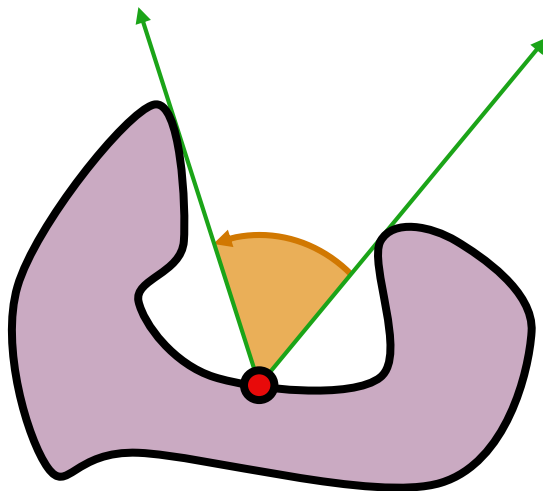
$$spot_i = \begin{cases} (\overrightarrow{\mathbf{P}_{pli}\mathbf{V}} \odot \hat{\mathbf{s}}_{dli})^{s_{rli}}, & c_{rli} \neq 180.0, \overrightarrow{\mathbf{P}_{pli}\mathbf{V}} \odot \hat{\mathbf{s}}_{dli} \geq \cos(c_{rli}) \\ 0.0, & c_{rli} \neq 180.0, \overrightarrow{\mathbf{P}_{pli}\mathbf{V}} \odot \hat{\mathbf{s}}_{dli} < \cos(c_{rli}) \\ 1.0, & c_{rli} = 180.0. \end{cases}$$

in Klausur gegeben

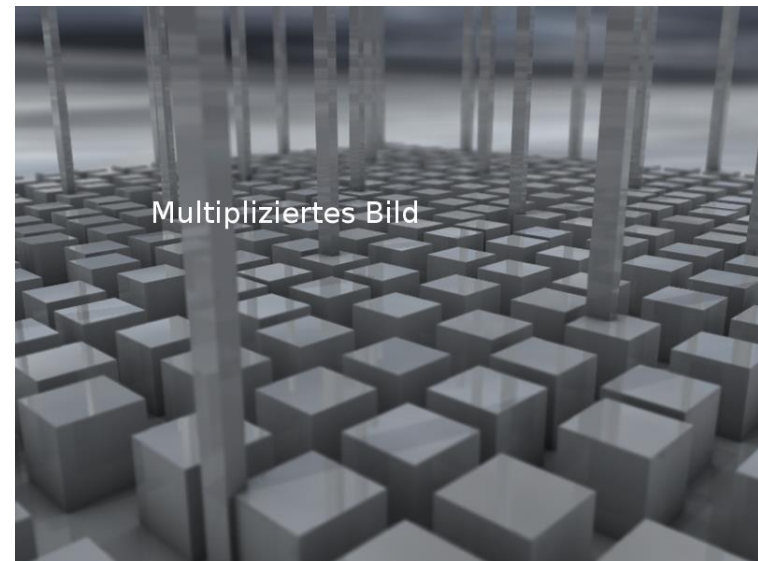
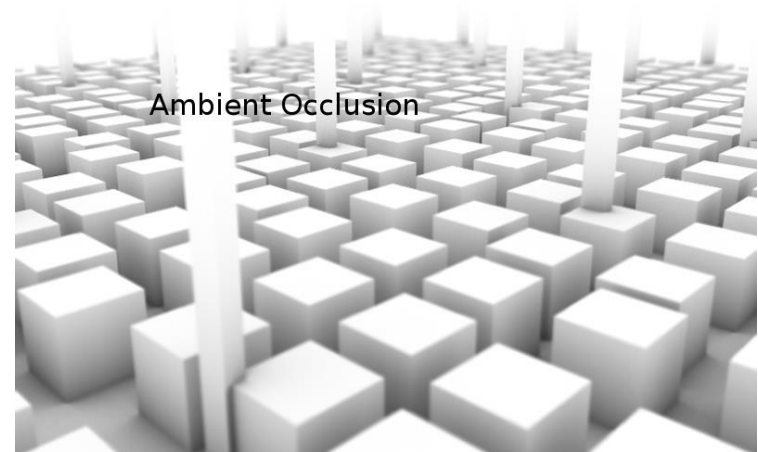
Beleuchtung global – Ambiente Verdeckung



- Die ambiente Beleuchtung kann realistischer approximiert werden, wenn man für jeden Oberflächenpunkt den Öffnungswinkel bestimmt, aus dem der Punkt ungehindert beleuchtet werden kann
- Dieses Verfahren nennt man ambient occlusion.



© Wikipedia

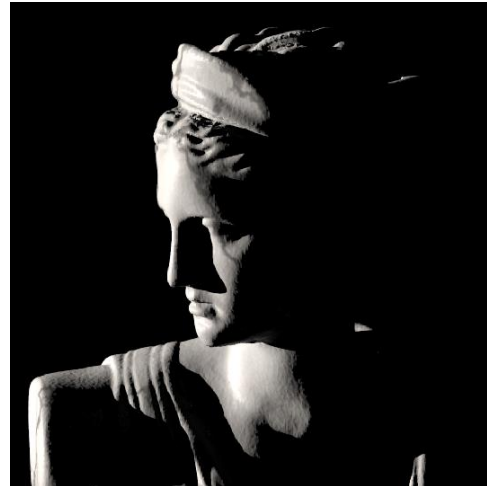


Beleuchtung

global – subsurface scattering



- In transluzenten Materialien wird Licht nahe der Oberfläche mehrfach gestreut bevor es an einer etwas anderen Stelle wieder austritt
- Die Lichtausbreitung in diesen Materialien kann realistisch approximiert werden, wenn man die Streueffekte nahe der Oberfläche stochastisch simuliert



diffus



fettarm

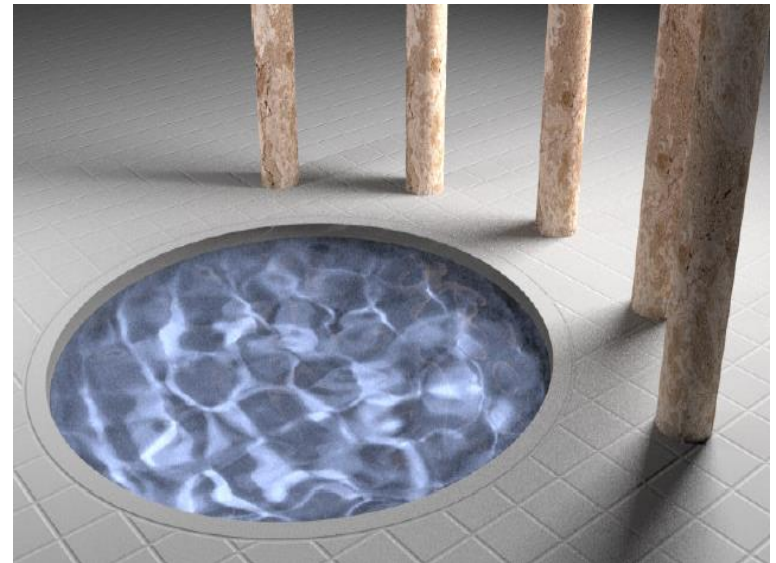
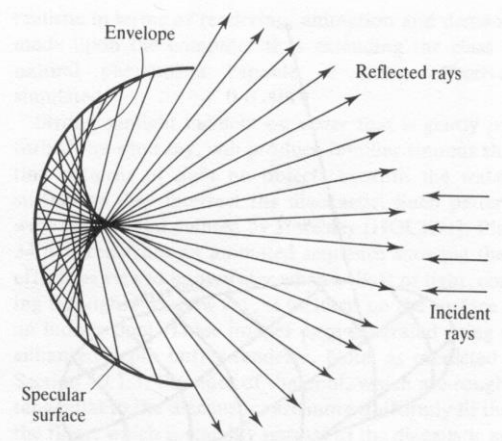


Vollmilch

Beleuchtung global – Kaustiken



- ◆ Gekrümmte transparente und oder spiegelnde Objekte können Licht bündeln und sogenannte Kaustiken (fokussiertes Licht) erzeugen



- Beim Radiosity Verfahren werden alle Lichtquellen und Oberflächen als rein diffus angenommen.
- Dadurch wird die Beleuchtungssimulation unabhängig vom Betrachter und kann in einem Vorverarbeitungsschritt berechnet werden und als Textur auf die Oberflächen abgebildet werden
- Das Strahlungsgleichgewicht führt auf ein lineares Gleichungssystem, das gelöst werden muss
- Unterstützt: diffuse Reflektionen und Streuung, weiche Schatten, Farbbloten
- Nicht unterstützt: gerichtet Diffuse Reflektion, Spiegelung, Brechung, Kaustiken



Beleuchtung global – Raytracing



- Beim Raytracing Verfahren werden Strahlen rückwärts vom Auge in die Szene verfolgt, um zu bestimmen, wie viel Licht an den einzelnen Bildpixeln ankommt
- Unterstützt: Spiegelung, Brechung
- Durch mehrfaches Verfolgen von Strahlen durch einen Pixel mit Variation diverser Parameter kann man sehr viele Effekte unterstützen: Motion Blur, Tiefenunschärfe, Antialiasing, weiche Schatten
- Nicht unterstützt: mehrere diffuse Reflektionen, Kaustiken
- Erste echtzeitfähige Raytracing Ansätze verfügbar



Beleuchtung global – Bidirektionales Pathtracing



- Beim Bidirektionalen Pathtracing werden Photonenpfade von der Lichtquelle und rückwärts vom Beobachter zufällig generiert und miteinander verknüpft
- So können alle Effekte der Lichtausbreitung simuliert werden. Das einzige was meist nicht berücksichtigt wird ist die Streuung in transparenten Medien.
- Bisher gibt es keinen Echtzeitansatz für bidirektionales Pathtracing – außer wenn man starkes Rauschen erlaubt:

[Video](#)

