

Beleuchtung

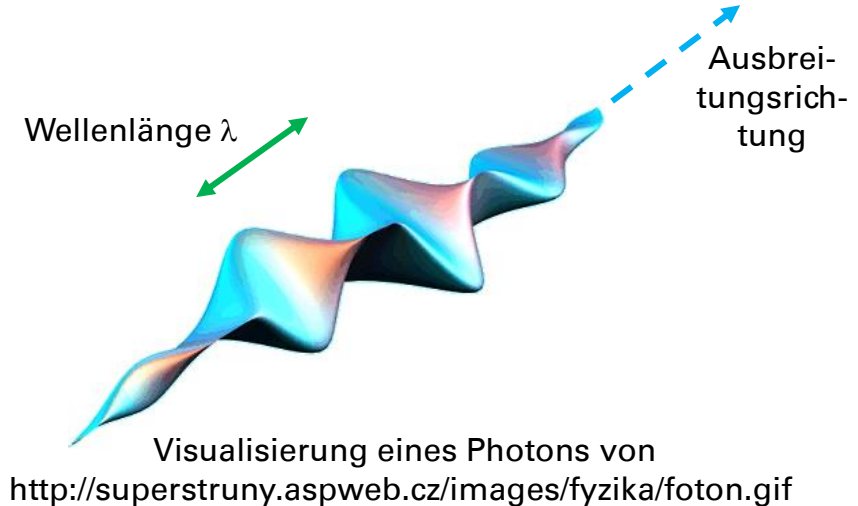


Inhalt

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

Was ist Licht?

- besteht aus Überlagerung sehr vieler Photonen, die sich gegenseitig nicht beeinflussen
- Photonen verhalten sich zwar wie Wellen – jedoch nur bei Interaktion mit Strukturen in der Größe der Wellenlänge, die zw. 400 und 800nm liegt
- Photonen fliegen entlang von geraden Bahnen mit Lichtgeschwindigkeit
- wichtige Eigenschaften:
 - Wellenlänge / Frequenz / Energie (definiert Farbe)
 - Polarisation (linear / zirkular)



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

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = \nu \lambda$$

Zusammenhang zwischen
Lichtgeschwindigkeit
Frequenz und Wellenlänge

$$E = h \nu$$

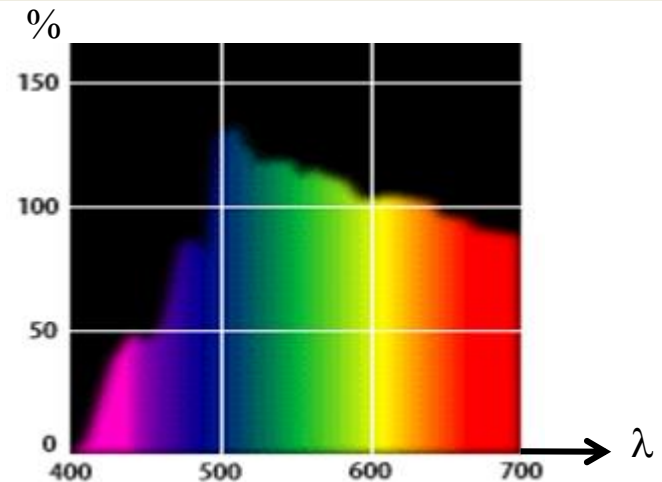
Energie eines
Photons mit
 $h = 6.6260689633 \cdot 10^{-34} \text{Js}$

Licht

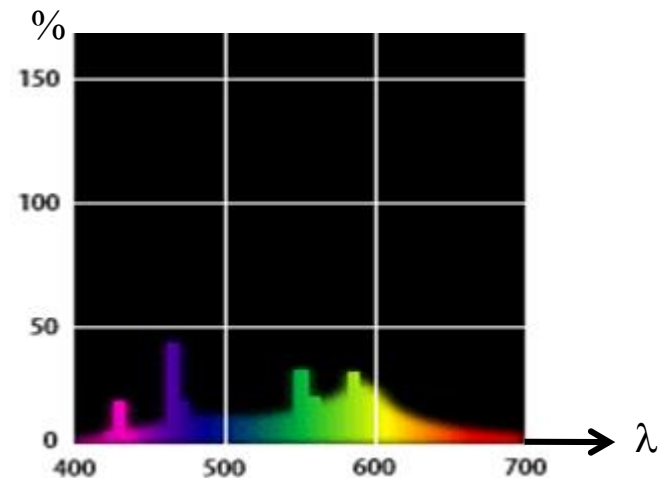
Leistungsspektrum



- 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 wird für jede Wellenlänge aufgetragen wie viel Prozent der Gesamtleistung in den Photonen dieser Wellenlänge mitgeführt wird



Leistungsspektrum von Tageslicht



Leistungsspektrum einer Leuchtstoffröhre

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

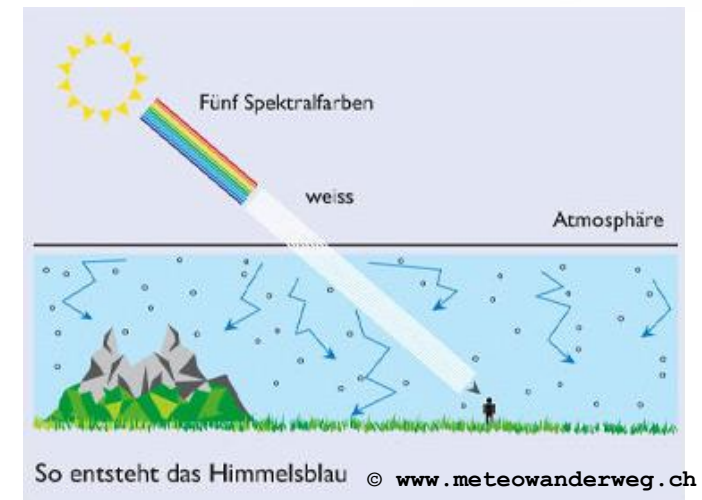
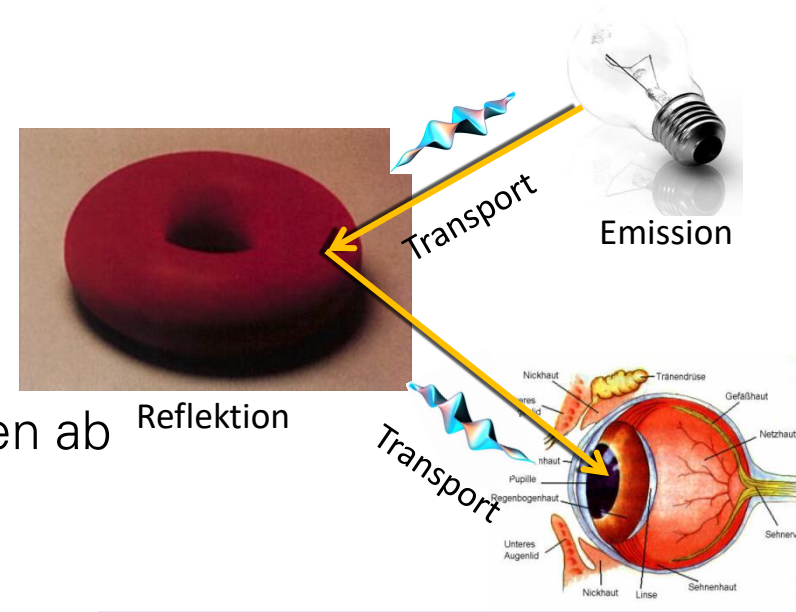


syl-wwf

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

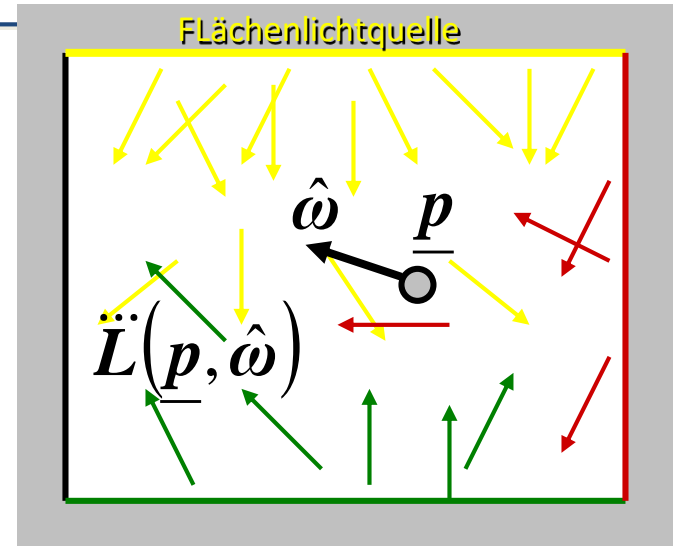


Licht

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} an einem Punkt nennt man auch die Strahldichte oder wenn man sie mit der menschlichen Empfindung gewichtet, die Leuchtdichte
- Beide Kenngrößen sind im Vakuum entlang von Strahlen konstant

Licht

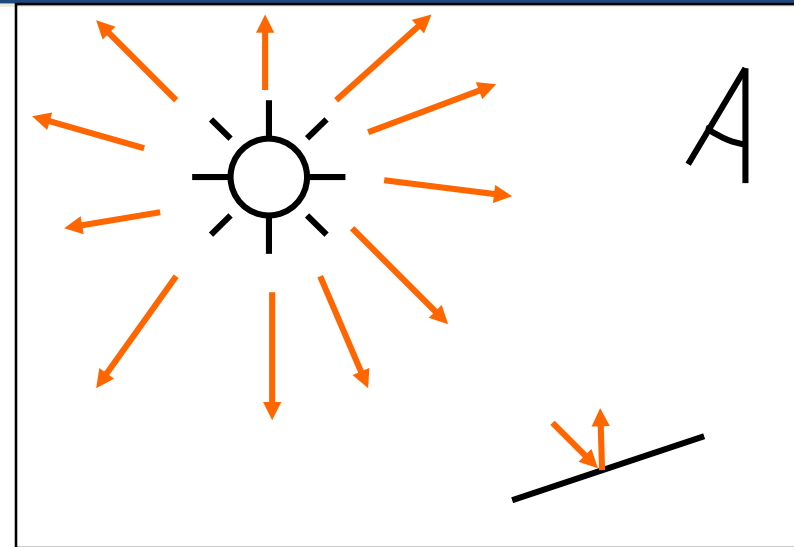
Beleuchtungssimulation



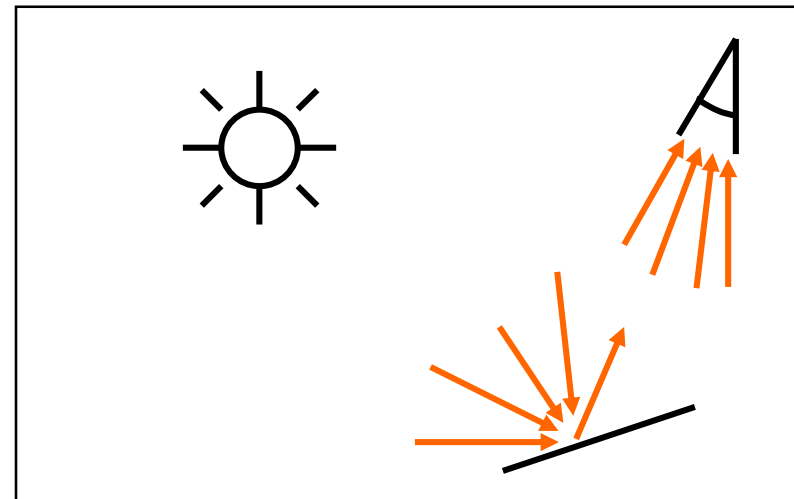
- In vielen Ansätzen zur Beleuchtungs-simulation wird die Strahl- oder Leuchtdichte bestimmt und zur Vereinfachung die Streuung weggelassen
- Photonen durchlaufen dann Pfade von
 - Emission
 - mehrere Reflektionen oder Refraktionen bis hin zur
 - Absorption bzw. Detektion

Man unterscheidet:

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

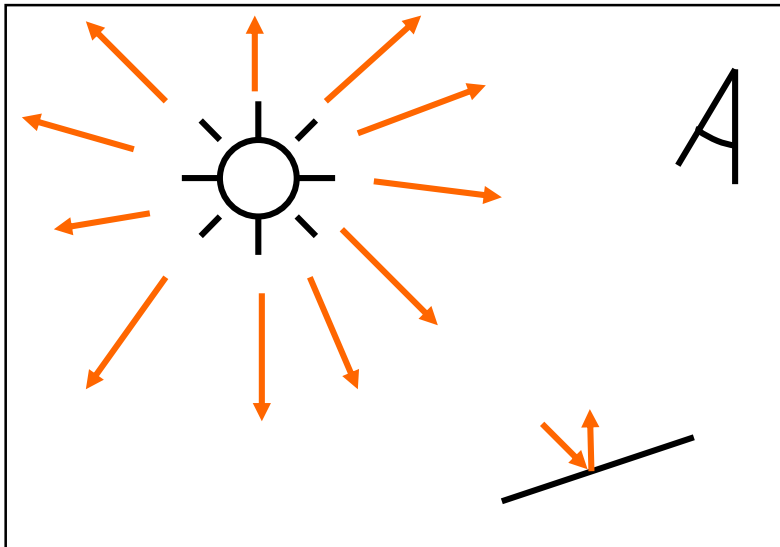


Light Tracing

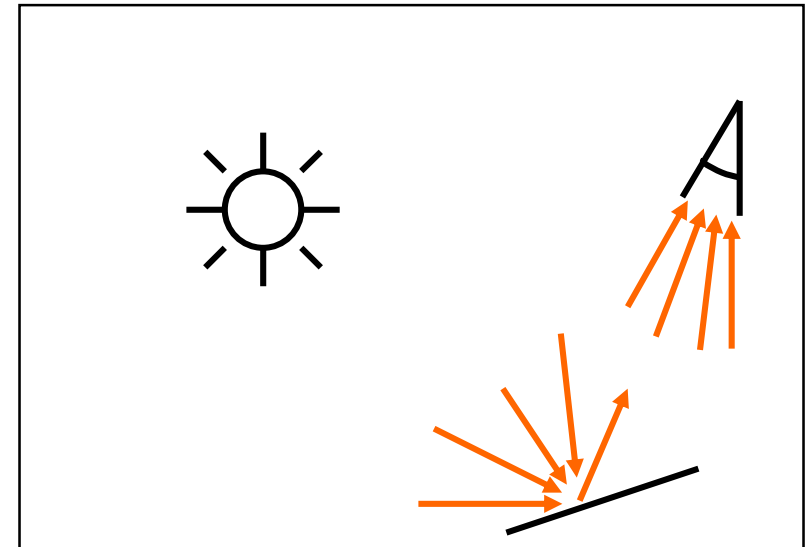


Visibility Tracing

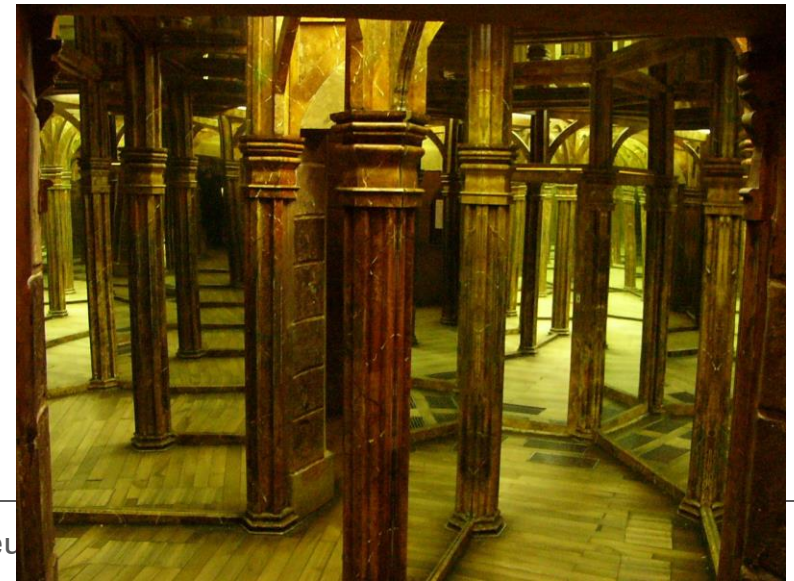
Abtastung entlang von Strahlen



Light Tracing



Visibility Tracing

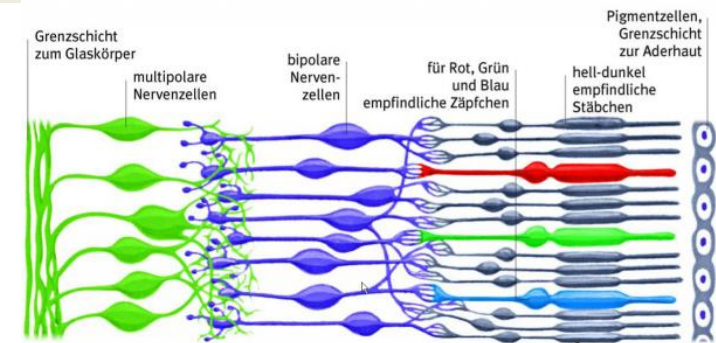


Licht

Diskretisierung des Spektrums



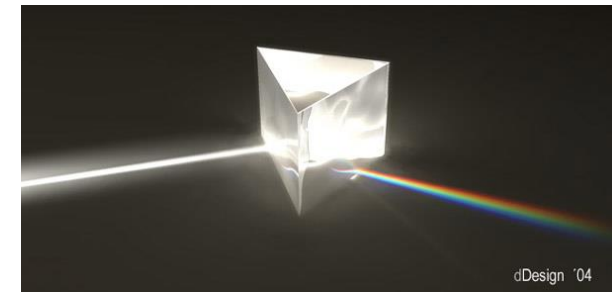
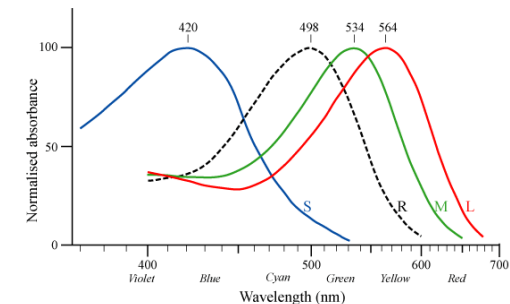
- Einerseits hat das menschliche Auge nur drei verschiedene Farbrezeptoren, so dass drei Farbkanäle für die Repräsentation von Licht ausreichen sollten



Aufbau der Retina mit Visualisierung der Zapfen

Bildquelle: www.jameda.de/gesundheits-lexikon/retina

- Notation: $\ddot{\mathbf{L}} = (R, G, B)$
- 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



verschiedenfarbige LEDs



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



Energiesparlampe



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



Wolfram Glühbirne

- 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

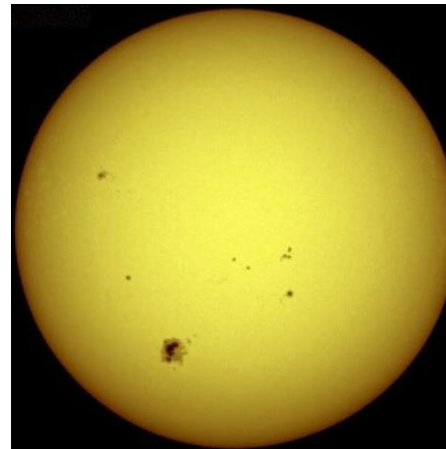
Typ	Lichtausbeute [lm/W]	Lebensdauer [h]	Ra	Startzeit
Glühlampe	5 .. 16	750 .. 1000	>90	Sofort
Halogenlampe ¹	14 .. 25	25 .. 4000	>90	Sofort
weiße Leuchtdiode	10 .. 100 ²	.. 100.000	90	Sofort
Energiesparlampe	35 .. 75	8000 .. 15000	>82	schnell
Leuchtstofflampe	50 .. 105	8000 .. 20000	80 .. 100	schnell
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)

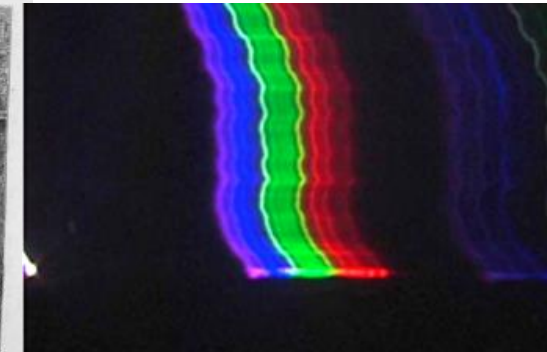
http://www.energie-bewusstsein.de/index.php?page=thema_strom_beleuchtung&p2=leuchtmittel_vergleichstabelle

Natürlich 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

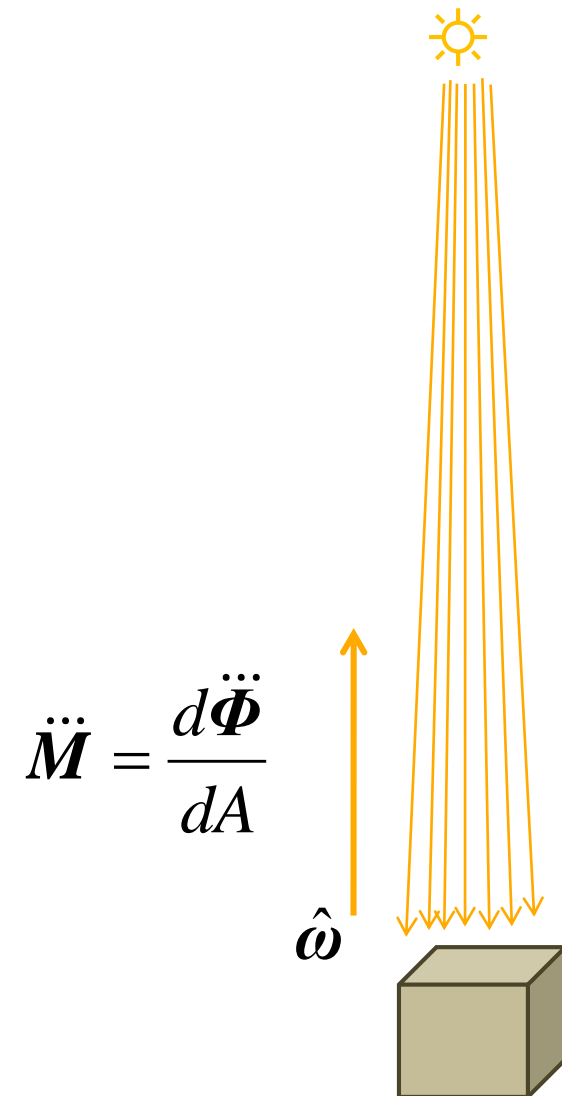
in Natur erfasst
<http://physics.aps.org/articles/v7/5>
und in Phys.Rev.Lett. publiziert:
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.035001>

Lichtquellen

Richtungslichtquelle



- Einfachste Lichtquelle; dient als Approximation sehr weit entfernter Lichtquelle (z. B. die Sonne)
- definiert durch Richtung ω zur Lichtquelle und Lichtausstrahlung $\dot{\mathbf{M}}$ (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

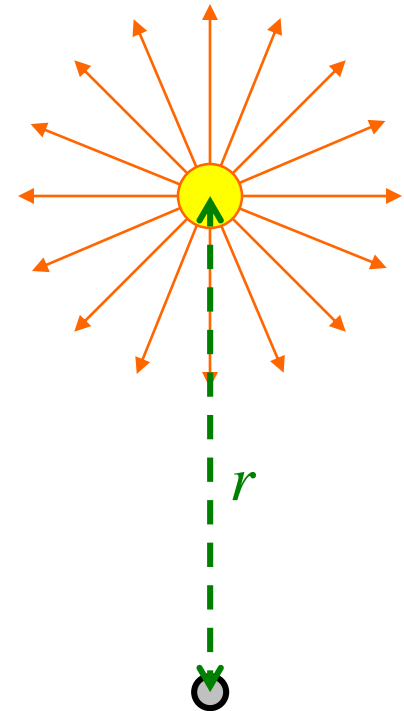


Lichtquellen

Punktlichtquelle

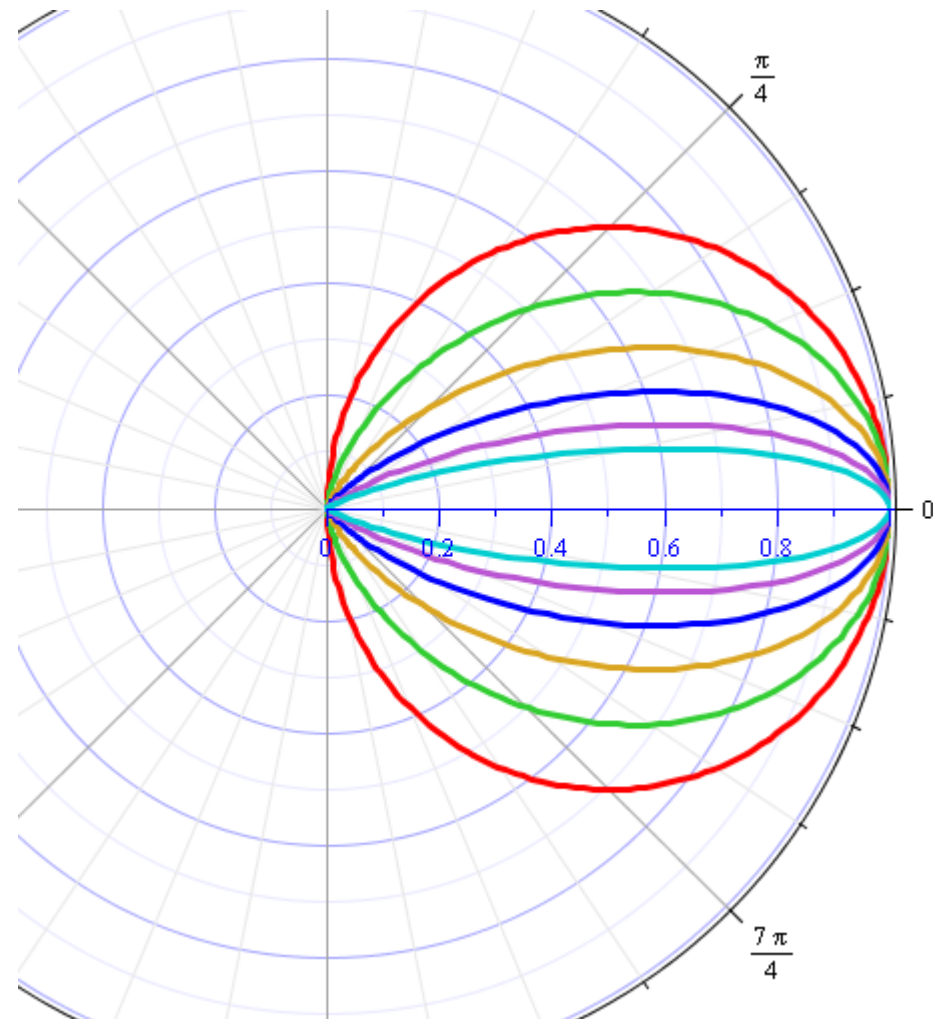
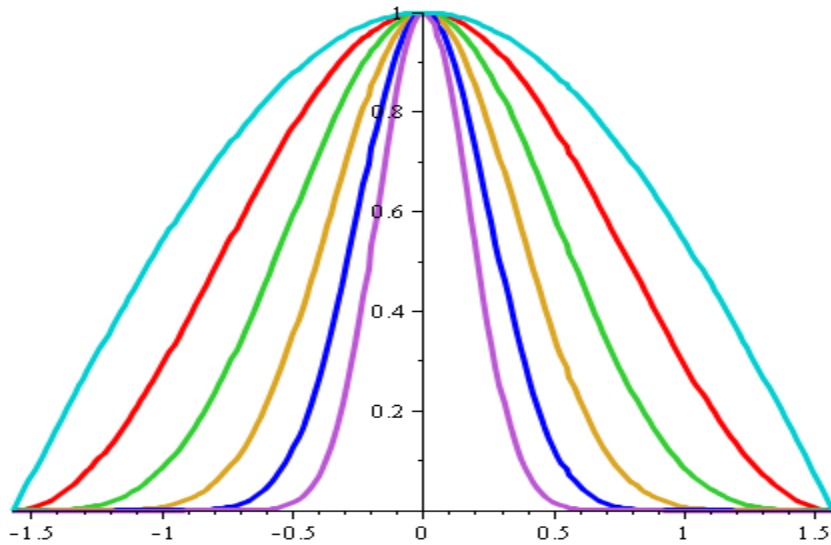


- sendet Licht in alle Richtungen mit gleicher Stärke (isotrop) aus
- Definition: Position, Lichtstärke \mathbf{I} [Candela] (Leistung pro Richtung) unabhängig von Richtung
- weit entfernte Punktlichtquelle verhält sich wie eine Richtungslichtquelle



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

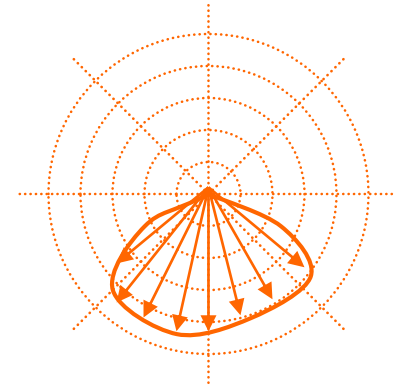
Polarer Plot





Goniometrische Lichtquelle

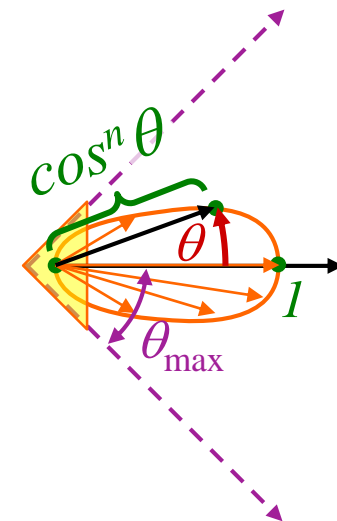
- Lichtstärke abhängig von Abstrahlrichtung: $I(\varphi, \theta)$
- Lichtstärke wird tabelliert



Strahler (engl. spot)

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

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

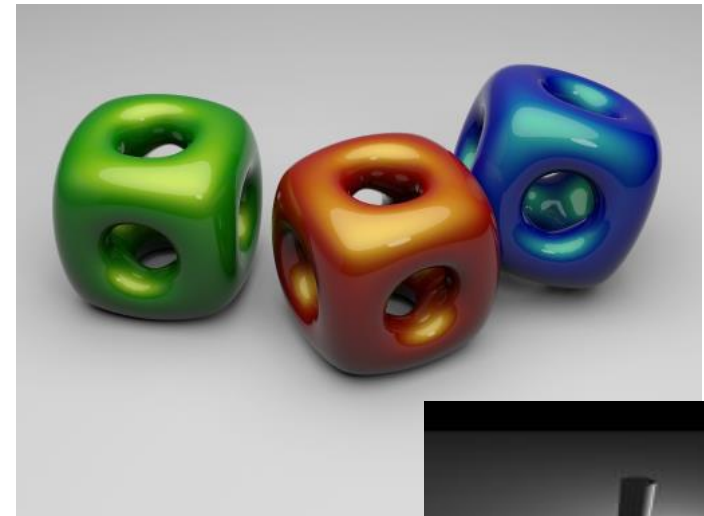


Lichtquellen

Flächenlichtquelle

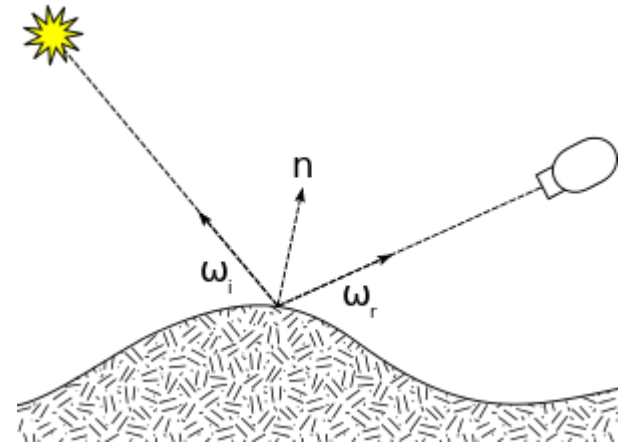


- ◆ allgemeinsten Fall ist die ausgedehnte Lichtquelle
- ◆ Wird durch Oberflächengeometrie und Abstrahlleistung pro Richtung und Fläche definiert – oft isotrop (d.h. an allen Oberflächenpunkten in alle Richtungen gleich hell)
- ◆ aufwendig bei der Simulation; kann durch viele Punktlichtquellen approximiert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

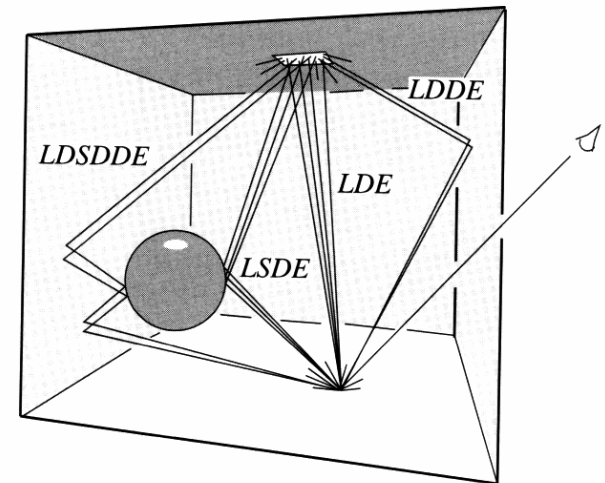


Man unterscheidet

- lokale Beleuchtungsmodelle ... beschreibt 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)

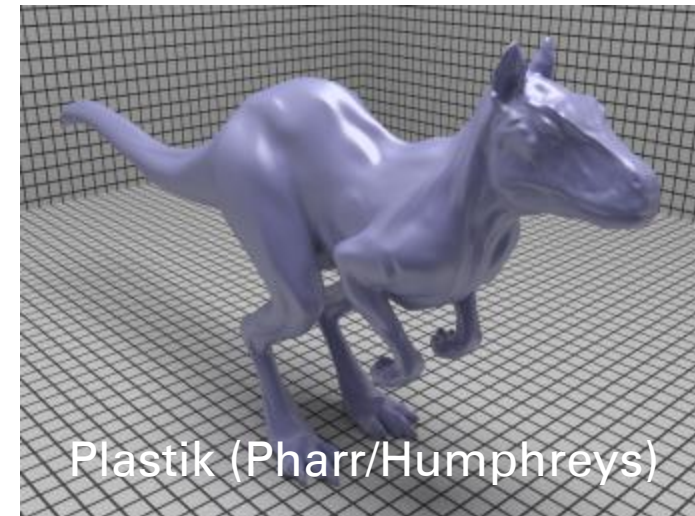


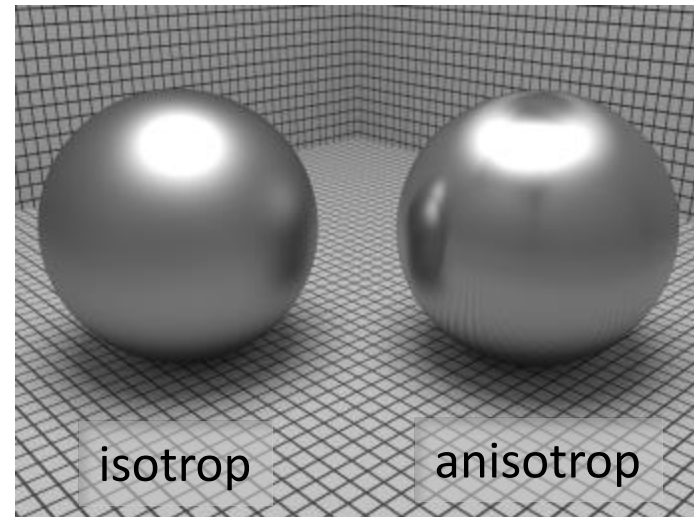
lokales Reflektionsverhalten wird durch BRDF beschrieben



globale Beleuchtungsmodelle berücksichtigen alle Pfade der Lichtausbreitung

Beleuchtungsmodelle lokal – Beispiele I





Brechung und Refraktion nach
den Fresnel'schen Formeln

Beleuchtungsmodelle

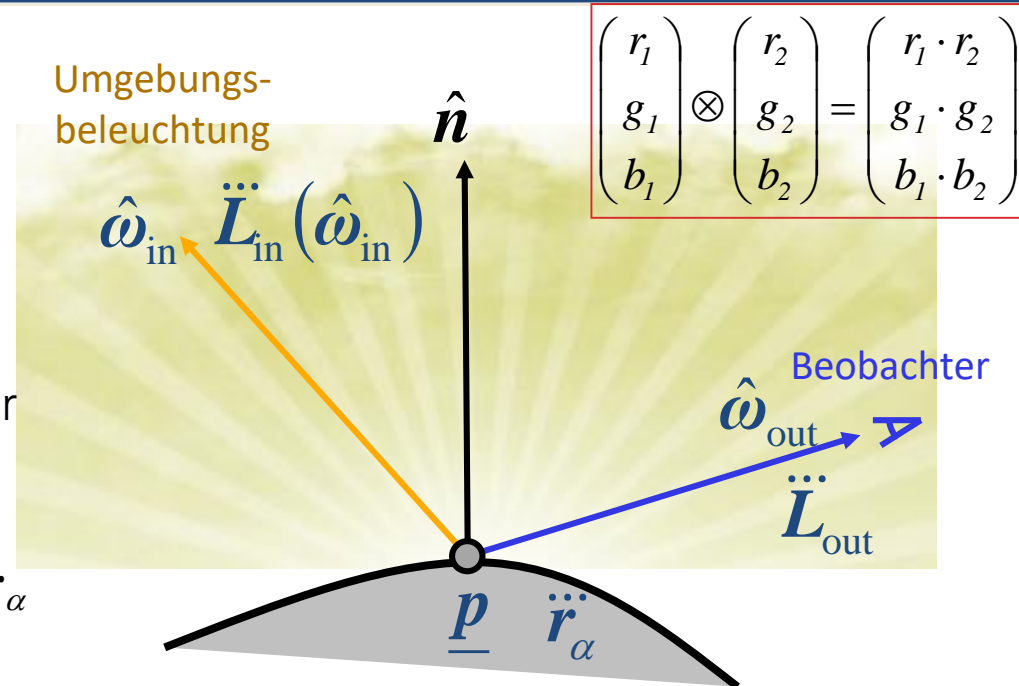
lokal – BRDF – Definition



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

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

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



$$\begin{pmatrix} r_1 \\ g_1 \\ b_1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} r_2 \\ g_2 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \cdot r_2 \\ g_1 \cdot g_2 \\ b_1 \cdot b_2 \end{pmatrix}$$

in Klausur gegeben

$$\underbrace{\underline{L}_{\text{out}}}_{\text{Beob-}} = \int_{\omega_{\text{in}} \in \Omega_+} \underbrace{\underline{f}_{\underline{p}, \underline{n}, \underline{r}}}_{\text{Ober-}}(\underbrace{\omega_{\text{out}}}_{\text{Beob-}}, \underbrace{\omega_{\text{in}}}_{\text{achter}}) \otimes \underbrace{\underline{L}_{\text{in}}}_{\text{Umgebungs-}} \cdot \underbrace{\langle \omega_{\text{in}}, \underline{n} \rangle}_{\text{Ober-}} d\omega_{\text{in}} \underbrace{\omega_{\text{in}}}_{\text{Umgebungs-}}$$

Integration über Halbkugel

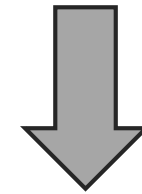
Beleuchtungsmodelle

lokal – BRDF – für Punktlichtquellen



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

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

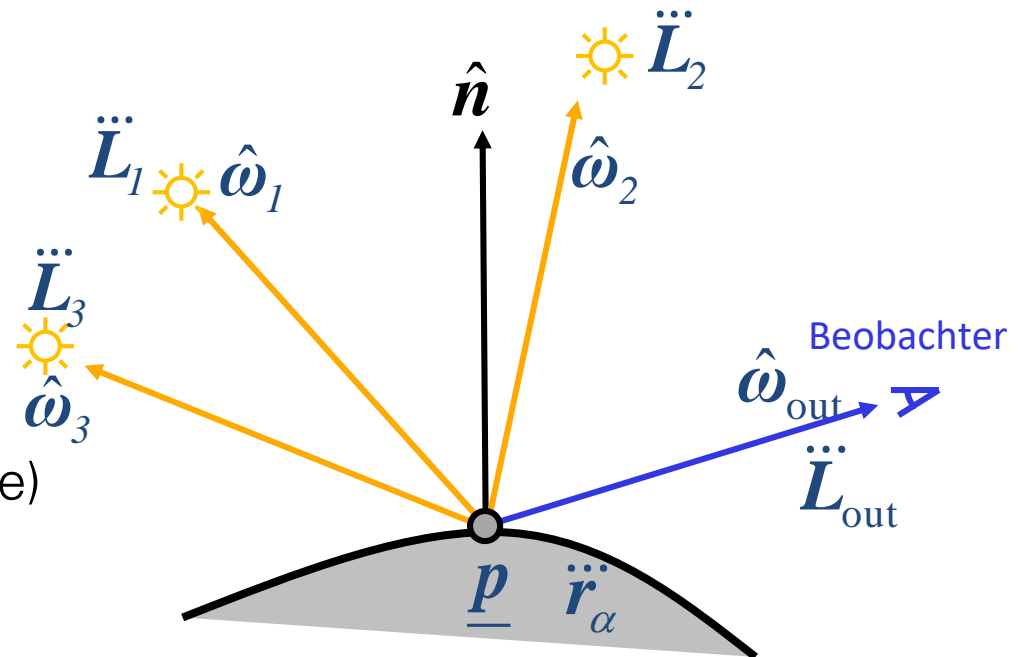


- Im Folgenden betrachten wir die BRDF bei Beleuchtung mit nur einer Punktlichtquelle. Damit kann die Summation weggelassen werden.

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

in Klausur gegeben

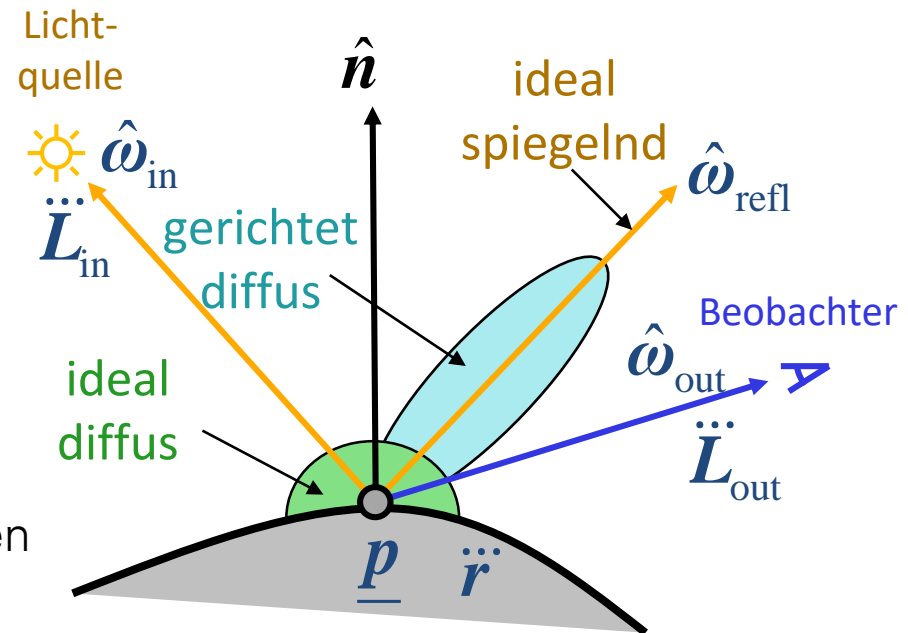
- Die Berechnung der Leuchtdichte für diesen Fall wird auch das lokale Beleuchtungsmodell genannt, weil nur eine (lokale) Reflektion betrachtet wird.



Beleuchtungsmodelle

lokal – Zerlegung

- Das lokale Beleuchtungsmodell wird meist 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 ω_{out} schaut und fällt mit dem Winkel zu ω_{out} ab
 - spiegelnd ... nur ein Beitrag, wenn der Beobachter genau aus ω_{out} schaut



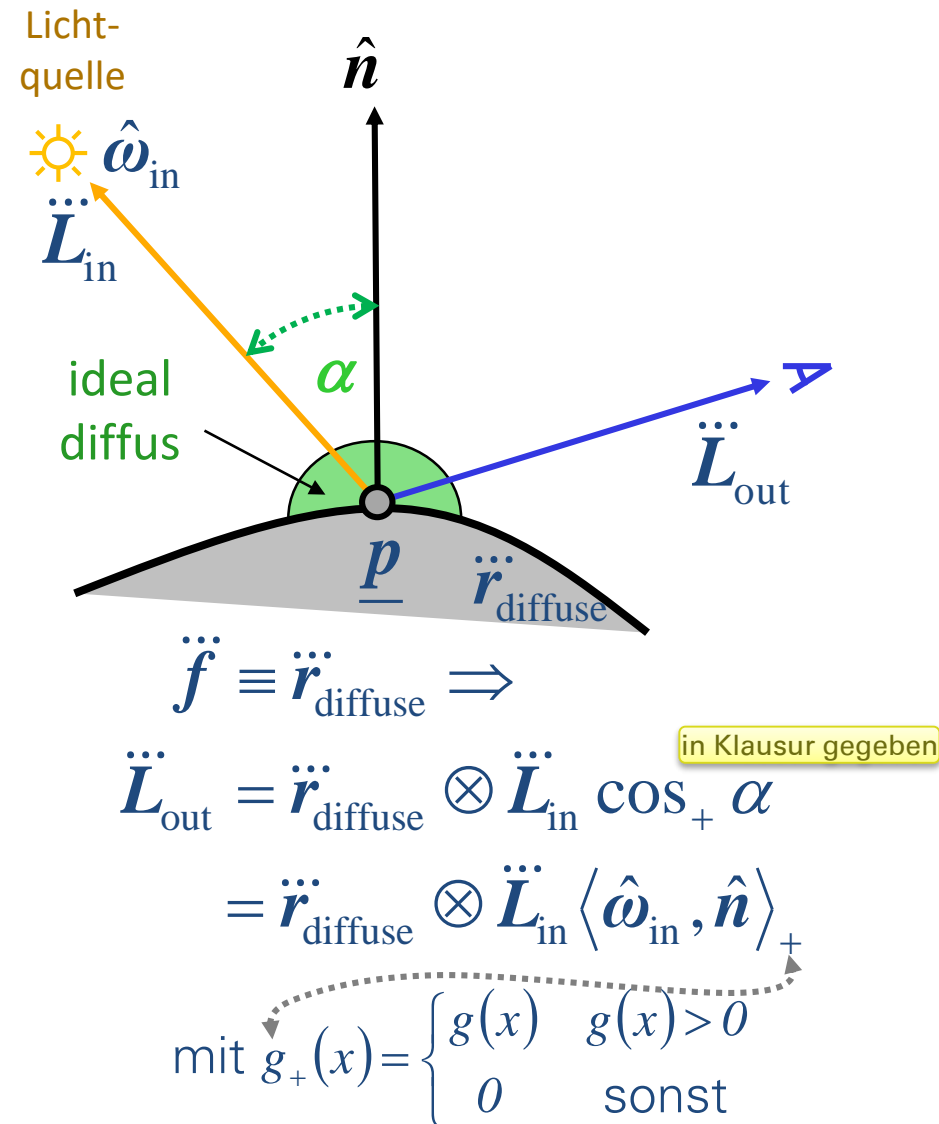
$$\begin{aligned}\hat{\omega}_{\text{refl}} &= \hat{\omega}_{\text{in}} + 2(\langle \hat{n}, \hat{\omega}_{\text{in}} \rangle \hat{n} - \hat{\omega}_{\text{in}}) \\ &= 2\langle \hat{n}, \hat{\omega}_{\text{in}} \rangle \hat{n} - \hat{\omega}_{\text{in}}\end{aligned}$$

Beleuchtungsmodelle

lokal – Diffuse Reflektion



- In allen lokalen Beleuchtungsmodellen wird der diffuse Anteil gleich modelliert
- Die BRDF wird als konstant angenommen und auf eine konstante Farbe gesetzt
- Der Kosinusterm in der Definition der reflektierten Lichtintensität macht die Helligkeit der Oberfläche 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

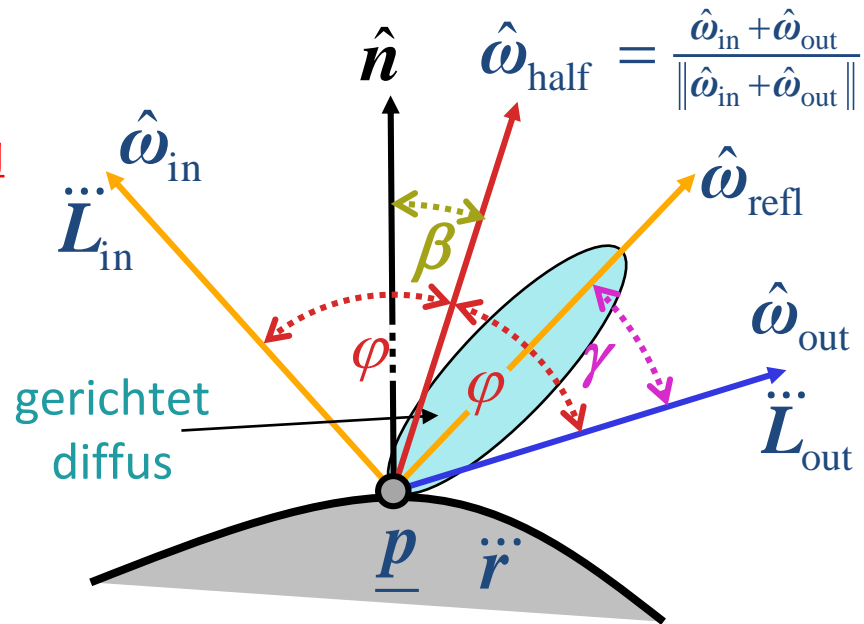


Beleuchtungsmodelle

lokal – Spekulare Reflektion



- Für die spekulare Komponente wurden zuerst das Modell nach Phong und das nach Blinn-Phong (Standardmodell in OpenGL) entwickelt. Später kamen komplexere und physikalisch plausiblere Modelle hinzu.
- Jeweils wird die Glattheit der Oberfläche durch einen Exponenten m , der shininess genannt wird, definiert. Je größer m desto fokussierter die Highlights



$$\underline{\underline{\text{in Klausur gegeben}}}$$

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

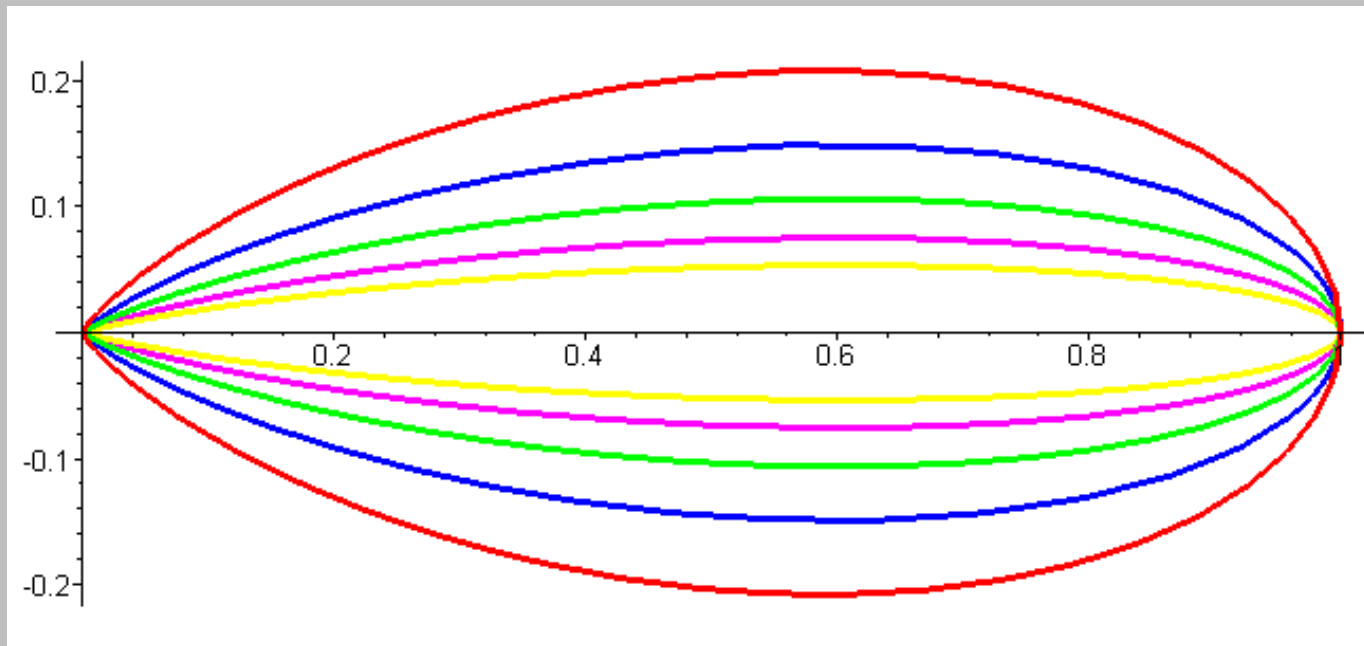
$$\text{mit } v = \begin{cases} 1 & \langle \hat{\omega}_{\text{in}}, \hat{n} \rangle \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

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^8x



Beleuchtungsmodelle

lokal – Phong vs Blinn-Phong

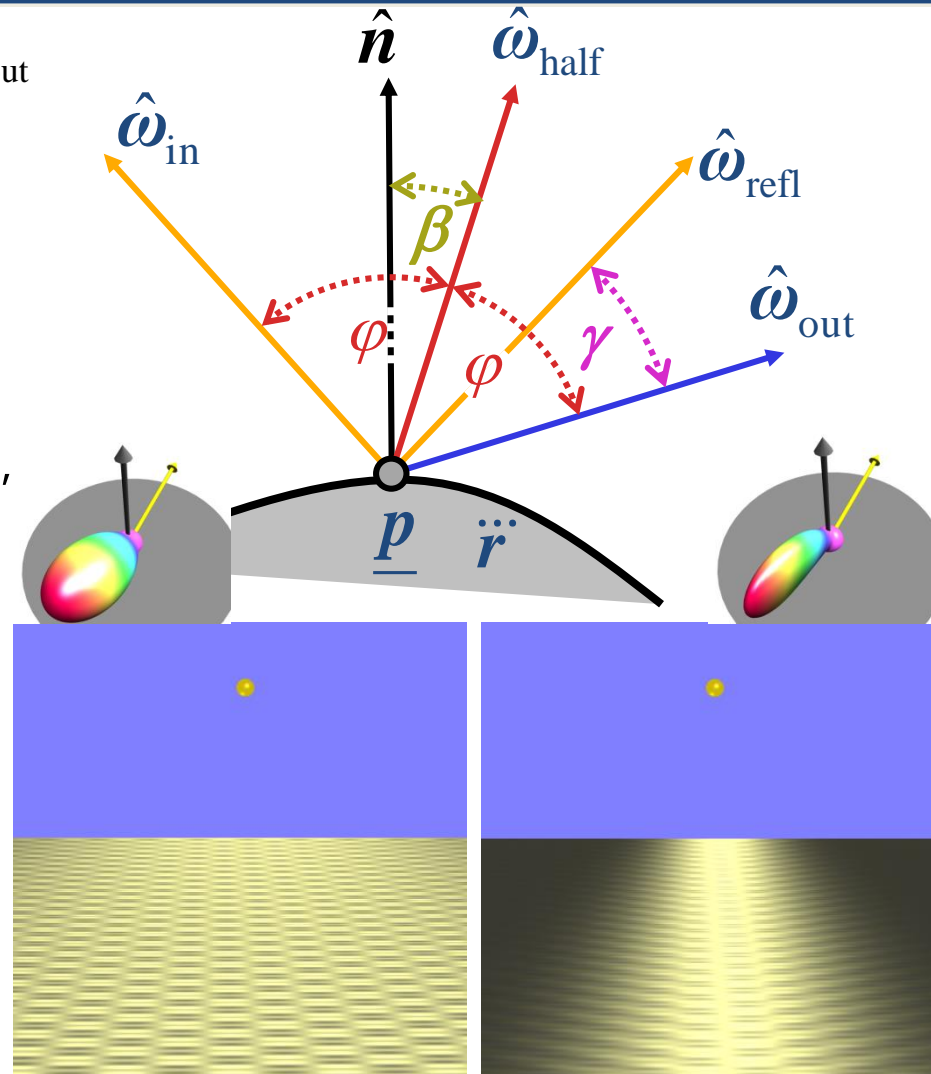


- Liegen die Vektoren \mathbf{n} , $\hat{\omega}_{\text{in}}$ und $\hat{\omega}_{\text{out}}$ in einer Ebene, so gilt

$$\gamma = 2\beta$$

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



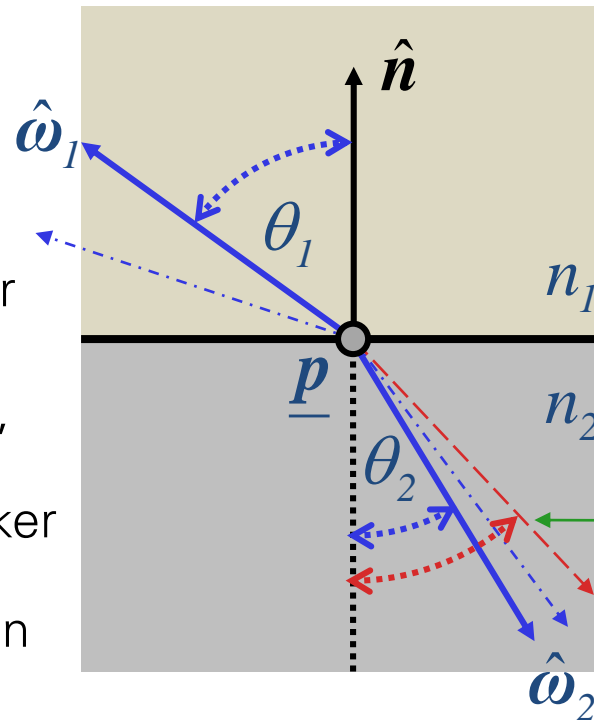
Phong Modell

Blinn-Phong Modell

Beleuchtungsmodell lokal – Refraktion



- Für die Brechung bzw. Refraktion wird meist nur die ideale Brechung nach dem Gesetz von Snellnius 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 reflektiert wird



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

Brechungsgesetz nach Snellnius

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

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

↗ Abschwächung
 ↗ Strahler

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

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

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

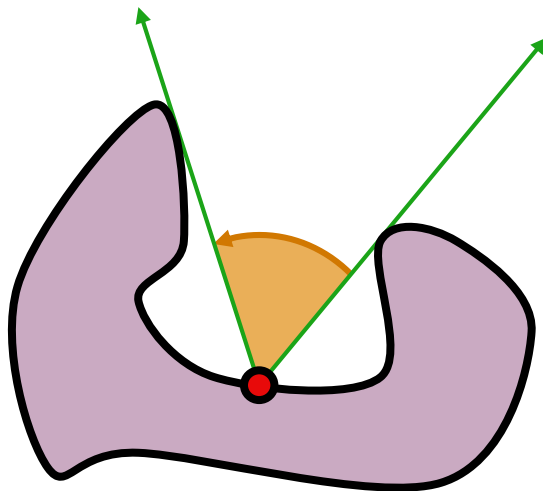
$$spot_i = \begin{cases} (\overrightarrow{P_{pli}V} \odot \hat{s}_{dli})^{s_{rli}}, & c_{rli} \neq 180.0, \overrightarrow{P_{pli}V} \odot \hat{s}_{dli} \geq \cos(c_{rli}) \\ 0.0, & c_{rli} \neq 180.0, \overrightarrow{P_{pli}V} \odot \hat{s}_{dli} < \cos(c_{rli}) \\ 1.0, & c_{rli} = 180.0. \end{cases}$$

in Klausur gegeben

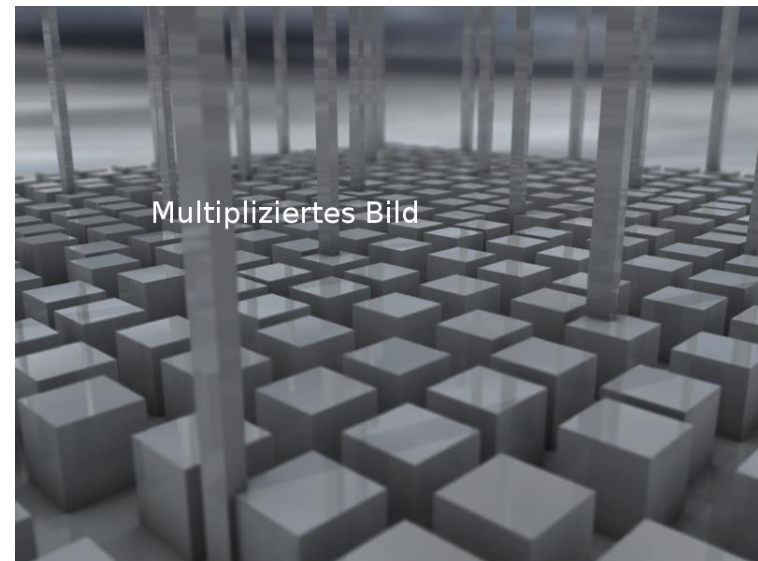
Beleuchtung global – Ambiente Verdeckung



- 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

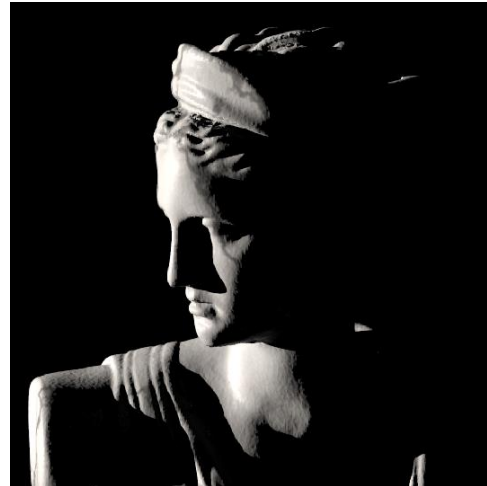


Beleuchtung

global – subsurface scattering



- Bei vielen durchscheinenden Materialien kommt es zu starker Streuung und Absorption
- Die Lichtausbreitung in diesen Materialien kann realistisch approximiert werden, wenn man die Streueffekte nur nahe der Oberfläche mit einem diffusen Transmissionmodell emuliert



diffus



fettarm

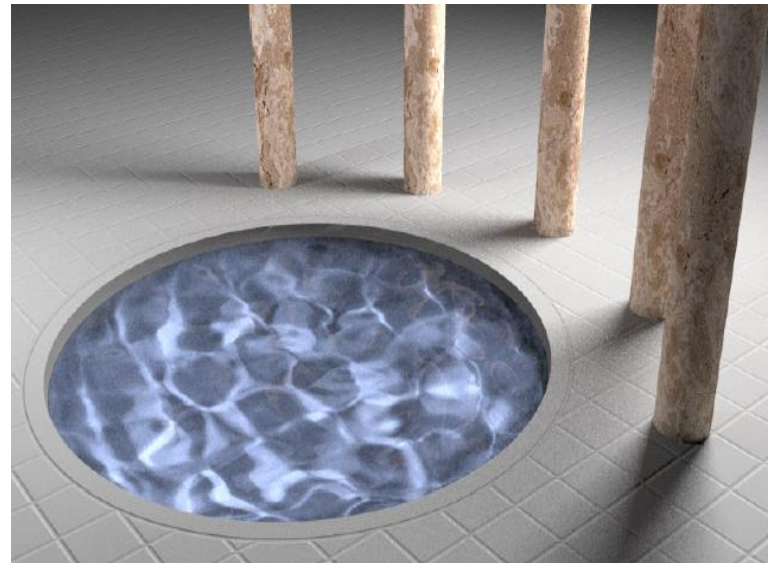
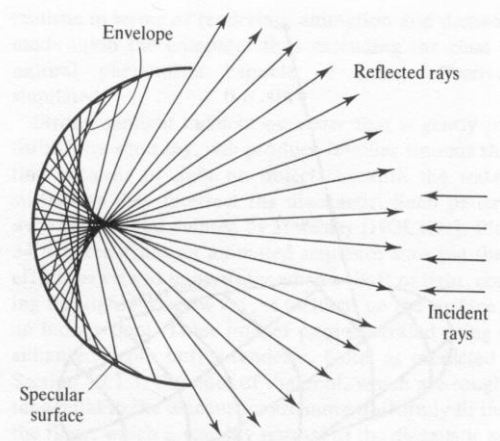


Vollmilch

Beleuchtung global – Kaustiken



- ◆ Gekrümmte transparente 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 Echtzeit-ansatz für Pathtracing

