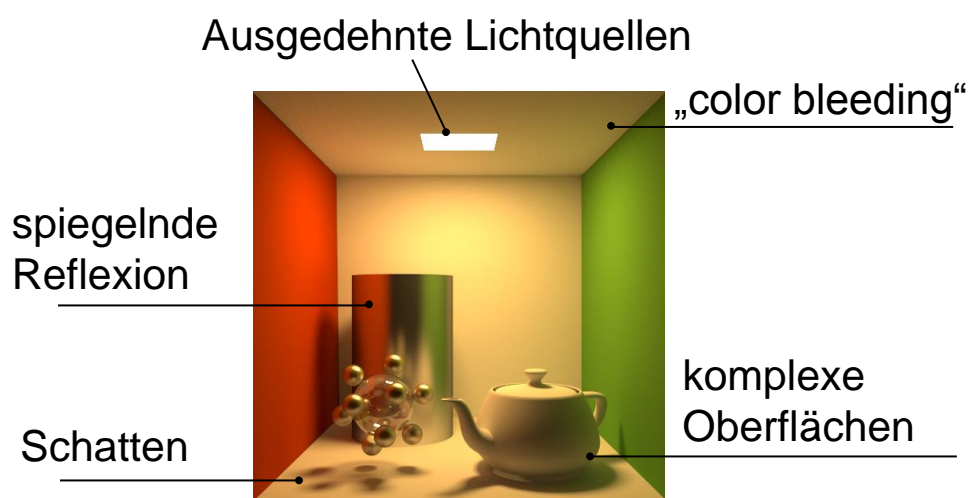


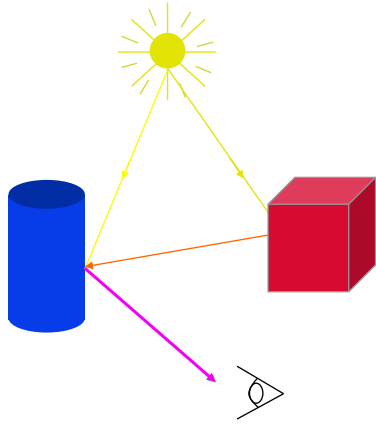
Beleuchtungsmodelle

- lokale Beleuchtungsmodelle
-

Realistische Bilder



Beleuchtung allgemein



- Lichtquelle
- Reflexion
 - mehrfache Reflexionen (globale Beleuchtung)

Lokale Beleuchtungsmodelle berücksichtigen nur Reflexionen 1. Ordnung! ==>

Physikalisch: Licht & Materie

Die physikalischen Prozesse bei der Wechselwirkung von Licht und Materie sind sehr gut verstanden.

- **Licht:** Elektromagnetische Strahlung einer bestimmten spektralen Zusammensetzung. Welle - Teilchen Natur des Lichts.
- **Materie:** Atomare Zusammensetzung mit unterschiedlicher Beweglichkeit der elektrischen Ladungen.

Wie viel Physik braucht die Computer Graphik?

Hypothese: Je komplexer die simulierten physikalischen Modelle, umso realistischer werden die Bilder.

Vermutlich richtig!

- Aber: 1.) Vermutlich sehr hoher Rechenaufwand!
2.) Haben wir genug Physikwissen um photorealistische Bilder zu erzeugen?

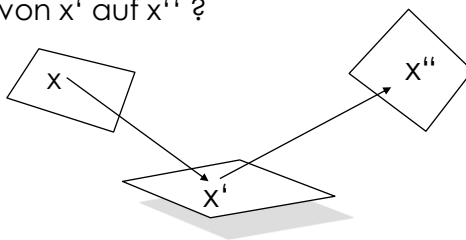
Herausforderung: Vereinfachte (neue?) Modelle, die realistische Bilder erzeugen,

sie müssen nicht alle Aspekte der Physik berücksichtigen.

Fundierte Physikkenntnisse sicher hilfreich!!!!

Beleuchtung allgemein (Kaija '86)

Wie viel Licht fällt von x' auf x'' ?



$$L(x' \rightarrow x'') = E(x' \rightarrow x'') + \int_x f_r(x, x', x'') L(x \rightarrow x') V(x, x') G(x, x') dx$$

$L(x' \rightarrow x'')$ Beleuchtungsstärke von x' auf x''
„radiance“

$E(x' \rightarrow x'')$ emittierte Beleuchtungsstärke von x' auf x''

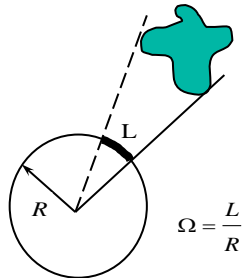
f ist die „BRDF“, die Bidirectional Reflection Distribution Function.

$V(x, x')$ ist die Sichtbarkeit
1 falls x von x' sichtbar ist;
0 sonst;

$G(x, x')$ Geometrieterm

Der Raumwinkel ("solid angle")

2 Dimensionen

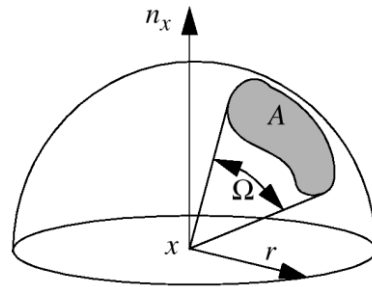


$$\Omega = \frac{L}{R}$$

Kreis = 2π radiant

Der Raumwinkel einer Fläche A von einem Punkt O aus betrachtet, ist anschaulich der Flächeninhalt der Zentralprojektion auf die Einheitskugel mit Zentrum O .

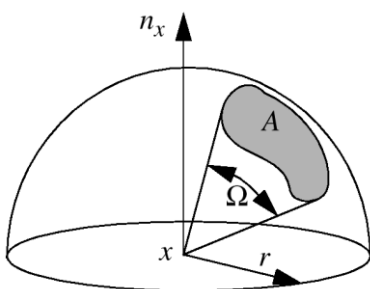
3 Dimensionen



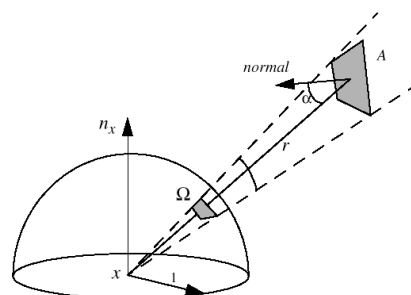
$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

Vollkugel = 4π steradian
= 12,566 sr

Der Raumwinkel ("solid angle")



$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$



$$\Omega = \frac{A \cos \alpha}{r^2}$$

Der Raumwinkel

In Kugelkoordinaten

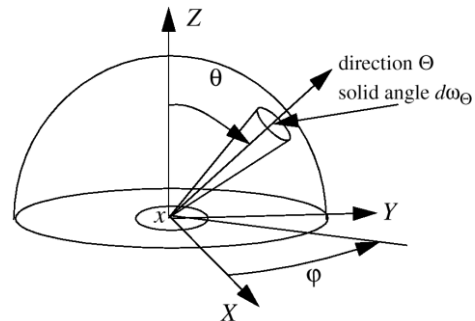
$$x = r \cos \varphi \sin \theta$$

$$y = r \sin \varphi \cos \theta$$

$$z = r \cos \theta$$

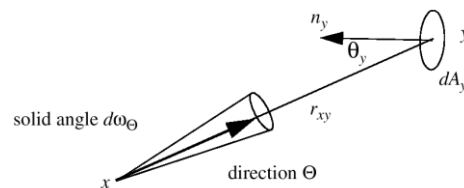
⇒ der differenzielle Raumwinkel

$$d\omega_{\Theta} = \sin \theta \, d\theta d\varphi$$



Der Raumwinkel einer Fläche A

$$d\omega_{\Theta} = \frac{\cos \theta}{r^2} dA$$

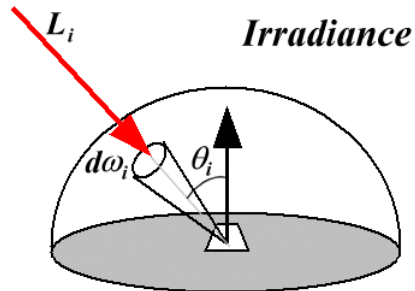


Radiometrie

- **Strahlungsleistung (Radiant Power) P**
Energie pro Zeit [Watt]
- **Strahlungsintensität (Radiant Intensity) I**
Leistung pro Raumwinkel [Watt / sr]
- **Strahlungsdichte (Radiance) L**
Intensität pro bestrahlter Einheitsfläche [Watt / (m² · sr)]
„Licht entlang eines Strahls“
- **Bestrahlstärke (Irradiance) E**
Leistung pro Fläche [Watt / m²]
- **Abstrahlstärke (Radiosity) B**
Leistung pro Fläche [Watt / m²]

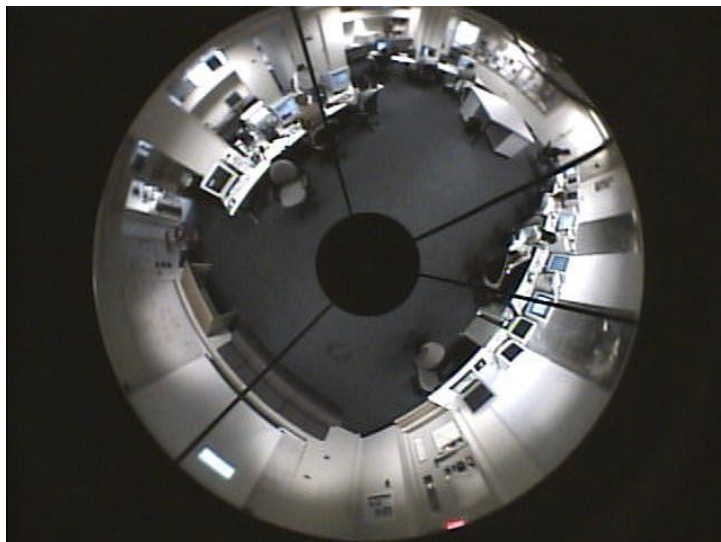
Beleuchtungsstärke „Irradiance“

Die Beleuchtungsstärke ist eine zwei-dimensionale Funktion die das an einem Punkt einfallende Licht beschreibt.



$$E_i = \int_{\Omega_i} L_i \cos \theta_i d\omega_i$$

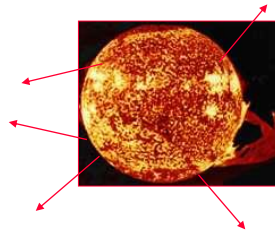
Wie sieht diese Funktion aus?



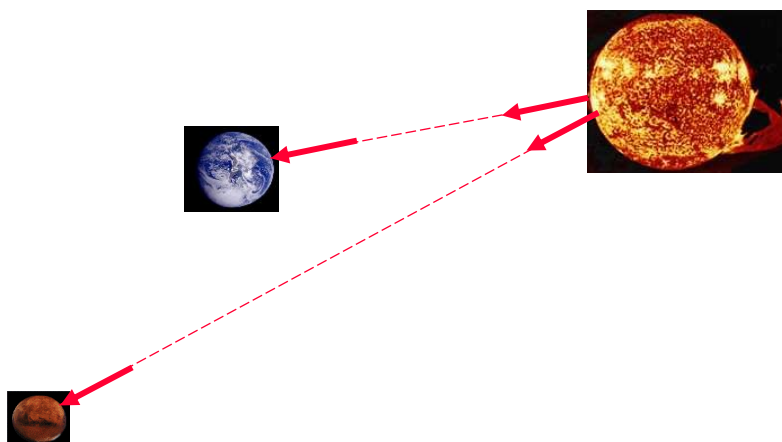
Radiance – ein Beispiel

Die Sonne:

- radiance = Leistung/Fläche. π = 2.05×10^7 W/ m².sr



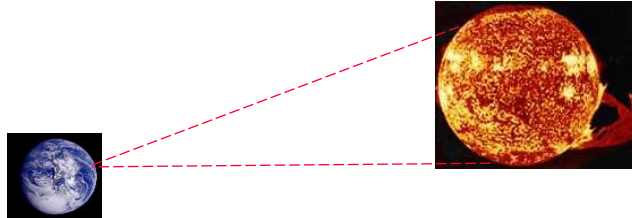
Radiance – ein Beispiel



Die Strahlungsdichte auf der Erde entspricht der auf dem Mars!

Radiance – ein Beispiel

Leistung die auf der Erde pro 1m² ankommt:

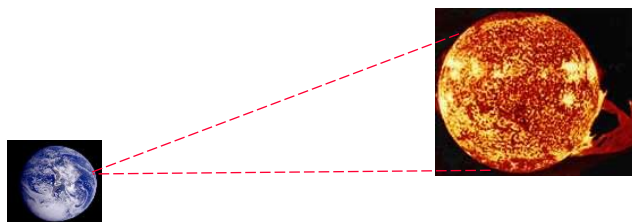


$$P = L \int_{\text{Fläche}} dA \int_{\text{Raumwinkel}} \cos\theta d\omega$$

Annahme: $\cos\theta = 1$ (Sonne im Zenit)

Radiance – ein Beispiel

Leistung die auf der Erde pro 1m² ankommt:



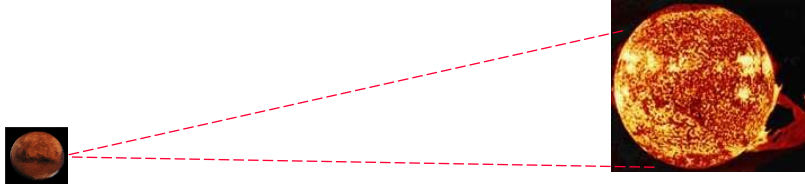
$$P = L * \text{Fläche} * \text{Raumwinkel}$$

$$\text{Raumwinkel} = \text{Fläche}_{\text{Sonne}} / (\text{Distanz}_{\text{Erde}_{\text{Sonne}}})^2 = 6.7 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$$

$$P = (2.05 \times 10^7 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{sr}) \times (1 \text{ m}^2) \times (6.7 \cdot 10^{-5} \text{ sr}) = 1373.5 \text{ Watt}$$

Radiance – ein Beispiel

Leistung die auf dem Mars pro 1m² ankommt:



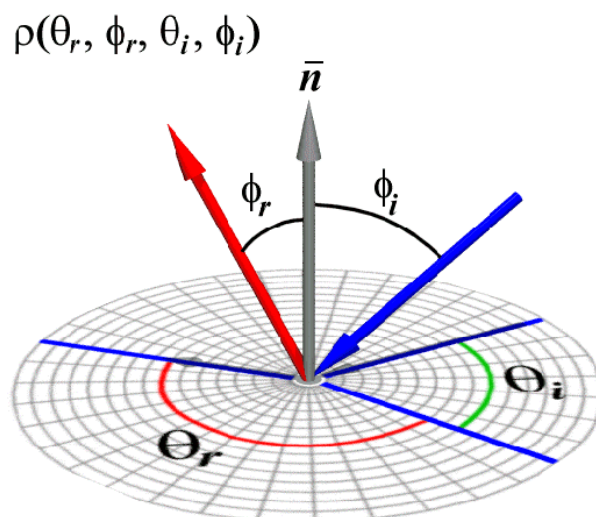
$$P = L * \text{Fläche} * \text{Raumwinkel}$$

$$\text{Raumwinkel} = \text{Fläche}_{\text{Sonne}} / (\text{Distanz}_{\text{Mars}_{\text{Sonne}}})^2 = 2.92 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$$

$$P = (2.05 \times 10^7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{sr}) \times (1 \text{ m}^2) \times (2.92 \cdot 10^{-5} \text{ sr}) = 598.6 \text{ Watt}$$

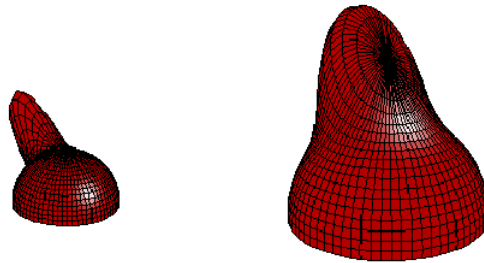
Kombination von einfallendem Licht und Abstrahlungseigenschaft eines Materials ergibt die BRDF

Bidirectional
Reflectance
Distribution
Function



Die Abstrahlung „*radiance*“

Die Abstrahlung ist ebenfalls eine zwei-dimensionale Funktion .

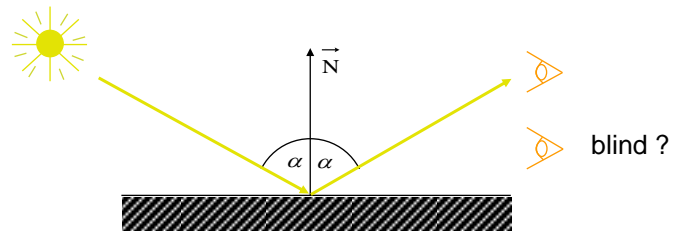


Lokale Beleuchtungsmodelle

Reflexion

A) Reflektierende Flächen

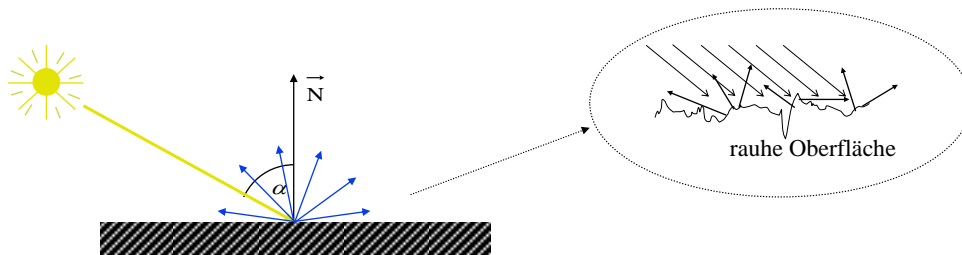
(Einfallswinkel = Ausfallwinkel)



Diese einfache Regel ist nur für eine perfekt spiegelnde Flächen ausreichend.

Reflexion

A) Streuende Flächen



Die Statistik der lokalen Reflexionen kann im Extremfall eine in alle Richtungen homogene Streuung ergeben.

Lokale empirische Beleuchtungsmodelle

1. Umgebungslicht (*Ambient Light*)

$$I_a = r_a \cdot I$$

I_a : ambiente Leuchtdichte

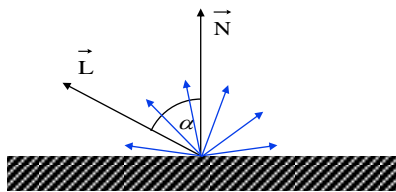
r_a : ambienter Reflexionsgrad

I : Leuchtdichte des einfallenden Lichts

Bemerkung: Notbehelf des lokalen Beleuchtungsmodells für eine globale Erscheinung. Umgebungslicht kann nicht abgeschattet werden.

Ideal diffus reflektiertes Licht

2.) Der Lambert'sche Reflektor oder Strahler.



\vec{L} : Einheitsvektor in Richtung
des einfallenden Lichtes

\vec{N} : Normalenvektor der Oberfläche

I_d : diffuse Leuchtdichte

r_d : diffuser Reflexionsgrad

I : Leuchtdichte des einfallenden Lichts

$$I_d = r_d \cdot I \cdot \cos\alpha, \quad |\alpha| < 90^\circ$$

$$I_d = r_d I \cdot \langle \vec{L} \cdot \vec{N} \rangle, \quad \vec{L} \cdot \vec{N} > 0$$

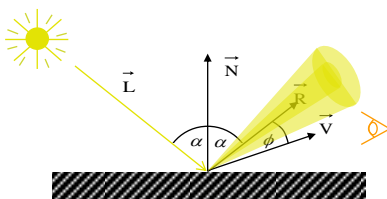
I_d ist unabhängig von der Blickrichtung.

Ideal diffus reflektiertes Licht



3.) Spiegelnde Reflexion (Fresnel'sche Reflexionsgesetz)

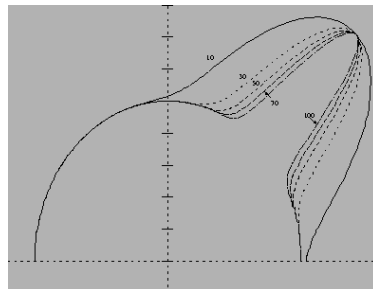
'specular reflection'



$$I_s = r_s \cdot I \cdot \cos^m \phi$$

$$I_s = r_s \cdot I \cdot \langle V \cdot R \rangle^m$$

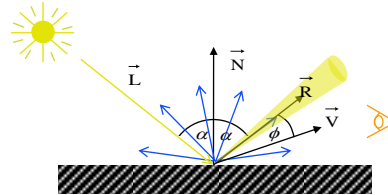
- \vec{L} : Einheitsvektor in Richtung des einfallenden Lichts
- \vec{N} : Normalenvektor der Oberfläche
- \vec{R} : Einheitsvektor in Richtung der spiegelnden Reflexion
- \vec{V} : Einheitsvektor in Richtung des Betrachters
- r_s : spiegelnder Reflexionskoeffizient
- m : Bündelungskoeffizient



$I_d + I_s$ 'diffuse + specular reflection'

Phong'sche Reflexionsmodell

Kombination von diffuser und spiegelnder Reflexion + konstantes Umgebungslicht.



$$I_{Phong} = I_a + I_d + I_s$$

$$I_{Phong} = r_a \cdot I + r_d \cdot I \cdot \langle \vec{N} \cdot \vec{L} \rangle + r_s I \cdot \langle \vec{R} \cdot \vec{V} \rangle^m$$

Oft ist der Reflexionsgrad r auch eine Funktion der Wellenlänge λ des einstrahlenden Lichts, bei manchen Materialien auch vom Einfallswinkel α .

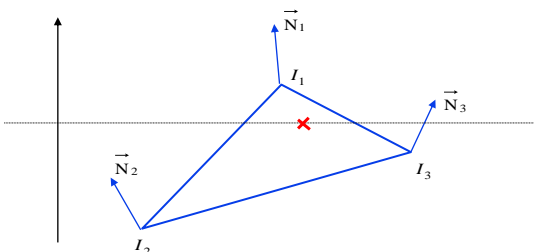
$$I_{Phong} = r_a(\lambda, \alpha) \cdot I + r_d(\lambda, \alpha) \cdot I \cdot \langle \vec{N} \cdot \vec{L} \rangle + r_s(\lambda, \alpha) I \cdot \langle \vec{R} \cdot \vec{V} \rangle^m$$

Wird jedoch in einfachen Systemen meist vernachlässigt!!!

Beleuchten eines Polygons (shading)

Bisher wurden die Modelle entsprechend ihrer Komplexität unterschieden!

Des weiteren unterscheidet die Literatur Algorithmen bezüglich ihrer Methodik beim Schattieren von Polygonen.



Man unterscheidet:

- 1.) Flat Shading
- 2.) Gouraud Shading
- 3.) Phong Shading

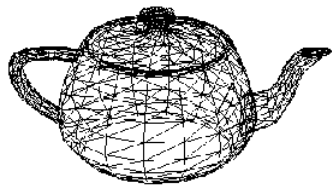
im Detail ==>

Flat Shading

for jedes Polygon

1. berechne im Objektraum das Beleuchtungsmodell an einem Punkt des Polygons;
2. projiziere das Polygon in die Bildebene;
3. fülle das Polygon mit der in Schritt 1 berechneten Farbe.

endfor



Polygonale Daten



Gouraud Shading

1. berechne im Objektraum die Normalenvektoren in den Eckpunkten der Polygone;

for jedes Polygon *do*

2. berechne im Objektraum das Beleuchtungsmodell an allen Eckpunkten des Polygons;
3. projiziere das Polygon in die Bildebene;

for alle vom Polygon überdeckten Scanlinien *do*

4. berechne den linear interpolierten Farbwert an der linken und rechten Kante des Polygons;

for jedes Polygonpixel der Scanlinie *do*

5. berechne den linear interpolierten Farbwert des Pixels.

endfor

endfor

endfor



Phong Shading

1. berechne im Objektraum die Normalenvektoren in den Eckpunkten der Polygone;

for jedes Polygon *do*

2. projiziere die Eckpunkte des Polygons in die Bildebene;

for alle vom Polygon überdeckten Scanlinien *do*

3. berechne im Objektraum den linear interpolierten Polygonpunkt und den linear interpolierten Normalenvektor an der linken und rechten Kante des Polygons;

for jedes Polygonpixel der Scanlinie *do*

4. berechne im Objektraum den linear interpolierten Polygonpunkt und den linear interpolierten Normalenvektor;

5. Normiere den Normalenvektor;

6. berechne im Objektraum das Beleuchtungsmodell und setze das Pixel mit dem berechneten Farbwert.

endfor

endfor

endfor



Mehr Realismus !??

Problem bisheriger Modelle:

Die Welt ist nicht so homogen wie die idealisierten Annahmen.

Dies bedeutet für die Computergraphik:

Die erzeugten Bilder sind unnatürlich homogen.

Wie lässt sich die Unregelmäßigkeit der Welt, wie z.B. die Rauigkeit einer Oberfläche, formal erfassen?

Keine allgemeine Antwort!

Es gibt Ansätze mit mehr Physik und Statistik! !

Cook-Torrance Beleuchtungsmodell (mehr Physik)

Ansatz: Ein Modell für die Oberflächenrauheit erstellen und dann in das Beleuchtungsmodell mit einbeziehen.

Das Phong Modell als Startpunkt!

$$I_{Phong} = r_a(\lambda, \alpha) \cdot I + r_d(\lambda, \alpha) \cdot I_L \cdot \vec{N} \cdot \vec{L} + r_s(\lambda, \alpha) I_L \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^m$$

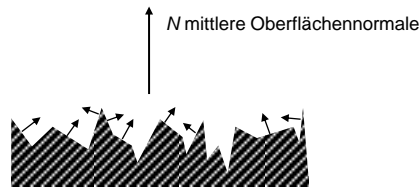
$$I_{Phong} = r_a(\lambda) \cdot I + I_L \cdot \left(r_d(\lambda) \cdot \vec{N} \cdot \vec{L} + \underbrace{r_s(\lambda, \alpha) \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^m}_{\text{wird verändert}} \right)$$

Die Verbesserungen berücksichtigen zwei Aspekte:

- Eine Statistik der Rauheit.
- Die Selbstabschattung einer rauen Oberfläche.

Cook-Torrance Modell (2)

Das Oberflächenmodell: Die Fläche sei perfekt reflektierend und bestehe aus V-förmigen Vertiefungen. Die Steigung der einzelnen Facetten sei Normalverteilt.

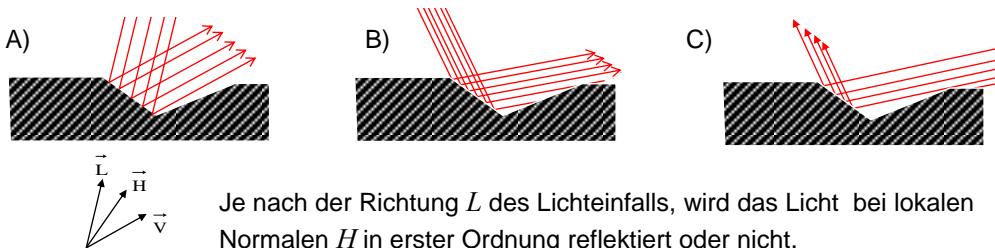


- $D(\alpha)$: sei der proportionale Flächenanteil in Richtung α
 α : sei der Winkel zur mittleren Normalen
 m : sei die mittlerer Quadratische Steigung der Facetten

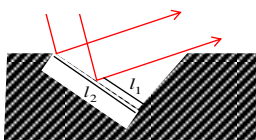
$$\Rightarrow D = \frac{1}{4m^2 \cos^4 \alpha} \exp\left(-\frac{\tan^2 \alpha}{m^2}\right)$$

Cook-Torrance Modell (3)

Selbstabschattung: Wenn Licht auf eine raue Fläche fällt, wird je nach Einfallswinkel nicht alles direkt reflektiert. (Mehrfache Reflexionen werden hier nicht berücksichtigt.)



Es wird der reflektierende Anteil G bestimmt.



$$G = 1 - \frac{l_1}{l_2}$$

A) $G = 1$

B) $G = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot V)}{V \cdot H}$

C) $G = \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{V \cdot H}$

Das Cook-Torrance Modell (vereinfacht)

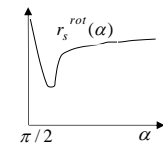
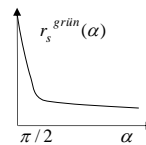
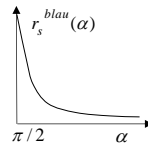
Ansatz: Ein Modell für die Oberflächenrauigkeit erstellen und dann in das Beleuchtungsmodell mit einbeziehen.

$$I_{Phong} = r_a(\lambda) \cdot I + I_L \cdot \left(r_d(\lambda) \cdot \vec{N} \cdot \vec{L} + \underbrace{r_s(\lambda, \alpha) \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^m}_{\text{wird verändert}} \right)$$

$$\underbrace{r_s(\lambda, \alpha) \cdot D \cdot G}$$

Für die einzelnen Materialien muß nun $r_s(\lambda, \alpha)$ bestimmt werden.

Z.B. poliertes Kupfer



Rob Cook's Vasen



Aus: Cook, Torrance 1981

Reflexionseigenschaften verschiedenster Materialien

BISHER:

- 1.) Entwickeln eines Modells
(physikalisches Theorie)
- 2.) Messungen
- 3.) Anpassen der Modellparameter

====> Materialbeschreibung

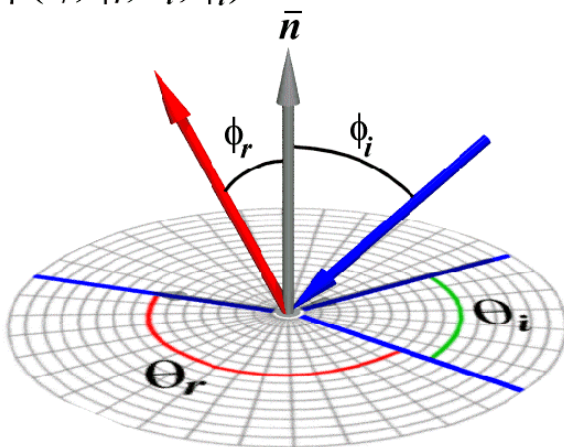
Zukünftig ??:

- 1.) Messungen
- 2.) Entwickeln eines Modells, welches die
Messungen am besten beschreibt
(Problemspezifische Modelle, hier für
Computer Graphik).

==> Materialbeschreibung

Es wird versucht, die BRDF aus Beispieldaten
experimentell zu bestimmen (approximieren)!?

$$\rho(\theta_r, \phi_r, \theta_i, \phi_i)$$



Bei bekannter Geometrie und
bekanntem Lichteinfall,

muss über die verschiedenen
Blickrichtungen die Lichtemission
gemessen werden.

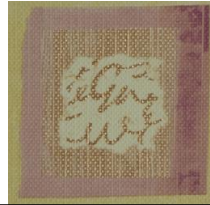
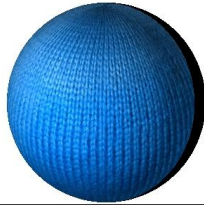
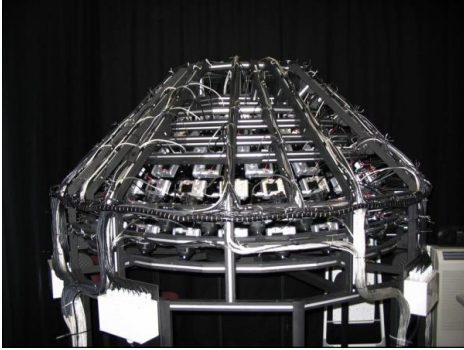
Es müssen auch die statistischen
Schwankungen der BRDF bestimmt
werden.

Eine allgemeine Strategie zur
Vermessung der BRDF gibt es
noch nicht!!!



RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT

Arbeitsgruppe: Prof. Reinhard Klein
<http://btf.cs.uni-bonn.de>



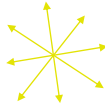
Licht und Farbe

Verschiedene Lichtquellen

1. Umgebungslicht (*ambient light*)

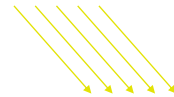
physikalisch keine Lichtquelle, Ersatz für globale Beleuchtungsrechnung!

2. Punktlichtquelle



3. Richtungslichtquelle (*directional light*)

meist als Punktlichtquelle im Unendlichen simuliert.



4. Diffuse Flächenlichtquelle



5. Strahler



Bei Phong Shading meist nicht berücksichtigt!