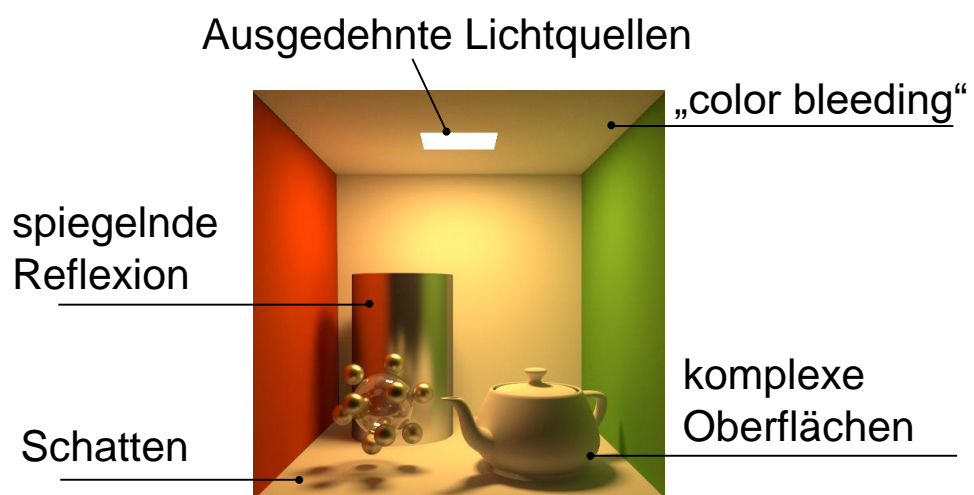


## Beleuchtungsmodelle

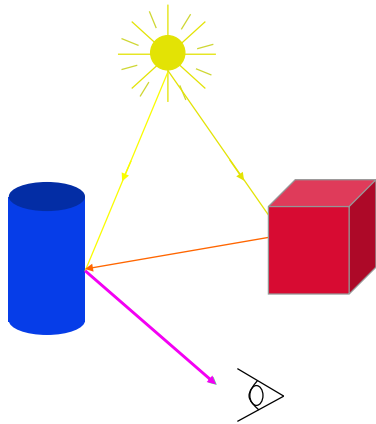
- lokale Beleuchtungsmodelle
- 

## Realistische Bilder



## Beleuchtung allgemein

3



- Lichtquelle
- Reflexion
  - mehrfache Reflexionen (globale Beleuchtung)

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

## Physikalisch: Licht & Materie

4

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?

5

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,

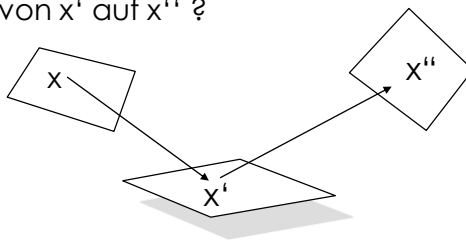
sie müssen nicht alle Aspekte der Physik berücksichtigen.

Fundierte Physikkenntnisse sicher hilfreich!!!!

## Beleuchtung allgemein (Kaija '86)

6

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.

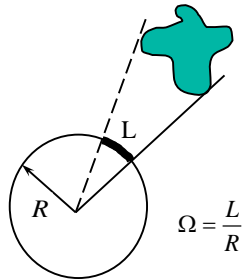
$V(x, x')$  ist die Sichtbarkeit  
1 falls  $x$  von  $x'$  sichtbar ist;  
0 sonst;

$G(x, x')$  Geometrieterm

# Der Raumwinkel ("solid angle")

7

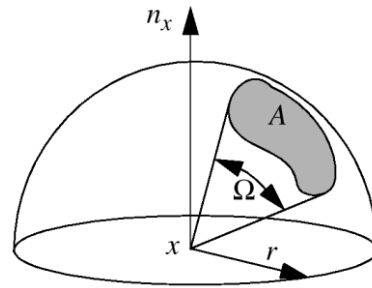
2 Dimensionen



Kreis =  $2\pi$  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

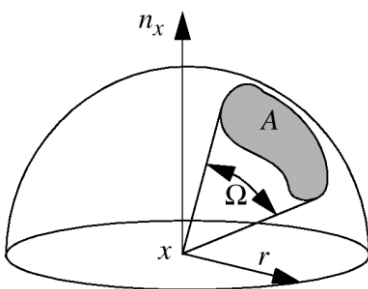


$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

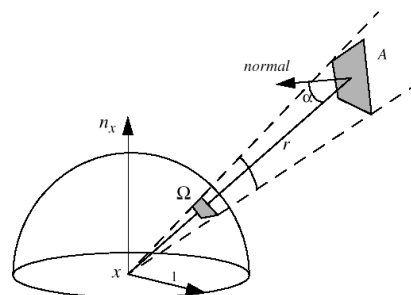
Vollkugel =  $4\pi$  steradian  
= 12,566 sr

# Der Raumwinkel ("solid angle")

8



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



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

# Der Raumwinkel

9

In Kugelkoordinaten

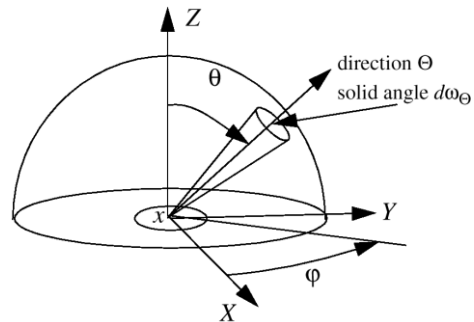
$$x = r \cos \varphi \sin \theta$$

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

$$z = r \cos \theta$$

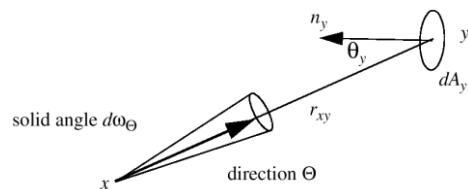
⇒ der differenzielle Raumwinkel

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



Der Raumwinkel einer Fläche A

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



# Radiometrie

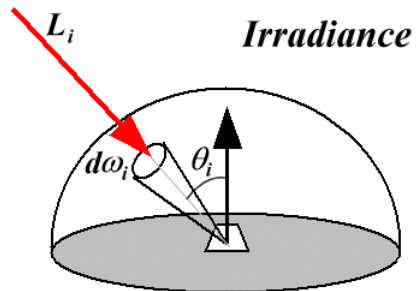
10

- **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 / (m<sup>2</sup> · sr) ]  
„Licht entlang eines Strahls“
- **Bestrahlstärke ( Irradiance ) E**  
Leistung pro Fläche [ Watt / m<sup>2</sup>]
- **Abstrahlstärke ( Radiosity ) B**  
Leistung pro Fläche [ Watt / m<sup>2</sup>]

## Beleuchtungsstärke „Irradiance“

11

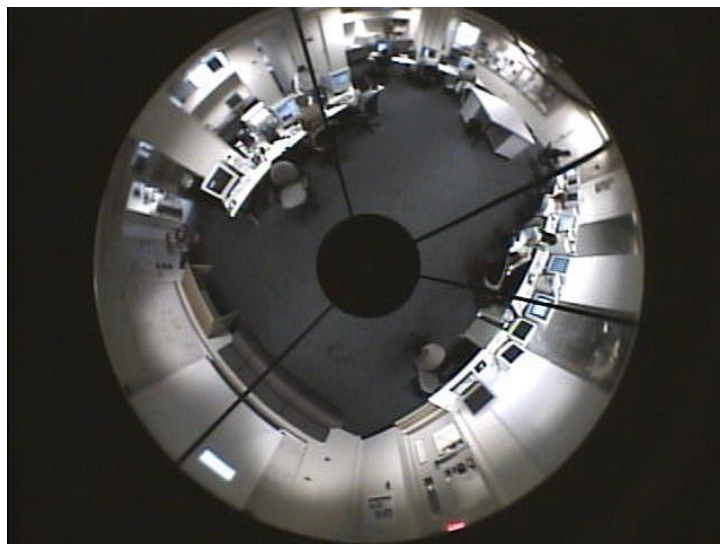
Die Beleuchtungsstärke ist eine zwei-dimensionale Funktion die das an einem Punkt einfallende Licht beschreibt.



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

Wie sieht diese Funktion aus?

12

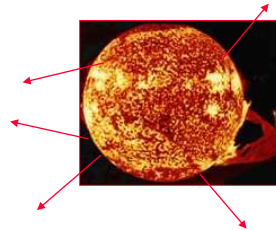


## Radiance – ein Beispiel

13

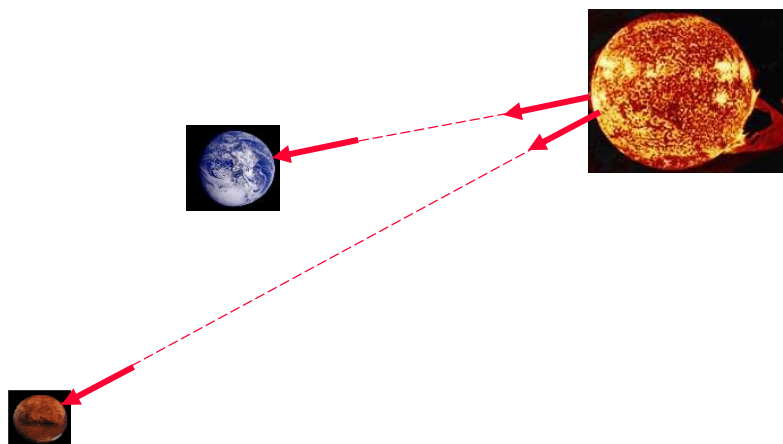
Die Sonne:

- radiance = Leistung/Fläche.π =  $2.05 \times 10^7 \text{ W/ m}^2.\text{sr}$



## Radiance – ein Beispiel

14

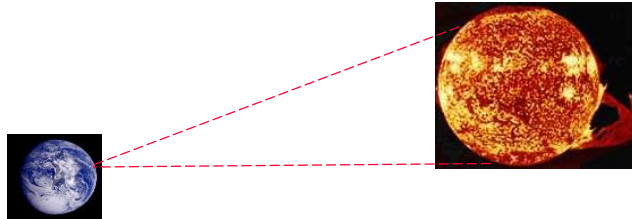


Die Strahlungsdichte auf der Erde entspricht der auf dem Mars!

## Radiance – ein Beispiel

15

Leistung die auf der Erde pro 1m<sup>2</sup> ankommt:



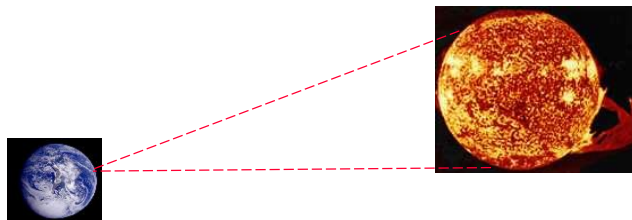
$$P = L \int_{\text{Fläche}} dA \int_{\text{Raumwinkel}} \cos \theta d\omega$$

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

## Radiance – ein Beispiel

16

Leistung die auf der Erde pro 1m<sup>2</sup> ankommt:



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

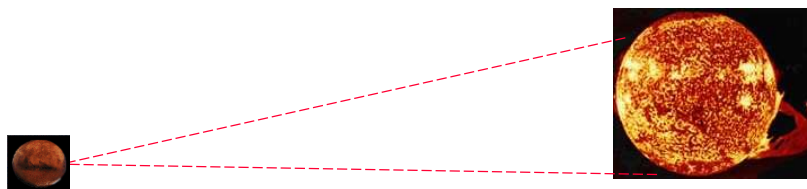
$$\text{Raumwinkel} = \text{Fläche}_{\text{Sonne}} / (\text{Distanz}_{\text{Erde}_{\text{Sonne}}})^2 = 6.7 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$$

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



## Radiance – ein Beispiel

Leistung die auf dem Mars pro  $1\text{m}^2$  ankommt:



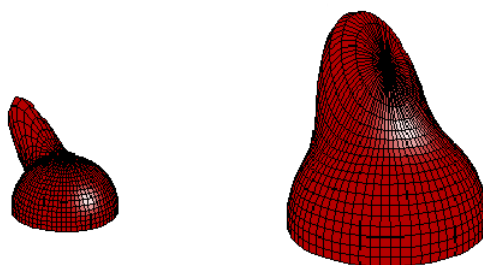
$$P = L * \text{Fläche} * \text{Raumwinkel}$$

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

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

## Die Abstrahlung „radiance“

Bei fixer Einstrahlungsrichtung ist die Abstrahlung ist eine zwei-dimensionale Funktion .

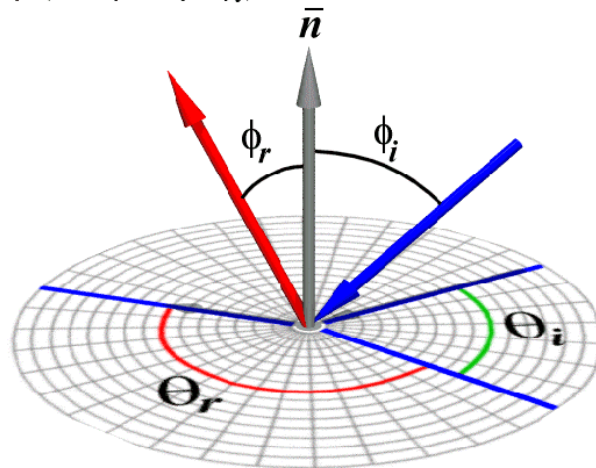


Kombination von einfallendem Licht und Abstrahlungseigenschaft eines Materials ergibt die BRDF

19

Bidirectional  
Reflectance  
Distribution  
Function

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



## Lokale Beleuchtungsmodelle

Radikale Vereinfachung des Problems. Minimaler Rechenaufwand führt zu minimaler Bildqualität.

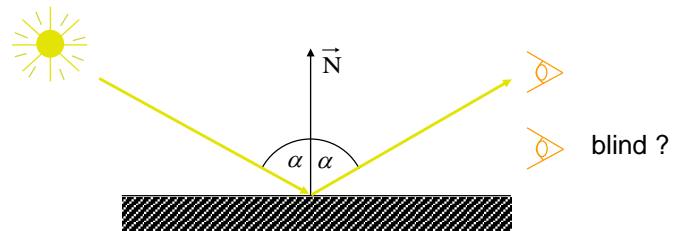
20

# Reflexion

21

## A) Reflektierende Flächen

(Einfallswinkel = Ausfallwinkel)

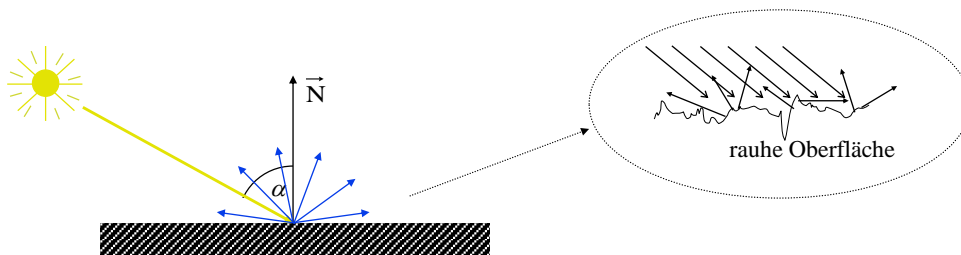


Diese einfache Regel ist nur für eine perfekt spiegelnde Flächen ausreichend.

# Reflexion

22

## A) Streuende Flächen (Reflexion in viele Richtungen)



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

# Lokale empirische Beleuchtungsmodelle

23

## 1. Umgebungslicht (*Ambient Light*)

$$I_a = r_a \cdot I$$

$I_a$  : ambiente Leuchtdichte

$r_a$  : ambierter Reflexionsgrad

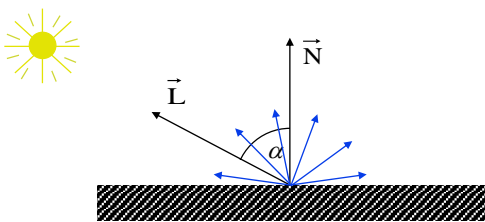
$I$  : Leuchtdichte des einfallenden Lichts

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

## Ideal diffus reflektiertes Licht

24

### 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.

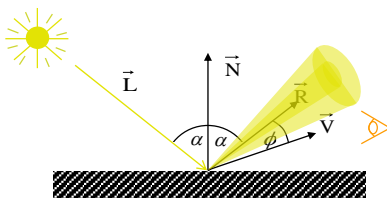
# Ideal diffus reflektiertes Licht

25



## 3.) Spiegelnde Reflexion (Fresnel'sche Reflexionsgesetz) <sup>26</sup>

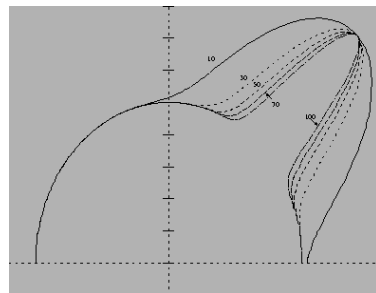
*'specular reflection'*



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

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

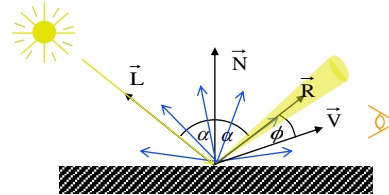
- $\vec{L}$  : Einheitsvektor in Richtung des einfallenden Lichts
- $\vec{N}$  : Normalenvektor der Oberfläche
- $\vec{R}$  : Einheitsvektor in Richtung der spiegelnden Reflexion
- $\vec{V}$  : Einheitsvektor in Richtung des Betrachters
- $r_s$  : spiegelnder Reflexionskoeffizient
- $m$  : Bündelungskoeffizient



$I_d + I_s$  *'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  $\lambda$  des einstrahlenden Lichts, bei manchen Materialien auch vom Einfallswinkel  $\alpha$ .

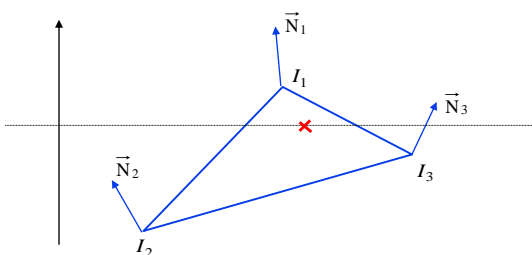
$$I_{Phong} = r_a(\lambda, \alpha) \cdot I + r_d(\lambda, \alpha) \cdot I \cdot \langle \vec{N} \cdot \vec{L} \rangle + r_s(\lambda, \alpha) I \cdot \langle \vec{R} \cdot \vec{V} \rangle^m$$

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 ==>

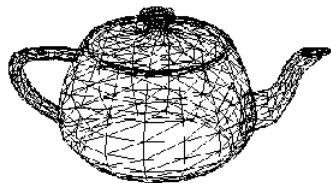
## Flat Shading

29

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

30

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

31

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*



Disney.com.br



32



## 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!

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

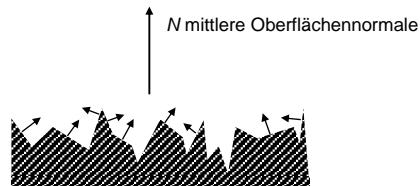
$$I_{Phong} = r_a(\lambda) \cdot I + I_L \cdot \left( r_d(\lambda) \cdot \vec{N} \cdot \vec{L} + \underbrace{r_s(\lambda, \alpha) \cdot (\vec{R} \cdot \vec{V})^m}_{\text{wird ersetzt}} \right)$$

Die Verbesserungen berücksichtigen zwei Aspekte:

- a) Eine Statistik der Rauheit.
- b) 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.

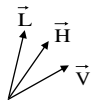
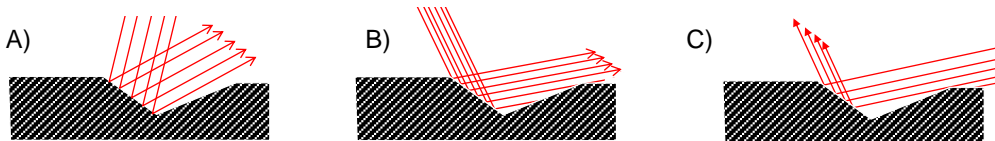


$D(\alpha)$  : sei der proportionale Flächenanteil in Richtung  $\alpha$   
 $\alpha$  : sei der Winkel zur mittleren Normalen  
 $m$  : sei die mittlerer Quadratische Steigung der Facetten

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

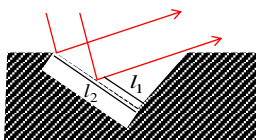
## Cook-Torrance Modell (3)

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



Je nach der Richtung  $L$  des Lichteinfalls, wird das Licht bei lokalen Normalen  $H$  in erster Ordnung reflektiert oder nicht.

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.

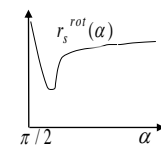
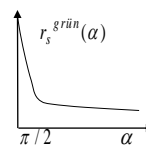
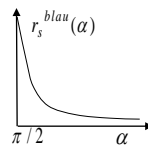
$$I_{Phong} = r_a(\lambda) \cdot I + I_L \cdot \left( r_d(\lambda) \cdot N \cdot L + \cancel{r_s(\lambda, \alpha) \cdot (R \cdot V)^m} \right)$$

wird ersetzt durch

$$r_s(\lambda, \alpha) \cdot (D \cdot G)$$

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

39

BISHER:

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

====> Materialbeschreibung

Zukünftig ??:

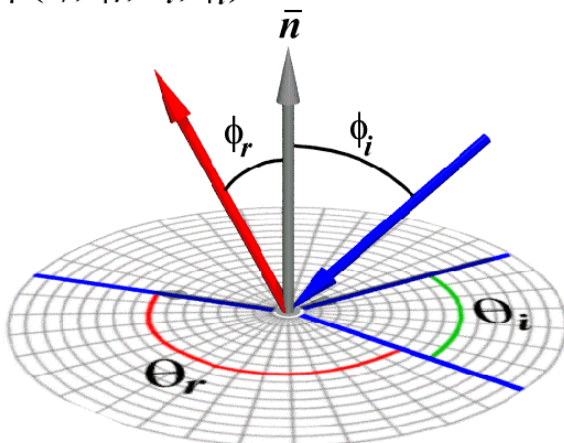
- 1.) Messungen
- 2.) Entwickeln eines Modells, welches die Messungen am besten beschreibt, häufig Verwendung von Methoden aus dem maschinellen Lernen.  
(Problemspezifische Modelle, hier für Computer Graphik.)

==> Materialbeschreibung

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

40

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



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!!!

