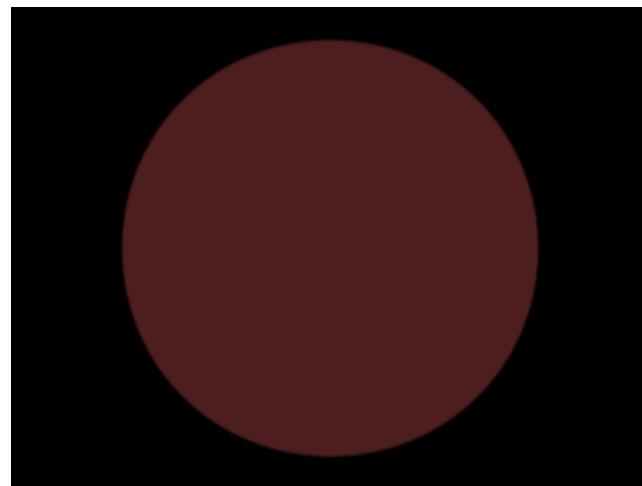
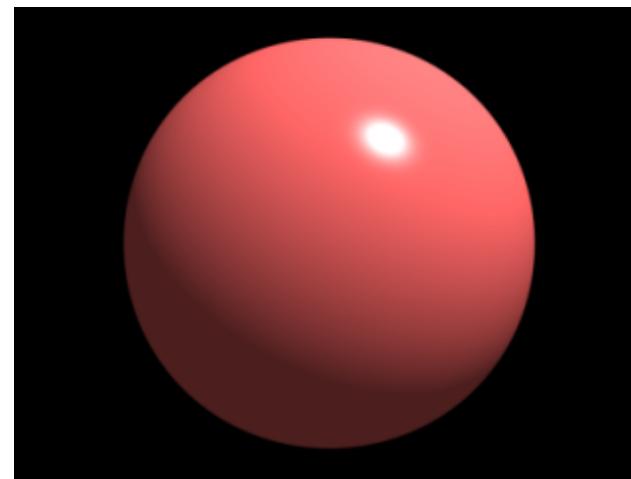


3.2 Beleuchtung und Schattierung

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Kugel ohne
Beleuchtungsmodell



Kugel mit
Beleuchtungsmodell

3.2 Beleuchtung und Schattierung



- In vielen Anwendungen reicht es aus, die Darstellungselemente in der vom Anwender spezifizierten Farbe darzustellen.
- In der realistischen Bilddarstellung werden dagegen **Beleuchtungsmodelle** verwendet, die die Wechselwirkung von Lichtquellen mit den Objektoberflächen in einer 3D-Szene beschreiben.
- 3D-graphische Systeme unterstützen in jedem Fall lokale Beleuchtungsmodelle und einfache Schattierungstechniken und oft auch globale Modelle.

3.2 Beleuchtung und Schattierung



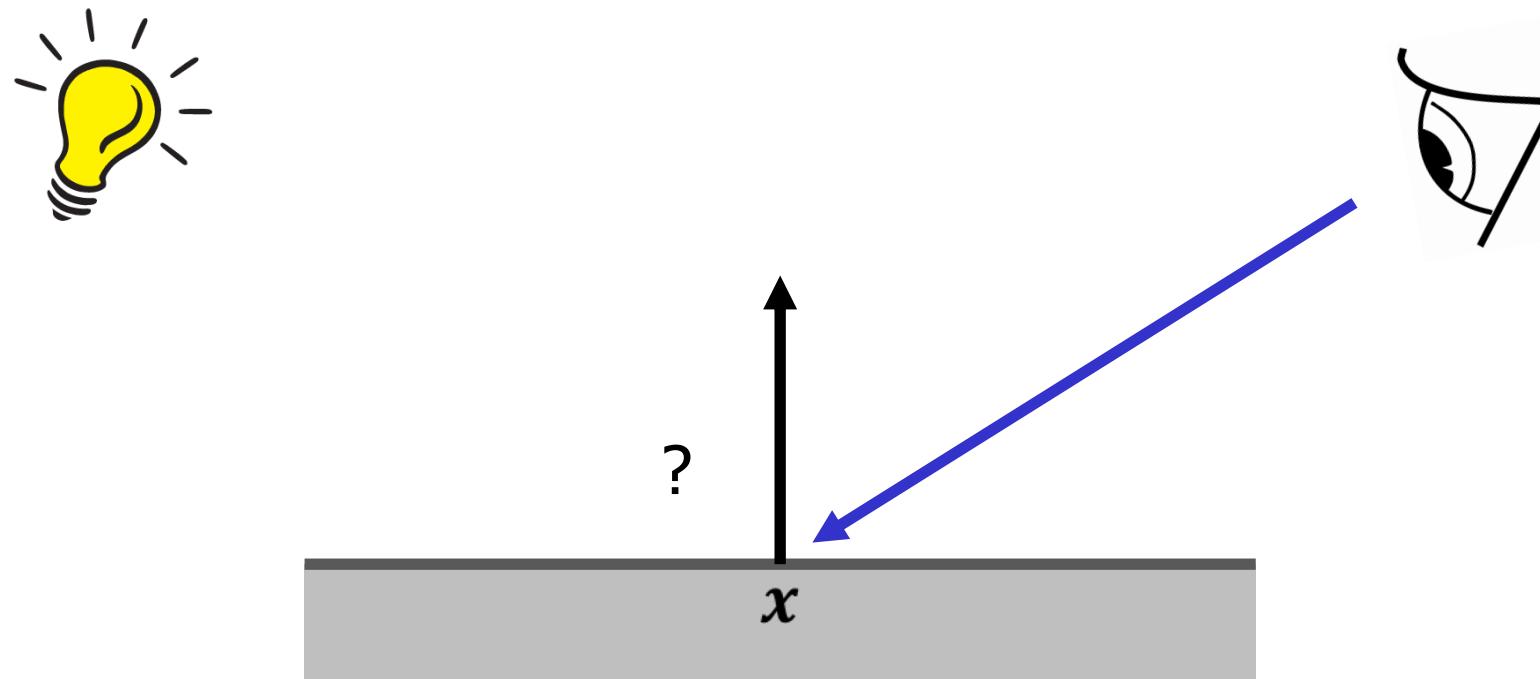
- Bei **lokalen Beleuchtungsmodellen** wird nur die Wechselwirkung eines Objektes zur Lichtquelle betrachtet, die Interreflexion der Objekte untereinander bleibt dagegen unberücksichtigt.
- Bei **globalen Beleuchtungsmodellen** wird zusätzlich die Interreflexion zwischen allen Objekten berücksichtigt.

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Das Auge sieht Punkt x .

Frage: Wie hell ist es hier?



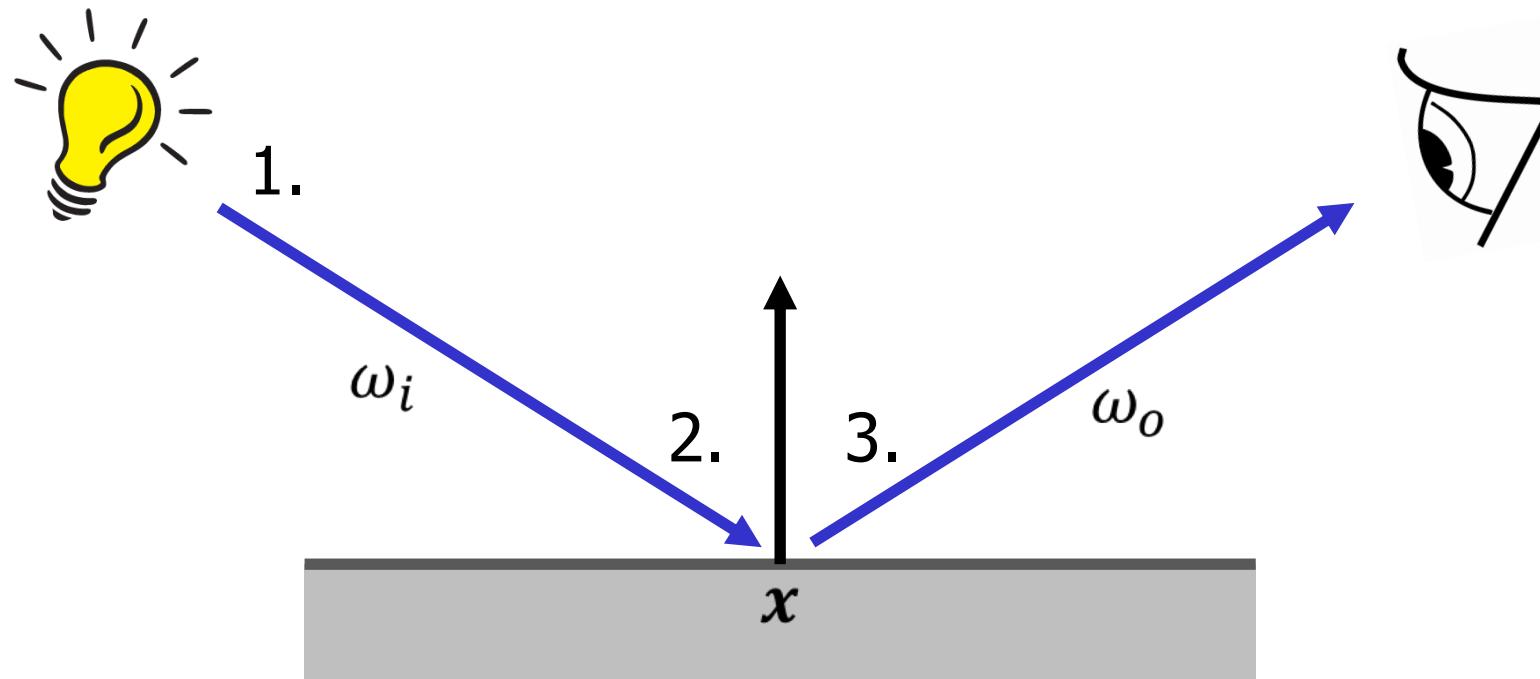
3.2 Beleuchtung und Schattierung



1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle in Richtung ω_i ?

2. Wie viel von diesem Licht kommt bei Punkt x an?

3. Wie viel Licht wird in Richtung ω_o zum Auge reflektiert?



3.2 Beleuchtung und Schattierung



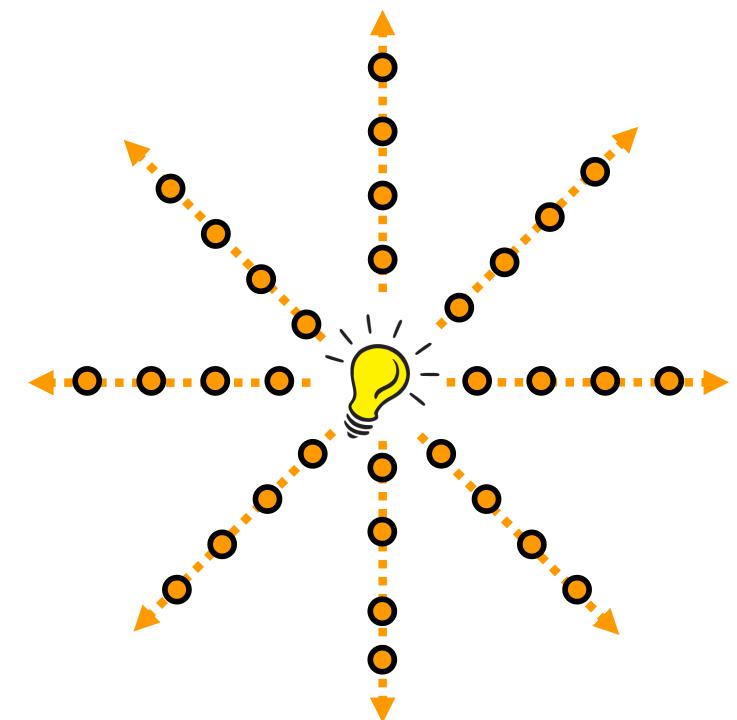
1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle ?

Lichtquellen versenden **Photonen**.

Die **Lichtmenge** Q ist die Menge der Photonen, die über die Zeit von einer Lichtquelle (in alle Richtungen) versendet wird.

Einheit: *Lumen · Sekunde* ($lm \cdot s$)

(Das ist das, was auf der Stromrechnung steht. Umrechenbar in kWh...)



3.2 Beleuchtung und Schattierung

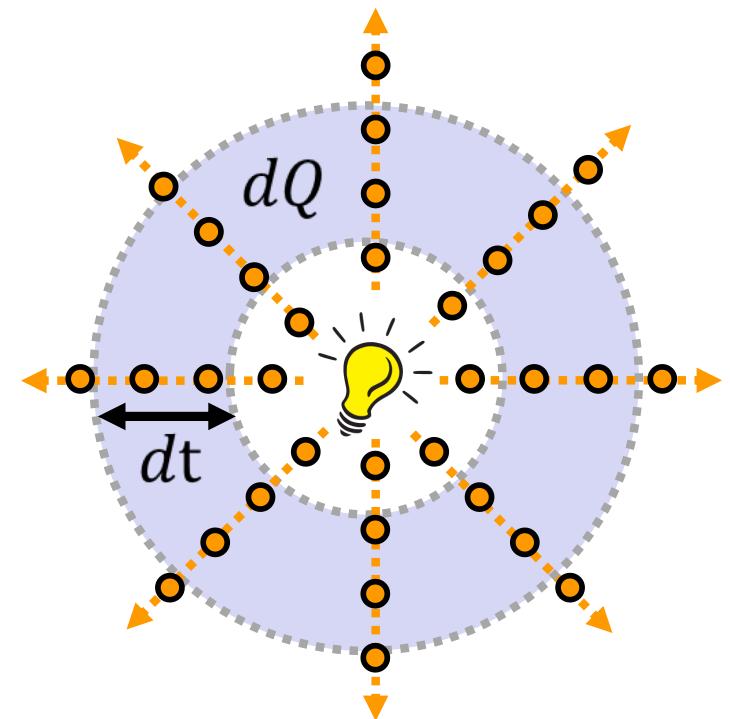


1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle ?

Der **Lichtstrom** ϕ bezeichnet die Lichtmenge, die pro Zeiteinheit (in alle Richtungen) versendet wird.

$$\phi = \frac{dQ}{dt}$$

Einheit: *Lumen (lm)*



3.2 Beleuchtung und Schattierung



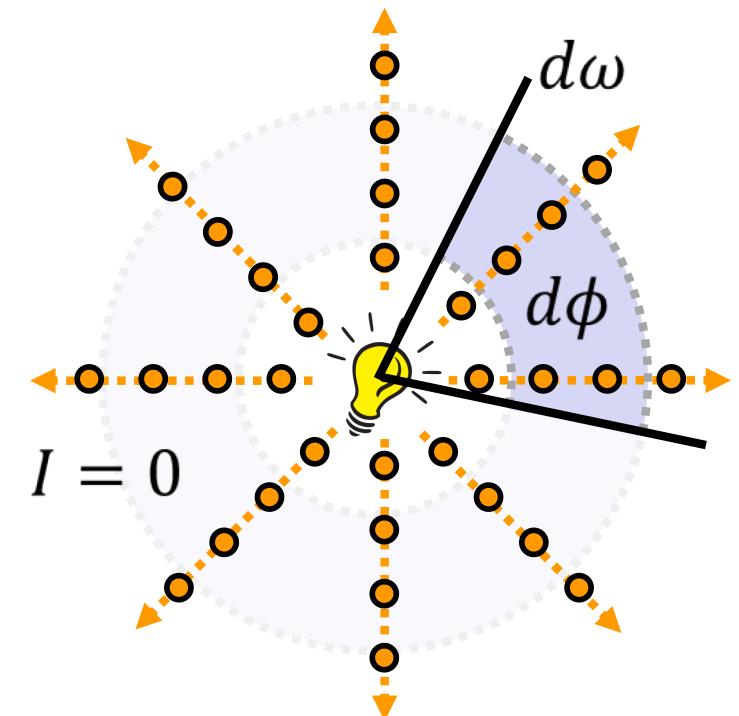
1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle ?

Lichtquellen geben oft nicht in jede Richtung gleich viel Lichtstrom ab. Um festzulegen, wie viel Lichtstrom in eine „Richtung“ versendet wird, definiert man die Lichtstärke:

Die **Lichtstärke** I bezeichnet den Lichtstrom, der in einem **Raumwinkel** ω versendet wird.

$$I = \frac{d\phi}{d\omega}$$

Einheit: *Candela (cd)*

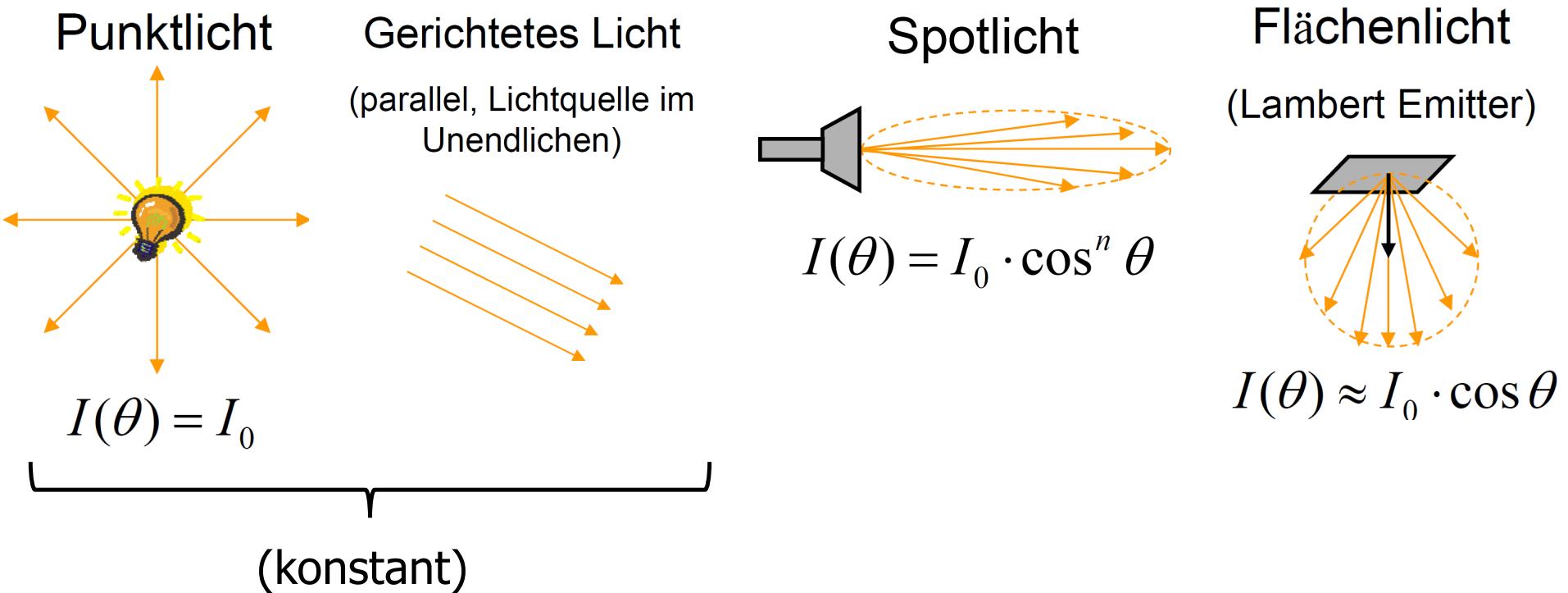


3.2 Beleuchtung und Schattierung



1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle ?

Je nach Art der Lichtquelle definiert man eine **Lichtstärkeverteilung** $I(\theta)$, die die Lichtstärke I für eine bestimmte Richtung θ angibt.



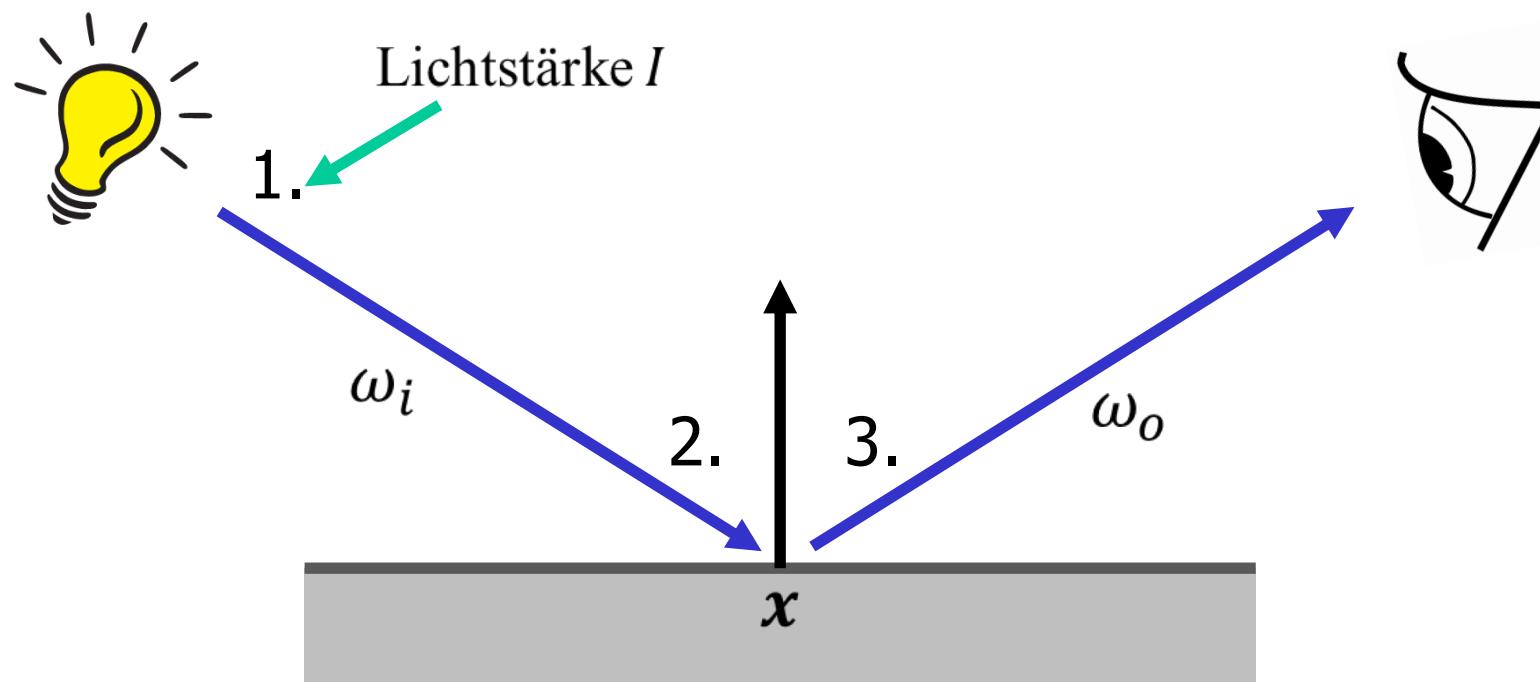
3.2 Beleuchtung und Schattierung



1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle in Richtung ω_i ?

2. Wie viel von diesem Licht kommt bei Punkt x an?

3. Wie viel Licht wird in Richtung ω_o zum Auge reflektiert?

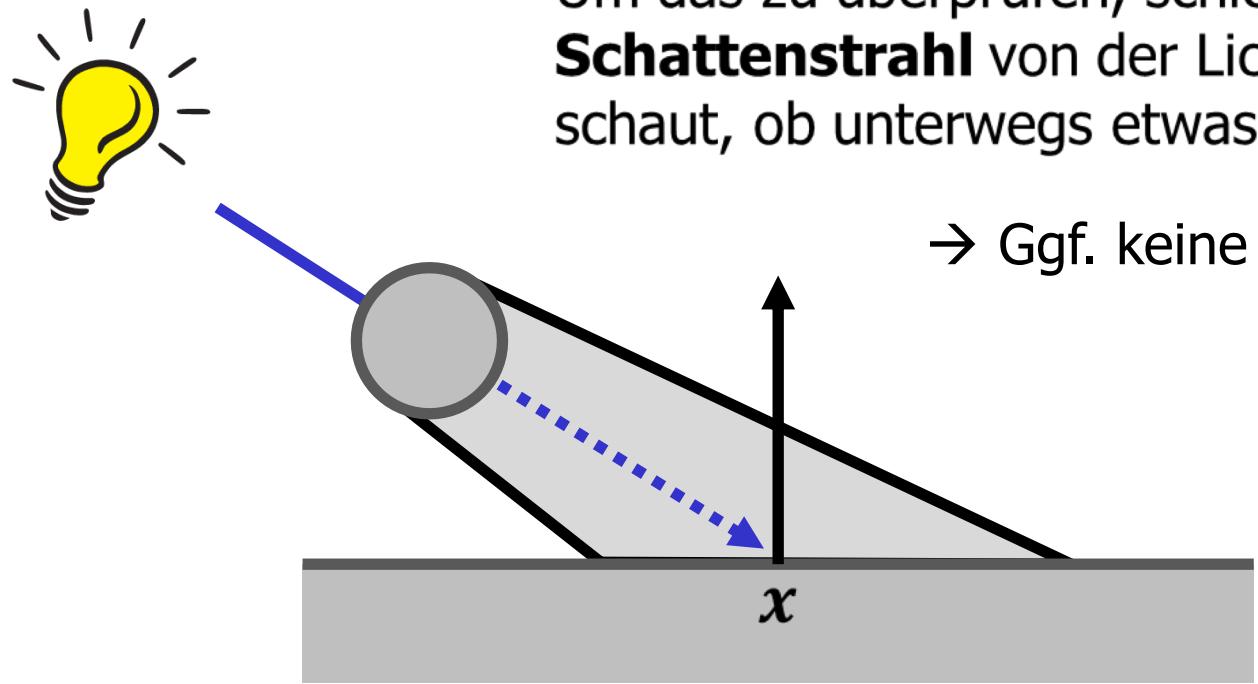


3.2 Beleuchtung und Schattierung



2. Wie viel Licht kommt an einem Punkt an?

Wird das Licht blockiert, liegt der betrachtete Punkt im **Schatten**.



Um das zu überprüfen, schickt man einen **Schattenstrahl** von der Lichtquelle nach x und schaut, ob unterwegs etwas getroffen wird.

→ Ggf. keine Lichtberechnung

3.2 Beleuchtung und Schattierung

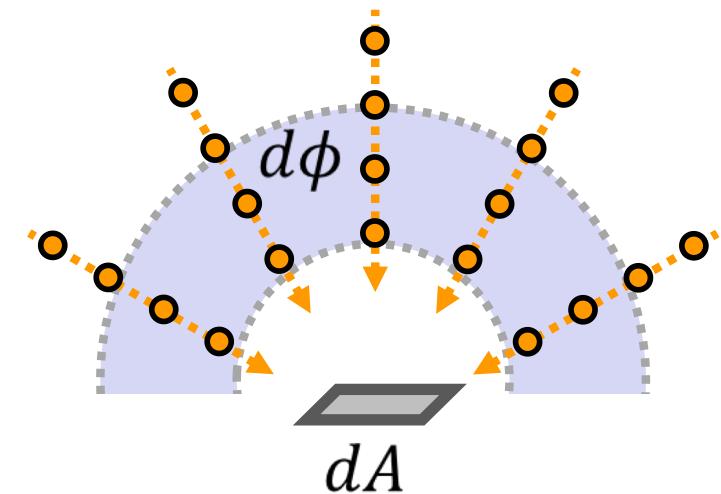


2. Wie viel Licht kommt an einem Punkt an?

Die **Beleuchtungsstärke** E bezeichnet den Lichtstrom ϕ , der (aus allen Richtungen) auf einem Flächenstück A ankommt.

$$E = \frac{d\phi}{dA}$$

Einheit: Lux ($lx = lm / m^2$)

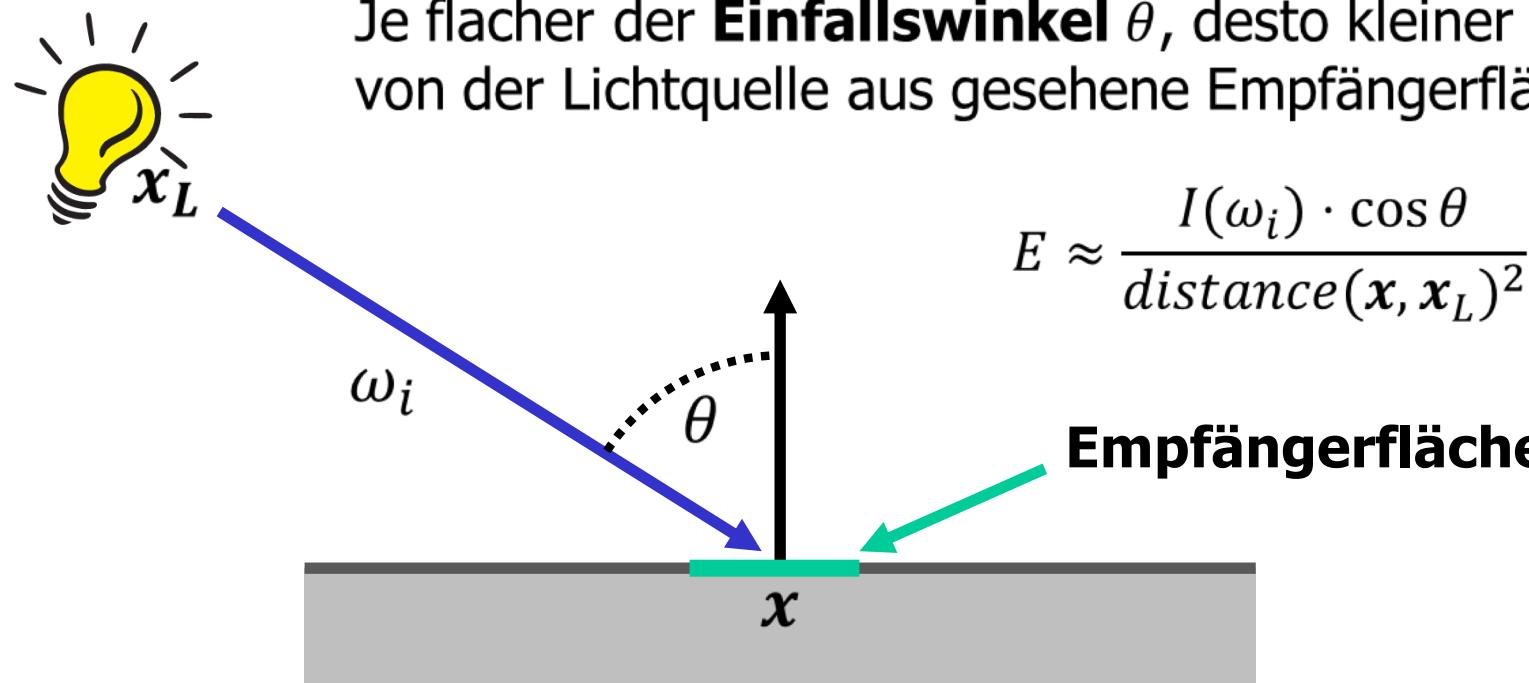


3.2 Beleuchtung und Schattierung



2. Wie viel Licht kommt an einem Punkt an?

Je weiter die Lichtquelle vom Punkt x entfernt ist, desto weniger Licht kommt an. Die Lichtabnahme ist **quadratisch**.



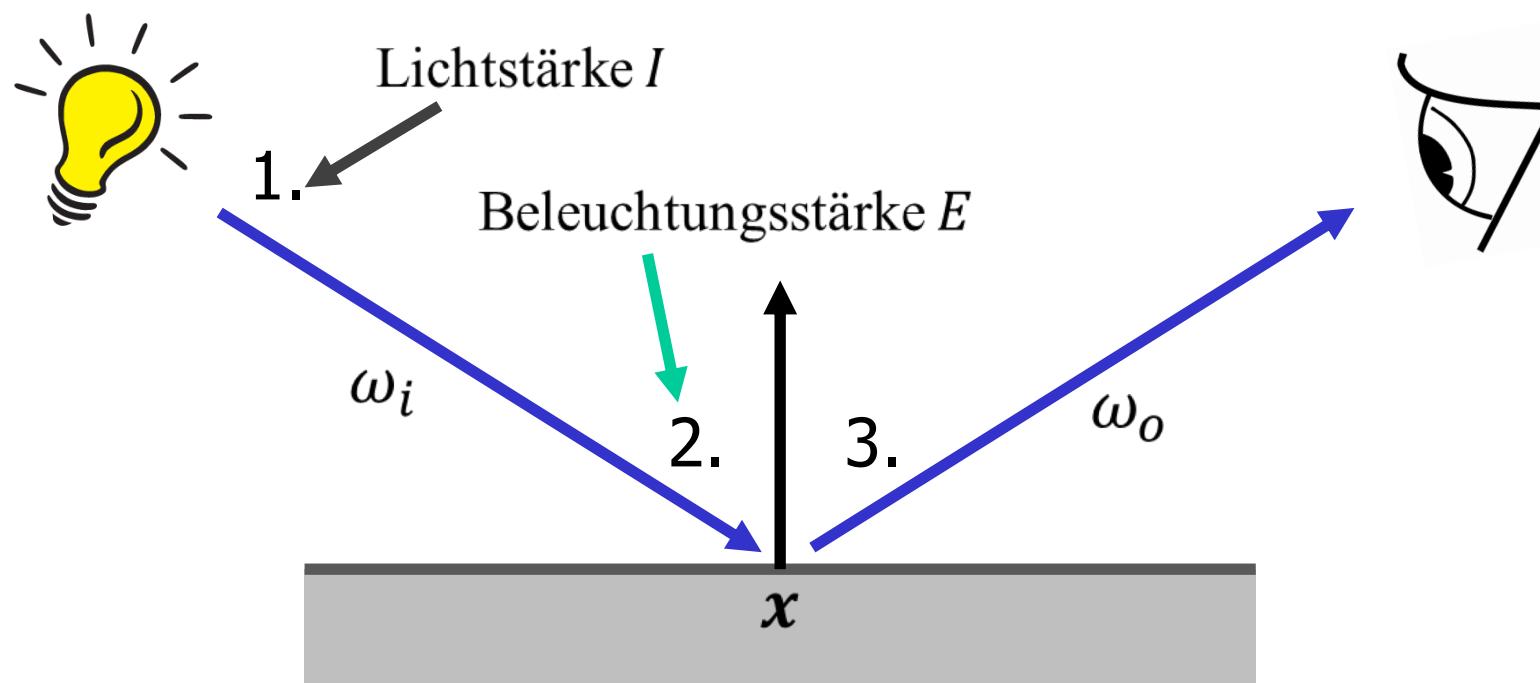
3.2 Beleuchtung und Schattierung



1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle in Richtung ω_i ?

2. Wie viel von diesem Licht kommt bei Punkt x an?

3. Wie viel Licht wird in Richtung ω_o zum Auge reflektiert?



3.2 Beleuchtung und Schattierung

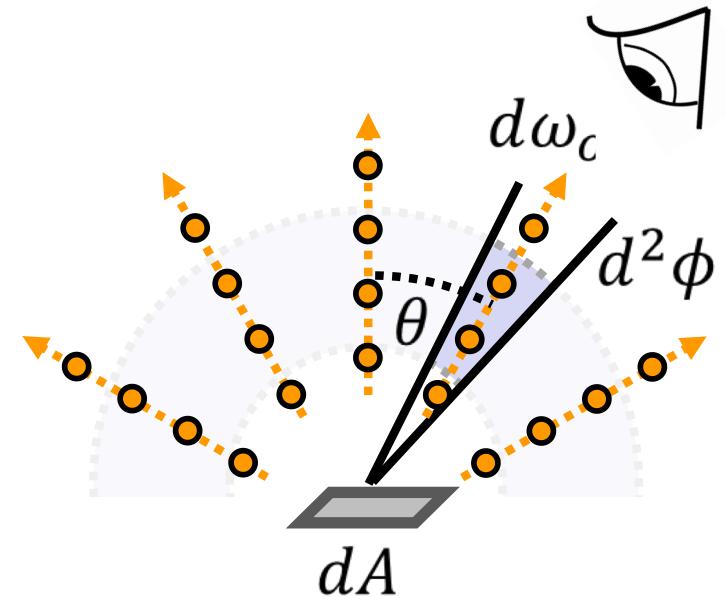


3. Wie viel Licht wird zur Kamera reflektiert?

Die **Leuchtdichte** L bezeichnet den aus Richtung ω_o empfangenen Lichtstrom ϕ , der von einem unter Blickwinkel θ gesehenen Flächenstück dA entsendet wird.

$$L = \frac{d^2\phi}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\omega_o}$$

Einheit: cd / m^2



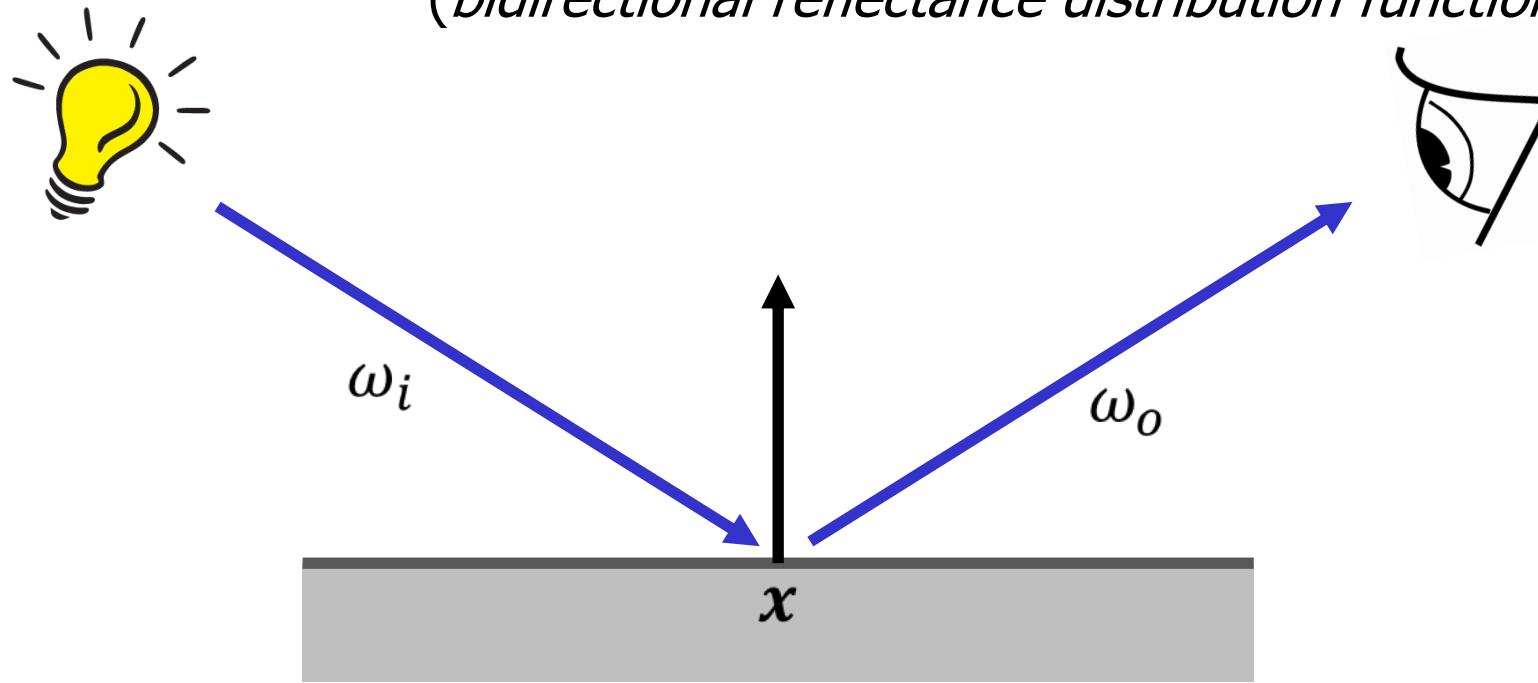
3.2 Beleuchtung und Schattierung



3. Wie viel Licht wird zur Kamera reflektiert?

Wie viel vom aus Richtung ω_i einfallenden Licht zur Kamera in Richtung ω_o reflektiert wird, beschreibt die **BRDF** $f_r(\omega_i, \omega_o)$.

BRDF = Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
(bidirectional reflectance distribution function)



3.2 Beleuchtung und Schattierung

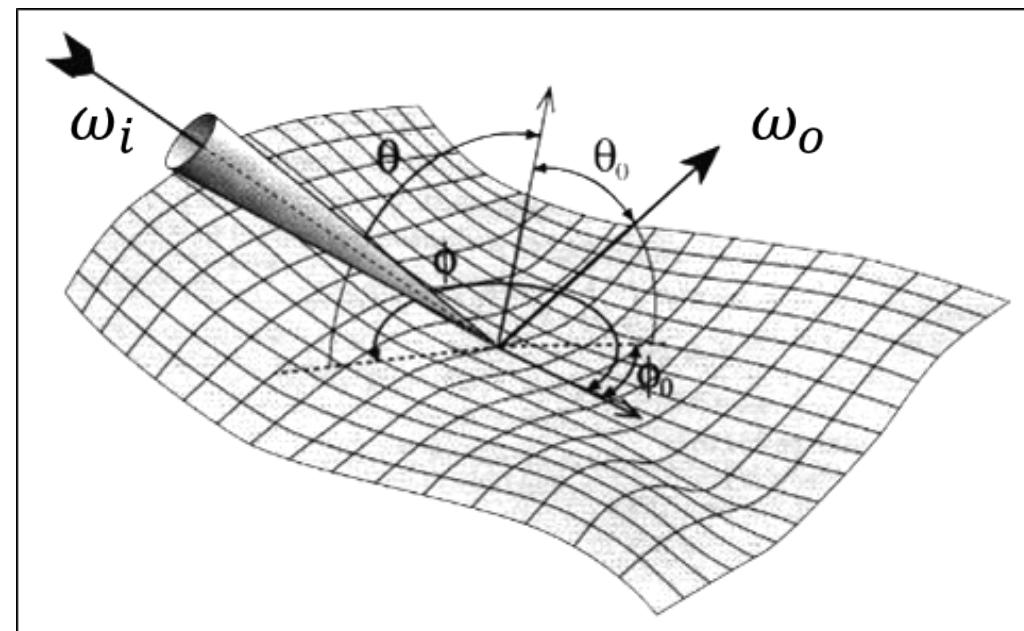


- **Bidirectional Reflectance**

- **Distribution Function**

- BRDF describes surface reflection for light incident from direction ω_i observed from direction ω_o
- Bidirectional
 - depends on two directions (4-D function)
 - Distribution function

$$f_r(\omega_i, \omega_o)$$

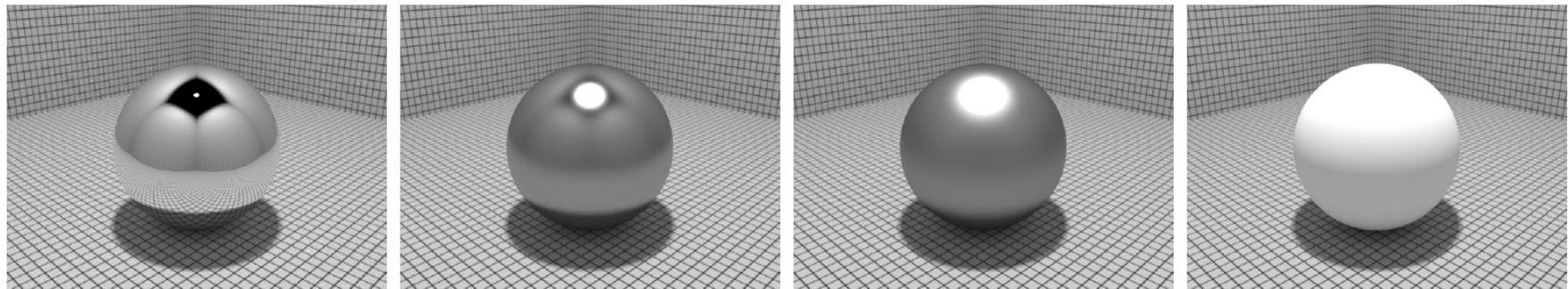


3.2 Beleuchtung und Schattierung



Materialien

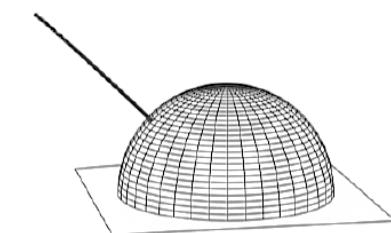
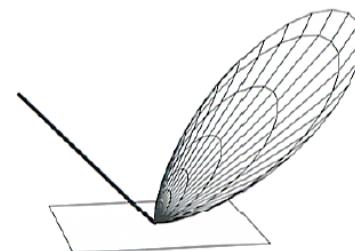
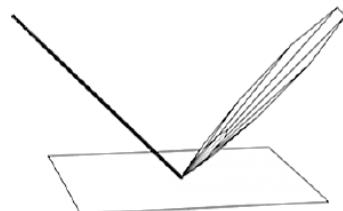
Die BRDF beschreibt somit Reflexionseigenschaften eines **Materials**.



Spiegel

Glänzend

Diffus



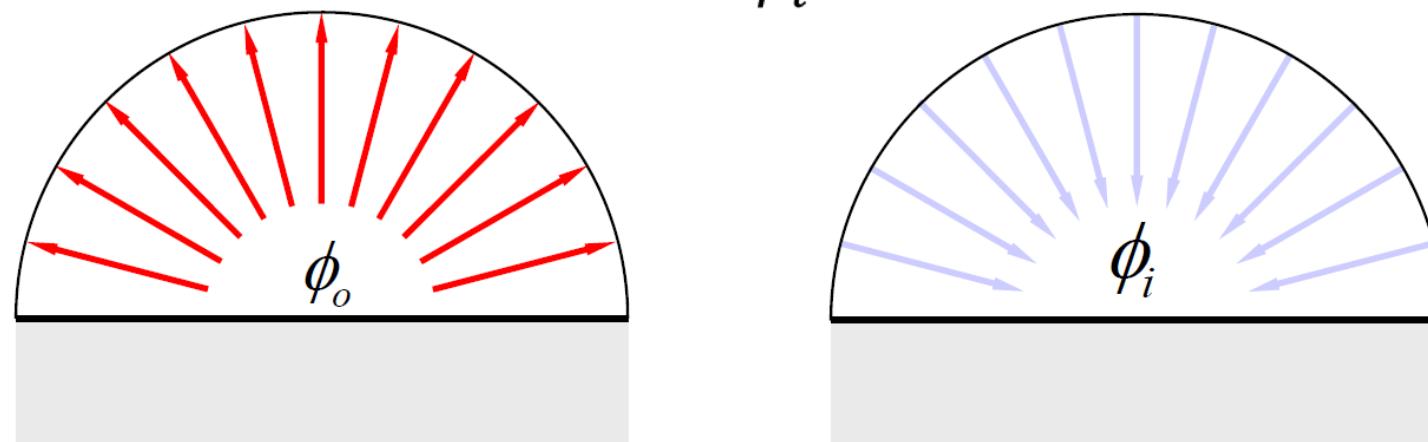
3.2 Beleuchtung und Schattierung



Reflexionsgrad

Der Reflexionsgrad $\rho \in [0,1]$ wird zur Beschreibung von BRDFs benutzt. Er beschreibt das Verhältnis zwischen dem gesamten ausfallenden und einfallenden Licht.

$$\rho = \frac{\phi_o}{\phi_i}$$



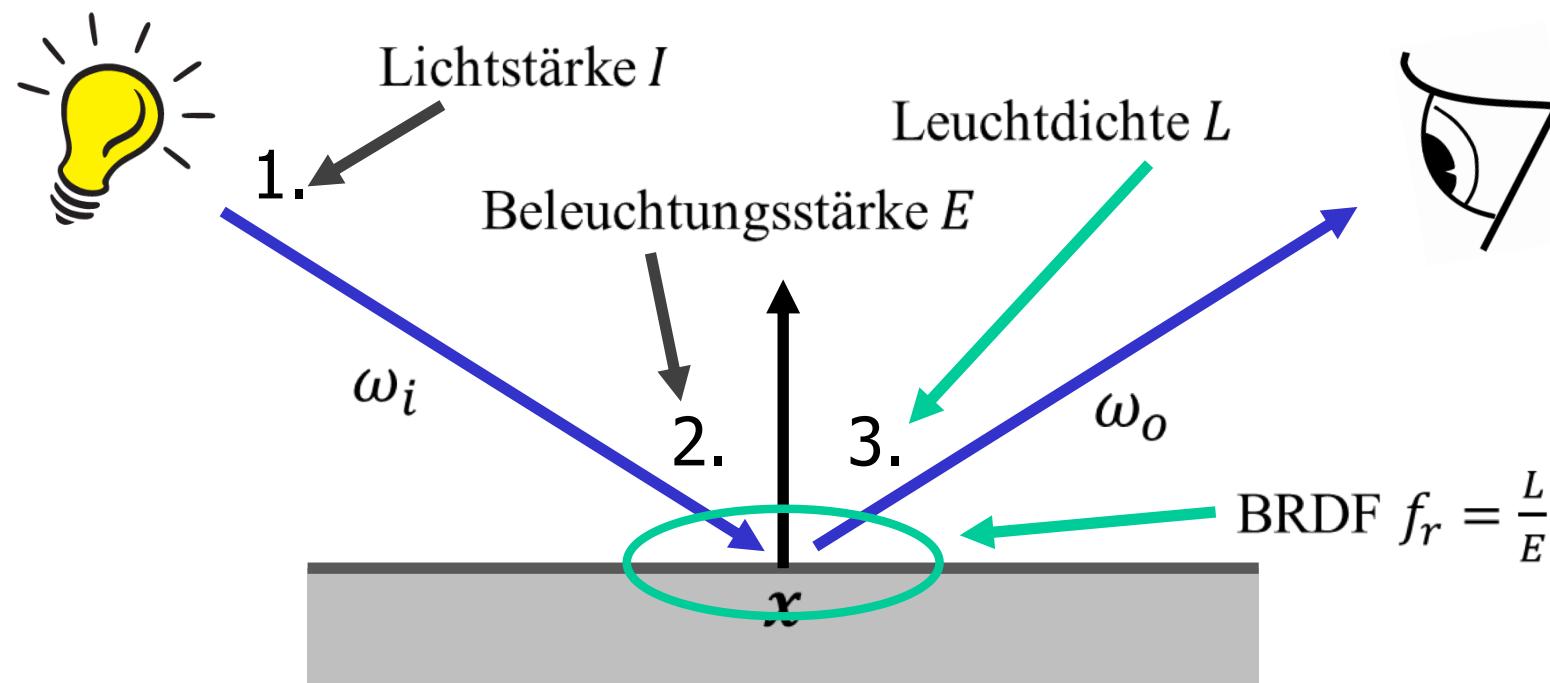
3.2 Beleuchtung und Schattierung



1. Wie viel Licht verlässt die Lichtquelle in Richtung ω_i ?

2. Wie viel von diesem Licht kommt bei Punkt x an?

3. Wie viel Licht wird in Richtung ω_o zum Auge reflektiert?



3.2 Beleuchtung und Schattierung



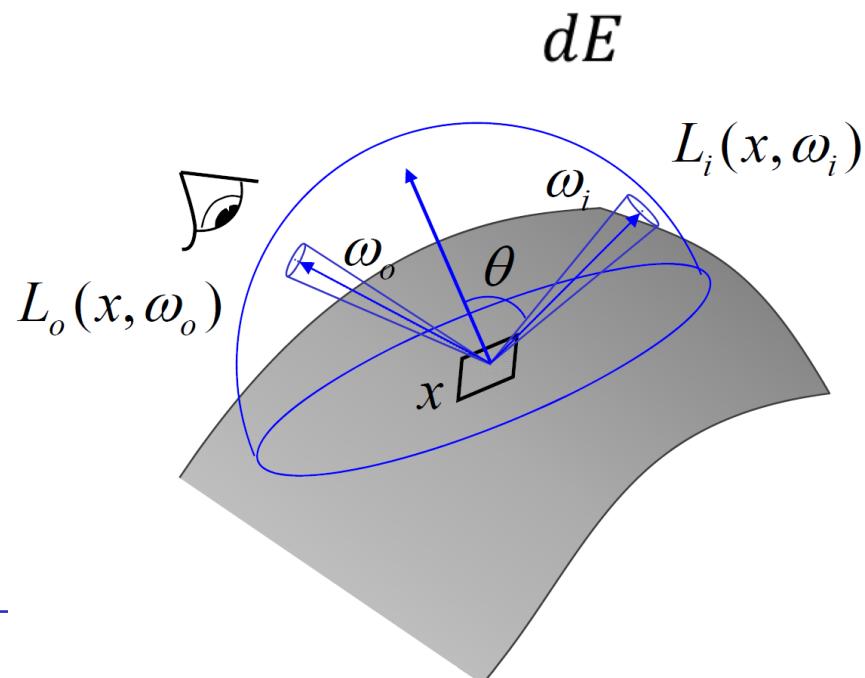
Rendering Equation – Globale Beleuchtung (1986)

Die Beleuchtung wird allgemein durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$L_o(x, \omega_o) = \underbrace{L_e(x, \omega_o)}_{\text{Eigenemission}} + \int_{\Omega} f_r(\omega_i, \omega_o) \cdot \cos \theta \cdot L_i(x, \omega_i) \cdot d\omega_i$$

Eigenemission
(nur Lichtquelle)

Integration über Halbkugel
(Licht aus jeder Einfallsrich-
tung einsammeln)

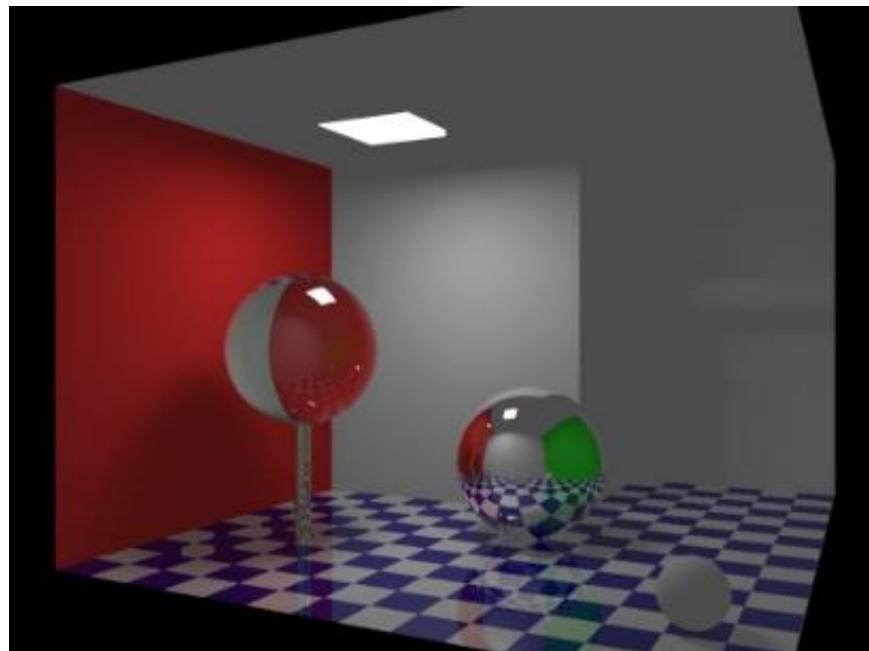


3.2 Beleuchtung und Schattierung

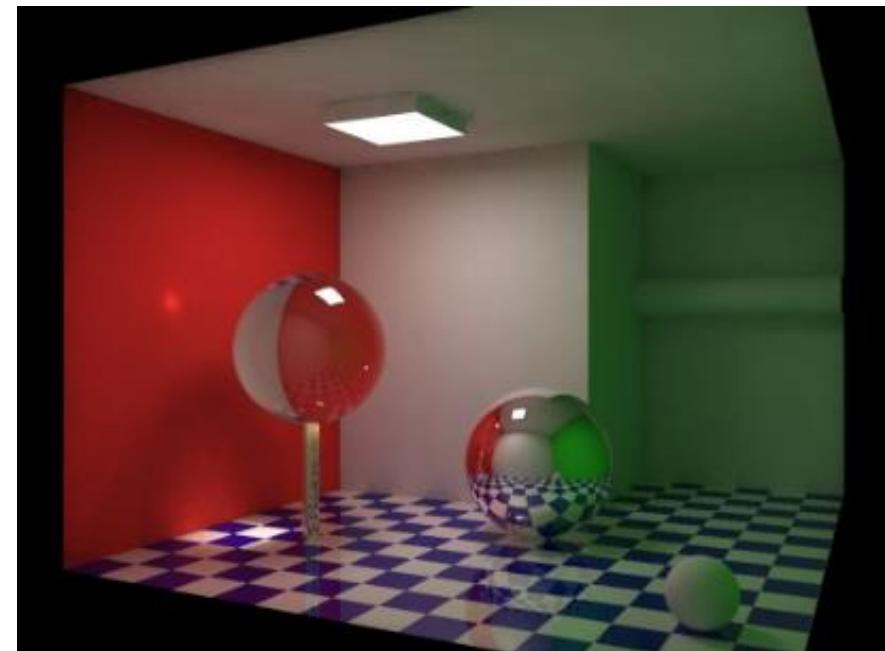


Rendering Equation – Globale vs. direkte Beleuchtung

Globale Beleuchtung beinhaltet Interreflexionen und Lichtbündelungen.



Direkte Beleuchtung + Reflexion



Globale Beleuchtung

3.2 Beleuchtung und Schattierung



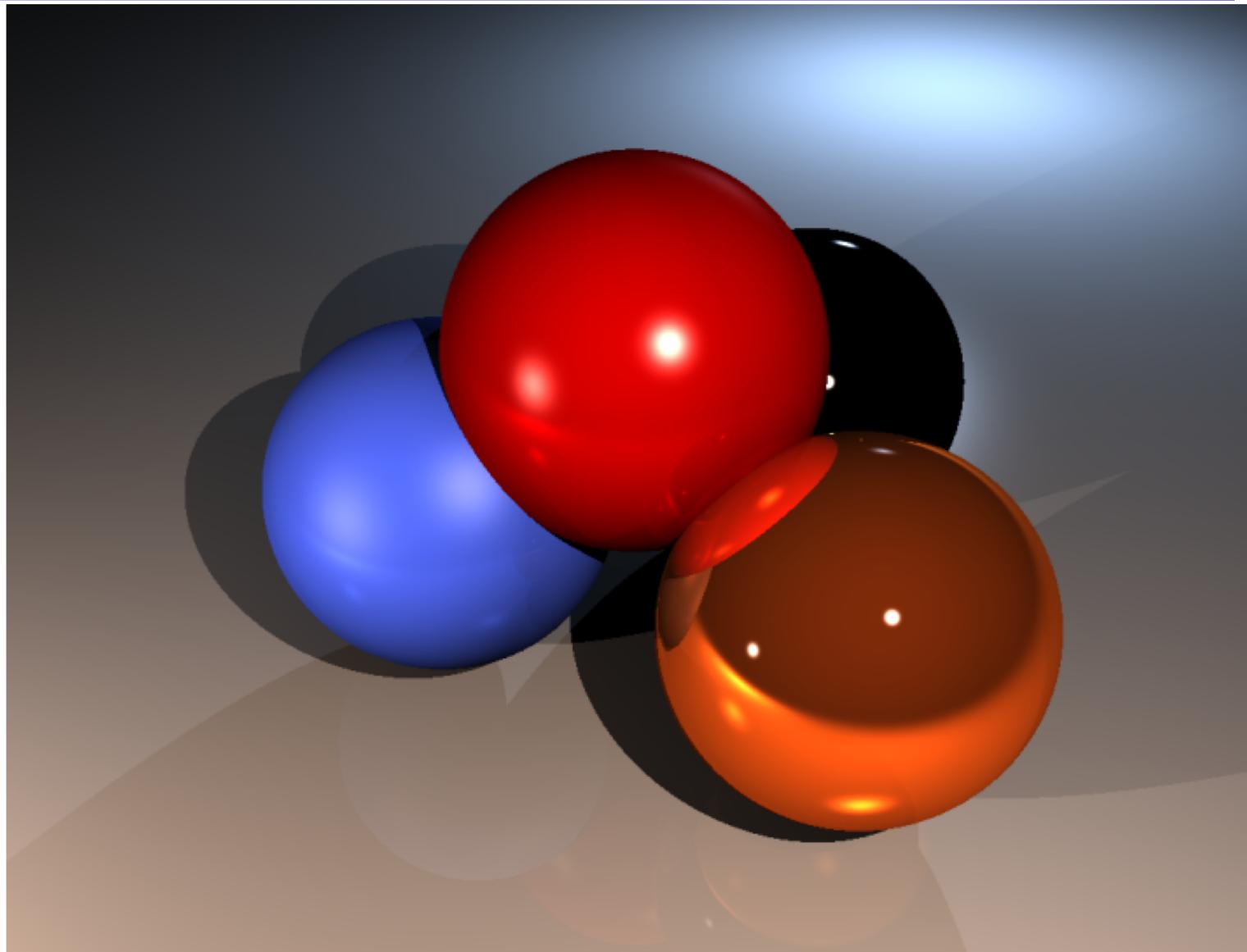
Rendering Equation – Direktes Licht mit Punktlichtern

Wenn nur direktes Licht betrachtet wird, muss man nicht alle möglichen Einfallsrichtungen betrachten, sondern kann direkt den Einfluss der Lichter berechnen, hier ein Beispiel für Punktlichter:

$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o) = \underbrace{L_e(\mathbf{x}, \omega_o)}_{\text{Eigenemission} \\ (\text{nur Lichtquelle})} + \sum_{i=1}^k f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta \cdot \underbrace{L_i(\mathbf{x}, \omega_i)}_{E \approx \frac{I_0 \cdot \cos \theta}{\text{distance}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_L)^2}}$$

Summe über die k Lichter

3.2 Beleuchtung und Schattierung



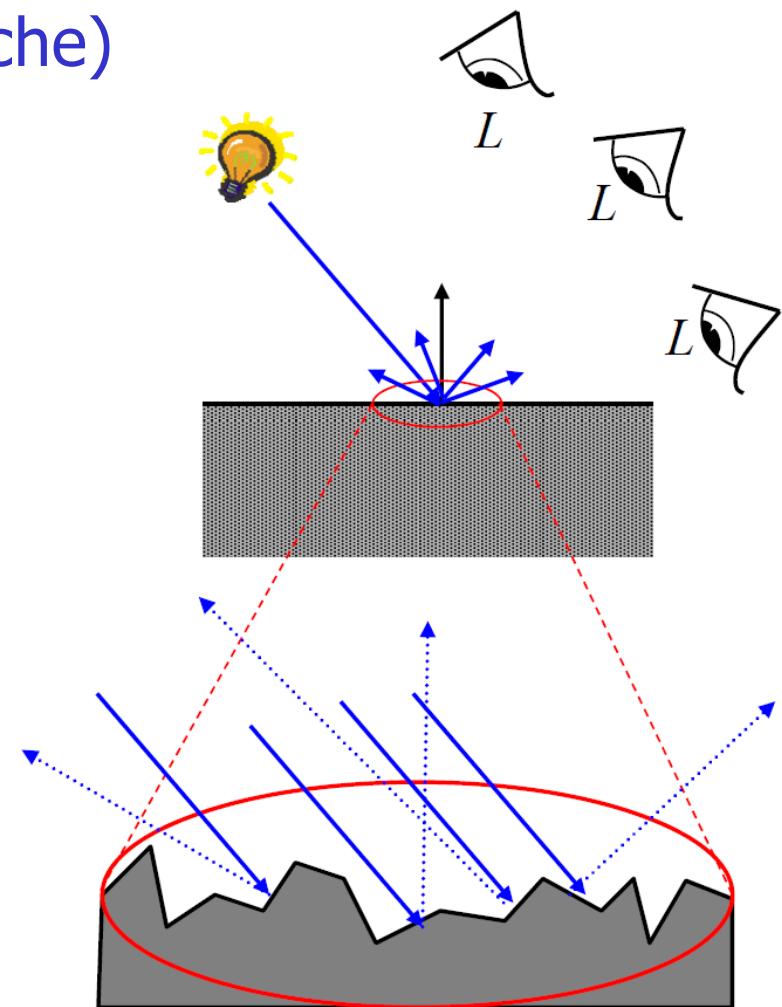
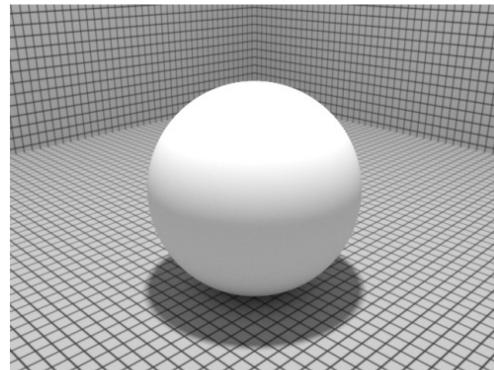
3.2 Beleuchtung und Schattierung



Materialien: Lambert (Diffuse Fläche)

Die beobachtete Leuchtdichte ist unabhängig von der Betrachtungsrichtung. In jede Richtung wird **gleich viel** Licht reflektiert, d.h. jede Reflexionsrichtung ist gleichwahrscheinlich. (Bsp. Papier)

$$f_r = \frac{\rho_d}{\pi} \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{Reflexionsgrad} \\ \leftarrow \text{Normierung} \end{matrix}$$



3.2 Beleuchtung und Schattierung

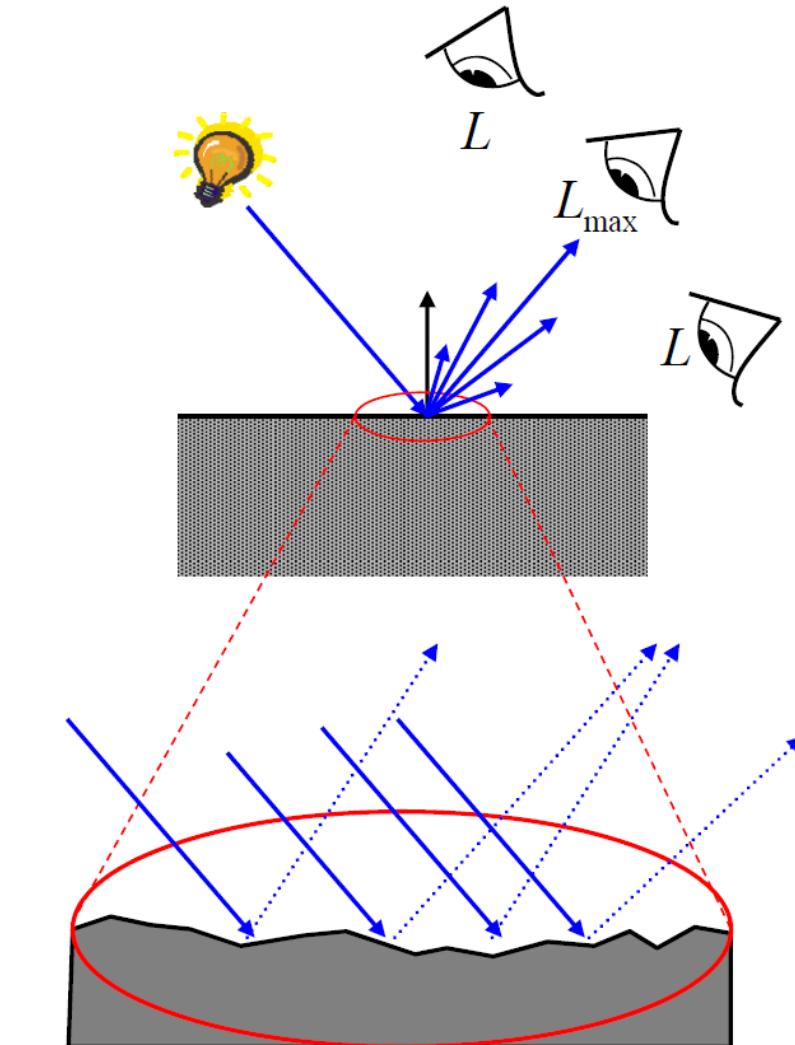
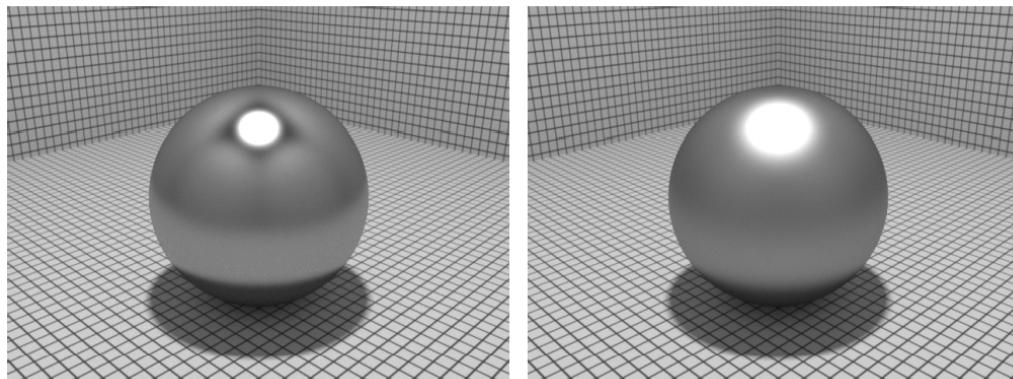


Materialien: Glänzende Fläche

Das an der Oberfläche reflektierte Licht wird nur leicht **gestreut**.

→ verschwommene Spiegelung

Es gibt verschiedene Modelle um dies zu beschreiben / approximieren.



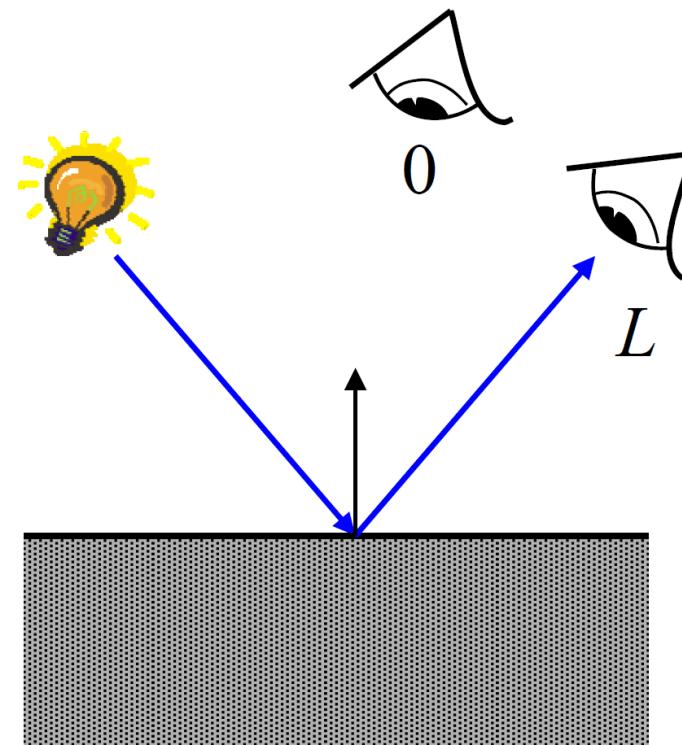
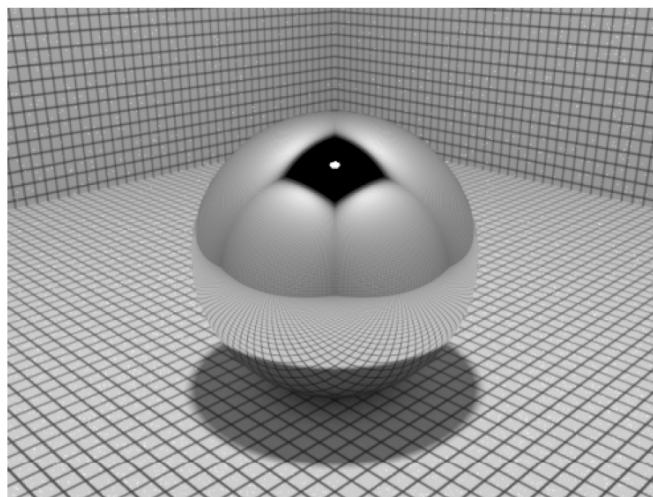
3.2 Beleuchtung und Schattierung



Materialien: Spiegel

Einfallsrichtung = Ausfallsrichtung

In alle anderen Richtungen wird kein Licht reflektiert





Das Phongsche Beleuchtungsmodell (Phong 75)

- Einfachstes (und oft verwendetes) lokale Beleuchtungsmodell
- Empirisch (physikalisch nicht exakt)

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Rendering Equation – Direktes Licht mit Punktlichtern

Wenn nur direktes Licht betrachtet wird, muss man nicht alle möglichen Einfallsrichtungen betrachten, sondern kann direkt den Einfluss der Lichter berechnen, hier ein Beispiel für Punktlichter:

$$L_o(\mathbf{x}, \omega_o) = \underbrace{L_e(\mathbf{x}, \omega_o)}_{\text{Eigenemission} \\ (\text{nur Lichtquelle})} + \sum_{i=1}^k f_r(\omega_i, \omega_o) \cos \theta \cdot \underbrace{L_i(\mathbf{x}, \omega_i)}_{E \approx \frac{I_0 \cdot \cos \theta}{\text{distance}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_L)^2}}$$

Summe über die k Lichter

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Materialien: Phong (1975)

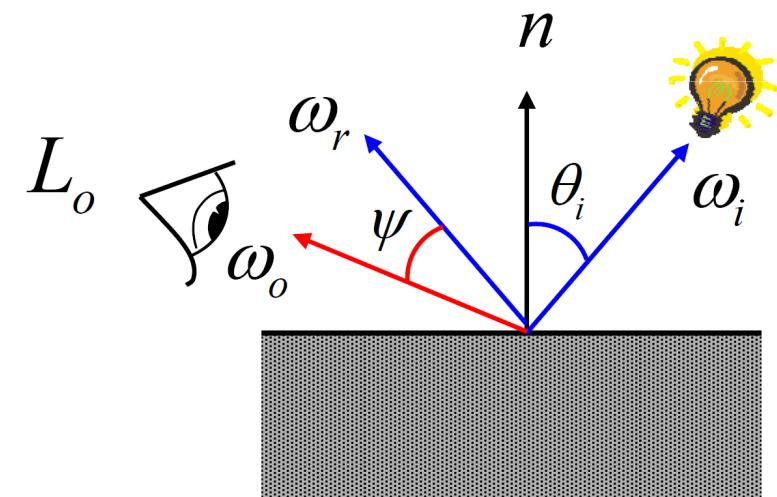
Zerlegung in **diffusen** und **spekularen**
Anteil.

Shiny-Exponent s kontrolliert Rauheit
der Oberfläche.

Keine physikalische Grundlage
(nicht energieerhaltend)

diffuser Reflexionsgrad

$$f_r = \frac{\rho_d}{\pi} + \rho_s \cdot \cos^s \psi$$



$$\omega_r = 2 \operatorname{dot}(\omega_i, n)n - \omega_i$$

$$\cos \psi = \operatorname{dot}(\omega_o, \omega_r)$$

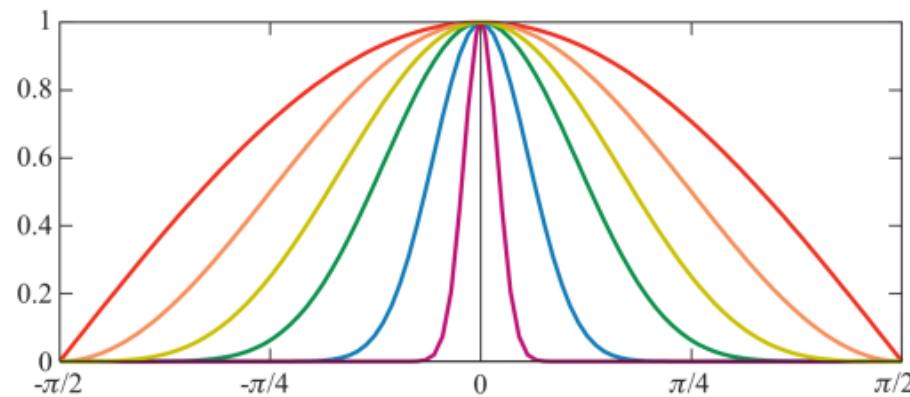
3.2 Beleuchtung und Schattierung



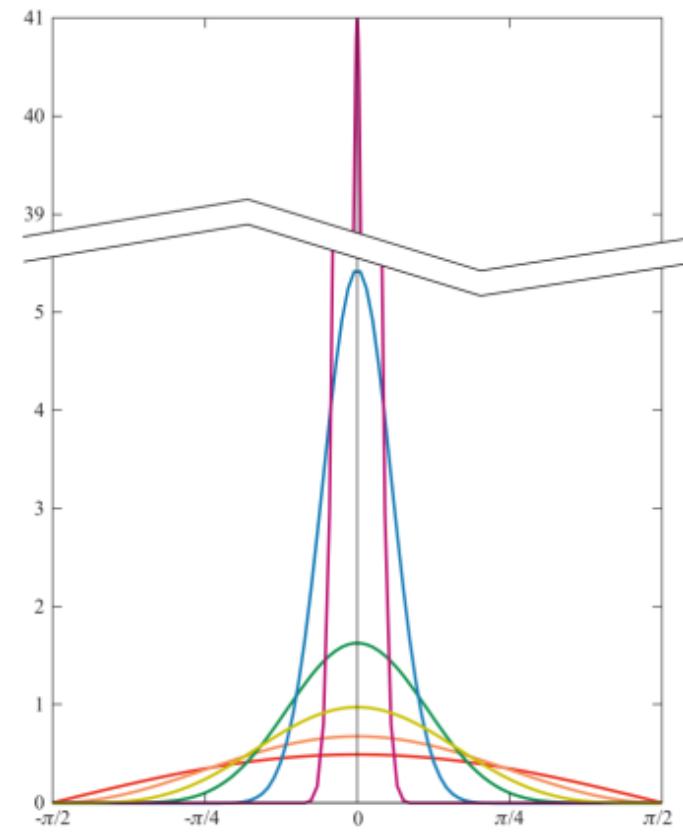
Materialien: Physikalisch Plausible Phong BRDF (1994)

Normierung des spekularen Terms zur Energieerhaltung.

$$f_r = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{s+2}{2\pi} \rho_s \cdot \cos^s \psi$$

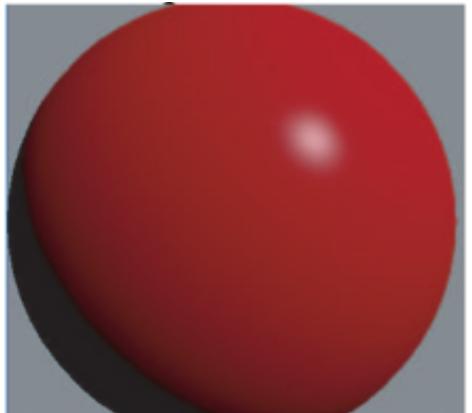
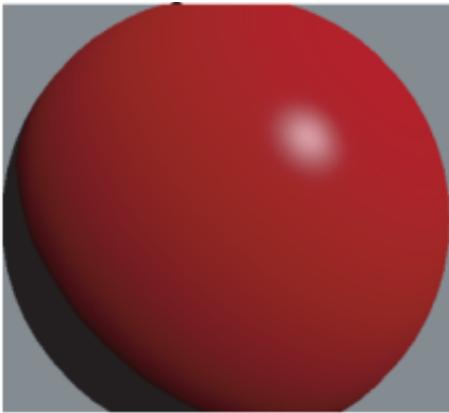
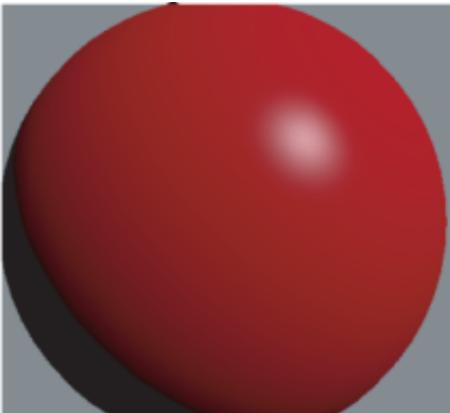
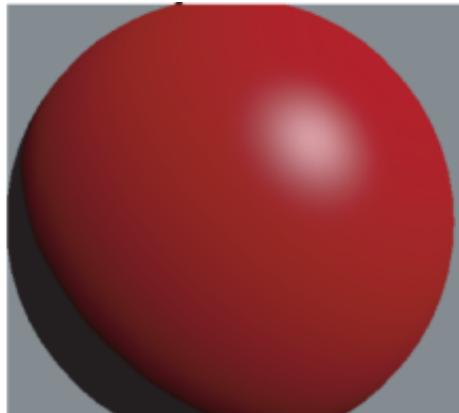


unnormiert

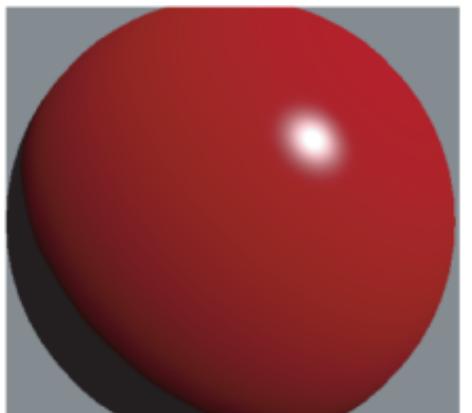
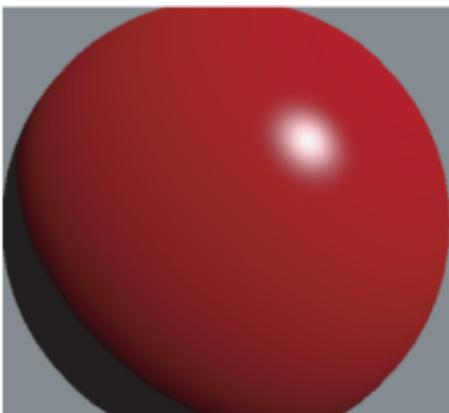
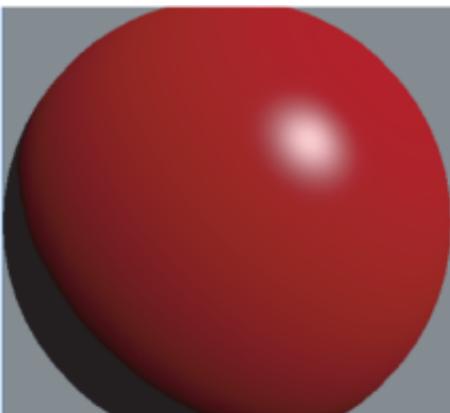
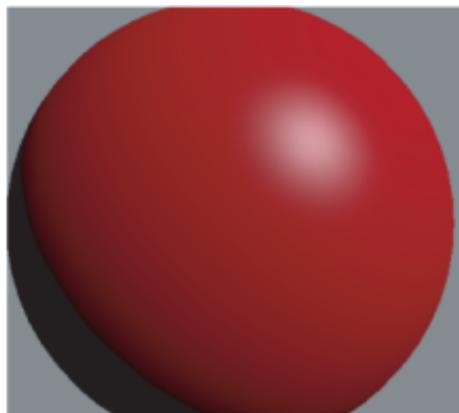


normiert

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Without Normalization Factor

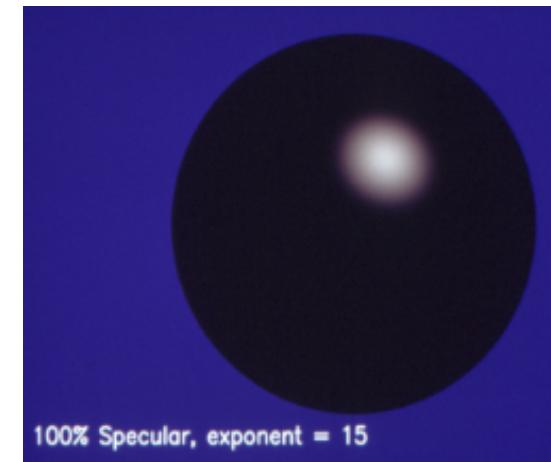
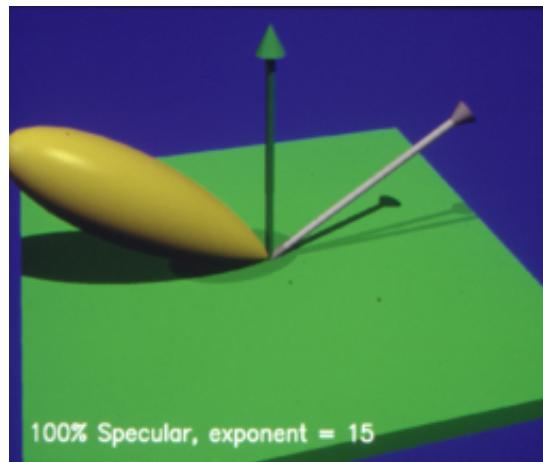


With Normalization Factor

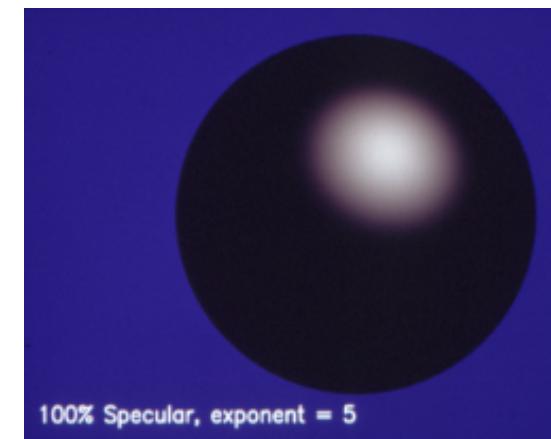
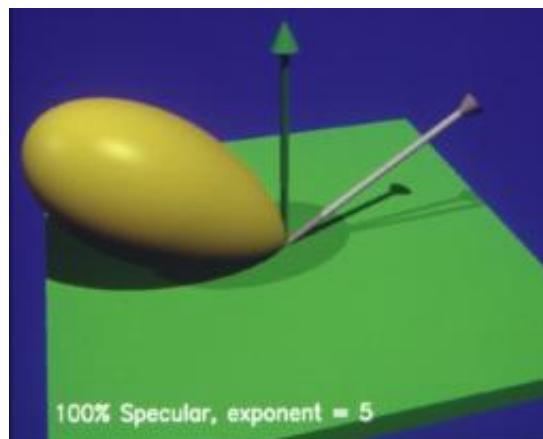
3.2 Beleuchtung und Schattierung



*spiegelnde
Komponente mit
Exponential-
werten für s = 15*



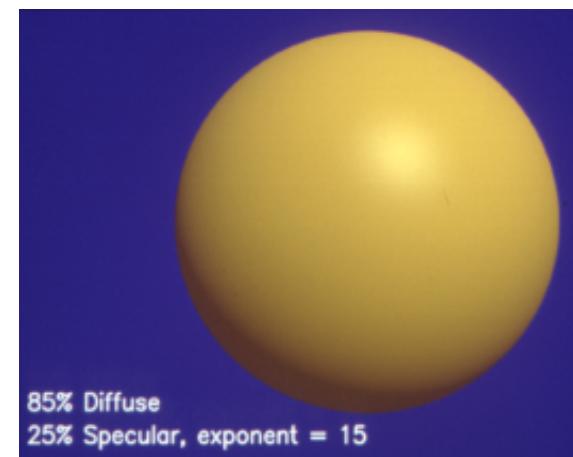
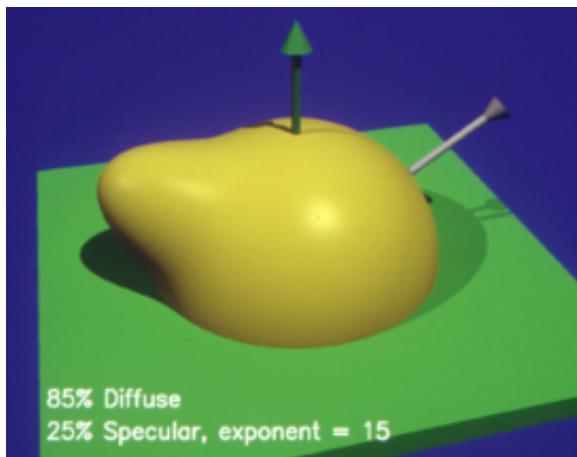
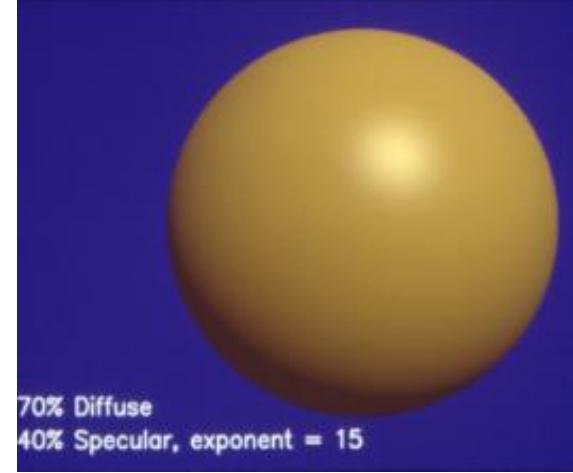
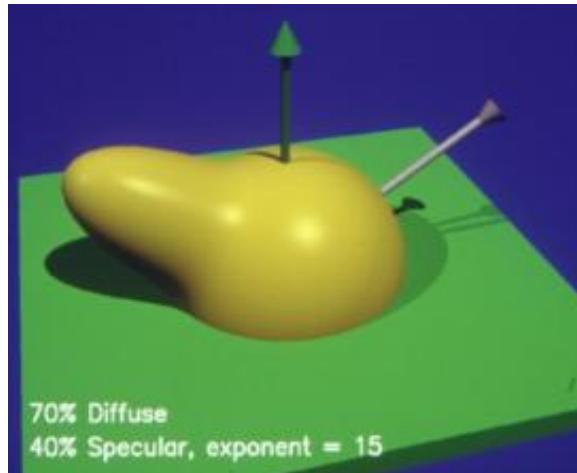
*spiegelnde
Komponente mit
Exponential-
werten für s = 5*



3.2 Beleuchtung und Schattierung



*Überlagerung
der spiegelnden
Komponente mit
der diffus-reflek-
tierenden Kom-
ponente.*

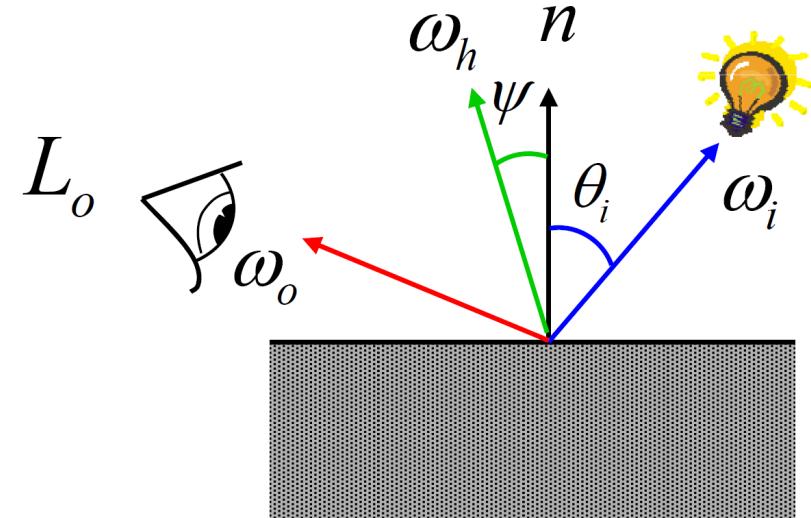


3.2 Beleuchtung und Schattierung



Materialien: Blinn-Phong (1978)

- Erweiterung von Phong
- Reflexionsrichtung muss nicht berechnet werden
- Ähnliche Ergebnisse wie bei Phong (etwas realistischer)

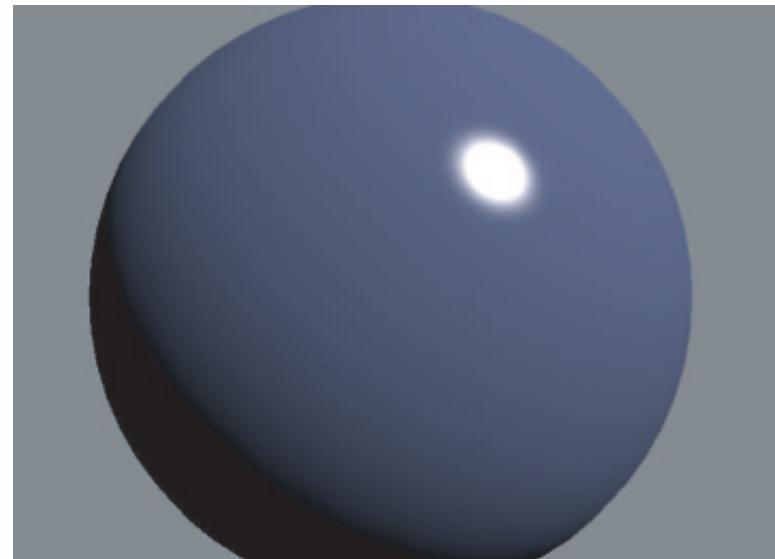


$$\omega_h = \frac{\omega_i + \omega_0}{\|\omega_i + \omega_0\|}$$

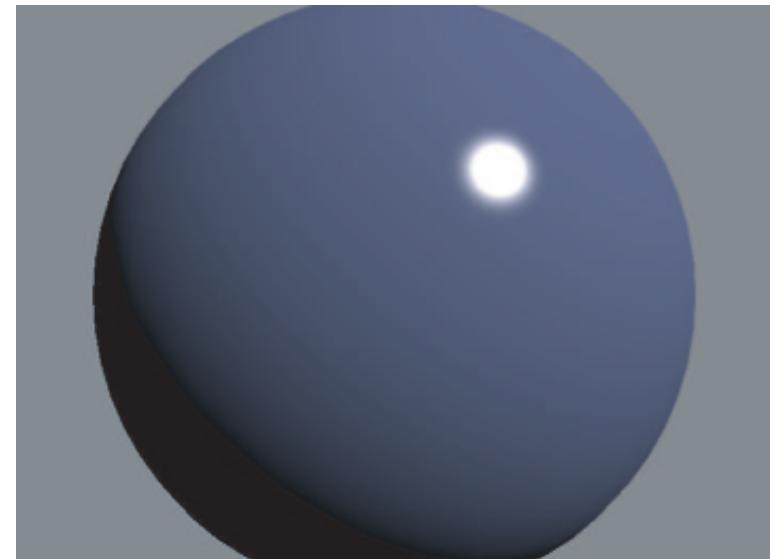
$$\cos \psi = \text{dot}(\omega_h, n)$$

$$f_r = \frac{\rho_d}{\pi} + \frac{s+8}{8\pi} \rho_s \cdot \cos^s \psi$$

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Phong



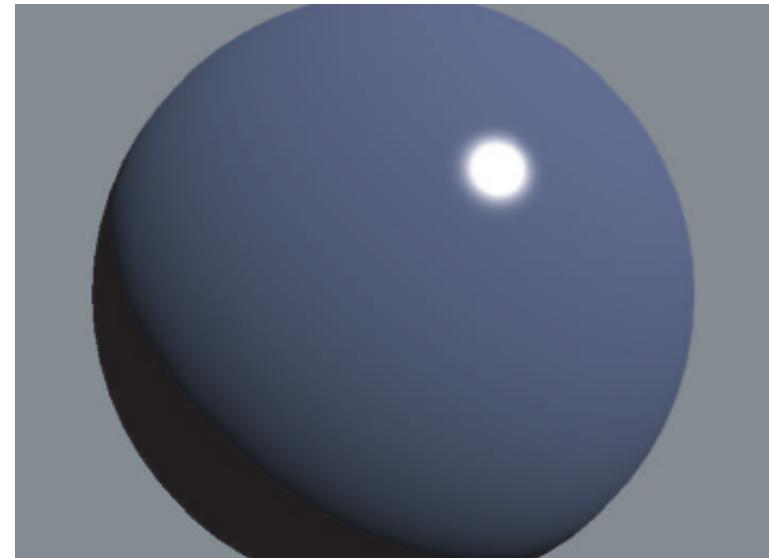
Blinn-Phong

3.2 Beleuchtung und Schattierung



BRDF-Messungen

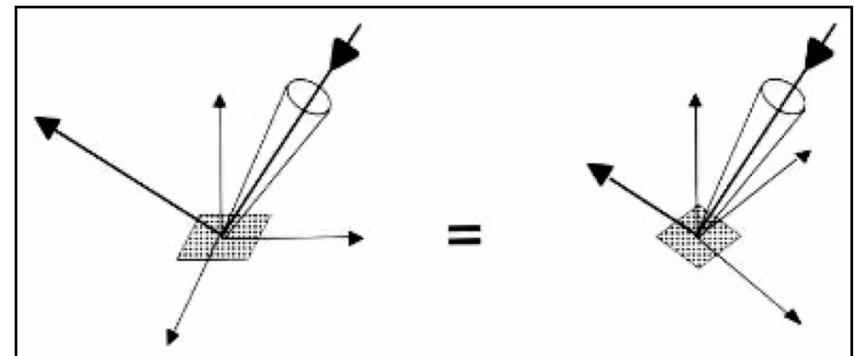
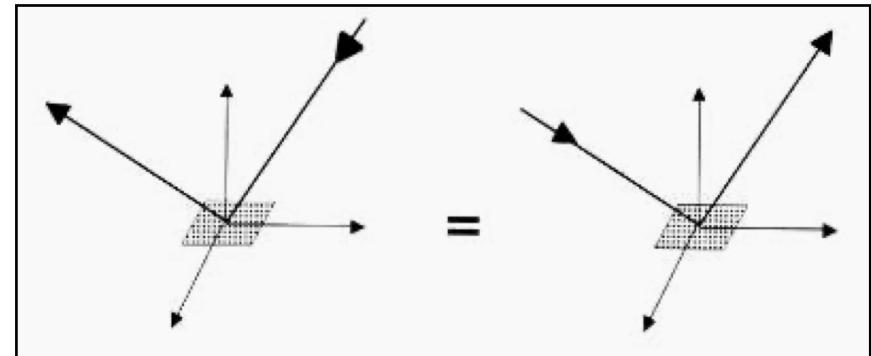
- Objekte mit Blinn-Phong Beleuchtungsmodell sehen aus wie Plaste
- Andere Materialen: Messungen der BRDF von realen Oberflächen



3.2 Beleuchtung und Schattierung



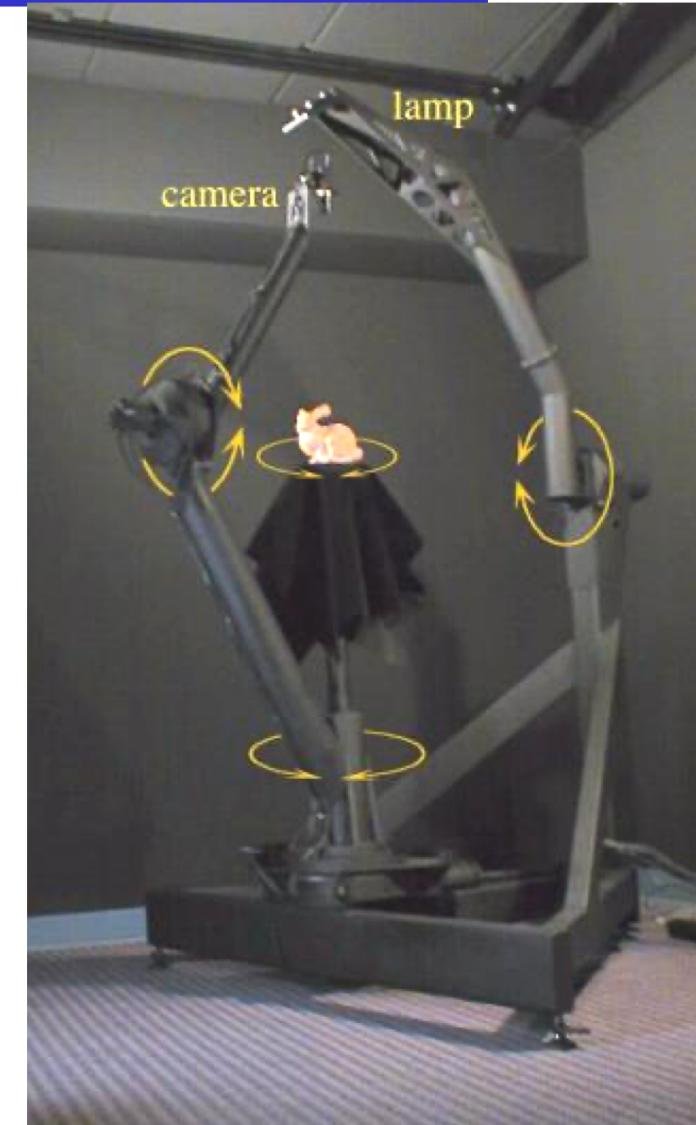
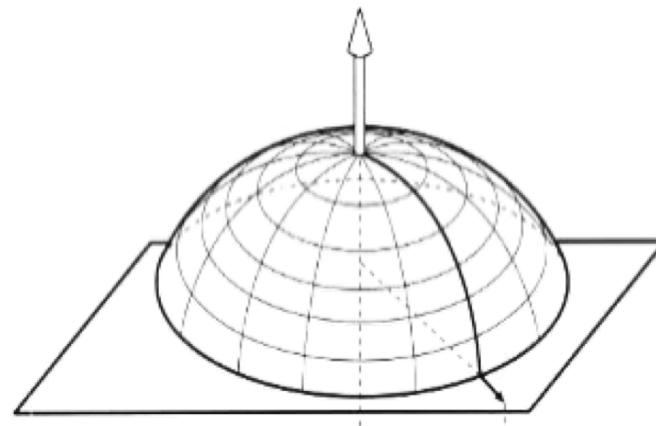
- **BRDF Properties**
 - **Helmholtz reciprocity principle**
 - BRDF remains unchanged if incident and reflected directions are interchanged
$$f_r(\omega_i, \omega_o) = f_r(\omega_o, \omega_i)$$
 - **Smooth surface: isotropic BRDF**
 - reflectivity independent of rotation around surface normal
 - BRDF has only 3 instead of 4 degrees of freedom



3.2 Beleuchtung und Schattierung



- Gonio-Reflectometer
- BRDF measurement
 - point light source position (ω_i)
 - light detector position (ω_o)
- 4 degrees of freedom
- BRDF representation
 - m incident direction samples (ω_i)
 - n outgoing direction samples (ω_o)
 - $m * n$ reflectance values



Stanford light gantry

3.2 Beleuchtung und Schattierung



■ BRDF Measurement

subsurface scattering



3.2 Beleuchtung und Schattierung



▪ **Schattierung**

- Graphische Systeme unterstützen mindestens die folgenden 3 Schattierungstechniken:

- **Flat Shading**

Die Berechnung der Beleuchtungsinformation erfolgt für 1 Punkt pro Fläche. Alle anderen Flächenpunkte erhalten diesen Wert.

- **Gouraud Shading**

Die Beleuchtung wird für jeden Eckpunkt eines Polygons berechnet. Danach wird eine bilineare Interpolation der Farbwerte entlang der Polygonkanten und entlang einer Rasterzeile durchgeführt.

- **Phong Shading**

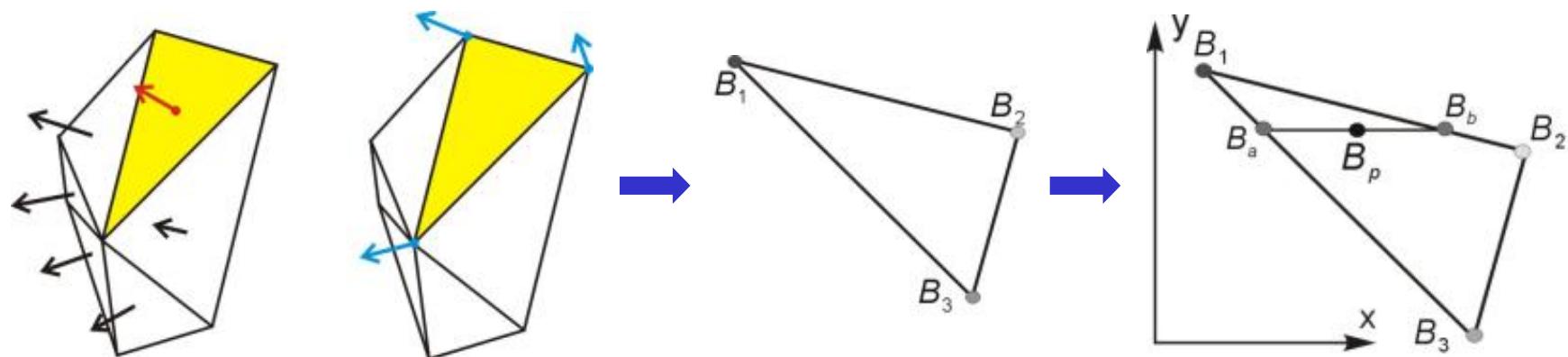
Hierbei erfolgt eine pixelweise Berechnung der Beleuchtungs-information. Dazu wird eine bilineare Interpolation der Normalen in den Polygoneckpunkten entlang der Polygonkanten und entlang einer Rasterzeile durchgeführt.

3.2 Beleuchtung und Schattierung



Gouraud-Shading

1. **Schritt:** Die Normalen der Polygoneckpunkte werden mit Hilfe der gewichteten Flächennormalen bestimmt.
2. **Schritt:** Mit Hilfe des Phongschen Beleuchtungsmodells werden die Farbwerte B_i an den Eckpunkten des Polygons berechnet.
3. **Schritt:** Die Farbwerte der weiteren Pixel werden durch lineare Interpolation berechnet.

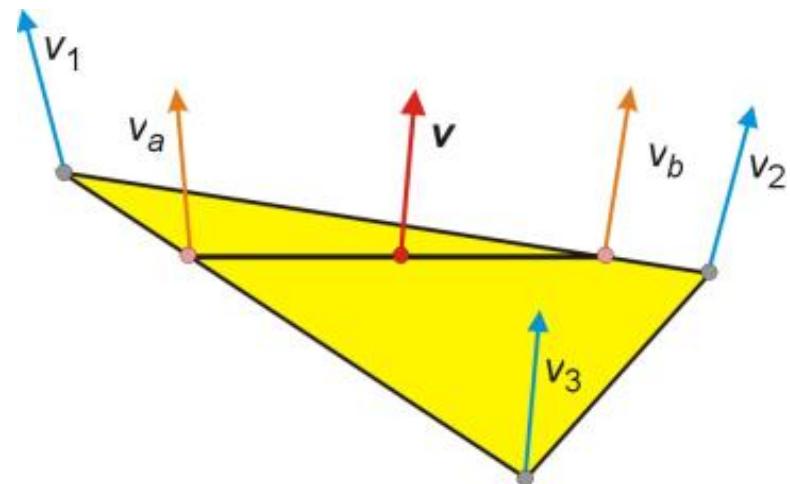


3.2 Beleuchtung und Schattierung



Phong-Shading

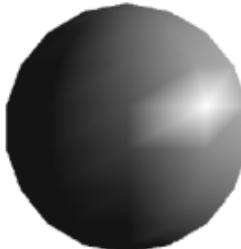
1. **Schritt:** Die Normalen der Polygoneckpunkte werden mit Hilfe der gewichteten Flächennormalen bestimmt.
2. **Schritt:** Für jedes Pixel wird die Normale durch lineare Interpolation abgeschätzt.
3. **Schritt:** Die Farbwerte der Pixel werden mit dem Phongschen Beleuchtungsmodell berechnet.



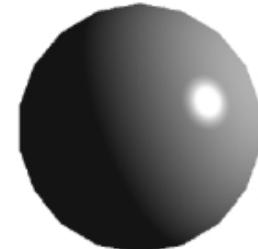
3.2 Beleuchtung und Schattierung



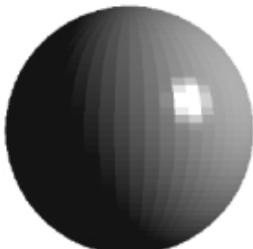
(a₁)



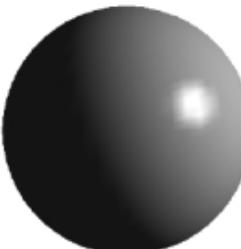
(b₁)



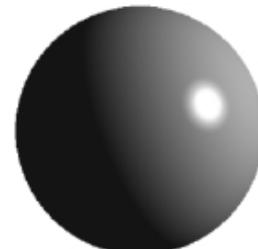
(c₁)



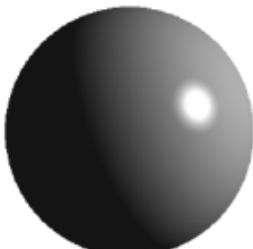
(a₂)



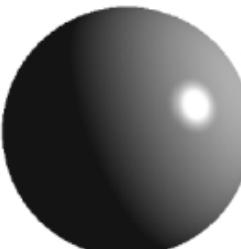
(b₂)



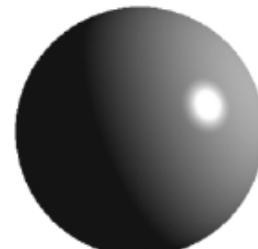
(c₂)



(a₃)



(b₃)



(c₃)

Flat-shading

Gouraud-shading

Phong-shading

*Vergleich der
Schattierungstechniken am
Bildbeispiel*

3.2 Beleuchtung und Schattierung

