

Computergrafik

Prof. Dr.-Ing. Kerstin Müller

Kapitel 5

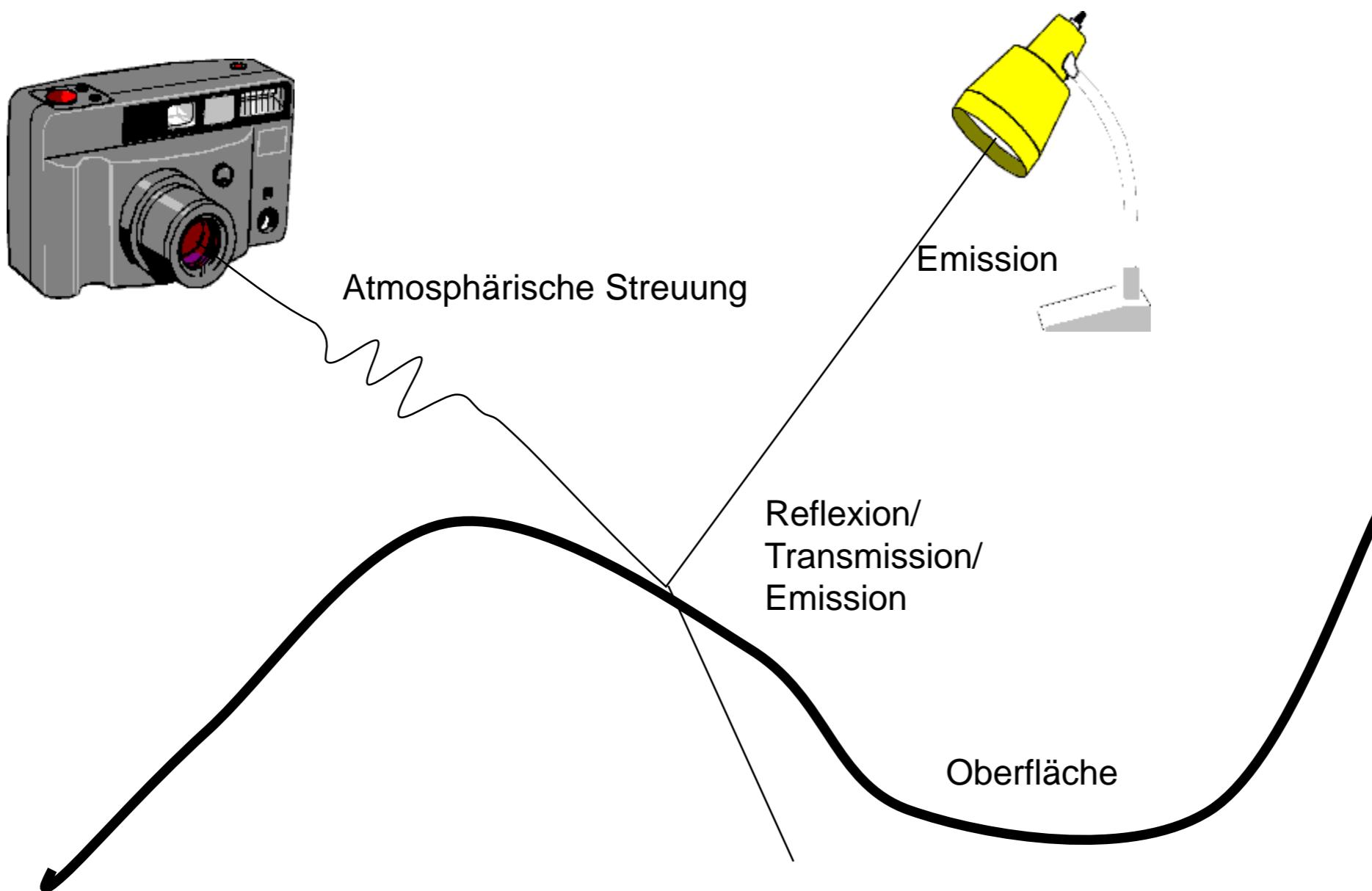
Beleuchtung und Schattierung

Kapitelübersicht

- 5.1 Einleitung und Überblick
 - Beleuchtung vs. Schattierung
- 5.2 Lokale Beleuchtungsmodelle
- 5.3 Interpolative Schattierungstechniken
- 5.4 Globale Beleuchtungsmodelle

Einleitung und Überblick

■ Grundbestandteile des Render-Prozesses



Beleuchtung / Lichtquellen

■ Punktlicht:

- Das Licht strahlt von einem Punkt in der Szene gleichmäßig in alle Richtungen.

■ Richtungslicht:

- Das Licht strahlt von einem unendlich weit entfernten Punkt aus in eine bestimmte Richtung.

■ Spotlight:

- Das Licht strahlt in einem Kegel ausgehend von der Kegelspitze.

■ Flächenlichtquellen:

- Weiche Ausleuchtung: technisch realisiert durch Ebenen, Kegel oder Zylinder mit „vielen“ Lichtquellen.

Definition Beleuchtungsmodell

- Beleuchtungsmodell (illumination model, lighting model, reflection model)

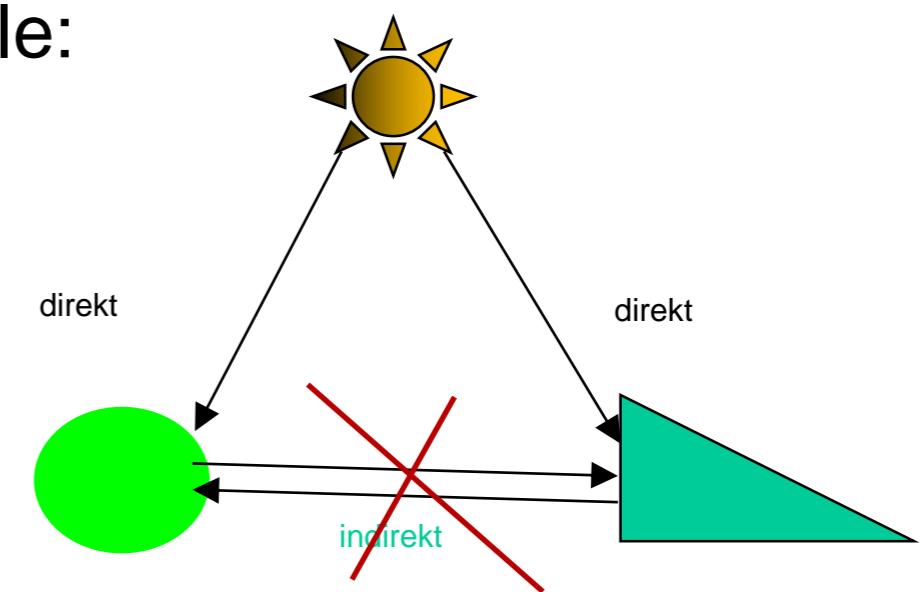
- Beleuchtungs- und Reflexionsalgorithmen bzw. -Modelle

- Lokales Beleuchtungsmodell:

- Berechnung der Intensität (Farbe) eines Punktes in Abhängigkeit von direktem Lichteinfall einer Lichtquelle:

nur direkte Beleuchtung

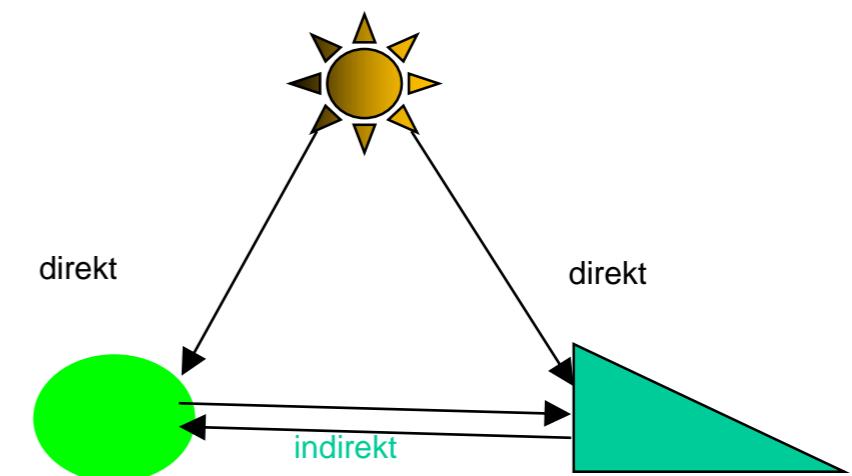
- z.B. Phong local reflection model, physikalisch basierte Modelle



Definition Beleuchtungsmodell

■ Globales Beleuchtungsmodell

- Berechnung der Intensität (Farbe) eines Punktes in Abhängigkeit von
 - direktem Lichteinfall einer Lichtquelle und
 - indirekt einfallendem Licht, d.h. nach Reflexionen an Oberflächen oder Transmissionen durch die eigenen oder anderen Oberflächen:
- direkte und indirekte Beleuchtung
- z.B. Ray-Tracing Verfahren oder Radiosity Verfahren
- Globale Beleuchtungsverfahren benutzen oft lokale Reflexionsmodelle und erweitern diese geeignet.



Definition Schattierungsmodell

■ Schattierungsmodell (shading model)

- Grundstruktur in die ein Beleuchtungsmodell eingebettet ist.
- Ein Schattierungsmodell bestimmt, wann und wo ein Beleuchtungsmodell angewendet wird.

■ Vorgehensweise 1:

- Auswertung eines Beleuchtungsmodells für jedes Pixel.
- z.B. oft bei Raytracing Verfahren angewendet.

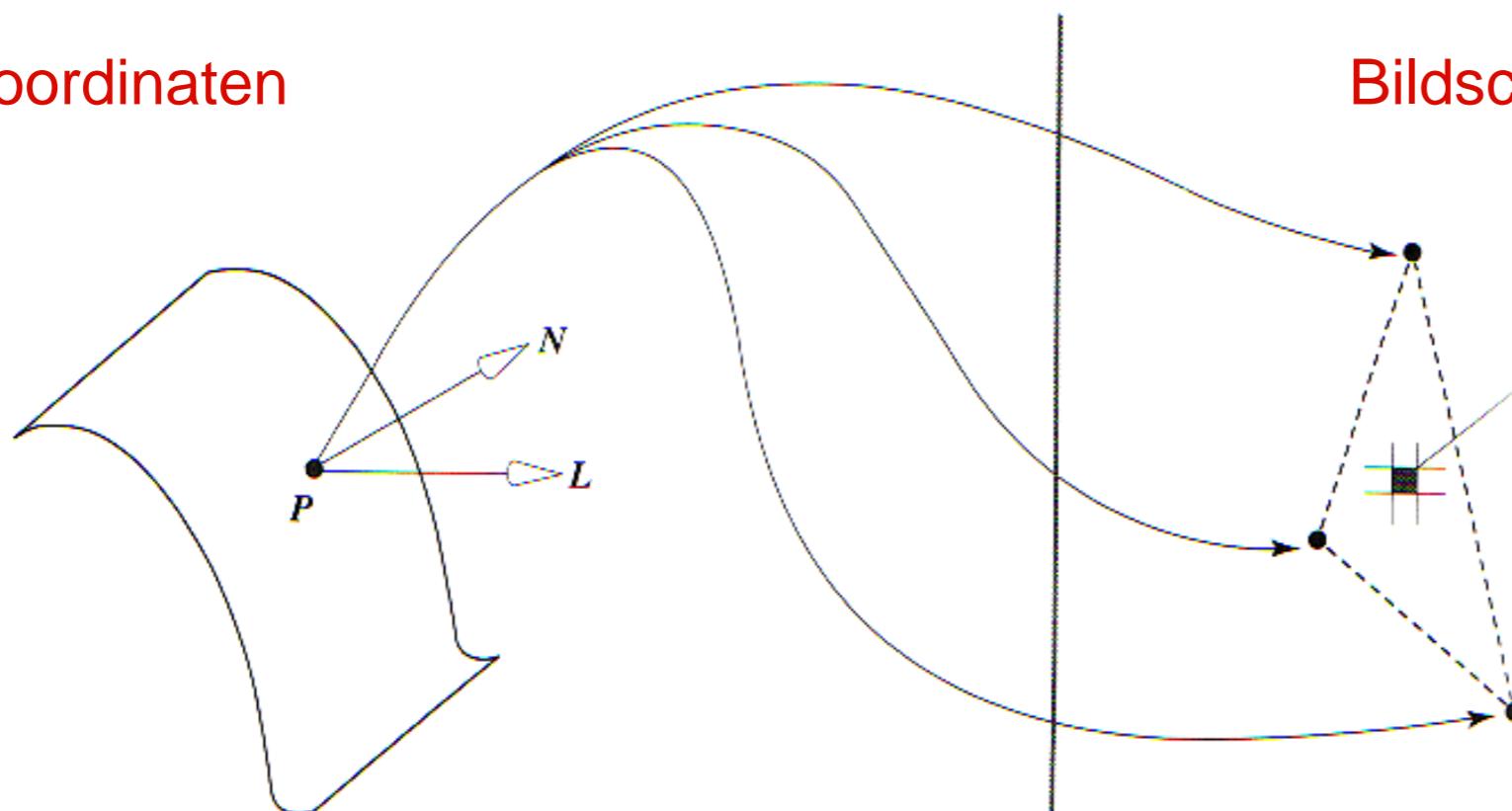
■ Vorgehensweise 2:

- Auswertung eines Beleuchtungsmodells für ausgewählte Pixel, Farben der „Zwischenpixel“ werden per Interpolation bestimmt.
- interpolative shading techniques (flat-, Gouraud- und Phong-shading).

Beleuchtungs- und Schattierungsmodell

■ Gängige Praxis-Kombination:

Weltkoordinaten



Bildschirmkoordinaten

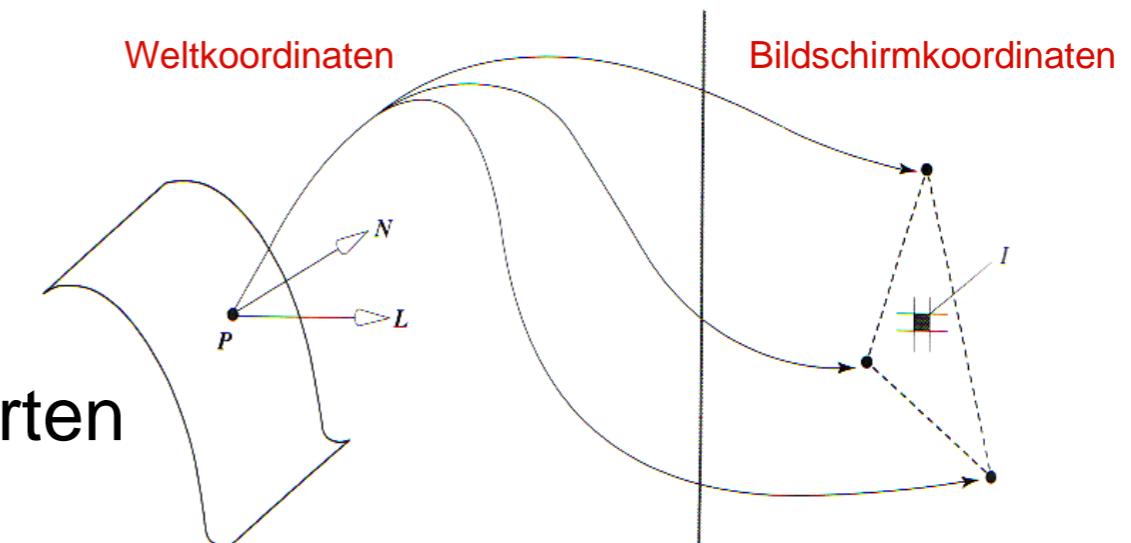
local reflection model:
berechnet die Lichtintensität an
jedem Punkt P auf der Oberfläche
eines Objektes

interpolative shading algorithm:
interpoliert Pixelintensitäten I
aus berechneten Lichtintensitäten
in den Polygonecken

Beleuchtungs- und Schattierungsmodell

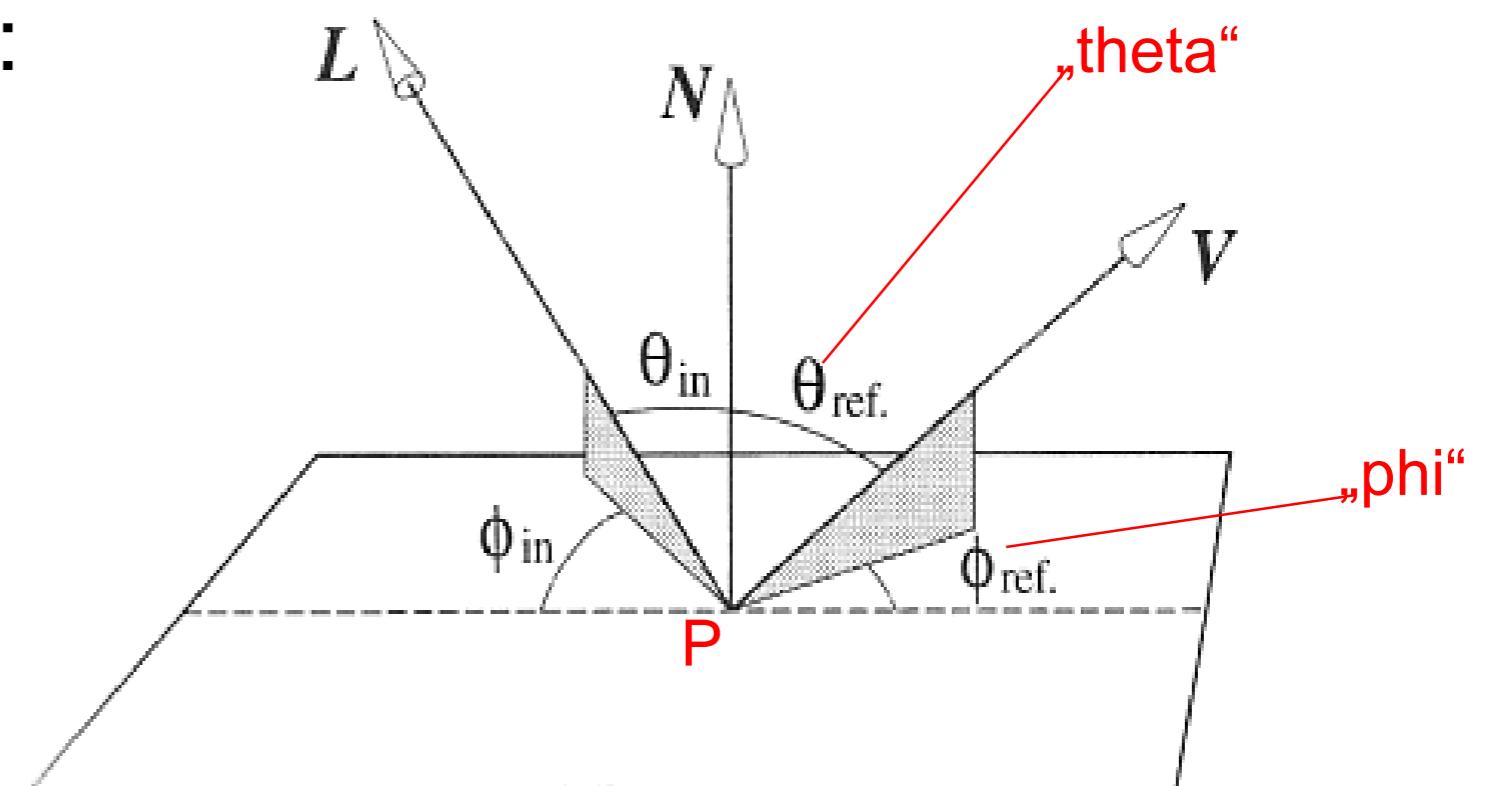
■ Probleme

- Beleuchtung und Betrachtung der Szene erfolgt in Weltkoordinaten.
- Interpolation zwischen Intensitätswerten erfolgt in Bildschirmkoordinaten.
- Zentralprojektionen sind i.A. nicht affin, d.h. Teilverhältnisse werden nicht beibehalten.
- d.h. beim Interpolationsschema (z.B. linearer Interpolation) ergeben sich „falsche“ Teilverhältnisse in Bezug auf das Weltkoordinatensystem.
- Trotz mathematischer Inkorrektheit liefert diese Kombination schnelle und akzeptable visuelle Resultate und wird daher so verwendet.



Lokale Beleuchtungsmodelle

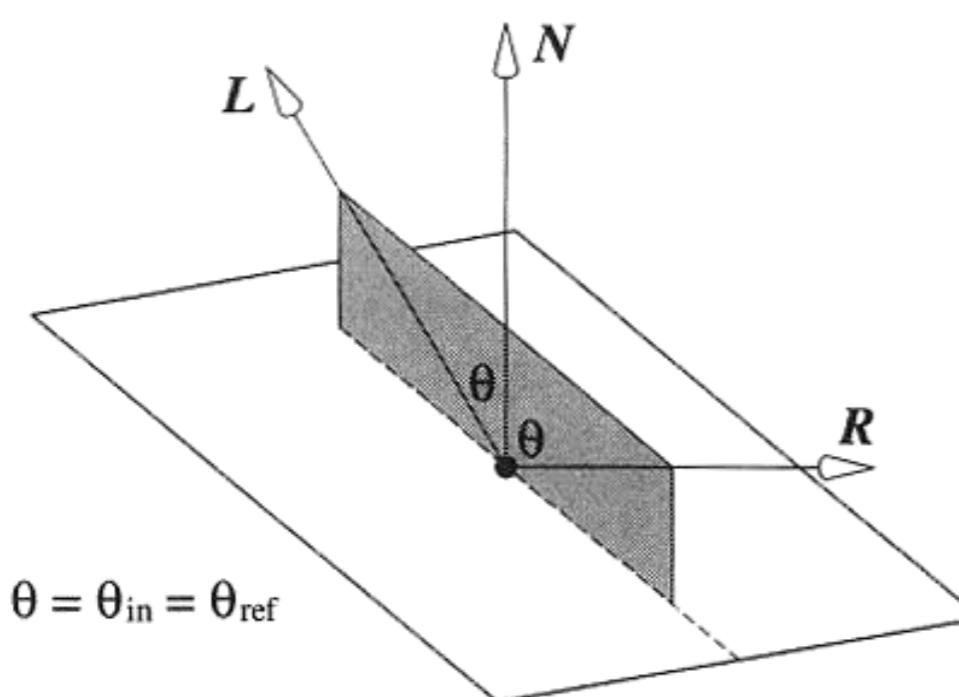
■ Geometriebetrachtung:



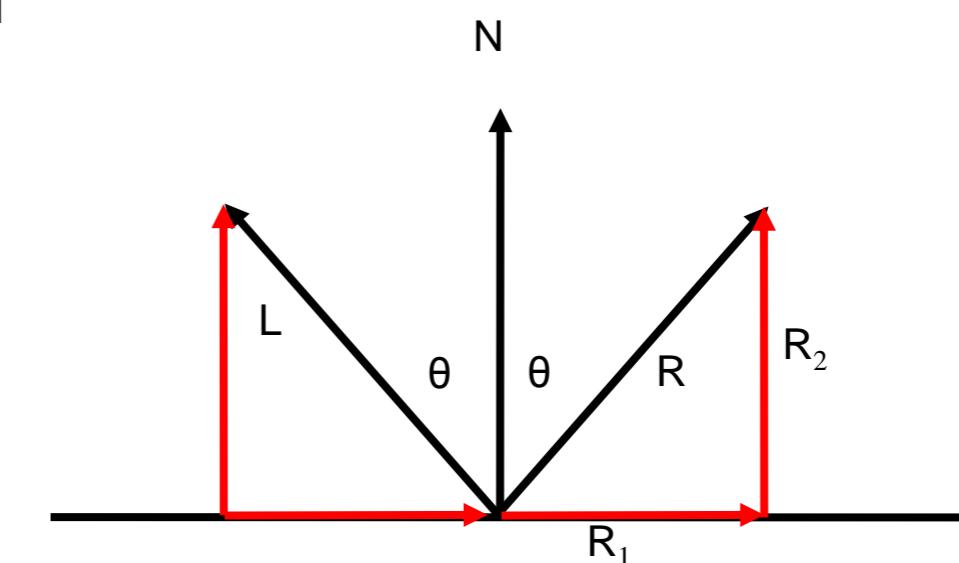
- P Punkt auf Objektoberfläche,
- N Flächennormalenvektor in P, normiert,
- L Vektor von P zu einer Punktlichtquelle, normiert,
- V Vektor von P zum Augpunkt (View), normiert,

Reflexionsgesetz

■ Perfekte spiegelnde Reflexion



Es gilt: L und R liegen in einer Ebene
und $\theta = \theta_{\text{in}} = \theta_{\text{ref}}$



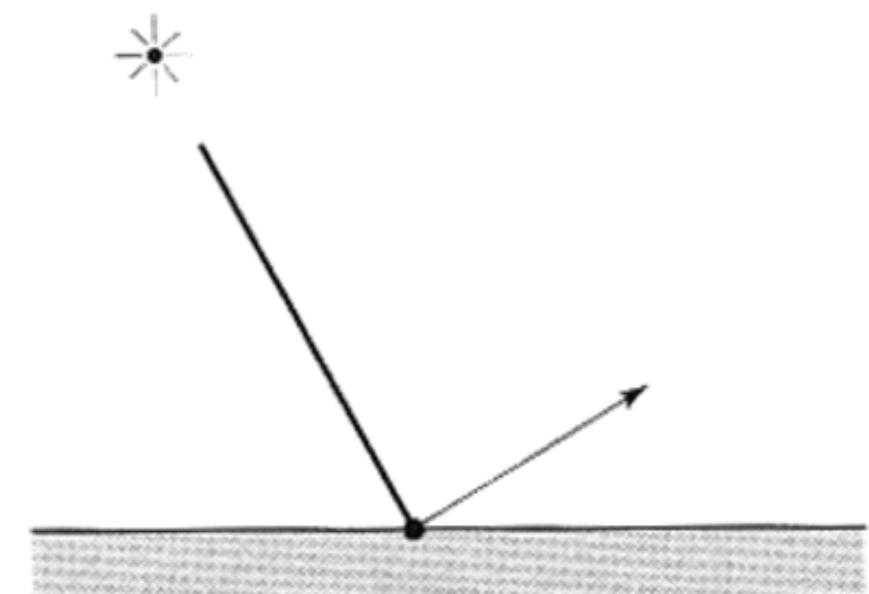
$$\begin{aligned} R &= R_2 + R_1 \\ &= 2 \cdot R_2 - L \\ &= 2(L \cdot N)N - L \end{aligned}$$

Voraussetzung: Vektoren sind normiert!!!

Beleuchtungsmodell von Phong (1)

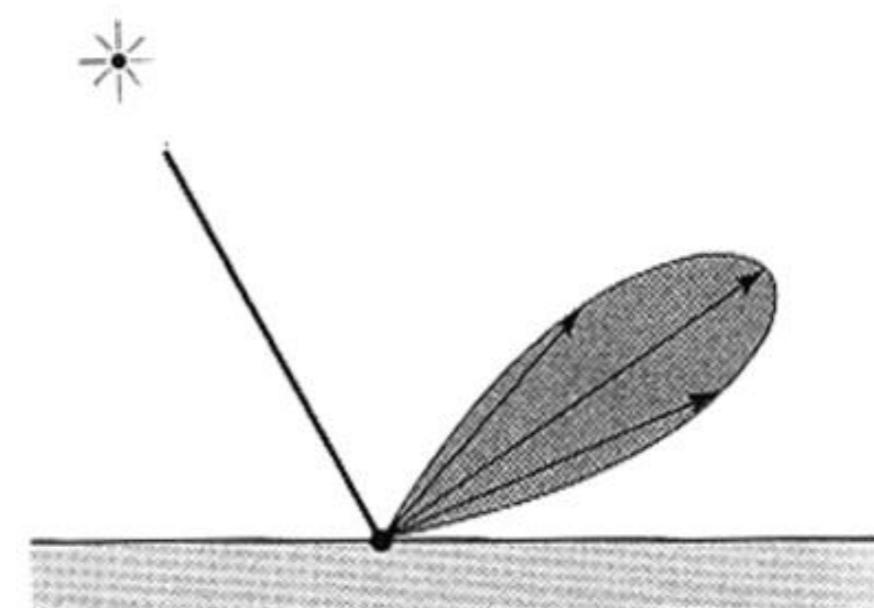
- Empirisches Modell ohne wirkliche physikalische Basis, aber mit guten praktischen Resultaten! (1975)
- Das Modell simuliert folgende physikalische Reflexionsphänomene:

- Vollkommene spiegelnde Reflexion:
 - perfect specular reflection
 - Ein Lichtstrahl wird ohne sich aufzustreuen, perfekt nach dem Reflexionsgesetz reflektiert.
 - Oberfläche: idealer Spiegel
 - Existiert in der Realität nicht.



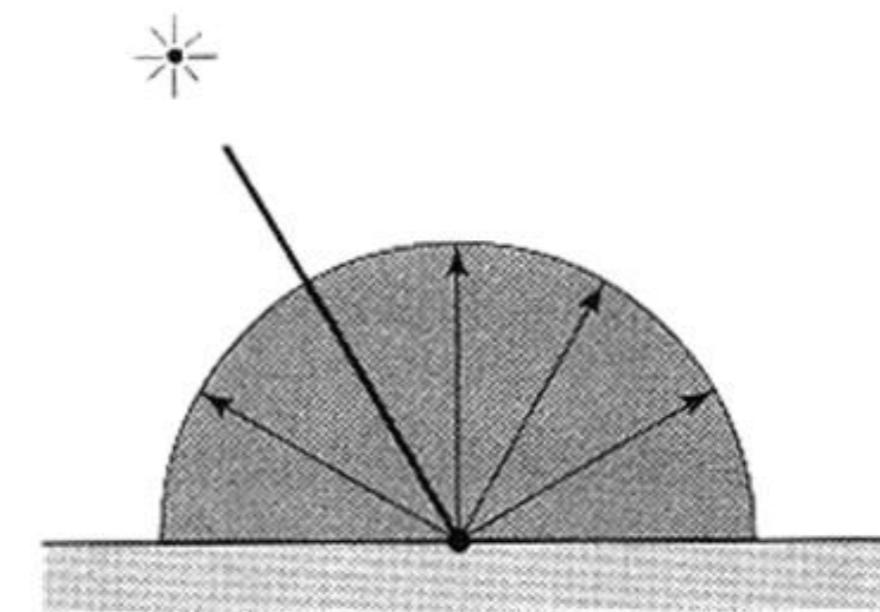
Beleuchtungsmodell von Phong (2)

- Unvollkommene Spiegelnde Reflexion
 - imperfect specular reflection
 - Der Lichtstrahl wird bei der Reflexion „aufgespalten“, es entsteht eine Reflexionskonus um die ausgezeichnete Reflexionsrichtung.
 - Oberfläche: unvollkommener Spiegel, rauhe Oberfläche.
 - Ein Oberflächenelement ist aus vielen mikroskopisch kleinen perfekten Spiegeln mit leicht unterschiedlichen Ausrichtungen zusammengesetzt.



Beleuchtungsmodell von Phong (3)

- Perfekte / vollkommene diffuse Reflexion
 - perfect diffuse reflection
 - Der Lichtstrahl wird bei der Reflexion perfekt gestreut, d.h. mit gleichmässiger Intensität in alle Richtungen.
 - Oberfläche ideale matte Oberfläche, existiert in der Realität nicht.
 - Näherungsweise: feine Lage Puder.



Beleuchtungsmodell von Phong (4)

- Das Phong Beleuchtungsmodell sieht vor, dass das reflektierte Licht eines Oberflächenpunktes aus drei Anteilen linear kombiniert wird.
 - reflected light = imperfect peculiar component („Glanzlicht“)
 - + perfect diffuse component („Streulicht“)
 - + ambient light (Umgebungslicht)
- Ambient Light: Eigentlich nur eine Hilfskonstruktion
 - Oft konstant und simuliert die globale bzw. indirekte Beleuchtung.
 - Einige Objekte sehen die Lichtquellen nicht und würden im Modell schwarz dargestellt, in der Realität werden solche Objekte indirekt beleuchtet.
 - Simple Addition einer Konstanten ersetzt komplexe Berechnungen.

Beleuchtungsmodell von Phong (5)

■ Welchen Typ von Oberflächen beschreibt das Modell?

- Die Lineare Kombination von diffuser und spiegelnder Reflexion entspricht z.B. der Physik polierter Oberflächen.

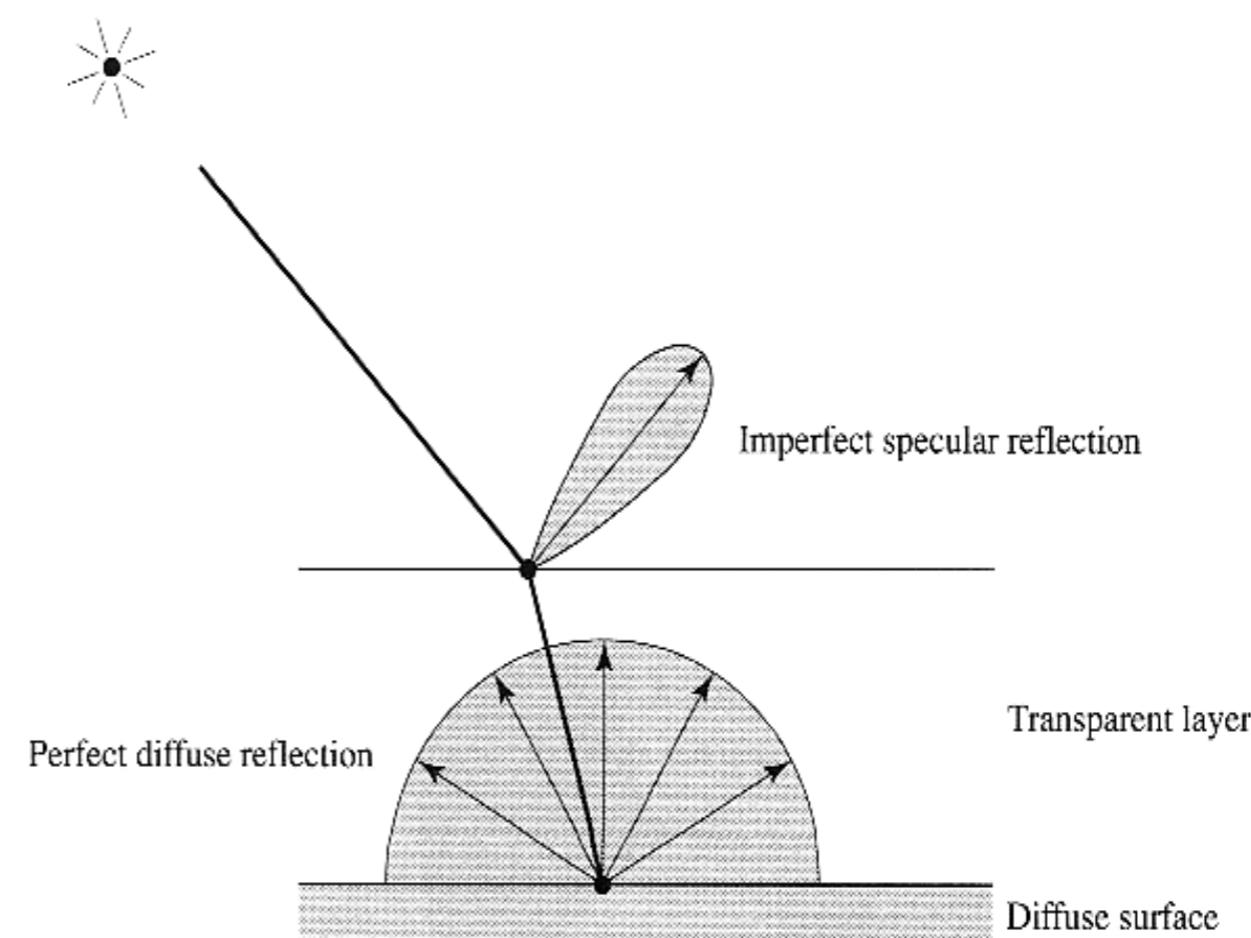
- z.B. poliertes Holz:

- transparente Schicht:

- spiegelnd

- Oberfläche:

- diffus.



Beleuchtungsmodell von Phong (6)

- Das Mathematische Modell (ohne Farbe)

$$\mathbf{I} = k_d \cdot \mathbf{I}_d + k_s \cdot \mathbf{I}_s + k_a \cdot \mathbf{I}_a$$

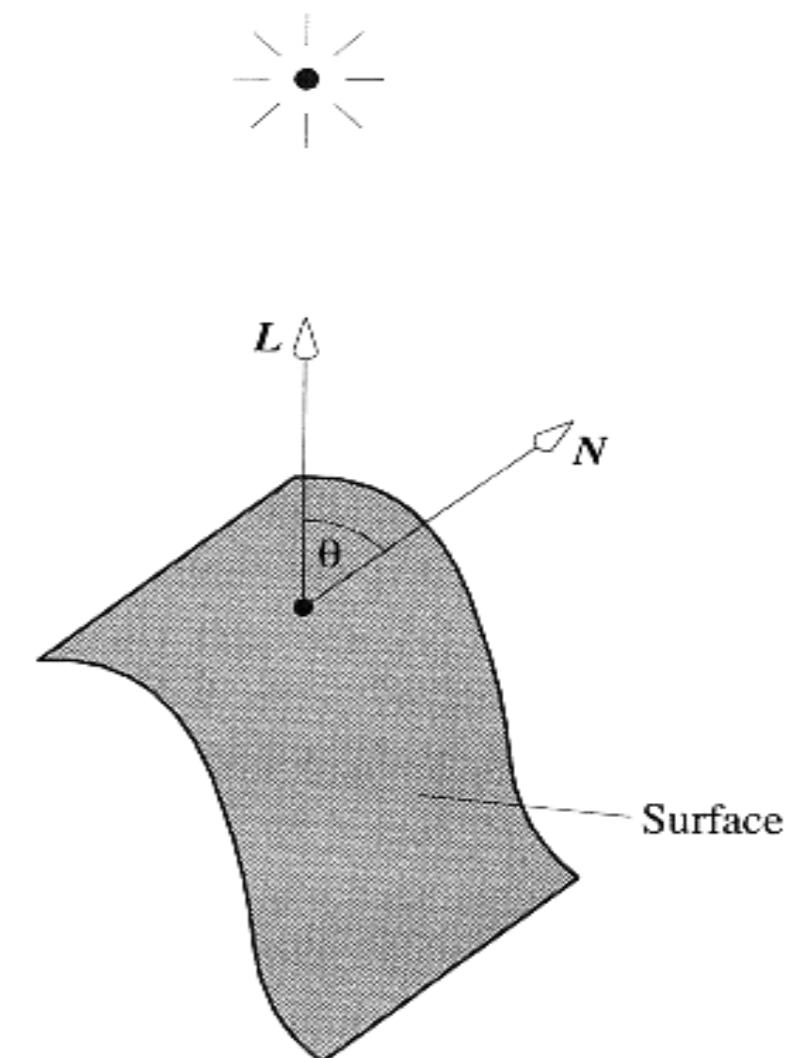
- Die Physik der Oberfläche wird über die Verhältnisse der einzelnen Komponenten modelliert.
- Für die Gewichte gilt: $k_d + k_s + k_a = 1$

Beleuchtungsmodell von Phong (7)

■ Diffuse Reflexion (der Term $k_d \cdot I_d$)

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{I}_i \cos(\theta) = \mathbf{I}_i (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N})$$

- \mathbf{I}_i : Intensität des einfallenden Lichts
- θ : Winkel zwischen Punktnormale \mathbf{N} und Lichtvektor \mathbf{L} .
- Die diffuse Komponente des Phong-modells modelliert das Kosinusgesetz von Lambert:

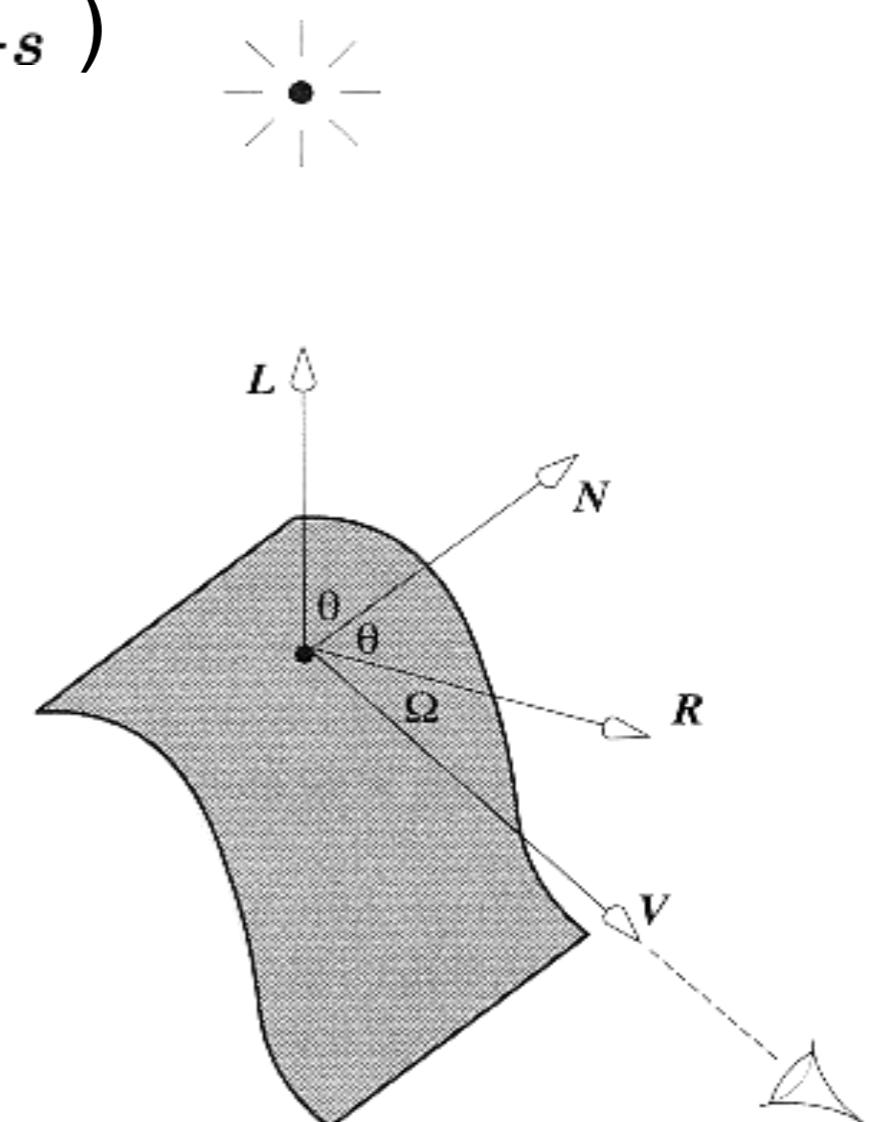


Bei ideal diffusen (matten) Oberflächen ist die Intensität des in alle Richtungen gleich reflektierten Lichtes eine Funktion des Kosinus zwischen Oberflächennormale und Lichtvektor.

Beleuchtungsmodell von Phong (8)

■ Spiegelnde Reflexion (der Term $k_s \cdot I_s$)

- Physikalisch gesehen besteht die spiegelnde Reflexion aus einem Abbild der Lichtquelle, das über einen Teil der Oberfläche „geschmiert“ ist:
 - ein so genanntes **Highlight**.
 - die Farbe der Lichtquelle erscheint auf der Oberfläche des Objektes.
 - z.B. weißer Fleck auf schwarzer Billard-Kugel.
- Ein Highlight kann vom Betrachter nur gesehen werden, wenn seine Betrachtungsrichtung V nahe an der Reflexionsrichtung R liegt.

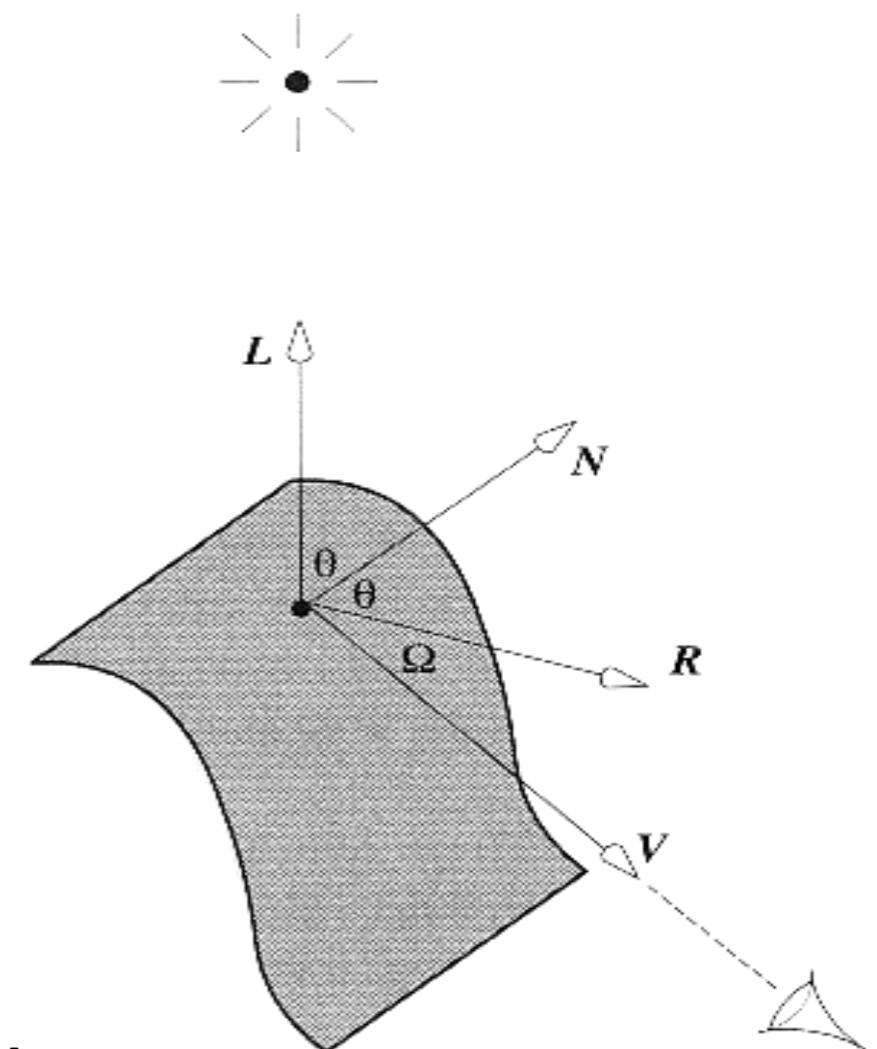


Beleuchtungsmodell von Phong (9)

- Dies wird simuliert durch

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_i \cos^n(\Omega) = \mathbf{I}_i (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n$$

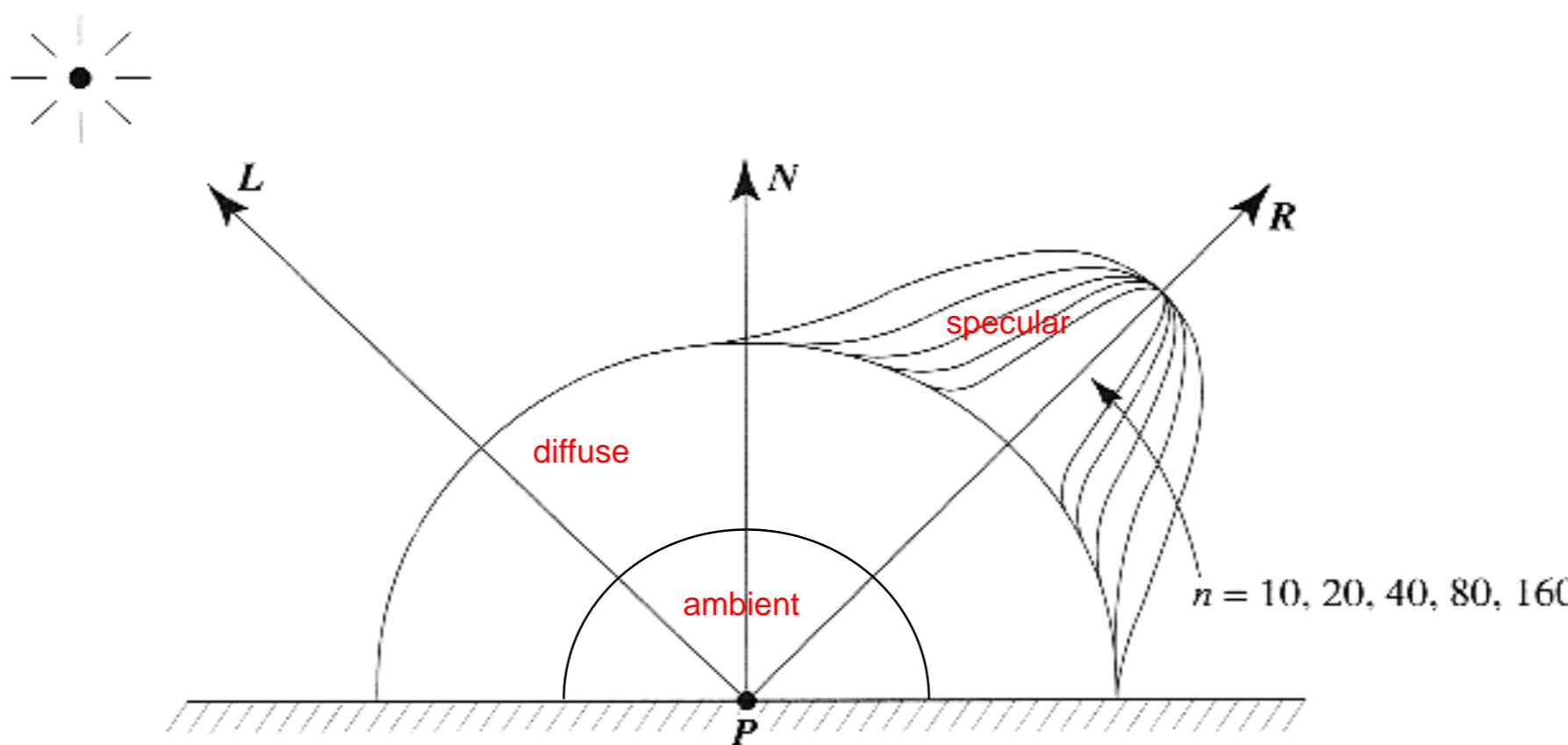
- Ω : Winkel zwischen \mathbf{V} und \mathbf{R} .
- n : simuliert den Perfektionsgrad der Oberfläche.
- $n \rightarrow \infty$: perfekter Spiegel, reflektiertes Licht nur in Richtung \mathbf{R} .
- Für verschiedene \mathbf{L} entsteht (bis auf seine Ausrichtung um \mathbf{R}) immer der gleiche Reflexions-Intensitätskonus:
 - Dies ist nicht die reale Abhängigkeit von Spiegelungen von der Ausrichtung des Lichtvektors! Gravierender Mangel des Modells!!!



Beleuchtungsmodell von Phong (10)

■ Gesamtmodell:

$$\begin{aligned}\mathbf{I} &= k_d I_d + k_s \mathbf{Is} + k_a \mathbf{I}_a \\ &= \mathbf{I}_i (k_d (\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_s (\mathbf{R} \cdot \mathbf{V})^n) + k_a \mathbf{I}_a\end{aligned}$$



Beleuchtungsmodell von Phong (11)

■ Beispiel:

k_a konstant



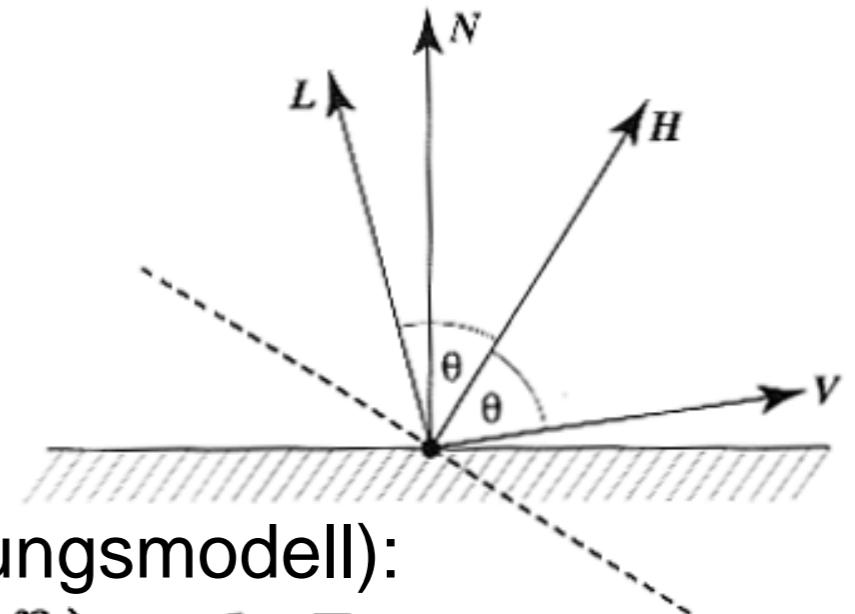
Beleuchtungsmodell von Blinn-Phong (12)

- Sind Betrachter und Lichtquelle unendlich (oder zumindest hinreichend) weit entfernt, so kann statt dem Reflexionsvektor R ein konstanter Vektor H eingesetzt werden: $\mathbf{H} = (\mathbf{L} + \mathbf{V}) / \|\mathbf{L} + \mathbf{V}\|$



- Statt RV jetzt NH , das sich zwar von RV unterscheidet, aber sich „auf gleiche Weise verhält“.

- Damit ergibt sich (Blinn-Phong Beleuchtungsmodell):
$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_i (k_d(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_s(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n) + k_a \mathbf{I}_a$$



Beleuchtungsmodell von Blinn-Phong (13)

■ Das mathematische Modell (mit Farbe)

- Für farbige Objekte bzw. Lichtquellen wird das Modell getrennt auf die Farbkomponenten $\mathbf{I}_r, \mathbf{I}_g, \mathbf{I}_b$ angewendet:

$$\mathbf{I}_r = \mathbf{I}_i (k_{dr}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_{sr}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n) + k_{ar}\mathbf{I}_a$$

$$\mathbf{I}_g = \mathbf{I}_i (k_{dg}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_{sg}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n) + k_{ag}\mathbf{I}_a$$

$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_i (k_{db}(\mathbf{L} \cdot \mathbf{N}) + k_{sb}(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^n) + k_{ab}\mathbf{I}_a$$

- k_{dr}, k_{dg}, k_{db} modellieren die Farbe des Objekts.
- k_{sr}, k_{sg}, k_{sb} modellieren die Farbe der Lichtquelle.
- k_{ar}, k_{ag}, k_{ab} modellieren die Farbe des Umgebungslichts.

Beleuchtungsmodell von Phong (14)

■ Bemerkungen

- Das Beleuchtungsmodell nach Phong ist kein Versuch, optische Gesetze physikalisch exakt zu modellieren
- Das Modell ist empirisch!!!
- Die lokale Beleuchtung ist schnell zu berechnen, die Bilder sind gut.
 - Außer der Normaleninformation werden keine weiteren Geometrie-Informationen verwendet.
 - Diffuser und Spiegelnder Anteil werden lokal berechnet.
- Die Farbe des spiegelnden Anteils wird durch die Farbe der Lichtquelle bestimmt bzw. über die der Lichtquelle zugeordneten Konstanten k_{sr}, k_{sg}, k_{sb} .

Beleuchtungsmodell von Phong (15)

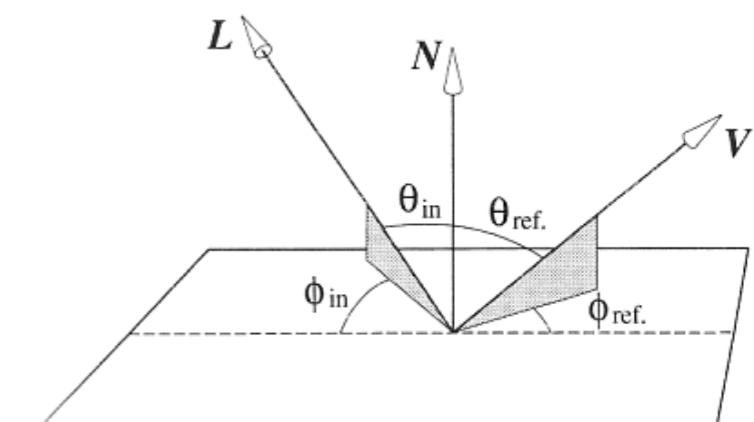
■ Gravierende Mängel des Modells

- Gegenseitige Reflektionen und Spiegelungen der Flächen werden durch den ambienten Term nur unzureichend beschrieben.
- Objektoberflächen wirken „plastikhaft“, z.B. lässt sich kein blankes Metall modellieren.
- Lösungsmöglichkeiten:
 - Physikalisch basierte lokale Beleuchtungsmodelle, die versuchen die Bi-directional Reflection Distribution Function (BRDF) korrekt zu simulieren.
 - Gänzlich andere Techniken, wie z.B. Mapping-Verfahren.

BRDF's

■ Bi-directional Reflection Distribution Function (BRDF)

- Das von einem Punkt der Oberfläche reflektierte Licht wird durch eine BRDF beschrieben.
- Die Bezeichnung betont insbesondere die Abhängigkeit des in einer beliebigen Richtung reflektierten Lichts von der Richtung des einfallenden Lichts.
- Sind die Richtungen L und V gegeben, so wird der Zusammenhang zwischen den Intensitäten also durch eine



$$BRDF = f(\theta_{in}, \phi_{in}, \theta_{ref.}, \phi_{ref.}) = f(\mathbf{L}, \mathbf{V})$$

beschrieben (evtl. abhängig von der Wellenlänge)

BRDF`s

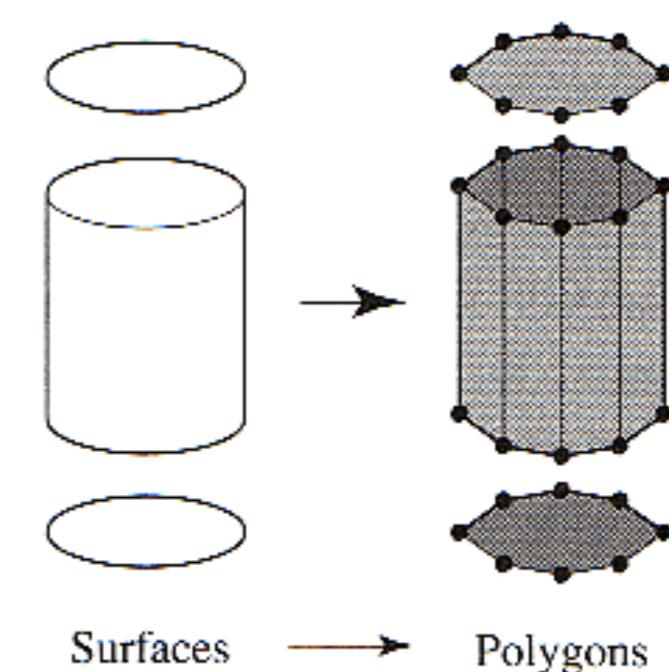
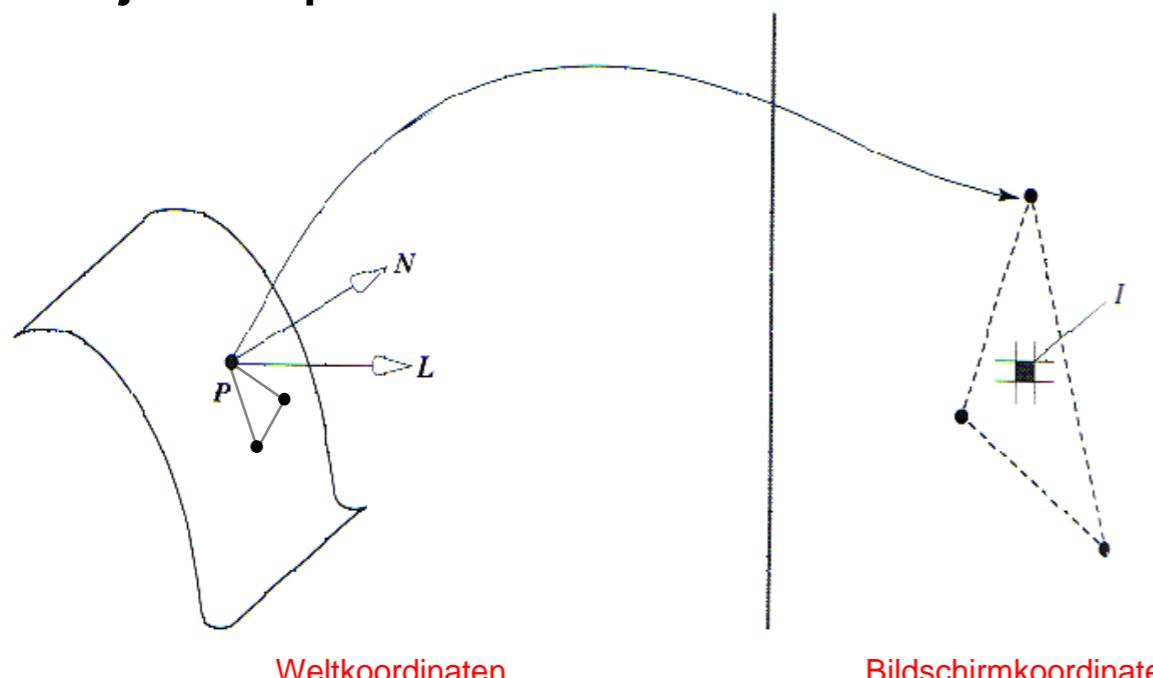
- In der Praxis fällt an einem Oberflächenpunkt Licht von mehr als einer Richtung ein.
- Das gesamt resultierende reflektierte Licht muß mittels Integration über die Hemisphäre gewonnen werden
- Fragestellungen:
 - Wie gewinnt man BRDF`s
 - z.B. Messungen, Modelle
 - In welcher Feinheit repräsentiert man BRDF`s
 - Heuristiken, falls keine geschlossene Form
 - Wie speichert und verarbeitet man effizient BRDF`s
 - z.B. Matrizen, Tabellen.

Nachteile lokaler Beleuchtungsmodelle

- Modellieren den Idealfall eines einzelnen von einer einzigen Punktlichtquelle beleuchteten Objekts in der Szene.
- Betrachten ausschließlich direkte Beleuchtung (bis auf Hilfskonstruktionen).
- Interaktion mit anderen Objekten werden nicht modelliert, d.h.
 - keine indirekte Beleuchtung
 - kein Schattenwurf
- Lösung: globale Beleuchtungsverfahren.

5.3 Interpolative Schattierungstechniken

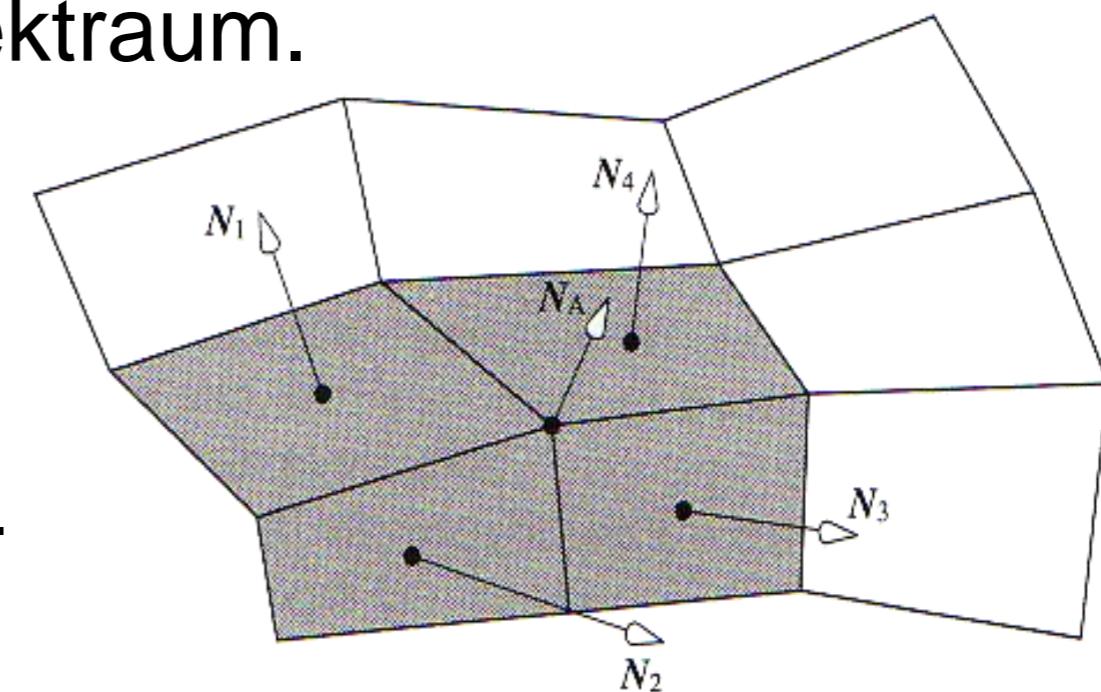
- Wie wird nun die Auswertung eines Beleuchtungsmodells bei einem Objekt zur Bestimmung der Lichtintensität auf dessen Oberfläche angewendet?
 - Wir setzen im Folgenden eine polygonale Objektrepräsentation voraus.



man beachte die Unterscheidung zwischen 3D Objektraum und 2D Bildraum.

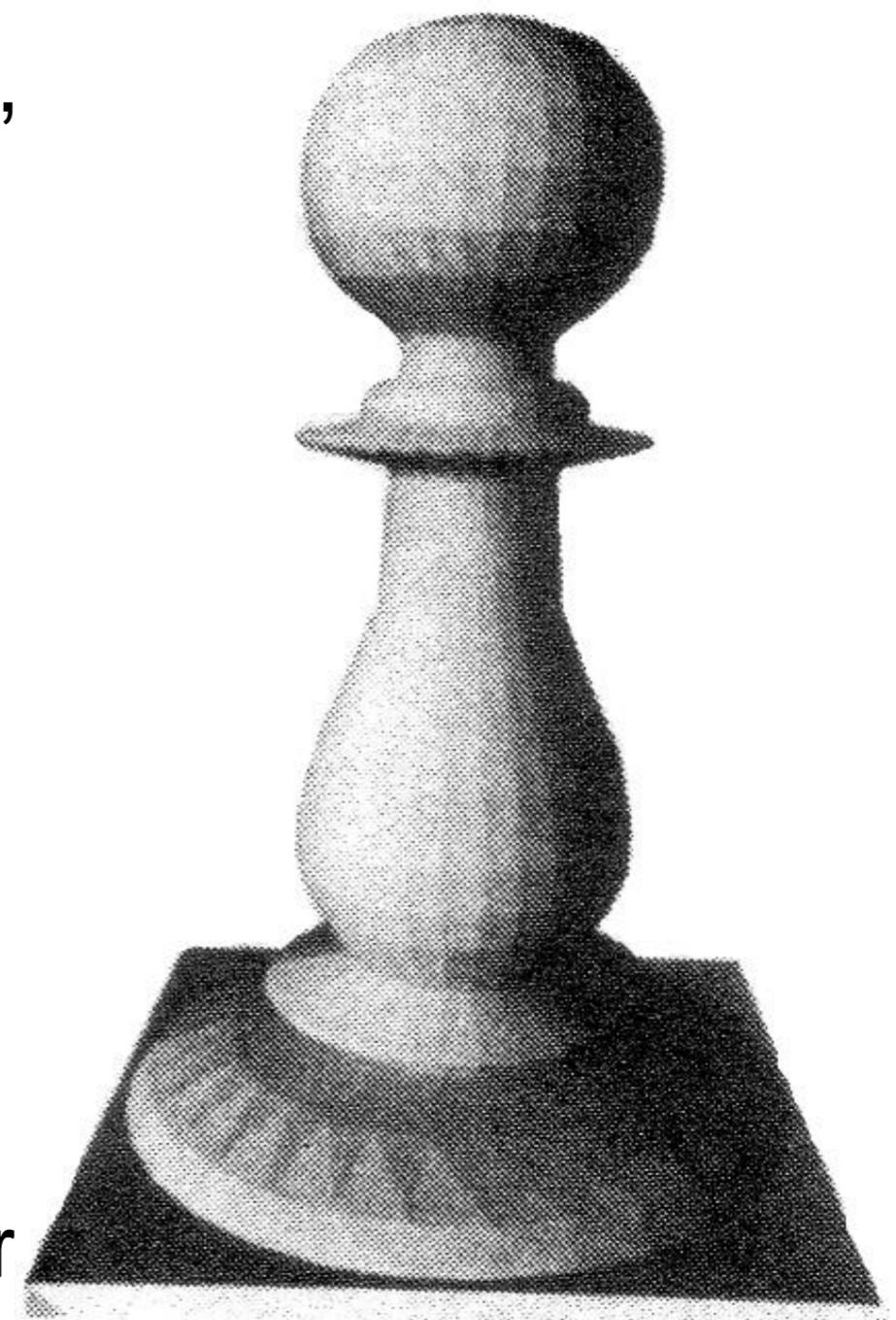
Flat Shading (1)

- Pro Polygon / Facette wird die Lichtintensität mit dem verwendeten Beleuchtungsmodell genau einmal in einem ausgewählten Oberflächenpunkt ausgewertet und allen weiteren Punkten der Polygon-Oberfläche zugewiesen.
- Grundlage der Berechnung ist die Polygon- oder Oberflächennormale im Objektraum.
 - hier : N_1, N_2, N_3, N_4
 - Als ausgewählte Punkte werden die Polygonschwerpunkte oder Polygoneckpunkte gewählt.



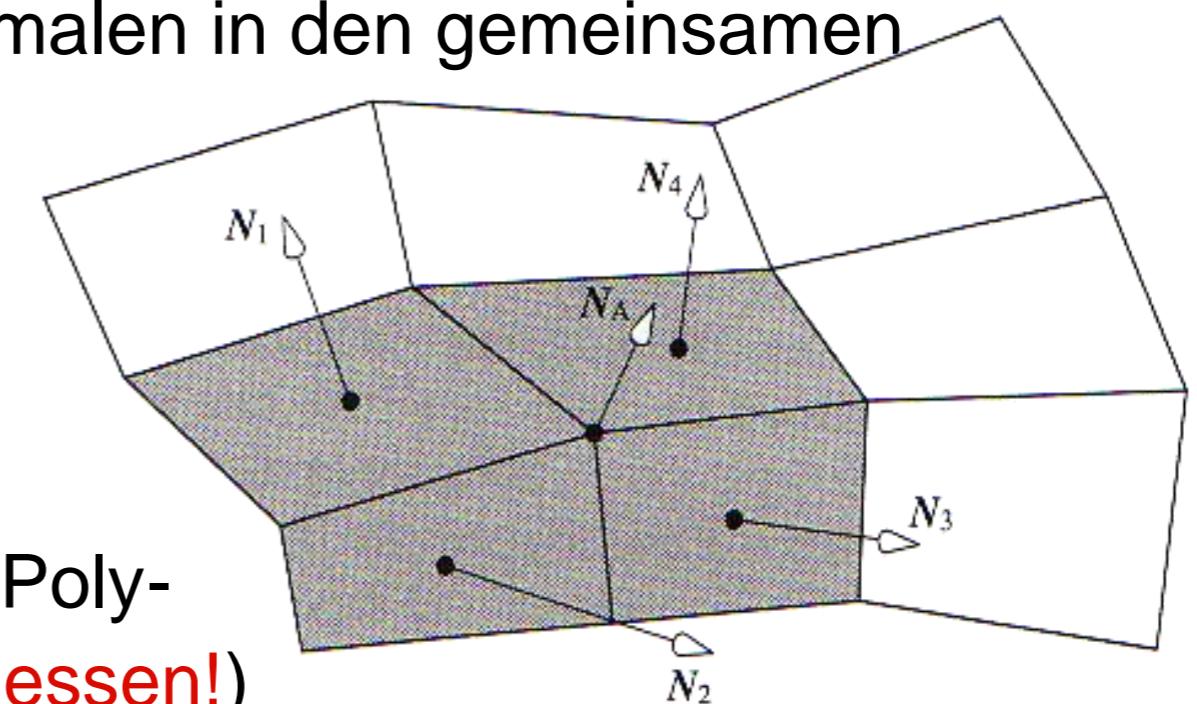
Flat Shading (2)

- Einfaches und effizientes Verfahren, Interpolation findet nicht statt.
- Kanten in Polygonnetzen bleiben bei der Darstellung sichtbar:
 - Objekte werden facettiert dargestellt.
 - Unstetiger Intensitätsverlauf über die Polygonkanten.
- „Runde“ Objekte nur durch extrem hohe Polygonzahl!
- Anwendung für Voransicht, bzw. zur Kontrolle der Polygonauflösung.



Gouraud- und Phong-Shading (1)

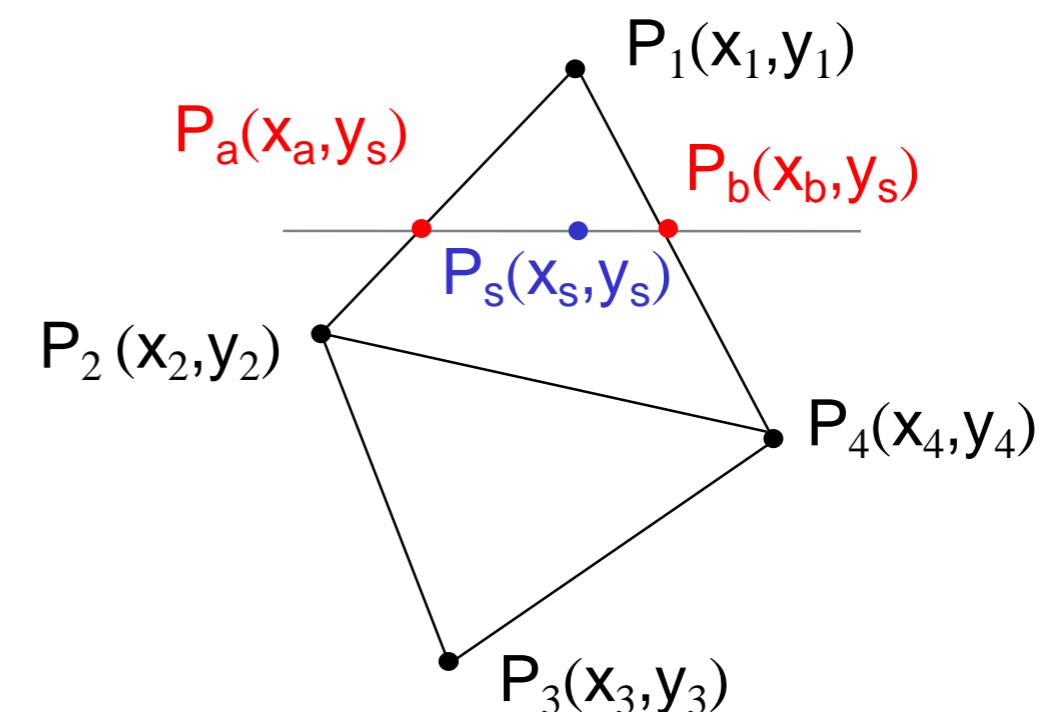
- Verfahren, die versuchen mittels Interpolation die (virtuellen) Kanten zwischen einzelnen Polygonfacetten zu glätten bzw. ganz zu „verwischen“.
 - Hier liegt die Annahme zugrunde, dass das Polygonnetz die Approximation einer gekrümmten Fläche ist.
 - Grundlage sind die Eckpunktnormalen in den gemeinsamen Polygoneckpunkten.
 - hier z.B. N_A .
 - Eckpunktnormale entsteht aus (gewichteter) Mittelung der Polgonnormalen aller anrenzenden Polygone. (**Normalisierung nicht vergessen!**)



Gouraud- und Phong-Shading (2)

■ Bi-lineare Interpolation im Bildraum:

- Werte einer Größe (hier z.B. Intensität) im Inneren und auf dem Rand des Polygons werden aus den Werten der Größe in den Eckpunkten des Polygons, die i.A. im Objektraum ermittelt wurden, mittels zweifacher linearer Interpolation im Bildraum bestimmt.
- Effiziente Implementierungen arbeiten mit einer Scanline und inkrementell.

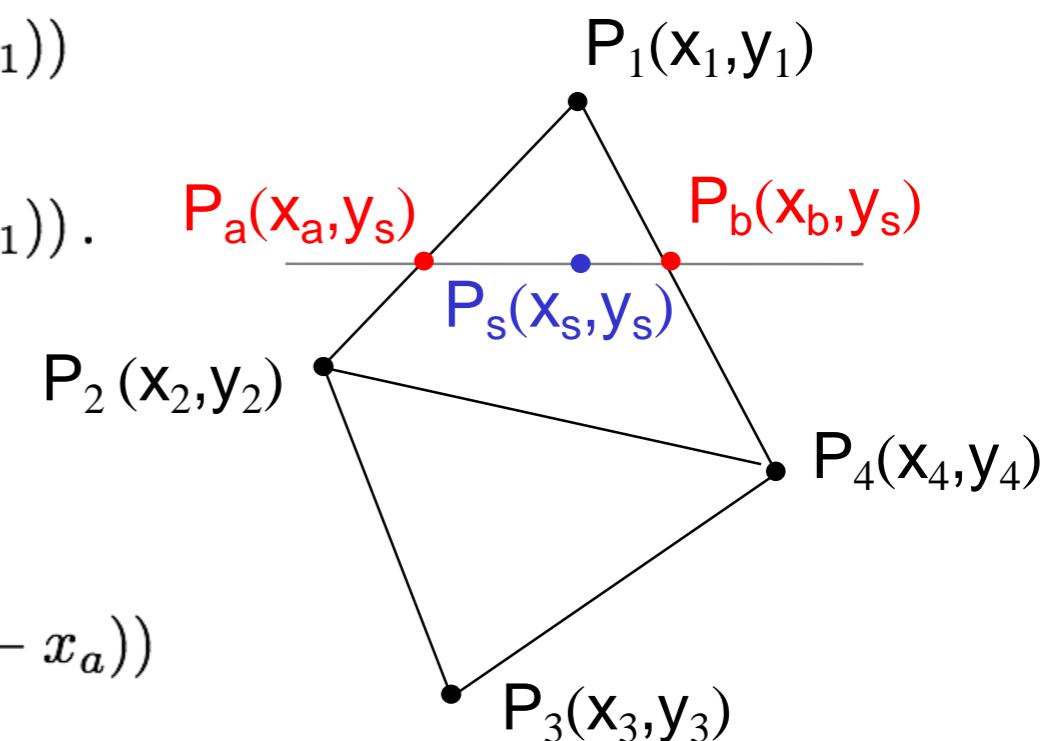


Gouraud- und Phong-Shading (3)

- 1. Schritt: Werte $W(P_1), W(P_2), W(P_3), W(P_4)$ bestimmen.
- 2. Schritt: Schnittpunkte Scanline-Polygonkanten P_a, P_b bestimmen.
- 3. Schritt: Werte $W(P_a), W(P_b)$ bestimmen:

$$W(P_a) = \frac{1}{y_2 - y_1} (W(P_1)(y_2 - y_s) + W(P_2)(y_s - y_1))$$

$$W(P_b) = \frac{1}{y_4 - y_1} (W(P_1)(y_4 - y_s) + W(P_4)(y_s - y_1)).$$

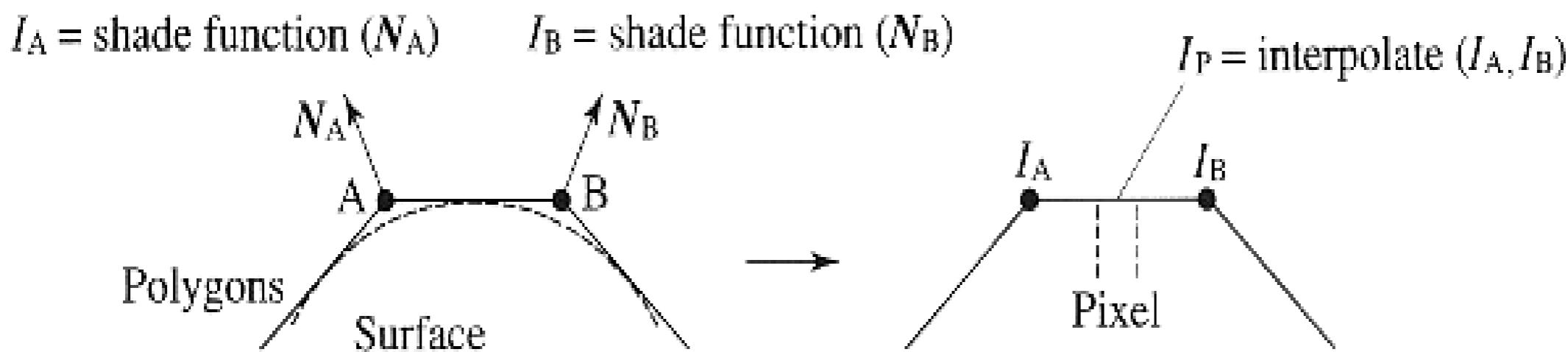


- 4. Schritt: Wert $W(P_s)$ bestimmen.

$$W(P_s) = \frac{1}{x_b - x_a} (W(P_a)(x_b - x_s) + W(P_b)(x_s - x_a))$$

Gouraud-Shading (1)

- Die Auswertung des Beleuchtungsmodells erfolgt ausschließlich in den Polygoneckpunkten unter Ausnutzung der Eckpunktnormalen.
- Mittels Interpolation folgt die Berechnung der Intensitätswerte projizierte, innerer Polygonpunkte.



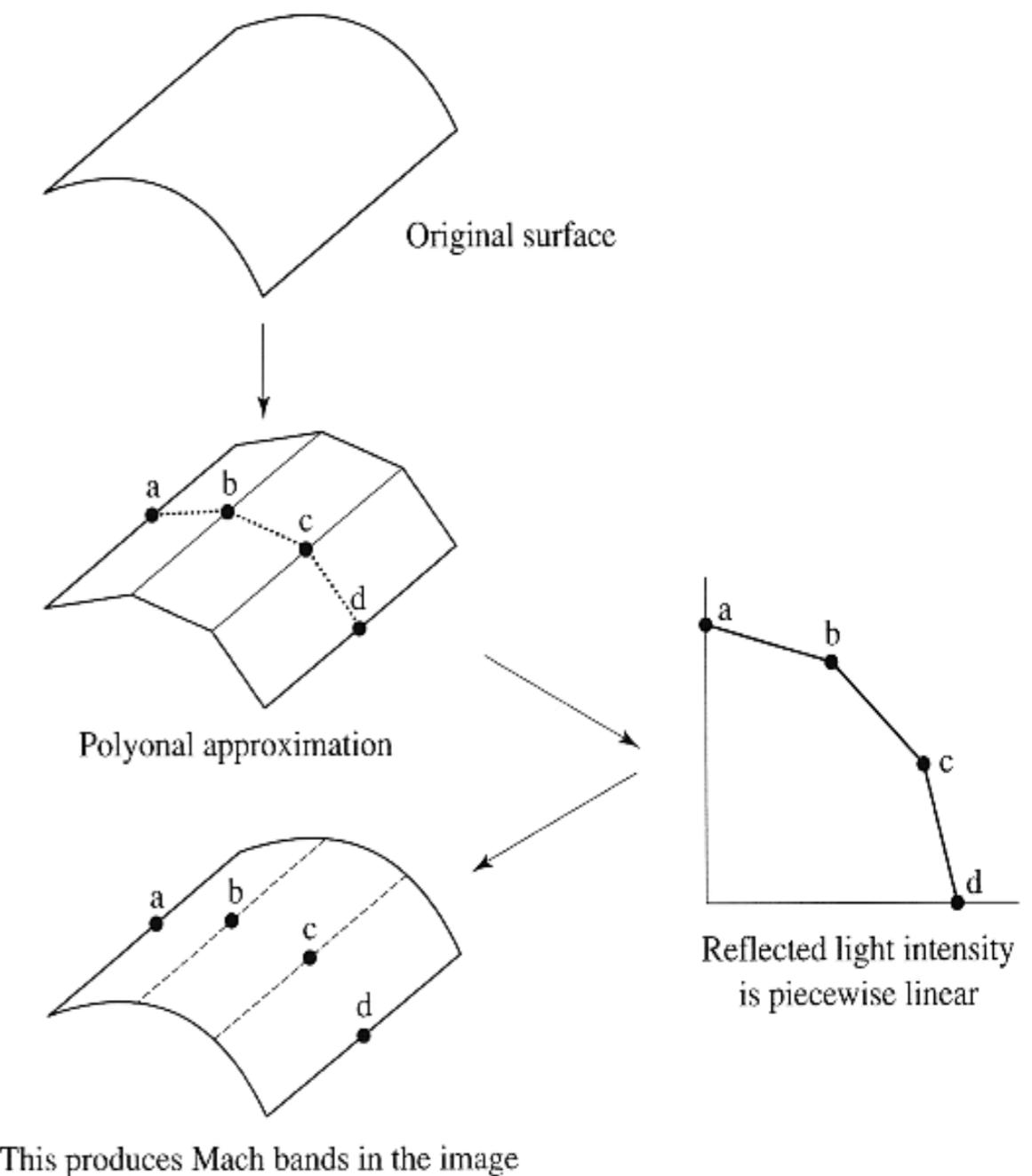
Gouraud-Shading (2)

■ Kanten in Polygonnetzen werden geglättet

- Der Intensitätsverlauf über die Polygonkanten ist i.d.R. stetig,
- aber nicht differenzierbar.

■ Folge:

Anfälligkeit des Verfahrens für Mach-Band-Effekte.



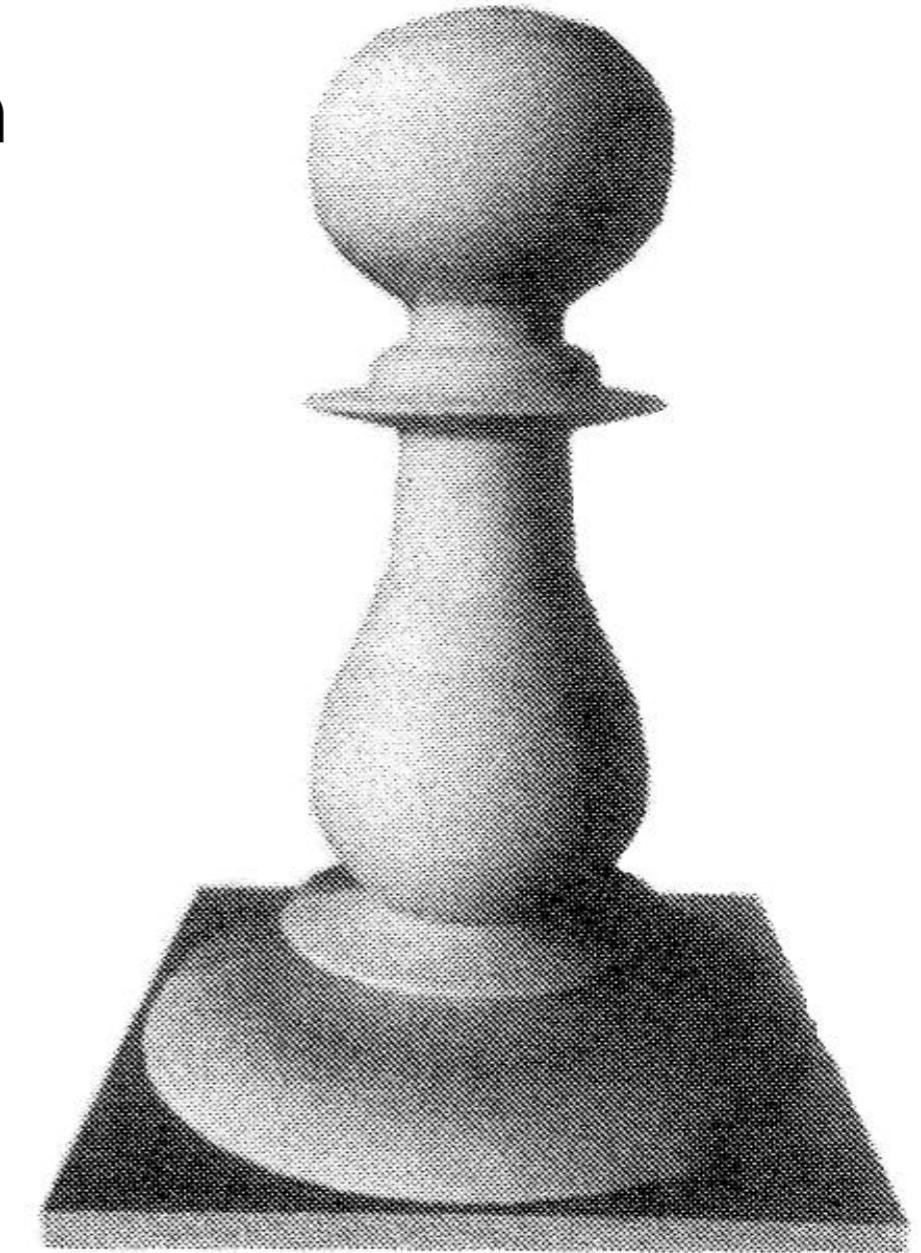
Gouraud-Shading (3)

- Highlights werden nicht angemessen dargestellt:

- Diese können nur entstehen, falls die Betrachtungsrichtung nahe der Reflexionsrichtung liegt;
- Das Modell wird aber nur in den Eckpunkten ausgewertet.

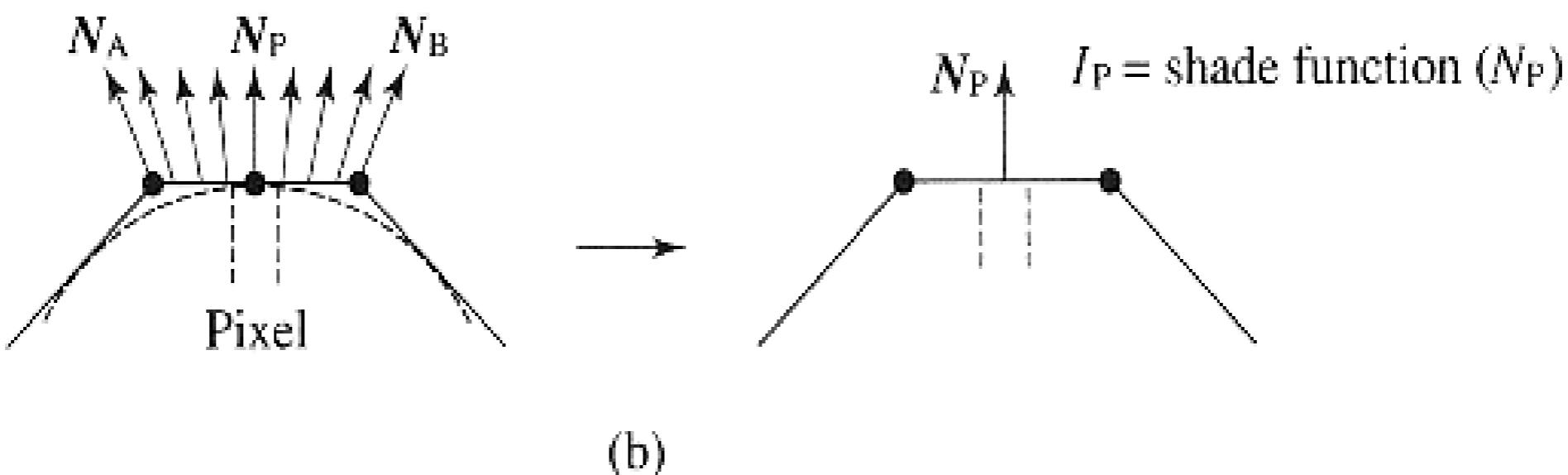
- Highlights werden durch Abtastfehler verschluckt oder erscheinen polygonförmig (statt rund).

- Folge: Gouraud Shading besser nur mit Beleuchtungsmodellen mit rein diffuser Reflexion kombinieren.



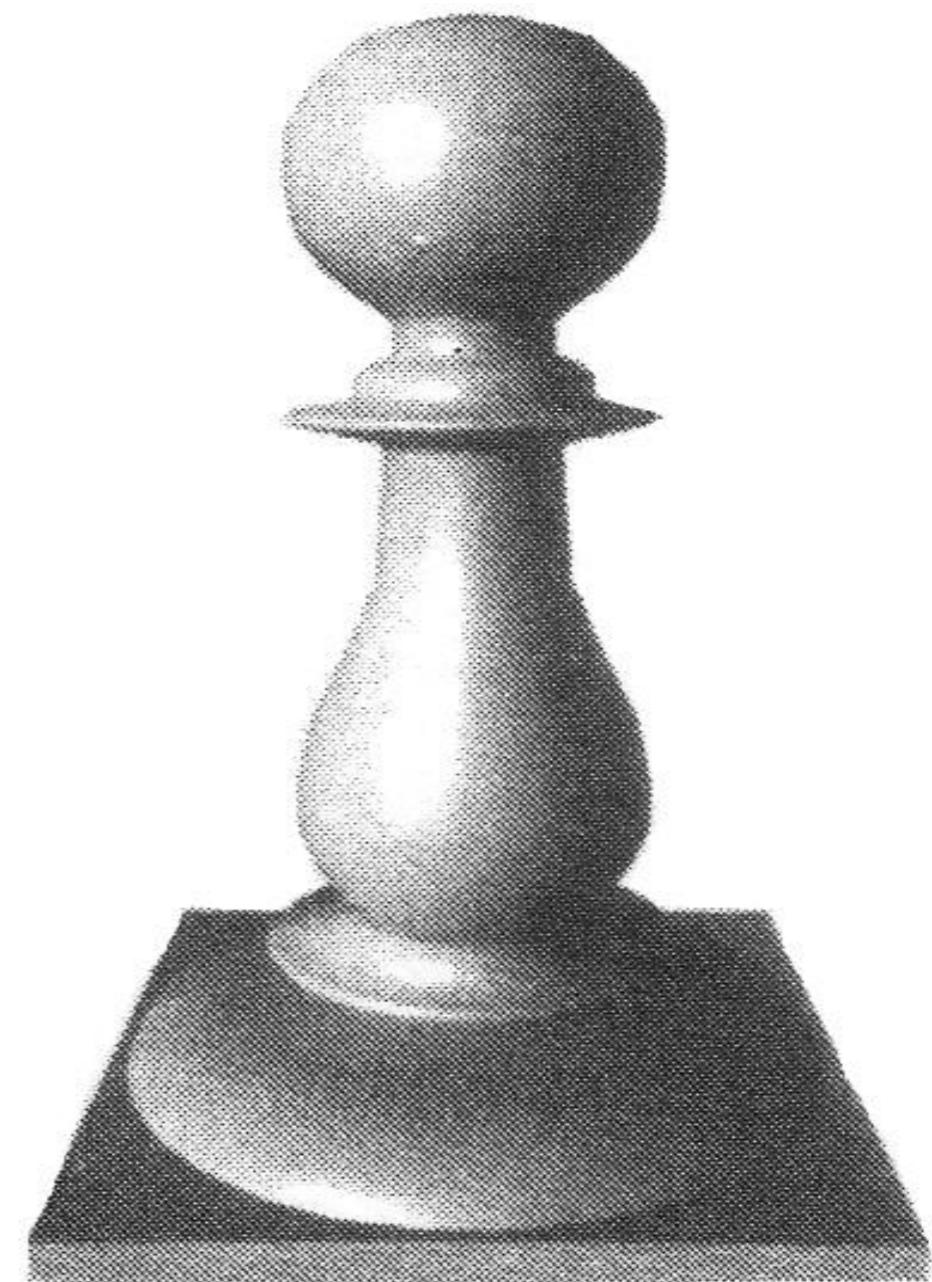
Phong-Shading (1)

- Die Auswertung des Beleuchtungsmodells erfolgt für jeden projizierten Punkt der Polygonoberfläche:
 - Die Oberflächennormalen in den Polygonpunkten werden mittels Interpolation aus den Eckpunktnormalen ermittelt.
(Normalisierung nicht vergessen).

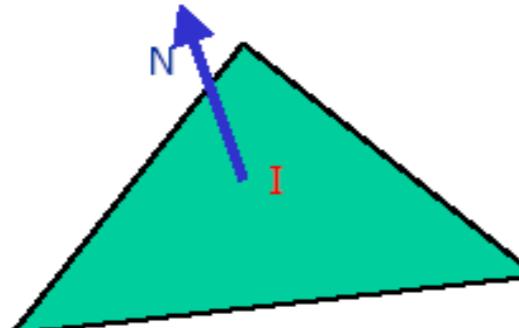
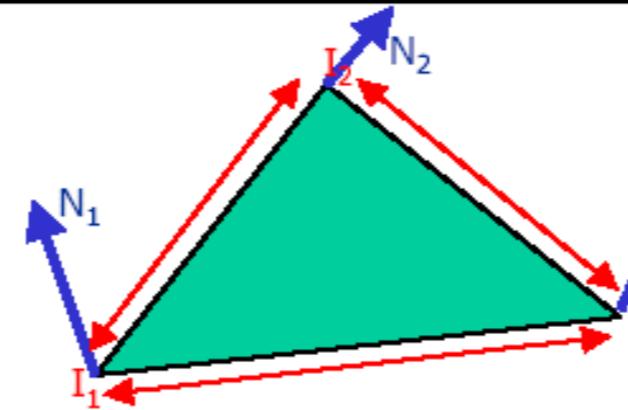
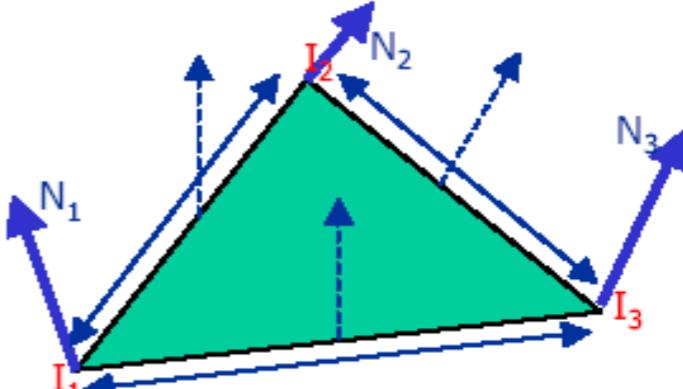
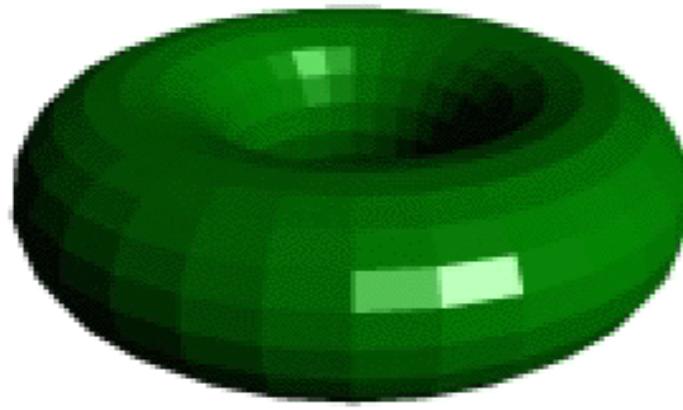
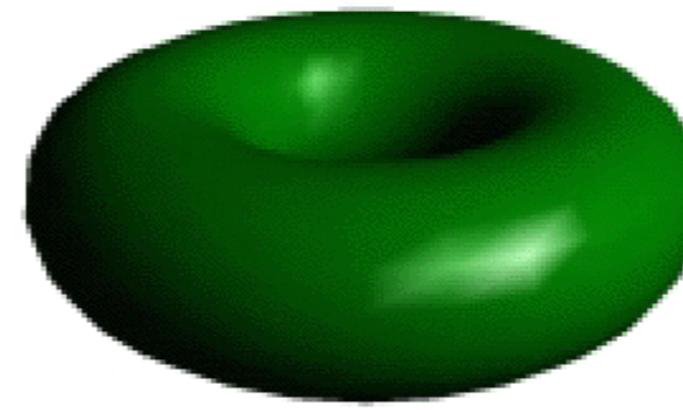
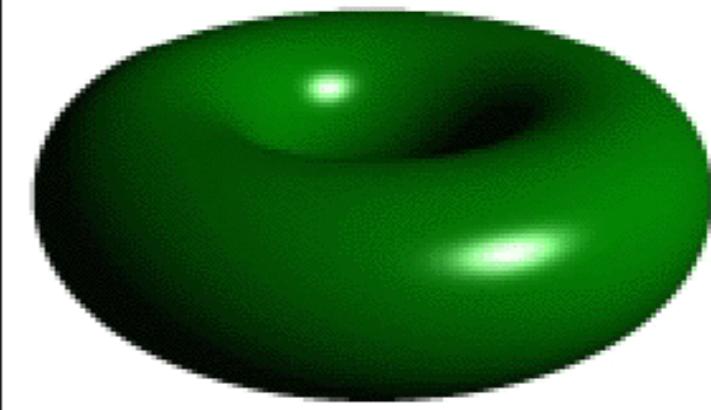


Phong-Shading (2)

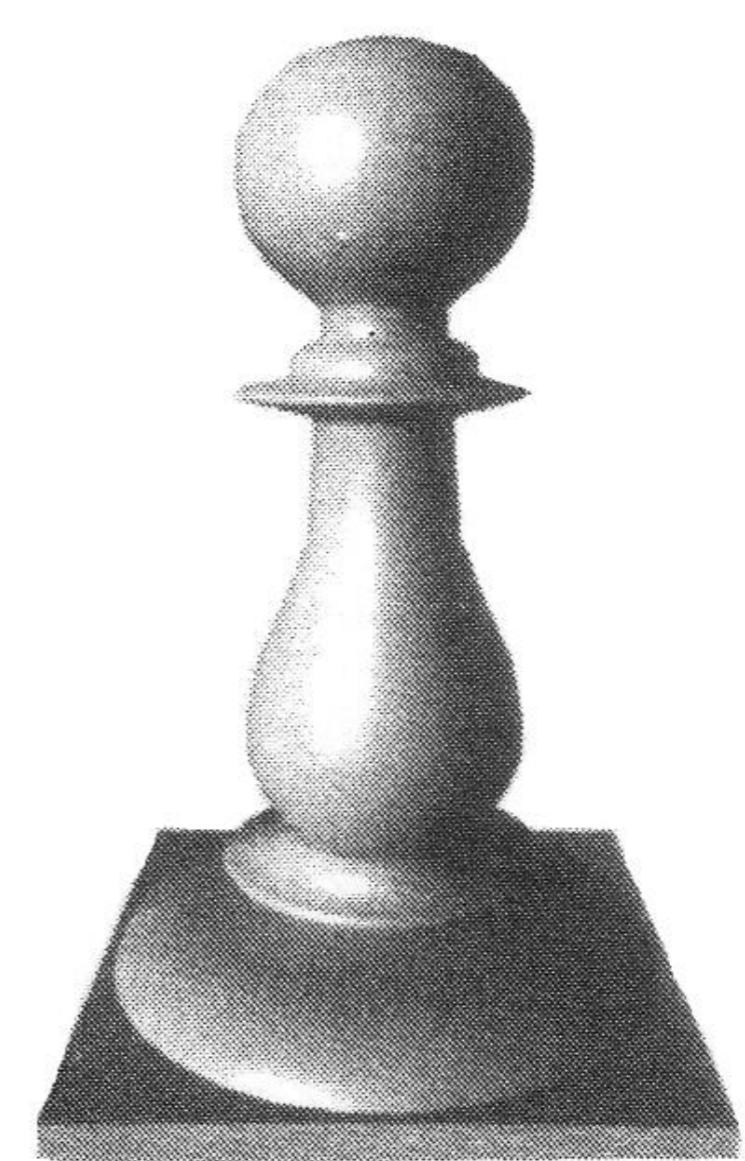
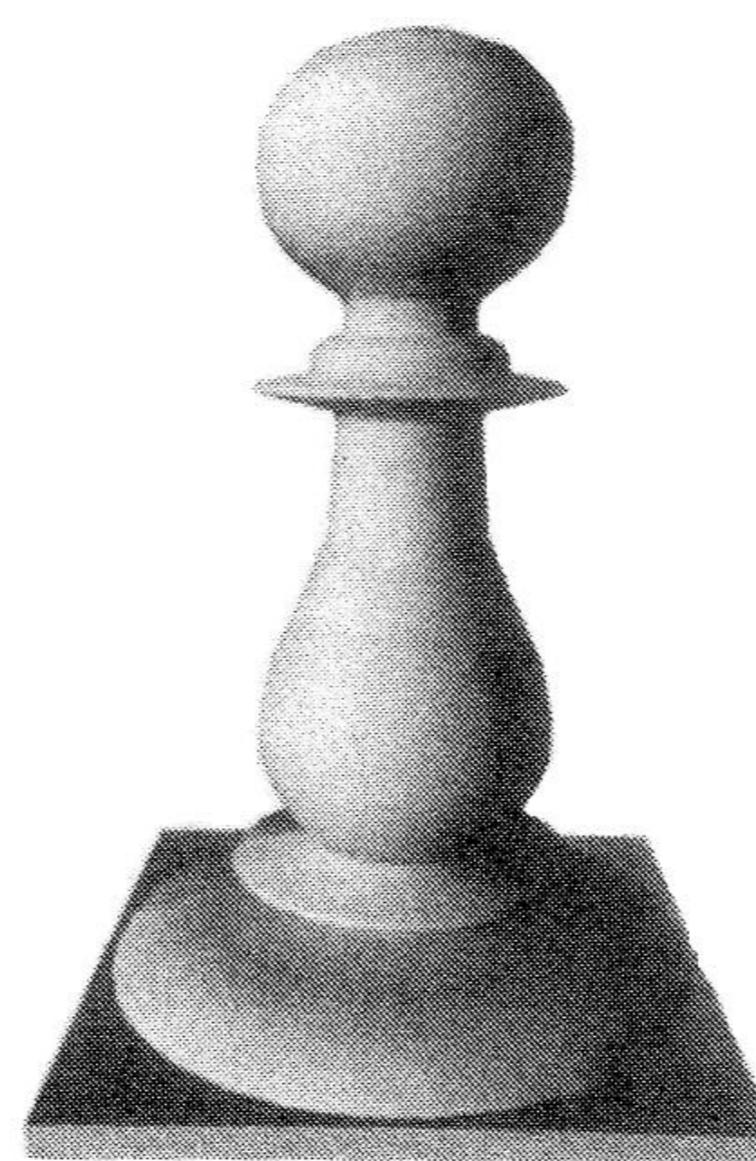
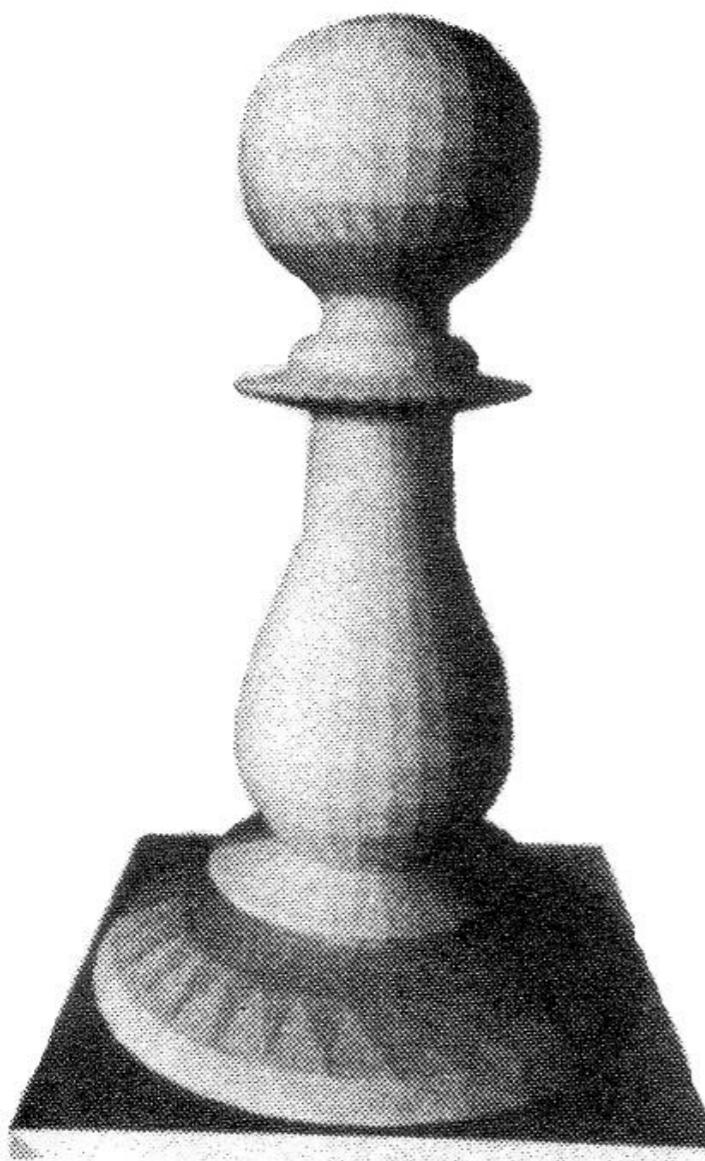
- Intensitätsverlauf über die Polygonkanten ist stetig und glatt. Das Erscheinungsbild der gekrümmten Oberfläche wird durch die Wahl der interpolierten Normalen gut angenähert.
- Äußerst rechenaufwendiges Verfahren!
- Highlights werden adäquat dargestellt.
- Phong-Shading wird von heutiger high-end Grafikhardware unterstützt.
 - d.h. Vektorinterpolation und Auswertung des Beleuchtungsmodells in Hardware.



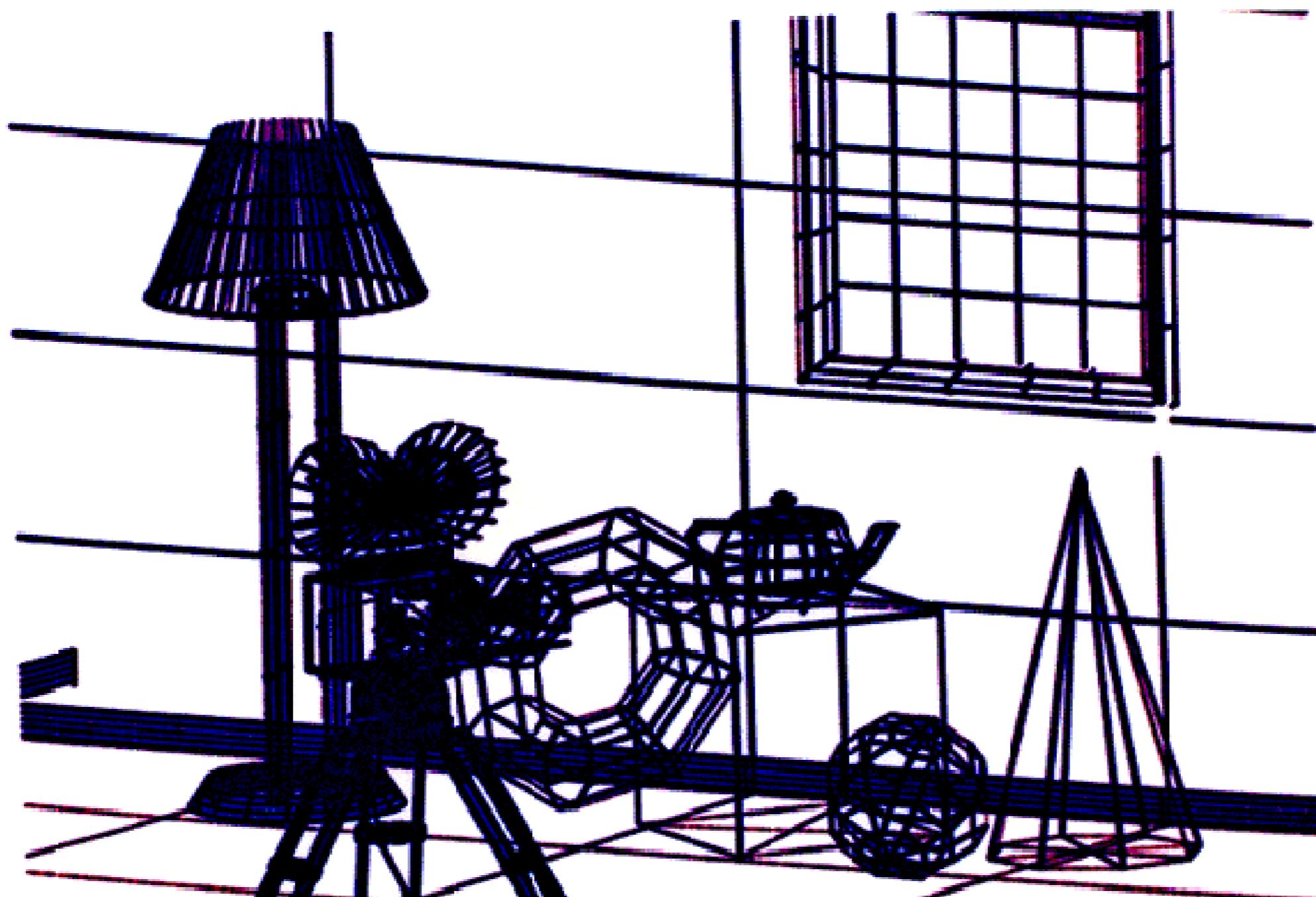
Vergleich: Flat-, Gouraud-, Phong-Shading

Flat-Shading	Gouraud-Shading	Phong-Shading
		
Ein Beleuchtungswert für das gesamte Polygon	Interpolation der Beleuchtungswerte an den Eckpunkten	Interpolation der Normalen an den Eckpunkten und Berechnen der Beleuchtungswerte
		

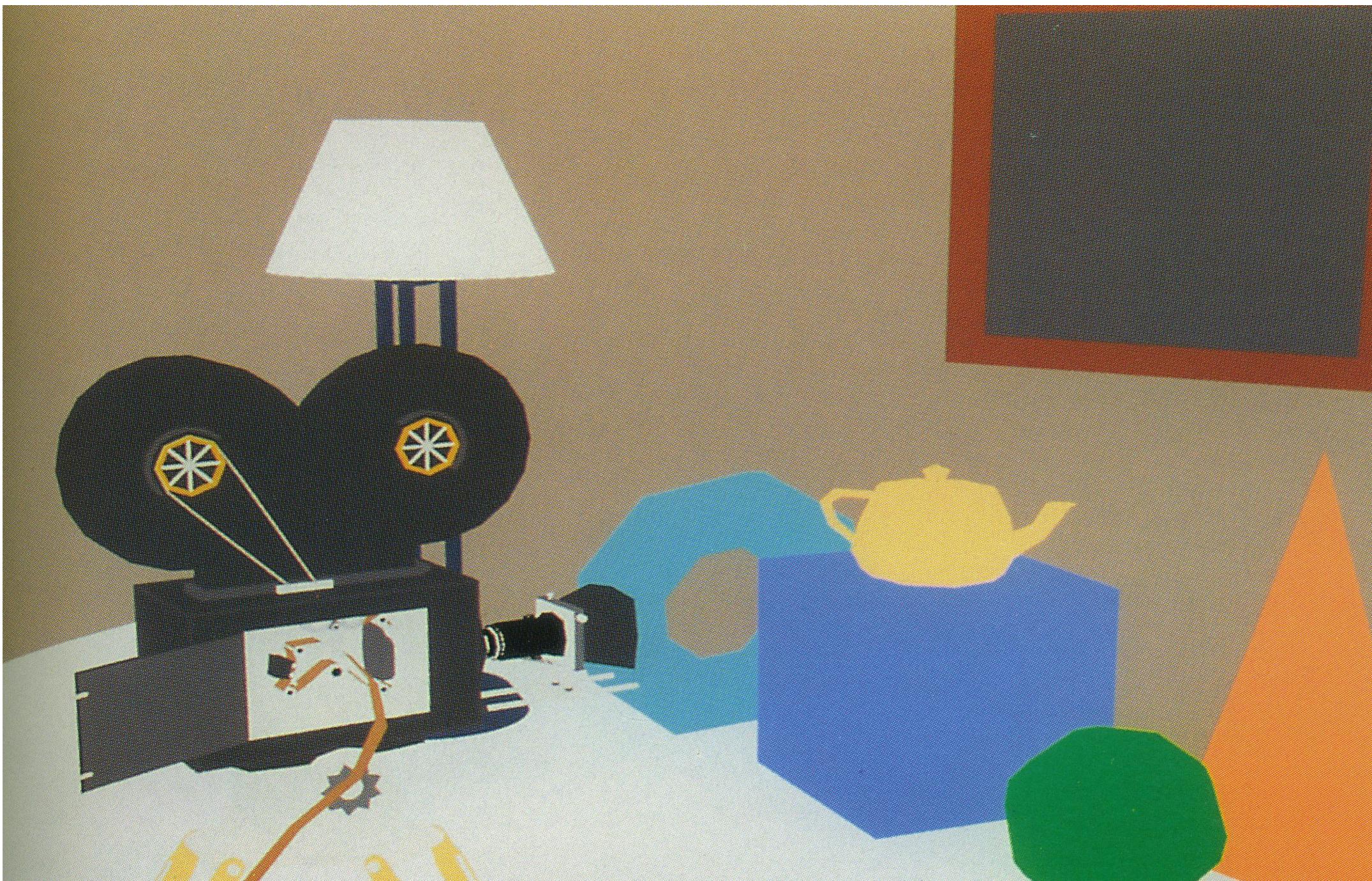
Vergleich: Flat-, Gouraud-, Phong-Shading



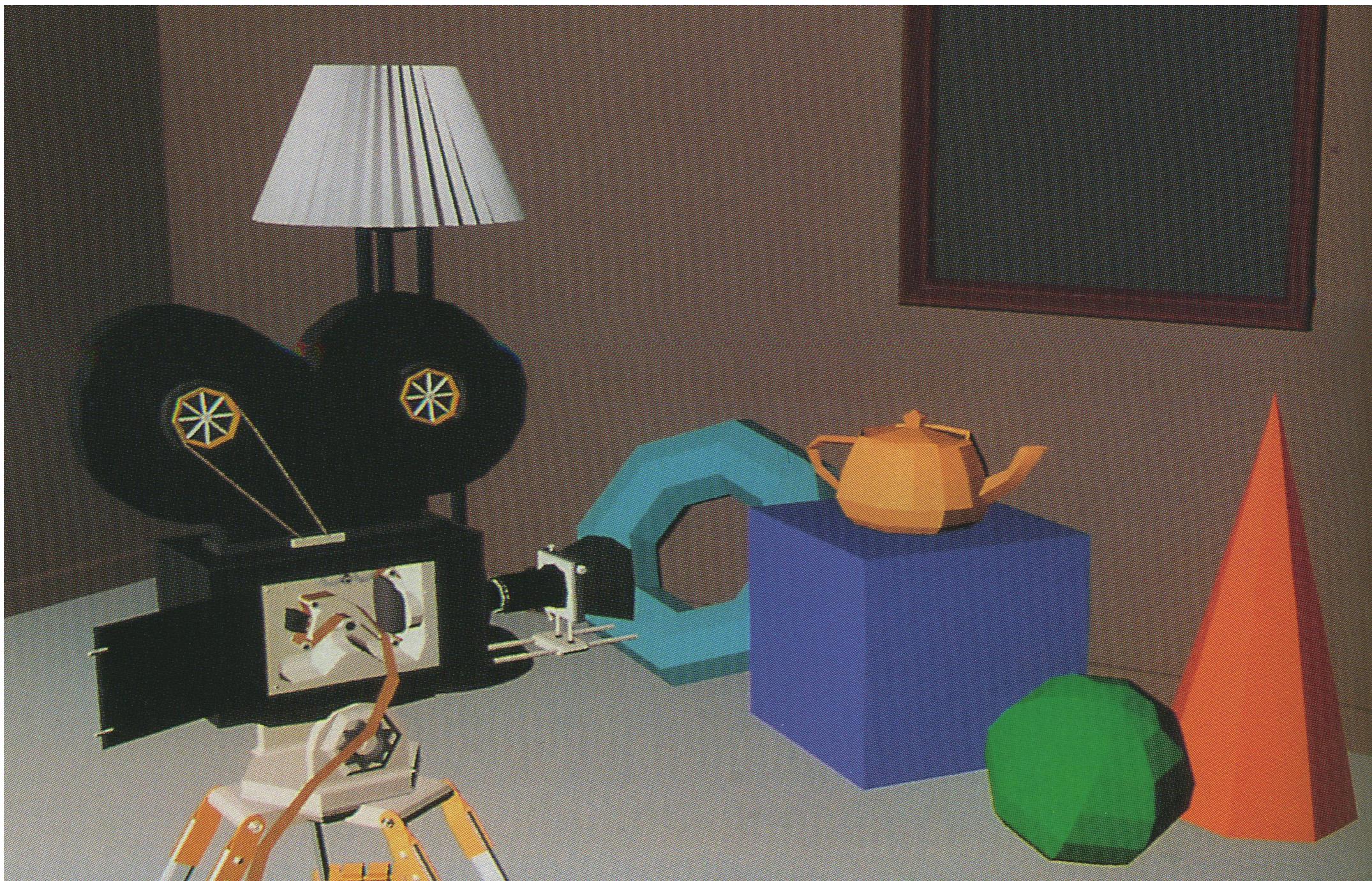
Wireframe Darstellung



Ausschließlich ambiente Beleuchtung



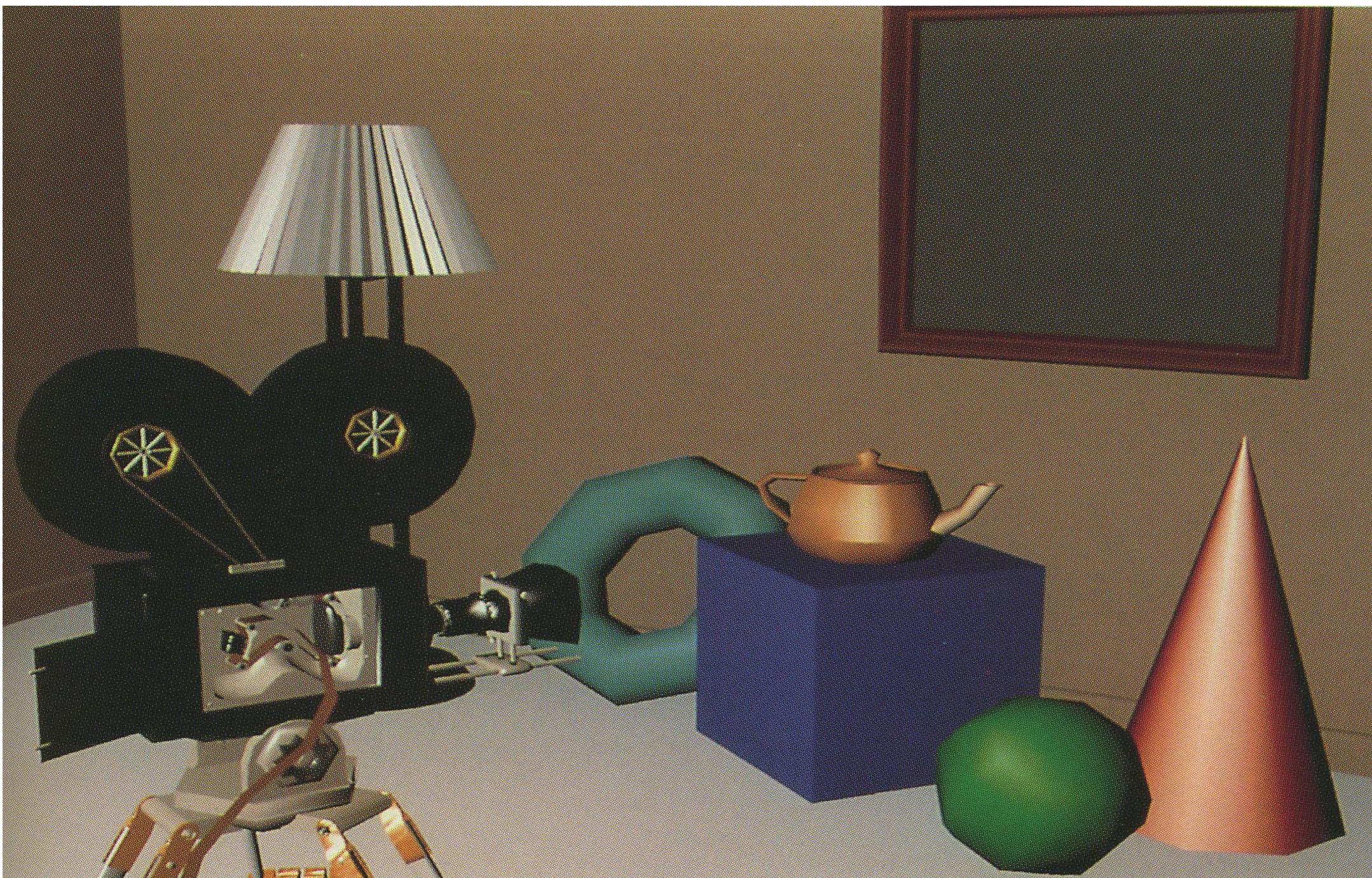
Flat Shading



Gouraud Shading (ambient und diffus)



Gouraud Shading (amb., diff., spiegelnd)



Phong Shading (amb., diff., spiegelnd)



Phong Shading der gekrümmten Flächen



Kantenverarbeitung beim Shading

- Was muß beachtet werden, wenn bei der Anwendung von Gouraud- oder Phong-Shading Polygonkanten explizit als Kanten (Feature Lines, wie beim Würfel) sichtbar sein sollen?
 - Polygoneckpunkte, die zu Feature-Lines gehören, müssen für die beteiligten Polygone separat mit unterschiedlichen Normalenvektoren gespeichert werden.
 - Folge: Enge Verknüpfung und Abhängigkeit zwischen der Schattierunstechnik und der Polygonalisierung bzw. der Triangulierungsmethode für das Objekt (Feature Recognition).

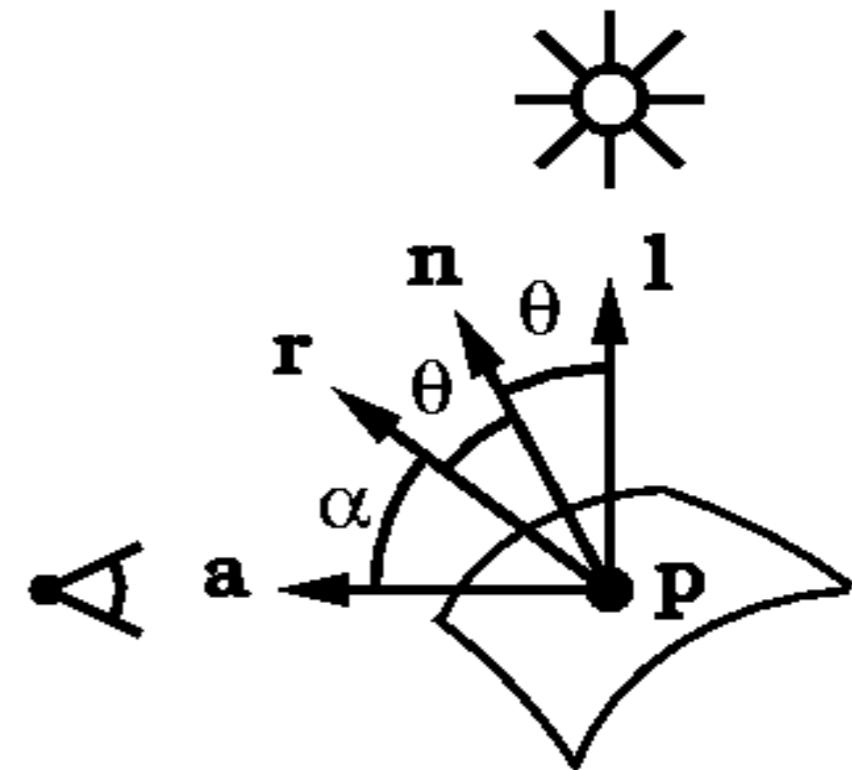
Globale Beleuchtungsmodelle

■ Wiederholung: Beleuchtungsmodelle

- Ein lokales Beleuchtungsmodell berücksichtigt nur das direkt einfallende Licht einer Lichtquelle.
- Phong-Modell: nur lokale Beleuchtung plus konstante ambiente Beleuchtung, um reflektiertes und gebrochenes Licht zu simulieren.

■ Besser: Globale Beleuchtung

- Sowohl direkt einfallendes Licht, als auch reflektiertes und gebrochenes Licht wird in dem zu schattierenden Punkt berücksichtigt.



Globale Beleuchtungsmodelle

■ Ray-Tracing:

- Ray Casting plus Strahlverfolgung für reflektierte und gebrochene Strahlen, Schattenberechnung.
- Abhängig vom Augpunkt.

■ Radiosity:

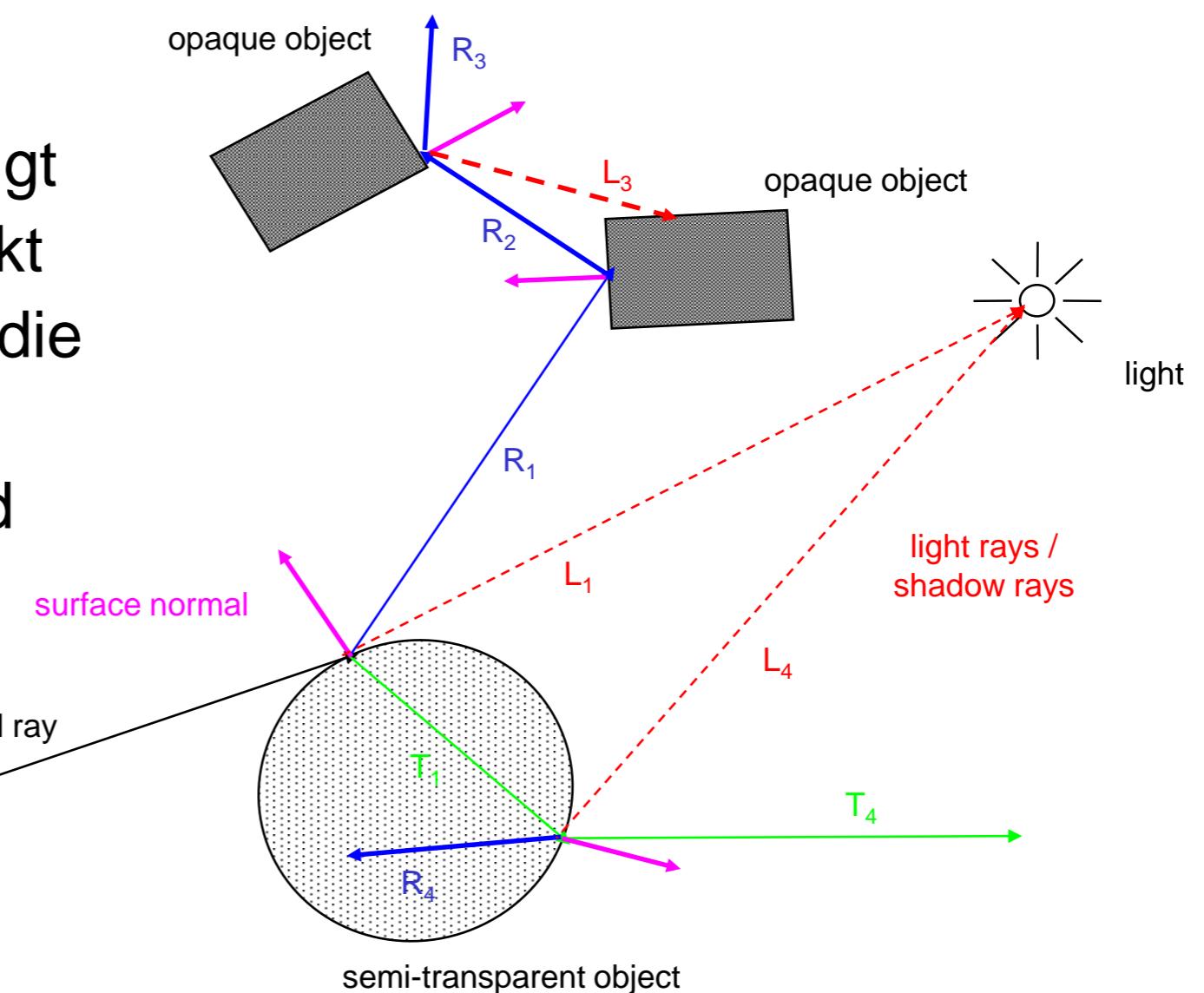
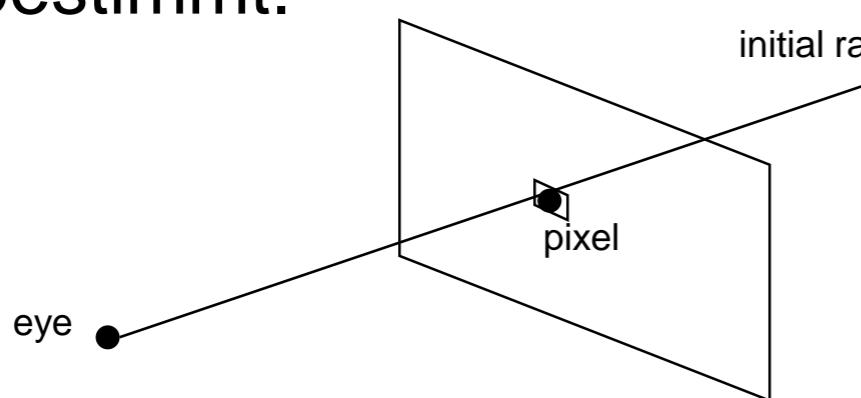
- Trennung von Sichtbarkeitstests und Schattierung.
- Alle Interaktionen des Lichts mit den Objekten der Szene werden vorberechnet.
- Unabhängig vom Augpunkt.

Raytracing (1)

- Ray Tracing eignet sich besonders für die Modellierung von gerichtetem Licht (spiegelnde / transparente Objekte).
- „backward ray-tracing“:
 - Da die meisten Lichtstrahlen das Auge nicht treffen, verfolgt man die Strahlen rückwärts vom Auge zur Fläche und dann zu den einzelnen Lichtquellen und weiteren Flächen.
 - Die Strahlen werden von jedem Pixel ausgehend zurück in die Szene verfolgt und bei jedem Schnittpunkt mit einem Objekt werden die direkten (lokales Modell), sowie die reflektierten und gebrochenen Lichtanteile bestimmt.
 - Die auftretende Strahlverzweigung impliziert eine Baumstruktur der Strahlen.

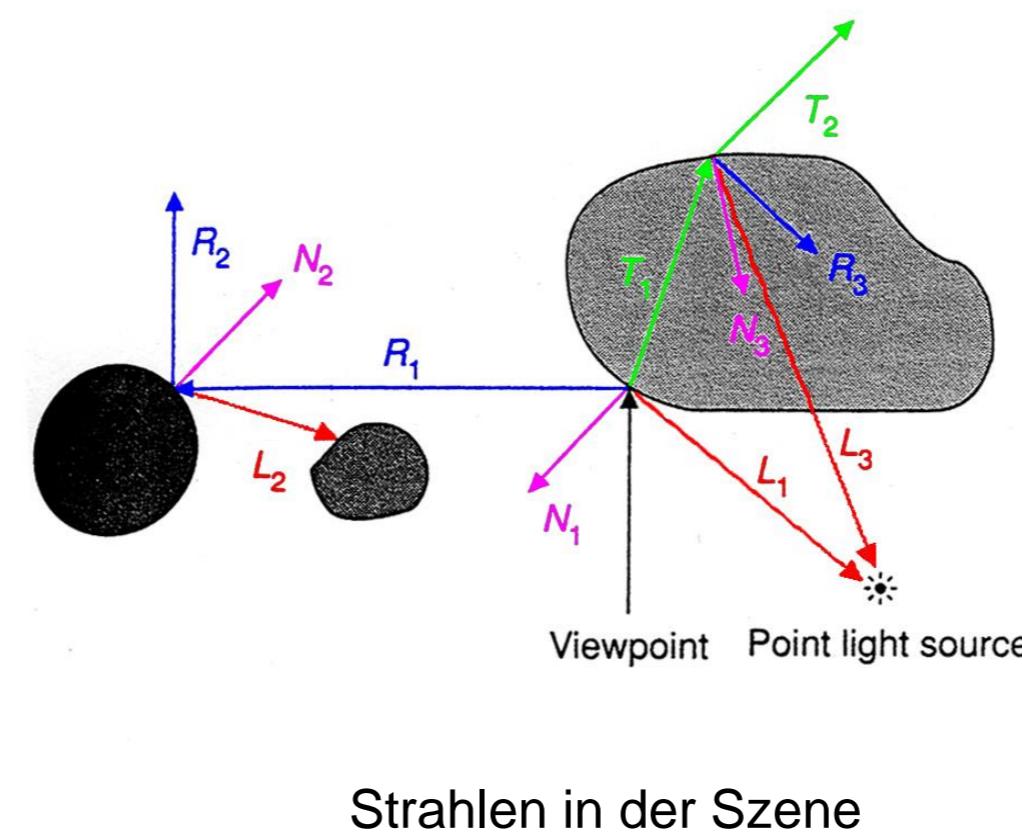
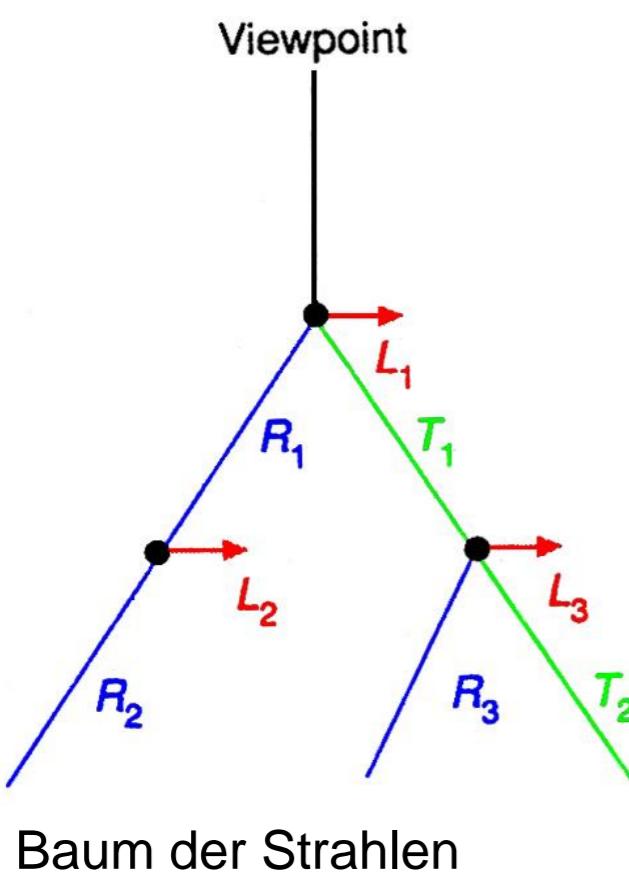
Raytracing (2)

- Die Strahlen werden von jedem Pixel ausgehend zurück in die Szene verfolgt und bei jedem Schnittpunkt mit einem Objekt werden die direkten (lokales Modell), sowie die reflektierten und gebrochenen Lichtanteile bestimmt.



Raytracing (3)

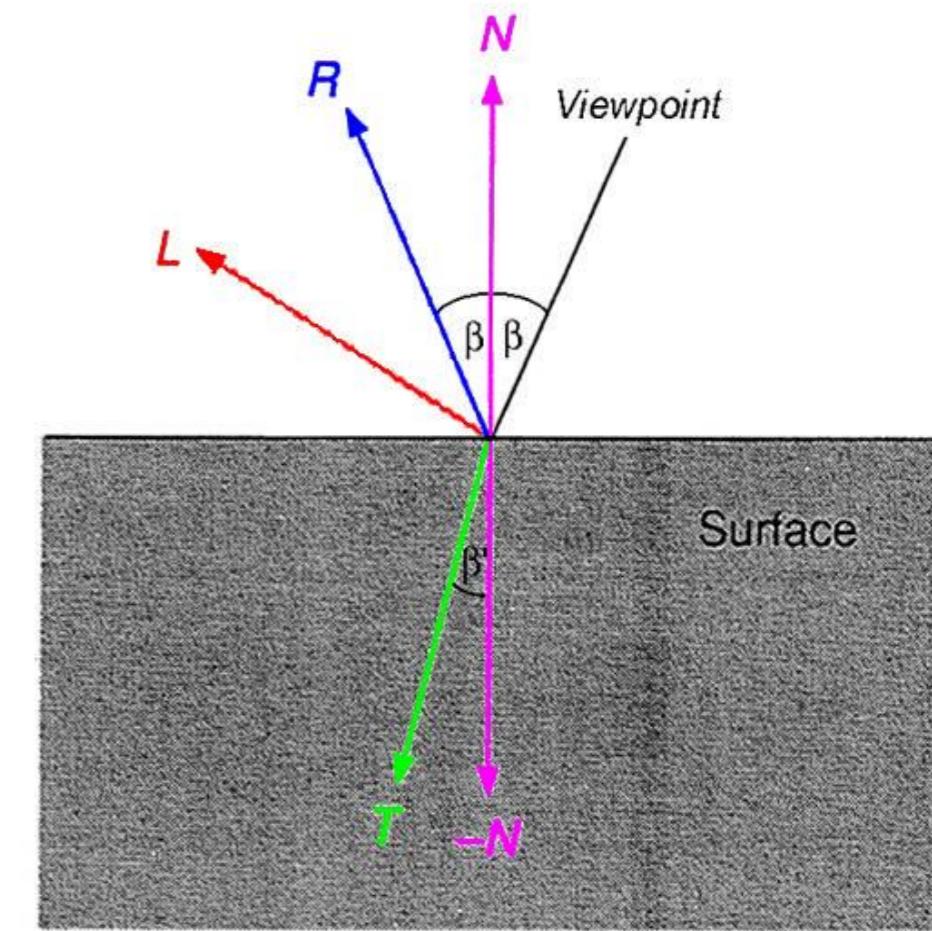
- Die auftretende Strahlverzweigung impliziert eine Baumstruktur.



N_i Surface normal
 R_i Reflected ray
 L_i Shadow ray
 T_i Transmitted ray

Raytracing (4)

- Brechung entsteht in der Natur an der Grenzfläche unterschiedlich dichter Medien, z.B. Luft und Wasser.
- Der Brechungswinkel β' zwischen $-N$ und T ist proportional zum Einfallswinkel β zwischen N und R .
- Tritt der Strahl in ein dichteres Medium ein, so verkleinert sich dieser Winkel.
- Flächen können zugleich anteilig spiegeln und brechen.
- Wird der Brechungswinkel β' größer als 90° , so wird der jedoch nur gespiegelt.



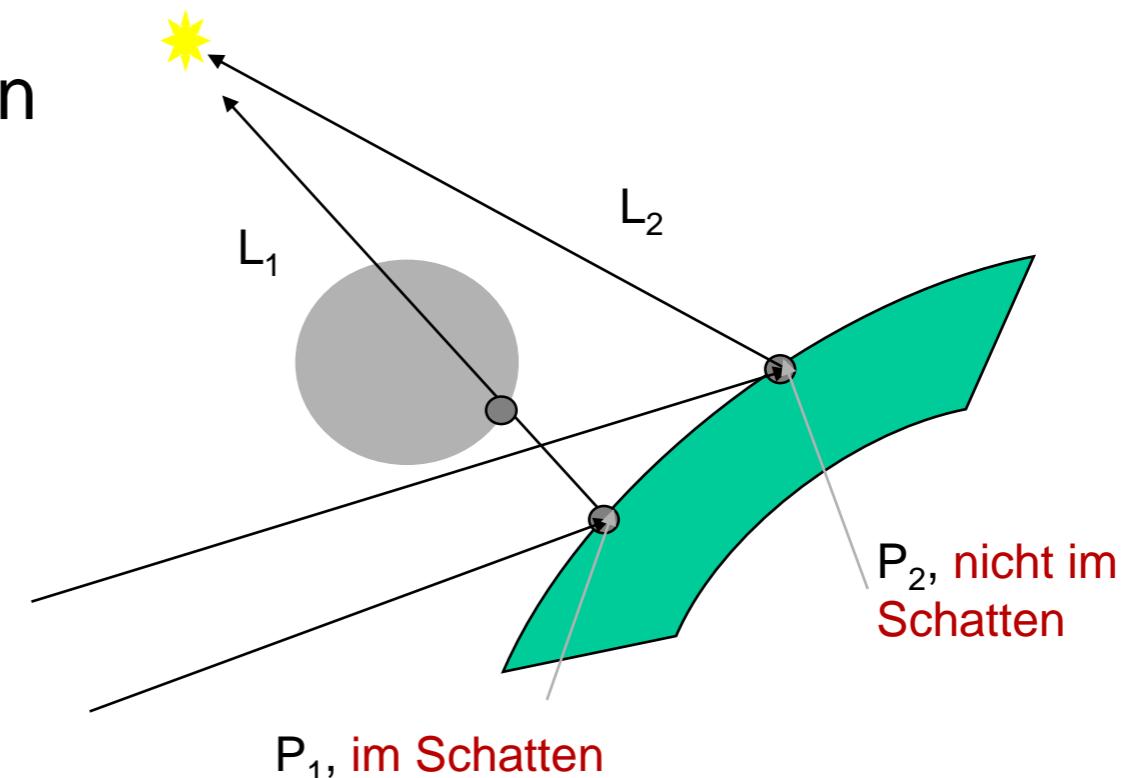
Raytracing (5)

- Abbruch der rekursiven Strahlverfolgung, wenn
 - reflektierte und gebrochene Strahlen kein Objekt mehr schneiden oder
 - eine vorgegebene maximale Baumtiefe erreicht ist oder
 - der Farbanteil (an der Pixelfarbe) eines zu verfolgenden Teil-Strahls zu gering ist.
- Rechenaufwand des Verfahrens hängt stark von der Komplexität und Beschaffenheit der betrachteten Szene ab.
- Folge: Erst Raumteilungsverfahren, wie z.B. Octrees, machen Ray-Tracing Verfahren überhaupt praktikabel.

Ray Tracing: Schatten

■ Ray-Tracing: Schatten

- Verfolge einen Strahl von einem gefundenen Schnittpunkt zu allen Lichtquellen.
- Schneidet einer dieser Strahlen ein Objekt, dann liegt der Schnittpunkt im Schatten dieser Lichtquelle.
- Den direkten Lichtstrahl zwischen einem Oberflächenpunkt und einer Lichtquelle nennt man Schattenfühler (shadow ray, shadow feeler, light ray).



Ray Tracing: Schatten



Abb. Von Per H. Christensen

Ray-Tracing – Eigenschaften

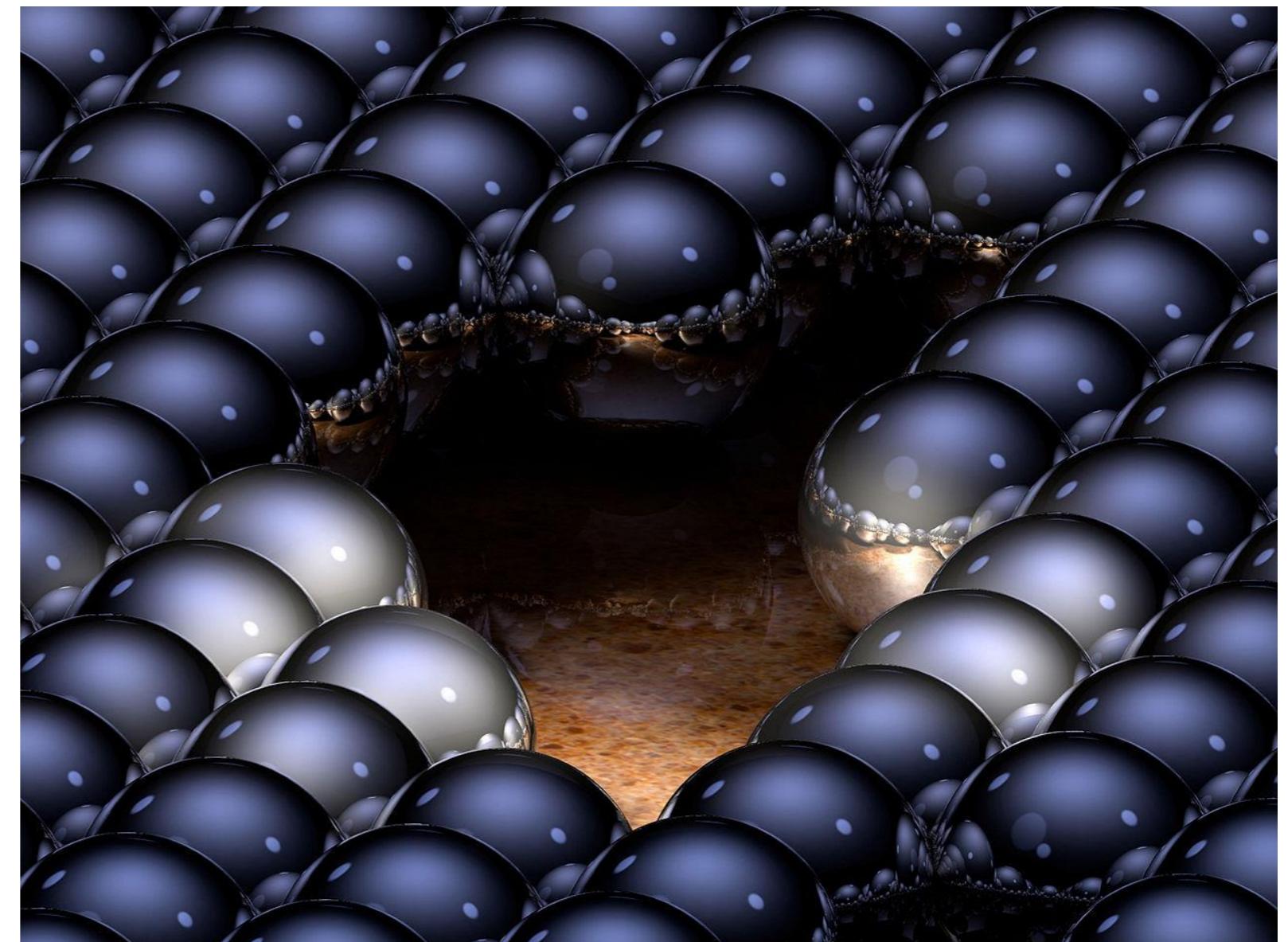
■ Vorteile:

- Der physikalische Vorgang der Beleuchtung (Strahlengang) wird sehr gut simuliert.
- Hervorragend für Spiegelungen geeignet.
- Das Sichtbarkeitsproblem wird automatisch gelöst.
- Große Wirklichkeitsnähe.

■ Nachteile:

- Nicht wirklich für diffuse Reflektion geeignet.
- Sehr großer Rechenaufwand.
- Schnittpunktberechnung sehr aufwendig.
- Anfälligkeit für numerische Probleme.

Ray Tracing: Beispiel



Quelle: Greg L at the English language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3426096>

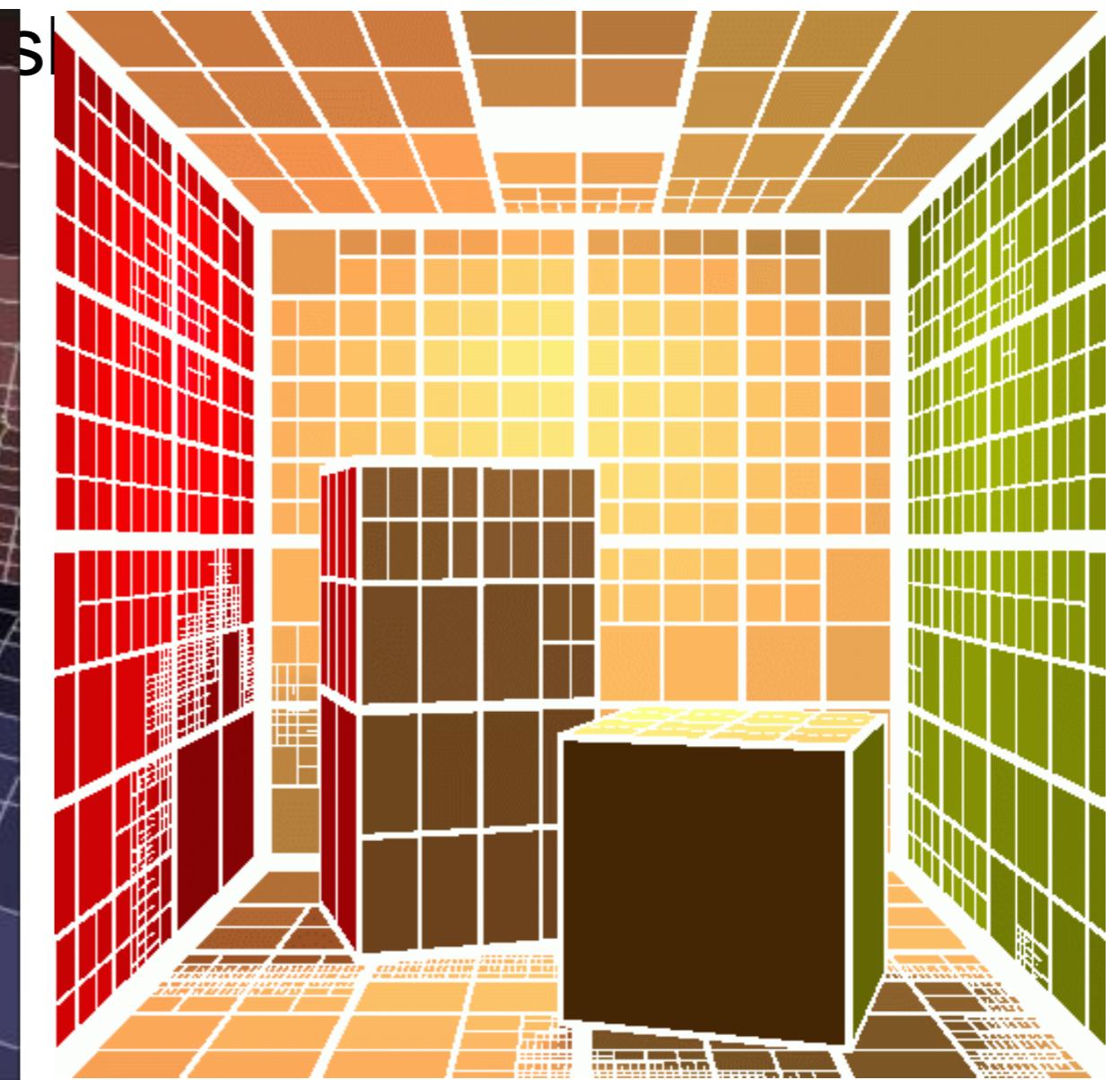
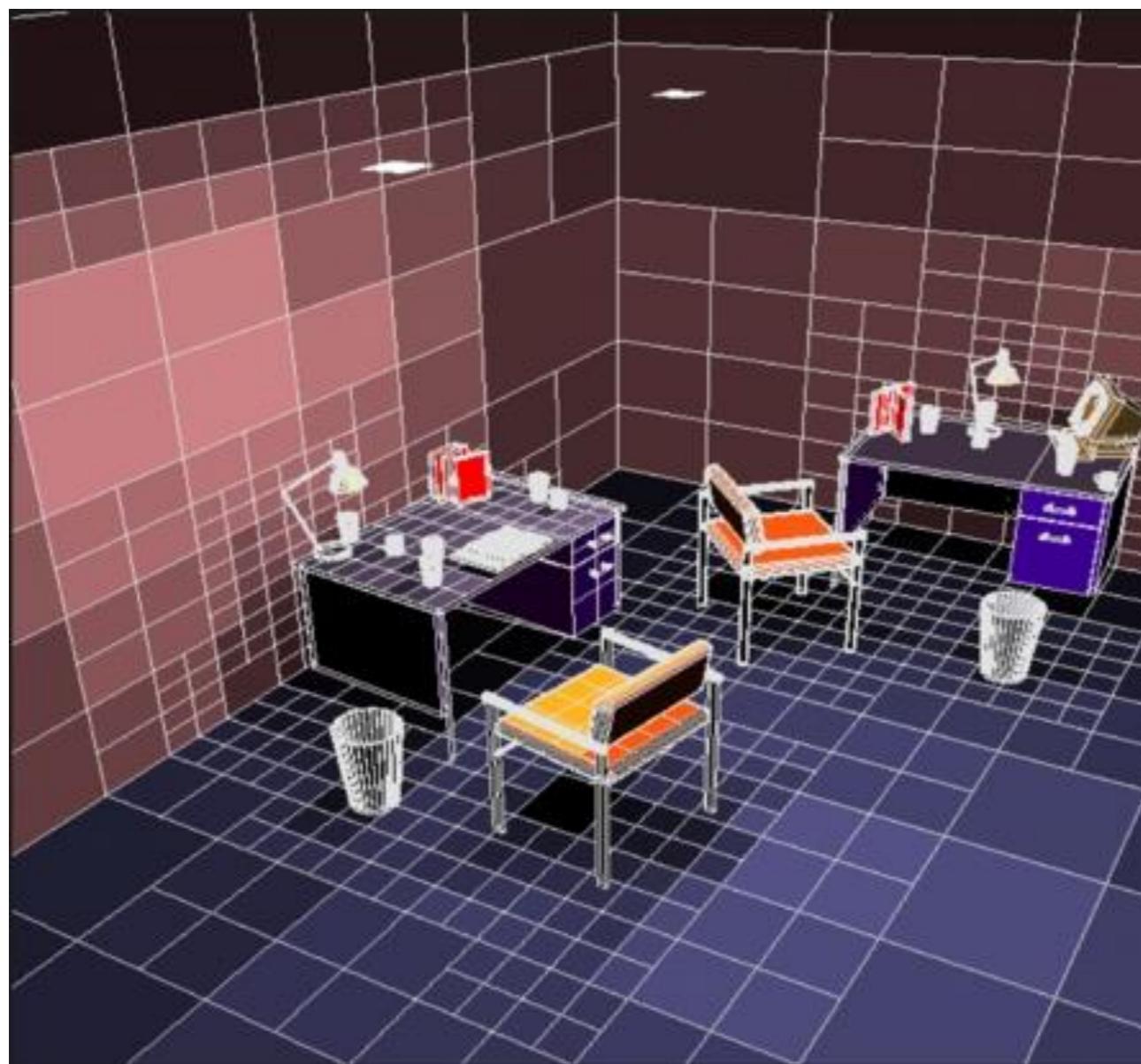
Radiosity



Radiosity

- **Radiosity** bzw. **Radiosität** ist ein Verfahren zur Berechnung der Verteilung von Wärme- oder Lichtstrahlung innerhalb eines virtuellen Modells. In der Bildsynthese ist Radiosity neben auf Raytracing basierenden Algorithmen eines der beiden wichtigen Verfahren zur Berechnung des Lichteinfalls innerhalb einer Szene.
- Es beruht auf dem **Energieerhaltungssatz**: Alles Licht, das auf eine Fläche fällt und von dieser nicht absorbiert wird, wird von ihr zurückgeworfen. Außerdem kann eine Fläche auch selbstleuchtend sein.
- Das Radiosity-Verfahren basiert auf der Annahme, dass alle Oberflächen ideal diffuse Reflektoren bzw. alle Lichtquellen ideal diffuse Strahler sind. Ideal diffus bedeutet dabei, dass Licht in alle Richtungen gleichmäßig reflektiert bzw. abgestrahlt wird. Im Gegensatz zu Raytracing ist Radiosity nicht vom Blickpunkt abhängig; die Beleuchtung der Flächen wird also für die gesamte Szene unabhängig von der Position des Betrachters berechnet. Die blickpunktabhängige Verdeckungsberechnung hat in einem unabhängigen Schritt zu erfolgen. (Quelle: wikipedia)

Radiosity



Lernziele

- Was unterscheidet lokale von globalen Beleuchtungsmodellen?
- Was ist das Phong Beleuchtungsmodell?
- Wie arbeitet Gouraud und Phong Shading?
- Was sind die Vor- und Nachteile von Flat-, Gouraud- und Phong-Shading?
- Erläutern Sie die Funktionsweise von Ray Tracing, Radiosity.