

## Teil 7: Beleuchtung

### Beleuchtungsmodelle, Schattierungsmodelle

Hellwig-Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Einleitung

### Beleuchtung vs. Schattierung

- ◆ **Beleuchtung:** Modell auswerten (anschl.)
  - ◆ global vs. lokal
  - ◆ physikalisch (photo-realistisch?) vs. empirisch
  - ◆ Phong-Modell
- ◆ **Schattierung:** Pixel einfärben (VO, 2. Teil)
  - ◆ Polygone schattieren (Flat, Gouraud, Phong)

Hellwig-Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Einleitung

### Globale Beleuchtungsmodelle

- ◆ Modelle der globalen Lichtverteilung – Schatten, Reflexionen, Brechung, etc.

$$I = k_{\text{local}} \cdot I_{\text{local}} + k_{\text{refl}} \cdot I_{\text{refl}} + k_{\text{trans}} \cdot I_{\text{trans}}$$

- ◆ Ray Tracing, Radiosity (→ extra VOs)

### Lokale Beleuchtungsmodelle

- ◆ Modelle der lokalen Beleuchtung
- ◆ Empirische bzw. physikalische Modelle

$I_{\text{local}}$

Hellwig-Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Beleuchtungsmodell

### Photorealismus

- ◆ exakte Repräsentation in der CG
- ◆ möglichst physikalische Modelle
  - ◆ Reflexion von Licht, Transparenz, Textur, Schatten, etc.

### Modellierung von Lichteffekten

- ◆ Physik
- ◆ Psychologie
- ◆ Licht-Objekt Interaktionen

Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

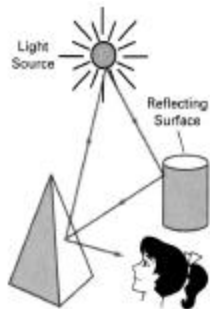
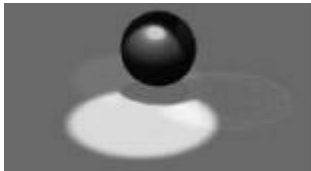
---

---

## Lichtquellen

### Reflektiertes Licht ist Summe von:

- ◆ Lichtquellenbeiträgen
- ◆ Objektbeiträge via Reflexionen



Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

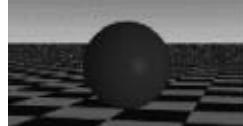
---

## Lichtquellentypen

### Ambientes Licht



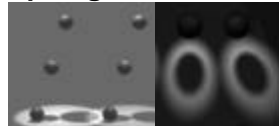
### Direktionales Licht



### Punktlichtquellen



### Spotlights, Flächen



Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

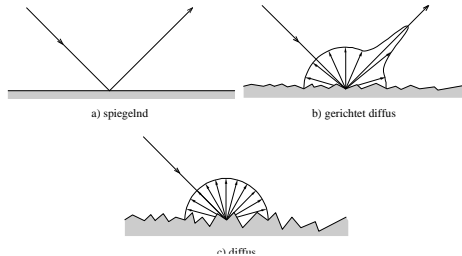
---

---

---

---

## Reflexionseigenschaften



Hellwig/Hausar

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Objektfarbe

### Farbe $\neq$ Objekteigenschaft!

- ◆ "Farbe" = Reflexionseigenschaft
- ◆ "Farbe" = Welche Anteile von (weißem) Licht werden reflektiert
- ◆ RGB (0.5, 0, 0.8) =
  - ◆ in weißem Licht: Reflexion = 50% Rot + 80% Blau, also Lila
  - ◆ in rotem Licht: Reflexion = 50% Rot, also (dunkleres) Rot
  - ◆ in grünem Licht: Reflexion = 0, also Schwarz!
- ◆ Im Weiteren nur mehr Helligkeiten

Hellwig/Hausar

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Umgebungslicht

**Ungerichtete (diffuse) Lichtquelle**

**Intensität in Umgebung gleich**

**Entsteht durch vielfache Reflexionen an Oberflächen in der Umgebung**

**Triviales Beleuchtungsmodell:**

$$I = k_a I_a$$

$I_a$  Intensität des Umgebungslichtes  
 $k_a$  ambierter Reflexionskoeffizient

Hellwig/Hausar

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

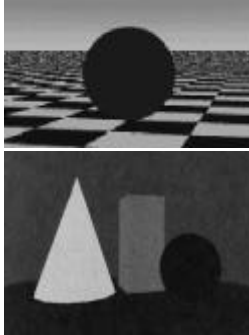
---

---

---

## Umgebungslicht – Beispiele

Objekthelligkeit nur von  $k_a$  abhängig  
Keine Variation in Abhängigkeit von Flächenorientierung  
Unabhängig von Betrachtungsrichtung  
Erschwertes 3D-Wahrnehmen



Hellwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

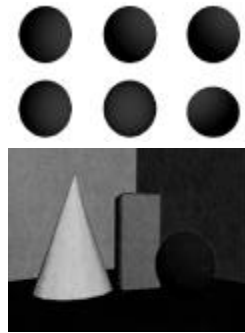
---

---

---

## Diffuse Reflexion (1)

Jeweils konstant für eine Fläche  
Unabhängig v. Betrachtungsrichtung  
Abhängig von Beleuchtungsrichtung  
Dunkler, wenn schräg angeleuchtet  
Verbessertes 3D-Wahrnehmen



Hellwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

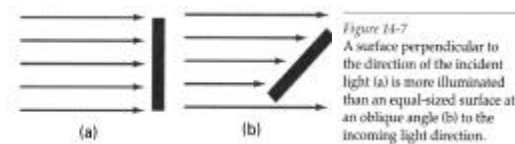
---

---

---

## Diffuse Reflexion (2)

**Ideale diffuse Reflexion**  
(Lambertsche Reflektoren)  
**Helligkeit hängt von der Lage der Fläche in Bezug auf das Licht ab**



Hellwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

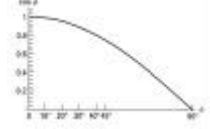
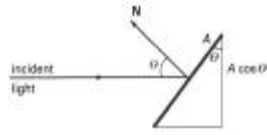
---

---

### Diffuse Reflexion (3)

#### Lamberts Gesetz

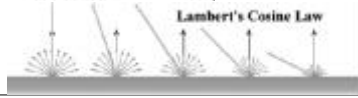
Flächenhelligkeit ist proportional zu  $\cos\theta$   
 $\theta$  ... Winkel(L, N)



$$I_{\text{diff}} = k_d I_L \cos \theta$$

$$= k_d I_L \mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$$

$$= k_d I_L \max(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}, 0)$$



AD

---

---

---

---

---

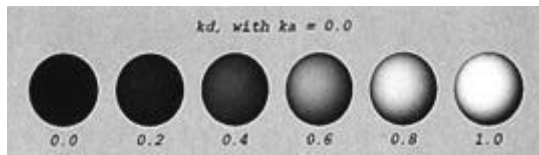
---

---

---

### Diffuse Reflexion (4)

$k_d$  variiert



Helmig Hauser

Teil 7: Beleuchtung

AD

---

---

---

---

---

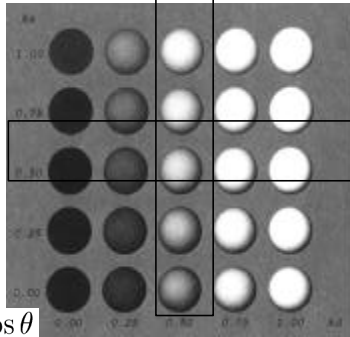
---

---

---

### Diffuse Reflexion (5)

Diffuse Refl. und Umgebungslicht



$$k_a I_a + k_d I_L \cos \theta$$

Helmig Hauser

Teil 7: Beleuchtung

AD

---

---

---

---

---

---

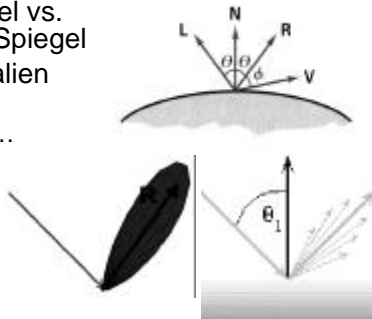
---

---

## Spiegelnde Oberflächen

Ideale Spiegel vs.  
nicht-ideale Spiegel  
Viele Materialien  
spiegeln

- ◆ nicht nur ...
- ◆ aber verstärkt in eine Richtung



Helmig Hauer

Teil 7: Beleuchtung

AD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Spiegelnde Reflexion (1)

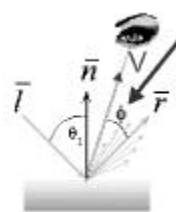
Empirisches Phong Modell

$$I_{\text{spec}} = k_s I_L \cos^{n_s} \phi$$

$$= k_s I_L (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})^{n_s}$$

Abhängig von Winkel  $\phi$   
zw.  $\mathbf{V}$  und  $\mathbf{R}$

$\mathbf{V}$  ... Betrachtungsvektor  
 $\mathbf{R}$  ... Reflexionsvektor



Helmig Hauer

Teil 7: Beleuchtung

AD

---

---

---

---

---

---

---

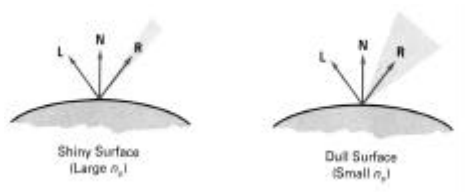
---

## Spiegelnde Reflexion (2)

Empirisches Phong Modell

- ◆  $n_s$  gross  $\Rightarrow$  glänzende Fläche
- ◆  $n_s$  klein  $\Rightarrow$  dumpfe Fläche

$$I_{\text{spec}} = k_s I_L \cos^{n_s} \phi$$



Helmig Hauer

Teil 7: Beleuchtung

AD

---

---

---

---

---

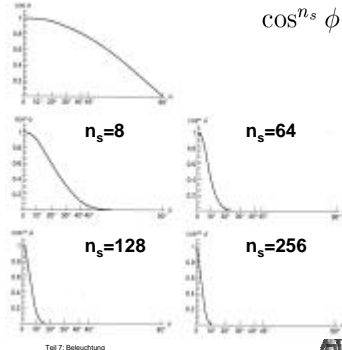
---

---

---

### Spiegelnde Reflexion (3)

Je größer  $n_s$ ,  
desto kleiner  
das Highlight



Hellwig Hauer      Teil 7: Beleuchtung

---

---

---

---

---

---

---

---

### Spiegelnde Reflexion (4)

Berechnung von R

$$R + L = (2N \cdot L)N$$

$$R = (2N \cdot L)N - L$$

Keine Winkel-  
operationen!

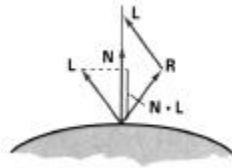


Figure 14-16  
Calculation of vector R by  
considering projections onto  
the direction of the normal  
vector N.

Hellwig Hauer      Teil 7: Beleuchtung

---

---

---

---

---

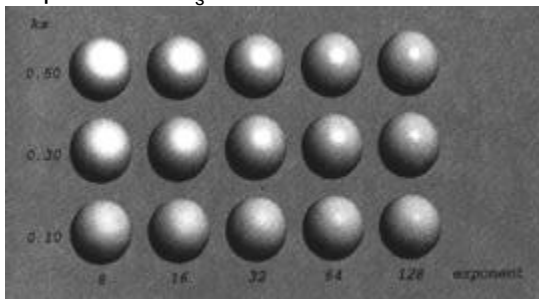
---

---

---

### Spiegelnde Reflexion (5)

Exponent vs.  $k_s$



Hellwig Hauer      Teil 7: Beleuchtung

---

---

---

---

---

---

---

---

## Spiegelnde Reflexion (6)

Variation von Blinn (Torrance):

$$I_{spec} = k_s I_l (N \cdot H)^{n_s}$$

$$H = \frac{L + V}{|L + V|}$$

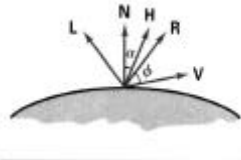


Figure 14-18  
Halfway vector **H** along the bisector of the angle between **L** and **V**.

Hellwig Houser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

---

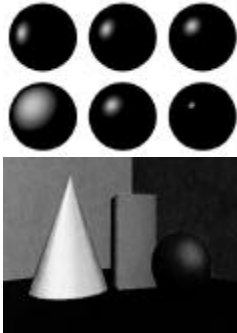
---

## Spiegelnde Reflexion (7)

Abhängig v.  
Betrachtungsrichtung

Abhängig von  
Beleuchtungsrichtung

Sehr gutes  
3D-Wahrnehmen



Hellwig Houser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

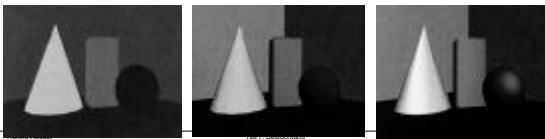
## Kombination

Für eine Lichtquelle:

$$I_{local} = k_a I_a + k_d I_L \cos \theta + k_s I_L \cos^{n_s} \phi$$

Für mehrere Lichtquellen:

$$I_{local} = k_a I_a + \sum_{i=1}^{\#lights} (k_d \cos \theta + k_s \cos^{n_s} \phi) I_{L_i}$$



Hellwig Houser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



## Andere Aspekte

Nicht-isotropes Licht  
Abnahme von Lichtintensität mit Entfernung  
Transparenz (Snells Gesetz)  
Schatten

Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

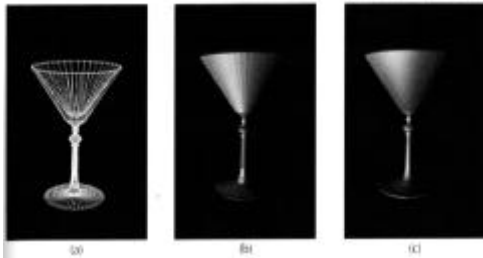
---

---

---

## Polygone schattieren

Anwendung von Beleuchtungsmodellen auf Polygone



Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Schattierungsmodelle

Polygone nach Transformationen und Abbildung mit Farbwerten füllen

**Flat-Shading:**

- ◆ Lambertsches Beleuchtungsmodell
- ◆ 1 Farbwert pro Polygon
- ◆ Vorteil: sehr schnelle Berechnung
- ◆ Nachteile: starker Mach-Band Effekt, unrealistisches Aussehen

**Besser: Gouraud-, Phong-Shading**

Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Gouraud Schattierung (1)

### Interpolation von Helligkeiten

- ◆ gemittelte Normale in Ecken bestimmen
- ◆ dann dort Beleuchtungsmodell evaluieren
- ◆ Ergebnisse, i.e., Intensitäten dann linear interpolieren

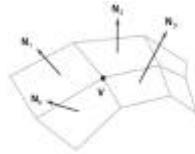


Figure 14-44  
The normal vector at vertex V is calculated as the average of the surface normals for each polygon sharing that vertex.

$$N_V = \frac{\sum_{k=1}^n N_k}{\sum_{k=1}^n N_k}$$

Helwig/Heuser

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Gouraud Schattierung (2)

### Helligkeiten interpolieren

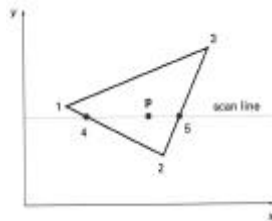


Figure 14-45  
For Gouraud shading, the intensity at point 4 is linearly interpolated from the intensities at vertices 1 and 2. The intensity at point 5 is linearly interpolated from intensities at vertices 2 and 3. An interior point p is then assigned an intensity value that is linearly interpolated from intensities at positions 4 and 5.

$$I_4 = \frac{y_4 - y_2}{y_1 - y_2} I_1 + \frac{y_1 - y_4}{y_1 - y_2} I_2 \quad I_p = \frac{x_5 - x_p}{x_5 - x_4} I_4 + \frac{x_p - x_4}{x_5 - x_4} I_5$$

Helwig/Heuser

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Gouraud Schattierung (3)

### Inkrementelles Interpolieren

$$I = \frac{y - y_2}{y_1 - y_2} I_1 + \frac{y_1 - y}{y_1 - y_2} I_2$$

$$I' = I + \frac{I_2 - I_1}{y_1 - y_2}$$

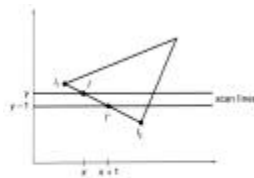


Figure 14-46  
Incremental interpolation of intensity values along a polygon edge for successive scan lines.

Helwig/Heuser

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Gouraud Schattierung (4)

Schattierung stetig ( $\neq$  flat shading)  
Aber Mach-Band Effekte

Probleme  
mit  
high-lights

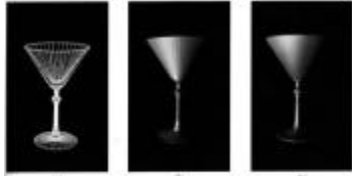


Figure 11-47  
A polygon mesh approximation of an object (a) is rendered with flat shading (b) and with Gouraud shading (c).

Helwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

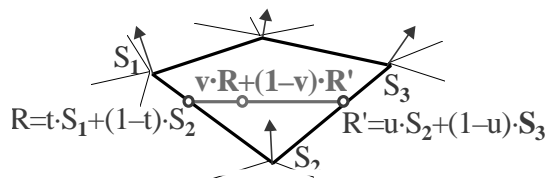
---

---

---

---

---



1. Normale in den Ecken bestimmen durch Mittel der angrenzenden Polygone
2. Beleuchtungsmodell evaluieren und entlang der Polygonkanten interpolieren
3. Innerhalb des Polygons entlang scan-lines interpolieren

Helwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Phong Schattierung (1)

Normalvektoren interpolieren

- ◆ wieder Normale in den Ecken bestimmen
- ◆ dann aber diese Normale interpolieren
- ◆ Beleuchtungsmodell bei jeder scan-line evaluieren

Helwig/Hausler

Teil 7: Beleuchtung




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## Phong Schattierung (2)

### Normalvektoren interpolieren

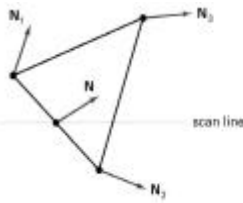


Figure 14-48  
Interpolation of surface normals  
along a polygon edge.

$$N = \frac{y - y_2}{y_1 - y_2} N_1 + \frac{y_1 - y}{y_1 - y_2} N_2$$

Helwig Hauer

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Phong Schattierung (3)

### Inkrementeller Normalvektor-update entlang von scan-lines und vertikal Vergleich zu Gouraud Schattierung

- ◆ High-lights besser
- ◆ kaum Mach-Band Effekte
- ◆ teurere Berechnung

Helwig Hauer

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

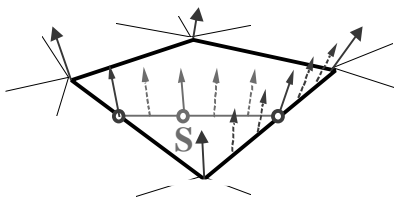
---

---

---

---

---



1. Normale in den Ecken bestimmen
2. Normale entlang Polygonkanten interpolieren
3. Normale innerhalb Polygon entlang scan-lines interpolieren und fuer jedes pixel Beleuchtungsmodell evaluieren

Helwig Hauer

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---

## Probleme bei Interpolationen

### Polygon-Silhouette

Interpolationsartefakte durch die vorgegebene „scanline“-Richtung

- ◆ Orientierungsabhängigkeit
- ◆ Perspektivische Abhängigkeit

Unrepräsentative Eckpunktnormalen

Abhilfe: feinere Triangulierung  
(führt zu komplexen Modellen)

Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

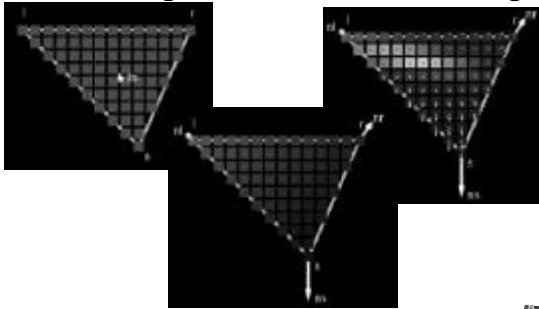
---

---

---

## Vergleich (1)

Flat Shading vs. Gouraud vs. Phong



Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

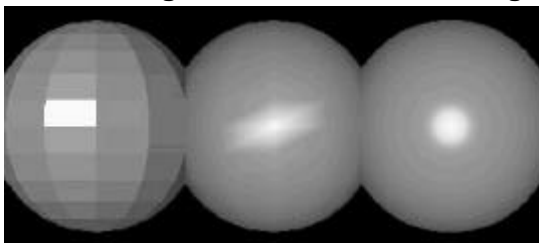
---

---

---

## Vergleich (2)

Flat Shading vs. Gouraud vs. Phong



Helwig Hauser

Teil 7: Beleuchtung



---

---

---

---

---

---

---

---