

Teil 8: Ray Tracing

Beleuchtung, inkl. Schatten, Reflexionen

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Einleitung

Forward Ray Tracing:

- ◆ Lichtwege verfolgen: wohin fällt Licht?
- ◆ vgl. shooting (Radiosity)
- ◆ Strahlen verfehlen Auge: aufwendig!

Backward Ray Tracing:

- ◆ „Blickstrahl“-Verfolgung: was sehe ich?
- ◆ vgl. gathering (Radiosity)
- ◆ Beleuchtung rekonstruieren



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



(Bwd.) Ray Tracing

Idee: für jedes Pixel:

- ◆ berechne Blickstrahl (**Kameramodell**)
- ◆ verfolge Blickstrahl in die Szene, ermittle nächsten Schnittpunkt (**Schnittpunktberechnung**)
- ◆ ermittle **Beleuchtung** (Phong, Schatten)
- ◆ ermittle **indirekte Beleuchtung** (Reflexionen, Brechungen)
- ◆ kombinieren Farbeindruck = Pixel-Wert
- ◆ evtl. mehr . . .

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Bausteine

Kameramodell

- ◆ Blickstrahlermittlung

Sichtbarkeitsberechnung = Schnittberechnungen++

- ◆ welches Objekt sehe ich (pro Pixel)

Schattierung bzw. Beleuchtung

- ◆ Schattenermittlung (Schattenfühler)
- ◆ lokales Beleuchtungsmodell (Phong)

Indirekte Einflüsse, Rekursion

- ◆ Reflexionen, Brechungen

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing

Charakteristika anhand von Beispielen

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



RT: Reflexionen, Brechungen

Normalerw. aber nicht:

- ◆ Kaustiken
- ◆ Prismen-
effekt



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



RT: Photo-Realismus

Normalerw.
aber nicht:

- ◆ Schmutz
- ◆ Out-door
- ◆ Tiefen-
unschärfe



Helmig Hauser

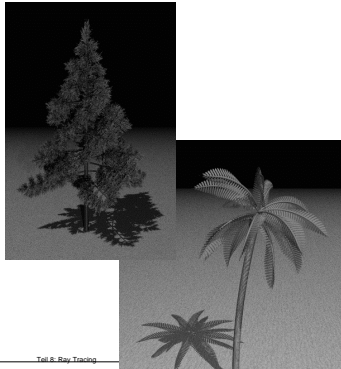
Teil 8: Ray Tracing



RT: Licht und Schatten

Normalerw.
aber nicht:

- ◆ Halbschatten,
i.e., flächige
bzw. räuml.
Lichtquellen



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing

RT: Komplexe Objekte

Normalerw.
aber nicht:

- ◆ komplexe
Modelle
realer Obj.
(Tiere, etc.)



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Charakteristika

Photo-realistische Ergebnisbilder
Sichtbarkeitsalgorithmus
Lichtquellen (auch mehrere), Schatten
Reflexionen, Brechungen
Komplexe Objekte (gekrümmt, fraktal)
Sehr aufwendig

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Strahlverfolgung

Primärstrahlen,
Sekundärstrahlen

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing

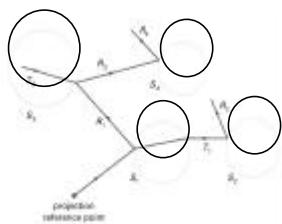


Ray Tracing – Strahlen

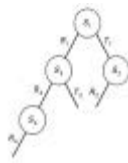
Primärstrahlen

Sekundärstrahlen:

- ◆ Reflexionen R, Brechungen T



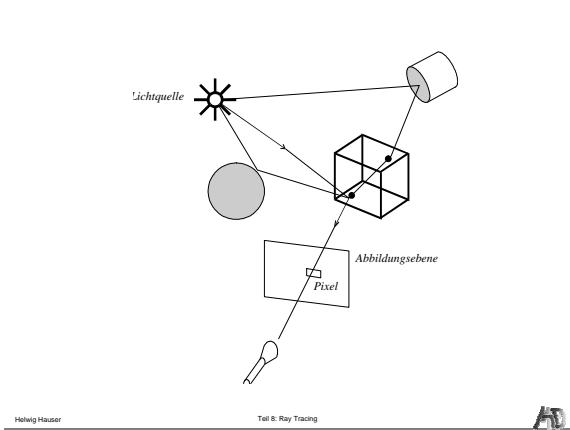
RT-Graph

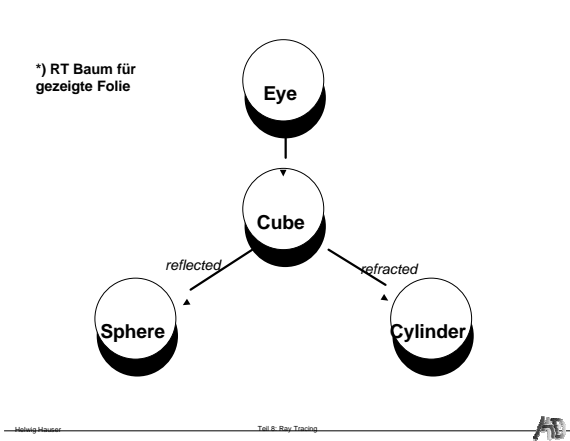


Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing







Ray Tracing – Algorithmus

**Sehstrahl,
Schnittberechnung,
Beleuchtung & Schatten,
Rekursion**

Teil 8: Ray Tracing

```

FOR every pixel p DO
1. trace primary ray
   find closest intersection s
2. FOR every light source l DO
   trace shadow feeler l -> s
   IF no intersection THEN
     illumination += local influence of l
3. IF surface of s is reflective THEN
   trace secondary ray
   illumination += influence of reflection
   IF surface of s is transparent THEN
   trace secondary ray
   illumination += influence of refraction

```

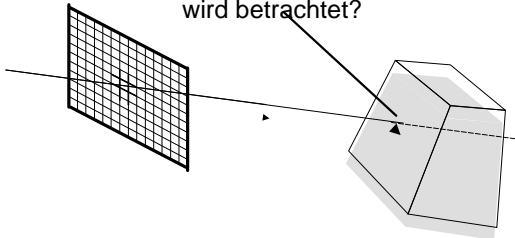
Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Beispiel (1)

1. Sichtbarkeitsberechnung:
welcher Objektpunkt
wird betrachtet?



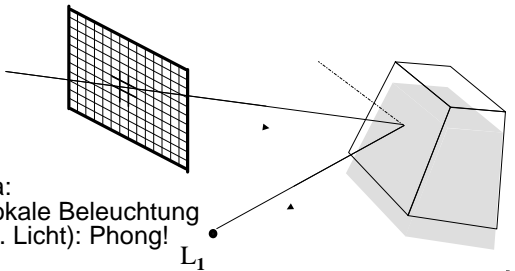
Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Beispiel (2)

2a:
Lokale Beleuchtung
(1. Licht): Phong!

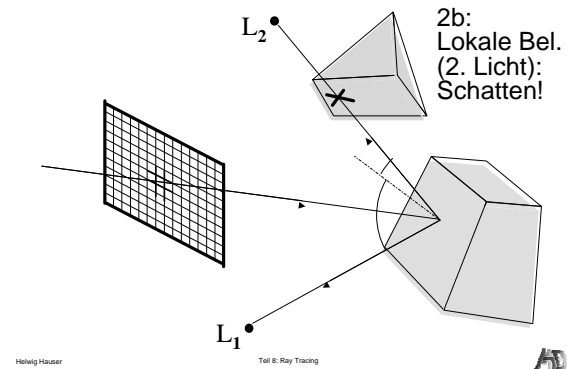


Helmig Hauser

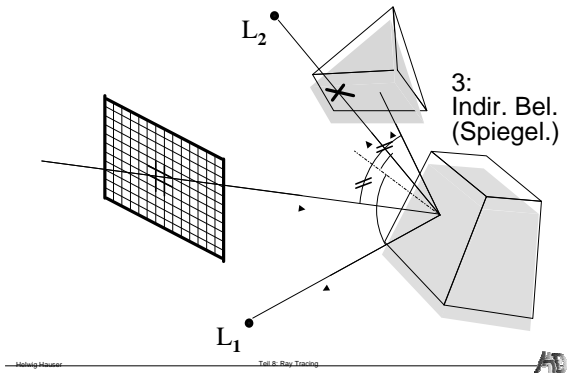
Teil 8: Ray Tracing



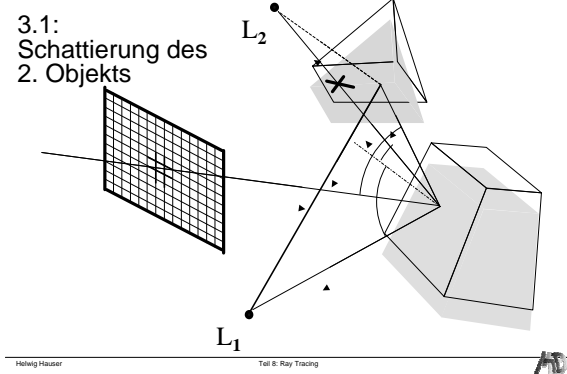
Ray Tracing – Beispiel (3)



Ray Tracing – Beispiel (4)

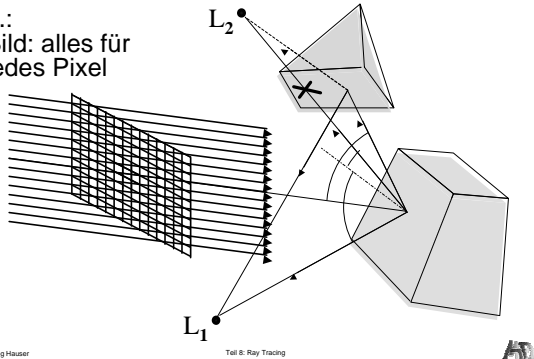


Ray Tracing – Beispiel (5)



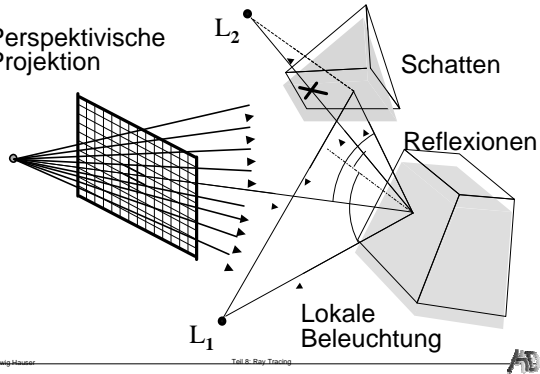
Ray Tracing – Beispiel (6)

0.:
Bild: alles für
jedes Pixel



Ray Tracing – Beispiel (7)

Perspektivische
Projektion



Ray Tracing – Schnittberechnungen

Kugel,
Polygon,
Box

Anforderungen an Objekte

Schnittberechnung mit Strahl

- ◆ Lösung in geschlossener Form
- ◆ Iterativer, numerischer Ansatz

Normalenberechnung im Schnittpunkt

Beispiele:

- ◆ Implizit definierte Objekte – $f(x)=0$ – wie Kugel, Ebene, etc.: oft relativ einfach
- ◆ Sonst: oft Ausnutzen von Hilfsstrukturen: bounding boxes, regular grid, BSP, etc.

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Kugel Schnitt (1)

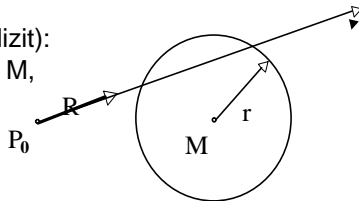
Strahl (parametrisch):

Augpunkt P_0 , Richtungsvektor R , i.e.

$$P(t) = P_0 + t \cdot R \quad (|R| = 1)$$

Kugel (implizit):

Mittelpunkt M ,
Radius r



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Kugel Schnitt (2)

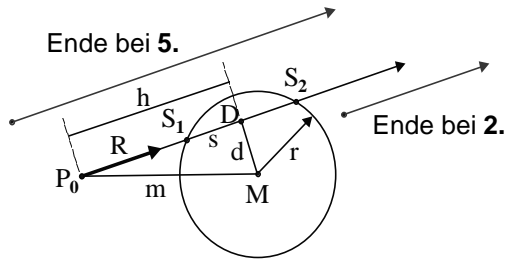
1. Abstand² $(M-P_0)^2 \equiv m^2 \rightarrow P_0$ außerhalb?
2. P_0 außerhalb + R zeigt weg von Kugel
 $R \cdot (M-P_0) \equiv h < 0 \Rightarrow$ fertig (kein Schnitt)
3. Def. D (\equiv Strahlpunkt am nächsten zu M)
4. Abstand² $(M-D)^2 \equiv d^2 \rightarrow$ Strahl schneidet?
5. $d^2 > r^2 \Rightarrow$ fertig (Strahl geht vorbei)
6. Ber. t -Werte von Schnittpunkten ($\equiv t_1, [t_2]$)
7. Ber. Schnittpunkte $S_1, [S_2]$
8. Ber. Kugelnormale $N_1, [N_2]$, fertig (Schnitt)

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Kugel Schnitt (3)



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Kugel Schnitt, Beispiel (1)

Bsp.: $P_0 = (1 \ -2 \ -1)^T$, $R \parallel (1 \ 2 \ 4)^T$, $M = (3 \ 0 \ 5)^T$, $r = 3$

1. $m^2 = (M - P_0)^2 = (2 \ 2 \ 6)^T \cdot (2 \ 2 \ 6)^T = 44$
 $44 > r^2 = 9 \Rightarrow P_0$ außerhalb
2. $R \cdot (M - P_0) = (1 \ 2 \ 4)^T / \sqrt{21} \cdot (2 \ 2 \ 6)^T = 6.546$
 $6.546 > 0 \Rightarrow R$ zeigt in Richtung Kugel
 !! $R \cdot (M - P_0) = h = m \cdot \cos(\angle MP_0D) = |D - P_0|$!!
4. $d^2 = m^2 - h^2 = 44 - 42.850 = 1.150$
5. $1.150 < r^2 = 9 \Rightarrow$ Strahl schneidet wirklich

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Kugel Schnitt, Beispiel (2)

~~Bsp.: $P_0 = (1 \ -2 \ -1)^T$, $R \parallel (1 \ 2 \ 4)^T$, $M = (3 \ 0 \ 5)^T$, $r = 3$~~

6. $s^2 = r^2 - d^2 = 9 - 1.150 = 7.850 \rightarrow s = 2.802$
 $t_1 = h - s = 6.546 - 2.802 = 3.744$,
 $t_2 = \dots$
7. $S_1 = P_0 + t_1 \cdot R = (1.816 \ -0.368 \ 2.269)^T$,
 $S_2 = \dots$
8. $N_1 = (S_1 - M) / r = (-0.395 \ -0.123 \ -0.910)^T$,
 $N_2 = \dots$

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Polygon Schnitt (1)

Strahl: $P = P_0 + t \cdot R \quad |R| = 1$

Polygon-Ebene:

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \quad (A^2 + B^2 + C^2) = 1$$

Normalvektor auf Polygon: $N = (A \ B \ C)$

Vektorschreibweise: $N \cdot P = -D$

$$N \cdot (P_0 + t \cdot R) = -D \Rightarrow \boxed{t = -(D + N \cdot P_0) / N \cdot R}$$

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Polygon Schnitt (2)

$N \cdot R = 0 \Rightarrow$ Strahl ist parallel zu Polygon

$t < 0 \Rightarrow$ Schnittpunkt hinter Augpunkt

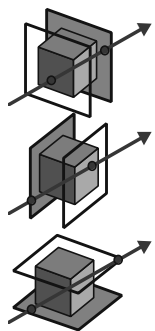
Schnittpunkt: t in Strahlgleichung einsetzen
inside/outside-Test für Polygon (z.B.) mit
even/odd-Regel

Helmig Hauser

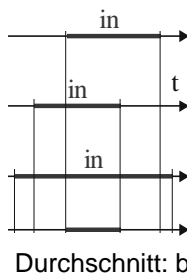
Teil 8: Ray Tracing



Strahl-Box Schnitt



t-Werte:



Für alle **konvexen** Vielflächer gilt:
Schnitte nur mit Ebenen, kein Polygon (inside/outside) Test notwendig!

Durchschnitt: box

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Beleuchtung

Beleuchtung = lokale Beleuchtung
+ Reflexionsanteil
+ Brechungsanteil

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Beleuchtungsmodell

Am Schnittpunkt:

$$I = k_{\text{local}} \cdot I_{\text{local}} + k_{\text{refl}} \cdot I_{\text{refl}} + k_{\text{trans}} \cdot I_{\text{trans}}$$
$$k_{\text{local}} + k_{\text{refl}} + k_{\text{trans}} = 1$$

Lokal (Phong):

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

Rekursive Definition:

$$I(P) = k_{\text{local}} I_{\text{local}} + k_{\text{refl}} I(P_r) + k_{\text{trans}} I(P_t)$$

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



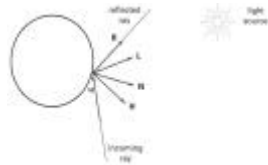
Beleuchtung: lokale Beleuchtung

Schattenfühler in Richtung L

Umgebungslicht $k_a I_a$

Diffuse Reflexion $k_d (N \cdot L)$

Spiegelnde Reflexion, z.B. $k_s (H \cdot N)^{n_s}$



Helmig Hauser

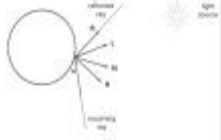
Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing: Reflexion, Brechung

Reflexionsstrahl

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



Brechungsstrahl

◆ Brechungsgesetz

$$\sin \theta_r = \frac{\eta_i}{\eta_r} \sin \theta_i$$



Helmig Hauser

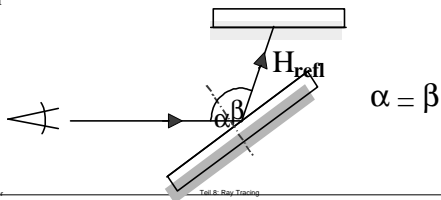
Teil 8: Ray Tracing



Beleuchtung: Reflexion

$$I_{\text{refl}} = k_{\text{refl}} \cdot H_{\text{refl}}$$

- I_{refl} ... Reflexionsanteil
- k_{refl} ... Reflexionskoeffizient des Materials
- H_{refl} ... Einfallender Teil in Reflexionsrichtung



Helmig Hauser

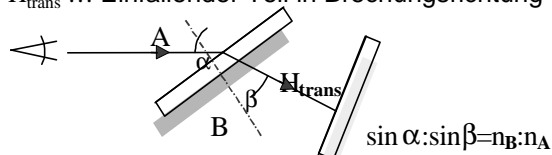
Teil 8: Ray Tracing



Beleuchtung: Transparenz

$$I_{\text{trans}} = k_{\text{trans}} \cdot H_{\text{trans}}$$

- I_{trans} ... Transparenzanteil
- k_{trans} ... Transparenzkoeffizient des Materials
- H_{trans} ... Einfallender Teil in Brechungsrichtung



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Beispiele

3 Beispiele

Helwig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing Beispiel 1

Szene:

37 Kugeln

720 Polyg.

Algorithmus:

9 Strahlen

per Pixel

Tiefe 5



Helwig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing Beispiel 2

Szene:

3036 Primitive

2 Lichtquellen

Algorithmus:

1 Strahl per Pixel

1.6 Mio. Strahlen



Helwig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing Beispiel 3

Szene:

1298 Polyg.

4 Kugeln

76 Zylinder

35 Quadriken

5 Lichtquellen

Algorithmus:

Light-Buffer



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing Beispiel 3 – Detail



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Mängel

Komplexität durch **Menge an Strahlen**
(und dabei entstehende Schnitte)

Restriktion der „Globalität“ auf
Spiegelreflexion und Brechung
(keine globale diffuse Beleuchtung)

Visuelle Mängel

- ◆ Anti-Aliasing
- ◆ Kein Halbschatten
- ◆ Tiefenschärfeneffekte

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Distributed Ray Tracing

Anti-Aliasing, Halbschatten, diffuse Reflexion, etc.

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Distributed Ray Tracing

Berücksichtigung folgender Effekte:

- ◆ Aliasing
- ◆ Unschärfe Spiegelung
- ◆ Milchglaseffekte
- ◆ Halbschatten
- ◆ Tiefenunschärfe
- ◆ Bewegungsunschärfe

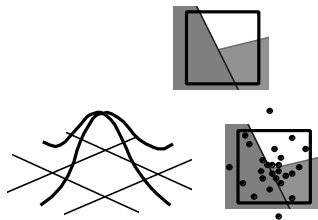
Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Anti-Aliasing

Stochastisches Sampling mit Gauss-Gewichtung



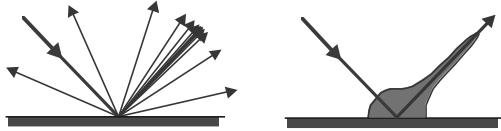
Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Unschärfe Spiegelung

Simulation von gerichtet-diffusen Reflexionen durch Variation des Reflexionswinkels

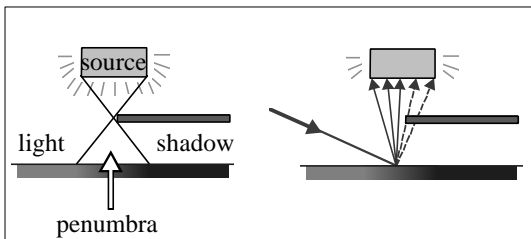


Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Halbschatten



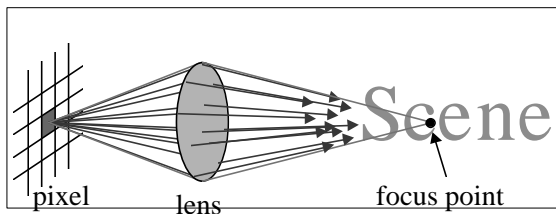
Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Tiefenunschärfe

Abhängigkeit von der Blende berücksichtigen (Durchmesser)



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Algorithmus (Distributed Ray Tracing)

**Große Anzahl an Strahlen - aber:
Monte-Carlo Integration möglich**

- ◆ Nur einen Strahl weiterverfolgen
- ◆ Integration eines Strahlenbündels

Benötigte Strahlen (pro Pixel):

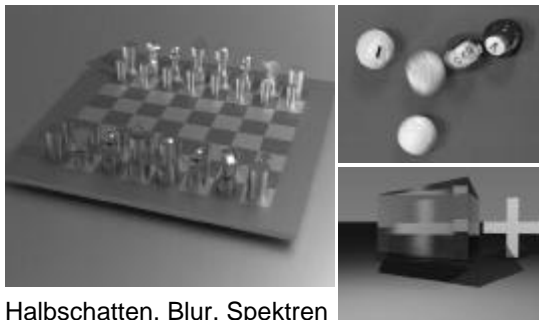
- ◆ Minimum: 5-10
- ◆ Gute Qualität: 10-20 (für einen Effekt)
- ◆ Gute Gesamtqualität: 20-60

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Distributed Ray Tracing – Bsp.



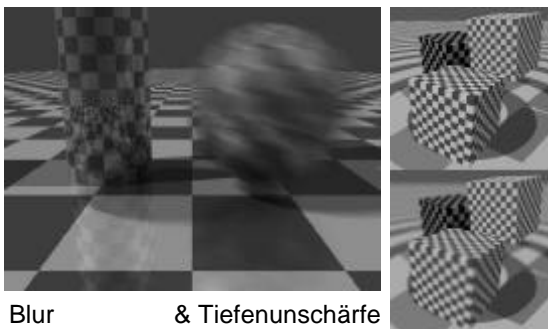
Halbschatten, Blur, Spektren

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Distributed Ray Tracing – Bsp.



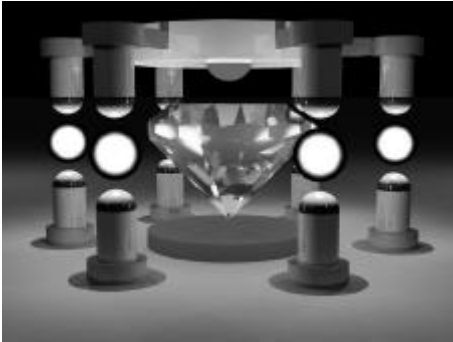
Blur & Tiefenunschärfe

Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Distributed Ray Tracing – Bsp.

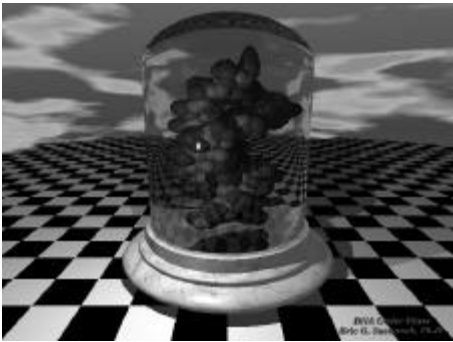


Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



www.povray.org – Beispiele



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



www.povray.org – Beispiele



Helmig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



www.povray.org – Beispiele



Heilig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



www.povray.org – Beispiele



Heilig Hauser

Teil 8: Ray Tracing



Ray Tracing – Weitere Beispiele



Heilig Hauser

Teil 8: Ray Tracing