

Computer-Graphik II

Ray-Tracing



G. Zachmann

Clausthal University, Germany

cg.in.tu-clausthal.de



Die antike Erklärung des Sehens: Sehstrahlen





Effekte für eine realistische Darstellung

- Das lokale Beleuchtungsmodell versagt bei folgenden Effekten
- (Soft) Shadows (Halbschatten)
- Reflexion (Spiegel und Glanz)
- Transparenz (Wasser, Glas)
- Interreflexion ("*color bleeding*")
- ...





Globale Beleuchtungsrechnung



- Ziel: **Photorealistisches Rendering**
- Die "Lösung": die **Rendering-Gleichung** [Kajiya, Siggraph 1986]

$$L_r(x, \omega_r) = L_e(x, \omega_r) + \int_{\Omega} \rho(x, \omega_r, \omega_i) L_i(x, \omega_i) \cos(\theta_i) d\omega_i$$

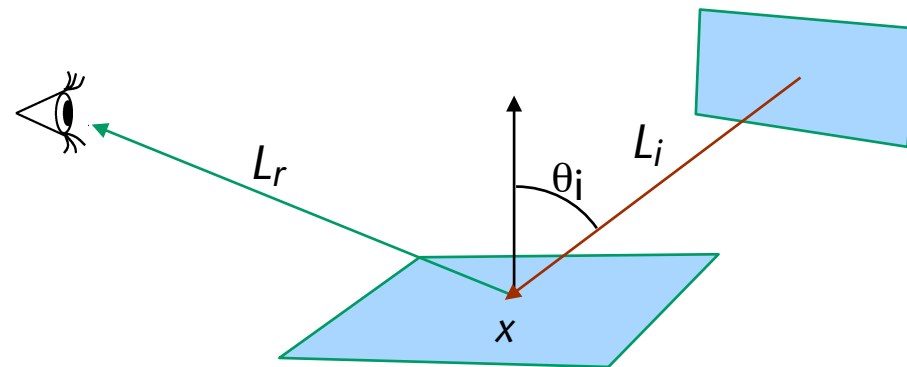
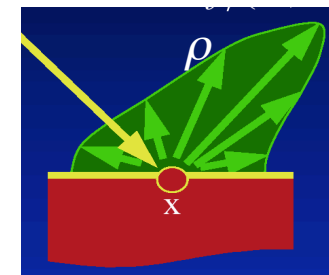
L_i = aus Richtung ω_i inzidenten "Licht"

L_e = emittiertes Licht

L_r = in Richtung ω_r reflektiertes Licht

ρ = Reflexionskoeffizientenfunktion (BRDF)

Ω = Halbkugel um Normale





- Analytische Lösung ist unmöglich!
- Die Rendering Gleichung kann als rekursive Funktion aufgefaßt werden
- Daraus folgen praktische **Approximations-Verfahren**, die auf der Verfolgung des Lichts entlang Strahlen beruhen
 - **Ray tracing** [Whitted, Siggraph 1980, "An Improved Illumination Model for Shaded Display"]
 - **Radiosity** [Goral et. al, Siggraph 1984, "Modeling the Interaction of Light between diffuse Surface"]
 - **Monte Carlo Verfahren**



Turner Whitted,
Microsoft Research



Rekursives Ray-Tracing

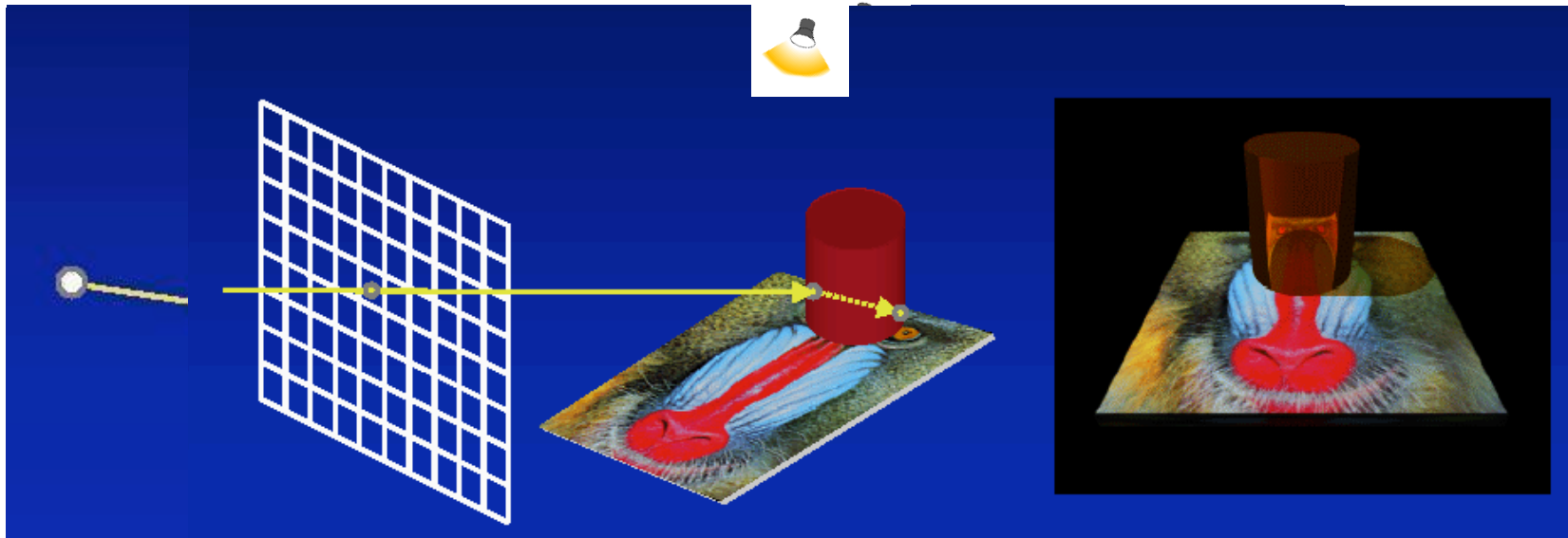
- Algorithmus zur Approximation der Rendering-Gleichung
- Modelliert werden nur:
 - Reflektion
 - Beugung
 - Verdeckungsrechnung
 - Schatten
- Strahlen werden nur in Richtung des **reflektierten** bzw. **gebrochenen** Strahls verfolgt
- Annahmen:
 - Punktlichtquellen
 - Phong-Modell
 - keine Halbschatten





Funktionsweise

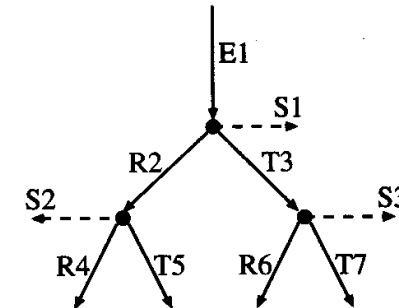
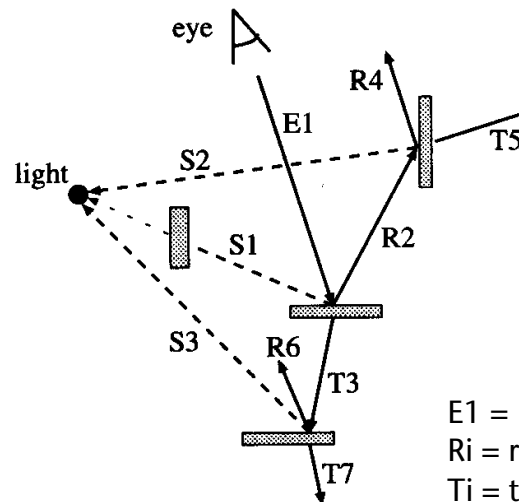
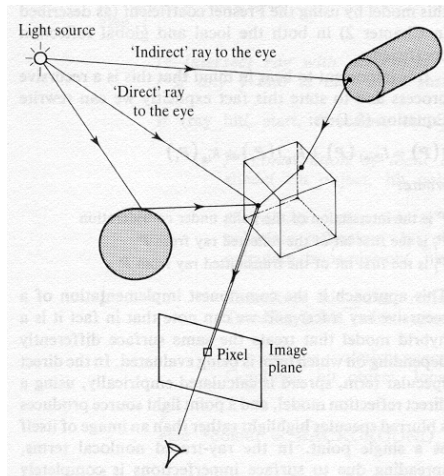
1. Synthetische Kamera = Augpunkt + Bildebene in Weltkoordinaten
2. Schieße Strahlen vom Augpunkt aus durch die Pixel in die Szene
3. Falls der Strahl mehr als ein Objekt schneidet, betrachte nur den ersten Schnittpunkt
4. Schieße weitere Strahlen vom dort zu allen Lichtquellen (Schattenstrahlen; "*shadow feelers*")
5. Treffen diese Schattenstrahlen auf ein Objekt, so liegt der betrachtete Flächenpunkt im Schatten. Ansonsten wird das Phong-Beleuchtungsmodell ausgewertet
6. Ist das sichtbare Objekt spiegelnd, dann schieße weiteren reflektierten Strahl in die Szene
7. Ist das Objekt transparent, so wird zusätzlich ein gebrochener Strahl weiterverfolgt





Der Strahlbaum

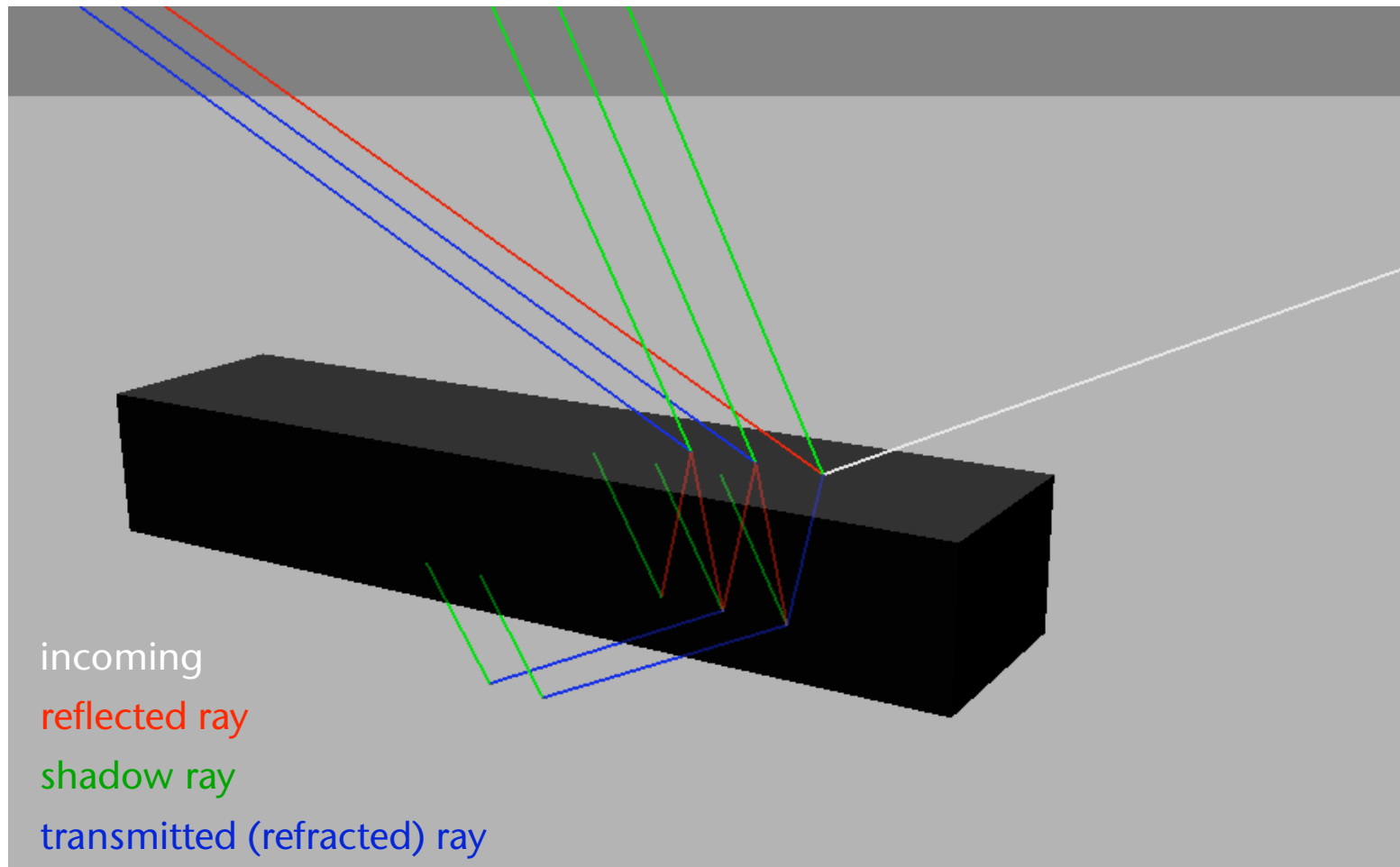
- Grundidee des Raytracing: Strahlengänge von den Lichtquellen bis zum Auge konstruieren, aber dabei beim Auge starten und diese Strahlengänge rückwärts "suchen"
- Ergibt (konzeptionell!) einen Strahlenbaum:



E1 = Primärstrahl
Ri = reflektierter Strahl
Ti = transmittierter Strahl
Si = Schattenstrahl



- Visualisierung eines Strahlbaumes (eignet sich hervorragend zum Debugging)





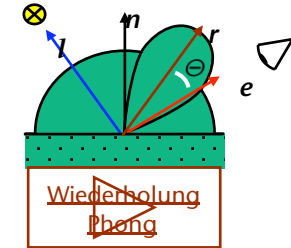
Das Beleuchtungsmodell

- Beleuchtung auf der Fläche

$$L_{\text{ges}} = L_{\text{Phong}} + r_s L_s + r_t L_t$$

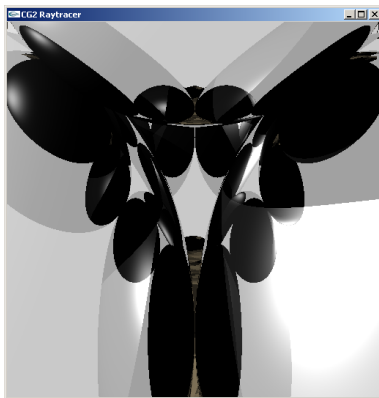
r_s = Reflexionskoeffizient für das reflektierte Licht L_s

r_t = Transmissionskoeffizient für das transmittierte Licht L_t

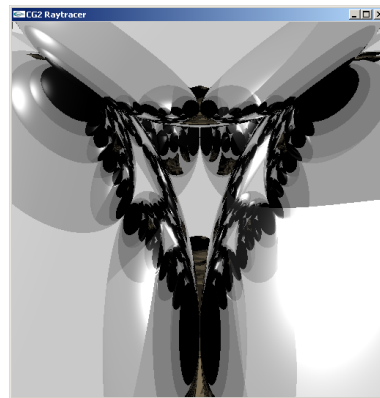


- Abbruch der Rekursion:

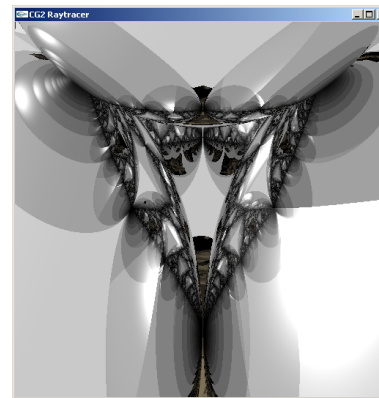
- Falls maximale Rekursionstiefe erreicht; oder/und,
- falls Beitrag zur Beleuchtung zu klein (schrumpft wie r_t^n)



Rek. Tiefe: 3



Rek. Tiefe: 5

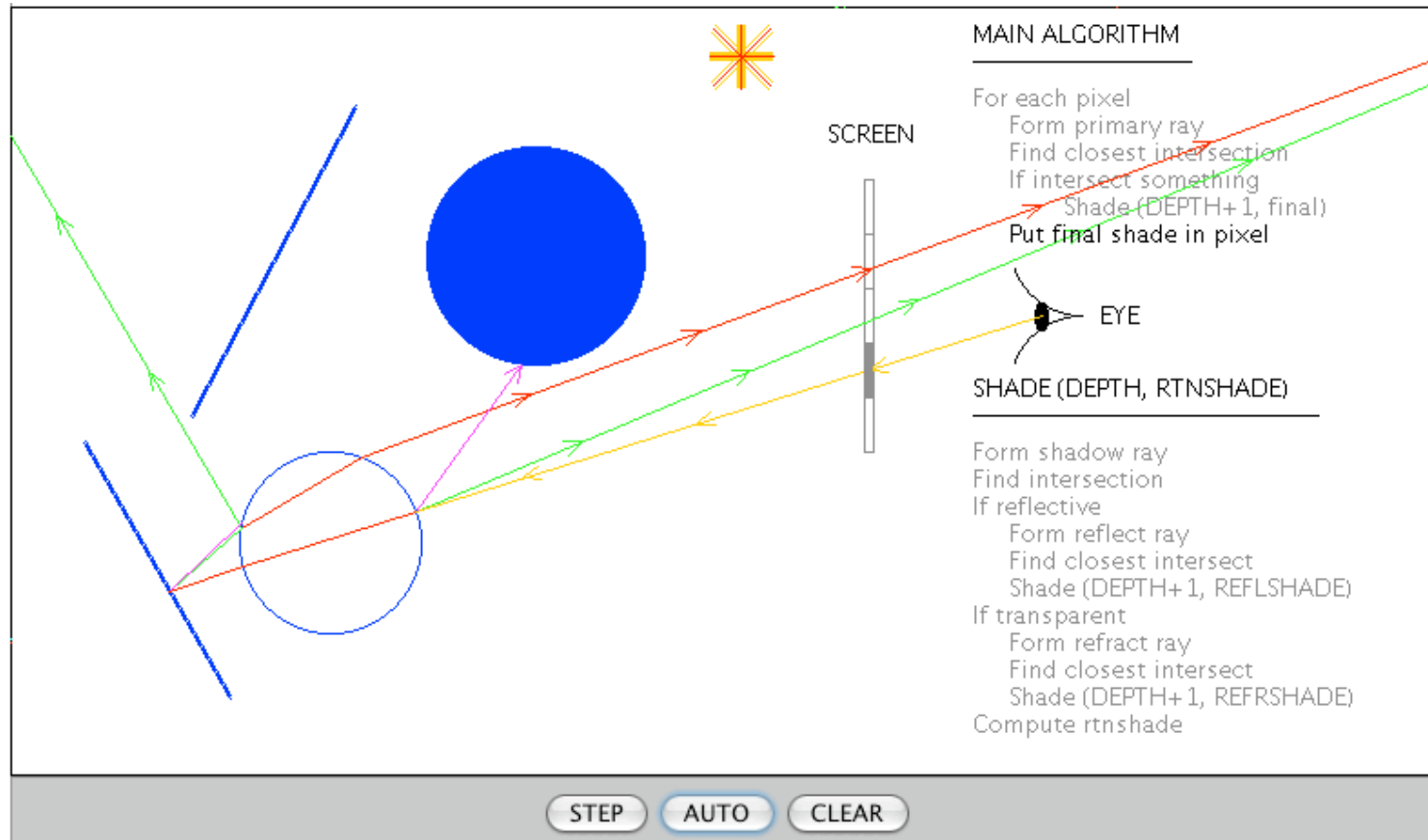


Rek. Tiefe: 100





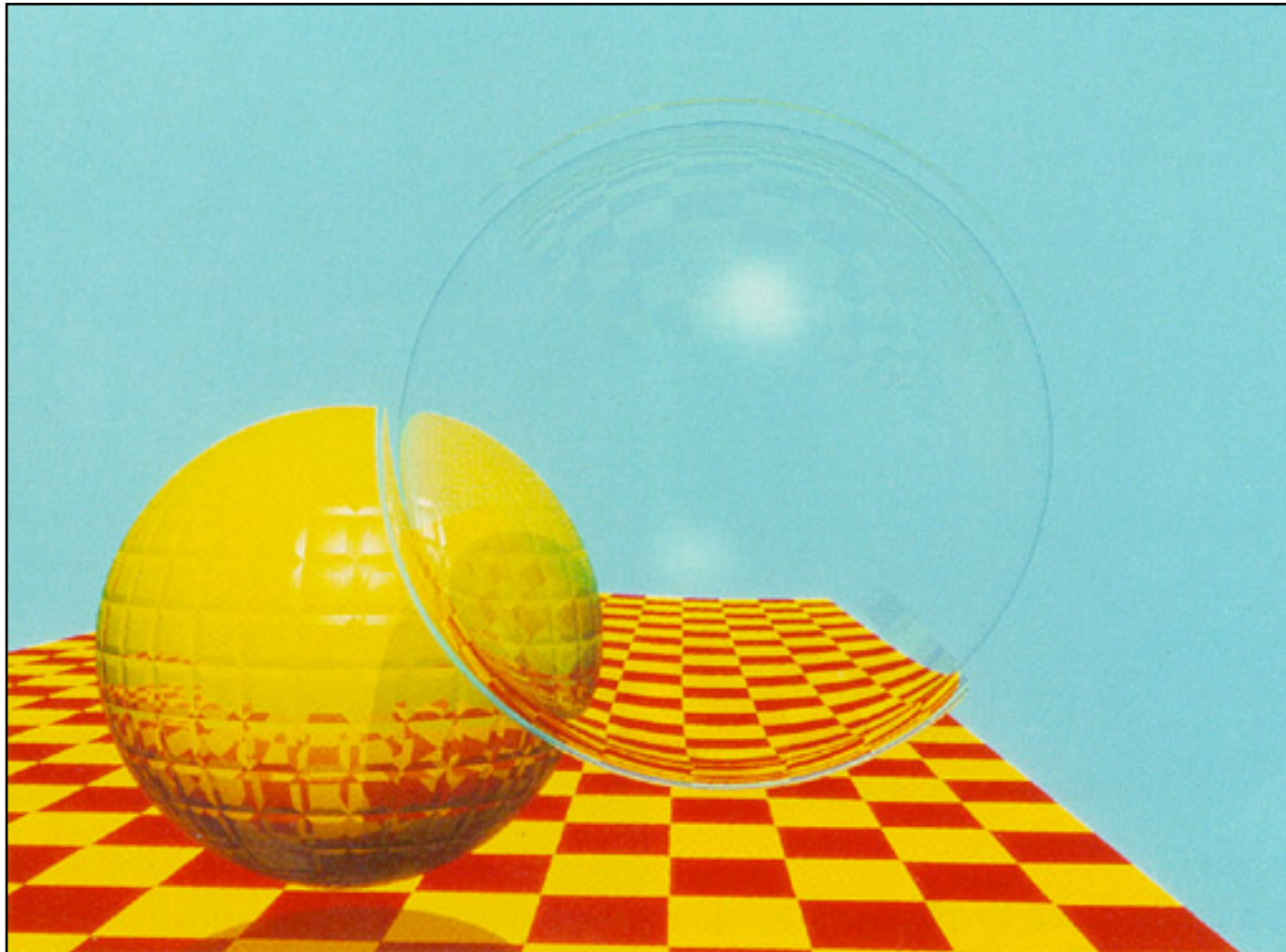
Demo



http://www.siggraph.org/education/materials/HyperGraph/raytrace/rt_java/raytrace.html



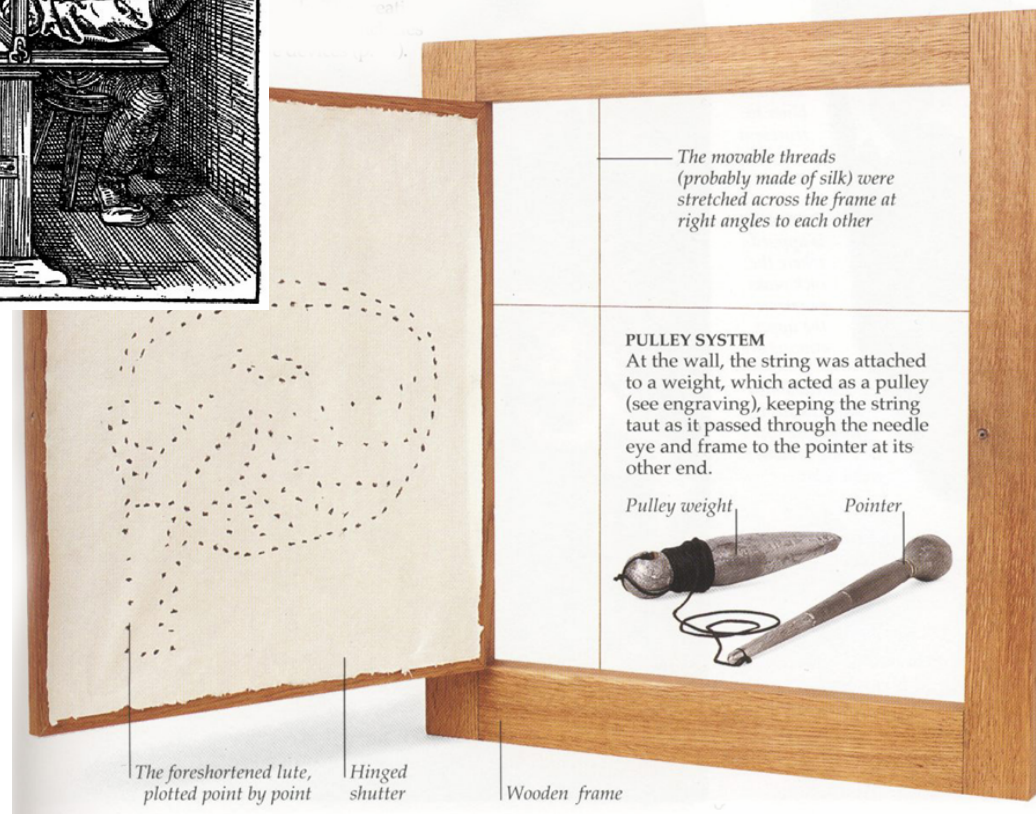
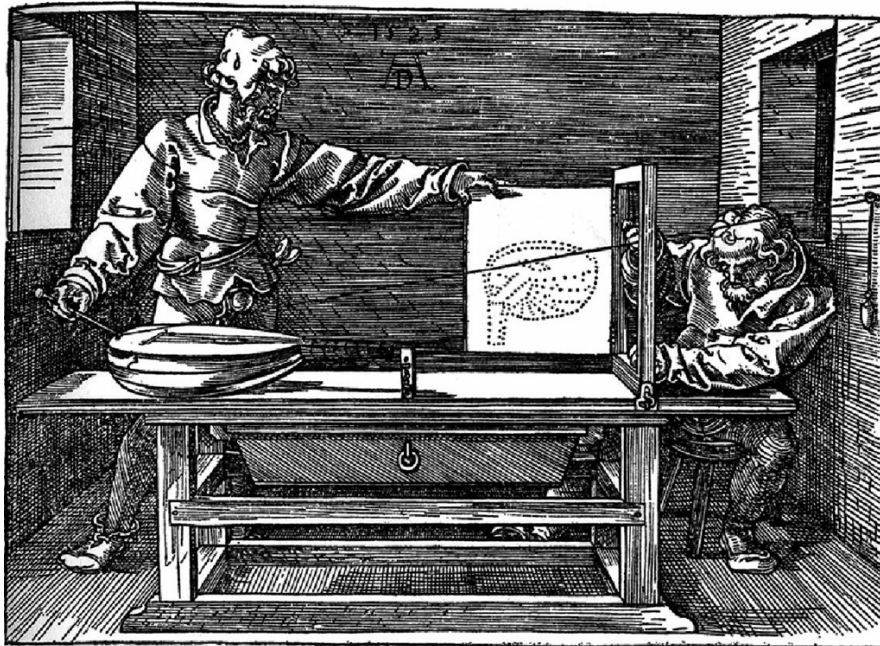
Eines der ersten Ray-Tracing-Bilder

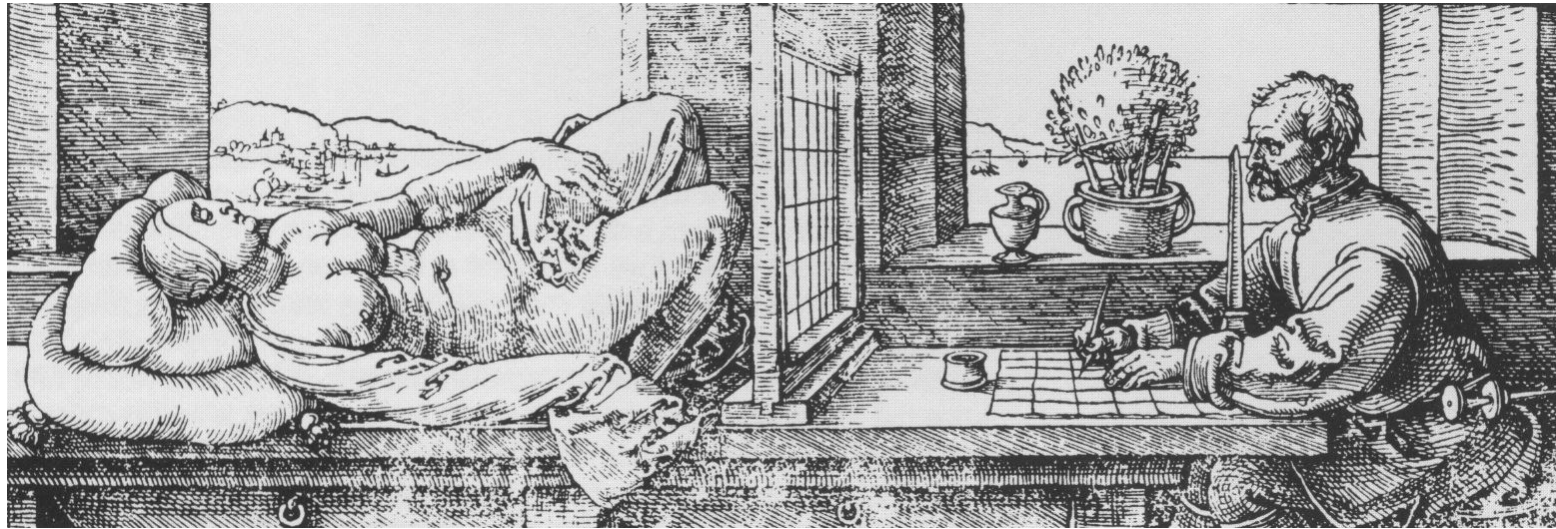


Turner Whitted 1980



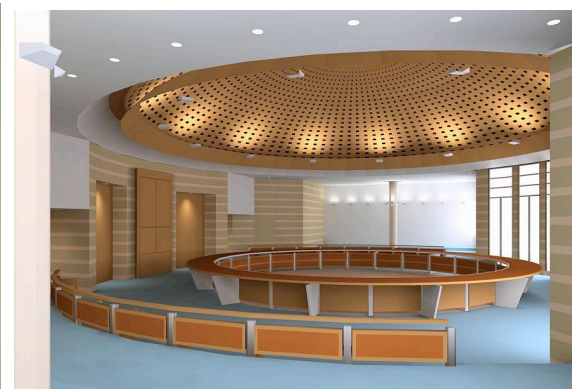
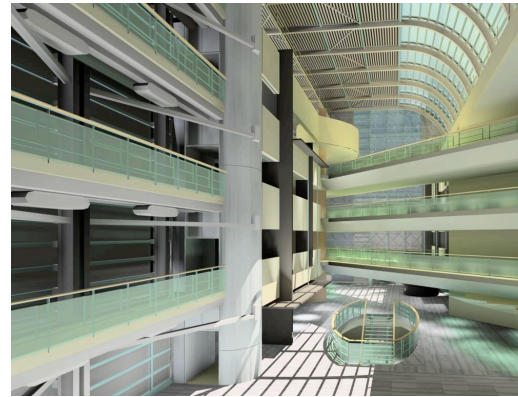
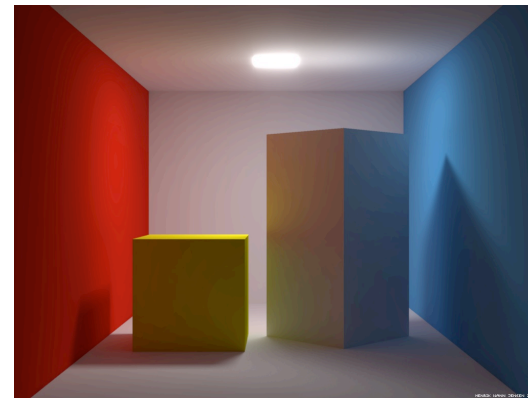
Albrecht Dürers "Ray-Casting-Maschinen" [16. Jhrdt.]



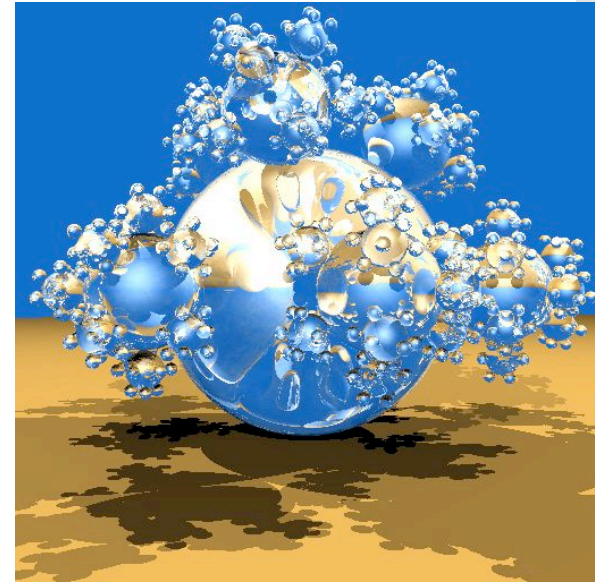
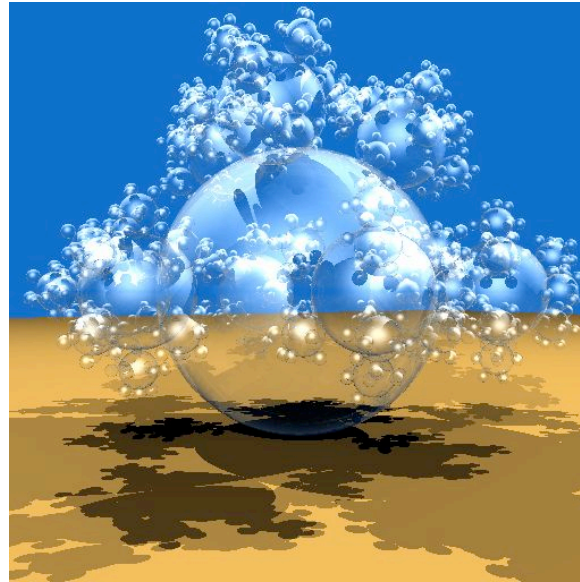
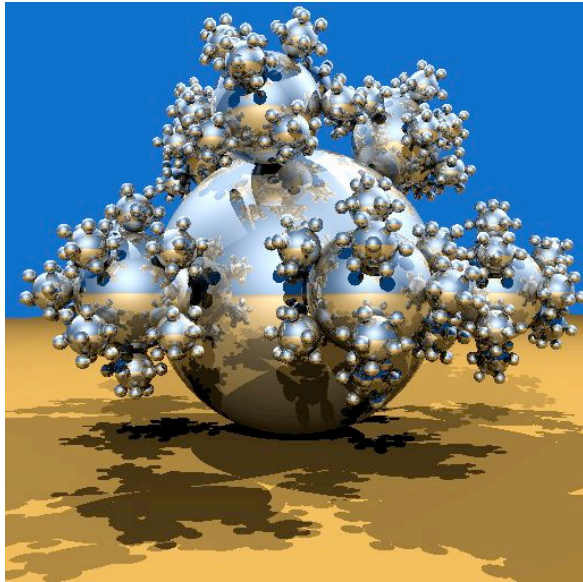




Beispiele

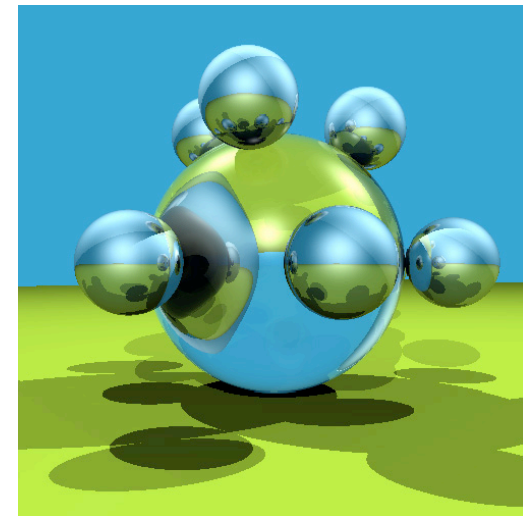
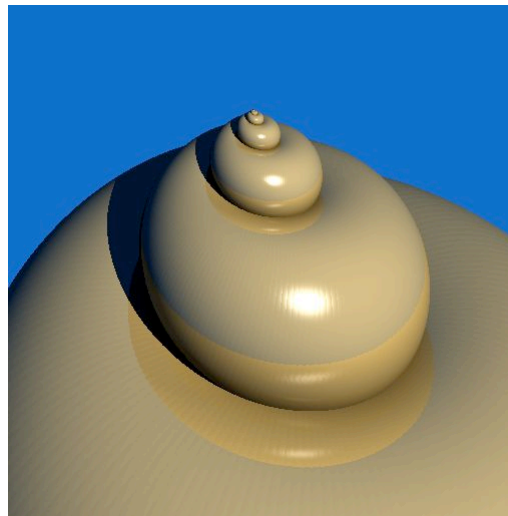
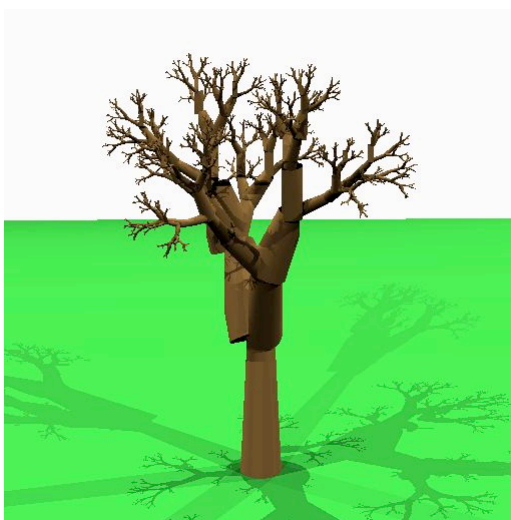
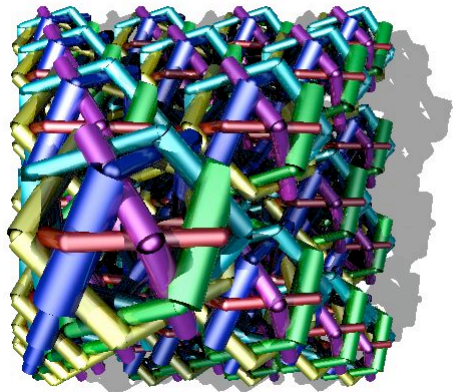


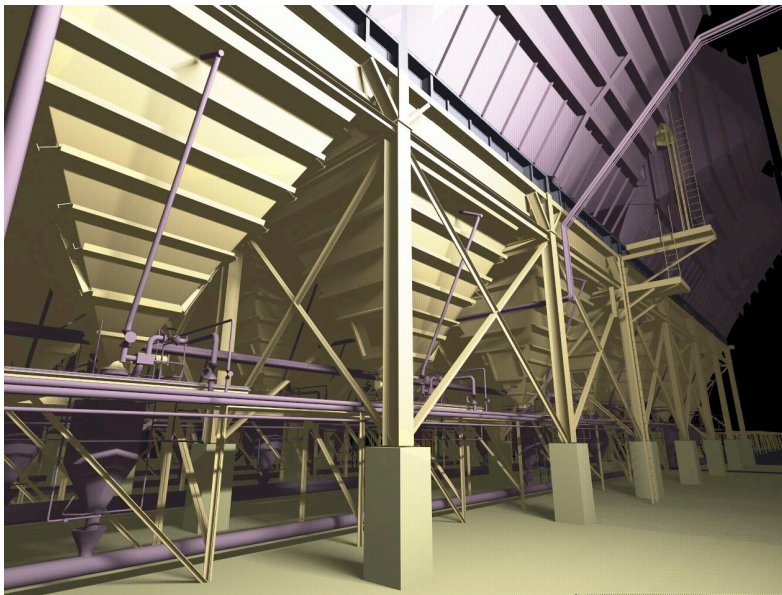
Jensen, Lightscape



Objekt "sphere flake" aus der "Standard Procedural Databases" (SPD) von Eric Haines [<http://www.acm.org/tog/resources/SPD/>].

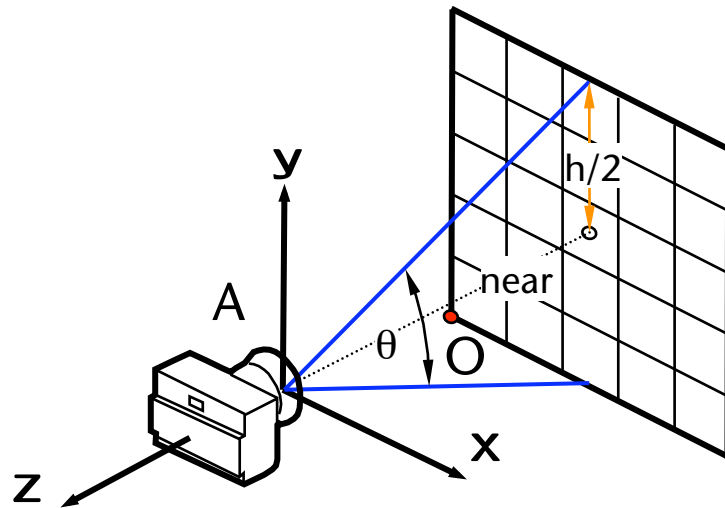








Die Kamera (ideale Lochkamera)



$$h = 2 \cdot \text{near} \cdot \tan \frac{\theta}{2}$$

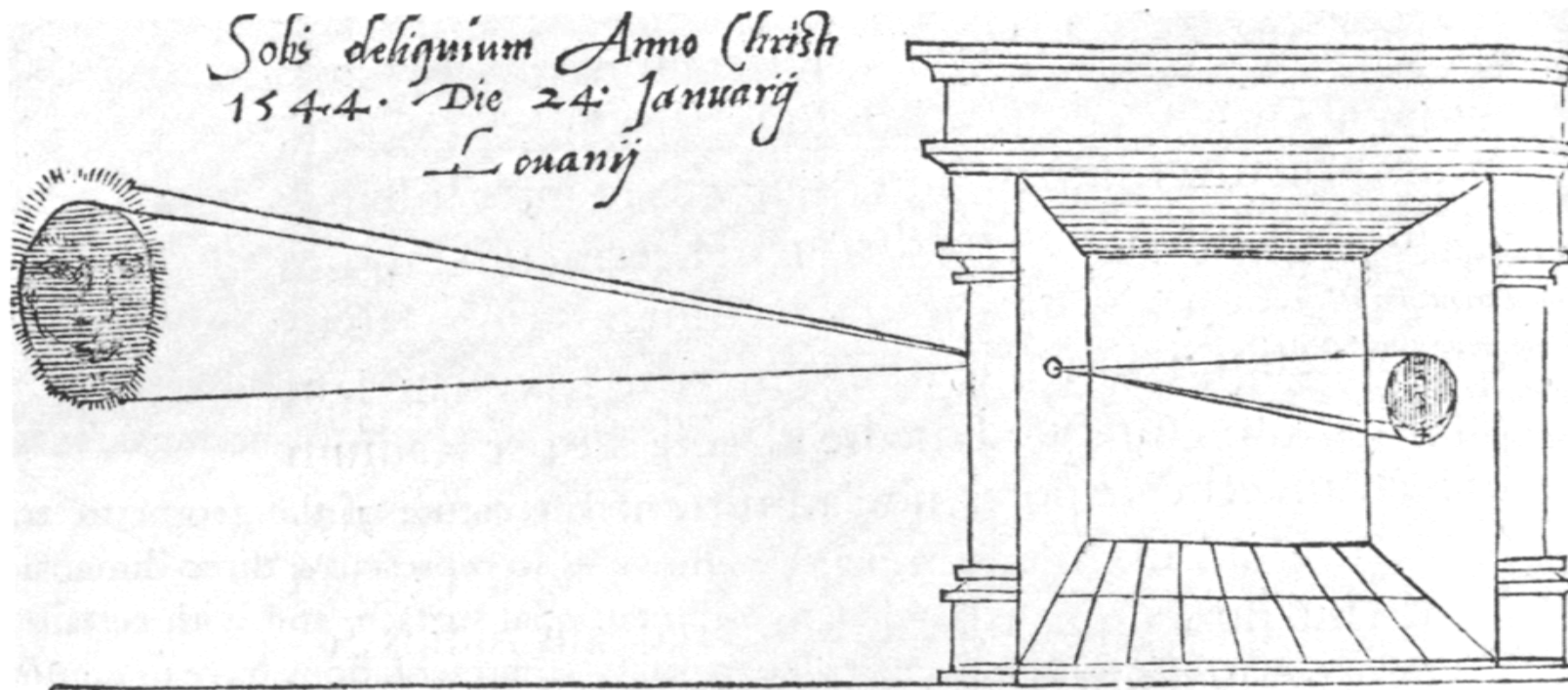
$$O = A - \text{near} \cdot \mathbf{z} - \frac{b}{2} \mathbf{x} - \frac{h}{2} \mathbf{y}$$

Die Main-Loop eines Ray-Tracers

```
for ( t = 0; t < h; t ++ )  
  for ( s = 0; s < b; s ++ )  
    ray.from = A  
    ray.at = O + s·x + t·y  
    trace( 0, ray, &color );  
    putPixel( x, y, color );
```



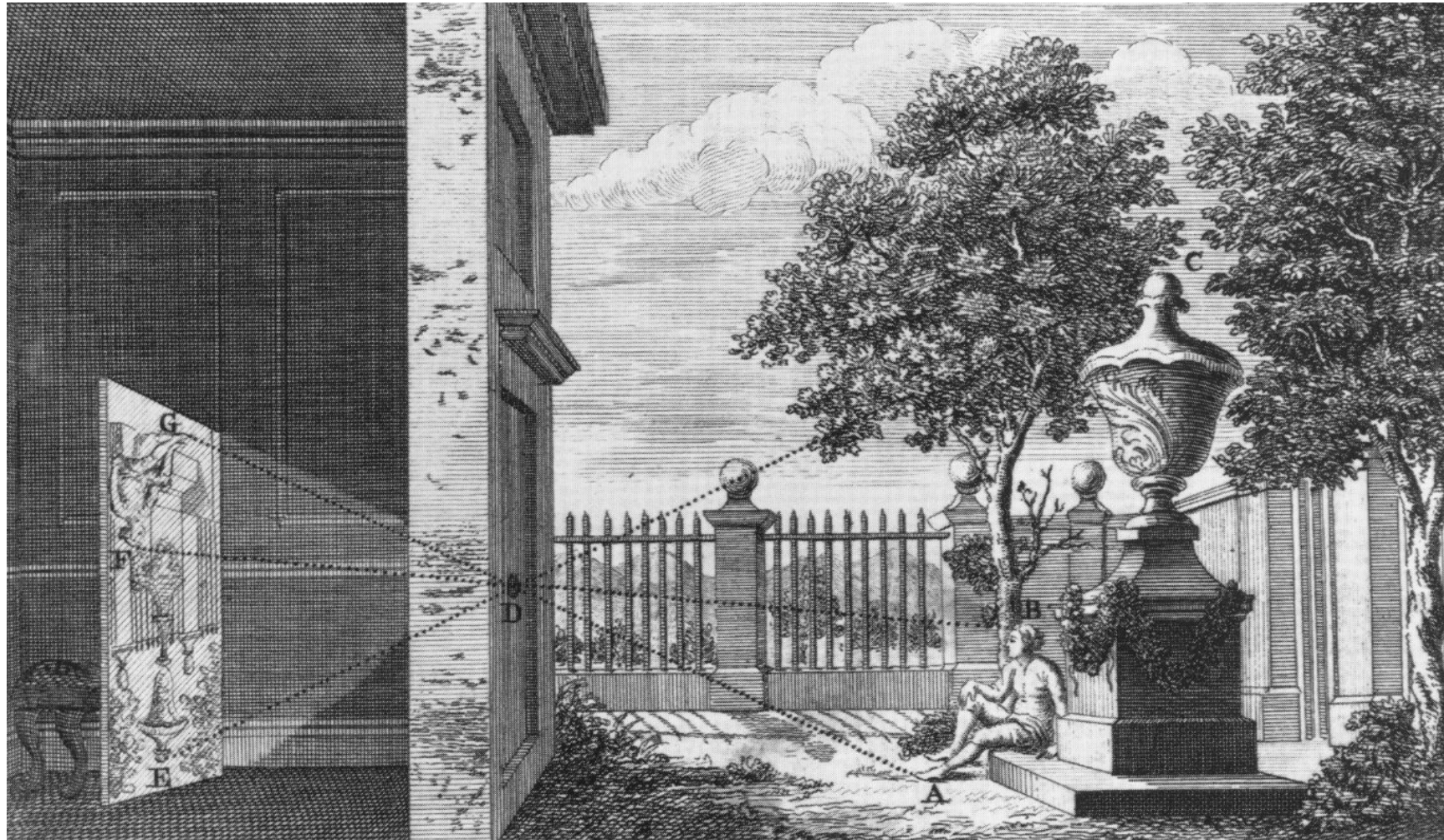
Älteste Abbildung einer Lochkamera



Von R. Gemma Frisius, 1545



Camera Obscura





Andere sonderbare Kameras

- Mit Ray-Tracing sind andere Projektionen sehr einfach
- Z.B. Fischauge, Omnimax, Panorama

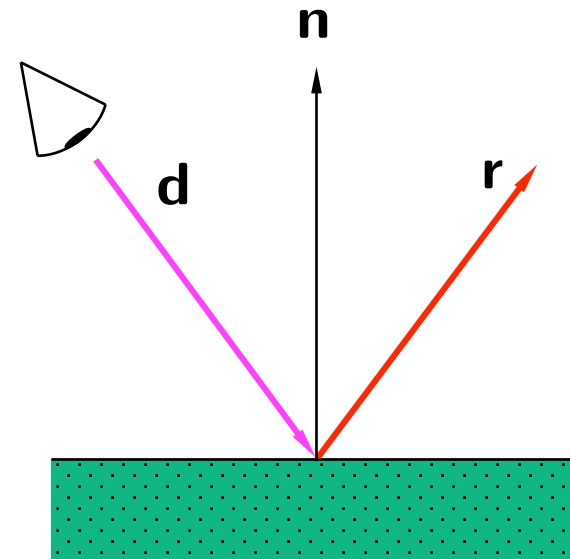






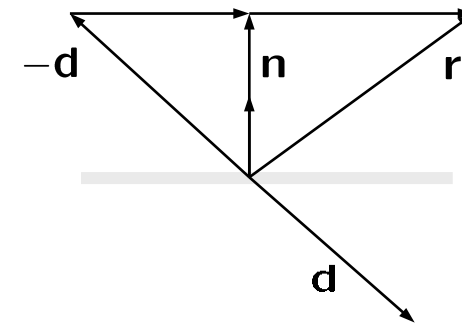
Sekundärstrahlen

- Annahme: Hit zwischen Primärstrahl und Szene gefunden
- Reflektierter Strahl:



$$((-d \cdot n) \cdot n - (-d)) \cdot 2 + (-d) = d - 2(d \cdot n) \cdot n$$

$$\|n\| = 1$$





Gebrochener Strahl

- Brechungsgesetz [Snell ~1600] :

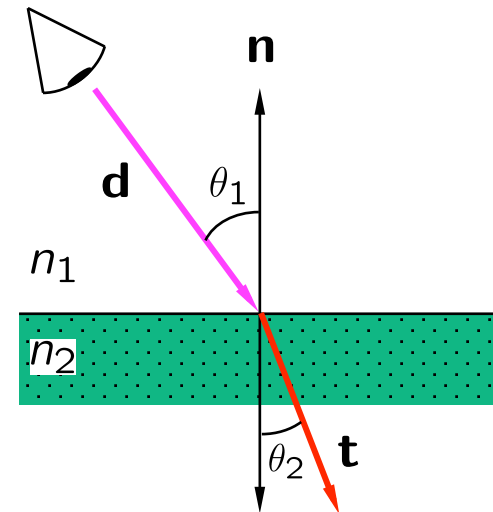
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Der transmittierte Strahl:

$$\mathbf{t} = \frac{n_1}{n_2} (\mathbf{d} + \mathbf{n} \cos \theta_1) - \mathbf{n} \cos \theta_2$$

$$\cos \theta_1 = -\mathbf{dn}$$

$$\cos^2 \theta_2 = 1 - \frac{n_1^2}{n_2^2} (1 - (\mathbf{dn})^2)$$



- Brechungsindizes:

Luft	Wasser	Glas	Diamant
1.0	1.33	1.5 - 1.7	2.4



$$|\mathbf{n}| = |\mathbf{b}| = 1$$

$$\mathbf{t} = \cos \theta_2 \cdot (-\mathbf{n}) + \sin \theta_2 \cdot \mathbf{b}$$

$$\mathbf{d} = \cos \theta_1 \cdot (-\mathbf{n}) + \sin \theta_1 \cdot \mathbf{b}$$

$$\mathbf{b} = \frac{\mathbf{d} + \mathbf{n} \cdot \cos \theta_1}{\sin \theta_1}$$

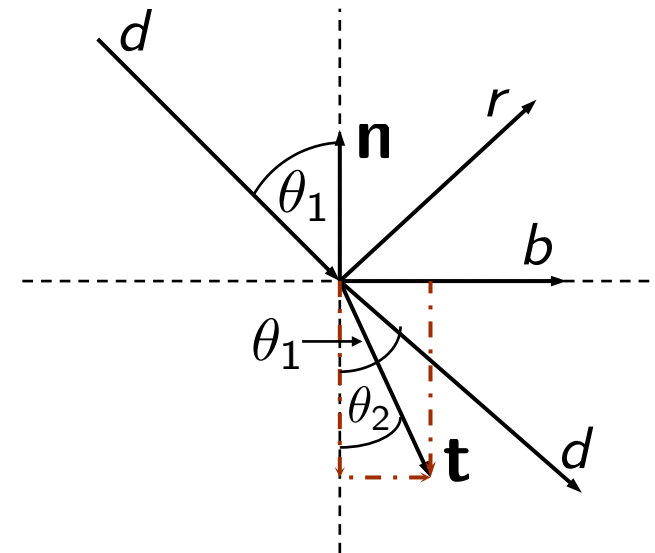
$$\mathbf{t} = -\mathbf{n} \cdot \cos \theta_2 + \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} (\mathbf{d} + \mathbf{n} \cdot \cos \theta_1)$$

$\cos \theta_2$ ausrechnen:

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

$$\sin^2 + \cos^2 = 1$$

$$\cos^2 \theta_2 = 1 - \left(\frac{u_1}{u_2} \sin \theta_1 \right)^2$$



$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\cos \theta_1 = \mathbf{n} \cdot (-\mathbf{d})$$



- Totalreflexion:

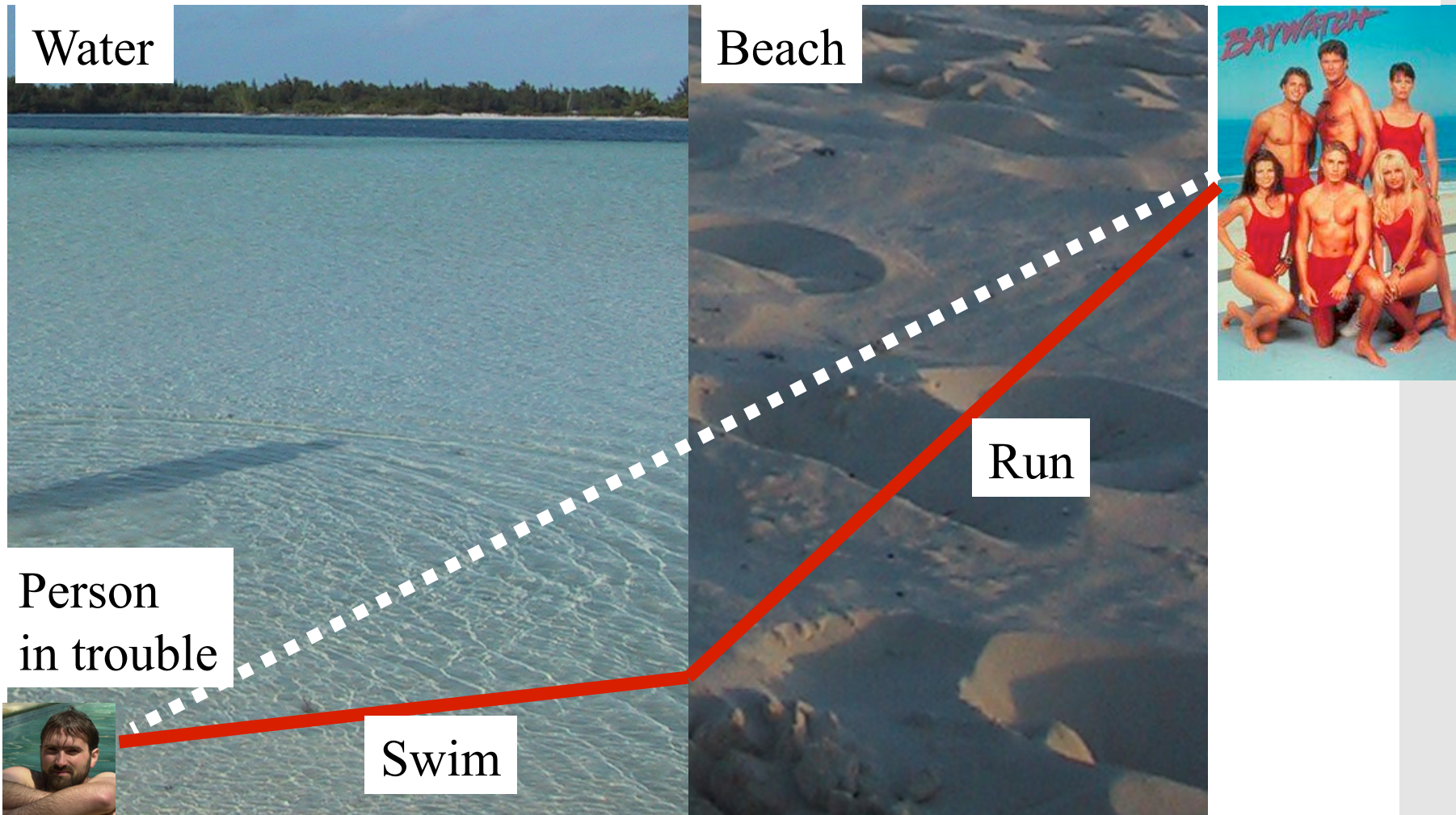
wenn Radikand $< 0 \Leftrightarrow \sin \theta_2 \leq \frac{n_1}{n_2}$





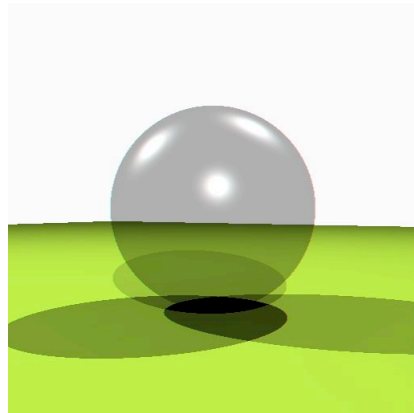
Refraction and the Lifeguard Problem

- Running is faster than swimming

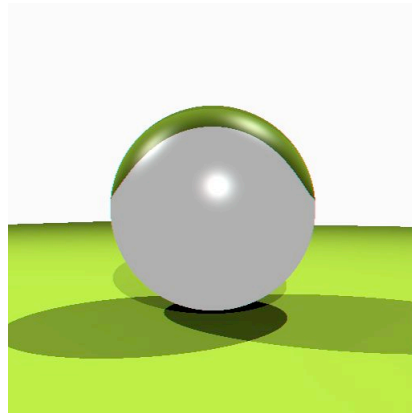




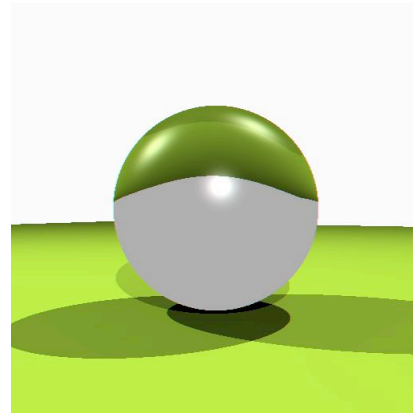
Wirkung des Brechungsindex



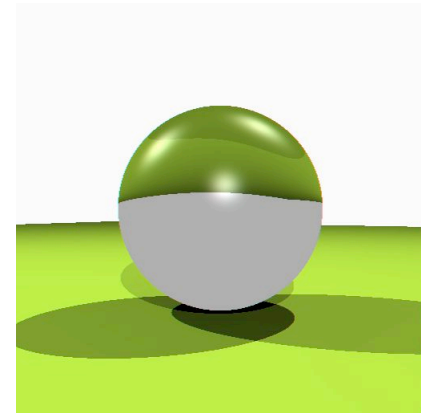
n=1.0



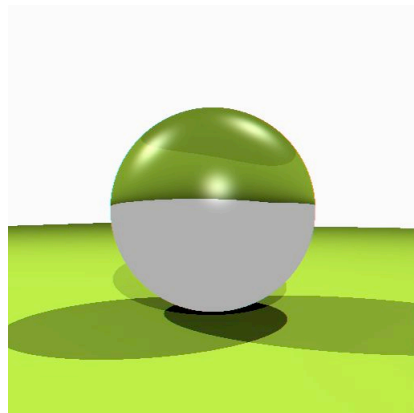
n=1.1



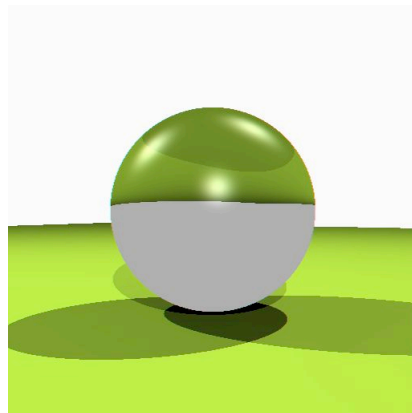
n=1.2



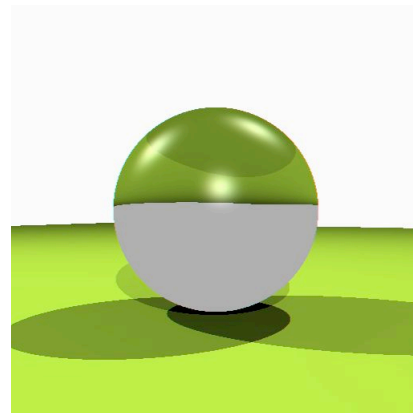
n=1.3



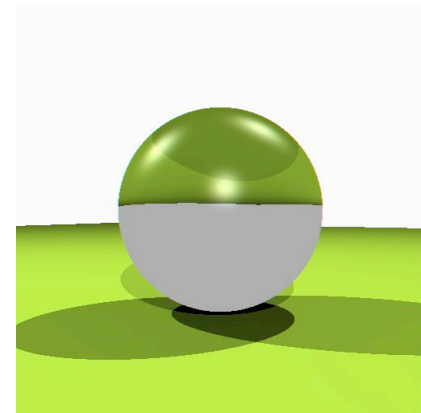
n=1.4



n=1.5



n=1.6



n=1.7