# 5. Visible Surface Determination

auch: *Visibilitätsrechnung*

"Hidden Surface Removal" (HSR)
"Visible Surface Determination" (VSD)

*Problem der Verdeckung* (Unsichtbarkeit von Teilen einer Szene) entsteht dadurch, dass Projektionen nicht injektiv sind

$\Rightarrow$ mehrere Objektpunkte haben denselben Bildpunkt ("Projektionsäquivalenz"), aber nur einer davon ist "sichtbar" (= bestimmt Farbe u. Intensität des betr. Pixels).

Im Folgenden:

- Problemdefinition
- Konservative Sichtbarkeitstests für die Vorverarbeitung
- Algorithmen (hier nur drei, es gibt sehr viel mehr!)

*Problemdefinition:*

Gegeben sei eine Menge von 3D-Objekten und die Spezifikation einer Ansicht dieser Szene (Kamera-modell).
*Problem:* Bestimme, welche Linien oder Flächen der gegebenen Objekte unter der gegebenen Ansicht sichtbar sind.

Drei Klassen von Algorithmen:

1. Bildraumalgorithmen (→ *image precision*)
- Sichtbarkeit wird für diskrete Bildpunkte bestimmt
- Beispiel: *z*-Buffer

2. Objektraumalgorithmen (→ *object precision*)
- exakte Sichtbarkeitsbestimmung im Modellraum
- Beispiele: Clipping von Polygonen an Polygonen, 3D-Tiefensortierung, BSP-Bäume

3. Hybride Algorithmen
- arbeiten sowohl im Objekt- als auch im Bildraum

Zusätzlich: "konservative Sichtbarkeitstests" (Vorverarbeitung): Aussondern von mehr oder weniger "trivialen" Fällen. Beispiel: Back-face culling.

*Back-face culling*

Entfernen von nicht sichtbaren Rückseiten, d.h. von allen Polygonen, die vom Betrachter weg zeigen (diese Rückseiten machen etwa die Hälfte aller Flächen aus!)

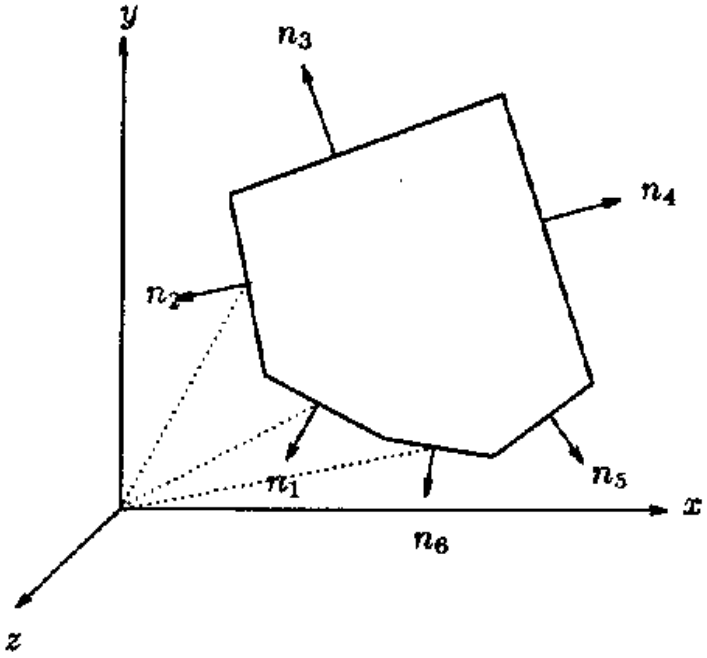
setzt voraus:
- Objekte sind als Polygonnetze modelliert, der Betrachterstandpunkt liegt außerhalb
- Polygone sind orientiert: Festlegung von "innen" und "außen" hinsichtlich des modellierten Körpers.

Testgrundlage: nach außen zeigende Normalen der Polygone.

Zwei Möglichkeiten der Betrachtung:

- Line-of-Sight-Interpretation
- Halbraum-Interpretation

*Line of Sight* (LOS):
Strahl vom Betrachterstandpunkt (COP) zu einem beliebigen Punkt des Polygons
(bei Parallelprojektion ist die LOS identisch mit der DOP)




Zeigt die Normale zur selben Seite wie die LOS (Winkel < 90°), dann handelt es sich bei dem Polygon um eine zu entfernende Rückseite.

Rechnerisch: Skalarprodukt prüfen
LOS · Normale > 0 $\Rightarrow$ unsichtbar
LOS · Normale $\leq$ 0 $\Rightarrow$ möglicherweise sichtbar

Halbraum-Interpretation:
Normalenform der Ebenengleichung für die Polygon-Ebene:

$(\text{Normale} \cdot x) + D = 0$

Die Ebene teilt den übrigen Raum in zwei Halbräume:

$(\text{Normale} \cdot x) + D > 0$: $x$ liegt im positiven Halbraum

$(\text{Normale} \cdot x) + D < 0$: $x$ liegt im negativen Halbraum

Polygon zeigt vom Betrachter weg, wenn sich der Betrachterstandpunkt (COP) im negativen Halbraum befindet:

unsichtbar, wenn $(\text{Normale} \cdot \text{COP}) + D < 0$

beide Interpretationen sind letztlich äquivalent (LOS lässt sich aus COP und Polygonpunkt berechnen).

*Algorithmen zur Visible Surface Determination*

## *1. Z-Buffer-Algorithmus*

häufig in der Hardware implementiert
*z*-Buffer (*z*-Puffer, Tiefenpuffer): pixelbezogener Speicher für die *z*-Werte

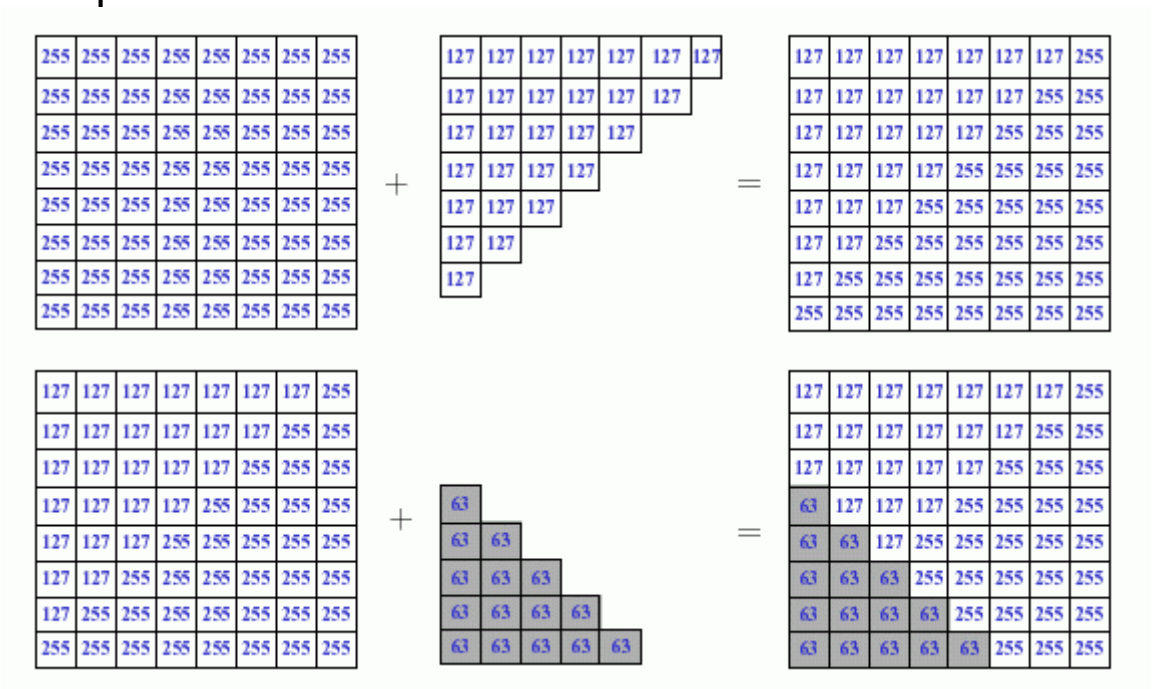
- schon 1974 vorgeschlagen, aber damals nicht realisiert
- heute dominierender Algorithmus für Rastergeräte

Vorgehensweise:

- zusätzlich zum Framebuffer (Bild) noch eine zweite Bitmap, die die $z$-Werte speichert
- $z$-Buffer initialisiert mit Hintergrundwert (Tiefe der am weitesten entfernten Ebene des Sichtkörpers, $z = 1$
- $z$-Wert jedes Pixels wird mit dem Wert im $z$-Buffer verglichen
  - $z$ aus Ebenengleichung des aktuellen Polygons berechnen
  - besser: $z$ an den Eckpunkten berechnen und interpolieren
- ist aktueller $z$-Wert kleiner als der an dieser Position gespeicherte: aktuellen Wert in den $z$-Buffer speichern und Pixel zeichnen
- sonst keine Änderungen

die Polygone können in jeder beliebigen Reihenfolge gezeichnet werden

## Beispiel:



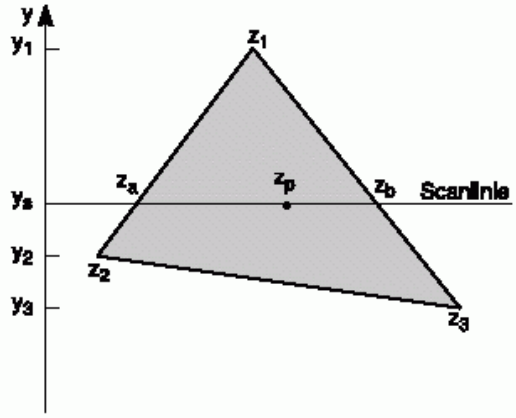

(hier *z*-Werte nicht zwischen 0 und 1, sondern zwischen 0 und 255; implementationsabhängig)

## Algorithmus:

initialisiere $z$-Buffer
**foreach** Polygon **do**
  **foreach** Pixel in der Projektion des Polygons **do**
    $p_z = z$-Wert des Polygons an Position $(x, y)$
    **if** $p_z < z$-Buffer$(x, y)$ **then**
      WritePixel$(x, y, c)$
      WriteZ$(x, y, p_z)$
    **fi**
  **od**
**od**

Effiziente Implementierung: *z*-Werte im Inneren der Polygone durch Interpolation bestimmen

- ähnliche Vorgehensweise wie beim Scanlinien-Algorithmus zum Polygonfüllen
- Interpolation zunächst entlang der Polygon-Kanten, dann entlang der Scanlinien im Inneren




$$z_a = z_1 - (z_1 - z_2)\frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_2}$$

$$z_b = z_1 - (z_1 - z_3)\frac{y_1 - y_s}{y_1 - y_3}$$

$$z_p = z_b - (z_b - z_a)\frac{x_b - x_p}{x_b - x_a}$$

- erweiterbar zu inkrementellem Verfahren zur Bestimmung der *z*-Werte

- Vorteile des $z$-Buffer-Algorithmus
  - einfach auch in Hardware zu implementieren → **schnell**
  - Polygone können in beliebiger Reihenfolge bearbeitet werden
  - jedes Polygon einzeln behandelt
  - kann auch für nicht-polygonale Flächen genutzt werden

- Nachteile des $z$-Buffer-Algorithmus
  - Genauigkeitsproblem, da $z$-Werte durch perspektivische Verkürzung „komprimiert“ werden
  - kein Antialiasing
  - *alle* Polygone müssen behandelt werden
  - Transparenz ist nicht realisierbar

Verbesserung:
*Hierarchischer z-Buffer-Algorithmus*

Ersetze *z*-Buffer durch "*z-Pyramide*"
tiefste Ebene: z-Buffer in maximaler Auflösung
höhere Ebenen: Jedes Pixel repräsentiert die maximale Tiefe der vier Pixel "unter" ihm

Grundidee: hierarchische Rasterung des Polygons; früher Abbruch, wenn Polygon verdeckt ist.

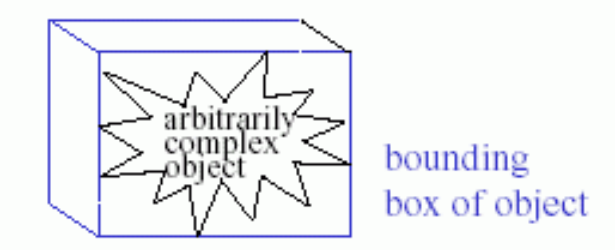
- Polygon zuerst gegen die höchste Ebene testen
- Wenn das Polygon weiter entfernt ist als die Tiefe, die im entspr. (Makro-) Pixel gespeichert ist: verdeckt
- wenn näher: Test gegen die nächstniedrige Ebene, usw.
- Wenn Polygon auf der tiefsten Ebene sichtbar ist, dann zeichnen und *z*-Pyramide aktualisieren.

Nutzung von Kohärenz in zweierlei Hinsicht möglich:

- Ein in einem Pixel verdecktes Polygon ist wahrscheinlich auch in benachbarten Pixeln verdeckt (Bildraum-Kohärenz, wird inhärent von der Pyramide genutzt)
- Polygone nahe einem verdeckten Polygon sind möglicherweise auch verdeckt (Objektraum-Kohärenz).

Verbesserung des Algorithmus durch Ausnutzung der Objektraum-Kohärenz:

- Unterteile die Szene durch einen *Octree*
- Geometrische Objekte in einem Knoten des Octrees sind in einem Würfel enthalten (*bounding volume*).
- Bevor der Inhalt des Würfels gerendert wird: Teste die Seiten des Würfels gegen die *z*-Pyramide!




- Wenn die Seitenflächen des Würfels verdeckt sind, dann ist auch die Geometrie im Inneren des Würfels verdeckt – gesamten Inhalt ignorieren.

(Dieser Ansatz ist ein Beispiel für eine "bounding volume hierarchy - Technik", wovon es noch andere Varianten gibt.)

## *2. BSP-Bäume (Binary Space Partition)*

Objektraum-Verfahren für die Sichtbarkeitsrechnung, entwickelt von Fuchs, Kedem & Naylor um 1980

- sehr effizient für statische Szenen und möglicherweise wechselnden Betrachterstandpunkt
- zeit- und speicherintensives Preprocessing, aber lineare Zeit für Display
- Preprocessing nur einmal nötig, kann für alle Betrachterstandpunkte genutzt werden (wichtig für walk-through)

Grundlegende Idee: Clustering

- betrachten eine Szene als Ansammlung von *clusters* (Mengen von Polygonen)
- Wenn eine Ebene gefunden werden kann, die eine Cluster-Teilmenge von der anderen trennt, dann:
  - Cluster auf der gleichen Seite dieser Ebene wie der Betrachterstandpunkt können nicht von Clustern auf der anderen Seite verdeckt werden (aber umgekehrt)
- Jede Teilmenge kann weiter unterteilt werden (wenn eine Ebene gefunden werden kann).
- $\rightarrow$ Binärbaum, der die Unterteilung repräsentiert
  - innere Knoten: Ebenen
  - Blätter: Regionen im Raum

Konstruktion des BSP-Baumes (Prinzip):

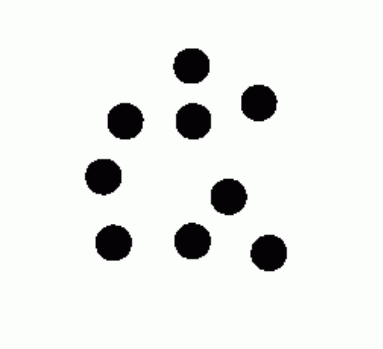
- wähle ein Polygon, Unterteilung erfolgt entlang der Ebene dieses Polygons
- alle Polygone danach unterteilen, ob sie im positiven oder negativen Halbraum dieser Ebene liegen
- wird ein Polygon von der Ebene geschnitten: Zerlegen in Teilpolygone
- Rekursion in den negativen Halbraum
- Rekursion in den positiven Halbraum

Konstruktion des BSP-Baumes (Algorithmus):

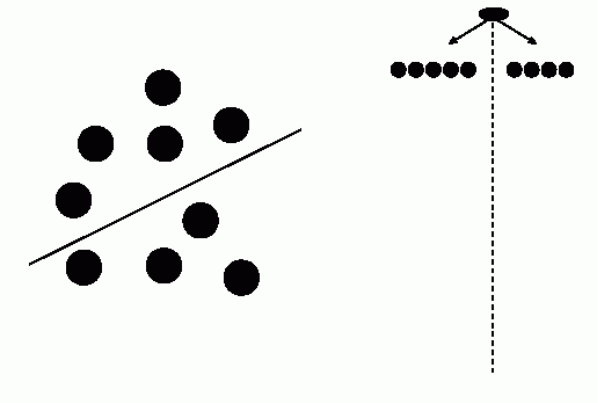
```
if Polygonliste leer
  then BSPTree := NULL
  else begin
         SelectPolygon(Polygonliste, Wurzel)
         backlist := NULL
         frontlist := NULL
         foreach Polygon p in der Polygonliste do
           if p liegt vor Wurzel
             then AddToBSPList(p, frontlist)
             else if p liegt hinter Wurzel
                    then AddToBSPList(p, backlist)
                    else
                      SplitPolygon(p, Wurzel, pFront, pBack)
                      AddToBSPList(pFront, frontlist)
                      AddToBSPList(pBack, backlist)
                  fi
           fi
           Combine(frontlist, Wurzel, backlist, BSPTree)
         od
       end
fi
```

Beispiel:

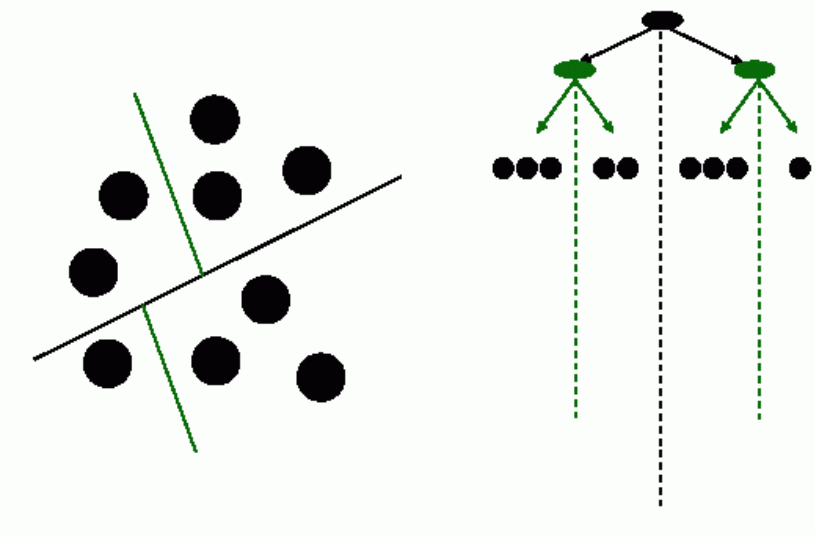
Polygone der Szene



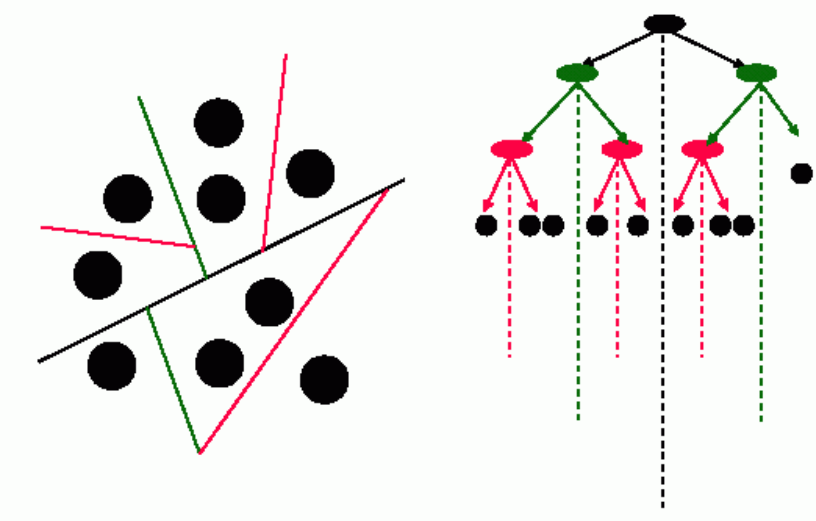
erste Unterteilung



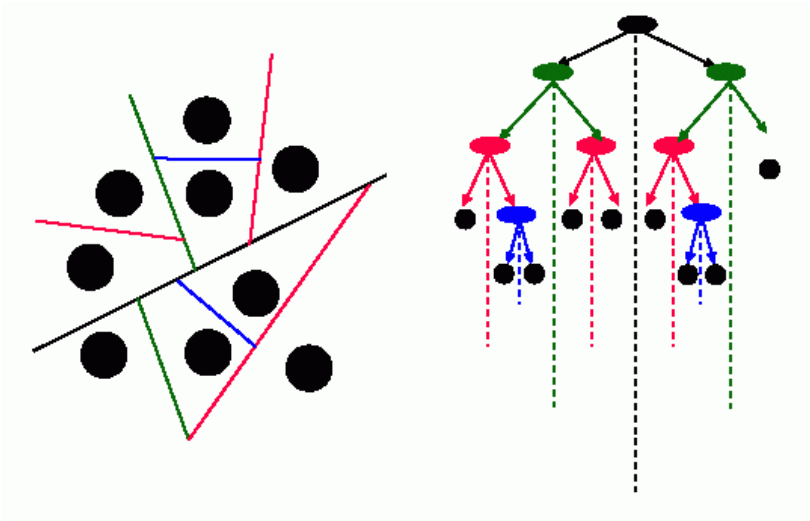
zweite Unterteilung:



dritte Unterteilung:



vierte (letzte) Unterteilung:



Der BSP-Baum ist unabhängig vom Betrachter-standpunkt.

Display des BSP-Baumes:

- ebenfalls rekursiv
- es muss jeweils die räumliche Beziehung des Betrachterstandpunktes zur Wurzel des Baumes bekannt sein (Prüfung, ob vor oder hinter – vgl. back face culling)
- Erzeugen der sichtbaren Flächen: Traversierung des Baumes (rekursiv) in "in-order"
- zeichne die sichtbaren Polygone von hinten nach vorne

Algorithmus "**`DisplayBSPTree`**":

```
if BSPTree nicht leer
  then if Betrachterstandpunkt liegt vor dem Wurzel-Polygon
         then
              DisplayBSPTree(backBranch)
              DisplayBSPTree(rootPolygon)
              DisplayBSPTree(frontBranch)
         else
              DisplayBSPTree(frontBranch)
              DisplayBSPTree(rootPolygon)
              DisplayBSPTree(backBranch)
       fi
fi
```

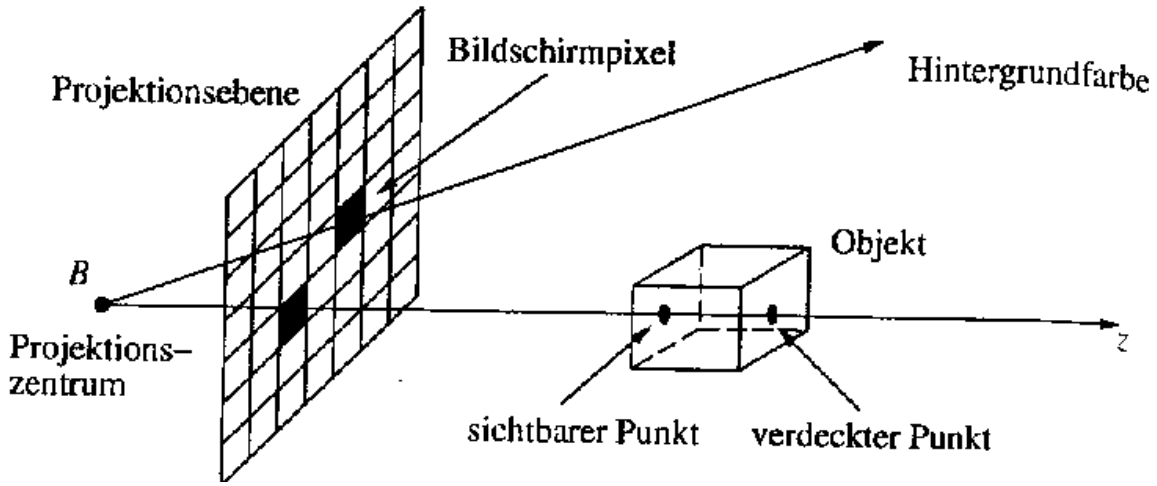
## Zusammenfassung BSP-Bäume

- Vorteile:
  - einfaches, elegantes Schema
  - benutzt nur den Framebuffer (kein zusätzlicher $z$-Buffer)
- Nachteile:
  - aufwendige Preprocessing-Phase schränkt Anwendung auf statische Szenen ein
  - worst-case-Komplexität zum Aufbau des Baumes: $O(n^3)$
  - Zerteilen der Polygone erhöht deren Anzahl (auch hier $O(n^3)$ im schlechtesten Fall)

*3. Das Ray-Casting-Verfahren*

- Hybrid Objektraum-Bildraum (aber mehr im Objekt-raum)
- Prinzip der Strahlverfolgung (vgl. Raytracing in der Beleuchtungsrechnung, siehe später)
- vom Betrachterstandpunkt wird je ein Strahl durch jedes Pixel in die 3D-Szene verfolgt.
- Berechnung der Schnittpunkte der Strahlen mit den Objektoberflächen

Fallunterscheidung dabei:
1. es gibt keinen Schnittpunkt: verwende die Hinter-grundfarbe.
2. es existieren Schnittpunkte: bestimme den zum Betrachter nächstgelegenen, dieser ist sichtbar, die anderen verdeckt.




Nachteil:
hoher Rechenaufwand durch häufige Schnittpunkt-berechnungen (ca. 95 % der Gesamtrechenzeit bei typischen Szenen)

Vorteile:

- leicht parallelisierbar (bei *p* Prozessoren teile Bildschirm in *p* disjunkte Rechtecke – allerdings muss bei diesem Ansatz die 3D-Szene auf jedem Prozessor vollständig zur Verfügung stehen)
- Effizienzverbesserung durch *boundary volume*-Techniken möglich (hierarchische Konzepte, Clustering)
- Kombination mit klassischem Raytracing (globale Beleuchtungsrechnung; siehe später) möglich