Zusammenfassung zu Shading-Modellen

Die Schattierung (*Shading*) umfasst sowohl die Auswahl eines geeigneten *Beleuchtungsmodells* als auch die Entscheidung, in welchen Bildpunkten das jeweilige Modell explizit zur Anwendung gelangen soll und in welchen Punkten *Interpolationsmethoden* (billiger) eingesetzt werden.
Letztere sind erforderlich, da die explizite Berechnung des aus dem Beleuchtungsmodell resultierenden Intensitäts- bzw. Farbwertes für jedes Pixel insbes. bei interaktiven Echtzeitanwendungen zu aufwändig wäre.

- Varianten des Phong-Shading sind die "Arbeitspferde" in der hochwertigen Computergrafik

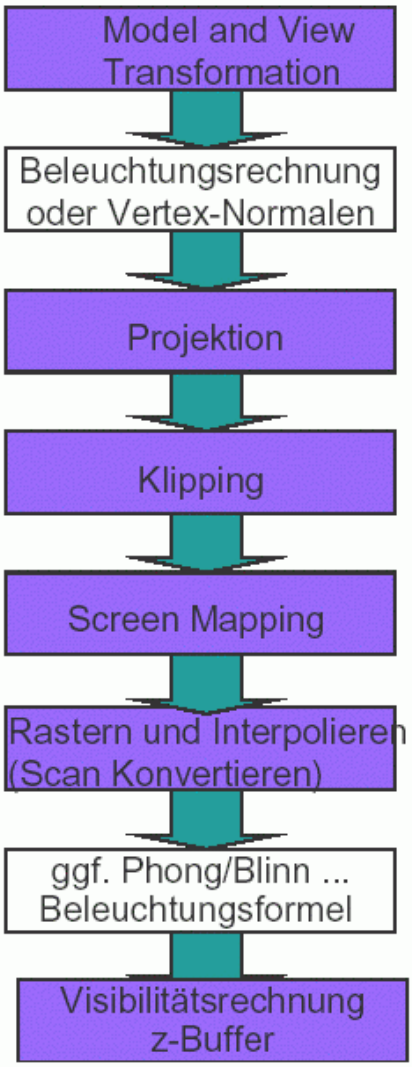
- heute häufig in Hardware realisiert!

nicht verwechseln:

- *Shading*: verbunden mit geometrischer Glättung (Interpolation)
  --- Gouraud: Farbwerte, Phong: Normalen

- Reflektion, Beleuchtungsgleichung: Berechnung der Farbintensitäten
  --- Gouraud: i.allg. nur diffuser + ambienter Anteil;
  Phong: spiegelnder + diffuser + ambienter Anteil.

Integration in die Rendering-Pipeline:



Historisch und praktisch werden zusammen verwendet:

- Gouraud-Shading + Lambertscher Reflektor (rein diffuse Abstrahlung) (auch Phong-Reflektor möglich, aber nicht im Bewegtbild)
- Phong-Shading + Phong-, Blinn-, Cook/Torrance-, ... -Reflektor

Transparenz

Manche Objekte sind (teilweise) durchsichtig
⇒ spezielle Probleme (Lichtbrechung, -abschwächung...)

3 einfache Ansätze ohne Berücksichtigung der Brechung:

1. *Screen-Door-Transparenz*

Das transparente Polygon wird mit einem Schachbrettmuster überzogen; ein Pixel wird voll transparent, das nächste wieder undurchsichtig (opak) gerendert.

Vorteile:
- einfach
- keine Tiefensortierung notwendig

Nachteile:
- Transparenzgrad 50 % (schwierig variierbar)
- Artefakte bei mehreren transparenten Objekten hinter-einander

2. Interpolierte Transparenz (*Alpha-Blending*)

Beim Rasterisieren, wird jedem Pixel nicht nur ein Farb- und z-Wert, sondern auch ein α-Wert zugeordnet: $0 \leq \alpha \leq 1$.
$\alpha = 1$ entspricht vollständig opakem Objekt
$\alpha = 0$ vollständig transparentes Objekt
Jedes Pixel, das von einem transparenten Objekt bedeckt wird, wird als Farbe

$$\mathbf{c}_{new} = \alpha \cdot \mathbf{c}_{ren} + (1-\alpha) \cdot \mathbf{c}_{old}$$

zugeordnet, wobei c_{ren} die Farbe des transparenten Objekts und c_{old} die Pixelfarbe vor dem Blending ist.

Das transparente Objekt wird *über* die schon gerenderten Objekte geschrieben.
Alpha-Blending erfordert Tiefensortierung der transparenten Objekte (back-to-front-Sortierung).

3. *Gefilterte Transparenz*

Das transparente Polygon wird als Filter aufgefasst, der Licht gewisser Wellenlängen bevorzugt durchlässt:

$$I_{P,\lambda} = I_1 + k_t(\lambda) I_2.$$

Der Transmissionskoeffizient $k_t(\lambda)$ hängt von der Wellenlänge ab. Damit lässt sich als Material von Objekt 1 etwa rotes Glas modellieren. Im Rotbereich ist $k_t(\lambda)$ dann sehr klein, im komplementären Cyanbereich dagegen groß.

Reduzierung der Lichtintensität beim Durchgang durch das transparente Objekt:
Transparenzkoeffizient (multiplikativ)

$$T = te^{-ad}$$

(wichtig für Raytracing).
Darin ist *d* die Länge des Strahls innerhalb des transparenten Objekts. *t* = "Durchlässigkeitsfaktor" = Anteil der Lichtmenge, der nicht reflektiert wird; *a* = "Absorptionsfaktor", gibt an, wie schnell das Licht von dem transparenten Material geschwächt wird.

Lichtintensität vor und nach dem Durchgang durch das Objekt:

$$I_{aus} = T \cdot I_{ein}.$$

Zusätzlich kann die Licht*brechung* nach dem Gesetz von Snellius berücksichtigt werden (s.o., Abschnitt über physikal. Grundlagen).

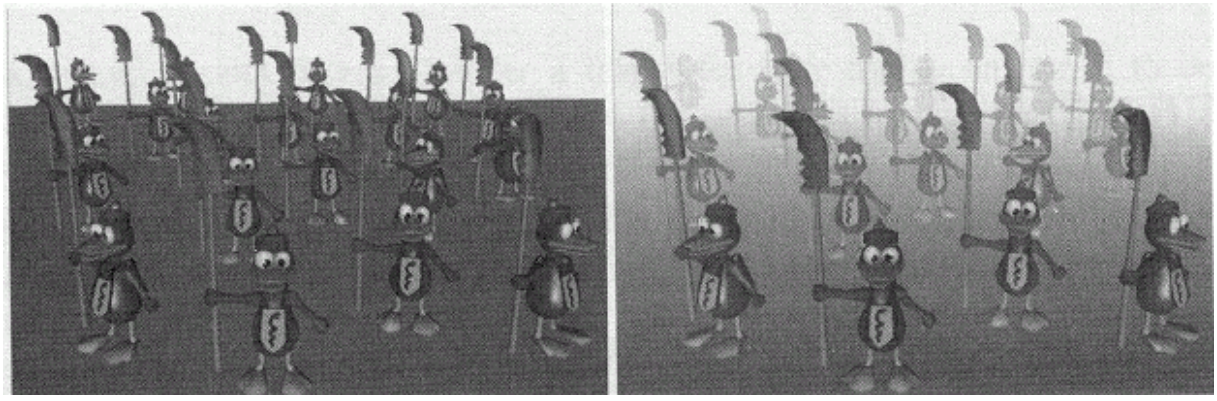
Nebel

Nebel (oder Dunst) kann relativ einfach simuliert werden, auch in Echtzeitsystemen

Er kann für viele Zwecke sinnvoll eingesetzt werden:

- Realismus von Landschaftsszenen (*outdoor scenes*) erhöhen
- Verbesserung der Tiefenschätzung / des 3D-Effekts
- Nebel verdeckt Artefakte in der Nähe der hinteren Clipping-Ebene (*far clipping plane*)

Nebel wird inzwischen oft von der Grafik-Hardware unterstützt.



(aus Krömker 2001)

Ähnlich wie bei der Transparenz, werden Nebeleffekte auch beim Rasterisieren realisiert, indem die Farbe c_{ren} eines Pixel mit der Farbe c_{fog} des Nebels gemischt wird:

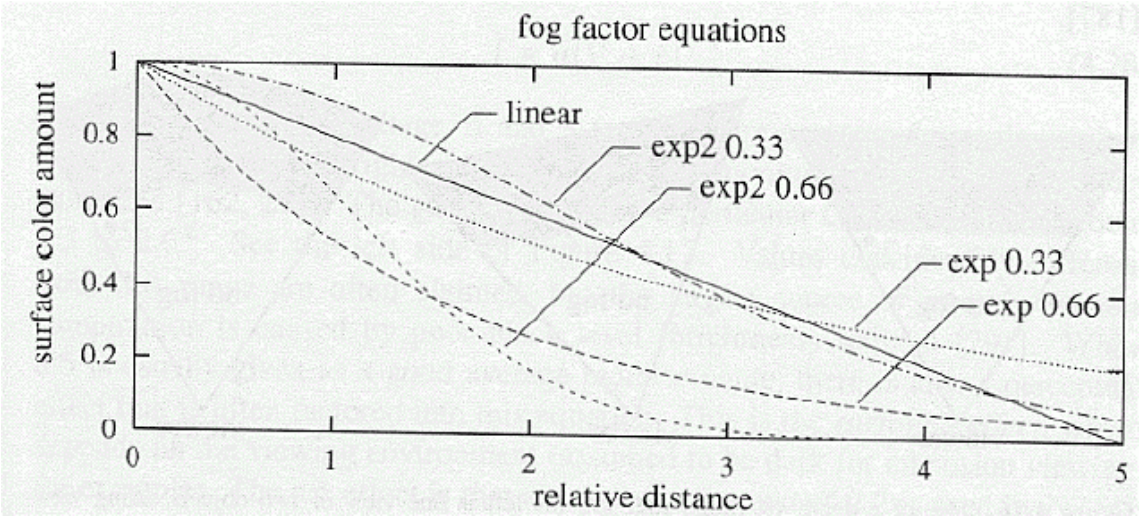
$$\mathbf{c}_{new} = f\mathbf{c}_{ren} + (1-f)\mathbf{c}_{fog}$$

wobei f eine Funktion des Abstands vom Beobachter mit Werten in $[0,1]$ ist.

Einfach gesagt: Tiefe im Bild ändert die Farbe von Pixeln.

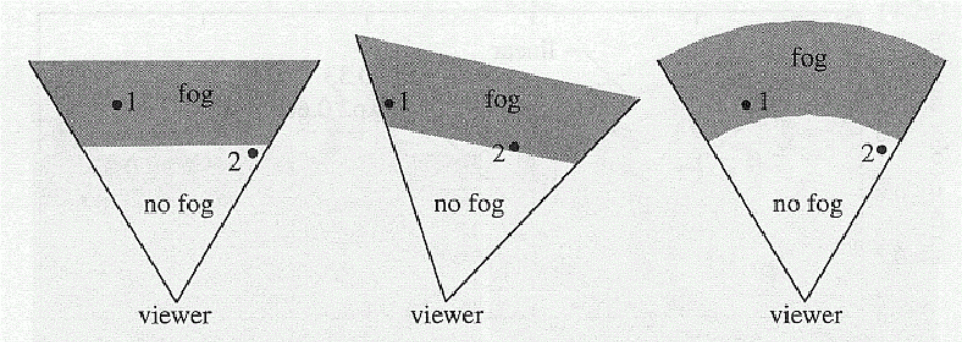
Arten von Nebel:

- **Linearer Nebel**: $f(z) = \frac{z_{max} - z}{z_{max} - z_{min}}$
- **Exponentieller Nebel**: $f(z) = e^{-d_f z}$
  wobei d_f die Dichte des Nebels bestimmt.
- **Quadrierter expotentieller Nebel**: $f(z) = e^{-(d_f z)^2}$



Implementierungsprobleme beim Nebel:

- die *z*-Werte verhalten sich nach der perspektivischen Transformation (in den kanonischen Sichtkörper) nicht mehr linear ⇒ Nebeleffekt müsste eigentlich im Objektraum berechnet werden
- Häufig wird der Abstand nicht für jedes Pixel ermittelt, sondern es wird einfach der Abstand entlang der zentralen Sichtgeraden verwendet. Das führt zu Artefakten. *Radialer Nebel* (Euclidean Distance Fog) vermeidet dieses Problem.



- Nebel auf Pixel-Ebene wird zur Zeit von Grafik-Hardware i.allg. nicht unterstützt, stattdessen auf Vertex-Ebene, d.h. nur an den Polygon-Eckpunkten berechnet und dann interpoliert.

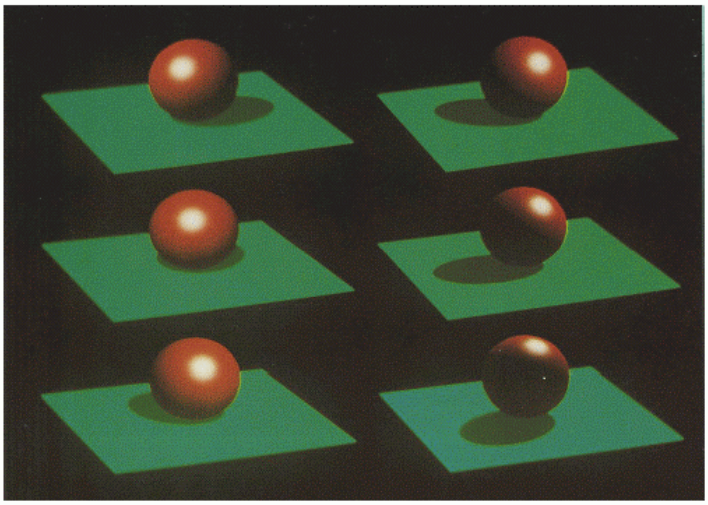
Schattenberechnung

hier geht es um Beschattung von Objekten durch andere – zu unterscheiden von *shading* (Schattierung)!

wichtiges Element des Fotorealismus!

Funktionen des Schattens

- „verankert" Objekte in der Szene (keine „fliegenden" Objekte)
- hebt die Richtung der Beleuchtung hervor



- Steigerung des Realismus des Bildes
- Schatten geben Hinweise zum Aufbau der Szene
- Verbesserung der Tiefenwahrnehmung
- verwendbar für Simulationen (Energie-, Wärmeverteilung)

Kern- und Halbschatten

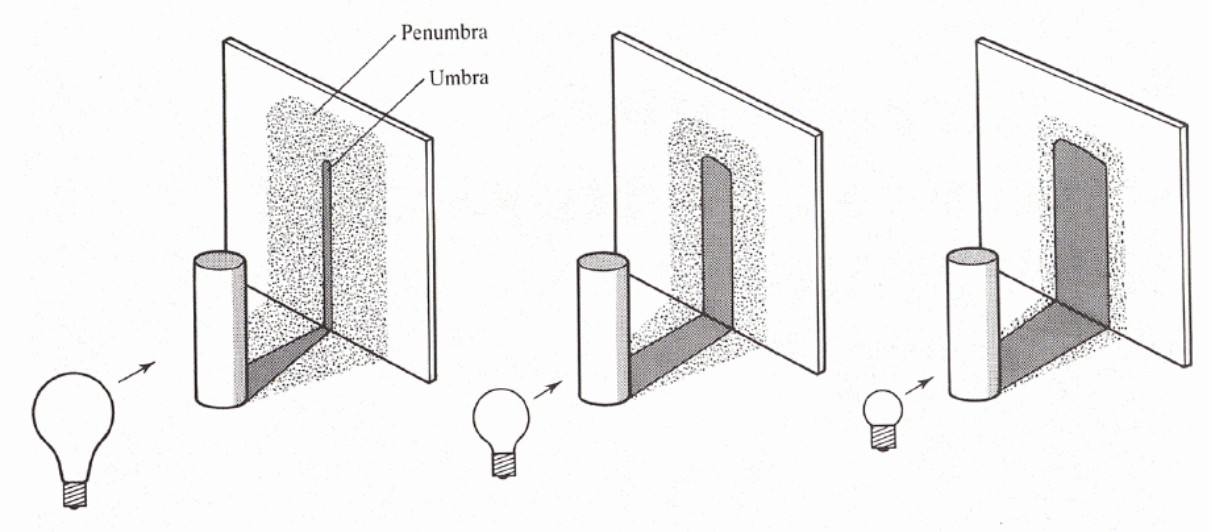
Schatten bestehen i.allg. aus 2 Teilen: Kernschatten (*umbra*) und Halbschatten (*penumbra*)

- Kernschatten: zentraler, scharf abgegrenzter dunkler Teil; hier kommt kein Licht der betrachteten Lichtquelle an, die Lichtquelle ist von hier aus nicht sichtbar.
- Halbschatten: helleres Gebiet, das den Kernschatten umgibt; von hier aus ist die Lichtquelle *partiell* sichtbar.

- Punktlichtquellen generieren nur Kernschatten
- flächige Lichtquellen erzeugen beides

Halbschatten aufwändig zu berechnen; da in der Computer-grafik i.d. Regel Punktlichtquellen eingesetzt werden, *häufig nur Kernschattenberechnung*.

Kern- und Halbschatten bei unterschiedlich großen Lichtquellen



Position der Lichtquelle

- Kompexität der Schattenberechnung abhängig von Position der Lichtquelle
- keine Schatten, wenn (einzige) Lichtquelle im Betrachterstandpunkt
- Lichtquelle im Unendlichen: ortographische Projektion zur Bestimmung des Schattens → einfachster Fall
- Lichtquelle an endlicher Position außerhalb des Gesichtsfeldes: perspektivische Projektion zur Bestimmung des Schattens → etwas komplizierter
- Lichtquelle innerhalb des Gesichtsfeldes: Unterteilung der Szene in Sektoren, Schattenberechnung separat für die Sektoren → komplizierter Fall
- Schatten ändern sich bei Animation

Schatten und Beleuchtung

- HSR/VSD-Algorithmen bestimmen, welche Flächen vom Betrachterstandpunkt aus sichtbar sind.
- Schattenberechnung bedeutet, die Flächen zu bestimmen, die von der Position der Lichtquelle aus nicht sichtbar sind.
- → VSD/HSR-Algorithmen können genutzt werden
- Sichtbarkeit aus Sicht der Lichtquelle: entweder sichtbar oder nicht
- wenn Oberflächenpunkt von Lichtquelle aus nicht sichtbar
  → Punkt liegt im Schatten
  → Beleuchtungsberechnung muß entsprechend angepaßt werden

- Faktor S_j bestimmt, ob Licht von Lichtquelle j ein Objekt an einem gegebenen Punkt erreicht:

$$S_j = \begin{cases} 0, & \text{wenn Lichtquelle } j \text{ blockiert ist} \\ 1, & \text{wenn Lichtquelle } j \text{ nicht blockiert ist} \end{cases}$$

- Hinzufügen zur Beleuchtungsberechnung:

$$I_\lambda = I_{a\lambda} k_a O_{d\lambda} + \sum_{j=1}^{m} S_j f_{\mathrm{att}_j} I_{i\lambda_j} (k_d O_{d\lambda} (N \cdot L_j) + k_{s\lambda} O_{s\lambda} (R_j \cdot V)^n)$$

- Gebiete im Schatten immer noch durch das ambiente Licht beleuchtet

Übersicht: Verfahren der Schattenberechnung

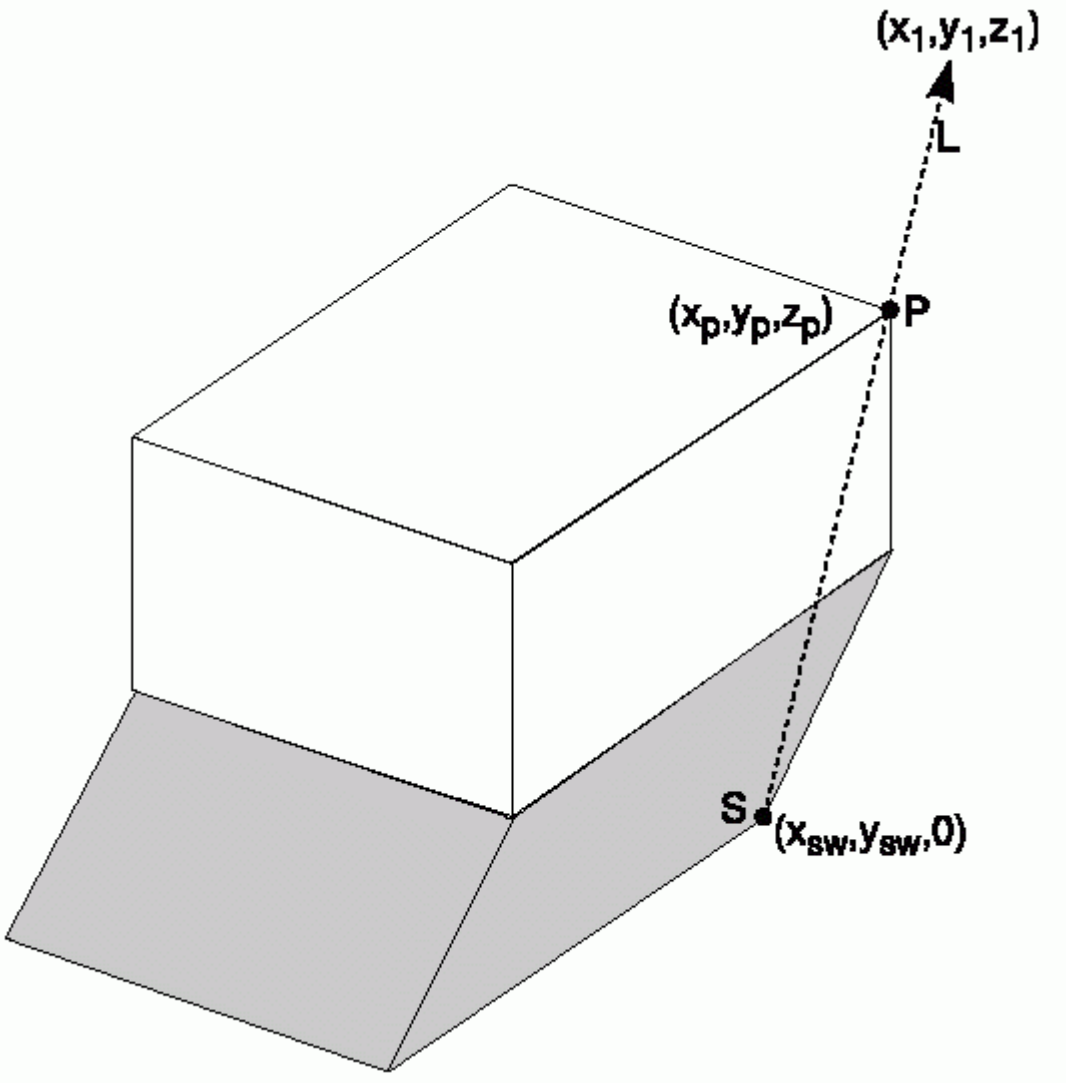
- Schatten auf einer einzelnen Grundebene (Spezialfall)
- Algorithmen zur Schattenberechnung im allgemeinen Fall:

  - Scanlinien-Schatten-Berechnung
  - Schattenvolumen-Ansatz
  - Hidden Surface Removal (HSR) aus Sicht der Lichtquelle
  - Schatten-*z*-Buffer
  - Raytracing
  - Radiosity

Raytracing und Radiosity ergeben (weitgehend) exakte Ergebnisse, werden aber erst später behandelt

Schatten auf Grundebene

- Szene mit *einem* Objekt, Schatten auf ebene Grundplatte
- $\rightarrow$ Zeichnen der Projektion des Objektes auf die Grundplatte
- Punktlichtquelle im Unendlichen $\rightarrow$ parallele Lichtstrahlen in Richtung $L = (x_1, y_1, z_1)$
- Punkt $P = (x_p, y_p, z_p)$ wirft Schatten im Punkt $S = (x_{sw}, y_{sw}, 0)$



- Es ist $S = P - \alpha L$ und mit $z_{sw} = 0$ ergibt sich:

$$0 = z_p - \alpha z_1 \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{z_p}{z_1}$$

- damit für x_{sw} und y_{sw}:

$$\begin{aligned} x_{sw} &= x_p - \frac{z_p}{z_1} x_1 \\ y_{sw} &= y_p - \frac{z_p}{z_1} y_1 \end{aligned}$$

- ähnlich einfach für vertikale Ebenen hinter dem Objekt oder seitlich vom Objekt

Scanlinien-Verfahren

erfordert Preprocessing:
Aufbau einer Datenstruktur, die ein Polygon mit allen Polygonen verbindet, die das gegebene Polygon abschatten können.

Ziel: Erkennen von "Schattenpaaren", d.h. Polygon zusammen mit einem anderen Polygon, das auf dieses einen Schatten wirft.
Vorgehensweise:

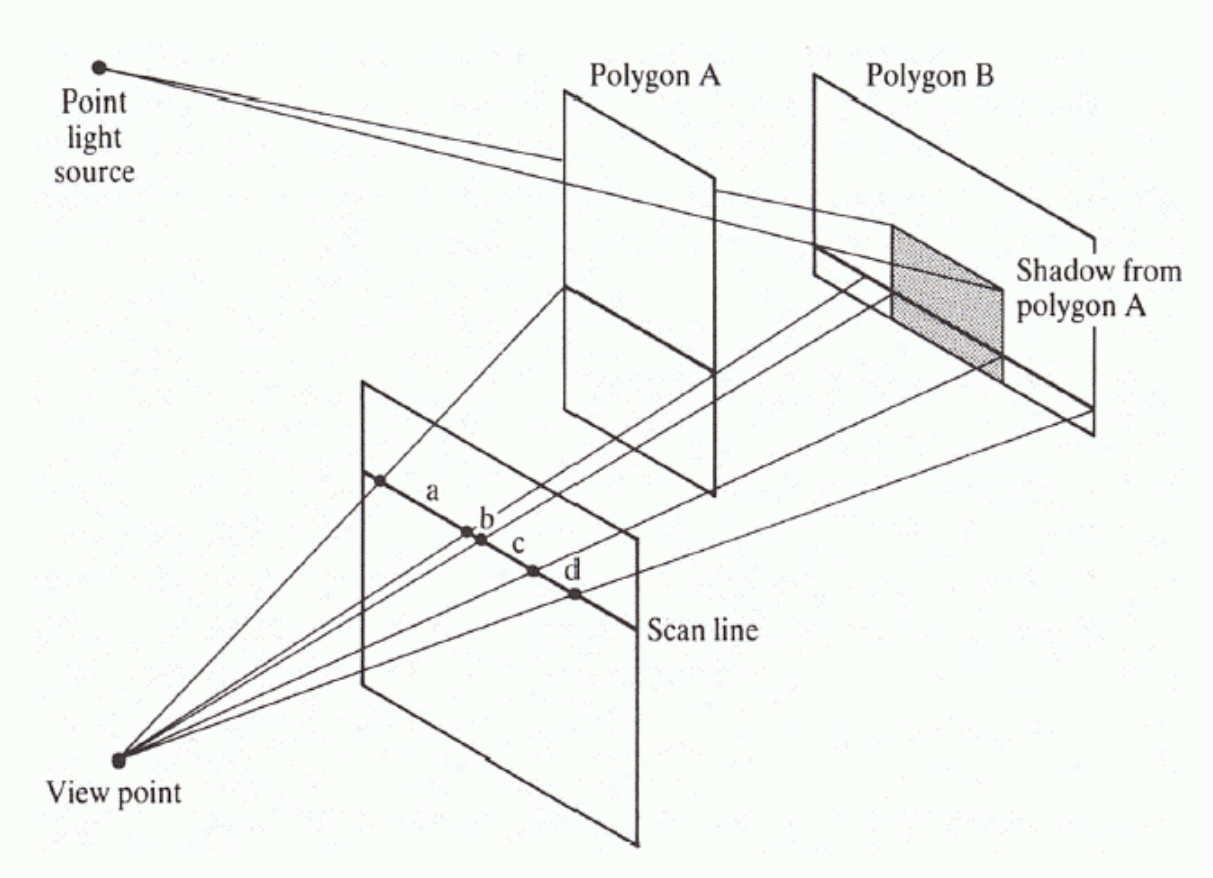
- Projektion aller Polygone auf eine Kugel mit der Lichtquelle im Mittelpunkt
- solche Paare nicht betrachten, die nicht miteinander interagieren können

bei *n* Polygonen sind *n*(*n*–1) Schattenpaare möglich.

Schattenpaare werden mit einer Variante des normalen Scanlinien-Shading ausgewertet:

- Wenn kein Schatten auf das Polygon fällt, zu dem die gerade betrachtete Scanlinie gehört, dann einfaches Shading
- Wenn Schatten zu beachten ist, dann 3 Fälle:

    1. Schattenpolygon verdeckt das aktuelle Scanlinien-Segment nicht: einfaches Shading
    2. Schattenpolygon verdeckt das aktuelle Scanlinien-Segment vollständig: Shading mit Modulation der Intensität
    3. Schattenpolygon verdeckt das aktuelle Segment partiell: Unterteilen des Segments und Anwendung des Verfahrens auf die Teilsegmente.



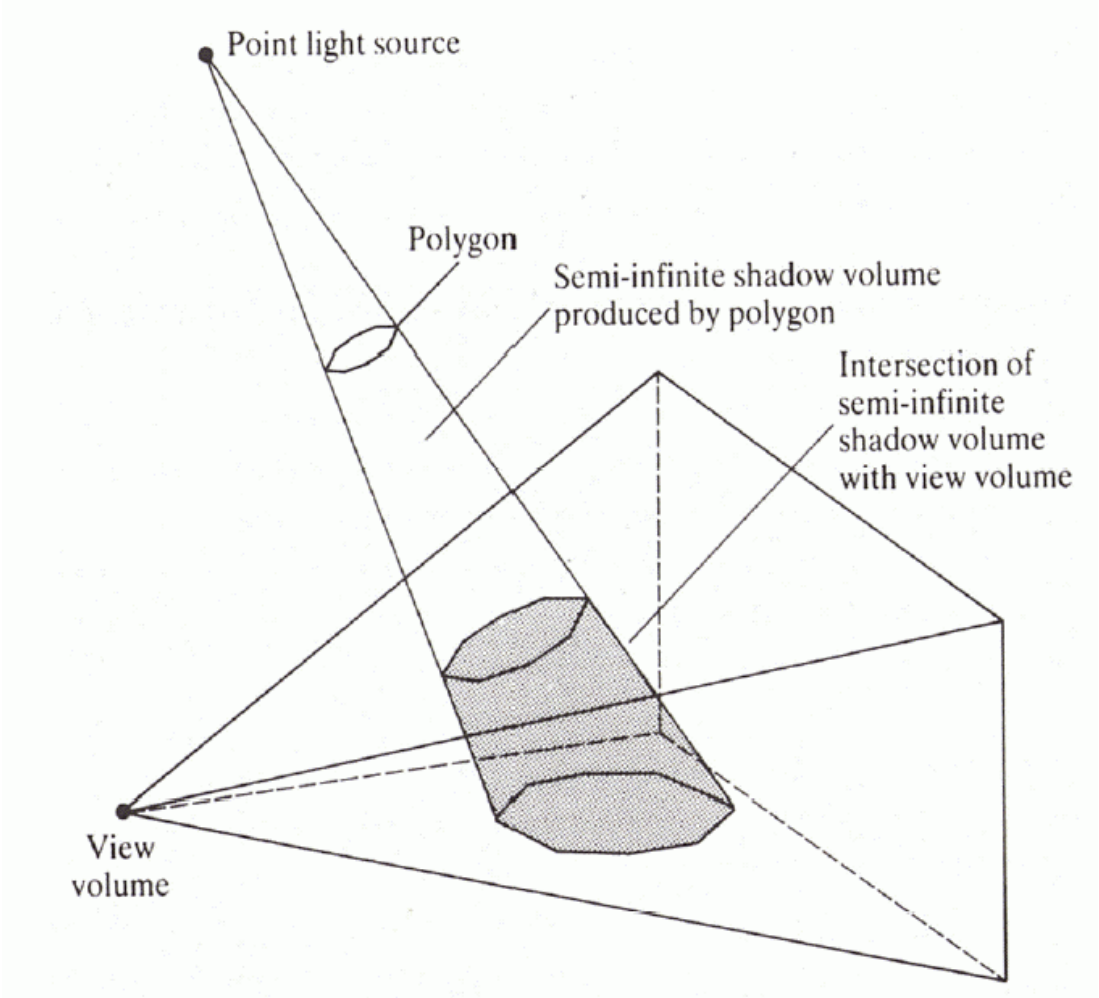
Schattenvolumen-Ansatz

entwickelt von Crow (1977) für polygonal begrenzte Objekte

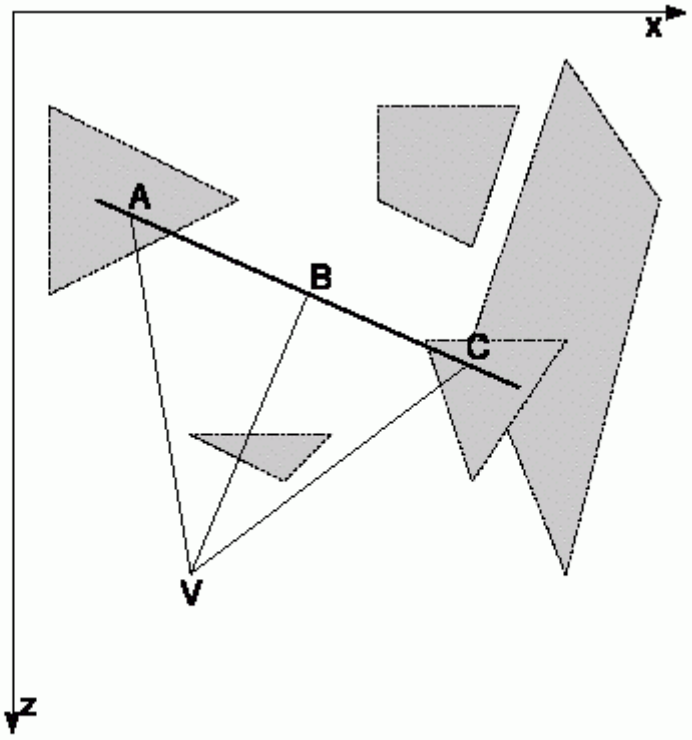
Schattenvolumen: ins Unendliche reichendes Raumsegment, das durch Linien begrenzt ist, die von der Lichtquelle ausgehen und durch die Eckpunkte der Polygone gehen

Schattenpolygone: alle Flächen, die ein Schattenvolumen begrenzen

- Schattenpolygone werden mit nach außen weisenden Normalenvektoren versehen
- Die Schattenvolumina werden üblicherweise am Sichtkörper geclippt
- sie werden nur für solche Polygone generiert, die zur Lichtquelle zeigen

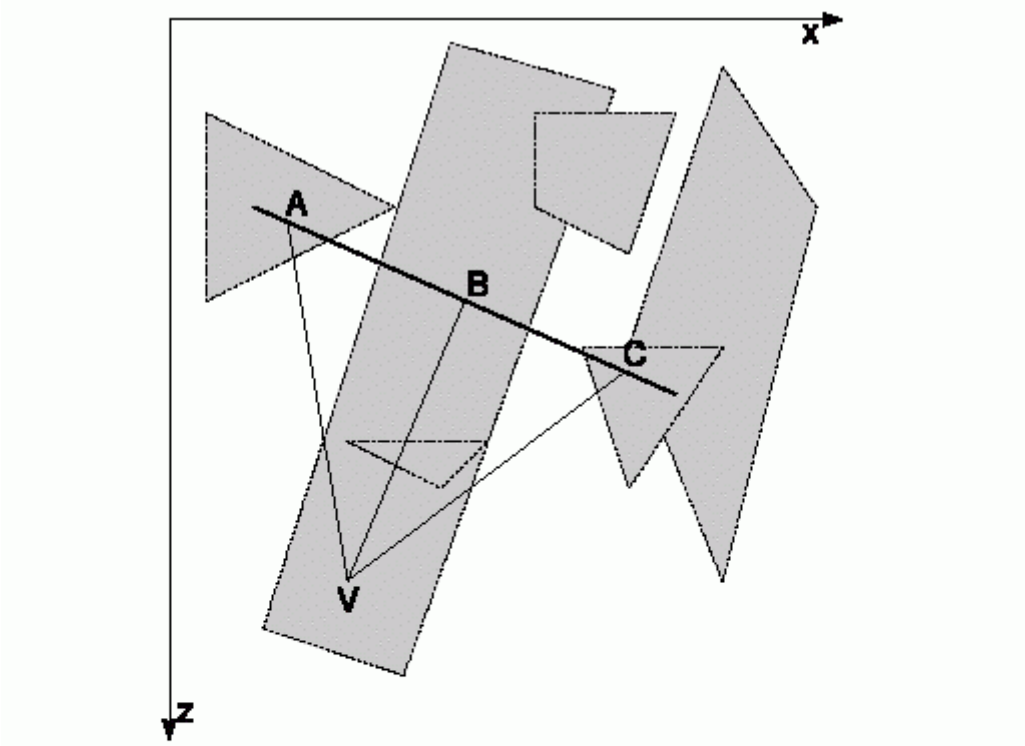


- ausgehend vom Betrachterstandpunkt:
  - Vorderseite eines Schattenpolygons erzeugt Schatten auf den dahinterliegenden Polygonen
  - Rückseite eines Schattenpolygons hebt diesen Effekt wieder auf
- Sei V ein Vektor vom Betrachterstandpunkt zu einem Punkt P an einem Objekt. P liegt im Schatten, wenn wenn V mehr Vorderseiten als Rückseiten von Schattenpolygonen schneidet.
- $\rightarrow$ Anwendung des Konzeptes der quantitativen Unsichtbarkeit von APPEL
- Addition von +1, wenn Vektor eine Vorderseite schneidet, Addition von -1 bei Rückseite.
- Punkt liegt im Schatten bei positivem Wert



- Betrachterstandpunkt liegt *nicht* im Schatten
- $\rightarrow$ A und C im Schatten, B nicht

Sonderfall:



- Betrachterstandpunkt liegt im Schatten
- zusätzlich: Jeder Punkt ist im Schatten, wenn noch nicht alle Rückseiten der Schattenpolygone, die von dem den Betrachter abschattenden Objekten stammen passiert wurden.
- B im Schatten, obwohl gleiche Anzahl von Schnittpunkten wie vorher.

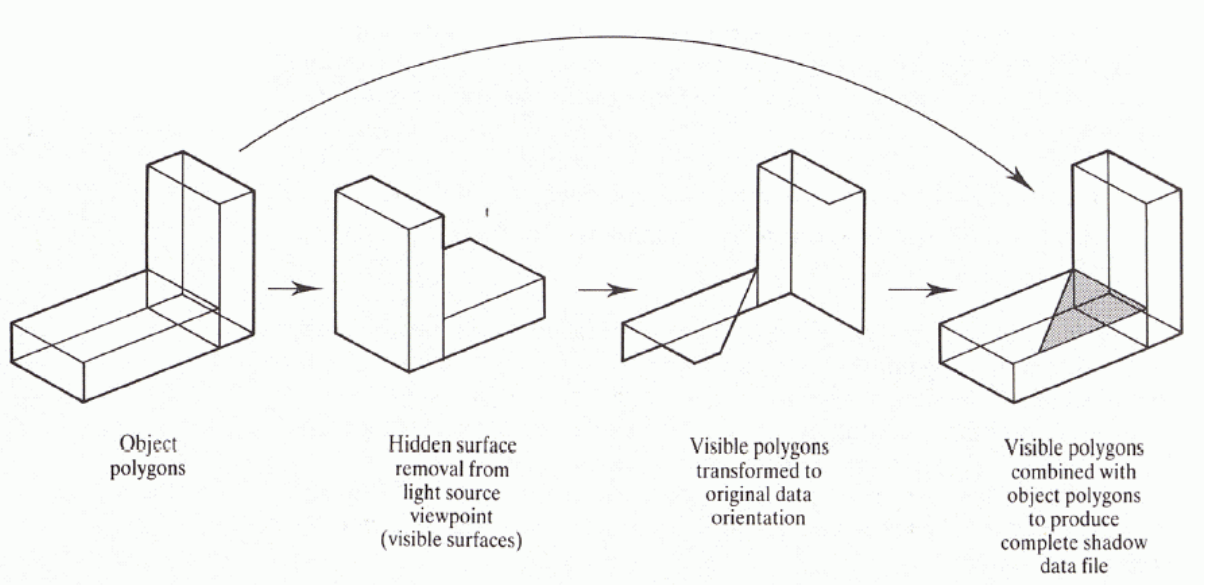
Schattenvolumen für jedes Polygon der Szene zu berechnen, wäre ineffizient

⇒ Objektkohärenz ausnutzen:

- Berechnen eines einzigen Schattenvolumens pro Polygonnetz
- Schattenpolygone werden dann *nur für diejenigen Kanten betrachtet, die, von der Lichtquelle aus betrachtet, Silhouettenkanten sind*.

HSR aus Sicht der Lichtquelle

- Idee: Hidden Surface Removal aus Sicht der Lichtquelle erzeugt (Teil-)Polygone, die im Schatten liegen (nicht sichtbar) und beleuchtete (Teil-)Polygone (sichtbar)
- Vorgehen:
  - Transformation der Szene, so daß Projektion aus Sicht der Lichtquelle möglich
  - Hidden Surface Removal in dieser Ansicht
  - Transformation der sichtbaren/unsichtbaren Polygone in ursprünglicher Ansicht
  - Kombination beider Polygonmengen



- erfordert einen Objektraum-HSR-Algorithmus (Weiler/Atherton)
- „Schattenpolygone“ entweder direkt mit Objektpolygonen kombiniert oder als koplanare Polygone auf Oberflächen gelegt, dann besondere Behandlung
- aber Vorteil: Objektraum-Genauigkeit

Schatten-z-Buffer

- zwei Schritte:
  1. Rendern der Szene aus Sicht der Lichtquelle und Speichern der Tiefeninformation im Schatten-z-Buffer (keine Intensitätsberechnung notwendig)
  2. Rendern der Szene mit einem z-Buffer-Algorithmus vom Betrachterstandpunkt aus. Zusätzlich:
     - für jeden sichtbaren Punkt: Koordinatentransformation von (x, y, z) nach (x', y', z') in die Sicht der Lichtquelle
     - Wenn z' größer als der Wert im Schatten-z-Buffer für diese Position ist, dann ist eine Fläche näher an der Lichtquelle und der Punkt im Schatten, sonst nicht.
     - Anpassen der Beleuchtungsgleichung an diese Gegebenheiten