

LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

3D-COMPUTERGRAFIK UND -ANIMATION

Shading und globale Beleuchtungsverfahren,
Animationstechniken

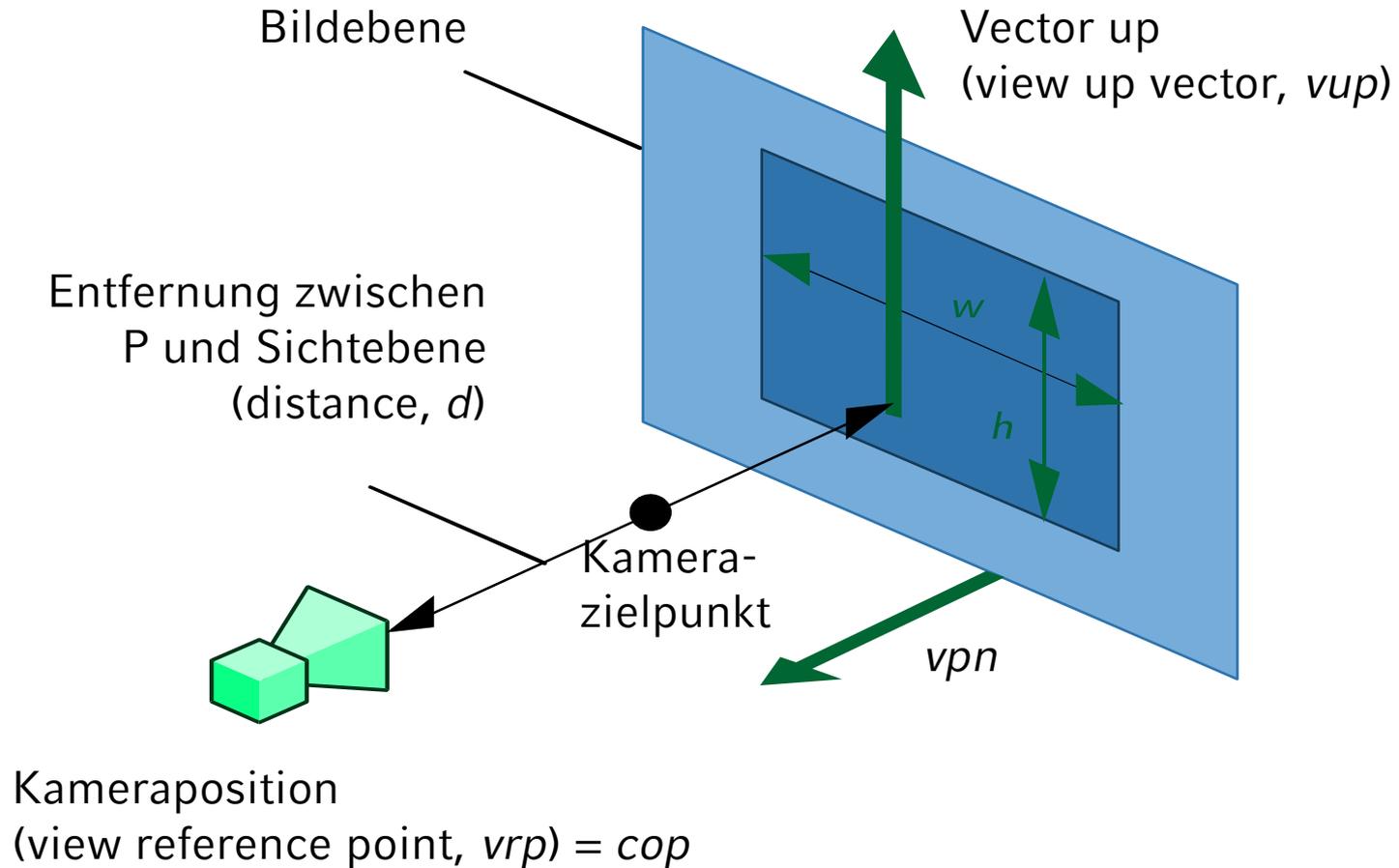
LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

Von 2D nach 3D

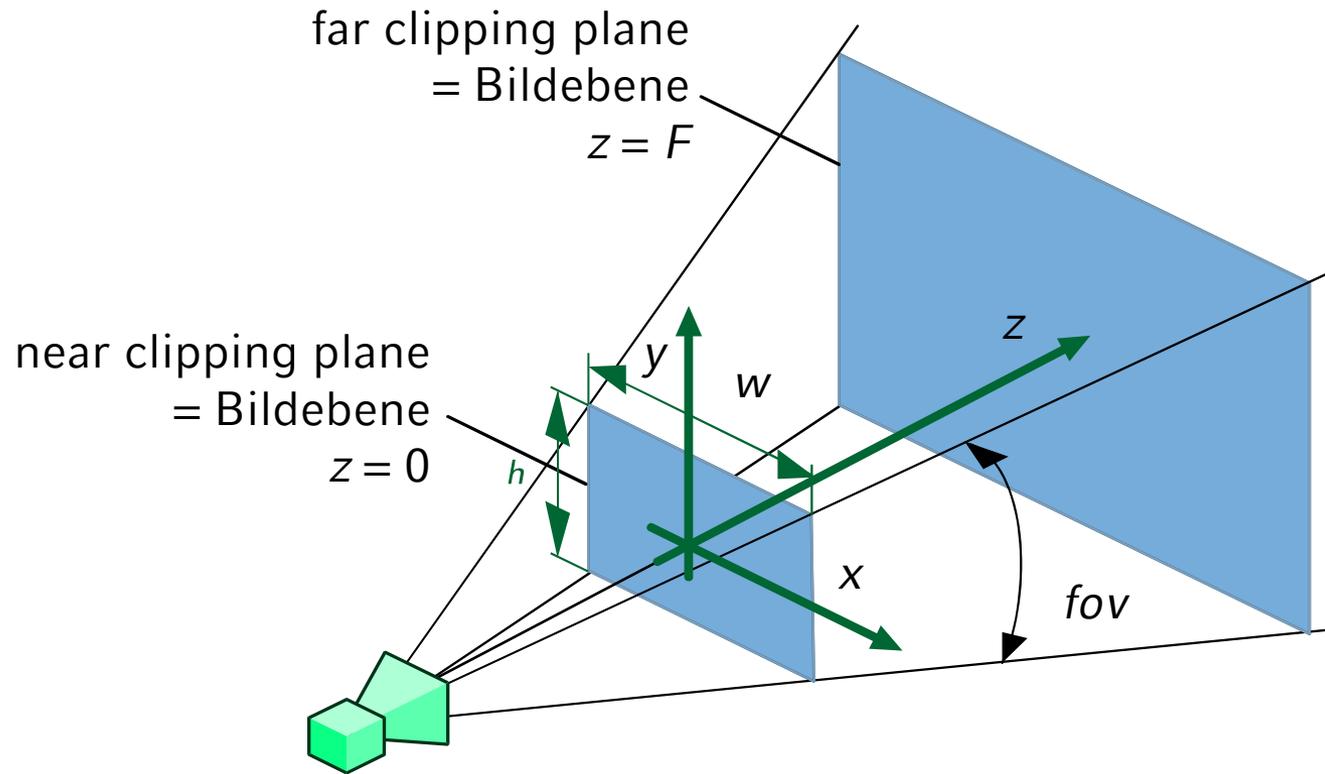
WEITER: MODELL FÜR EINE SICHTBESCHREIBUNG

- Reale Kamera als Orientierung und Metapher für den Viewing-Prozess
- Parameter realer Kameras:
 - Position
 - Blickrichtung
 - Brennweite
 - Tiefenschärfe
 - Art des Objektivs (Weitwinkel, Tele) bestimmt den Öffnungswinkel → Projektionen sind teilweise nicht planar
- Parameter der entstehenden Bilder:
 - Größe (Breite, Höhe, bzw. Breite und Seitenverhältnis)
 - Typische Werte für Seitenverhältnis: 4:3 (Fernsehen), 16:9
 - Auflösung

SYNTHETISCHE KAMERA



KAMERAMODELL: SICHTKÖRPER

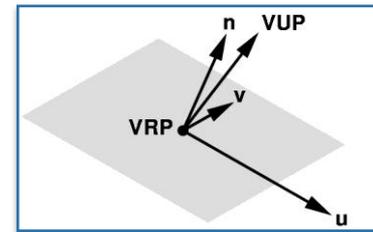


- Blickrichtung der Kamera: Entlang der z-Achse.
- Sichtebene: Die xy-Ebene.
- Warum die Schnittebenen?
 - *Near*-Ebene verhindert, dass Objekte, die sehr nahe an der Kamera sind, alles verdecken und das Objekte hinter der Kamera berücksichtigt werden.
 - *Far*-Plane verhindert, dass weit entfernte und damit im Bild sehr kleine Objekte Rechenaufwand beanspruchen.

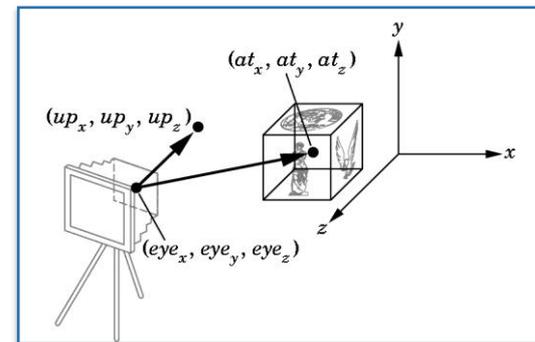
- Model-View-Transformation beschreibt die Transformation zwischen Modell und der Kamera.
- Repräsentiert durch eine Matrix in homogenen Koordinaten.
- **Standardwert:** Einheitsmatrix
- **Praktisch:**
 - In der Regel ist zumindest eine Verschiebung der Kamera nötig, damit diese außerhalb der Szene platziert ist. Das Modell ist normalerweise um den Ursprung angeordnet.
 - Richtlinien für einheitliche Szenen sind wichtig!

KAMERAMODELL – FORMEN DER KAMERASPEZIFIKATION

- Angabe der Kameraposition:
 $\text{view_reference_point}$ (vrp)
- Angabe der Orientierung:
 view_plane_normal (vpn)
- Angabe der Richtung „nach oben“ view_up -Vektor (vup)
- v ist Projektion des vup in die Sichtebene
- u steht senkrecht zu v und n
- Art der Perspektive wird in der Projektionsmatrix festgelegt (später).



- Look-At Funktion:
- Kameraposition/Augpunkt:
 eye ;
 - Ziel: at
 - vup kann gewählt werden.
 - $vpn = eye - at$
 - $vrp = eye$
- Wahl des „At“-Vectors: z. B. Schwerpunkt des Modelles oder Mittelpunkt des umschließenden Quaders (für eine zentrierte Darstellung)



- Parallelprojektion:
- Projektionsebene sei die xy -Ebene
- Projektionsrichtung parallel zur z -Achse
- Projektionsrichtung parallel zum Vektor $(x_p; y_p; z_p)^T$ $z_p = 0$
- Projektionsgerade für Punkt $(x_1; y_1; z_1)$ erfüllt
 - $x = x_1 + x_p u$
 - $y = y_1 + y_p u$
 - $z = z_1 + z_p u$



- Parallelprojektion
- Darstellung in homogenen Koordinaten:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



- Schiefwinklige/schräge
Parallelprojektionen:

$$\begin{aligned}
 P &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-\cos(\alpha)}{\tan(\beta)} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\sin(\alpha)}{\tan(\beta)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\sin(\beta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-\cos(\alpha)}{\tan(\beta)} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\sin(\alpha)}{\tan(\beta)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$



- Bei Kavalierprojektion: $\beta = 45^\circ$
- Geraden in z-Richtung werden nicht verkürzt, wegen $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

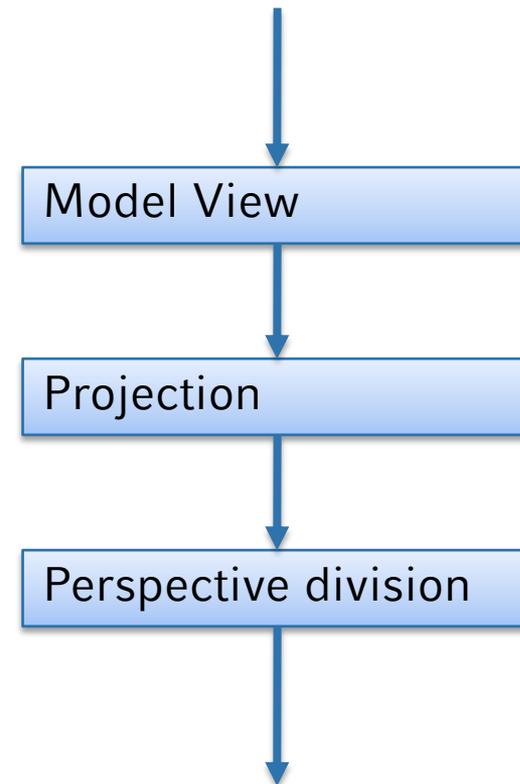


- Bei Kabinettprojektion: $\beta = 63,4^\circ$
- Geraden in z-Richtung werden halbiert, wegen $\cos^2(\alpha/2) + \sin^2(\alpha/2) = 1/2$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{-\cos(\alpha)}{2} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\sin(\alpha)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



- Übergang zwischen verschiedenen Koordinatensystemen (3D → 2D)
- Projektionen sind keine affinen Transformationen; sie sind nicht umkehrbar (Parallelität von Geraden wird nicht erhalten).
- Ausnutzen der Eigenschaften homogener Koordinaten bei der Berechnung
- Mathematische Beschreibung war auf die einfachsten Projektionen (Projektionsebene = xy -Ebene) konzentriert.
- Transformation der Kamera in Weltkoordinaten (Model-View) und Projektion werden nacheinander durchgeführt.



- In einigen Gebieten der Visualisierung, z. B. bei der Darstellung geographischer Daten und abstrakter Daten werden nichtlineare Projektionen genutzt
- **Beispiele:** Fisheye-Projektionen mit einem oder mehreren Fokuspunkten zur Darstellung geographischer Daten
- **Vorbild:** Projektionen aus der Kartographie, die das Stadtzentrum (als Fokus) vergrößert darstellen



- Foley, van Dam, Feiner, Hughes. *Computer Graphics, Principles and Practice*. Zweite Auflage, Addison Wesley. ISBN 0-201-84840-6.
- Bernhard Preim. *Computergraphik 1*. Universität Magdeburg, Vorlesungsskript, Juli 2005.



FAHRPLAN FÜR HEUTE

- Beleuchtung und Shading
- Animation



LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

von 3D nach 2D

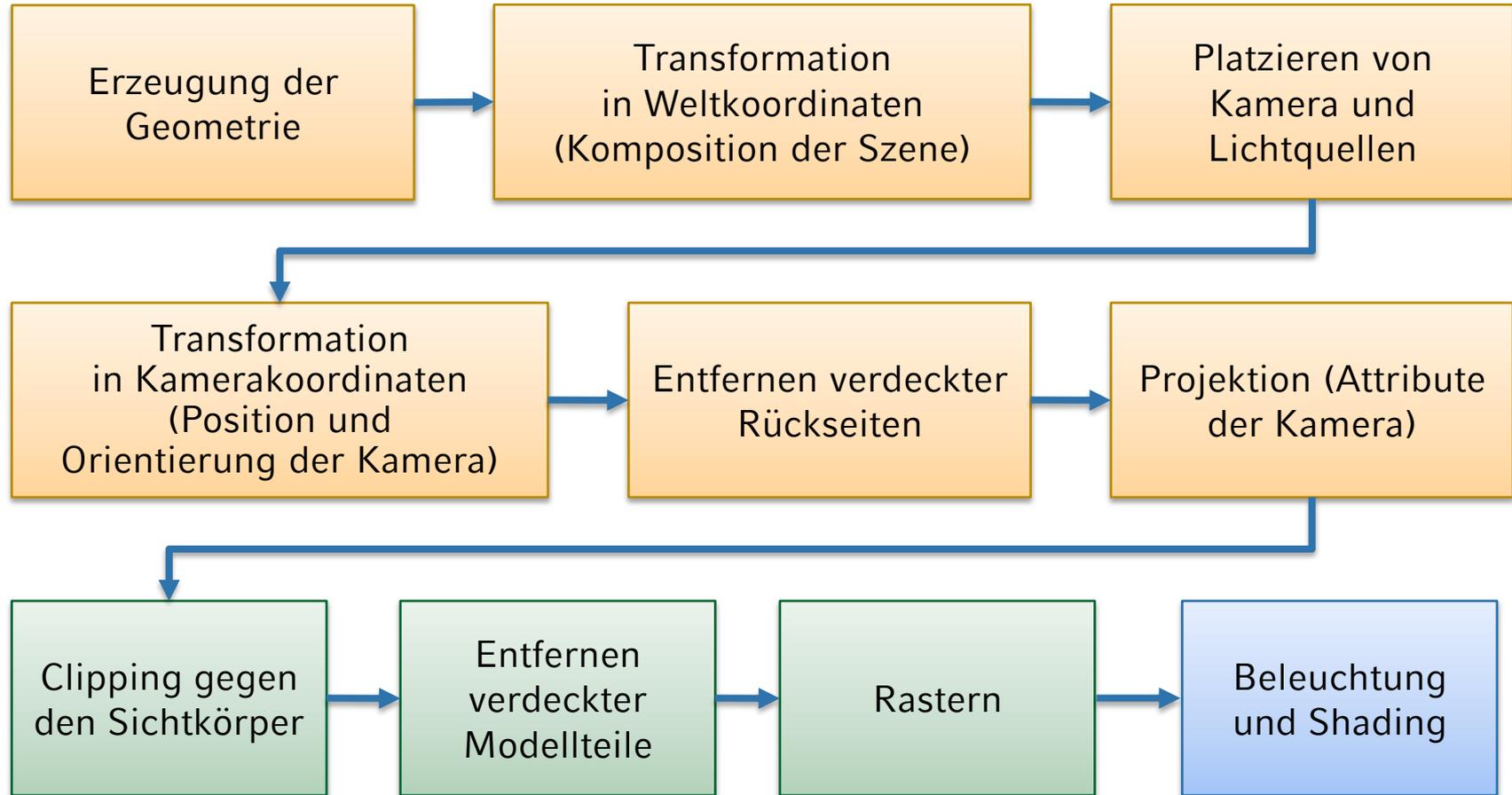
RASTERN UND SHADING



- Beleuchtungsmodelle
- Lichtquellen
- Interaktion von Licht mit Oberflächen
- Beleuchtungsmodell nach Phong
- Shading polygonaler 3D-Modelle
- Globale Beleuchtungsberechnung



RENDERING-PIPELINE



- Oberflächen senden Licht aus oder reflektieren es (oder beides). Teile des Lichtes werden absorbiert; andere Teile (ungerichtet) gestreut
- Lichtintensität und Farbe an einem Punkt der Szene hängt von seiner Lage zu den Lichtquellen ab
- Licht wird oft mehrfach reflektiert/gebrochen und an einem Punkt „addiert“ sich die Lichtintensität, die auf verschiedenen (langen) Wegen an diesem Punkt angekommen ist



- Mathematische Beschreibung
 - führt zu einer Integralgleichung – der Renderinggleichung.
 - Diese ist im Allgemeinen nicht lösbar
 - Computergrafik: Annäherungen, die nur bestimmte Arten von Lichtquellen und Oberflächentypen berücksichtigt



- Beleuchtungsmodelle beschreiben die Faktoren, die die Farbe eines Objektes an einem bestimmten Punkt bestimmen
Unterscheiden in:
- Globale Beleuchtungsberechnung
 - Einbeziehung aller Objekte einer Szene, um die Farbe an einem Punkt zu bestimmen,
 - Interaktion Lichtquelle-Objekt und auch Interaktion Objekt-Objekt,
 - Oft physikalisch basiert (Erhaltungssätze)
 - Methoden: Raytracing, Radiosity

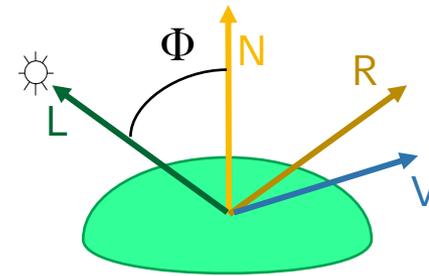


EINSCHUB: NORMALENBERECHNUNG

- Normalen sind wichtig für die Sichtbarkeitsbestimmung (*occlusion culling*) und die Beleuchtungsberechnung.
 - Die Normale n ist ein Vektor, der senkrecht zu einer Ebene steht. Eine Ebene wird durch drei Punkte definiert (p_0, p_1, p_2)
- Normale wird unter Nutzung des Kreuzproduktes folgendermaßen berechnet:
- $n = (p_2 - p_0) \times (p_1 - p_0)$.
 - Reihenfolge der Punkte ist wichtig, weil $a \times b = -b \times a$
 - Typische Konvention in der CG: Eckpunkte im Uhrzeigersinn angeordnet
 - Bei Polygonen mit > 3 Eckpunkten: Nutze die ersten drei Eckpunkte für die Normalenberechnung



- Einfallswinkel θ : Winkel zwischen L und N (bestimmt die diffuse Reflexion)
- Reflexionswinkel r : Winkel zwischen R und N
- Winkel Φ zwischen V und R bestimmt Intensität des einfallenden Lichts
- Wenn $V = R$ (bzw. $\Phi = 0$) wird das Licht maximal zum Betrachter reflektiert



L-Vektor zur Lichtquelle
N-Oberflächennormale
R-Reflektierter Lichtstrahl
V-Vektor zum Betrachter



LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

von 3D nach 2D

SHADING



- In der CG am häufigsten verwendetes Modell
- Modelliert Beleuchtung aus drei Anteilen:
- $I_{\text{phong}} = I_a + I_d + I_s$



- Ambienter Anteil
 - Grundhelligkeit in der Szene
 - Simuliert Streuung des Lichts durch Oberflächen
 - Unabhängig von Betrachterstandpunkt und vom einfallendem Licht
- Diffuser Anteil
 - Reflexion an matten Oberflächen
 - Gleichmäßig in alle Richtungen
 - Unabhängig vom Betrachterstandpunkt
- Spekularer Anteil
 - Gerichtete Reflexion an spiegelnden Oberflächen
 - Abhängig vom Betrachterstandpunkt
 - Erzeugt Glanzpunkte



Ambiente Reflexion:

- In der Realität kommt durch vielfältige Licht-Oberflächen-Interaktionen in einem beleuchteten Raum praktisch überall ein gewisses Maß an Licht an.
- Oft ist eine gleichmäßige Beleuchtung auch das Ziel bei der Gestaltung von Räume
- In der CG würde es durch die stark vereinfachte Nachbildung der Beleuchtungsvorgänge dazu kommen, dass Teile der Szene komplett dunkel werden.
- **Daher:** Annahme einer Grundhelligkeit (etwa 10–15% der maximalen Helligkeit). Bewirkt mit geringem Aufwand das, was sonst nur durch Einfügen vieler Lichtquellen erreichbar wäre.
- **Problem:** Farbe des ambienten Lichtes (müsste prinzipiell von allen Objekten in der Szene abhängen)



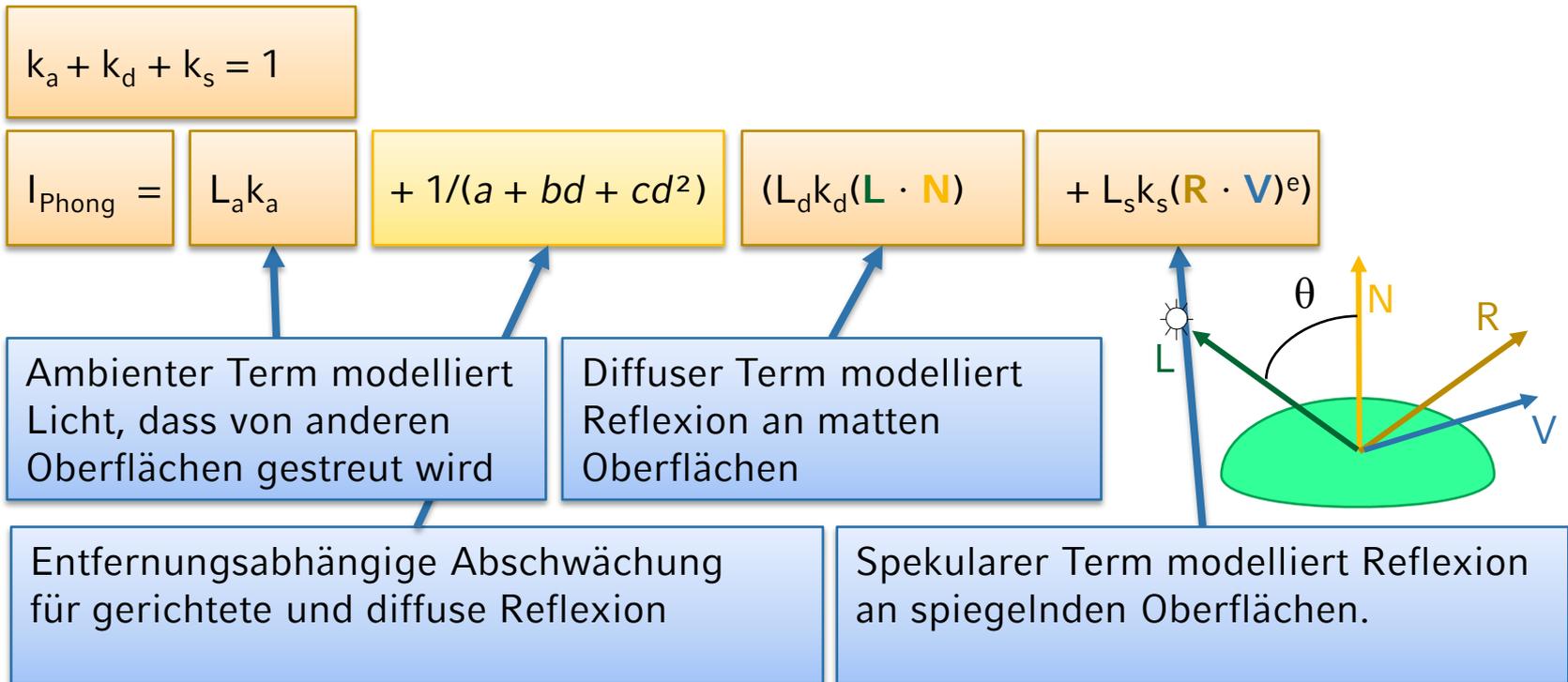
Art	Beschreibung	Spezifikation
Punkt-Lichtquelle	keine Ausdehnung, sendet Licht in alle Richtungen	3D-Koordinaten (Position)
Gerichtetes Licht	parallele Lichtstrahlen (~ einer unendlich weit entfernten Lichtquelle). Effekt wie z. B. Sonnenstrahlen auf der Erde	3D-Vektor (Richtung)
Spotlicht	Punktlichtquelle, die nur in einem bestimmten Öffnungswinkel Licht sendet. Lichtintensität sinkt zu den Rändern des Sichtkegels	3D-Koordinate (Position), 3D-Vektor (Richtung) Öffnungswinkel, Maß für das Abfallen der Intensität



- Abschwächung (attenuation)
 - Intensität des Lichtes wird mit wachsender Entfernung zur Lichtquelle kleiner (physikalisch: $I \sim 1/d^2$)
 - In der CG hat sich eine geringere Abschwächung ($I \sim 1/(a + bd + cd^2)$) als günstig erwiesen. a , b und c müssen geeignet gewählt werden. Oft: $a = 0$, $b = 1$, $c = 0$)
- Farbe
 - Lichtquellen haben eine Farbe. Diese wird als RGB-Tripel angegeben. Verhalten der Lichtstrahlen hängt von der Wellenlänge ab. Annäherung: betrachten nur R-, G- und B-Anteile.



BELEUCHTUNGS-MODELL NACH PHONG



Beleuchtungsgleichung muss für jede Lichtquelle (ggf. modifiziert bei Spotlichtern) und jede der 3 Grundfarben ausgewertet werden.



- Warum ist die Berechnung bei einer gerichteten Lichtquelle schneller als bei einer Punktlichtquelle?
- Gerichtetes Licht approximiert sehr weit entfernte Lichtquelle → Distanzabhängigkeit der Berechnung entfällt.
- Aufgrund der Parallelität der Lichtstrahlen muss die Normalenberechnung nur einmal pro Polygon durchgeführt werden.

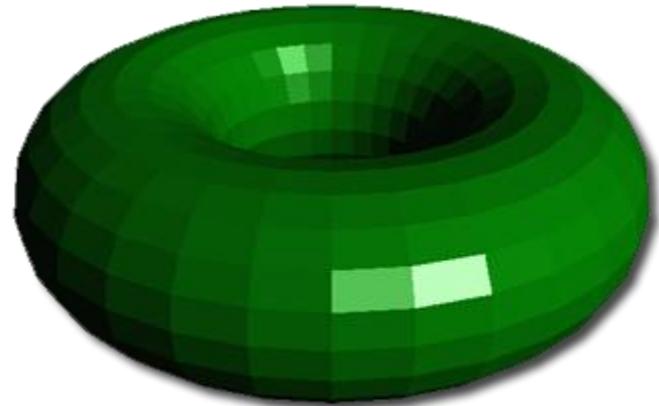


- **Ziel:** Zuordnung von Farben zu den Pixeln,
- Betrachten polygonale 3D-Modelle.
- Verfahren unterscheiden sich darin, an welchen Stellen das Beleuchtungsmodell ausgewertet wird.
- Einfache Techniken: interpolative Shading-Verfahren
 - Über das Beleuchtungsmodell werden Farbwerte an den Eckpunkten berechnet.
 - Farbwerte aller Punkte eines Polygons ergeben sich durch lineare Interpolation der Farbwerte an den Eckpunkten.
 - Drei Verfahren
 - ◆ Flat-Shading
 - ◆ Gouraud-Shading
 - ◆ Phong-Shading (Unterschied zu Phong-Modell)



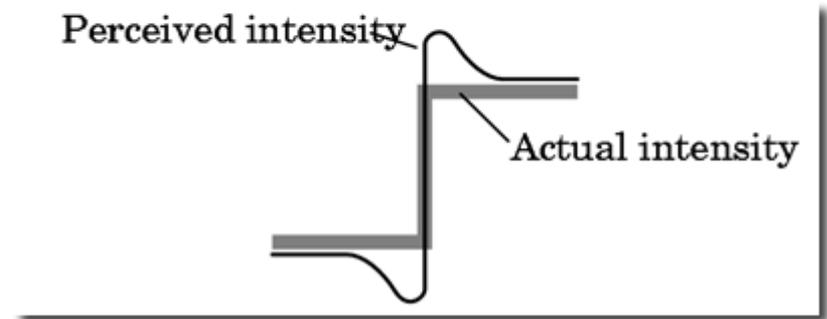
SHADING: FLAT-SHADING

- Keine Interpolation
- Bestimmung eines Farbwerts pro Polygon
 - Variante 1: Mittelwert aus den Farbwerten an den Eckpunkten
 - Variante 2: durch Auswahl eines Punktes und Berechnen der Farbe dort
- Setze alle Pixel des Polygons auf diese Farbe
- Einzelne Polygone deutlich sichtbar
- Einfache Implementierung, sehr schnell, aber geringe Qualität



SHADING: FLAT-SHADING

- Warum sind die Diskontinuitäten an den Kanten so auffällig und störend?
- Visuelle Wahrnehmung: Kontraste werden verstärkt wahrgenommen. Wahrgenommene Helligkeitsunterschiede sind stärker als die (physikalischen) Intensitätsunterschiede.



SHADING: GOURAUD-SHADING

- Berechnung der Helligkeitswerte an den Eckpunkten des Polygons
- lineare Interpolation der Helligkeitswerte über die Fläche des Polygons
- Aufwändiger als Flat-Shading, aber qualitativ besser
- Kanten zwischen Polygonen sind nicht mehr sichtbar

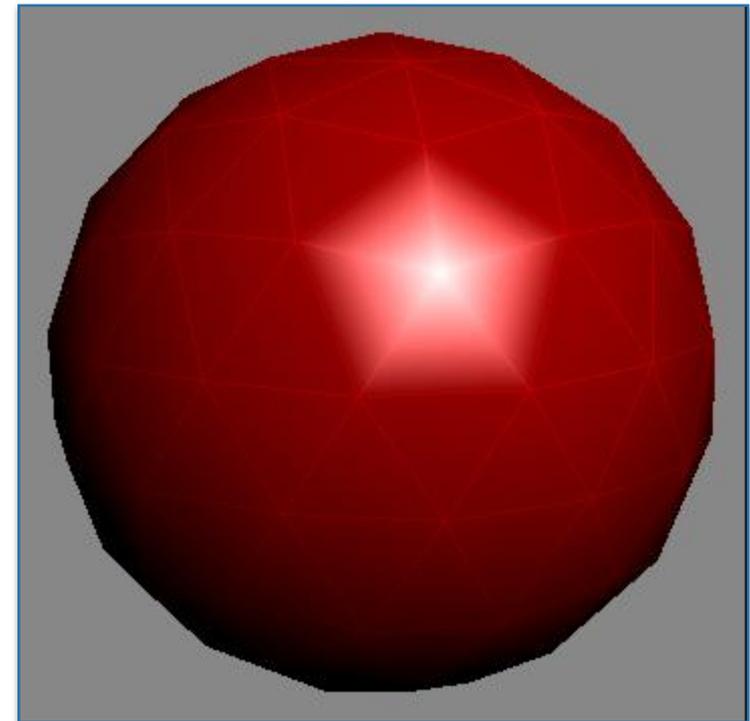


SHADING: GOURAUD-SHADING

Vorteile

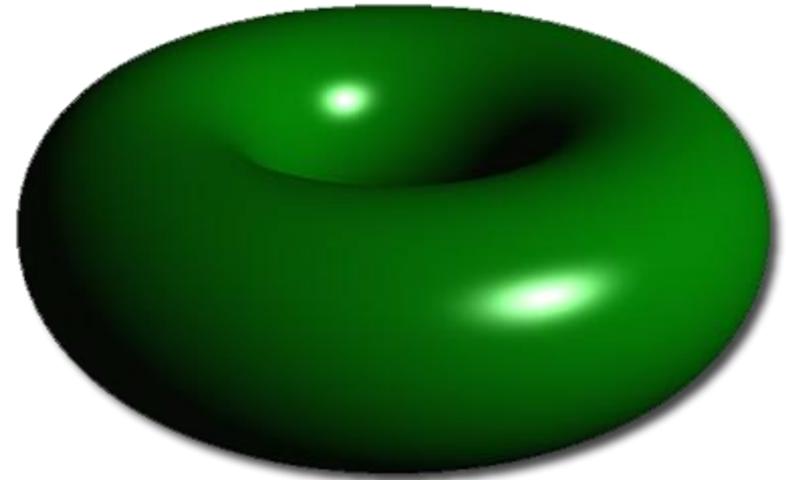
- schnell
- keine Facettierung der Oberflächen mehr
- implementiert in Hardware

Nachteile



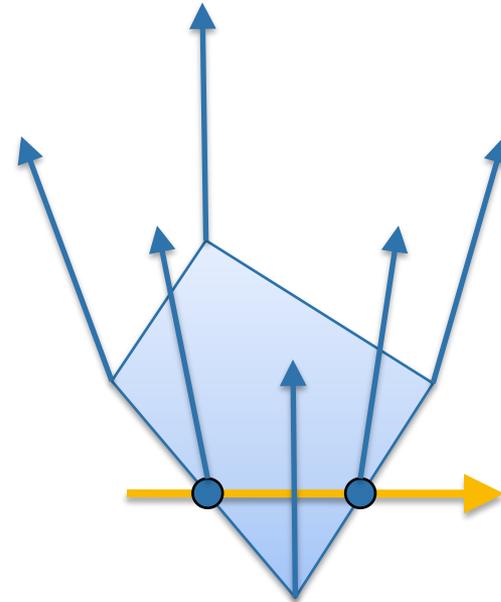
SHADING: PHONG-SHADING

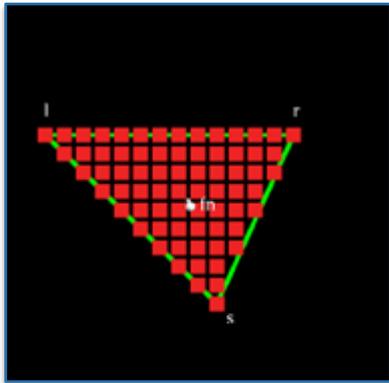
- Interpoliere die Normalenvektoren der Eckpunkte des Polygons über die Fläche des Polygons und berechne an jedem Punkt (Pixel) im Inneren des Polygons einen Farbwert aus der interpolierten Normalen
- Wesentlich aufwändiger als Gouraud-Shading, liefert aber die besten Ergebnisse
- Glanzpunkte im Inneren eines Polygons werden korrekt dargestellt
- Aber: auch einige Fälle, die nicht dargestellt werden können



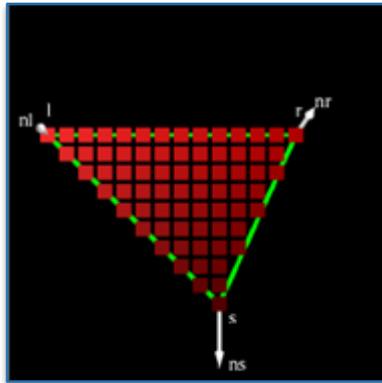
SHADING: PHONG-SHADING

- Normalen-Berechnung entlang von Polygonkanten und Scanlinien durch Interpolation

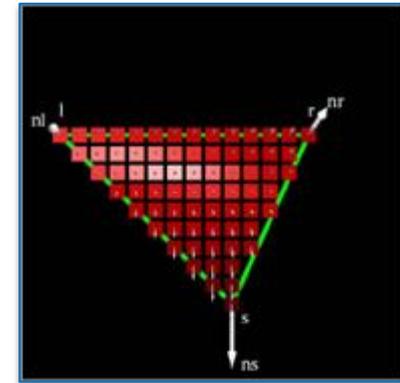




Flat-Shading



Gouraud-Shading

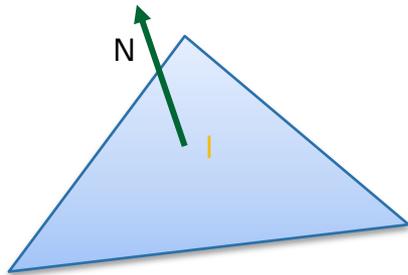


Phong-Shading

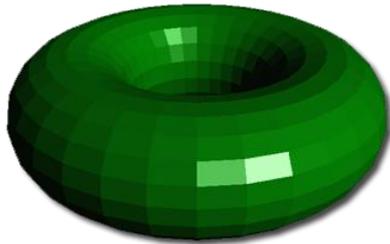


SHADING POLYGONALER 3D-MODELLE – ZUSAMMENFASSUNG

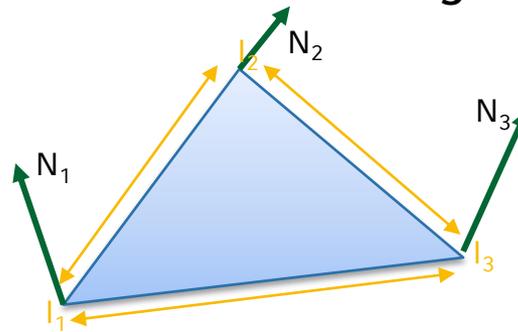
Flat-Shading



Ein Helligkeitswert für
das gesamte Polygon



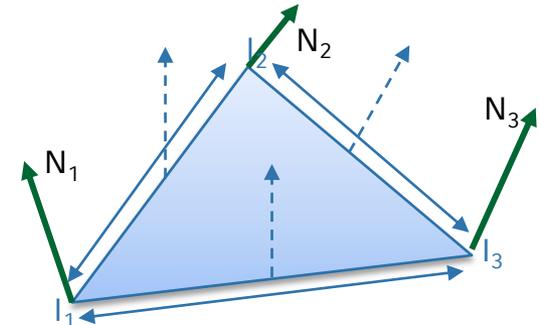
Gouraud-Shading



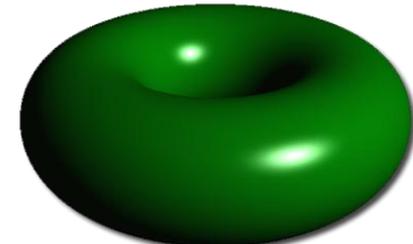
Bestimmung der
Helligkeit an den
Eckpunkten;
Interpolation im Inneren



Phong-Shading



Bestimmung der Normalen
an den Eckpunkten und
Interpolation im Inneren;
Bestimmung der Helligkeit
mit Hilfe der interpolierten
Normalen



KOMBINATION VON Z-BUFFER UND SHADING-VERFAHREN

1. Fülle den Framebuffer mit der Hintergrundfarbe
2. Fülle den z-Buffer mit der maximal möglichen Tiefe
3. Zeichne alle Polygone nacheinander:
 - a) Für alle Eckpunkte: Bestimme z-Wert und Normale.
 - b) Nutze den Scanlinien-Füllalgorithmus zum Zeichnen der Polygone, dabei
 - ◆ Interpoliere die entsprechenden Werte (z , N , I) entlang der Kanten und entlang der Spannen.
 - ◆ Teste für jedes Pixel, ob der Wert im z-Buffer ein Setzen des Pixels im Framebuffer notwendig macht
 - ◆ Aktualisiere z- und Framebuffer



- Vorgestellte Shading-Verfahren sind nicht (korrekt) physikalisch basiert
- Erreichen akzeptable Ergebnisse in zumutbarer Zeit
- Qualität abhängig vom verwendeten Beleuchtungsmodell und vom Shading-Verfahren.
- Beleuchtungsberechnung muss in Weltkoordinaten erfolgen (ein Bezugssystem für alle Koordinaten)
- Cosinus-Funktionen werden für viele Aspekte der Beleuchtungsberechnung eingesetzt (Intensität von Spotlichtern, gerichtete Reflexion $f(\Phi)$, ungerichtete Reflexion $f(\theta)$)



„Virtuelle Kaiserpfalz“

Maic Masuch et al.,
Universität Magdeburg,
1999



„Sonnenblumen“

Oliver Deußen et al.,
Universität Magdeburg,
1997



Oliver Deußen et al.,
Universität Magdeburg,
1997



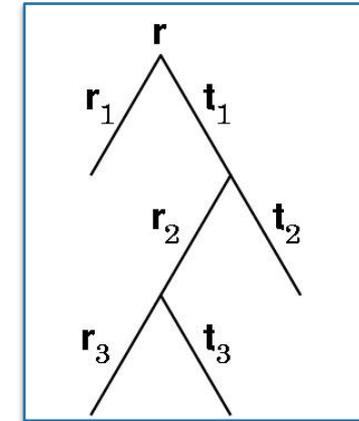
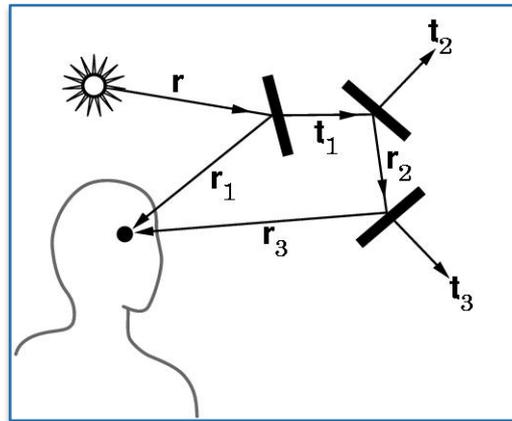
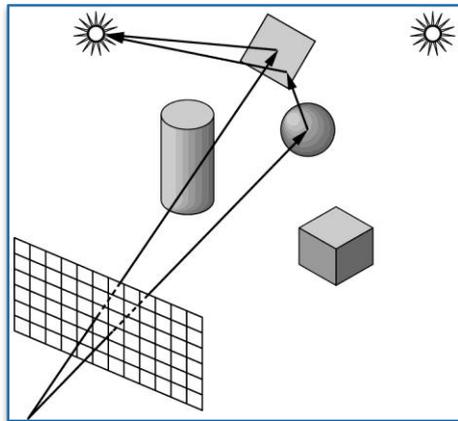
LFE Medieninformatik • Prof. Dr. Ing. Axel Hoppe

Realistischere Darstellungen in 3D

Globale Beleuchtung

- Globale Beleuchtungsverfahren berücksichtigen nicht nur den direkten Lichteinfall auf die Oberflächen, sondern auch Lichteffekte höherer Ordnung wie Mehrfachreflexionen, Lichtbrechung und Schatten.
- Verbreitet sind zwei große Gruppen von Verfahren:
 - **Raytracing**
 - ◆ Verfolgung von Strahlen vom Bild zurück in die Szene bis zu den Lichtquellen. Mehrfache gerichtete Reflexion wird korrekt dargestellt.
 - **Radiosity**
 - ◆ Basiert auf dem Energieerhaltungssatz und betrachtet den Energieaustausch zwischen Flächen. Mehrfache diffuse Reflexion wird korrekt dargestellt.





- Bei der rekursiven Verfolgung von Lichtstrahlen entsteht ein Baum, wobei jeder Strahl einen bestimmten Anteil an der resultierenden Intensität hat
- Strahlverfolgung/Rekursion wird abgebrochen, wenn der Anteil sehr klein ist bzw. die Rekursionstiefe einen Schwellwert erreicht hat



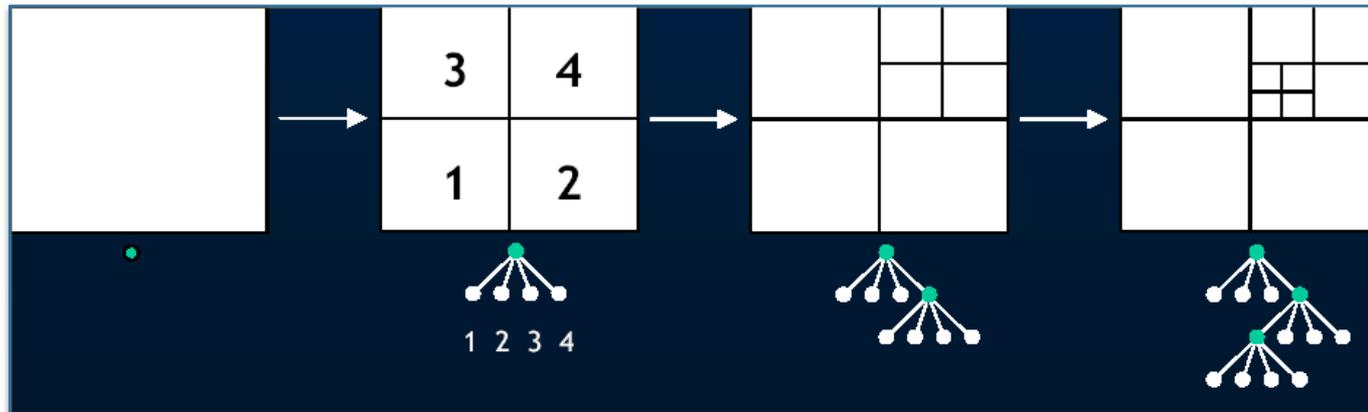
- Aufwand hängt ab von der Zahl der Strahlen, die verfolgt werden und von den Schnittpunktberechnungen
- Test, ob Strahl ein Objekt trifft, kann durch Einsatz hierarchischer Datenstrukturen (z. B. Octtree) oder umschließende Hüllkörper (Kugeln, Bounding Box) verringert werden
- **Ziel:** In den meisten Fällen durch einen schnellen Test (z. B. Strahl – Kugel) entscheiden, ob aufwändige Schnittpunktberechnung nötig
- **Qualität:** Diffuse Mehrfachreflexionen (in alle Richtungen) können nicht nachgebildet werden



- Beschleunigung der Schnittpunktberechnung durch umschließende Hüllkörper
- Kriterien für Hüllkörper:
 - Effiziente Berechnung
 - Gute Anpassung



- Beschleunigung der Schnittpunktberechnung durch Octrees
- Hierarchische Unterteilung des Raumes in je 8 gleich große Kinder (Teilung entlang der x -, y - und z -Achse)
- Repräsentation in welchen Teilen der Szene sich Objekte befinden
- Adaptive Unterteilung („leere“ Knoten werden nicht unterteilt).



GLOBALE BELEUCHTUNG: RAYTRACING

© Cornell University
Program of Computer
Graphics. 1990

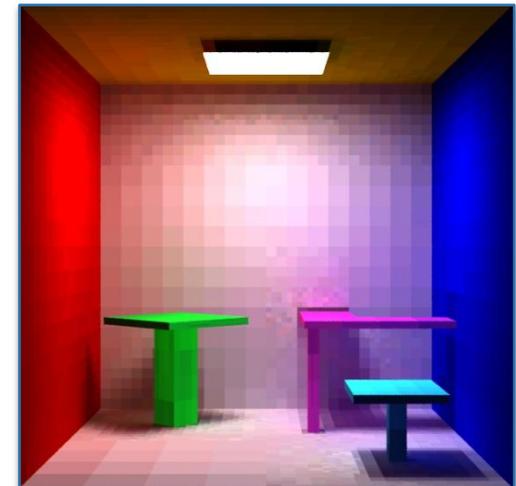
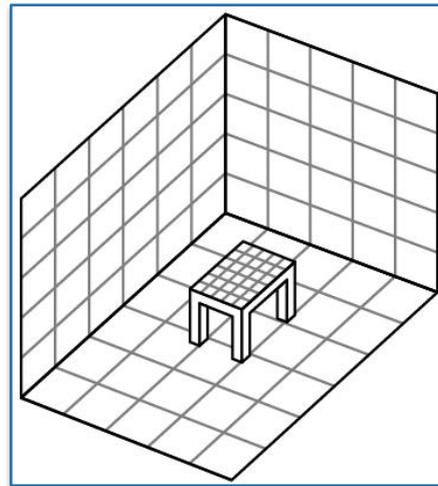
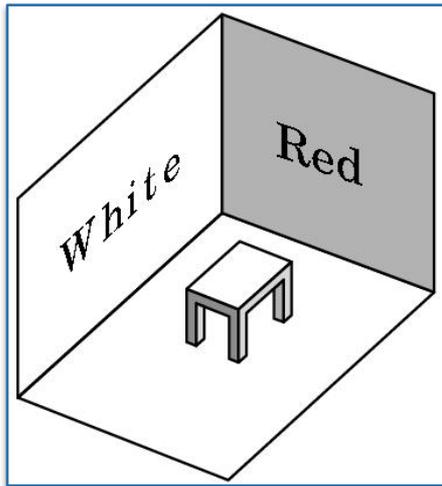


- Szene wird angenommen als perfekt diffus reflektierend. Unter dieser Annahme kann die Renderinggleichung numerisch gelöst werden.
- Polygone werden unterteilt in kleine Patches. Gesucht ist der Einfluss/der Anteil des diffus reflektierten Lichtes von einem Patch auf einen anderen ($O(n^2)$).
- Ausgehend von Betrachtungen zur Verteilung von Wärmeenergie wird der Einfluss in sogenannte Formfaktoren berechnet und gespeichert.
- Szene wird daraufhin mit Flatshading dargestellt, wobei Formfaktoren berücksichtigt werden.



- Wesentlicher Aufwand ist die Berechnung der Form-Faktoren (FF). Aufwand und Qualität hängen von der Diskretisierung (Zahl der FF) ab.
- **Ziel:** Adaptive Diskretisierung (an den Stellen feiner unterteilen, wo es besonders auffällt)
- FFs sind unabhängig von der Betrachterposition und müssen damit bei Rotation/Zoom/Kamerafahrt nicht neu berechnet werden.
- Qualität wird deutlich bei indirektem Licht. Eine beleuchtete große Wand reflektiert Licht diffus auf Gegenstände im Raum oder andere Wände.





Eine einfache Szene für Radiosity-Darstellungen und die Unterteilung in Patches

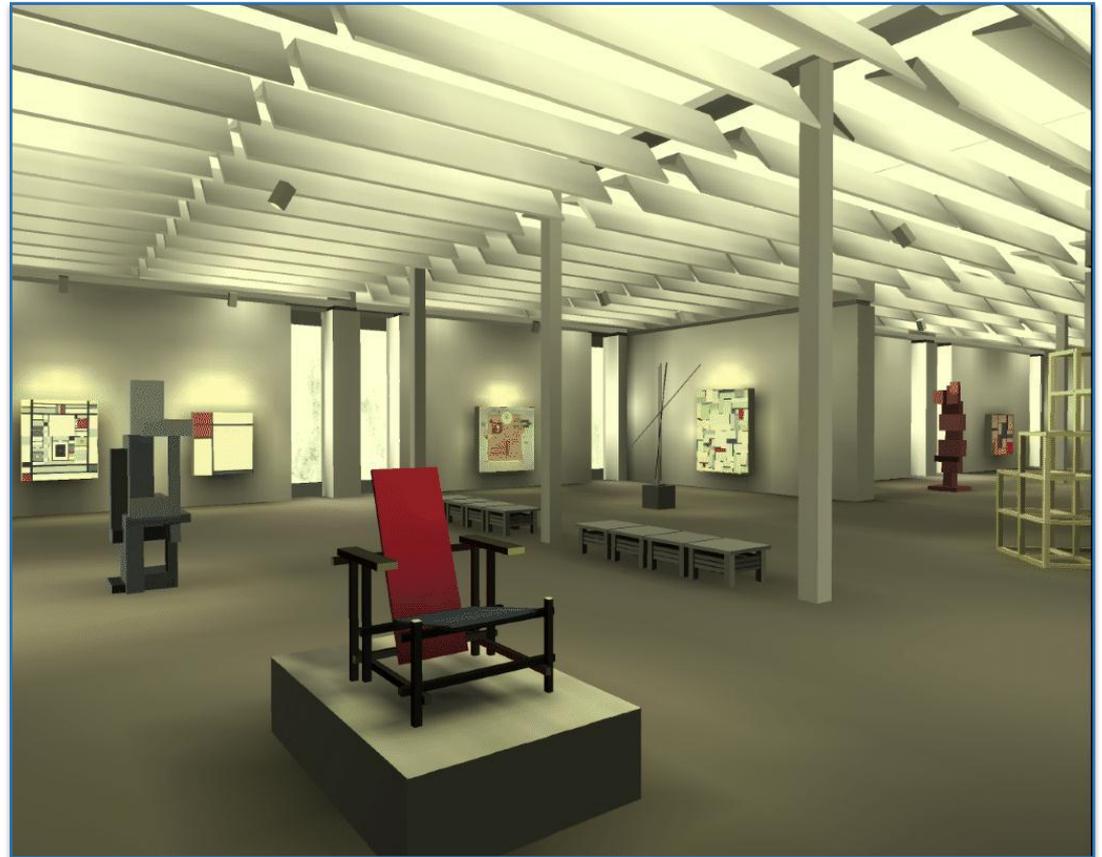
Patches für die Radiosity-Berechnung

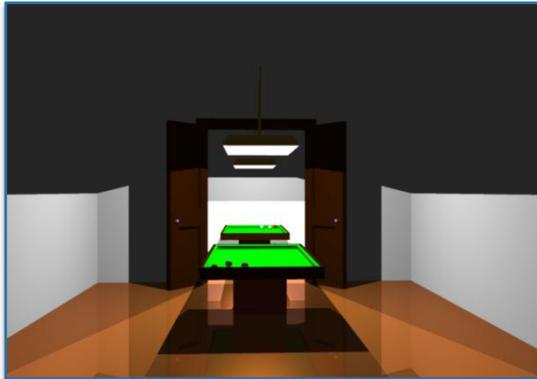


© Michael Cohen et al.,
Cornell University,
Program of Computer
Graphics. 1988 gerendert;
30.000 Patches, 190
Stunden Rechenzeit auf
einer VAX



© Michael Cohen et al.
Cornell University,
Program of Computer
Graphics. 1988 gerendert



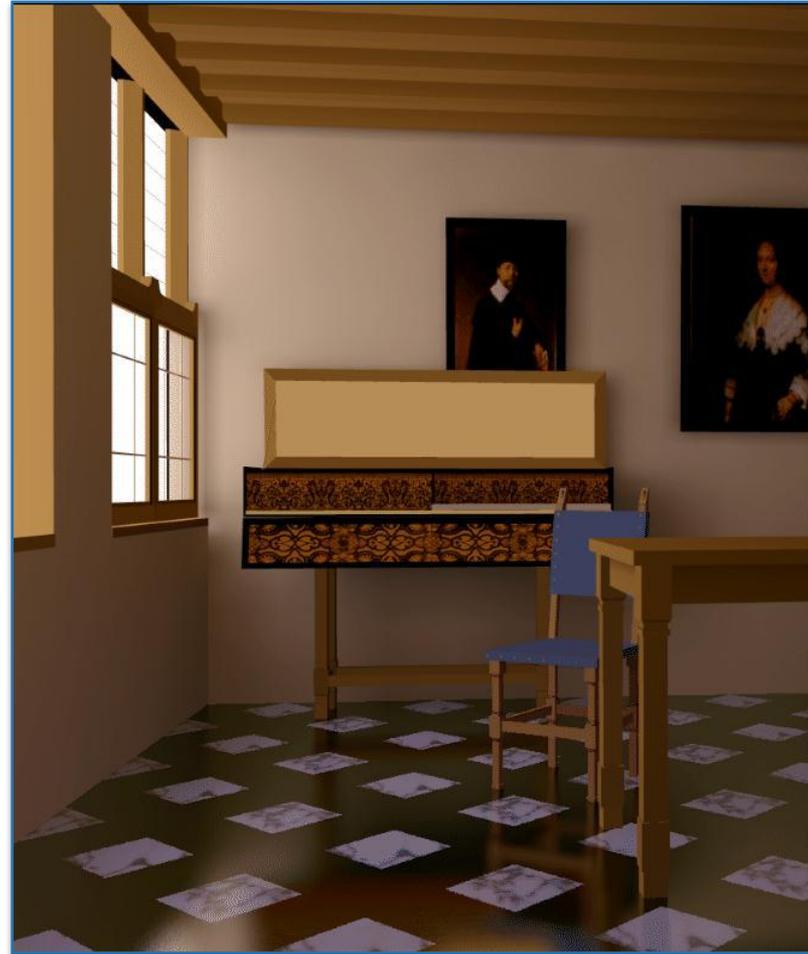


- Raytracing im 1. Schritt,
- Radiosity im 2. Schritt, Kombination rechts



Kombination von
Raytracing und Radiosity
in einem 2-Pass-Verfahren

© Michael Cohen et al.
Cornell University Program
of Computer Graphics,
1987



- Modellierung von Oberflächendetail über Texturen: Texture Mapping, Bump Mapping,
- Atmosphärische Effekte wie Nebel, Tiefenschärfe, etc.
- Simulation realer Objekte und Materialien (Rauch, Feuer, Wasser, etc.)
- Animation



- Axel Hoppe. *Validierung und Nachbearbeitung von gerenderten Bildern*. Dissertation an der Otto-von Guericke-Universität Magdeburg, Shaker-Verlag, Aachen, 1999. ISBN 3-8265-4610-5
- Foley, van Dam, Feiner, Hughes. *Computer Graphics, Principles and Practice*. Zweite Auflage, Addison Wesley. ISBN 0-201-84840-6.
- Bernhard Preim. *Computergraphik 1*. Universität Magdeburg, Vorlesungsskript, Juli 2005.

