

Computergrafik

Jan Fässler

5. Semester (HS 2013)

Inhaltsverzeichnis

1	Mathematische Grundlagen	1
1.1	Euklidischer Raum	1
1.2	Vektoren	1
1.2.1	Addition	1
1.2.2	skalare Multiplikation	1
1.2.3	Betrag	2
1.2.4	Einheitsvektor	2
1.2.5	Skalarprodukt	2
1.2.6	Vektorprodukt	2
1.3	Matrizen	2
1.3.1	Einheitsmatrix	2
1.3.2	Transponierte Matrix	3
1.3.3	Multiplikation	3
1.4	Homogene Koordinaten	3
1.5	2D-Transformationen	3
1.5.1	Translation	3
1.5.2	Skalierung	3
1.5.3	Scherung	4
1.5.4	Rotation	4
1.6	3D-Transformationen	4
1.6.1	Translation	4
1.6.2	Skalierung	4
1.6.3	Scherung	4
1.6.4	Rotation	4
1.6.5	Rotation um eine beliebige Achse	5
2	Rasteralgorithmen	6
2.1	Inkrementeller Algorithmus	6
2.2	Bresenham Algorithmus	6
3	Perspektive: 3D auf 2D	7
3.1	Kategorien der Projektionen	7
3.2	Parallelprojektion	7
3.3	Zentralprojektion	7
3.4	Projektionstransformation	7
3.4.1	Schritt 1: Scherung H in eine orthogonale Sichtpyramide	8
3.4.2	Skalierung S in ein kanonisches Sichtvolumen	8
3.4.3	Projektive Transformation N in einen Sichtwürfel	8
3.4.4	Perspektivische Division	8
3.5	Viewport-Transformation	9
4	OpenGL	10
4.1	Was ist OpenGL?	10
4.2	Rendering Pipeline	10
4.3	Shaders	10
5	3D-Objekte	12
5.1	OpenGL-Primitive	12
5.2	DrawElements	12
5.3	Vertex Buffer Object	12
6	Shader	14
6.1	Shader Programme kompilieren, linken & aktivieren	14
6.2	einfache Datentypen	14
6.3	Typen Qualifizierer	14
6.3.1	const	14

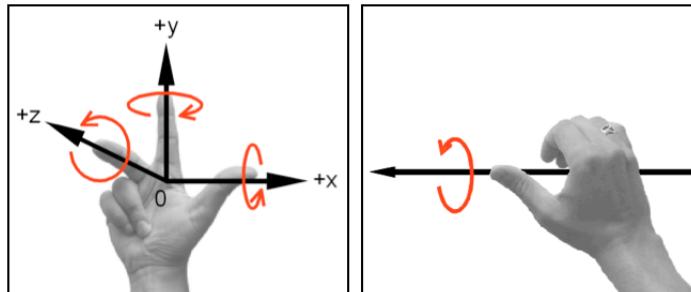
6.3.2	attribute	14
6.3.3	uniform	15
6.3.4	varying	15
7	Beleuchtung	16
7.1	Lichtquellen	16
7.2	Reflexion	16
7.2.1	Ambiente Reflexion	16
7.2.2	Diffuse Reflexion	16
7.2.3	Spiegelnde Reflexion	16
7.2.4	Lichtabnahme (Attenuierung)	17
7.3	Beleuchtungsmodell nach Phong	17
7.4	Erweiterungen im alten OpenGL Beleuchtungsmodell	17
7.5	Blinn's Halbvektor	17
7.6	Schattierung	17
7.6.1	Berechnung pro Dreieck: Flat Shading	17
7.6.2	Berechnung pro Vertex: Gouraud Shading	18
7.6.3	Berechnung pro Pixel: Phong Shading	18
8	Texture Mapping	19
8.1	verschiedene Texturen	19
8.2	Textur Abbildung	19
8.3	Texturfilterung	19
8.3.1	Point Sampling	19
8.3.2	Bilineare Filterung	19
8.3.3	MIP-Mapping	20
8.3.4	Trilineare Filterung	20
8.3.5	Anisotropische Filterung	20
8.4	Bump Mapping	21
8.4.1	Heightfield Bump Mapping	21
8.4.2	Normalmap Bump Mapping	21
8.4.3	Parallax Mapping	21
8.5	Texture Mapping in OpenGL	22
9	Frustum Culling	23
9.1	Ziel	23
9.2	Hüllvolumen	23
9.3	AABB (axis-aligned bounding box)	23
10	Alpha Blending	24
10.1	Einleitung	24
10.2	Berechnung	24
10.3	Zeichnungsreihenfolge	24
11	Deferred Shading	25
11.1	Prinzip	25
11.2	Vorteile	25
11.3	Nachteile	25
11.4	OpenGL	25
11.4.1	Framebuffer objects	25
11.4.2	FBO relevant API	26
12	Shadow Rendering	27
12.1	Shadow Maps	27
12.2	Cascade Shadow Maps	27
12.3	Vergleich	27
13	Stereoprojektion	28

13.1 Raumwahrnehmung	28
13.1.1 Teufenunschärfe	28
13.1.2 Abnehmende Grösse	28
13.1.3 Zunehmender Dunst	28
13.1.4 Schettenbildung	28
13.1.5 Bewegungsparallaxe	28
13.2 Stereobildwiedergabe	28
13.2.1 Projektion nebeneinander	28
13.2.2 Projektionen übereinander	28
13.3 Projektionstransformation für Stereobildpaare	29
13.3.1 Positive, negative oder null Parallaxe	29
13.3.2 Symmetrische oder asymmetrische Projektion	30
13.4 Stereobildübertragung	30
14 Globale Beleuchtungsmodelle	32
14.1 Beleuchtungsgleichung	32
14.2 Bidirektionale Reflectance Distribution Function (BRDF)	32
14.2.1 Eigenschaften	32
14.3 Lichtweg-Notation	33
15 Ray Tracing	34
15.1 Photon Tracing	34
15.2 Raytracing	34
15.3 Distributed Raytracing	34
15.4 Radiosity	35
15.5 Path Tracing	36
15.5.1 Schnittpunkt Behandlung	36
15.5.2 Lösen der Rendering-Gleichung durch Monte-Carlo Integration	36
15.6 Bidirektionales Path Tracing	37
15.7 Photon Mapping	37
15.7.1 Photon Tracing	37
15.7.2 Rendering	38
16 RayTracing Verbesserungen	39
16.1 Irradiance Caching	39
16.2 Light Cuts	39
16.3 Raumunterteilung	39

1 Mathematische Grundlagen

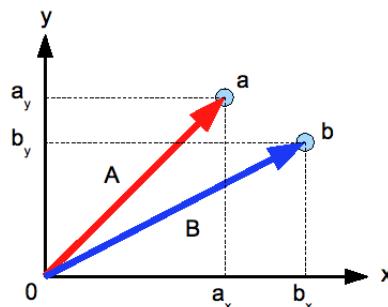
1.1 Euklidischer Raum

- OpenGL benutzt das rechtshändige Koordinatensystem. Direct3D oder der Raytracer POVRay benutzen das links-händige System.
- Nehmen Sie die rechte Hand, streckt den Daumen nach rechts, den Zeigefinger nach oben und den Mittelfinger nach vorne.
- Die Finger zeigen dabei in die positiven Richtungen der x-, y- und z-Achse.
- Die Drehwinkel werden im Gegenuhrzeigersinn gemessen.



1.2 Vektoren

- Vektoren haben eine Richtung und eine Länge aber KEIN Ort.
- Punkte im Raum können durch Ortsvektoren beschrieben werden.
- Sie werden als n-Tupel, als geordnete Liste von reellen Zahlen beschrieben
- Punkte sind Orte, Vektoren sind Richtungen



1.2.1 Addition

$$C = A + B = \begin{bmatrix} a_0 + b_0 \\ a_1 + b_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} + b_{n-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n \quad (1)$$

1.2.2 skalare Multiplikation

$$s * A = \begin{bmatrix} s * a_0 \\ s * a_1 \\ \vdots \\ s * a_{n-1} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n \quad (2)$$

1.2.3 Betrag

$$\text{Länge} = |A| = \sqrt{A * A} = \sqrt{a_0^2 + a_1^2 + \dots + a_{n-1}^2} \quad (3)$$

1.2.4 Einheitsvektor

Ein Vektor mit der Länge 1 wird Einheitsvektor bezeichnet

$$E = \frac{1}{|A|} * A = \frac{1}{\sqrt{a_0^2 + a_1^2 + \dots + a_{n-1}^2}} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.2.5 Skalarprodukt

$$A \bullet B = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot b_i \quad (5)$$

Das Skalarprodukt wird häufig zur Beantwortung der Frage benutzt wie ein Vektor A zu einer Fläche bzw. zu deren Normalen N steht. Sit das Skalarprodukt $N \bullet A$ positiv, so zeigt A von der Flächenvorderseite weg.

$$A \bullet B = |A| * |B| * \cos(\alpha) \quad (6)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{A \bullet B}{|A| * |B|} \quad (7)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{p}{|A|} \quad (8)$$

$$\text{Projektion} = p = \cos(\alpha) * |A| = \frac{A \bullet B}{|B|} \quad (9)$$

1.2.6 Vektorprodukt

Der resultierende Vektor N steht senkrecht auf den Vektoren A und B

$$N = A \times B = \begin{bmatrix} a_1 * b_2 - a_2 * b_1 \\ a_2 * b_0 - a_0 * b_2 \\ a_0 * b_1 - a_1 * b_0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n \quad (10)$$

1.3 Matrizen

Eine Matrix ist ein rechteckiges Schema von reellen Zahlen mit n_x Zeilen und n_y Spalten

$$A_{n_x \times n_y} = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,n_y-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,n_y-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n_x-1,0} & a_{n_x-1,1} & \dots & a_{n_x-1,n_y-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

1.3.1 Einheitsmatrix

Wird ein Vektor damit transformiert resultiert daraus derselbe Vektor

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

1.3.2 Transponierte Matrix

Bei der transponierten Matrix sind die Spalten und Zeilen vertauscht

$$A_{nx \times ny}^T = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{1,0} & \dots & a_{nx-1,0} \\ a_{0,1} & a_{1,1} & \dots & a_{nx-1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{0,ny-1} & a_{1,ny-1} & \dots & a_{nx-1,ny-1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

1.3.3 Multiplikation

$$C_{m \times p} = A_{m \times n} * B_{n \times p} \quad (14)$$

$$= \begin{bmatrix} a_{0,0} & \dots & a_{a,n-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m-1,0} & \dots & a_{m-1,n-1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a_{0,0} & \dots & a_{a,p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n-1,0} & \dots & a_{n-1,p-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} a_{0,i} * b_{i,0} & \dots & \sum_{i=0}^{n-1} a_{0,i} * b_{i,p-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{m-1} a_{0,i} * b_{i,0} & \dots & \sum_{i=0}^{m-1} a_{0,i} * b_{i,p-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

1.4 Homogene Koordinaten

Man kann Transformationen einfacher handhaben und miteinander kombinieren, wenn sie sich alle einheitlich, durch eine Multiplikation beschreiben lassen. Dies lässt sich durch sogenannte homogene Koordinaten erreichen. In der homogenen Darstellung werden die Koordinaten des Punktes P um eine weitere Komponente w ergänzt.

$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} \quad (17)$$

Mit homogenen Koordinaten gibt es unendlich viele Repräsentationen eines Punktes. Die Normalisierung wird mit der Division durch w erreicht. Um diesen Schritt zu umgehen, benutzt man deshalb die Standarddarstellung mit $w = 1.0$. Ist die Komponente $w = 0$, so liegt der repräsentierte Punkt im Unendlichen (Division durch 0!). Seine Koordinaten legen dann lediglich die Richtung fest, in der der Punkt im Unendlichen liegt.

1.5 2D-Transformationen

1.5.1 Translation

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

1.5.2 Skalierung

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

1.5.3 Scherung

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h_{xy} & 0 \\ h_{xy} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

1.5.4 Rotation

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

1.6 3D-Transformationen

1.6.1 Translation

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

1.6.2 Skalierung

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

1.6.3 Scherung

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h_{xy} & h_{xz} & 0 \\ h_{xy} & 1 & h_{yz} & 0 \\ h_{zx} & h_{zy} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

1.6.4 Rotation

Rotation um die x-Achse:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Rotation um die y-Achse:

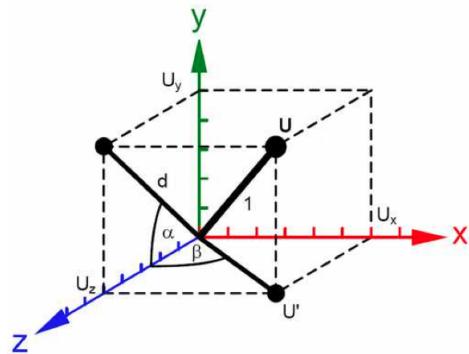
$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Rotation um die z-Achse:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

1.6.5 Rotation um eine beliebige Achse

1. Drehen um α um die x-Achse
2. Drehen um $-\beta$ um die y-Achse
3. Drehen um φ um die z-Achse
4. Raum zurückdrehen: β um y-Achse, $-\alpha$ um x Achse



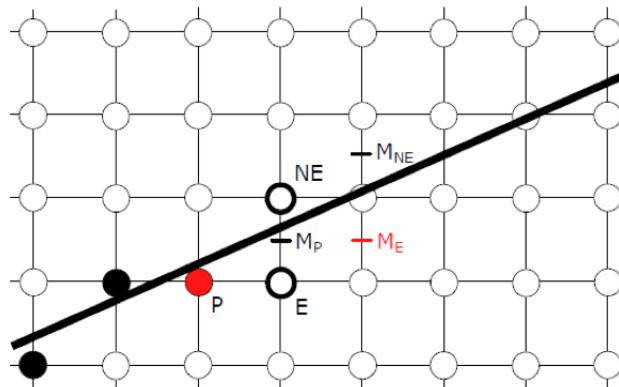
2 Rasteralgorithmen

2.1 Inkrementeller Algorithmus

Listing 1: Inkrementeller Algorithmus

```
1 void LineIncrement(int x0, int y0, int x1, int y1) {
    int dy=y1-y0;
    int dx = x1 - x0;
    float t = 0.5f; // offset
    drawPoint(x0, y0);
6   if (Abs(dx) > Abs(dy)) {
        float m = (float) dy / (float) dx;
        t = t + y0; // Initialisieren von y
        dx = (dx < 0) ? -1 : 1;
        m = m * dx; // Teilstieigung berechnen
11  while (x0 != x1) {
            x0 = x0+dx;
            t = t + m; // Steigung zu y addieren
            drawPoint(x0, (int) t); // Runden durch Casting
        } else {...}
16 }
}
```

2.2 Bresenham Algorithmus



Listing 2: Bresenham Algorithmus

```
void Line_Bresenham(int x0, int y0, int x1, int y1) {
    int dy =y1-y0;
3   int dx = x1 - x0;
    int deltaE = (dy<<1) - (dx<<1);
    int deltaNE = (dy<<1);

    int stepx, stepy;
8   if(dy<0){dy=-dy; stepy=-1;} else {stepy=1;}
    if(dx<0){dx=-dx; stepx=-1;} else {stepx=1;

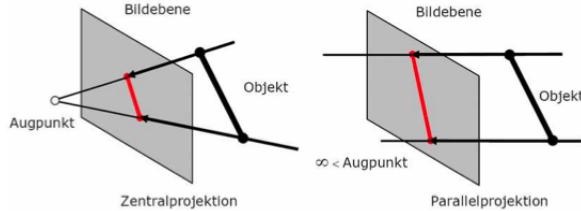
    drawPoint(x0, y0);

13  if (dx > dy) {
        int D = (dy<<1) - dx;
        while (x0 != x1) {
            if(D<0) { D=D+deltaE; }
            else { y0=y0+stepy; D = D + deltaNE; }
18        x0 = x0 + stepx;
            drawPoint(x0, y0);
        } else {...}
    }
}
```

3 Perspektive: 3D auf 2D

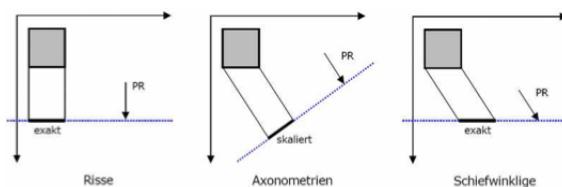
3.1 Kategorien der Projektionen

Es gibt zwei Arten von Projektionen: perspektivische und parallele. Bei Parallelprojektionen ist der Blickpunkt unendlich weit entfernt, wodurch sich parallele Projektionsstrahlen ergeben. Im Gegensatz dazu führen die Projektionsstrahlen bei Zentralprojektionen ins Zentrum, in den Blickpunkt.



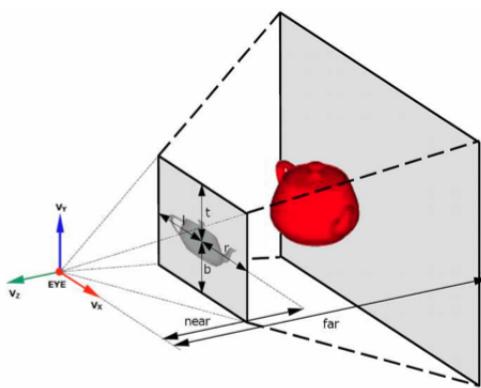
3.2 Parallelprojektion

Bei Parallelprojektionen sind die Projektionsstrahlen parallel zueinander. Sie können gegen die Projektionsebene schief oder senkrecht (orthogonal) stehen. Parallelprojektionen werden vor allem in technischen Zeichnungen verwendet, um die Tiefeninformationen ablesbar zu halten. Im Gegensatz zur Perspektive sind weiter entfernte Objekte nicht kleiner als nahe Objekte.



3.3 Zentralprojektion

Durch die Zusammenführung der Projektionsstrahlen im Projektionszentrum entsteht eine optische Tiefenwirkung. Das Sichtvolumen (Englisch für View Frustum) entspricht bei der perspektivischen Projektion einem Pyramidenstumpf. Es wird wie das orthogonale Sichtvolumen durch die Parameter $t=\text{top}$, $l=\text{left}$, $r=\text{right}$, $b=\text{bottom}$, $n=\text{near}$ und $f=\text{far}$ definiert:



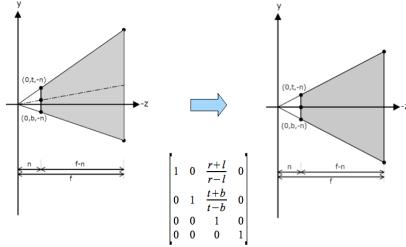
3.4 Projektionstransformation

Wir können View-Koordinaten nicht auf die Near-Clipping Plane projizieren. Ein zusätzlicher Schritt, die perspektivische Normalisierung, ist notwendig. Die perspektivische Transformation kann in vier Schritte zerlegen werden:

1. Scherung H in eine orthogonale Sichtpyramide
2. Skalierung S in ein kanonisches Sichtvolumen
3. Projektive Transformation N in einen Sichtwürfel
4. Perspektivische Division

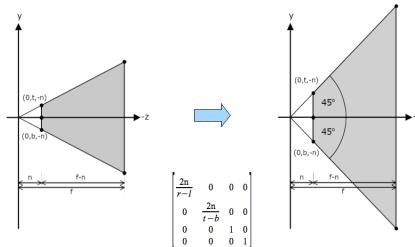
3.4.1 Schritt 1: Scherung H in eine orthogonale Sichtpyramide

Ist die Blickrichtung (Mittellinie der Pyramide) nicht parallel zur negativen z-Achse und somit nicht rechtwinklig zur Projektionsfläche, so muss sie zuerst mit einer Scherung H mit der z-Achse in Übereinstimmung gebracht werden.

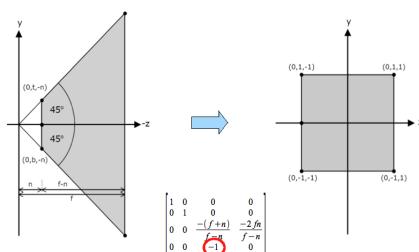


3.4.2 Skalierung S in ein kanonisches Sichtvolumen

Stimmt die Blickrichtung mit der negativen z-Achse überein, so wird zur Vereinfachung der perspektivischen Normalisierung im nächsten Schritt mit einer Skalierung S das Sichtvolumen in eine Sichtpyramide transformiert. Die Skalierung betrifft ebenfalls nur die x- und y-Koordinaten.



3.4.3 Projektive Transformation N in einen Sichtwürfel



3.4.4 Perspektivische Division

Die perspektivische Projektion transformiert die View-Koordinaten in homogene sogenannte Clip-Koordinaten (C_X, C_Y, C_Z, C_W). Mit diesen Koordinaten wird in einem nächsten Zwischenschritt das 3D-Clipping durchgeführt. Polygone, die aus der Projektionsebene hinausragen, werden abgeschnitten.

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ C_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} & 0 & \frac{r+l}{r-l} & 0 \\ 0 & \frac{2n}{t-b} & \frac{t+b}{t-b} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$C_x = \frac{2n}{r-l} V_x + \frac{r+l}{r-l} V_z$$

$$C_y = \frac{2n}{t-b} V_y + \frac{t+b}{t-b} V_z$$

$$C_z = \frac{-(f+n)}{f-n} V_z + \frac{-2fn}{f-n}$$

$$C_w = -V_z$$

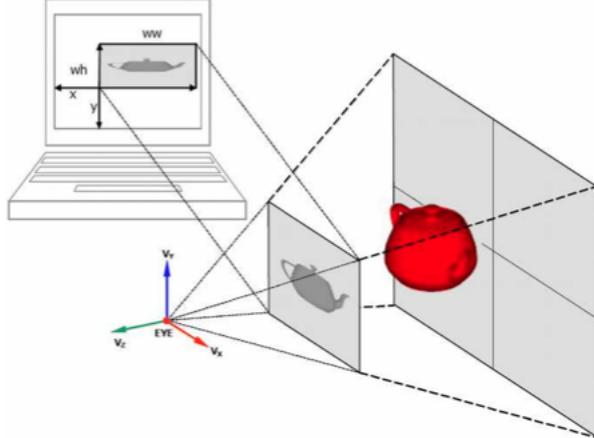
Um die gewünschten normalisierten Device-Koordinaten (NDC) (D_X, D_Y, D_Z) zu erhalten, muss nach dem Clipping die Division durch C_W durchgeführt werden. Dieser Schritt wird auch perspektivische Division genannt:

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x/C_w \\ C_y/C_w \\ C_z/C_w \\ C_w/C_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2n}{r-l} V_x + \frac{r+l}{r-l} V_z / -V_z \\ \frac{2n}{t-b} V_y + \frac{t+b}{t-b} V_z / -V_z \\ \frac{-(f+n)}{f-n} V_z + \frac{-2fn}{f-n} / -V_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad D_x, D_y, D_z \in [-1, 1]$$

3.5 Viewport-Transformation

Wir sind mit der Projektionstransformation noch nicht ganz am Ende angelangt. Es fehlt noch die Umrechnung von den normalisierten Device-Koordinaten (D_X, D_Y, D_Z) der virtuellen Projektionsebene zu den Fensterkoordinaten (S_X, S_Y) und dem Tiefenbufferwert S_Z zwischen n und f . Für ein Fenster mit den Fensterkoordinaten von $[x, y]$ unten-links bis $[ww, wh]$ oben-rechts und einem Tiefenbuffer mit Werten zwischen n und f (bei OpenGL normalerweise 0-1) ergäbe sich eine Viewport-Matrix wie folgt:

$$\begin{bmatrix} S_x \in [x, ww] \\ S_y \in [y, wh] \\ S_z \in [n, f] \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ww}{2} & 0 & 0 & \frac{x+ww}{2} \\ 0 & \frac{wh}{2} & 0 & \frac{y+wh}{2} \\ 0 & 0 & \frac{f-n}{2} & \frac{f+n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$



4 OpenGL

4.1 Was ist OpenGL?

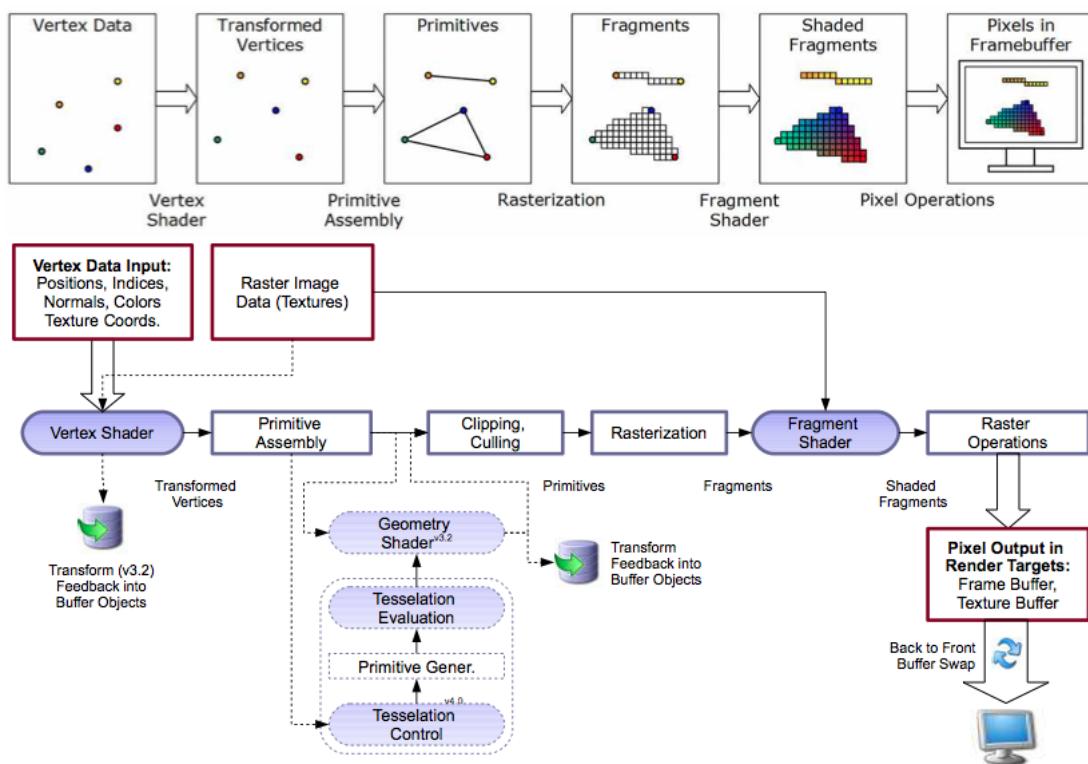
OpenGL ist ein Software-Interface zur Grafik-Hardware. Das Ziel ist die Echtzeitdarstellung (**Realtime Rendering**) von **2D- und 3D-Objekten**. Die Objekte werden durch Raumpunkte (**Vertizes**) definiert und können durch eine beliebige Transformation auf ein Ausgaberechteck (**Viewport**) projiziert werden. Die Farbe von jedem Pixel im Ausgabebild kann durch Berechnung und/oder durch Belegung mit Rasterbildern (**Texture Mapping**) bestimmt werden.

OpenGL bietet keine Funktionalität für die Anbindung an ein GUI oder andere betriebssystemabhängige Dienste. Diese werden von den jeweiligen Betriebssystemen bereitgestellt. OpenGL bietet nur primitive geometrische Objekte (Punkte, Linien und Dreiecke) an.

OpenGL ist eine Zustandsmaschine (**State Machine**). Zu jedem Zeitpunkt des Rendering-Prozesses herrscht ein gültiger Zustand. Wird ein Zustand durch ein Ereignis verändert, gilt dieser für alle nachfolgenden Objekte so lange, bis der Zustand wieder verändert wird. Das Setzen der aktuellen Farbe bestimmt z. B. den Zustand der Farbe. Dieser gilt fortan für alle folgenden Objekte, bis der Farbzustand wieder verändert wird. Jede Zustandsvariable hat einen Defaultwert. Der aktuelle Wert eines Zustandes kann mit einer `glGet*`() Funktion abgefragt werden. Bestimmte Zustände können aktiviert oder deaktiviert werden mit `glEnable` und `glDisable`.

Das OpenGL API funktioniert nach dem Client/Server Modell, wobei der Client die Applikation und die OpenGL-Implementation der Server ist.

4.2 Rendering Pipeline



4.3 Shaders

Bei der Initialisierung in `onInit` werden der Quellcode des Vertex Shaders und des Fragment Shaders mit `loadShader` geladen und mit `buildShader` und `buildProgram` kompiliert und zu einem Programm gelinkt.

Listing 3: Minimaler Vertex Shader

```
attribute vec4 a_position; // Vertex position attribute
uniform vec4 u_color; // uniform color
uniform mat4 u_mvpMatrix; // = projection * modelView
varying vec4 v_color; // Resulting color per vertex

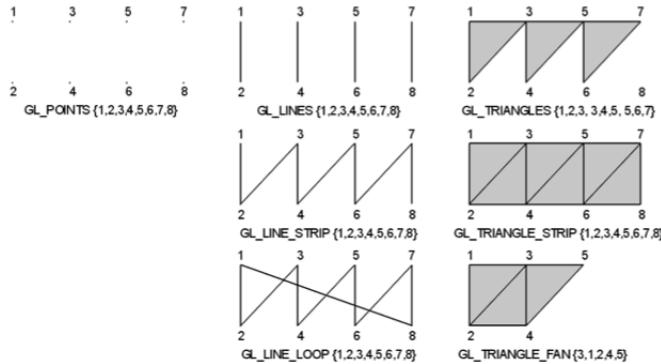
void main(void) {
    v_color = u_color; // pass color for interpolation
    gl_Position = u_mvpMatrix * a_position; // transform vertex position
}
```

Listing 4: Minimaler Fragment Shader

```
1 varying vec4 v_col;
void main(void) {
    gl_FragColor = v_col; // Set the interpolated color to the output color
}
```

5 3D-Objekte

5.1 OpenGL-Primitive



5.2 DrawElements

Mit dem Zeichnungsbefehl **glDrawArrays** werden OpenGL-Primitive direkt mit der Vertex-reihenfolge erzeugt. Wird ein Vertex mehrfach in der Geometrie verwendet, so muss er also auch mehrfach im Array vorhanden sein.

Mit dem Zeichnungsbefehl **glDrawElements** werden OpenGL-Primitive anhand eines Index-Arrays gezeichnet. Ein mehrfach vorkommender Vertex muss so nur einmal im Array vorkommen und kann via Index mehrfach referenziert werden. Die Vertexposition verbraucht immerhin 12 Bytes, während ein Index je nach unsigned Datentyp nur 1-4 Bytes belegt.

Listing 5: Draw Elements

```
1 // Transform 2 units to the left & rebuild mvp
  _modelViewMatrix.translate(1.5f, 0.0f, 0.0f);
  mvp.setMatrix(_projectionMatrix * _modelViewMatrix);

  // Pass updated mvp and set the red color
6 glUniformMatrix4fv(_mvpLoc, 1, 0, (float*)&mvp);
  glUniform4f(_matDiffLoc, 0.0f, 1.0f, 0.0f, 1.0f);

  // Set the vertex attribute pointers to the array of structs
  GLsizei stride = sizeof(VertexPN);
11 glVertexAttribPointer(_pLoc, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, stride, &_v[0].p.x);
  glVertexAttribPointer(_nLoc, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, stride, &_v[0].n.x);

  // Draw cube with triangles by indexes
  glDrawElements(GL_TRIANGLES, 36, GL_UNSIGNED_BYTE, &i);
```

5.3 Vertex Buffer Object

Mit jedem Aufruf der Zeichnungsbefehle **glDrawArrays** und **glDrawElements** werden die Vertex-Arrays vom Hauptspeicher über den Datenbus auf die Grafikkarte kopiert. Dies ist unumgänglich, wenn sich die Vertexdaten sehr schnell ändern würden. Die allermeisten Objekte bleiben aber über viele Frames, wenn nicht gar für immer gleich. Auch wenn die Objekte sich bewegen, so ändern wir ja nur Transformationsmatrizen und nicht die Struktur der Dreiecksnetze. Es würde also Sinn machen, wenn wir die Vertex-Arrays im RAM der Grafikkarte speichern könnten und der Kopiervorgang nur einmal durchgeführt werden müsste. Genau diese Möglichkeit bieten uns die Vertex Buffer Objekte.

Listing 6: VBO erstellen

```
void buildVBO(GLuint &vboID, void* dataPointer, GLint numElements, GLint elementSize,
  GLuint typeSize, GLuint targetTypeGL, GLuint usageTypeGL) {
```

```
// if buffer exist delete it first
5   if (vboID) glDeleteBuffers(1, &vboID);

// Generate a buffer id
glGenBuffers(1, &vboID);

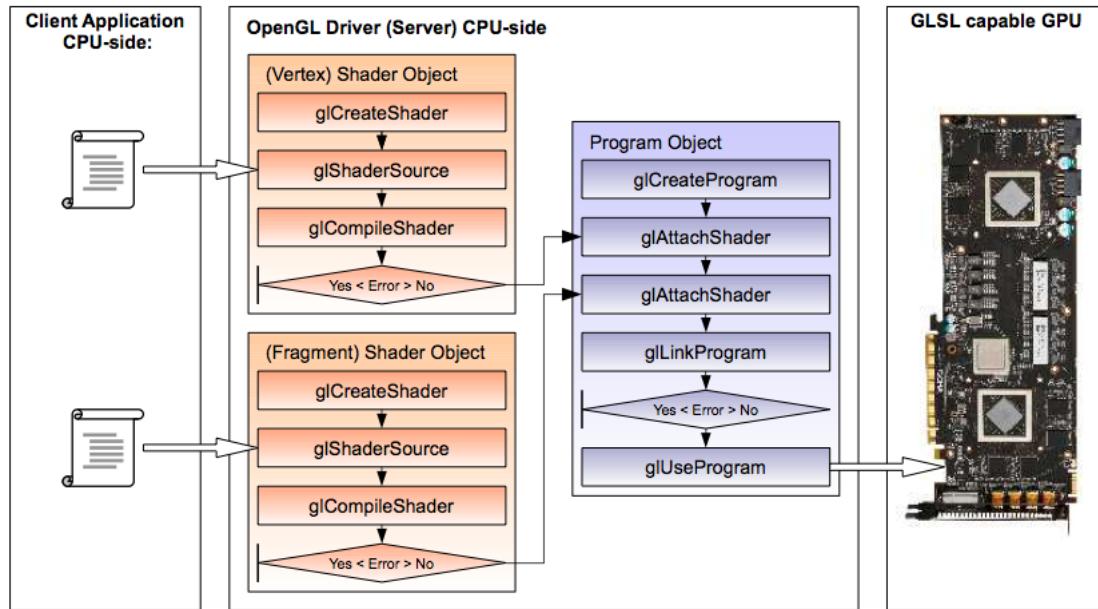
// binds (activates) the buffer that is used next
10  glBindBuffer(targetTypeGL, vboID);

// determine the buffersize in bytes
SLint bufSize = numElements * elementSize * typeSize;

15 // copy data to the VBO on the GPU. The data could be deleted afterwards.
    glBindBufferData(targetTypeGL, bufSize, dataPointer, usageTypeGL);
    glBindBuffer(targetTypeGL, 0);
}
```

6 Shader

6.1 Shader Programme kompilieren, linken & aktivieren



6.2 einfache Datentypen

Listing 7: Datentypen

```
void          // Datentyp fuer Funktionen ohne Rueckgabewert
2 float       // Gleitkomma Variable nach IEEE Single Precision Definition
int          // Integer Variable mit 32 bit
uint         // Unsigned Integer Variable mit 32 Bit
bool         // Boolesche Variable (true/false)
vec2, vec3, vec4 // Gleitkomma Vektor mit 2, 3, oder 4 Komponenten
7 ivec2, ivec3, ivec4 // Integer Vektor mit 2, 3, oder 4 Komponenten
uvec2, uvec3, uvec4 // Unsigned Integer Vektor mit 2, 3, oder 4 Komponenten
bvec2, bvec3, bvec4 // Boolescher Vektor mit 2, 3, oder 4 Komponenten
mat2, mat3, mat4 // Matrix mit 2x2, 3x3 oder 4x4 Gleitkomma Komponenten
mat2x3, mat2x4 // Matrix mit 2 Spalten und 3 oder 4 Zeilen
12 mat3x4      // Matrix mit 3 Spalten und 4 Zeilen
sampler1D ,2D ,3D // Texturzugriffsdatentyp fuer 1D-, 2D-, oder 3D-Texturen
samplerCube    // Texturdatentyp fuer Cube Mapping Zugriff
```

6.3 Typen Qualifizierer

6.3.1 const

- Konstanten müssen bei der Deklaration initialisiert werden.
- Kann benutzerdefiniert sein.
- Kann vordefiniert sein durch GLSL.

6.3.2 attribute

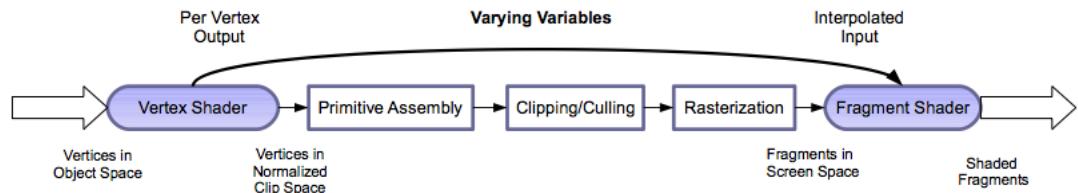
Mit attribute qualifizierte Variablen dienen als Übergabeparameter der Vertex-Attribute vom Hauptprogramm ans Vertex-Programm. Die Werte können mit jedem Vertex ändern.

6.3.3 uniform

Als uniform qualifizierte Variablen dienen als Übergabeparameter vom Hauptprogramm in ein Vertex- oder Fragment-Programm. Deren Werte bleiben für einen ganzen Zeichnungsbefehl konstant.

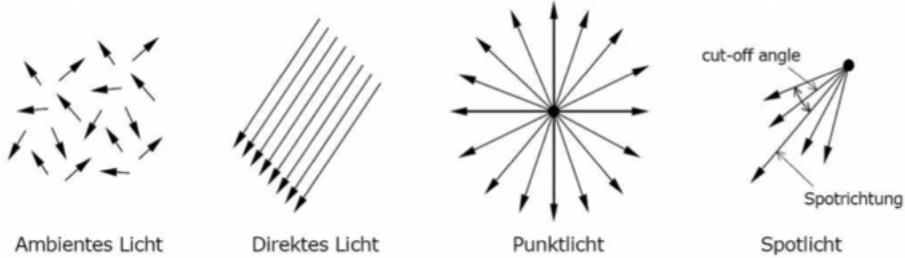
6.3.4 varying

Als varying qualifizierte Variablen dienen als Übergabeparameter vom Vertex- zum Fragment-Programm. Der Wert einer Varying-Variable wird im Vertex-Programm gesetzt und steht dann über das Primitiv interpoliert im Fragment-Programm zur Verfügung.



7 Beleuchtung

7.1 Lichtquellen



7.2 Reflexion

7.2.1 Ambiente Reflexion

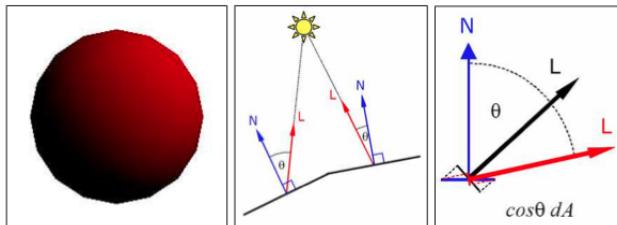
I_a bezeichnet darin die konstante, ambiente Lichtintensität und k_a den ambienten Reflexionskoeffizienten (zw. 0 und 1) des reflektierenden Materials.

$$I_{ambi} = I_a * k_a \quad (29)$$

7.2.2 Diffuse Reflexion

I_d bezeichnet darin die konstante, diffuse Lichtintensität und k_d den diffusen Reflexionskoeffizienten (zw. 0 und 1). Wenn N und L normalisiert sind, kann der Kosinus durch das Skalarprodukt beider Vektoren ersetzt werden.

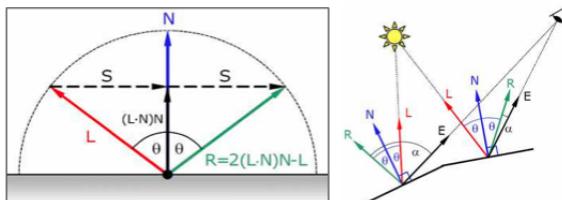
$$I_{diff} = I_d * k_d * max(\cos(\theta), 0) = I_d * k_d * max(N \bullet L, 0) \quad (30)$$



7.2.3 Spiegelnde Reflexion

Die Menge des reflektierten Lichts ist vom Beobachterstandpunkt abhängig bzw. vom Winkel α zwischen dem Beobachtungsvektor E (eye) und dem reflektierten Strahl R , sowie von einer Materialbeschaffenheit n bezüglich der Reflektierbarkeit (Shininess) ab. I_s bezeichnet die konstante, spiegelnde Lichtintensität und k_s den spiegelnden Reflexionskoeffizienten (zw. 0 und 1).

$$I_{spec} = I_s * k_s * max(\cos(\alpha), 0)^n = I_s * k_s * max(R \bullet E, 0)^n \quad (31)$$



7.2.4 Lichtabnahme (Attenuierung)

Bevor wir alles zusammenstellen können, müssen wir noch die Energieabnahme des Lichts (Lichtabnahme) in Abhängigkeit der Distanz berücksichtigen. Darin sind c_1 , c_2 und c_3 Konstanten für die konstante, die lineare und die quadratische Lichtabnahme in Abhängigkeit der Distanz d . Diese Lichtabnahme wirkt nur auf die diffuse und die spiegelnde Reflexion.

$$f_{att} = \min\left(\frac{1}{c_1 + c_2 * d + c_3 * d^2}, 1\right) \quad (32)$$

7.3 Beleuchtungsmodell nach Phong

$$I_{Phong} = I_{amb} + \sum_{i=0}^{lights-1} f_{att} * (I_{diff} + I_{spec}) \quad (33)$$

7.4 Erweiterungen im alten OpenGL Beleuchtungsmodell

$$I_{OpenGL} = k_e + I_{aglobal} * k_{aglobal} + \sum_{i=0}^{lights-1} f_{att} * S_{spott} * (I_{ambi} + I_{diff} + I_{spec}) \quad (34)$$

Emittierende Farbintensität k_e für selbststrahlende Objekte

Globale ambiente Hintergrundintensität $I_{aglobal}$ unabhängig von einer Lichtquelle

Spotlichteffekt S_{spot} bewirkt die Begrenzung des Spotlights und eine Lichtabnahme innerhalb des Lichtkegels von der Spotachse zum Kegelrand bewirkt. Der Wert von SspotEffect ist:

- 1, wenn das Licht kein Spotlight ist (Cut-Off Winkel=180).
- 0, wenn das Licht ein Spotlight ist, der Vertex aber ausserhalb des Spotkegels ist.
- $\max(L \bullet S, 0)^{spotexp}$, wobei L der Vektor von der Vertexposition zum Licht ist und S die Spotrichtung und spotexp ein Exponent zwischen 0 und 128. Standardwert ist 0.
- Ein zunehmender Exponent bewirkt eine Abnahme des Lichtes zum Kegelrand.

7.5 Blinn's Halbvektor

Jim Blinn steuerte eine vereinfachte Berechnung des spekulären Anteils bei, indem er den Winkel zwischen der Normalen N und einem Halbvektor H berechnet. H ist der normalisierte Halbvektor zwischen der Blickrichtung E und der Lichtrichtung L.

$$I_{specBlinn} = I_s * k_s * \max(N \bullet H, 0)^n \quad (35)$$

$$(R \bullet E)^n \approx (N \bullet H)^{4n} \quad (36)$$

7.6 Schattierung

7.6.1 Berechnung pro Dreieck: Flat Shading

Im alten OpenGL war es möglich die Beleuchtungsrechnung auf den letzten Vertex eines Polygons zu beschränken. Dies bewirkte eine flache Schattierung und war die einfachste und schnellste Beleuchtung.

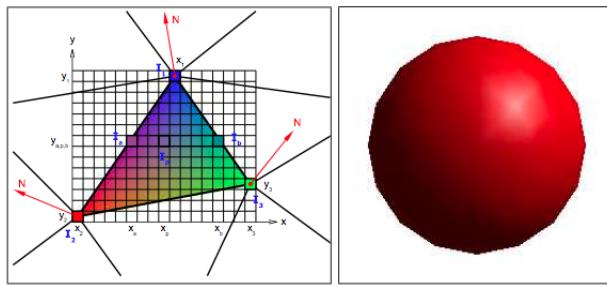
7.6.2 Berechnung pro Vertex: Gouraud Shading

Im alten OpenGL wurde die Blinn'sche Version des Phong Modells pro Vertex gerechnet und die Farbwerte dann über das Polygon interpoliert. Dabei werden die Farbwerte zwischen den Eckpunkten eines Polygons linear interpoliert. Der Scanline Algorithmus wird in folgende Schritte gegliedert:

1. An allen Ecken eines Dreiecks müssen die Normalen definiert sein, die aus den Flächenormalen der jeweiligen Nachbardreiecke gemittelt wurden.
2. Die Farbwerte an den Ecken gemäss Beleuchtungsmodell bestimmen.
3. Pixelzeile für Pixelzeile werden die Kantenwerte linear interpoliert.
4. Pixelintensitäten berechnen durch Interpolation zwischen den Werten.

Nachteile:

- Ungenaue Glanzlichter
- Keine Lichtkegel
- Keine perspektivische Verzerrungen
- Abhängigkeit von der Orientierung
- Nicht repräsentative Knotennormalen

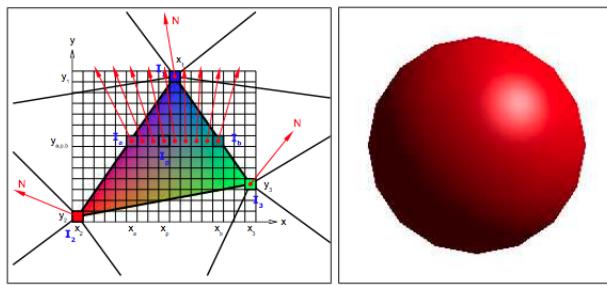


7.6.3 Berechnung pro Pixel: Phong Shading

Es liegt auf der Hand, dass die Phong Shading wesentlich aufwendiger ist, wenn die gesamte Rechnung pro Pixel anstatt nur pro Vertex gemacht werden muss. Zusätzlich muss ja vorgängig für jedes Pixel eine interpolierte Normale und Pixelposition berechnet werden.

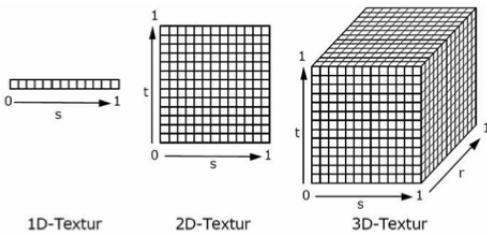
Nachteile:

- Polygonale Silhouetten
- Spotlichtgrenzen nicht auf Kugeloberflächen

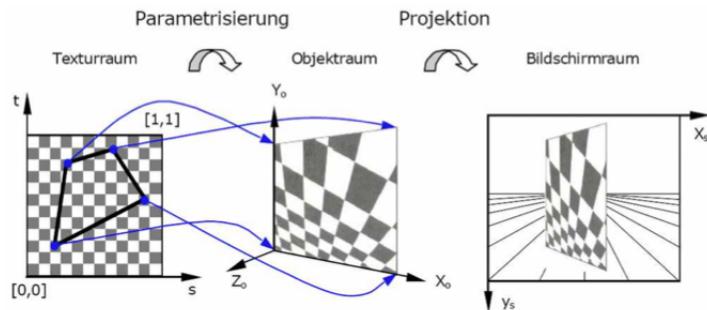


8 Texture Mapping

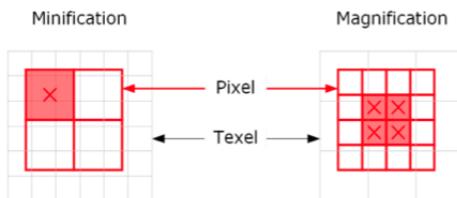
8.1 verschiedene Texturen



8.2 Textur Abbildung



8.3 Texturfilterung

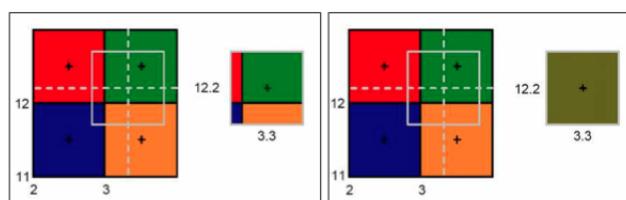


8.3.1 Point Sampling

Wird keine Filterung angewendet, so wird nach der Point Sampling oder Nearest Neighbour Methode gearbeitet, bei der das dem Pixelzentrum (Kreuz) am nächsten liegende Texel verwendet wird. Dies ist also im Prinzip nur ein Abschneiden der Nachkommastellen.

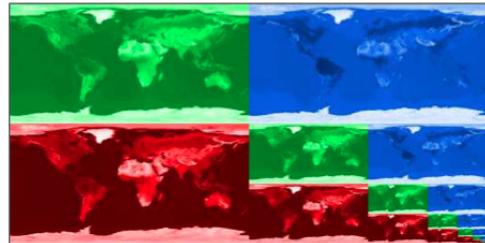
8.3.2 Bilineare Filterung

Bei der bilinearen Filterung werden die benachbarten Texel mit berücksichtigt. Da in X- und Y-Richtungen interpoliert wird, nennt man diesen Filter bi-linear.



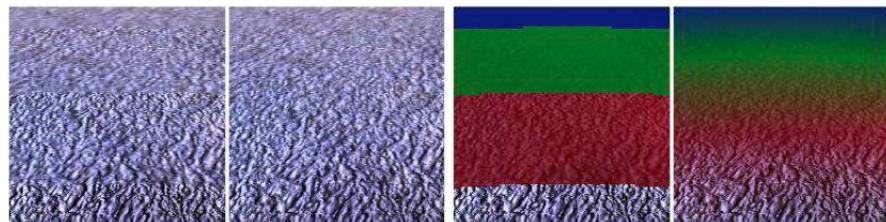
8.3.3 MIP-Mapping

Die Idee dahinter ist, eine Textur bereits vor der Anwendung mit mehreren Verkleinerungen anzulegen, um diese je nach Distanz zum Betrachter einzusetzen.



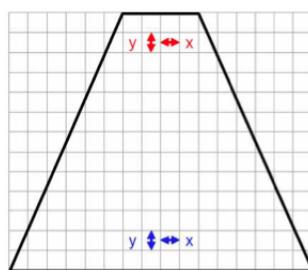
8.3.4 Trilineare Filterung

Der Übergang von einem MIP-Level zum nächsten fällt besonders bei grossen Flächen mit gleicher Textur auf. Die verschiedenen aufgelösten MIP-Level bilden dabei eine scharfe Kante. Beim trilinearen Filtern werden nun zuerst die entsprechenden Texel der zwei MIP-Levels bilinear gefiltert und diese dann noch einmal linear (eben tri) zwischen den beiden MIP-Levels.

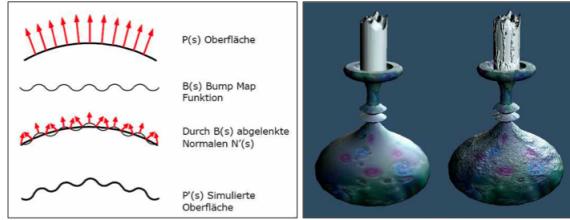


8.3.5 Anisotropische Filterung

Die trilineare Filterung hat nur noch einen Mangel. Die perspektivische Verzerrung wird zwar bei der Bestimmung der Texel-Position berücksichtigt, bei der bilinearen Interpolation fällt sie aber unter den Tisch. Man müsste Texturen, auf die man sehr schräg sieht, mit anderen Verfahren filtern als jene, auf die man senkrecht sieht. Da für beste Qualität nicht mehr isotrop, also gleichmäßig gefiltert werden kann, muss das ungleichmäßig (sprich anisotrop) getan werden. Beim bilinearen Filtern werden bekanntlich nur 4 Texel gemischt. Für den trilinearen Filter sind 2 bilinear gefilterte Texel.

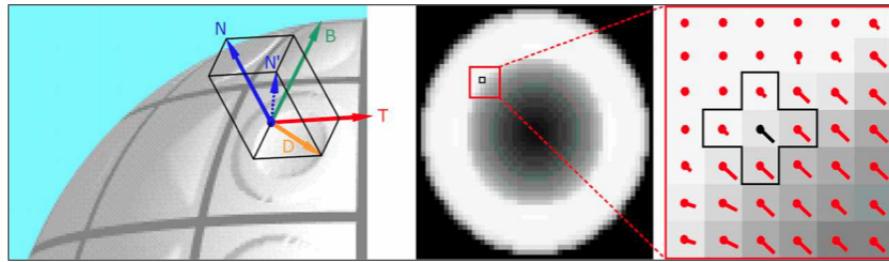


8.4 Bump Mapping



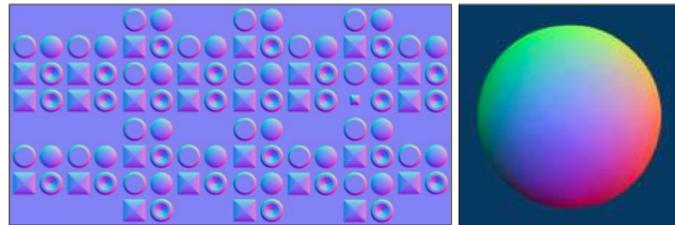
8.4.1 Heightfield Bump Mapping

Die Normale wird durch einen Vektor D abgelenkt, indem er zur Normalen hinzugefügt wird. Der Ablenkungsvektor D berechnet sich aus den Tangentialvektoren T und B (Binormale) sowie aus der partiellen Ableitung d (= Grauwertsteigung) bei der Texturkoordinate s,t in der Bumpmap.



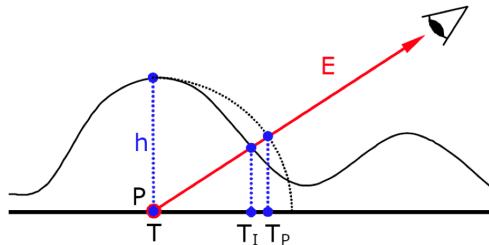
8.4.2 Normalmap Bump Mapping

Eine Verbesserung hinsichtlich der Performanz ist das sogenannte Normalmap Bump Mapping. Dabei wird die bereits abgelenkte Normale im Tangentenraum in einem RGB-Bild abgespeichert. Die Koordinatenkomponenten x , y und z entsprechen den Farbkomponenten r , g und b .



8.4.3 Parallax Mapping

Die Grundidee besteht darin die Texturkoordinaten (im Bild neben an nur die T -Komponente) so zu dehnen, dass wir sie den Höhen entsprechend richtig sehen. Für den Punkt P im Bild neben an würden wir ohne Parallax Mapping das Texel bei T erhalten, obwohl wir eigentlich die Farbe bei T_I (ideal) sehen sollten. Um diese Berechnung zu vereinfachen, beschränkt man den Versatz um die Höhe H entlang des Augvektors E .



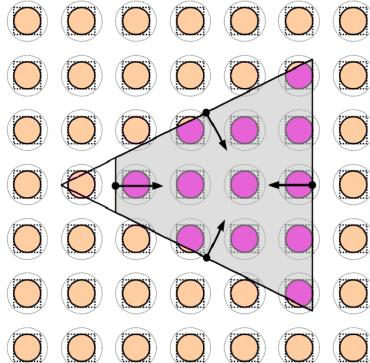
8.5 Texture Mapping in OpenGL

1. Texturnamen anlegen.
2. Textur binden (aktivieren).
3. Texturparameter setzen.
4. Texturdaten übergeben
5. Mipmap-Level generieren.

9 Frustum Culling

9.1 Ziel

Ziel ist es, nur Objekte durch die Pipeline zu schicken, die sichtbar sind:



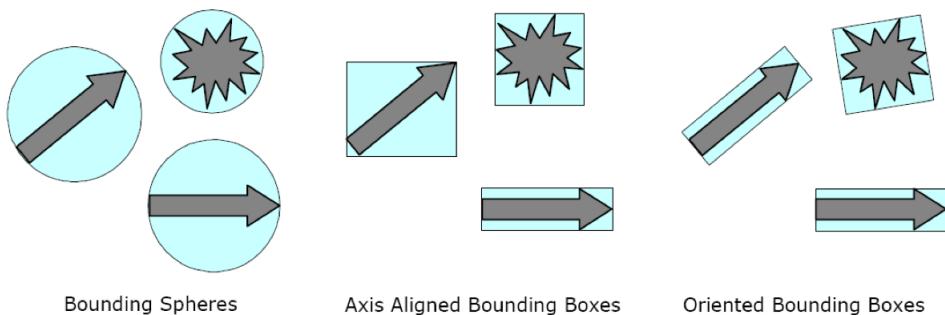
9.2 Hüllvolumen

Die Wahl des Hüllvolumens hängt von folgenden Kriterien ab:

- Passgenauigkeit des Hüllvolumens
- Kosten des Hüllvolumenschnitttests.
- Erstellungskosten des Hüllvolumens.

9.3 AABB (axis-aligned bounding box)

Die AABB für eine bestimmte Punktmenge ist die minimale bounding box mit der Einschränkung, dass die Kanten der Box parallel zu den (kartesischen) Koordinatenachsen sind. Es ist lediglich das kartesische Produkt der N Intervalle, von denen jeder durch den minimalen und maximalen Wert der entsprechenden Koordinaten, für die Punkte in S , definiert sind.



Aufwand für die Berechnung des Hüllvolumens für ein Objekt, dass sich bewegt muss unter Umständen von Frame zu Frame neu berechnet werden. Wissen wir nichts über die Struktur des zu umhüllenden Objekts, so ist die AABB mit Abstand am einfachsten zu berechnen. Wir suchen einfach das Minimum und das Maximum aller Koordinatenkomponenten.

Die kleinste umgebende Kugel zu finden ist dagegen viel aufwendiger. Der Aufwand lohnt sich meistens nicht, weshalb man eine Methode verwendet, die eine um ca. 5% grössere Kugel berechnen kann.

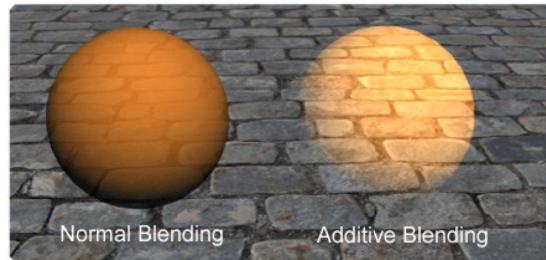
Um den kleinsten Kubus um n Punkte zu berechnen, verwendet man eine statistische Methode, genannt Principal Component Analysis. Man findet dabei die primären Achsen, entlang deren die Koordinaten am meisten variieren.

10 Alpha Blending

10.1 Einleitung

- Beim Alpha Blending wird eine neue Farbe mit der bestehenden vermischt.
- Der Alpha Wert ist der Dekungsgrad.
- Der Alpha Wert der Farbe ist der 4. Parameter bei den Farbangaben **RGBA**.

10.2 Berechnung



Normal Blending:

$$Color = C \cdot \alpha + C_{bg} \cdot (1 - \alpha) \quad (37)$$

Additive Blending:

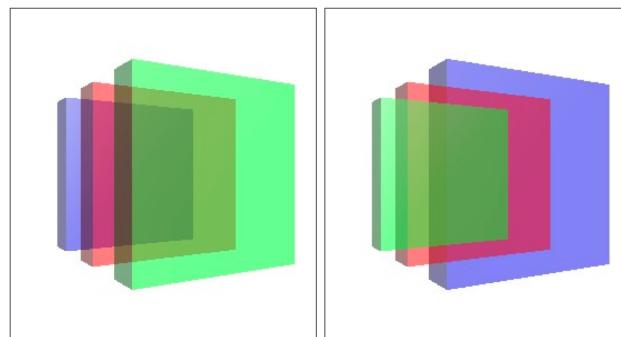
$$Color = C \cdot \alpha + C_{bg} \quad (38)$$

10.3 Zeichnungsreihenfolge

Zeichnungsreihenfolge ist entscheidend:

1. Alle opaques (=nicht-transparente) Objekte
2. Alle transparenten Objekte

In diesem Beispiel wurde zuerst die blaue Box, dann die rote Box und schlussendlich die grüne Box gezeichnet. Auf der rechten Seite wurde die selbe Reihenfolge benutzt aber die Ansicht wurde gedreht.



Eine korrekte Transparenz können wir nur erreichen, wenn wir zuerst undurchsichtige (Englisch: opaque) Objekte mit eingeschaltetem Z-Buffer und dann die transparenten Objekte, von hinten nach vorne sortiert, mit ausgeschaltetem Z-Buffer-Test zeichnen.

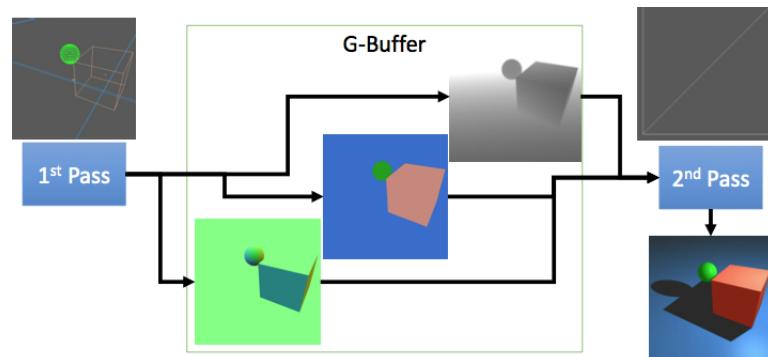
11 Deferred Shading

Methode um in dreidimensionalen Szenen die Geometrieverarbeitung von der Lichtberechnung zu trennen. So sind mehrere hundert dynamische Lichter in geometrisch komplexen Szenen möglich

11.1 Prinzip

In klassischen Rendermethoden wird anhand von Tiefe (depth), Ausrichtung (normals) und Farbe (albedo) eines Eckpunktes und Farbe, Intensität und Einfallswinkel einer Lichtquelle der finale Farbwert für den jeweiligen Eckpunkt ermittelt. Für jede Lichtquelle muss so jeder Eckpunkt zur Berechnung herangezogen werden.

Beim Deferred Shading werden nun Tiefenwert, Ausrichtung und Farbe eines jeden Pixels in jeweils eine Textur in Bildschirmgröße gespeichert. Dies wird durch sogenannte Multiple Render Targets ermöglicht, wobei in jedem Rendervorgang in verschiedene Framebufferobjekte (die Texturen) gleichzeitig geschrieben werden kann. Statt dass nun jeder Eckpunkt mit den Lichtquellen verrechnet werden muss, muss nur noch jedes Pixel (in dem alle benötigten Werte – depth, normals und albedo – vorhanden sind) bei der Berechnung berücksichtigt werden. Die Berechnung selbst erfolgt durch klassische Beleuchtungsmodelle, wie zum Beispiel nach Phong. Dabei kann zusätzlich noch Glanzlicht mit einbezogen werden. Technisch geschieht das im Pixel- bzw. Fragment-Shader am Ende der Grafikpipeline.



11.2 Vorteile

- Independent of scene complexity & dynamics.
- Fully in hardware.
- Well suited for deferred renderers (as normal map is typically available).

11.3 Nachteile

- Noise removal requires extra blur stage.
- Limited range of sample sphere makes approach relatively local and view dependent.

11.4 OpenGL

11.4.1 Framebuffer objects

- FBOs encapsulate a framebuffer that can be used for off- screen rendering.
- Each FBO has a given dimension, and a number of attachments (n color buffers, depth buffer, and stencil buffer).
- Attached buffers are either textures or renderbuffers.

- FBOs can be enabled for writing and reading.

11.4.2 FBO relevant API

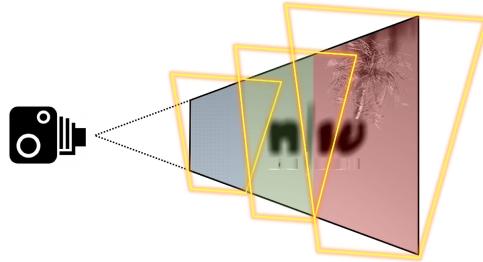
- glGenFramebuffers, glDeleteFramebuffers
- glBindFramebuffer - Bind for reading or writing
- glClearBuffer
- glFramebufferTexture2D - Attach texture to FBO
- glCheckFramebufferStatus - Important: Check if FBO is correctly set up

12 Shadow Rendering

12.1 Shadow Maps

Beim Shadow Mapping werden Schatten generiert, indem getestet wird, ob ein Pixel von einer Lichtquelle aus sichtbar ist. Dabei wird zunächst die sogenannte Shadow Map erzeugt. Diese ist eine aus Sicht der Lichtquelle erzeugte Tiefenkarte. Diese enthält Informationen über den geringsten Abstand von Objekten einer Szene zur Lichtquelle (Z-Buffer). Durch den Vergleich des Abstandes des zu rendernden Objektes zur Lichtquelle und dem entsprechenden Punkt in der Shadow Map kann der Schattenwurf berechnet werden.

12.2 Cascade Shadow Maps



12.3 Vergleich

	Vorteile	Nachteile
Shadow Volumes	<ul style="list-style-type: none">Präzise, geometrische SchattenUnabhängig von der Abmessung der Szene	<ul style="list-style-type: none">Braucht Szenen Geometrie (funktioniert nicht Alphamasken)Nur begrenzt brauchbar für Echtzeitanwendungen
Shadow Maps	<ul style="list-style-type: none">Einfaches PrinzipKeine Geometrie Daten nötig (funktioniert z.B. auch mit Alphamasken)Schnell (Szene muss nur einmal zusätzlich pro Lichtquelle gezeichnet werden)	<ul style="list-style-type: none">Ungeeignet für grosse Szenen (Auflösung der Shadow Map)Unschöne (scharfe) Ränder
Variance Shadow Maps	<ul style="list-style-type: none">Ähnlich gute Filterung wie PCFGPU verwenden für StatistikEffizient	<ul style="list-style-type: none">Mehrkanal Float32 Texturen (wegen $Depth^2$) → sind z.B. Extensions in OpenGL ES
Cascade Shadow Maps	<ul style="list-style-type: none">Kamera-abhängige AuflösungSehr gute Resultate auch bei grossen SzenenKann einfach mit Filterung kombiniert werden	<ul style="list-style-type: none">Idealerweise implementiert mit 3D TexturvenSzene muss pro Shadow-Map neu gezeichnet werden
Photonmapping, Raytracing, Radiosity, ...	<ul style="list-style-type: none">Beste bekannte Verfahren für Global IlluminationViele Lichteffekte (nicht nur Schatten) werden miteinbezogen	<ul style="list-style-type: none">Sehr RechenaufwendigNoch nicht brauchbar für Echtzeitanwendungen

13 Stereoprojektion

13.1 Raumwahrnehmung

13.1.1 Teufenunschärfe

Bis zu einer Entfernung von 10m kann das Gehirn aus der Fokussierung eine Teufeninformation gewinnen. Je näher der fokussierete Gegenstand ist, umso präziser muss die Fokussierung arbeiten und umso grösser ist die Tiefenunschärfe. Beim Tilt-Shift-Effekt wird eine räumliche weite Szenerie durch künstliche Unschärfe so dargestellt, als ob si im Massstab einer Modelleisenbahn wäre.

13.1.2 Abnehmende Grösse

Durch die Zentralperspektive erscheinen weiter entfernte Gegenstände kleiner.

13.1.3 Zunehmender Dunst

Mit zunehmender Distanz nimmt der Dunst zu und die Silhouetten von Bergketten werden heller. Dieser Effekt lässt sich mit OpenGL leicht imitieren, indem man jedem Pixel mit zunehmender Distanz eine Dunstfarbe hinzuaddiert.

13.1.4 Schattenbildung

Wir sind uns gewohnt, dass das Licht von oben kommt. Ist dem nicht so, so haben wir Mühe die Dreidimensionalität zu verstehen.

13.1.5 Bewegungsparallaxe

Einfache Games und Trickfilme verwenden oft den Trick der Bewegungsparallaxe, bei der sich nahe Objekte schneller bewegen als Objekte weiter hinten. Damit erreicht man einen Tiefeneffekt, obwohl es eine reine 2D-Animation ist.

13.2 Stereobildwiedergabe

13.2.1 Projektion nebeneinander

Techniken wie das Spiegelstereoskop, Stereoskope und Stereobrillen führen den beiden Augen durch Spiegel, spezielle Linsen oder Brillen getrennt das jeweilige Bild zu. Sie haben den Vorteil, dass sie eine hundertprozentige Bildtrennung gewährleisten aber auch den Nachteil, dass sie auf einen Betrachter beschränkt sind.

13.2.2 Projektionen übereinander

Trennung durch Farbfilter

Das älteste Verfahren zu Auftrennung von zwei übereinander gelagerten Bildern durch Farbfilter ist nur ein wenig jünger als die Fotografie selbst. Bei solchen Anaglyphen-Bildern wird das Bild für das linke Auge meist in Rot und das Bild für das rechte Auge in Cyan dargestellt. Mit einer Brille, die vor dem linken Auge einen Rotfilter und vor dem rechten Auge einen Cyan-Filter hat, werden die Teilbilder für die entsprechenden Augen herausgefiltert.

Es gibt verschiedene Typen:

Echte Anaglyphen

Hier findet eine Graukonversion auf dem Rot- und Blau-Kanal statt. Dies entspricht den ursprünglichen Anaglyphen und ergibt ein relativ dunkles Bild und es gibt praktisch kein Ghosting (Überblenden), da die Kanäle nicht aneinandergrenzen.

Graue Anaglyphen

Diese echten Rot-Cyan-Anaglyphen ergeben ebenfalls ein Graustufenbild. Die Helligkeit ist dabei korrekt aber durch die benachbarten Rot- und Grün-Kanäle entsteht mehr Ghosting

Farbige Anaglyphen

Bei diesen werden die Farbkanäle nicht skaliert. So kann ein Grossteil der Farben wiedergegeben werden. Allerdings ist das Ghosting sehr stark.

Halbfarbige Anaglyphen

Setzt man den Rotkanal als Graustufe zusammen, vermindert sich das sich das Ghosting aber auch die Farbwiedergabe.

Optimierte Anaglyphen

Gibt man den Rotkanal ganz auf und gewichtet Grün und Blau stärker, wird das Bild aufgehellt und das Ghosting ist fast ganz eliminiert.

ColorCode3D Anaglyphen

Damit kann eine fast vollständige Farbwiedergabe gewährleistet werden. Das Farbspektrum wird für das linke Auge im Rot-Grün-Spektrum wiedergegeben und die Helligkeit auf dem rechten Auge im Blauspektrum. Ein weiterer Vorteil ist, dass auch die Betrachtung ohne die gelb-blaue Color-Code-Brille fast ungestört möglich ist.

Trennung durch Polarisationsfilter

Lineare Polarisationsfilter

Diese lassen nur Licht einer bestimmten Polarisationsrichtung passieren. Damit die Polarisationsrichtung erhalten bleibt, muss eine versilberte Leinwand verwendet werden und der Betrachter muss den Kopf waagrecht halten, um eine Vermischung zu vermeiden.

Sie Werden auch in Sonnenbrillen eingesetzt, um den Himmel abzudunkeln oder um Spiegelungen auf Festerschreiben herauszufiltern.

Zirkuläre Polarisationsfilter

Diese filtern das Licht zweistufig. Zuerst wird es linear gefiltert und dann wird es mit einem Lambda/4-Filter in Drehung versetzt. Links und rechts unterscheiden sich durch umgekehrte Drehrichtungen.

Trennung durch Interferenzfilter

Diese filtern enge Frequenzbänder aus dem Gesamtspektrum heraus. Jedes Auge erhält dabei ein unterschiedliches Rot-,Grün- und Blau-Frequenzband. Die Farbtrennung dabei ist praktisch 100% und es braucht zudem keine Silberleinwand.

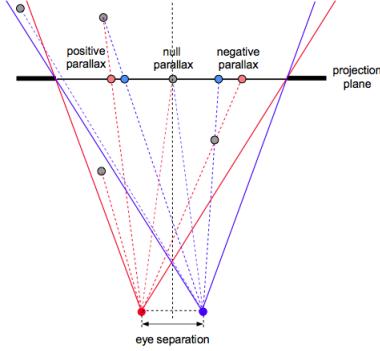
Zeitliche Trennung durch Shutter-Brillen

Das linke und rechte Bild wird nacheinander projiziert. Abwechselungsweise blockieren die Brillengläser die Sicht eines Bildes. Durch eine schnelle Abwechslung entsteht ein konstanter Bildeindruck.

13.3 Projektionstransformation für Stereobildpaare

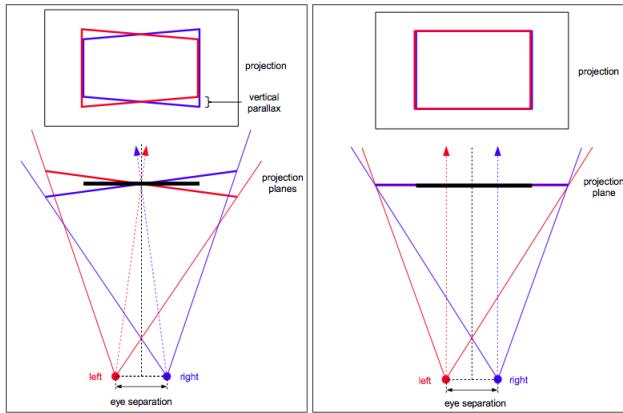
13.3.1 Positive, negative oder null Parallaxe

Bei der Stereobildprojektion werden alle Punkte von zwei Blickpunkten projiziert. Je nach Distanz zur Ebene Entstehen eine oder zwei Abbildungen. Die Projektionsebene können wir uns auch als Fenster vorstellen. Nicht alle Punkte sind von beiden Augen aus sichtbar.



13.3.2 Symmetrische oder asymmetrische Projektion

Mit zwei symmetrischen Projektionen auf zwei nicht parallele Projektionsebenen entstehen vertikale Parallaxen, die vom Gehirn nur schwer fusioniert werden können. Diese können verhindert werden, in dem man zwei asymmetrische Projektionen auf eine Projektionsebene mit parallelen Blickrichtungen generiert.



13.4 Stereobildübertragung

Für eine Stereo-Projektion müssen wir nun zwei Bilder generieren und übertragen. Grundsätzlich bedeutet dies nun den doppelten Rechenaufwand für die Generierung. Wie und in welchem Format wir zwei Bilder zum Monitor oder Projektor übertragen hängt von der verwendeten Wiedergabetechnik ab.

monoPerspective

Perspektivische Projektion von einer Kameraposition aus

monoOrthographic

Orthografische Projektionen von einer Kameraposition aus.

stereoColor

Mit dieser Technik werden die verschiedenen Anaglyphen mit Farbmaskierung realisiert.

stereoSideBySide

Bei dieser Technik werden das linke und rechte Bild mit jeweils der halben Breite nebeneinander in ein Bild gerendert.

stereoSideBySideP

Hier werden beide Bilder in voller Auflösung gerendert und übertragen.

stereoLineByLine

Bei dieser Technik wird das linke Bild nur in den geraden Zeilen und das Rechte in den ungeraden Zeilen gerendert. Der Monitor zeigt abwechselnd nur das eine oder andere Bild.

stereoColByCol

Gleich wie bei stereoLineByLine aber spaltengetrennt.

stereoCheckerBoard

Bei dieser Technik wechseln sich die Bilder in jedem Pixel ab. Dies führt zu einer Schachbrettartigen Aufteilung.

14 Globale Beleuchtungsmodelle

14.1 Beleuchtungsgleichung

$$L_o(x, \vec{\omega}_o) = L_e(x, \vec{\omega}_o) + \int_{\Omega \omega_i} f_r(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_o) L_i(x, \vec{\omega}_i) (\vec{\omega}_i \cdot N) d\omega_i$$

Emissiver Anteil	Reflektiver Anteil
---------------------	-----------------------

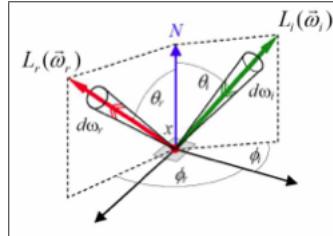
$$= L_e(x, \vec{\omega}_o) + \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum f_r(x, \vec{\omega}_r \rightarrow \vec{\omega}_o) L_i(x, \vec{\omega}_r) (\vec{\omega}_r \cdot N)$$

Monte-Carlo Integration
(i.e. Zufälliges Sampling, $\vec{\omega}_r$ = Zufällig)

14.2 Bidirektional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Die BRDF f_r beschreibt bei einem nichttransparenten Material das Verhältnis der von einem Punkt x in Richtung $\vec{\omega}_r$, ausgehenden differenziellen Strahldichte L_r zur differenziellen Bestrahlungsstärke E die an diesem Punkt aus der Richtung $\vec{\omega}_i$ ankommt.

$$f_r(x, \vec{\omega}_i \rightarrow \vec{\omega}_r) = \frac{dL_r(\vec{\omega}_r)}{dL_i(\vec{\omega}_i) \cos(\Theta_i) d\omega_i} \quad (39)$$



14.2.1 Eigenschaften

Reziprozität

Eine wichtige Eigenschaft der BRDF ist die Reziprozität die besagt, dass die einfallende Strahlendichte mit der ausfallenden Strahlendichte vertauscht werden kann. Diese Eigenschaft ist für alle Strahlenverfolgungsalgorithmen von Bedeutung, da es uns erlaubt die Lichtstrahlen vom Auge aus und in ihrer Gegenrichtung zu verfolgen.

Energieerhaltung

Ein Oberflächenpunkt eines passiven Strahlers kann nicht mehr Licht reflektieren, als dort eintrifft. Mit anderen Worten muss das Verhältnis von ausgehender zu ankommender Strahlung kleiner gleich 1 sein.

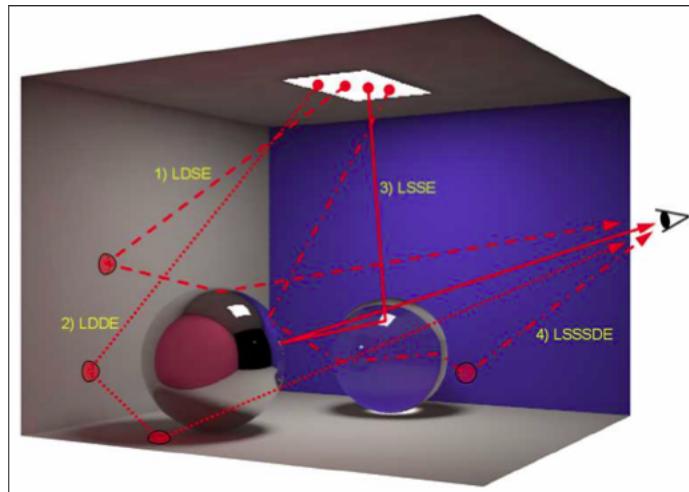
Isotropische und anisotropische Reflexion

Beim idealen Spiegel liegen die einfallende und ide ausgehende Strahlendichte in einer Ebene und wir sprechen von einer isotropen Reflexion. Bei vielen manuell bearbeiteten Materialien haben wir eine stark anisotropische und damit gerichtete Reflexion.

14.3 Lichtweg-Notation

Die Lichtweg-Notation bezeichnet die Punkte eines Lichtstrahls von der Lichtquelle bis zum Auge mit einer Reihenfolge von Buchstaben. Der Startpunkt bei der Lichtquelle wird L bezeichnet, das Ende beim Auge E , eine diffuse Reflexion D und eine spekuläre Reflexion S . Für Paare von aufeinanderfolgenden Flächen kann demnach ein Strahl folgende Reflexionsmöglichkeiten haben: diffus-diffus (DD), diffus-spekulär (DS), spekulär-diffus (SD) und spekulär-spekulär (SS).

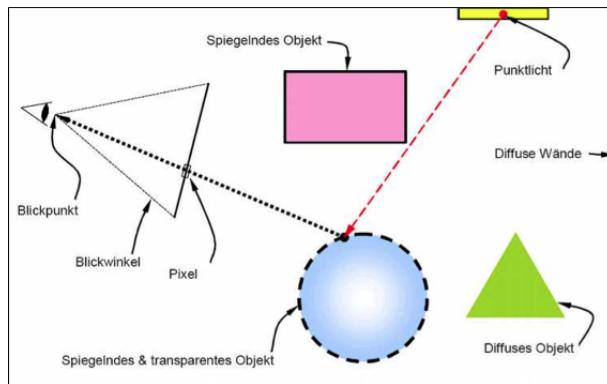
Ein vollständiger Algorithmus für die globale Beleuchtung müsste jeden Lichtweg einschliessen, der als $L(D|S)*E$ geschrieben werden kann, wobei ein $|$ oder und ein $*$ kein, ein- oder mehrmals bedeutet.



15 Ray Tracing

15.1 Photon Tracing

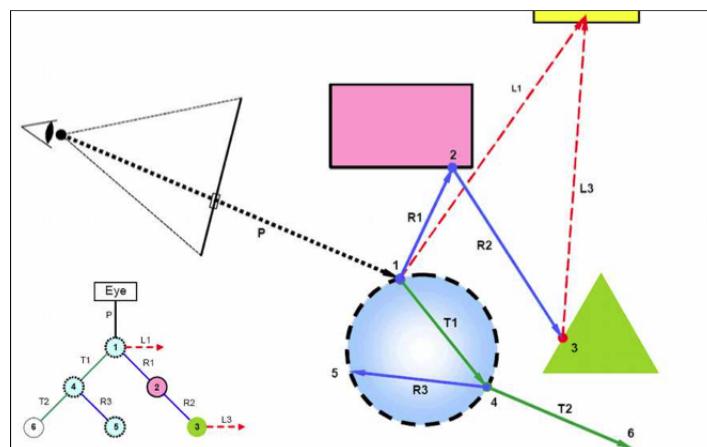
Dabei werden Photonen per Zufall in einer Szene verfolgt. Treffen die Photonen eine Oberfläche, so wird mit einem zweiten Strahl getestet, ob der Schnittpunkt vom Auge aus sichtbar ist.



15.2 Raytracing

Die Strahlen werden vom Auge ausgehend durch ein Pixel des Bildes in die Szene verfolgt. Trifft ein Strahl auf ein reflektierendes Objekt, so wird ein gespiegelter Strahl weiterverfolgt. Ist das Objekt transparent, so wird ein gebrochener Strahl weiterverfolgt. Diese neuen Strahlen werden rekursiv, mit derselben Funktion behandelt, wie der vom Auge ausgehende Strahl. Die Strahlenverfolgung wird abgebrochen, wenn:

- Der Strahl auf den Hintergrund trifft
- Der Strahl auf eine rein diffuse Oberfläche trifft
- Die Rekursionstiefe einen Maximalwert erreicht
- Die Strahlenbeitragskraft einen Minimalwert unterschreitet

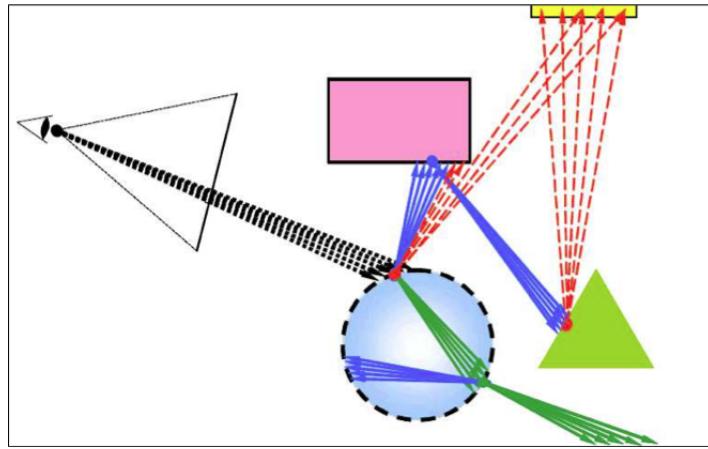


Zur Berechnung der Farbintensität muss von jedem Sichtpunkt aus zusätzlich ein sogenannter Schattenstrahl zu jeder Lichtquelle geschickt werden. Schneidet dieser auf seinem Weg ein Objekt, dann liegt der betrachtete Punkt im Schatten und der Beitrag der Lichtquelle wird bei der Beleuchtungsberechnung nicht berücksichtigt.

15.3 Distributed Raytracing

Weil RT immer nur einen Primärstrahl, einen reflektierten Strahl, einen gebrochenen Strahl und ein Schattenfänger verschießt, erhalten wir die perfekt scharfen Bilder. Dies mag reizvoll sein, entspricht aber relativ

schlecht der Ralität, wo oft auch diffuse Spiegelungen und Transparenzen sowie Halbschatten vorkommen. Beim Distributet Raytracing werden deshalb immer mehrere Strahlen vom gleichen Typ verschickt und deren Ertrag gemittelt.



Mehrfache Primärstrahlen

Antialiasing

Verschickt man mehrere Primärstrahlen vom Blickpunkt durch verschiedene Orte des Pixels, so kann man die erhaltenen Farbwerte mitteln und erreicht dadurch ein Antialiasing

Motion Blur (Bewegungsunschärfe)

Verschickt man mehrere Primärstrahlen durch ein Pixel, während man ein Objekt verschiebt, so kann man eine Bewegungsunschärfe erzeugen.

Depth of Field (Tiefenunschärfe)

Verschiesst man mehrere Primärstrahlen von einer Linsenscheibe durch einen Punkt auf der Schärfenebene, so kann man Tiefenunschärfe realisieren.

Mehrfache Sekundärstrahlen

Um unscharfe Spiegelungen und Transparenzen zu erhalten, verschiesst man mehrere reflektierte bzw. gebrochene Strahlen. Die Unschärfe wird durch das Mass der Abweichung von der perfekten Reflexions- bzw. Transmissionsrichtung bestimmt.

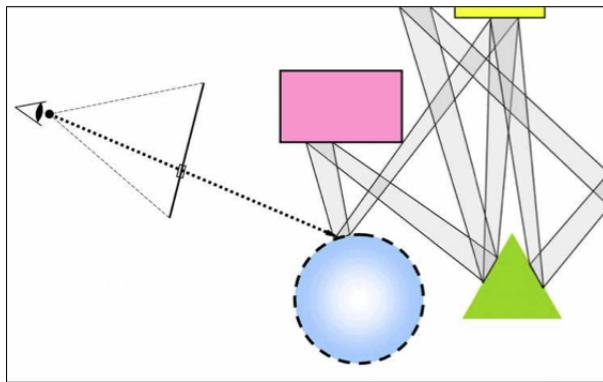
Mehrfache Schattenfühler

Sobald sich in der Szene sichtbare Lichtquellen mit einem Volumen befinden, wirken scharfe Schattenräder schnell unrealistisch. Dort wo nur ein Bereich der Lichtquelle sichtbar ist, entsteht ein Teilschatten. Vom kompletten Schatten bis zur kompletten Beleuchtung entsteht so ein weicher Übergang.

15.4 Radiosity

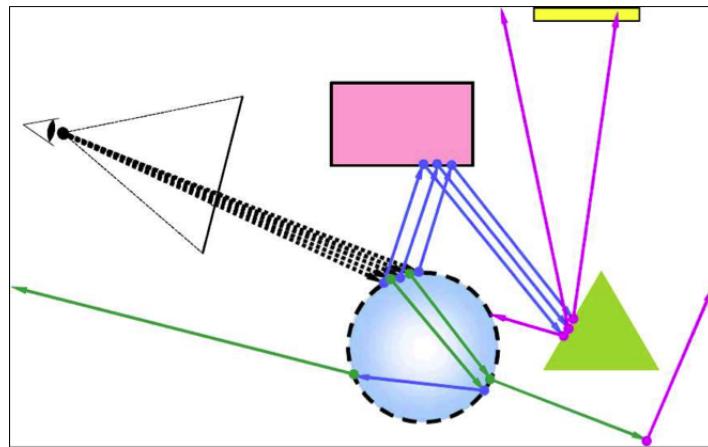
Im ersten Schritt wird vom Blickpunkt unabhängig der Austausch der Strahlungsstärke, beginnend bei selbstrahlenden Patches der Lichtquellen und allen anderen Patches berechnet. Dabei wird nur die rein diffuse Reflexion berücksichtigt. Nachdem der Strahlungsaustausch von allen Lichtpatches berechnet wurde, geht der Algorithmus der Stärke nach durch alle bestrahlten Patches. Am Schluss des ersten Schrittes weiss jeder Patch seine direkte und indirekte Bestrahlungsstärke. Im zweiten Schritt kann das Bild gerendert werden, indem für jedes Pixel die Radiosity der sichtbaren Patches interpoliert zurückgegeben wird.

Der Vorteil des Radiosity Algorithmus ist seine relativ effiziente Berechnung der indirekten Beleuchtung, die aus der diffus-diffusen Reflexion kommt. Man hat viel Forschungsaufwand in diesen Algorithmus investiert, weil in der Innenraumbeleuchtungssimulation der größte Teil aus dieser Reflexion stammt.



15.5 Path Tracing

Dies ist der erste Algorithmus der einen vollständigen globalen Beleuchtungsalgorithmus besitzt. Beim Path Tracing wird bei jedem Schnittpunkt nur ein Strahl so lange weiterverfolgt, bis er entweder absorbiert wird oder in einer Lichtquelle endet. Im Unterschied zum RT werden im PathTracing auch diffus reflektierte Strahlen weiterverfolgt. Um für ein Pixel die korrekte Farbe zu erhalten, müssen viele Pfade verfolgt werden, deren Ertrag am Schluss gemittelt wird.



15.5.1 Schnittpunkt Behandlung

Was bei einem Schnittpunkt passiert, wird mit einer Zufallsvariablen zwischen 0 und 1 entschieden. Je nach Zufallszahl und den Reflexionskoeffizienten wird der Strahl diffus reflektiert, spekulär reflektiert, gebrochen oder absorbiert. Bei den Reflexionskoeffizienten handelt es sich um Wahrscheinlichkeiten zwischen 0 und 1, die man bei RGB-Koeffizienten durch Drittteilung der summierten Komponenten bekommt.

15.5.2 Lösen der Rendering-Gleichung durch Monte-Carlo Integration

Wo durch das Pixel ein Primärstrahl geschossen wird oder in welche Richtung ein Strahl reflektiert oder gebrochen wird, wird ebenfalls anhand von Zufallszahlen bestimmt. Mathematisch gesehen entspricht das Abtasten durch zufällige Lichtpfade dem Lösen der Rendering-Gleichung durch Monte Carlo Integration. Diese Technik kann zum Lösen von komplexen Integralen verwendet werden.

15.6 Bidirektionales Path Tracing

Die Idee dahinter ist, dass gewisse Lichtpfade besser von der Lichtquelle aus verfolgt werden, anstatt vom Auge aus. Dies gilt insbesondere für PFade die für Lichtbündelungen verantwortlich sind. Das Problem ist, dass die Wahrscheinlichkeit mit der ein Strahl bei der diffusen Reflexion in Richtung der ersten spekulären Reflexion geleitet wird, sehr klein ist. Bei der diffusen Reflexion kann der Strahl per Zufall in alle Himmelsrichtungen reflektiert werden. Um diesen energiereichen Pfad zu finden, braucht es daher sehr viele Samples und auch dann wären die Lichtbündelungen noch stark verzerrt. In umgekehrter Richtung ist die Wahrscheinlichkeit des Pfades aber sehr hoch, da er bei den spekulären Reflexionen kaum abweichen kann.

Obwohl bidirektionales Path Tracing Lichtbündelungen besser erzeugen kann als reines Path Tracing, so leidet die bidirektionale Variante in vielen Fällen immer noch unter Rauschen.

15.7 Photon Mapping

Der Algorithmus erhält seinen Namen durch eine Datenstruktur in der Photonen unabhängig von der Geometrie der Objekte gespeichert und gesucht werden können. Er ist in zwei Durchgänge aufgeteilt:

Photon Tracing

Im ersten Durchgang werden Photonen von den Lichtquellen in die Szene geschossen. In der Szene interagieren die Photonen mit den vorhandenen Objekten und werden von diesen reflektiert, transmittiert oder absorbiert. Beim Auftreffen auf eine diffuse Oberfläche werden die Photonen in der Photonemap gespeichert.

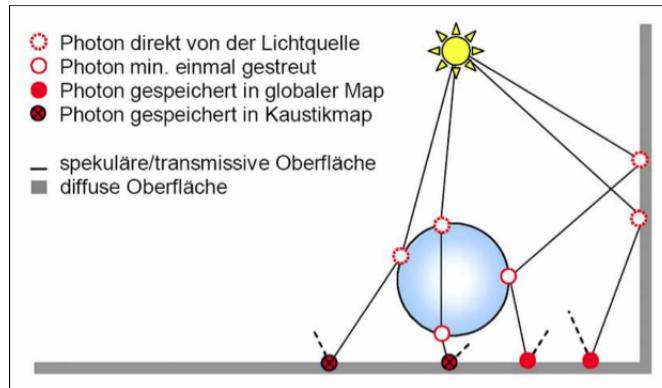
Rendering

Der zweite Durchgang entspricht dem vom Path Tracer bekannten Rendering. Hier wird nun für jeden Schnittpunkt, der auf einer diffusen Oberfläche liegt zusätzlich anhand der im Photon Tracing angelegten Photonemap abgeschätzt, wie viel indirektes diffuses Licht an diesem Punkt angekommen ist.

15.7.1 Photon Tracing

Im ersten Durchgang werden die Photonen von den Lichtquellen zufällig in die Szene geschossen nach den physikalischen Eigenschaften der Lichtquellen. Dies geschieht solange bis die gewünschte Anzahl Photonen in der Photonemap gespeichert wurde.

Beim Auftreffen eines Photons auf eine Oberfläche wird anhand der Materialparameter entschieden, ob das Photon diffus reflektiert, spekulär reflektiert, transmittiert oder absorbiert wird. Man spricht hier von Scattering (Streuung), da die Richtung der Reflexion bzw. Transmission zufällig ermittelt wird. Dieses Vorgehen wird rekursiv solange wiederholt, bis das Photon absorbiert wird. Trifft ein Photon nach mindestens einer Interaktion auf eine diffuse Oberfläche, wird es in der Photonemap gespeichert. Trifft es auf den Hintergrund oder auf eine Lichtquelle, wird es absorbiert. Man beachte, dass Photonen nicht schon bei der ersten diffusen Oberfläche gespeichert werden, da diese die direkte Beleuchtung repräsentieren würden, die im Rendering Durchgang ermittelt wird.



In der Photonmap werden die Photonen gespeichert. Ein Photon ist ein Strahlungsfluss-Träger, dessen Leistung in Watt in den drei Wellenlängenkanälen RGB untergebracht ist. Die Leistung einer Lichtquelle wird gleichmäßig auf die Photonen verteilt. Neben der Leistung müssen zudem Ort und Einfallrichtung abgespeichert werden.

Während dem Photon-Scattering werden die zu speichernden Photonen einfach in ein Array eingefügt. Danach werden sie in einen sogenannten kd-Baum umgewandelt. Der Aufwand des Umsortierens ist gerechtfertigt, da die Datenstruktur nur einmal aufgebaut werden muss, die Suche nach den Photonen aber millionenfach stattfindet.

15.7.2 Rendering

Im Renderingdurchgang wird mit einem Path Tracer gearbeitet, wobei die Rendering-Gleichung noch Stärker in Teilintegrale aufgeteilt wird.

Zur Berechnung der indirekten Beleuchtung in einem Punkt X der Szene führen wir eine sogenannte Radiance Estimate durch. Diese besteht aus einer Irradiance Estimate und deren Multiplikation mit der BRDF:

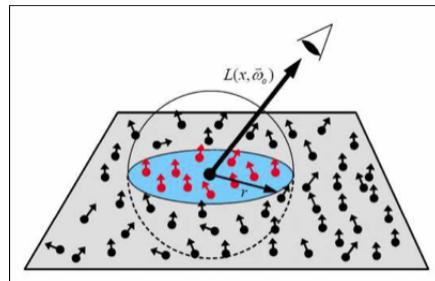
$$L_0(x, \vec{\omega}_0) = \int_{\Omega_i} f_r(x, \vec{\omega}_P \rightarrow \vec{\omega}_0) L_{i,i}(x, \vec{\omega}_P) (N \bullet \vec{\omega}_P) d\vec{\omega}_0 \quad (40)$$

worin $\vec{\omega}_0$ die Richtung ist aus der das Photon bei X eintrifft und $L_{i,i}(x, \vec{\omega}_P)$ die Strahlendichte des einzelnen Photons.

Der Fluss Φ , der auf die Fläche A trifft, repräsentiert eine Bestrahlungsstärke (Irradiance). Betrachten wir dazu die Kreisfläche mit $A = \pi r^2$, auf die der Fluss eintrifft. Das Aufsummieren der Flussbeträge der einzelnen Photonen innerhalb des Radius r ergibt den gesamten Fluss auf der Fläche A. Dividiert man durch die Fläche A, erhält man die ausgehende Strahlenstärke:

$$L(x, \vec{\omega}_0) \approx \frac{1}{\pi r^2} \sum_{p=1}^n f_r(x, \vec{\omega}_P \rightarrow \vec{\omega}_0) \Phi_P(x, \vec{\omega}_0) \quad (41)$$

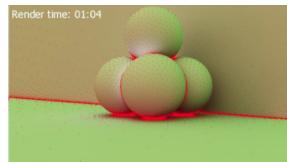
mit n im Suchradius r gefundenen, nächstliegenden Photonen.



16 RayTracing Verbesserungen

16.1 Irrandiance Caching

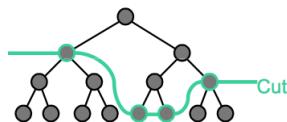
- Benachbarte Raumpunkte mit ähnlicher Normale werden ähnlich Beleuchtet
- Nicht für jedes Pixel die globale Beleuchtung neu berechnen



16.2 Light Cuts

Dies ist Final Gathering Verfahren, um Szenen mit enorm vielen Punktlichtern effizient zu rendern. Alle Punkte zu verwenden ist zu zeitaufwändig, daher wird eine Hierarchie der Punkte generiert. Beim Final Gathering wird die Punkthierarchie traversiert und pro Knoten entschieden, ob dieser als Sender verwendet werden kann oder weiter unterteilt werden muss, da der resultierende Fehler zu gross wird. Pro Pixel im Bild wird also ein individueller Cut durch die Hierarchie gebildet.

Als Sender werden nur Knoten aus dem Cut verwendet, dadurch werden es deutlich weniger Punkte. Die Knoten im Cut werden in einer Priority Queue gespeichert. Der Knoten mit der grössten zu erwartenden Änderung wird aus der Queue entnommen und durch seine beiden Kinder ersetzt.



16.3 Raumunterteilung

Die Grundidee der Raumunterteilung liegt wiederum in der Reduktion der potenziellen Schnittpunkttests. Der Raum und damit die Anzahl Objekte werden dabei so verkleinert, dass nur noch wenige Objekte in einer Raumzelle als Schnittpunktkandidaten infrage kommen. Bei der Verfolgung entlang eines Strahls werden nur noch jende Raumzellen betrachtet, durch die ein Strahl geht.

Es haben sich verschiedene Unterteilungsstrategien entwickelt, die je nach Objektdichte und Verteilung besser oder weniger gut geeignet sind.

