



**HOCHSCHULE TRIER**

Trier University of Applied Sciences

**Informatik - Computer Science**

---

# Generierung eines dreidimensionalen Baumes mit OpenGL

Daniel Biskup, 952976

Hausarbeit zur Vorlesung Real-Time Rendering

Betreuer: Prof. Dr. Christof Rezk-Salama

Trier, 31.3.2015

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitende Hinweise</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Konzeption der Geometrieerzeugung</b>	<b>2</b>
2.1	Attribute der Eckpunkte	2
2.2	Konstruktion der Geometrie	2
2.2.1	Konstruktion der Eckpunkte	3
2.2.2	Konstruktion der Geometrie aus den Eckpunkten	4
2.3	Herleitung der Formel zur Berechnung der Anzahl generierter Dreiecke nach n Iterationen	5
<b>3</b>	<b>Implementierung</b>	<b>7</b>
3.1	Bedienung des Programmes	7
3.2	Verwendet Libraries	8
3.3	Aufbau des Programmes	9
3.4	Der Build Prozess unter Windows 7 mit VisualStudio 2012	9
3.5	Der Build Prozess unter Linux	10

## Einleitende Hinweise

Dieses Projekt enthält die beiden Archive `Projekt.Windows` und `Projekt.Linux`. Bitte berücksichtigen sie, dass die eigentliche Abgabe die sich nach Möglichkeit bewerten sollten `Projekt.Linux` ist. Dieses enthält Teilweise neuere Codeabschnitte. Der Grund dafür, dass ich zwei Projekte habe ist, dass ich das Linux Projekt auf einen Windows-Rechner kopiert habe um es dort an Windows an zu passen. Als ich es zurück auf mein Linux System kopierte waren die Zugriffsrechte auf einige Dateien wie Shared Libraries verändert und daher lief auf meine Linux Build nicht mehr. Da meine Windowsversion auch auf Windows nicht richtig funktioniert, habe ich mich entschieden, die Änderungen für Windows nicht zurück in mein Hauptprojekt `Projekt.Linux` zu integrieren.

## Konzeption der Geometrieerzeugung

In diesem Kapitel werden die Rechnungen und Definitionen hergeleitet, die benötigt werden, um die Geometrie des Baumes zu erzeugen.

### 2.1 Attribute der Eckpunkte

In der Computergrafik setzen sich Objekte üblicherweise aus Dreiecken zusammen. Jedes Dreieck ist über drei Eckpunkte eindeutig definiert. Häufig ist es wichtig zwischen der Vorder- und Rückseite eines Dreiecks unterscheiden zu können, zum Beispiel um Face Culling durchzuführen. Für ein auf eine Ebene projiziertes Dreieck im  $\mathbb{R}^3$  kann diese Unterscheidung anhand der Drehrichtung in der die Eckpunkte um den Mittelpunkt des Dreiecks angeordnet sind getroffen werden. Sind die Punkte in mathematisch positiver Drehrichtung – gegen den Uhrzeigersinn – um den Mittelpunkt des Dreiecks angeordnet handelt es sich um ein Dreieck mit positiver Wicklungsrichtung (englisch. winding order) andernfalls um eines mit negativer Wicklungsrichtung. Je nach Konvention wird entweder die Seite eines Dreiecks die in negativer oder in positiver Wicklungsrichtung erscheint als Vorderseite interpretiert. In der vorliegenden Arbeit verwendete Konvention entspricht der Standarteinstellung `glFrontFace( GL_CCW )`; von OpenGL, bei der die Seite mit positiver Wicklungsrichtung – gegen den Uhrzeigersinn – als Vorderseite interpretiert wird.

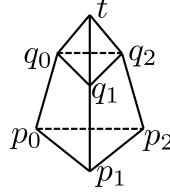
Daher muss bei der Generierung neuer Geometrie darauf geachtet werden, dass die Punkte der generierten Dreiecke in der richtigen Reihenfolge angegeben werden.

Beim Erzeugen der in der Einleitung beschriebenen Geometrie ist es wichtig, dass für jedes Dreiecken  $(p_0, p_1, p_2)$  auch die Höhe  $l$  des Pyramidenstumpfes gegeben ist, der möglicherweise aus diesem generiert werden soll. Im Folgenden wird ein Dreieck  $(p_0, p_1, p_2)$  mit Höhe  $l$  repräsentiert durch ein Tupel  $p = ((p_0, p_1, p_2), l)$  mit  $l \in \mathbb{N}$  wobei  $\mathbb{N} := \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ .

### 2.2 Konstruktion der Geometrie

Es sei gegeben, dass die Funktion zum Erzeugen neuer Geometrie als Eingabe neben einem Dreieck  $p = ((p_0, p_1, p_2), l)$  zusätzlich die drei über alle Iterationen hinweg

konstanten Werte `scaleTriangle`, `pyramidFactor` und `scaleLength` erwartet. Gilt  $l = 0$ , so soll das Dreieck unverändert zurückgegeben werden. Gilt  $l > 0$ , so soll die in Abbildung 2.1 abgebildete Geometrie zurückgegeben werden. Im Folgenden werden zunächst die Eckpunkte und anschließend aus diesen die Dreiecke der zu erzeugenden Geometrie konstruiert.



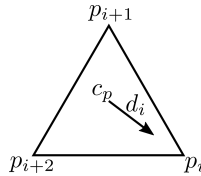
**Abb. 2.1.** Geometrie

### 2.2.1 Konstruktion der Eckpunkte

Ist ein Dreieck  $p = ((p_0, p_1, p_2), l)$  mit  $l > 0$  gegeben, so werden zur Erzeugung der neuen Geometrie die Punkte  $p_0, p_1, p_2, q_1, q_2, q_3$  und  $t$  benötigt (2.1). Da nach gewählter Konvention gilt, dass die Vorderseite eines Dreiecks eine positive Wicklungsrichtung hat, lässt sich die Normale eines Dreiecks  $d$  über das Kreuzprodukt wie folgt bestimmen:

$$n = \frac{a \times b}{|a \times b|} \text{ mit } a = p_1 - p_0 \text{ und } b = p_2 - p_0$$

Der Schwerpunkt  $c_p$  des Dreiecks liegt bei  $c = \frac{p_0 + p_1 + p_2}{3}$ . Das Dreieck  $q = (q_0, q_1, q_2)$  soll kleiner sein, als das Dreieck  $p$ . Die Eckpunkte des Dreiecks  $d$ , dessen Eckpunkte jeweils um den konstanten Faktor  $0 < \text{scaleTriangle} \leq 1$  weiter von  $c_p$  entfernt sind als die von  $p$ , lassen sich bestimmen mit  $d_i = (p_i - c_p) \cdot \text{scaleTriangle}$  für  $i \in \{0, 1, 2\}$ . (Siehe Abbildung 2.2) Der Vektor vom Schwerpunkt  $c_p$  zu jenem des Dreiecks  $q$  ist  $h = n \cdot l$ .



**Abb. 2.2.** Das erste Dreieck

Damit ergeben sich die Eckpunkte von  $q$  zu:

$$q_i = c_p + d_i + h \text{ für } i \in \{0, 1, 2\}$$

Die Höhe  $h_{\text{pyramid}}$  der Pyramide  $(q_0, q_1, q_2, t)$  wird in diesem Projekt festgelegt als ein Vielfaches der Länge  $l$ .  $h_{\text{pyramid}} = l * \text{pyramidFactor}$ , wobei es sich bei `pyramidFactor` um eine Konstante handelt. Die Spitze  $t$  der Pyramide liegt damit bei  $t = c_p + h + h_{\text{pyramid}} * n$ .

### 2.2.2 Konstruktion der Geometrie aus den Eckpunkten

Wenn die Punkte  $p_0, p_1, p_2, q_1, q_2, q_3$  und  $t$  bekannt sind, so kann aus diesen sowohl die Geometrie der Mantelfläche, als auch die der Pyramide erzeugt werden.

#### *Die Dreiecke der Mantelfläche*

Die Dreiecke welche die Mantelfläche des Pyramidenstumpfes bilden sollen einen Längenwert von 0 haben, damit sie bei der nächsten Iteration nicht durch weitere Geometrie ersetzt werden. Zudem sind die Eckpunkte der Dreiecke in negativer Wicklungsrichtung an zu geben, damit es auch im nächsten Schritt möglich ist die Normalen der Dreiecke zu berechnen und damit OpenGL Backface Culling durchführen kann. Wie Abbildung 2.3 entnommen werden kann, ergibt sich die Menge der Dreiecke der Mantelfläche zu:

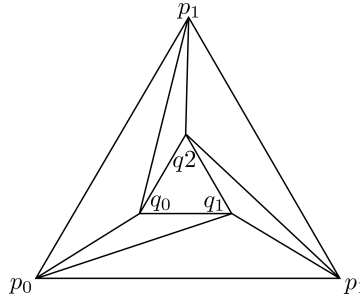
$$M := \{(p_0, q_1, q_0), (p_0, p_1, q_1), (p_1, q_2, q_1), (p_1, p_2, q_2), (p_2, q_0, q_2), (p_2, p_0, q_0)\}$$

Oder kürzer:

$$M := \{x \in \{(p_i, q_j, q_i), (p_i, p_j, q_j)\} | i \in \{0, 1, 2\} \wedge j = (i + 1) \bmod 3\}$$

Die Menge  $M_L$  aller Dreiecke mit Längenangabe ist damit

$$M_L = \{(d, l) | d \in M \wedge l = 0\}$$

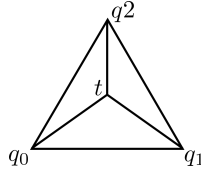


**Abb. 2.3.** Die Dreiecke der Pyramide

Die Dreiecke  $(p_0, p_1, p_2)$  und  $(q_0, q_1, q_2)$  sind nicht als Teil von  $M_L$  definiert worden, da sie beim betrachten der fertigen Geometrie auf dem Bildschirm ohnehin verdeckt sein würden. Das die Geometrie des fertigen Baumes auf der Unterseite des Stammes ein dreieckiges Loch haben wird, ist unproblematisch, da Bäume für gewöhnlich in der Erde stecken.

#### *Die Dreiecke der Pyramide*

Die Dreiecke welche die Pyramide bilden sollen in der nächsten Iterationen um einen Bruchteil der Länge  $l$  extrudiert werden. Daher wird als Länge für diese Dreiecke  $l_{next} = l * \text{scaleLength}$  gewählt mit  $0 \leq \text{scaleLength} \leq 1$ .



**Abb. 2.4.** Die Dreiecke der Pyramide

Die Menge  $P$  der Dreiecke der Pyramide lässt sich beschreiben durch  $P := \{(q_0, q_1, t), (q_0, q_1, t), (q_0, q_1, t)\}$  (siehe Abbildung 2.4). Die Menge  $P_L$  der Dreiecke der Pyramide mit Längenangabe ist damit  $P_L = \{(d, l_{next}) | d \in P \wedge l_{next} = l * \text{scaleLength}\}$ .

Die Menge  $D$  aller Dreiecke der in Abbildung 2.1 abgebildeten Geometrie ergibt sich damit zu  $D = M_L \cup P_L$ .  $D$  hat eine Mächtigkeit von neun.

## 2.3 Herleitung der Formel zur Berechnung der Anzahl generierter Dreiecke nach n Iterationen

Beim absetzen eines Draw Calls an OpenGL über die Methode `void glDrawArrays(GLenum mode, GLint first, GLsizei count);` muss als dritter Parameter angegeben werden, wie viele Eckpunkte zu zeichnen sind. Da die in diesem Kapitel generierte Geometrie aus einzelnen Dreiecken zusammensetzt, und jedes Dreieck sich aus drei Eckpunkten besteht, ist die Anzahl der Eckpunkte in der Geometrie dreimal so groß wie die der Dreiecke. Um die Anzahl der Eckpunkte in der Geometrie zu bestimmen ist es daher hilfreich zunächst die Anzahl der Dreiecke aus denen diese sich zusammensetzt zu bestimmen.

Nach  $n$  Iterationen besteht die Geometrie des generierten Baumes aus  $4 * 3^n - 3$  Eckpunkten. Diese Formel wird im Folgenden hergeleitet.

### *Herleitung*

Für jedes Eingabedreieck  $p = ((p_0, p_1, p_2), l)$ , für welches  $l = 0$  gilt wird keine neue Geometrie erzeugt, die Gesamtzahl der Dreiecke bleibt unverändert. Gilt  $l > 0$  so wird das Eingabedreieck durch neun andere Dreiecke ersetzt, die Gesamtzahl steigt um acht Dreiecke.

In jeder Iteration wird jedes Dreieck mit  $l > 0$  ersetzt durch drei neue Dreiecke mit  $l > 0$ . Also enthält die Eingabemenge der Dreiecke nach  $n$  Iterationen genau  $3^n$  Dreiecke mit  $l > 0$ . Da mit jeder Iteration für jedes Dreieck mit  $l > 0$  genau acht neue Dreiecke hinzukommen, und nach  $m$  Iterationen  $3^m$  Dreiecke in der Eingabemenge enthalten sind die diese Bedingung erfüllen, kommen in Iteration  $n$  genau  $3^n$  Dreiecke hinzu für  $n \geq 0$ . Für die Anzahl der Dreiecke  $f$  die in Iteration  $n$  hinzukommen gilt daher  $f(n) := 3^n * 8$ .

Die Gesamtzahl  $g(n)$  der Dreiecke nach  $n$  Iterationen ist damit:

$$g(n) := 1 + \sum_{i=0}^{n-1} f(i)$$

$$\begin{aligned} &= 1 + \sum_{i=0}^{n-1} 8 * 3^i \\ &= 1 + 8 * \sum_{i=0}^{n-1} 3^i \\ &= 1 + 8 * \left( \sum_{i=0}^n 3^i - 3^n \right) \\ &= 1 + 8 * \left( \frac{1 - 3^{n+1}}{1 - 3} - 3^n \right) \\ &= 1 + 8 * \left( \frac{1 - 3^{n+1}}{-2} - 3^n \right) \\ &= 1 + 8 * \left( \frac{1 - 3^{n+1} + 2 * 3^n}{-2} \right) \\ &= 1 + 8 * \left( \frac{1 - 3 * 3^n + 2 * 3^n}{-2} \right) \\ &= 1 + 8 * \left( \frac{1 - 3^n}{-2} \right) \\ &= 1 + \left( \frac{4 * (1 - 3^n)}{-1} \right) \\ &= 1 - (4 - 4 * 3^n) \\ &= 4 * 3^n - 3 \end{aligned}$$

Da für  $n = 0$  gilt  $g(0) = 4 * 3^0 - 3 = 1$ , gilt:

$$\forall n \in \mathbb{N} : g(n) := 4 * 3^n - 3$$



## Implementierung

Dieses Kapitel behandelt das diesem Dokument beiliegende Programm. Zunächst wird Überblick darüber gegeben, wie das Programm zu bedienen ist. Anschließend wird auf die verwendeten Libraries, und den Aufbau des Programmes eingegangen. Zuletzt wird ausgeführt wie das Programm auf den Plattformen Windows und Linux kompiliert werden kann.

### 3.1 Bedienung des Programmes

Nach dem Start des Programmes ist in der Mitte des Fensters ein sich drehender Baum zu sehen. In der linken oberen Ecke befindet sich ein Fenster mit der mit dem Titel “TweakBar“ welches im folgenden als Tweak Bar bezeichnet wird.

Die Tweak Bar enthält drei Gruppen von Einträgen, mit Namen “generation parameters“, “presentation parameters“ und “read-only scene information“.

Während die ersten Beiden Gruppen Felder die vom Benutzer oder der Benutzerin manipuliert werden können enthalten, enthält die letzte Gruppe die nicht vom Benutzer oder der Benutzerin nicht direkt manipulierbaren Einträge “number of triangles“ und “number of vertices“. Unter “number of triangles“ ist die Anzahl der Dreiecke und unter “number of vertices“ anderen die Anzahl der Eckpunkte aufgeführt, aus denen sich der aktuell auf dem Bildschirm angezeigt Baum zusammensetzt.

In der Gruppe “presentation parameters“ findet der Benutzer oder die Benutzerin den Schalter “autoRotation“ mit dem sich festlegen lässt, ob der Baum automatisch entlang seiner Y-Achse gedreht werden soll, sowie das Eingabefeld “autoRotationSpeed“ über welches die bei automatischer Rotation anzuwendende Rotationsgeschwindigkeit festgelegt werden kann. Über den Eintrag “rotation“ kann durch klicken und ziehen der bunt eingefärbten Kugel die Orientierung des Baumes im Raum verändert werde.

In der Gruppe “generation parameters“ sind Einträge aufgeführt über die sich der Prozess der Geometriegenerierung des Baumes konfigurieren lässt. Den ersten Eintrag bildet ein Button mit Aufschrift “click here to generate tree“. Ein Klick auf diesen löst die Ausführung des in Kapitel 2 beschriebenen Geometrieerzeugungsalgorithmus aus, welchem als Parameter die Werte der übrigen Eingabefelder, die in

der Gruppe “generation parameters“ enthalten sind, übergeben werde. Wurde die Geometrie erfolgreich erzeugt, so wird der diese nun anstelle der zuvor angezeigten angezeigt.

Der Parameter “numberOfIterations“ gibt an, wie viele Iterationen des Geometrieerzeugungsalgorithmus verwendet werden sollen.

Die übrigen Parameter sind bereits aus 2 bekannt, ihr Bedeutung soll hier dennoch kurz geklärt werden.

Der Parameter “scaleLength“ bestimmt, wie lang ein Astsegment im Verhältnis zu seinem Vorgänger ist.

Der Parameter “scaleTriangle“ bestimmt, wie dick das obere Ende eines Astsegmentes im Verhältnis zu seinem Unteren Ende ist.

Der Parameter “pyramidFactor“ bestimmt, wie hoch die Pyramide am Ende eines Astsegmentes im Verhältnis zu dessen Länge ist.

## 3.2 Verwendet Libraries

Das Programm nutzt mehrere plattformunabhängige Open Source Libraries.

### *GLEW*

<http://glew.sourceforge.net/> Sorgt dafür, dass man als Programmierer gleich die OpenGL Funktionen aufrufen kann, ohne sich selbst darum kümmern zu müssen irgendwie an die functionpointer zu diesen Funktionen zu kommen.

### *GLFW*

<http://www.glfw.org/> Vergleichbar mit SDL oder FreeGLUT. Erstellt Fenster und den OpenGL Kontext. Bietet Methoden zur Eingabebehandlung von Mouse und Tastatur.

### *GLM*

<http://glm.g-truc.net/0.9.6/index.html> Eine Header-Only Library die sich um Mathematik kümmert. Sie stellt unter anderem eine Klasse für Quaternionen zur Verfügung und Methoden um View- und Projection-Matrizen zu erzeugen.

### *AntTweakBar*

<http://anttweakbar.sourceforge.net/doc/> Erlaubt es schnell und einfach einfache Bedienelemente in die eigene OpenGL Anwendung zu integrieren. Sie bietet wie auf dem Folgenden Link zu sehen ist Methoden um sie ganz leicht mit GLFW2, SDL, usw. zu verbinden. [http://anttweakbar.sourceforge.net/doc/tools:anttweakbar:howto#5.\\_handle\\_mouse\\_and\\_keyboard\\_events\\_and\\_window\\_size\\_changes](http://anttweakbar.sourceforge.net/doc/tools:anttweakbar:howto#5._handle_mouse_and_keyboard_events_and_window_size_changes) GLFW3, welches ich hier nutze, bringt allerdings API-Änderungen und AntTweakBar unterstützt GLFW3 nicht. <http://sourceforge.net/p/anttweakbar/tickets/11/>. Deshalb habe ich in `tweakbarutil.cpp` ein paar Methoden geschrieben, welche dieses Problem für mich teilweise lösen.

## 3.3 Aufbau des Programmes

### 3.3.1 OpenGL Errorbehandlung

Wenn man sich als Programmierer oder Programmiererin nicht darum kümmert, wird einem ein OpenGL Programm nicht mitteilen, warum es gerade abgestürzt ist. OpenGL bietet allerdings einige Funktionen, mit denen man sich relativ hilfreiche Fehlermeldungen ausgeben lassen kann. So sollte man sich nach dem Kompilieren von Shadern und dem Linken von Shaderprogrammen jeweils den Error-Log ausgeben lassen mit `glGetProgramiv`, `glGetProgramInfoLog`, `glGetShaderiv` und `glGetShaderInfoLog`. Ich verwende diese in meinem Programm in den Funktionen `void Shaderprogram::linkProgram` und `void Shader::createShaderFromString`.

Allgemein ist es eine gute Idee, `glDebugMessageCallback` zu verwenden, welches einem erlaubt eine Callbackfunktion anzumelden, die immer aufgerufen wird, wenn ein Fehler auftritt. Ich habe mich an der folgenden Website bedient und den Code für die Funktion größtenteils übernommen: <http://blog.nobel-joergensen.com/2013/02/17/debugging-opengl-part-2-using-gldebugmessagecallback/>. In meinem Programm befindet sich die Implementierung dieser Funktion in `openglerrorcallback.cpp`.

## 3.4 Der Build Prozess unter Windows 7 mit VisualStudio 2012

**ACHTUNG:** Das Programm kompiliert und linkt zwar unter Windows, stürzt beim Ausführen allerdings ab. Damit sie sich vorstellen können wie das Programm aussehen würde wenn sie es ausführen könnten, habe ich ihnen ein Video davon aufgenommen, wie das Programm aussieht, wenn es unter Linux ausgeführt wird. Die Videodatei heißt `Video.mp4`.

Der Beschriebene Buildprozess wurde auf den Poolrechnern in Raum L3 getestet. Entpacken sie `Projekt_Windows.rar`. Navigieren sie zu `Projekt_Windows/Projekt/Projekt/project`. Dort finden sie die ausführbare Datei `premake4.exe`, dies ist das Build Tool. Halten sie **CTRL + SHIFT** gedrückt, während sie mit der rechten Mause Taste irgendwo in das gerade geöffnete Fenster des Filemanagers klicken. Es öffnet sich ein Kontextmenue. Wählen sie **Eingabeaufforderung hier öffnen** aus. In der nun offenen CMD geben sie den Befehl `premake4.exe vs2012` ein, welcher ein `*.sln`-File für Visual Studio 2012 generiert. Doppelklicken sie auf `ProceduralTreeGeneration.sln`. Sollte VS 2012 nun gestartet sein, im Projektmappen-Explorer jedoch nur ein `MyFirstTree` (Laden fehlgeschlagen) stehen, rechtsklicken sie darauf, und wählen **Projekt erneut laden** aus. Nun können sie durch einen Klick auf **Lokaler Windows-Debugger** das Programm kompilieren und linkern. Normalerweise sollte das es ohne Fehler (mit ein paar Warnungen) kompilieren und linkern. Es wird anschließend versuchen zu starten und kurz danach abstürzen.

Es wird in Zeile 94 der Datei `buffer.cpp` beim Ausführen des Befehls `glBufferSubData(...)` abstürzen. Ich konnte den Fehler leider nicht beheben.

## 3.5 Der Build Prozess unter Linux

Auf meinem System, einem Arch Linux, kompiliert, linkt und läuft das Programm fehlerfrei. Um das es unter Linux zu kompilieren müssen sie zunächst folgende Abhängigkeiten auflösen indem sie die entsprechenden Pakete ihrer Distribution installieren oder von Hand die benötigten Bibliotheken installieren.

Wie sie **AntTweakBar** installieren ist hier beschrieben: <http://anttweakbar.sourceforge.net/doc/tools:anttweakbar:download>. Alternativ gibt es für einige Distributionen Pakete. ArchLinux: <https://aur.archlinux.org/packages/anttweakbar/>, Fedora: <https://apps.fedoraproject.org/packages/AntTweakBar>, Gentoo: <http://gpo.zugaina.org/media-libs/anttweakbar>.

Sind alle Abhängigkeiten aufgelöst, so kompilieren sie folgendermaßen. Entpacken sie `codeProjekt_Linux.rar`. Navigieren sie mit der Bash nach `Projkt_Linux/Projekt/project`. In diesem Ordner liegt bereits die Ausführbare Datei des Build-tools Premake. Generieren sie die GNU-Makefiles mit dem Befehl `./premake4 gmake`. Anschließend sollte im Ordner die Datei `Makefile` enthalten sein. Die Debug-Version kompilieren sie nun mit `make config=debug` und die Release-Version mit `make config=release`. Die Ausführbaren Programme liegen nun, falls der Kompilier- und Linkvorgang erfolgreich waren, in `./bin/debug` bzw. `./bin/release`. Ausführen können sie diese meist mit Doppelklick oder über die Bash.