

Methoden zur Nachbildung natürlicher Beleuchtungseffekte bei der Echtzeitdarstellung von Pflanzenpopulationen

Carsten Colditz
Professur für Computergrafik und Medieninformatik
Universität Konstanz
78457 Konstanz
Tel.: +49(0)7531 88 4742
Fax: +49(0)7531 88 3655
E-Mail: colditz@inf.uni-konstanz.de

Abstract: Bei der Darstellung natürlicher Pflanzenpopulationen in Echtzeit spielen zwei Aspekte eine wichtige Rolle, Quantität und Qualität. In der Vergangenheit lag das Hauptaugenmerk der interaktiven Visualisierung vor allem auf der Steigerung der Menge darstellbarer Pflanzen. Zurzeit existieren mehrere gut dokumentierte Ansätze zur Reduktion der Modellgeometrie, die unter anderem auf Level of Detail Algorithmen, hierarchischen Strukturen und dem Einsatz von Billboards/Imposters beruhen. Aufbauend auf diesen Ansätzen ist es uns möglich, quantitativ überzeugende Populationen von Pflanzenmodellen zu visualisieren. In der nachfolgenden Ausarbeitung soll sich nun mit der qualitativen Seite der Darstellung beschäftigt werden. Dabei wird gezeigt, dass sich durch den Einsatz bewährter Methoden und die Modifikation und Erweiterung bestehender Beleuchtungsmodelle Szenarien entwerfen lassen, die das Gesamtbild natürlicher Pflanzenpopulationen sehr gut nachbilden können.

Stichworte: lokales Beleuchtungsmodell, Helligkeitstransmission, Transluzenz

1 Motivation

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekt Lenné3D [Len3D] geht es um die Planung, Gestaltung und Visualisierung natürlicher Landschaftsszenarien. Innerhalb des Projektes wird bewusst auf zwei unterschiedliche Visualisierungsformen gesetzt. Zum einen wird bei der Darstellung von GIS relevanten Daten auf eine interaktive 3D-Karten Ansicht zurückgegriffen. Auf der anderen Seite kommt eine interaktive Visualisierung der Szenarien aus der Fußgängerperspektive zum Einsatz. Der zweite Ansatz erlaubt es uns, den Betrachter einen unmittelbaren, konkreten Blick auf die Landschaft werfen zu lassen, in einer Art und Weise, wie er es auch aus der Realität gewohnt ist. Doch gerade dieser gewollte Bezug zur Realität, bei dieser Form der Darstellung, stellt hohe Ansprüche an die Quantität und Qualität des Gezeigten.

Beim Umgang mit in Echtzeit generierter Geometrie steht der Aspekt der Effizienz meist im Vordergrund. Die Darstellung sollte dabei immer den Mittelweg zwischen Interaktivität und Qualität finden. Gerade bei der Visualisierung größerer Pflanzenbestände standen bisher vor allem Bemühungen im Vordergrund, die Menge der darzustellenden Geometrie effizient zu verwalten und in einem Maße zu reduzieren, ohne dass der visuelle Gesamteindruck darunter leidet. In [Deu02] haben wir einen Ansatz vorgestellt, der es mit Hilfe von Punkt- und Linienapproximationen ermöglicht, tausende von Pflanzenmodellen gleichzeitig interaktiv darzustellen. In der Fortführung dieser Arbeit haben wir uns nun dem qualitativen Aspekt der Darstellung zugewandt.

Moderne Entwicklungsumgebungen zur Visualisierung von Geometrie in Echtzeit, wie OpenGL oder Direct3D verfügen über umfangreiche Methoden zur Berechnung von Beleuchtungseffekten. Weiterhin ermöglicht der Einsatz von programmierbaren Vertex- und Fragmentshadern die gezielte Steuerung dieser Effekte auf Vertex- und Pixelebene. Jedoch beschränkt sich der Umfang an einsetzbaren Methoden auf bekannte Algorithmen lokaler Beleuchtungsmodelle, wie zum Beispiel das Phong-Beleuchtungsmodell. In der Natur nachempfundenen Szenarien, wie der Darstellung von Landschaft und natürlichem Bewuchs, reichen diese Ansätze allein jedoch nicht aus, um die mannigfaltigen Wechselwirkungen globaler Beleuchtungseffekte nachzubilden. Aufgrund des Echtzeitparadigmas ist eine genaue Umsetzung mathematischer Modelle zur Berechnung dieser globalen Effekte jedoch kaum anwendbar. Vielmehr muss nach Wegen und Möglichkeiten gesucht werden, mit Hilfe kompakter Berechnungsmethoden die Effekte globaler Beleuchtung allgemeingültig nachzubilden, ohne sie exakt simulieren zu müssen. Ausgangspunkt unserer Arbeit ist deshalb nach wie vor das lokale Phong-Beleuchtungsmodell, welches im Rahmen der Arbeit modifiziert und erweitert wurde, um einige Phänomene globaler Beleuchtungseffekte speziell bei der Darstellung von Pflanzen nachzubilden.

Im Einzelnen sind es folgende Beleuchtungseffekte, die realisiert werden sollen:

- Ambientes Umgebungslicht
- Diffuse Lichtreflexion
- Spekulare Lichtreflexion
- Schattendarstellung
- Helligkeitstransmission (Durchlauf des Lichts durch nicht opake Teile der Pflanze)
- Transluzenz

In unseren Szenen verwenden wir eine gerichtete Lichtquelle, um die Charakteristik der Sonne so gut wie möglich nachzubilden zu können. Außerdem verfügen die eingesetzten Pflanzenmodelle über keine speziell spezifizierten Materialfarben. Der Farbwert ergibt sich allein aus der auf die jeweilige Oberfläche projizierten Texturfarbe.

Mit Hilfe des lokalen Standardbeleuchtungsmodells nach Phong ist es möglich, drei unserer gewünschten Beleuchtungseffekte zu realisieren, das ambiente Umgebungslicht, sowie die diffuse und spekulare Lichtreflexion. Beim Einsatz der Berechnungsmethoden stellt sich jedoch noch kein visuell zufrieden stellendes Ergebnis ein.

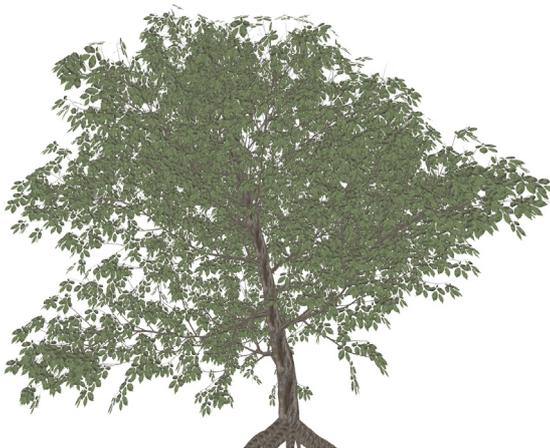


Abbildung 1: linke Seite: unbeleuchtetes Baummodell



rechte Seite: phongbeleuchtetes Baummodell

Beim rechten Bild von (Abb. 1) steht die gerichtete Lichtquelle genau senkrecht über dem Modell. Es fallen sofort mehrere Unstimmigkeiten auf. Zu allererst wirken die vielen komplett schwarzen Regionen störend. In der Natur gibt es keine völlig schwarzen Bereiche, wie sie uns der diffuse Term des Phong Modells liefert, falls der Winkel zwischen Lichtvektor und Normalenvektor größer als 90 Grad ist. Dieser Umstand lässt sich jedoch durch einfache Intervallverschiebung leicht korrigieren.

Viel subtiler stellt sich jedoch der zweite Fehler in der Berechnung dar. Bei genauer Betrachtung ist zu erkennen, dass die Vorderseite einiger Blätter dunkel erscheint, obwohl sie der Lichtquelle zugewandt sind und die Rückseite einiger Blätter hell erscheinen, obwohl sie von der Lichtquelle abgewandt sind. Worin liegt die Begründung für diesen Umstand und wie lässt sich der daraus resultierende Fehler beheben?

Die Blätter der Pflanzenmodelle bestehen aus simplen Polygonen. Jedem Vertex eines Polygons ist eine Normale zugeordnet. Bei soliden Grundkörpern wie Kugeln oder Zylindern lässt sich anhand der Normalen sehr einfach die Vorder- und Rückseite bestimmen, da in den meisten Fällen die Normalen einfach nach Außen zeigen. Bei unseren Blättern verhält es sich jedoch anders. Nur anhand der Normalen lässt sich nicht einwandfrei festlegen, welche Seite des Blattes die Vorder- und welches die Rückseite ist. In Abhängigkeit des Betrachterstandpunktes und dem Stand der gerichteten Lichtquelle kann sich diese Zuordnung sogar während der Darstellung ständig ändern. Aus diesem Grund müssen wir die Normalen, bevor wir sie in die Berechnung einfließen lassen, ausrichten und in Abhängigkeit vom Betrachterstandpunkt neu positionieren. Dadurch wird gewährleistet, dass die aktuell für den Betrachter sichtbare Seite des Polygons immer korrekt beleuchtet wird.

Mit Hilfe eines Vertexshaderprogramms lässt sich diese dynamische Ausrichtung der Normalen während der Anzeige leicht realisieren.

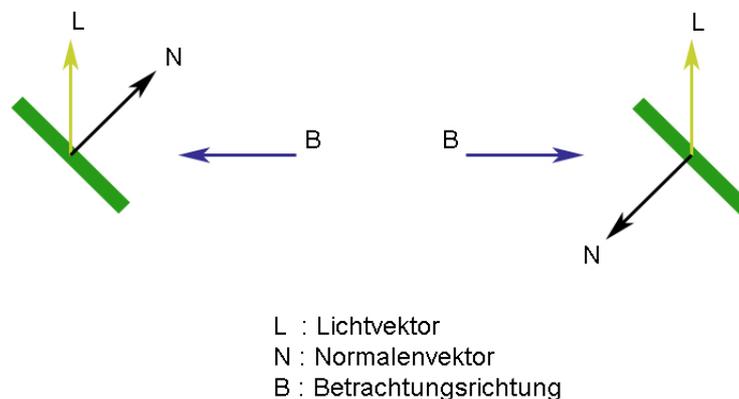


Abbildung 2: variable Ausrichtung der Vertex Normalen

Nach der Umsetzung dieser beiden Modifikationen stellt sich dem Betrachter schon ein wesentlich besseres Gesamtbild dar, wie in (Abb. 3) zu sehen ist.



Abbildung 3: linke Seite: Helligkeits-Intervallverschiebung rechte Seite: Normalenausrichtung

Die erste Erweiterung unserer Berechnungsmethode ist das Einfügen eines Schattenterms. Dabei greifen wir auf das bekannte Standardverfahren des Shadowmapping zurück. Dieser Ansatz stellt für unseren Verwendungszweck einen guten Kompromiss aus Darstellungsqualität und Ressourcenverbrauch dar.



Abbildung 4: linke Seite: Modell mit Shadowmap rechte Seite: Modell mit Shadowmap und Beleuchtung

Bisher haben wir uns mit der Modifikation und Einbindung bekannter Sachverhalte beschäftigt. Dadurch erreichen wir eine stimmige Visualisierung von Vegetation. Um den Grad des Realismus bei der Darstellung von Pflanzen weiter zu erhöhen möchten wir jedoch noch zwei weitere Beleuchtungseffekte in unsere Gesamtbetrachtung einfließen lassen.

2 Helligkeitstransmission

Der Durchlauf des Lichtes durch nicht opake Teile der Pflanze ist eindeutig ein globales Beleuchtungsphänomen. Dabei sind zwei Einzelaspekte wirksam. Das Umgebungslicht sorgt dafür, dass an allen Stellen der Pflanze eine gewisse Grundhelligkeit vorhanden ist. Das gerichtete Sonnenlicht indes sorgt dafür, dass aus Richtung der Lichtquelle gesehen, die Menge, des durch nicht opake Teile der Pflanze transportierten Lichtes, zur Gegenseite hin abnimmt. Dieser Aspekt lässt sich nicht allein durch Schatten beschreiben, obwohl er mit ihm in Wechselwirkung tritt.



Abbildung 5: Helligkeitstransmission in der Natur

Der natürliche Transmissionseffekt des Lichtes bei Pflanzen ist in (Abb. 5) dargestellt. Es ist sehr gut erkennbar, dass die abgeschatteten Bereiche nahe dem Erdboden wesentlich dunkler wirken als zum Beispiel abgeschattete Blätter an der Spitze des Baumes.

In [Fuh02] wird ein Verfahren beschrieben, wie sich mittels Photon Mapping beim Rendering von Pflanzen genau diese Helligkeitstransmission realisieren lässt. Für die Echtzeitdarstellung ist dieser Ansatz leider mit heutiger Hardware nicht realisierbar. Auch mit dem Abschwächungsterm des Phong Modells ist eine glaubhafte Nachbildung dieses Effektes nicht möglich. Deshalb ersetzen wir diesen Term durch einen eigenen Luminanzterm.

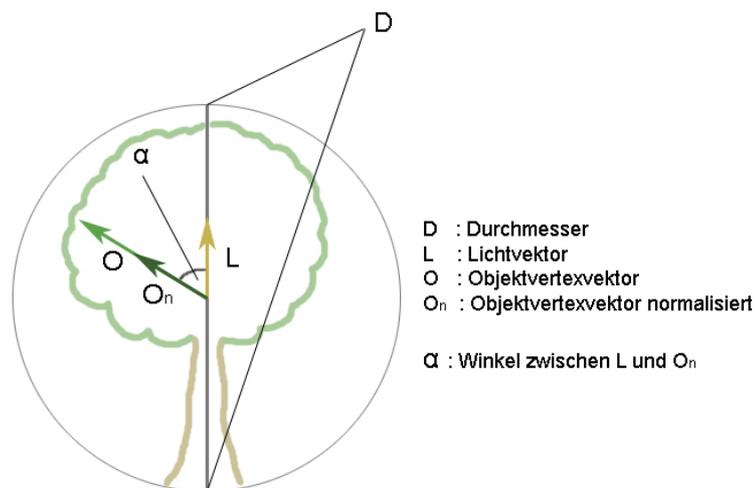


Abbildung 6: Größen zur Berechnung des Luminanzterms

Zur Bildung des Luminanzterms brauchen wir zwei zusätzliche Informationen. Den Mittelpunkt und Durchmesser der das Modell umschließenden Bounding Sphere. In Anbetracht des notwendigen Frustum Cullings haben wir diese Werte schon pro Objekt abgespeichert und können sie einfach an den Vertexshader übertragen.

$$\vec{O} = P_{vertex} - P_{center}$$

$$len_o = |\vec{O}|$$

$$len_{ak} = abs(len_o * \cos(\alpha))$$

$$Lum = \begin{cases} 0.5 + (len_{ak} / D); & \cos(\alpha) \geq 0 \\ 0.5 - (len_{ak} / D); & \cos(\alpha) < 0 \end{cases}$$

Nicht alle Pflanzen haben bezüglich der Helligkeitstransmission die gleichen Eigenschaften. Bei kompakten, sehr dichten Pflanzen ist der Helligkeitsabfall stärker als bei großen, lichten Vegetationstypen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, übergeben wir außerdem pro Pflanzenmodell eine Luminanzfunktion. Diese Funktion spezifiziert einen linearen, quadratischen oder wurzelfunktionsbasierten Verlauf des Luminanzterms.



Abbildung 7: links: linearer Verlauf mitte: quadratischer Verlauf rechts: wurzelbasierter Verlauf

Für realistisch wirkende Beleuchtungsergebnisse muss der Luminanzterm direkt mit dem Schattenterm verrechnet werden. Denn die Abschwächung des Helligkeitsdurchlaufs tritt natürlich nur in abgeschatteten Schichten einer Pflanze auf.



Abbildung 8: linke Seite: Shadowmap und Luminanz rechte Seite: Shadowmap, Luminanz und Beleuchtung

3 Transluzenz



Abbildung 9: Transluzenz in der Natur

Das Blatt- und Blütenwerk von Pflanzen besitzt wie schon beschrieben die Eigenschaft der Lichttransmission. Dabei wird das auftreffende Licht innerhalb der verschiedenen Blattschichten unterschiedlich stark reflektiert, absorbiert oder hindurch geleitet.

In [Deu03] wird eine Methode vorgestellt, die mit Hilfe des Schichtenmodells nach [Vog93] diesen Prozess simuliert. Auch diese Methode hat den Nachteil, dass sie sehr rechenintensiv ist und somit für die Echtzeitdarstellung nach dem heutigen Stand der Technik ungeeignet ist.



Abbildung 8: Effekt der Transluzenz durch Rendering Methode nach [Deu03]

Wir haben also auch bei dieser Problematik nach einer Möglichkeit gesucht, den Effekt der Transluzenz nachzubilden, ohne ihn exakt simulieren zu müssen. Dazu haben wir uns zuerst genauer mit dem Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsverhalten chlorophyllhaltiger Pflanzenblätter beschäftigt. In [Gau73] wurden genau diese Eigenschaften anhand 30 ausgewählter Pflanzenarten untersucht. Für den sichtbaren Teil des Lichtspektrums lässt sich danach folgende Aussage treffen. Licht der Wellenlänge 500nm bis 550nm wird zu einem Großteil reflektiert, wobei bei 550nm ein so genannter Reflexionspeak auftritt. Licht der

Wellenlänge 400nm bis 500nm und 600nm bis 700nm wird größtenteils absorbiert, hierbei wird vom Absorptionsband gesprochen.

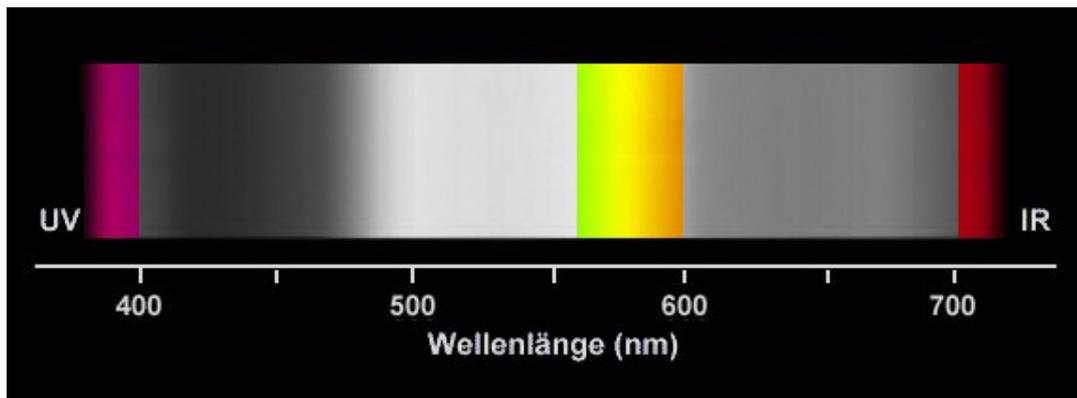


Abbildung 9: Transmissionsanteil des sichtbaren Lichtspektrums bei chlorophyllhaltigen Blättern

Gut zu erkennen ist, dass hauptsächlich Licht zwischen den Wellenlängen 550nm und 600nm mittels Transmission durch die Blattschichten weitergeleitet wird. Scheint die Sonne also direkt auf die Vorderseite eines Blattes, so entsteht auf der Rückseite für das menschliche Auge der Eindruck der Vergelblichung des ursprünglichen Grüntons. Bei andersfarbigen Blütenblättern treten ähnliche Effekte auf. Bei roten Blütenblättern wird der Rotanteil des Lichtes reflektiert und der Grünanteil des Lichtes absorbiert. Somit tritt auch hier der Effekt der Vergelblichung auf, das ursprüngliche Rot verlagert sich mehr in ein Orange.

Bei gelben Blütenblättern tritt in Folge der Transluzenz kaum eine Farbveränderung an der Rückseite der Blätter auf, da sowohl Grün- als auch Rotanteil des Lichtes absorbiert werden. Bei blauen Blütenblättern schließlich wird nur ein gewisser Teil des Lichtes im roten Bereich des sichtbaren Spektrums mittels Transmission durch die Blütenschicht geleitet. Der ursprüngliche Farbton verschiebt sich damit ins Violette.

Die so gewonnenen Erkenntnisse lassen sich relativ leicht auf das RGB-Farbmodell übertragen und ressourcensparend mittels eines Fragmentshaderprogramms in Echtzeitumgebungen implementieren. Dabei gilt die simple Regel, sollte Grün die dominierende Farbe des aktuellen Fragments sein, so wird der Wert des Grünkanals maximiert und der Wert des Rotkanals um denselben Wert angehoben. Der Wert des Blaukanals bleibt unverändert. Der ursprüngliche Grünton wird demzufolge leicht nach Gelb verschoben. Sollte Rot die vorherrschende Farbe sein, so wird der Wert des Rotkanals maximiert und der Wert des Grünkanals dementsprechend verändert. Auch hier bleibt der Blaukanal unangetastet. Der anfängliche Farbton wird also leicht nach Orange verschoben. Und bei Blau als dominierende Farbe wird der zugehörige Wert des Kanals maximiert und die Werte des Grün- und Rotkanals mit jeweils der Hälfte des entsprechenden Wertes addiert.

R: 40 G: 110 B: 25	R: 185 G: 255 B: 25
R: 145 G: 30 B: 15	R: 255 G: 140 B: 15
R: 25 G: 35 B: 145	R: 80 G: 90 B: 255
R: 215 G: 220 B: 30	R: 250 G: 255 B: 30

Abbildung 10: Verschiebung der RGB-Farbwerte in Folge der Transluzenz

Auf den folgenden Bildern ist der Effekt der Transluzenz anhand der Blätter gut erkennbar.



Abbildung 11: linke Seite: ohne Transluzenz

rechte Seite: mit Transluzenz

4 Ausblick

Der große Nachteil bei der Echtzeitvisualisierung naturnaher Szenarien ist der eingeschränkte Dynamikbereich. Bei der Entwicklung der Grafikhardware zeichnen sich jedoch eindeutig Tendenzen ab, es dem Programmierer, durch die Einführung von Floatingpoint Framebuffer und Floatingpoint Texturen zu ermöglichen, auch Medium oder High Dynamic Range Verfahren zu implementieren. Denn erst mit der zurzeit eingeführten neuen Generation von Grafikkarten besteht die Möglichkeit Floatingpoint Texturen wie bisherige RGB-Texturen zu filtern und Blendingoperationen darauf anzuwenden.

Durch den Einsatz von Kugelfunktionen (Spherical Harmonics) wäre es außerdem möglich, den Anteil des einfallenden Lichtes richtungsabhängig zu beschreiben, um noch natürlicher wirkendere Helligkeitsverläufe auf der Oberfläche von Pflanzen darstellen zu können. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass der zeitliche Berechnungsaufwand während der Vorverarbeitung gerade bei komplexen Szenen nicht unerheblich wäre. Denkbar wären jedoch auch hybride Verfahren, welche den Einsatz von Kugelfunktionen mit herkömmlichen, lokal arbeitenden Berechnungsmethoden kombinieren.

5 Literatur

- [Len3D] Lenné3D, Landschaft sehen, verstehen, gestalten www.lenne3d.com
- [Deu02] O. Deussen, C. Colditz, M. Stamminger, G. Drettakis. *Interactive Visualization of Complex Plant Ecosystems*. In: Proc. IEEE Visualization 2002, S. 219-226, ISBN 0-7803-7498-3, 2002. IEEE inc.
- [Fuh02] M. Fuhrer. *Realistic Rendering of Plants with Photon Mapping*. In: Proc. Western Computer Graphics Symposium 2002, S. 37-44.
- [Deu03] O. Franzke, O. Deussen. *Accurate Graphical Representation of Plant Leaves*. In: Proc. PMA 2003 Plant Growth Modeling and Applications, S. 203-209, ISBN 7-302-07140-3, 2003. Tsinghua University Press and Springer
- [Vog93] C. Vogelmann. *Plant Tissue Optics*. In: Annu. Rev. Plant Physiology Plant Molecular Biology 44, 1993, S. 231-251
- [Gau73] H. W. Gausman, W. A. Allen. *Optical Parameters of Leaves of 30 Plant Species*. In: Plant Physiology 52, 1973, S. 57-62