

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT INFORMATIK

INSTITUT FÜR SOFTWARE- UND MULTIMEDIATECHNIK

PROFESSUR FÜR COMPUTERGRAPHIK UND VISUALISIERUNG

PROF. DR. STEFAN GUMHOLD

Großer Beleg

Ground-Truth-Renderer für Partikelbasierte Daten

Josef Schulz

(Mat.-Nr.: 3658867)

Betreuer: Dipl-MedienInf. Joachim Staib

Dresden, 10. Mai 2015

Aufgabenstellung

Die Darstellung von Partikeldaten mittels Kugelglyphen ist in der wissenschaftlichen Visualisierung inzwischen etabliert. Gerade bei dichten Datensätzen stellen kompakte Anordnungen von sehr vielen Kugeln jedoch ein Problem für die Erkennbarkeit der zu visualisierenden Vorgänge dar. Eine Möglichkeit, diesem Problem zu begegnen ist es, über Blinn-Phong-Beleuchtung hinausgehende Effekte wie globale Schatten oder den Einsatz von Methoden aus dem Volume-Rendering zu integrieren. Durch deren Komplexität muss in Echtzeitvisualisierungen jedoch auf teilweise grobe Approximationen zurückgegriffen werden. Die Einschätzung der Approximationsqualität fällt häufig schwer, da keine Visualisierung des exakten Verfahrens verfügbar ist. Ziel dieser Belegarbeit ist die Umsetzung eines CPU-Renderers für Partikeldaten, der eine Reihe von erweiterten Visualisierungseffekten unterstützt. Er soll die Grundlage für Ground-Truth-Visualisierungen bieten. Zunächst soll eine geeignete Softwarearchitektur konzipiert und umgesetzt werden. Die Partikel sollen als mit lichtemittierendem und ?absorbierendem Gas gefüllte Kugeln interpretiert werden. Es sollen anschließend Methoden entwickelt werden, um einen physikalisch plausiblen globalen Schattenwurf und Lichttransport für eine beliebige Anzahl an Punkt- und Richtungslichtquellen zu ermöglichen. Die dafür notwendigen Gleichungen für Kugeln mit konstanter Dichte und Emission, sowie linearer Absorption, sollen soweit wie möglich analytisch bestimmt und, sobald nicht mehr möglich, mittels möglichst exakter numerischer Integratoren ausgewertet werden.

Die Teilaufgaben umfassen:

- Umfassende Literaturrecherche zur globalen Beleuchtungsrechnung in der Volumen Visualisierung
- Schrittweise Konzeption und Umsetzung einer erweiterbaren Architektur zum Erzeugen von Ground-Truth-Bildern:
 1. Zunächst als Raytracer für opake Kugeln, der globale Schatteneffekte von frei positionierbaren Punkt- und Richtungslichtquellen unterstützt
 2. Umsetzung eines Renderers, der Kugeln als Volumen nach dem Emissions-Absorptions-Modell rendert, dabei analytische Bestimmung des Volume-Rendering-Integrals, einschließlich Integration direkter Beleuchtung unverdeckter Lichtquellen
 3. Erweiterung zu verdeckten Lichtquellen und Bestimmung der Lichtstärke- und Farbe für Lichtstrahlen durch verdeckende Kugeln
- Unterstützung für ein Standardformat wie VRML
- Evaluation in Bezug auf Korrektheit, Bildartefakte und (numerische) Grenzfälle

Optional:

- Unterstützung für Refraktionseffekte
- Unterstützung komplexerer Materialtypen

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tag dem Prüfungsausschuss der Fakultät Informatik eingereichte Arbeit zum Thema:

Ground-Truth-Renderer für Partikelbasierte Daten

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Dresden, den 10. Mai 2015

Josef Schulz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Verwandte Arbeiten	3
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Strahl und Kugelgleichung	5
2.2	Die Perspektivische Kamera	6
3	Rendergleichung	9
3.1	Das Optische Modell	9
3.1.1	Emission	10
4	Implementation	11
5	Evaluation und Diskussion	13
5.1	Fazit	13
	Literaturverzeichnis	15

1 Einleitung

1.1 Motivation

Partikel sind geometrische Objekte, welche in einem Raum durch ihre Position und beliebige weitere Attribute, wie einen Geschwindigkeitsvektor beschrieben werden können. Sie kommen bei computergestützten Simulationen zum Einsatz oder entstehen bei modernen Messvorgängen in Form von Punktwolken. Der Einsatz von Partikelsystemen ist weit verbreitet und die Visualisierung dieser ist eine der Kernkomponenten beim Analysieren und Verstehen der dargestellten Prozesse. Bei komplexen und dichten Szenen kommt es vor, dass innere Strukturen auf Grund von Verdeckungen nicht sichtbar sind. Ein Ziel von Visualisierungen besteht in der Förderung der menschlichen Wahrnehmung zur Erkennung von Beziehungen und Tendenzen der Abgebildeten Daten. Eine Möglichkeit das Problem der verdeckten Objekte zu lösen, ist der Einsatz von Transparenz. Die hinteren Objekte scheinen bis zum Betrachter durch. In interaktiven Visualisierungen kann dem Benutzer die Möglichkeit geboten werden die Transparenz für ausgewählte Regionen selbst zu variieren. Zusätzlich spielt der Einsatz von Licht eine wichtige Rolle, da der menschliche Wahrnehmungsapparat darauf trainiert ist Lichtwege zu rekonstruieren und anhand dieser Tiefeninformationen zu schätzen. Lokale Beleuchtungsmodelle erfüllen diese Aufgabe nicht, der Einsatz einer globalen Beleuchtung wird notwendig. Auf Grund der hohen Komplexität der Algorithmen zur Berechnung der globalen Beleuchtung, müssen bei Echtzeitfähigen GPU-Implementierungen die Lösungen approximiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines CPU-Renderers dessen Fokus nicht auf Geschwindigkeit, sondern auf der Genauigkeit der Berechnung liegt. Die Partikel in Form von Kugeln werden mit Methoden des direkten Volumenrenderns abgebildet. Das Verfahren wird als direkt bezeichnet, da die Objekte nicht in polygonale Netze aufgelöst werden müssen um sie abzubilden. Die erzeugten Bilder, dienen als *Ground-Truth* Information zur Evaluation von approximativen Implementierungen. Aufbauend auf der Volumen-Rendergleichung von Nelson Max aus der Arbeit [Max95], soll dessen Emission- und Absorptionsmodell benutzt und eine weitestgehend analytische Lösung entwickelt werden. Zur Erzeugung der Bilder kommt ein *Raycasting* Algorithmus zum Einsatz. Das Verfahren ist nicht auf Kugeln beschränkt und lässt sich für implizite Oberflächen erweitern. Die erarbeitete Lösung stellt ebenfalls eine Approximation der eigentlichen dar. Um die Berechnung zu beschleunigen kann die Genauigkeit der numerischen Integration in Abhängigkeit der Stichprobengröße vereinfacht werden. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit die Beleuchtungsberechnung der verdeckten Objekte sukzessiv zu vereinfachen, in Abhängigkeit einer einstellbaren Tiefe werden nur bis zu dieser die Partikel global beleuchtet. Alle weiteren verdeckten Kugeln werden durch eine weitere Vereinfachung der Rendergleichung gezeichnet.

1.2 Verwandte Arbeiten

Die Arbeit [JSYR14] wurde verfasst, um den Leser einen Überblick über Techniken des renderns von Volumendaten in Echtzeit zu geben. Die in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen wurden mit Gütekriterien bewertet und klassifiziert. Diese Kriterien sollen die Auswahl des Verfahrens für den Entwickler erleichtern. Alle vorgestellten Modelle sind Approximationen, sie generieren optisch schöne Bilder, weichen jedoch weit von der Realität ab.

Die Arbeit von Nelson Max [Max95], beschreibt die Grundlagen des Emission und Absorptionsmodells, welches Grundlage vieler Arbeiten im Bereich des Direkten Volumenrenderns bildet. Für die Renderglei-

chung entwickelt er in dieser Arbeit eine Allgemeine Lösung und beschreibt den Vorgang der Lichtstreuung im Detail. Am ende der Arbeit werden einige Lösungsvorschläge zur Implementierung vorgestellt.

In der Publikation [JPP98] wird ein zum Teil Analytisches Verfahren vorgestellt. Der Algorithmus wurde zum Rendern von Voxelgittern konzipiert. Jedem Voxel wird eine Dichte zu geordnet, aus welchem ein Wert für Transparenz abgeleitet wird. Hinter dem Voxelgitter befindet sich eine Lichtquelle und deren Lichtintensität wird durch das Volumen unterschiedlich Stark abgeschwächt. Die Integrale der Gleichungen werden streckenweise Analytisch gelöst, wodurch ein Zuwachs an Genauigkeit erreicht wird.

Photon Mapping ist ein Verfahren zum erzeugen von Globaler Beleuchtung. Es werden Photonen in die Szene geschossen, trifft ein Photon die Oberfläche, werden Informationen in der Photonenmap gespeichert. Wenn das Photon noch genügend Energie besitzt, wird in Abhängigkeit der Reflektionsrichtung ein weiterer Strahl verfolgt. Diese Vorgehensweise wiederholt sich das Photon seine Energie komplett an die Umgebung abgegeben hat, oder ein Abruchkriterium erfüllt wurde. In einem zweiten Schritt wird das Bild mit einem Raycast verfahren erzeugt. In der Arbeit [JKRY12] wird die Photonenmap mit Histogrammen umgesetzt. Nach Parameteränderungen, werden nur die Betroffenen Histogramme ersetzt. Dadurch wird dieses Verfahren Echtzeitfähig.

In der Arbeit [ASW13] geht es um einen alternativen Ansatz, welcher nicht auf dem Emission und Absorptionsmodell aufbaut, sondern von einem Punkt Stahlen in die umliegende Nachbarschaft verfolgt um den Grad an Verdeckung an diesem Punkt zu bestimmen. Je mehr Segmente mit hoher Dichte in der Nachbarschaft liegen, umso geringer ist der Anteil des Lichtes, welches eben jenen Punkt erreicht. Ein Geschwindigkeitszuwachs wird durch eine Vor-integrierte Transferfunktion erreicht. Ein Vorteil dieses Verfahrens, stellt die Güte der erzeugten Schatten da.

Eine weitere Arbeit aufbauend auf dem Prinzip der Ambienten Verdeckung stellt die Arbeit [KPH⁺03] vor. In dieser Arbeit hat Direktes und Indirektes Licht einen Einfluss auf das Ergebnis. Mit Hilfe des so genannten *blurring* werden die Farbanteile des Indirekten Lichtes in einem Buffer gehalten. Dieses verfahren approximiert die Streuungseffekte, welche in Materialien auftreten können.

Eine Erweiterung dieses Verfahrens stellt die Arbeit [SPH⁺09] dar, welche hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden soll.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert. Zunächst werden im Grundlagen Kapitel die Technik des Raycastings erläutert und die grundlegenden Gleichungen für Kugel und Strahl und deren Schnitt behandelt. Beendet wird das zweite Kapitel mit der Herleitung der Perspektivischen Kamera anhand einer Lochkamera. Im dritten Kapitel wird die Rendergleichung aufbauend auf der Arbeit von Nelson Max hergeleitet und eine Lösung dieser präsentiert werden. Das vierte Kapitel wird die sich mit der Implementierung des Algorithmus beschäftigen und im fünften Kapitel werden die Ergebnisse in Abhängigkeit der Parameter und der Rechenzeit evaluiert und anschließend im Fazit diskutiert werden.

2 Grundlagen

Der Entwickelte Algorithmus basiert auf dem Verfahren des *Raycasting*. Bei diesem Verfahren wird der Sensor der Kamera, welche am ende dieses Kapitels definiert wird, diskretisiert und für jeden Pixel wird mindestens ein Strahl in die Szene geschossen. Für jeden Strahl muss eine Schnittberechnung mit den in der Szene befindlichen Objekten durchgeführt werden. Wird ein Objekt vom Strahl geschnitten, muss die Rendergleichung für das dazugehörige Stahlsegment gelöst werden.

In dieser Arbeit wird die Menge der Objekte auf Kugeln reduziert. Jede Kugel repräsentiert ein mit Gas gefüllten Partikel. Die Dichte im Inneren jedes Partikels wird als Konstant angenommen und die Menge der Transferfunktionen auf Lineare beschränkt werden. Im Folgenden werden die Gleichungen für Strahlen, Kugeln und deren Schnittberechnung definiert. Das Kapitel wird mit der Herleitung der perspektivischen Kamera beendet.

Punkte werden in dieser Arbeit wie Vektoren behandelt, sie unterscheiden sich von diesen in den Formeln dadurch das sie Unterstrichen sind und keinen Pfeil besitzen wie ein Vektor. \underline{p} stellt einen Punkt und \vec{p} einen Vektor dar. Skalarprodukte werden mit Hilfe von spitzen Klammern $\langle \vec{a}, \vec{b} \rangle$ repräsentiert.

2.1 Strahl und Kugelgleichung

Es wird mit der Definition des Strahls begonnen, der das Zentrale Element des Algorithmus bildet. Die Formel beschreibt wie jeder Punkt auf dem Strahl in Abhängigkeit eines skalaren Wertes t , eines Stützpunktes \underline{o} und einem Richtungsvektor r bestimmt werden kann. Die Gleichung definiert sich wie folgt:

$$\underline{p}(t) = \underline{o} + t \cdot \vec{r}, \text{ mit } t \in \mathbb{R}_+ \quad (2.1)$$

Jeder Punkt auf dem Strahl $\underline{p}(t)$, ergibt sich aus der Addition eines Stützpunktes \underline{o} mit dem durch t skalierten Richtungsvektor \vec{r} . Der Vektor \vec{r} muss normiert sein, die Länge des Vektors muss genau 1 betragen: $||\vec{r}|| = 1$. Ist der Wert von $t < 0$ liegt der Punkt hinter dem Ausgangspunkt des Strahls, andernfalls davor oder im Fall von $t = 0$ entspricht er eben diesen.

Neben dem Strahl ist die Kugel, welche die Geometrische Form der betrachteten Partikel darstellt eine wichtige Rolle und soll ebenfalls definiert werden, damit die Schnittpunktberechnung durchgeführt werden kann.

Die Fläche einer Kugel wird im \mathbb{R}^3 durch den Mittelpunkt $\underline{m} = (x_0, y_0, z_0)$ und den Radius r parametrisiert. Jeder Punkt auf der Kugeloberfläche lässt sich durch den Abstand zum Mittelpunkt, dem Zentrum der Kugel definieren. Die Folgende Formel beschreibt diese Formulierung:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (2.2)$$

Jeder Punkt $\underline{p} = (x, y, z)$ der die Formel 2.2 erfüllt liegt auf der Oberfläche der Kugel. Die Kugelgleichung 2.2 lässt sich auf beliebige \mathbb{R}^n , mit $n \in \mathbb{N}_+$ erweitern, und die Beschreibung ist für alle n äquivalent:

$$\langle \underline{p} - \underline{m}, \underline{p} - \underline{m} \rangle = r^2 \quad (2.3)$$

Um den Schnittpunkt zwischen Kugel und Strahl zu berechnen wird die Kugelgleichung 2.3 vereinfacht. Der Mittelpunkt der Kugel auf den Koordinaten Ursprung verschoben, liegen alle Punkte p auf der Oberfläche O , wenn sie den Abstand r zum Koordinatenursprung haben. Die zu erfüllende Bedingung hat demnach folgende Form:

$$||\underline{p}|| = r \quad (2.4)$$

Die Gleichung 2.4 lässt sich quadrieren und der Strahl wird anschließend in diese eingesetzt. Das Resultat ist eine quadratische Gleichung. Bis auf das Skalar t sind alle Werte bekannt. Die Gleichung

$$r^2 = \langle \underline{p}, \underline{p} \rangle = \langle r(t), r(t) \rangle = \langle \underline{p} + t \cdot \vec{r}, \underline{p} + t \cdot \vec{r} \rangle \quad (2.5)$$

kann nach t umgestellt werden und die Nullstellen berechnet werden. Es gibt entweder keine, eine oder zwei Lösungen für die Gleichung. Werden die bestimmten Schnittpunkte in die Gleichung des Strahls eingesetzt können die Positionen der Schnittpunkte berechnet werden. Die komplette Lösungsformel definiert sich im Folgenden:

$$t_{1,2} = \frac{-2 \cdot \langle \underline{p}, \vec{r} \rangle \pm \sqrt{4 \cdot \langle \underline{p}, \vec{r} \rangle^2 - 4 \cdot \langle \underline{p}, \underline{p} \rangle \cdot \langle \vec{r}, \vec{r} \rangle}}{2 \cdot \langle \vec{r}, \vec{r} \rangle}. \quad (2.6)$$

2.2 Die Perspektivische Kamera

Um in der realen Welt Bilder aufzunehmen wird eine Kamera benötigt, hier wird eine Simulation durchgeführt und für diese wird das Modell einer Kamera benötigt welches sich von der *camera obscura* ableitet. Dabei handelt es sich um das Modell einer Lochkamera, diese besteht aus einem Kasten. Auf der einen Seite befindet sich ein lichtempfindliches Material, welches den Sensor bildet und auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein schmales Loch. Das Licht wird von der Oberfläche der abzubildenden Objekte reflektiert und fällt durch das Loch auf den Sensor. Bei dem Vorgang der Abbildung findet eine Vertikale und Horizontale Spiegelung der Szene statt. Das bedeutet das Bild der Szene wird spiegelverkehrt aufgenommen.

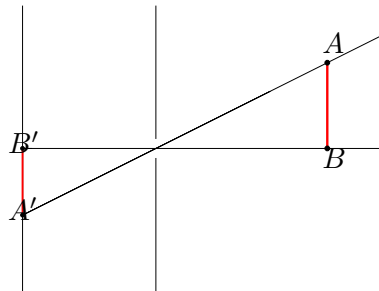


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Abbildungsvorgangs der *camera obscura*

Die Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau der *Camera obscura* schematisch. Auf der linken Seite der Abbildung befindet sich die Bildebene, auf welche die Szene abgebildet wird. In der Mitte der Abbildung 2.1 befindet sich die Wand mit dem kleinen Loch. Hier wird die erste Abstraktion durchgeführt, denn in der Realität kann das Loch eine gewisse Größe nicht unterschreiten, da andernfalls kein Licht hindurch dringen würde. Aufgrund dieser minimalen Größe kommt es zu einer Glättung der Abbildung. Diese Einschränkung gilt für die Computersimulation nicht, es wird angenommen, dass das Loch unendlich klein ist, so dass die Szene unendlich genau abgebildet werden kann.

Auf der rechten Seite in der Abbildung 2.1 befindet sich ein Objekt in Form einer Strecke, welche durch die Punkte A und B begrenzt wird. Der Punkt B befindet sich mit der Sensormitte und dem Loch genau auf einer Ebene und er wird auf den Punkt B' abgebildet. Der zweite Punkt A wird auf dem Punkt A' abgebildet. Genauer zeigt die Abbildung 2.1 den Strahlensatz der in diesem Zusammenhang gilt.

Die Distanz zwischen dem Sensor und dem Loch der Kamera wird mit der Variable f bezeichnet. Da es sich wie oben bereits erwähnt um eine Computersimulation handelt kann das Modell weiter abstrahiert werden. In der im Computer simulierten Welt kann der Sensor auch vor dem Loch positioniert werden, was zur Folge hat, dass die Abbildung entspiegelt wird.

Die Position der Kamera soll im Folgenden mit der Variable \underline{p} bezeichnet werden. Diese ist mit der Position des Lochs der Lochkamera identisch und wird in der Literatur auch als Augpunkt bezeichnet. Für jeden Pixel der Bildebene wird mindestens ein Strahl erzeugt, welcher als Stützpunkt die Position der Kamera erhält und der Richtungsvektor ist der Normierte Vektor von der Kameraposition zum Pixel. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die Bildebene parallel zur xy -Ebene des Koordinatensystems der Szenen ist und der Augpunkt genau im Ursprung von diesem liegt. Die Fläche des Sensors wird in $W \cdot H$ Pixeln unterteilt. Für jeden Pixel (x, y) wird ein Strahl s in die Szene geschossen, dessen Stützpunkt der Augpunkt der Kamera ist und der Richtungsvektor der normierte Vektor $\vec{r}(x, y)$ welche sich ohne wie folgt definiert.

$$\vec{r}(x, y) = \begin{pmatrix} \left(\frac{x}{W} \cdot 2 - 1 \right) \cdot \frac{W}{H} \\ \frac{y}{H} \cdot (-2) + 1 \\ f \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Es ist gilt zu beachten dass der Richtungsvektor noch normiert werden muss: $\vec{r}(x, y) = \frac{\vec{r}(x, y)}{\|\vec{r}(x, y)\|}$. Jeder Kamera Strahl, im folgenden auch als Primärstrahl bezeichnet hat die folgende Form:

$$\underline{s}(x, y) = \underline{p} + t \cdot \vec{r}(x, y) \quad (2.8)$$

Die Kamera kann an dieser Stelle nur entlang der z -Achse Blicken, eine Rotation im Raum lässt sich durch die Multiplikation einer Rotationsmatrix mit den Richtungsvektoren bewerkstelligen. Die Position des Kameramodells ist frei Wählbar, es genügt den Augpunkt zu verschieben. Mit Hilfe der Distanz f , der fokalen Länge kann ein Zoomeffekt der Kamera erzielt werden.

3 Rendergleichung

In diesem Kapitel wird die Rendergleichung aufgestellt und die Grundlagen des Algorithmus hergeleitet, welcher beim Zeichnen der Kugeln zum Einsatz kommt. Zum Beginn wird das Emission und Absorptionsmodell aus der Arbeit von [Max95] genauer betrachtet. Als Grundannahme wird die Menge der Transferfunktionen auf lineare Funktionen beschränkt, die Dichte soll im Volumen als konstant gelten. Diese Arbeit befasst sich mit der Frage, ob sich mit diesen Einschränkungen das entstehende Volumenintegral analytisch lösen lässt. Gibt es eine analytische Lösung, lassen sich die Bilder effizient und sehr genau berechnen. Tritt der Fall ein, dass sich keine analytische Lösung für die Gleichung finden lässt, werden die Integrale so weit es möglich analytisch gelöst und die restlichen Teile der Gleichung müssen folglich Numerisch approximiert werden.

3.1 Das Optische Modell

Aufbauend auf dem Modell von Nelsen Max aus der Arbeit [Max95] werden zur Herleitung Partikel in Form von Einheitskugeln betrachtet. Jede dieser Kugeln besitzt einen Radius r . Die Oberfläche eines Partikel A bestimmt sich durch das Produkt der Kreiszahl π und dem Radius. So das gilt $A = \pi \cdot r$. Die Mittlere Dichte ρ entspricht der Anzahl von Partikeln, welche sich in einem Einheitsvolumen befinden. Betrachtet wird im folgenden ein Zylinder, welcher mit der Kreisfläche E und einer Länge Δs parametrisiert wird. Das Volumen eines solchen Zylinders entspricht $V_z = E \cdot \delta s$ und es enthält in etwa N Partikel, mit $N = \rho E \delta s$. Die von dem Zylinder verdeckte Grundfläche B entspricht bei einem sehr klein gewählten δs in etwa NA , mit $NA = \rho A E \delta s$. Als Flussrichtung des Lichtes wird δs gewählt. Der Anteil des Lichts, welcher mit Teilchen Wechselwirkt bis er B erreicht beträgt $\rho A \delta s$. Wenn δs gegen Null geht, sinkt die Wahrscheinlichkeit, das sich Gaspartikel entlang der Lichtrichtung überlappen. Die Funktion $I(s)$ liefert die Intensität des Lichtes an der Distanz s . Wird die Lichtintensität $I(s)$ nach s abgeleitet, ergibt sich die folgender Differenzialgleichung:

$$\frac{dI}{ds} = -\rho(s)AI(s) = -\tau(s)I(s) \quad (3.1)$$

Auf der rechten Seite der Gleichung 3.2 steht die Funktion $\tau(s)$, diese beschreibt die Abschwächung der Lichtintensität durch ein Volumen der Länge s . Wie in 3.4 zusehen ist definiert sich der Abschwächungskoeffizient als das negative Produkt der mittleren Dichte ρ mit der Oberfläche eines Partikels. Nelson Max hat die folgende Lösung für die Differenzialgleichung gefunden:

$$I(s) = I_0 \cdot e^{-\int_0^s \tau(t)dt} \quad (3.2)$$

Der Parameter I_0 entspricht der Intensität an der Stelle $s = 0$, dabei handelt es sich um den Punkt, an dem der Lichtstrahl auf das Volumen trifft. Bei den zweiten Teil des Terms handelt es sich um die Transparenz des Mediums im Intervall $[0, s]$, welche durch $T(s) = \exp(-\int_0^s \tau(t)dt)$ repräsentiert wird. Nelson Max definiert neben der Transparenz einen Wert für den Grad an Verdeckung durch das Volumen α , der in der Englischen Literatur als *opacity* bekannt ist.

$$\alpha = 1 - T(l) = 1 - e^{-\int_0^l \tau(t)dt} \quad (3.3)$$

Ist die Funktion τ innerhalb des Volumens konstant, vereinfacht sich der Term für die Verdeckung zur Gleichung $\alpha = 1 - \exp(-\tau l) = \tau l - (\tau l)^2/2 + \dots$. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Begriff der Transferfunktion bereit mehr als einmal gefallen, eine solche Funktion bildet den Materialwert auf die optischen Eigenschaften der Gleichung ab.

3.1.1 Emission

Wie in der Arbeit [Max95] wird auch in dieser zuerst die Gleichung für die Emission hergeleitet. Neben der Abschwächung der Lichtintensität durch ein Volumen, kann zusätzlich an jedem Punkt in diesem Licht emittiert werden. In Worten bedeutete es, das ein Lichtstrahl welcher durch das Volumen geschossen wurde zusätzlich mit Licht angereichert wird. Zur Herleitung der Emission soll die Absorption zu nächst vernachlässigt werden. Betrachtet werden die Partikel aus dem vorhergehenden Abschnitt, jeder dieser Partikel wird im Folgenden als Transparent angenommen. Zusätzlich emittiert jeder von ihnen diffuses Licht. Das bedeutet jeder Partikel emittiert Licht, in alle Richtungen mit der gleichen Intensität C über der projizierten Fläche $\rho A E \Delta s$. Dieser Effekt bewirkt eine Anreicherung des Lichtfluss $C \rho A E \Delta s$ welcher zur Basisfläche E fließt. Durch diesen Zusammenhang ergibt sich eine weitere Differenzialgleichung:

$$\frac{dI}{ds} = C(s)\rho(s)A = C(s)\tau(s) = g(s) \quad (3.4)$$

Die Funktion $g(s)$ wird als Quellterm bezeichnet. Dieser Term beschreibt die Wechselwirkung des Lichtes mit dem Volumen über der Länge s . Zu der Differenzialgleichung 3.4 hat Nelson Max ebenfalls eine Lösung gefunden welche sich wie folgt definiert:

4 Implementation

5 Evaluation und Diskussion

5.1 Fazit

Literaturverzeichnis

- [ASW13] AMENT, Marco ; SADLO, Filip ; WEISKOPF, Daniel: Ambient Volume Scattering. In: *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 19 (2013), Nr. 12, S. 2936–2945
- [JKRY12] JÖNSSON, Daniel ; KRONANDER, Joel ; ROPINSKI, Timo ; YNNERMAN, Anders: Historygrams: Enabling Interactive Global Illumination in Direct Volume Rendering using Photon Mapping. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG)* 18 (2012), Nr. 12, S. 2364–2371
- [JPP98] JUNG, Moon-Ryul ; PARK, Hyunwoo ; PAIK, Doowon: An Analytical Ray Casting of Volume Data. In: *Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, IEEE Computer Society, 1998. – ISBN 0–8186–8620–0, S. 79–86
- [JSYR14] JÖNSSON, Daniel ; SUNDÉN, Erik ; YNNERMAN, Anders ; ROPINSKI, Timo: A Survey of Volumetric Illumination Techniques for Interactive Volume Rendering. In: *Computer Graphics Forum* 33 (2014), Nr. 1, S. 27–51
- [KPB12] KROES, Thomas ; POST, Frits H. ; BOTHA, Charl P.: Exposure render: an interactive photo-realistic volume rendering framework. In: *PLoS ONE* 7 (2012), 07, Nr. 7. – 10.1371/journal.pone.0038586
- [KPH⁺03] KNISS, Joe ; PREMOZE, Simon ; HANSEN, Charles D. ; SHIRLEY, Peter ; MCPHERSON, Allen: A Model for Volume Lighting and Modeling. In: *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.* 9 (2003), Nr. 2, S. 150–162
- [Max95] MAX, Nelson: Optical Models for Direct Volume Rendering. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 1 (1995), Juni, Nr. 2, S. 99–108. – ISSN 1077–2626
- [SPH⁺09] SCHOTT, Mathias ; PEGORARO, Vincent ; HANSEN, Charles ; BOULANGER, KÃ©vin ; BOUATOUCH, Kadi: A Directional Occlusion Shading Model for Interactive Direct Volume Rendering. In: *Computer Graphics Forum* (2009). – ISSN 1467–8659

Danksagung

Die Danksagung...

Erklärungen zum Urheberrecht

Hier soll jeder Autor die von ihm eingeholten Zustimmungen der Copyright-Besitzer angeben bzw. die in Web Press Rooms angegebenen generellen Konditionen seiner Text- und Bildübernahmen zitieren.

