

Bachelorarbeit im Studiengang

Audiovisuelle Medien

**Die Nutzbarkeit von Fraktalen
in VFX Produktionen**

vorgelegt von Denise Hauck

an der Hochschule der Medien Stuttgart

am 29.03.2019

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor of Engineering

Erst-Prüferin: Prof. Katja Schmid

Zweit-Prüfer: Prof. Jan Adamczyk

Eidesstattliche Erklärung

Name:

Hauck

Vorname:

Denise

Matrikel-Nr.: 30394

Studiengang: Audiovisuelle Medien

Hiermit versichere ich, Denise Hauck, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Die Nutzbarkeit von Fraktalen in VFX Produktionen“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der ehrenwörtlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 24 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester), § 23 Abs. 2 Master-SPO (3 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO (4 Semester und berufsbegleitend) der HdM) einer unrichtigen oder unvollständigen ehrenwörtlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Stuttgart, den 29.03.2019

Kurzfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, ein Verständnis für die Generierung und Verwendung von Fraktalen in VFX Produktionen, zu vermitteln. Dabei bildet der Einblick in die Arten und Entstehung der Fraktale einen ersten Überblick, der dazu dient, ein mathematisches Grundverständnis zu bekommen. In anschaulicher Erklärung der Anwendungen Mandelbulb 3D und Houdini, werden die benötigten Arbeitsschritte der Fraktalgenerierung, näher erläutert. Durch die gewonnene Kenntnis, über den Prozess der Fraktalerstellung und die zusätzliche Befragung von Anwendern aus der Visual Effects und Computeranimations Branche, kann die Nutzbarkeit der Fraktale in aktuellen Produktionen, wie The Guardians of the Galaxy Vol 2., Doctor Strange und Suicide Squad, besser nachvollzogen werden. Es werden Problematiken und Lösungswege ausführlich beschrieben, um den Bedarf an zukünftigen Entwicklungen zur Verbesserung der Nutzbarkeit zu zeigen.

Schlagwörter: Fraktale, visuelle Effekte, VFX, Mandelbrot, Mandelbulb 3D, Houdini, VEX

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to provide an understanding of the generation and use of fractals in visual effects productions. The insight into the types and origin of fractals provides an initial overview that serves to gain a basic mathematical understanding. In a detailed explanation of the applications Mandelbulb 3D and Houdini, the necessary steps of fractal generation will be illustrated. Through the gained knowledge about the process of fractal creation and the additional survey of users from the Visual Effects and Computeranimation industry, the usability of fractals in current productions, such as The Guardians of the Galaxy Vol 2., Doctor Strange and Suicide Squad, will be better understood. Problems and solutions are described in detail in order to show the need for future developments to improve usability.

Keywords: fractals, visual effects, VFX, Mandelbrot, Mandelbulb 3D, Houdini, VEX

Glossar

kongruent	Vollkommen deckungsgleich
Rekursion	Wiederholtes Einsetzen des erhaltenen Ergebnisses und anschließende Neuberechnung der Formel
Endlich sein	Eine Menge besitzt eine feste Anzahl an Werten
Ordnung	Sortierung, den Zustand zielführender Abfolge
selbstinvers	Ein Objekt wird in sich selbst gefunden
Rauigkeit	Unebenheiten der Oberflächenhöhen
Gefangenenmenge	Die Werte innerhalb der Mandelbrotmenge
Fluchtmenge	Die Werte außerhalb der Mandelbrotmenge
Pseudocode	Ein Programmcode, der nicht zur maschinellen Interpretation, sondern lediglich zur Veranschaulichung eines <u>Paradigmas</u> oder Algorithmus dient.
VDB	OpenVDB in Houdini beschleunigt das Rendering, da nur gefüllte und keine leeren Voxel beachtet werden und somit der Speicher effizienter genutzt wird.

Eidesstattliche Erklärung	2
Kurzfassung	3
Abstract	3
Glossar	4
Einleitung	7
1. Fraktale	7
1.1 Die ersten Fraktale	10
1.1.1 Kantor Menge	10
1.1.2 Sierpinski-Dreieck und – Teppich	11
1.1.3 Die Koch-Kurve	12
1.1.4 Hilbert Kurve.....	13
1.1.5 Apollonisches Dichtungsfraktal	15
1.2 Mandelbrotmenge	15
1.2.1 Berechnung der Mandelbrotmenge	16
1.2.2 Julia Menge.....	20
1.2.3 Berechnung der Julia Menge in Abhängigkeit der Mandelbrotmenge.....	20
1.3 Wie kommt das 2D Fraktal in die dritte Dimension?	22
1.3.1 Mandelbulb	23
1.3.2 Mandelbox.....	26
2. Erstellen von Fraktalen	27
2.1 Kreation von Fraktalen in Mandelbulb 3D.....	27
2.1.1 Formeln wählen und kombinieren	29
2.1.2 Navigator	31
2.1.3 MutaGen.....	32
2.1.4 Lighting	33
2.1.5 Schneiden	36
2.1.6 Post Processing	36

2.1.7 Animation	37
2.1.8 Exportmöglichkeiten	38
2.1.9 Eignung	41
2.2 Fraktalerstellung in Houdini	43
2.2.1 Houdini VEX Tutorial	43
2.2.2 VFX Fractal Toolkit.....	47
2.2.3 Flyknit – ManvsMachine	50
3. Einsatzgebiete von Fraktalen in VFX Produktionen	52
3.1 Guardians of the Galaxy Vol. 2	52
3.1.1 Animal Logic.....	52
3.1.2 Method Studios	57
3.1.3 Trixter	58
3.1.4 Weta Digital	60
3.2 Doctor Strange	64
3.2.1 Luma Pictures	65
3.2.2 Framestore.....	68
3.2.3 Method Studios	69
3.2.4 ILM.....	70
3.3 Suicide Squad	72
4. Fazit	74
Literaturverzeichnis.....	76
Abbildungsverzeichnis	81
Interview mit Trixters Concept Artist Markus Brackelmann zur Produktion Guardians Of The Galaxy Vol. 2	83
Interview mit Viviana Schaller zur Studioproduktion Hidden Worlds.....	86

Einleitung

Fraktale sind nicht jedermann ein Begriff, obwohl jeder tagtäglich von ihnen umgeben ist. In der Natur sind sie allgegenwärtig und finden sich in den unterschiedlichsten Bereichen wieder. Vertreten sind sie in der menschlichen Anatomie, in Molekülen, Pflanzen, Wolken und Küstenlinien. Sie finden Nutzen in der Datenkompression, Chemie, Ökonomie und der Astronomie, um Galaxien zu analysieren.¹ Ein Stückchen bekannter werden diese abstrakten Formen durch deren Verwendung in Bereichen der Kunst- und Medienbranche. Sehr vielseitig werden sie von Julius Horsthuis, Fraktal Artist mit VFX Vergangenheit, für ganze CG Landschaften eingesetzt. Er baut eigene fraktale Welten und produziert daraus eigene Kurzfilme für Virtual Reality Projekte, Musikvideos, Musikfestivals, Live Music Untermalung, Projection Mapping und Kunstausstellungen.² Ein breites Publikum erreichten die Fraktale der aktuellen Marvel Produktionen Doctor Strange, Guardians Of The Galaxy Vol. 2 und DC Entertainments Suicide Squad. Die VFX Producer hatten einige Hürden zu meistern, da Fraktale nicht leicht zu kontrollieren und in die Pipeline einzubauen sind. Diese Arbeit soll einen Überblick geben was Fraktale definiert und wie sie für eine VFX Produktion erstellt werden können. Anhand der genannten Filme werden Problematiken, Herausforderungen und Lösungswege bei deren Nutzung veranschaulicht.

1. Fraktale

Die Geometrie wird oft als nüchtern und trocken bezeichnet, da Mathematiker bislang unfähig waren naturgegebene Formen zu beschreiben. Sie sind Formen wie Wolken, Berge, Küstenlinien, Schneeflocken, Bäume oder Blitzen bisher ausgewichen und haben sie als formlos oder mit dem gleichbedeutenden Fachbegriff Amorphe bezeichnet. Die Oberfläche vieler Naturerscheinungen ist nicht glatt und perfekt wie Kugel oder Kegel. Sie weist Unregelmäßigkeiten und Zersplitterungen auf und nicht einfach einen höheren Grad der Dimension, wie bei der Standardgeometrie von Euklid. Dahingegen unendlich viele Größenbereiche, auch bekannt als gebrochene Dimension, die erste wichtige Eigenschaft eines Fraktals.³

“Wir sind es gewohnt die Dimension 1 mit einer Kurve, die Dimension 2 mit einem Quadrat und die Dimension 3 mit einem Würfel zu verknüpfen”⁴

¹ Vgl. Tutorialspoint

² Vgl. Horsthuis Events

³ Vgl. Mandelbrot, 1987, S.13.

⁴ Bausteine des Chaos, 1992, S.134.

Als gebrochene Dimension bezeichnet man alle Werte zwischen zwei Dimensionen. Zur besseren Veranschaulichung wird zunächst eine Küstenlinie betrachtet, denn deren gebrochene Dimension ist größer als eins. Die Länge einer Küstenlinie ist gleich dem Abstand zwischen gemessenem Anfangs- und Endpunkt. Wählt man hierbei einen sehr großen Maßstab der Messung von z.B. einem Kilometer, enthält man eine kürzere Länge, da nur Halbinseln oder Buchten sichtbar werden. Bei einem

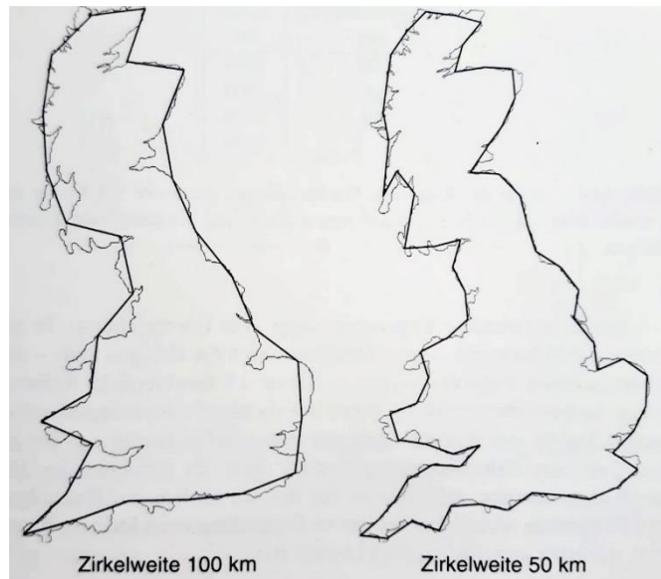


Abb. 1: Küstenlinie

kleineren Maßstab eines Meters, werden nun viele unregelmäßige und geschlängelte Küstenstriche messbar. Eine weitere Einteilung der vorher gemessenen Buchten in Unterbuchten. Wählt man einen noch kleineren Maßstab von einem Zentimeter, können nun sogar kleinere Felsen miteinbezogen werden. Je kleiner man den Maßstab des Messwerkzeuges wählt, desto länger wird die Küstenlinie, weil immer mehr Details miteinbezogen werden und die Länge genau genommen unendlich ist, vergleichbar mit einer Wanderung eines Menschen über einen Landstrich oder der Wanderung einer Maus oder Ameise über die gleiche Strecke. Eine Ameise muss in ihrer Größe viel mehr Unebenheiten, Höhen, wie kleine Steine, Gräser etc. überwinden, als der Mensch.⁵ Küstenlinien können innerhalb eines für Geographen interessanten Maßstabs durch fraktale Kurven nachgebildet werden, denn Küstenlinien sind selbst fraktale Muster, aber hierzu mehr in 1.1.3.⁶

In der Natur sind endlose Wiederholungen gang und gebe. Mathematiker beschreiben dieses Phänomen als Selbstähnlichkeit, die zweite Eigenschaft der Fraktale. Ein Naturbeispiel der Selbstähnlichkeit ist die Verzweigungsstruktur eines Baums, die es ihm ermöglicht das Höchstmaß an Sauerstoff aufzunehmen. Ähnlich verzweigt ist das Blutgefäßsystem einer Lunge, erlaubt ebenfalls die Aufnahme der Höchstmenge an Sauerstoff.⁷

⁵ Vgl. Mandelbrot, 1987, S. 37f.

⁶ Vgl. Mandelbrot, 1987, S. 42.

⁷ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S.417.

“Eine Struktur wird (exakt) selbstähnlich genannt, wenn sie in beliebig kleine Teile zerlegt werden kann, von denen jeder eine kleine Kopie der ganzen Struktur ist.“⁸

Die Selbstähnlichkeit kann sehr gut an einem Blumenkohlkopf gezeigt werden. Dieser besitzt Teile, die man als Röschen bezeichnet. Die Röschen kann man in immer kleinere Röschen zerlegen und in einem Vergleich sehen, dass alle diese Röschen dem gesamten Blumenkohlkopf, abgesehen von der Größe sehr ähnlich sind, genau genommen selbstähnlich. Ein Blumenkohl ist von der Größe her endlich, d.h. nach einigen Zerlegungen sind die Strukturen für eine weitere zu klein. Bei einem Fraktal hingegen geht diese Selbstähnlichkeit bis ins Unendliche, man kann ewig in ein Fraktal hineinzoomen und erkennt in jeder

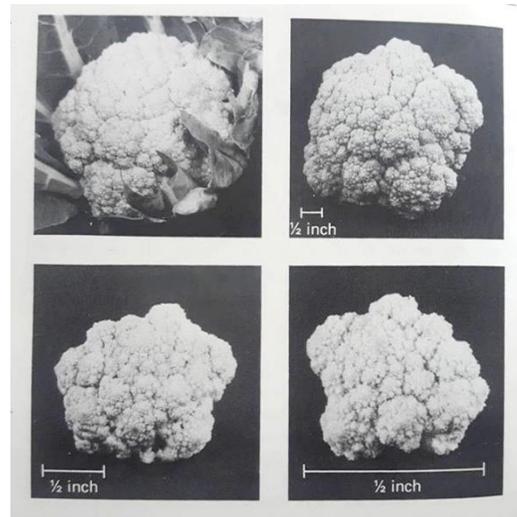


Abb. 2: Selbstähnlichkeit Blumenkohl

fraktalen Dimension selbstähnliche Strukturen.⁹ Ein Fraktal ist also skaleninvariant und besitzt, in jedem Größenbereich, denselben Grad an Irregularität, Zersplitterung oder beides.¹⁰

Hinter diesem Phänomen steckt ein System, welches Benoît B. Mandelbrot als neue Form der Geometrie der Natur erkannte. Er veröffentlichte seine Erkenntnisse erstmals 1977 in seinem Buch *The Fractal Geometry of Nature* und gab diesem System den Namen Fraktal.¹¹

„Aus dem lateinischen Adjektiv fractus, <<in Stücke zerbrochen>> und <<irregulär>> hat Mandelbrot Fraktal geprägt. Das entsprechende lateinische Verb fragere bedeutet <<zerbrechen: unregelmäßige Bruchstücke erzeugen>>.“¹²

⁸ Bausteine des Chaos, 1992, S. 246.

⁹ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S.83.

¹⁰ Vgl. Mandelbrot, 1987, S. 13.

¹¹ Vgl. Mandelbrot, 1987, S. 13.

¹² Mandelbrot, 1987, S. 16.

1.1 Die ersten Fraktale

Mandelbrot gilt als Vater der fraktalen Geometrie, jedoch sind viele Fraktale auf klassische Mathematiker zurückzuführen, wie Georg Cantor, Giuseppe Peano, David Hilbert, Helge von Koch, Waclaw Sierpinski, Gaston Julia oder Felix Hausdorff, welche in Mandelbrots Konzept eine Schlüsselrolle gespielt haben. Viele der frühen Fraktale entstanden bei dem Versuch, den mathematischen Gehalt und die Grenzen von Stetigkeit und Krümmung vollständig zu erforschen. Die Cantor-Menge oder Koch-Kurve wurden als "mathematische Monster" angesehen, da sie von dem mathematisch Vertrauten und berechenbaren abweichen. Mandelbrot aber zeigte, dass diese frühen mathematischen Fraktale viele Eigenschaften mit natürlichen Formen gemeinsam haben.¹³

1.1.1 Cantor Menge

1883 konstruierte der deutsche Mathematiker Georg Cantor die Cantor Menge, welche als mathematisches Monster gilt. Das erzeugen erfolgt durch das Nehmen einer geraden Linie, Teilung dieser in drei Teile und Entfernung des mittleren Stücks. Dieses Verfahren wird mit den entstandenen zwei Linien, unendlich oft wiederholt. Es ist unmöglich die Punkte der Menge abzuzählen, denn es werden unendlich viele Punkte übrigbleiben, welche selbst keine Endpunkte sind. Das Prinzip der Selbstähnlichkeit erkennt man auch hier, denn an jeder Stelle der Cantor Menge findet man dasselbe Muster, egal wie nah man hineinzoomt.¹⁴

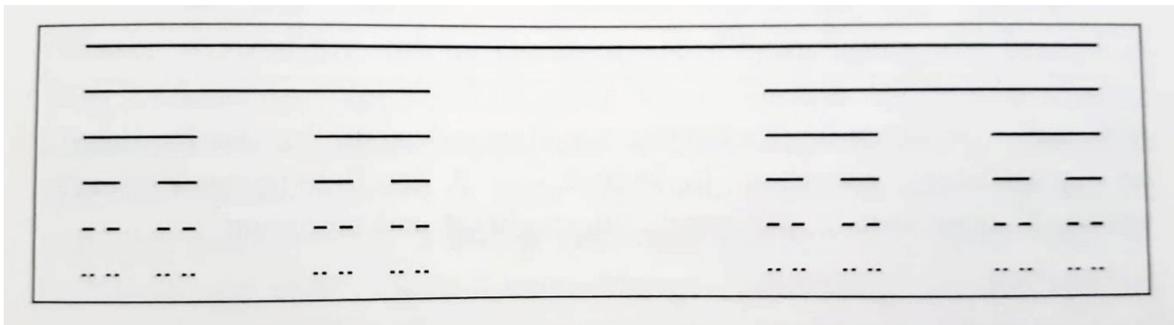


Abb. 3: Darstellung der Cantor Menge

¹³ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 81f.

¹⁴ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 85ff.

1.1.2 Sierpinski-Dreieck und – Teppich

Das folgende klassische Fraktal wurde 1916 vom polnischen Mathematiker Waclaw Sierpinski vorgestellt. Die geometrische Grundschrift Konstruktion erfolgt wie folgt: Beginnend mit einem Gleichseitigen mit der Farbe schwarz gefüllten Dreieck, auf das jetzt ein Rekursionsverfahren mit folgenden Schritten angewendet wird. Die Mittelpunkte der drei Seiten werden mit geraden Linien verbunden. Entstanden sind nun vier kongruente Dreiecke, von denen das in der Mitte liegende Dreieck entfernt wird. Nach dem ersten Schritt sind nun drei kongruente Dreiecke entstanden, von denen sich immer zwei in einem Eckpunkt berühren. Die Rekursion wird nun mit den neu entstandenen schwarzen Dreiecken beliebig oft wiederholt. Somit entstehen aus einem Dreieck sehr schnell, drei, neun, 27, 81, 243, usw. Dreiecke, welche jedes einzelne eine exakte, verkleinerte Kopie des Originals darstellt. Nachdem das Verfahren unendlich oft wiederholt wird, ist das Sierpinski-Dreieck die Menge der Punkte in der Ebene, welche übrigbleiben. Die Menge sind genaugenommen die Kanten aller erzeugten Dreiecke.¹⁵

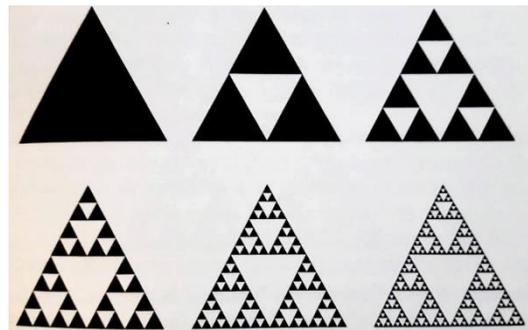


Abb. 4: Konstruktion Sierpinski Dreieck

Bei dem Sierpinski-Teppich handelt es sich um eine Variation des Sierpinski Dreiecks. Hier startet man mit einem Quadrat, dieses wird in neun kongruente Quadrate unterteilt und das im Zentrum liegende Quadrate entfernt. Das Verfahren wird unendlich oft für die entstandenen Quadrate wiederholt.¹⁶

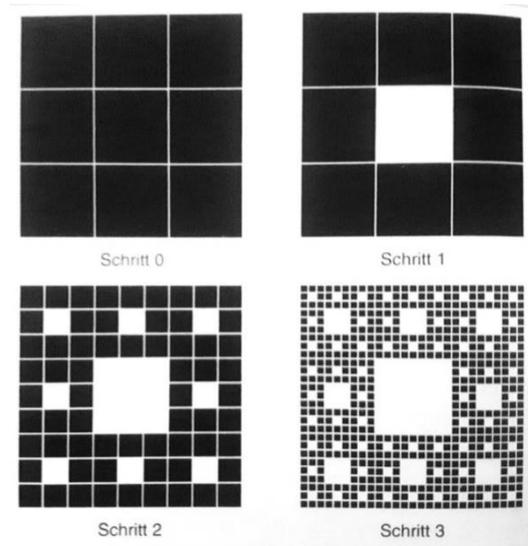


Abb. 5: Konstruktion Sierpinski Teppich

Das enorme Streben nach drahtloser Kommunikation in den letzten Jahrzehnten hat zu einem Bedarf von größeren Bandbreiten und flachen Antennen in den Bereichen für zivile und militärische Anwendungen geführt.¹⁷ Die Lösung hierfür bieten fraktale

Antennen, welche auf dem Prinzip des Sierpinski Teppichs aufgebaut sind. Durch ihr selbstähnliches Design kann auf kleinen Flächen das nutzbare Volumen maximiert und alle Bandbreiten abgedeckt

¹⁵ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 98-101

¹⁶ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 102.

¹⁷ Vgl. Sierpinski Carpet Fractal Antenna, S. 1-5.

werden. Die Nutzung zusätzlicher Antennen wird dadurch überflüssig. Sie benötigen zudem weniger Material, sind somit leicht, in der Herstellung kostengünstig und leicht in Leiterplatten zu integrieren.

18

1.1.3 Die Koch-Kurve

Helge von Koch führte 1904 die Koch-Kurve ein, die unter Mathematikern auch als Monsterkurve bekannt ist. Sie ist eine Kurve, hat allerdings keine geraden Linien oder Abschnitte. Der Ansatz gleicht der Cantor Menge, angefangen wird mit einer geraden Linie, diese wird in drei gleiche Teile geteilt und das mittlere Stück gegen ein gleichseitiges Dreieck ersetzt, dessen Grundlinie entfernt wird. Die Kurve besteht nach unendlichen Iterationen ausschließlich aus Eckpunkten, an denen man keine Tangente anlegen kann, um die Steigung zu messen, deshalb gilt sie als nicht differenzierbar.¹⁹

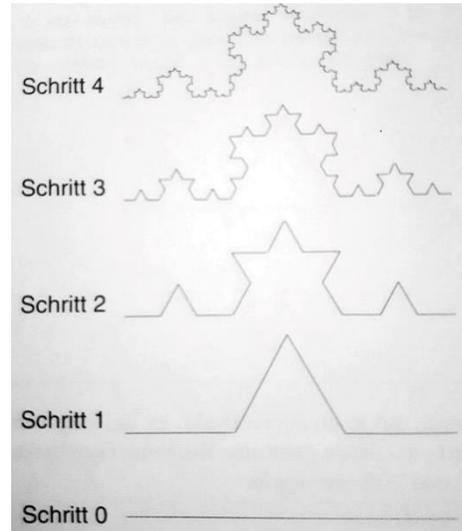


Abb. 6: Konstruktion Koch-Kurve

Die Länge der Koch Kurve wird niemals endlich sein, da bei jeder Iteration ein weiteres Dreieck hinzukommt und ist somit ein weiteres Fraktal der Mathematik. Die Länge ist genau wie die Küstenlinie unendlich lang. Mithilfe der Kochkurve kann man deren Problem der Längenberechnung approximieren, denn die Kochkurve hat, ebenso wie die Küstenlinie, eine gebrochene Dimension und ist zwischen zwei und dreidimensional. Da, für Geographen nicht das kleinste Sandkorn eine Rolle spielt, wird in den benutzten Karten, unabhängig von Maßstab, nicht jedes Detail der Küste dargestellt. Die Küstenlinie bei der Messung durch eine Näherungskurve approximiert wird, hängt das Ergebnis der Länge L von dem Kartenmaßstab und dem Punktabstand ϵ ab. Die Länge $L(\epsilon)$ des triadischen Koch-Tetragons oder einer Küstenlinie lässt sich folgendermaßen errechnen.²⁰

¹⁸ Vgl. Sierpinski Carpet Fractal Antenna, S. 1-5.

¹⁹ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 107-113

²⁰ Vgl. Mandelbrot, 1987, S. 48.

Formel: $L(\epsilon) = \epsilon^{(1-D)}$

Dimension $D = \frac{\log 4}{\log 3} \sim 1,2618$ ²¹

Das triadische Koch-Teragon wird auch als Schneeflocke bezeichnet, denn wenn man ein gleichseitiges Dreieck statt einer geraden Linie als Ausgangsform wählt, erinnert die Form sehr stark an natürliche Schneeflocken. ²²

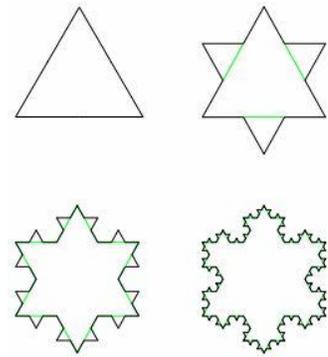


Abb. 7: Koch-Teragon

1.1.4 Hilbert Kurve

Intuitiv bezeichnet man Linien als eindimensional und Ebenen als zweidimensionales Objekt. Basierend auf der räumfüllenden Peano Kurve von Giuseppe Peano entwickelte David Hilbert eine vereinfachte Form der raumfüllenden Kurve. Raumfüllende Kurven beschreiben Kurven, die jeden Punkt einer Ebene berühren, Ebenen also sinngemäß füllen und somit nicht mehr als eindimensional definierbar sind. ²³ Dabei gibt es Regeln bei der Anordnung der Linien, diese erfolgt je nach Ordnung.

Ordnung 1: Man beginnt immer vom Zentrum des Quadrats links unten (LU), zum Mittelpunkt des Quadrates oben oben (LO), dann in das Quadrat oben rechts (RO) und anschließend in das Quadrat unten rechts. (RU). Diese Schema wird ebenfalls in den folgenden Ordnungen angewendet. ²⁴

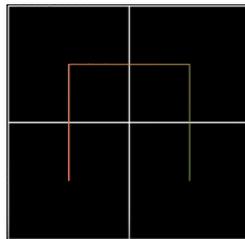


Abb. 8: Hilbert Kurve – Ordnung 1

Ordnung 2: Jedes der Quadrate wird nun in vier Quadrate geteilt. Man fügt in jedes der vier Quadrate eine Miniatur Hilbert Kurve aus Ordnung 1 hinzu. Wenn man nun die Enden der Kurven in der Reihenfolge von Ordnung 1, LU, LO, RO, RU verbindet enthält man eine Überschneidung. Daher ist die Regel, dass man die Kurven in LU und RU dreht und erhält das Ergebnis Abbildung 9.

²¹ Mandelbrot, 1987, S. 48.

²² Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 107-113.

²³ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 115f.

²⁴ Vgl. 3Blue1Brown, 2017

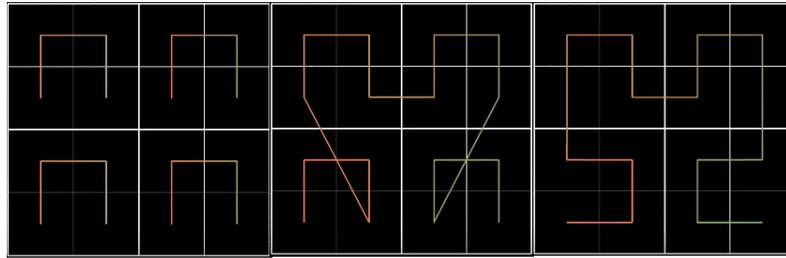


Abb. 9: Konstruktionschritte der Hilbert Kurve - Ordnung 2

Ordnung 3: Man fügt in jedes der Quadrate eine Hilbert Kurve der Ordnung 2 und dreht LU und RU wie in Ordnung 2.

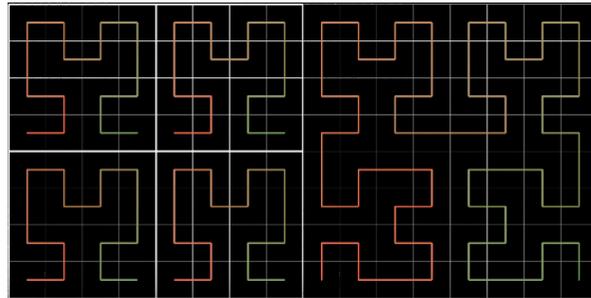


Abb. 10: Konstruktion der Hilbert Kurve – Ordnung 3

In höheren Ordnungen wird dieses Schema immer beibehalten.

Verwendung findet die Hilbert Kurve in der Berechnung der Umwandlung von Bildern Informationen zu Audiosignalen.²⁵ Die Bildabtastung entlang der Hilbert Kurve bietet den Vorteil des Entfallens jeglicher Richtungsmerkmale, anstelle der zeilenweisen Abtastung. Die Natur nutzt raumfüllende Kurven, um Lebewesen aufzubauen. Jeder Organismus muss mit lebensnotwendigen Stoffen, wie Sauerstoff und Wasser versorgt werden.

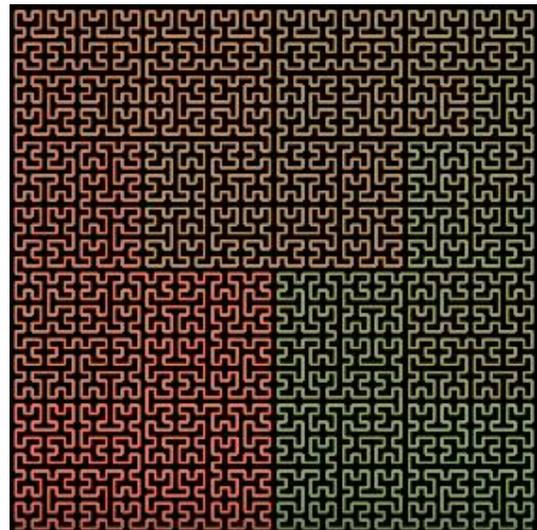


Abb. 11: Hilbert Kurve höhere Ordnung

Nährstoffe gelangen, durch fraktal geformte Gefäßsysteme, zu jedem Ort des Organismus, z.B. den Organen. Die Organe enthalten wiederum selbst Gefäßsysteme, beispielsweise die Niere beinhaltet drei ineinander verwachsene Gefäßsysteme, das arterielle, venöse und Harn-System.²⁶

²⁵ Vgl. 3Blue1Brown, 2017

²⁶ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 117.

1.1.5 Apollonisches Dichtungsfraktal

Eine Menge heißt apollonisch, wenn die aus unendlich vielen sich berührenden Kreisen besteht, die nach einem bestimmten Konstruktionsmuster angeordnet sind. Bei der apollonischen Dichtung handelt es sich um ein selbstinverses Fraktal, das von dem griechischen Mathematiker Apollonios von Perge 200 Jahre vor unserer Zeitrechnung entwickelt wurde.²⁷

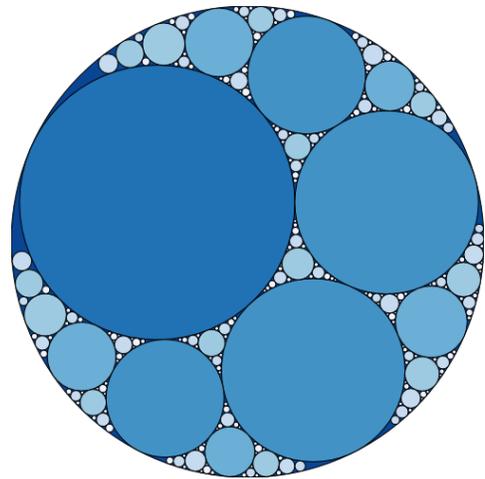


Abb. 12: Apollonisches Dichtungsfraktal

1.2 Mandelbrotmenge

Benoit Mandelbrot stellte die Welt der bisherigen Mathematik auf den Kopf, da er ein System der Ordnung für Rauigkeit in dem bisherigen Chaos und Realismus in einfachen Gleichungen fand.²⁸ Das wohl berühmteste Fraktal, die Mandelbrotmenge wurde nach ihm benannt. Auf dem nachfolgenden Bild sieht man eine „Zoomfahrt“ durch die Mandelbrotmengengrafik, welche man ins Unendliche fortsetzen kann. Die angegebenen Ausschnitte werden jeweils rechnerisch vergrößert wiedergegeben. In dem letzten Bild sieht man sehr gut die Selbstähnlichkeit, da sich die Mandelbrotmenge erneut abbildet.²⁹

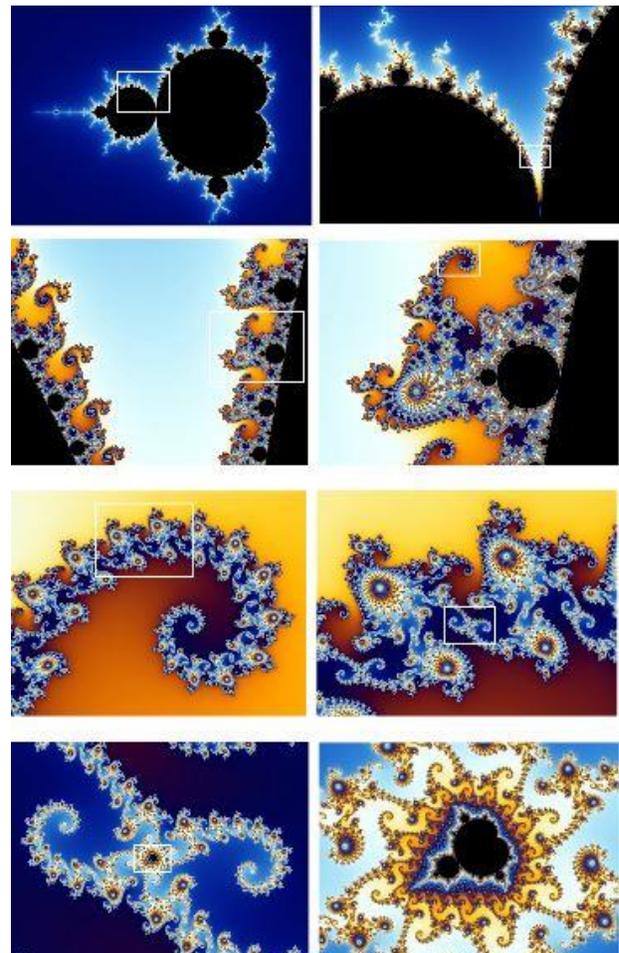


Abb. 13: Zoomfahrt Mandelbrotmenge

²⁷ Vgl. Mandelbrot 1987, S. 182f.

²⁸ Vgl. Seymour Squad, 2016

²⁹ Vgl. Schröder, S. 5.

1.2.1 Berechnung der Mandelbrotmenge

Man erhält die Mandelbrotgrafik, indem man das Verhalten für jede Pixelkoordinate bei Iteration der Formel $Z_{n+1} = Z_n^2 + C$ mit $Z, C \in \mathbb{C}$ und $Z_0 = 0$ errechnet und auf ihr Konvergenzverhalten, also das Annäherungsverhalten im Unendlichen und Divergenzverhalten, das Auseinanderstreben im Unendlichen, überprüft. Die Mandelbrotmenge besteht aus komplexen Zahlen, welche einen Realteil und Imaginärteil i , welcher für Wurzel aus -1 steht, besitzen. Sie lässt sich also in das Koordinatensystem der komplexen Ebene einzeichnen. In der horizontalen Achse wird der Realteil der Gleichung auftragen und in der vertikalen Achse der Imaginärteil. Zur grafischen Darstellung werden für verschiedene Werte gemessen und unterschiedlich farbig kodiert.³⁰

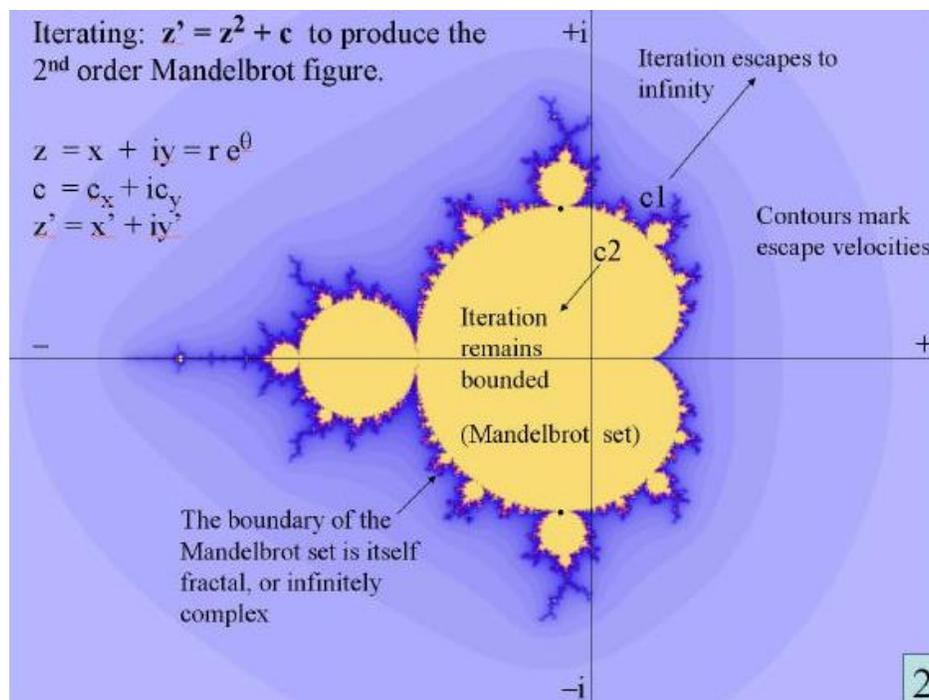


Abb. 14: Einzeichnung der Mandelbrotmenge in die komplexe Ebene

Zur Veranschaulichung der Berechnung der Farbwerte werden die Punkte $C_1 = (1/0,5)$ und $C_2 = (0,5/0,3)$ in die Formel $Z' = z^2 - C$ eingesetzt und rekursiv wieder für Z eingesetzt, C bleibt konstant.

³⁰ Vgl. Berkemeier, 2018

Rekursionswerte für die n-te Iteration des Punktes $C_1 = (1/0,5)$:

n	z_n	$f(z_n)$	$ f(z_n) $
0	(0 0)	(-1 -0,5)	1,118033
1	(-1 -0,5)	(-0,25 0,5)	0,559016
2	(-0,25 0,5)	(-1,1875 -0,75)	1,404512
3	(-1,1875 -0,75)	(-0,15234 1,28125)	1,290275
4	(-0,15234 1,28125)	(-2,61839 -0,89038)	2,765639

Abb. 15: Iterationen C_1

Abbruchbedingung $|f(z_n)| \geq 2$ bei $n = 4$ erreicht. $\rightarrow C_1$ gehört nicht zur Mandelbrotmenge³¹

Rekursionswerte für die n-te Iteration des Punktes $C_2 = (0,5/0,3)$:

n	z_n	$f(z_n)$	$ f(z_n) $
0	(0 0)	(-0,5 -0,3)	
1	(-0,5 -0,3)	(-0,34 0)	0,34
2	(0,34 0)	(-0,3844 -0,3)	0,487609
3	(-0,3844 -0,3)	(-0,44223 -0,06936)	0,447642
4	(-0,44223 -0,06936)	(-0,30923 -0,23865)	0,390618
100	(-0,38254 -0,16996)	(-0,38254 -0,16996)	0,418603

Abb. 16: Iterationen C_2

Abbruchbedingung $n \geq 100$ erreicht! $\rightarrow C_2$ gehört zur Mandelbrotmenge³²

Da in der Praxis keine unendlich vielen Rekursionsschritte durchführbar sind, müssen Abbruchbedingungen festgelegt werden. Ein mathematischer Satz besagt, dass ein Rekursionswert, dessen Betrag größer als 2 ist, auf jeden Fall gegen unendlich strebt. Die Rekursion kann also abgebrochen werden, falls der Betrag des aktuellen Rekursionswerts größer als 2 ist, da das gewählte c dann nicht zu Mandelbrotmenge gehört. Wenn der Betrag des Rekursionswerts trotz hoher Anzahl an Iterationen nicht größer als 2 wird, so wird die Rekursion durch die Vorgabe einer maximalen Iterationszahl n_{\max} , z.B. 100, begrenzt und das ausgewählte C ist Teil der Mandelbrotmenge (Apfelmännchen).³³ Im Randbereich der Mandelbrotmenge ist das Verhalten der Rekursion erst nach

³¹ Schröder, S. 4

³² Schröder, S. 4

³³ Vgl. Schröder, S. 5

einer sehr hohen Anzahl an Iterationen definitiv zu beurteilen, daher wird mit dieser Methode das Apfelmännchen nur angenähert. Je detaillierter und näher man die Menge darstellen möchte, desto mehr Iterationsschritte sind notwendig.³⁴

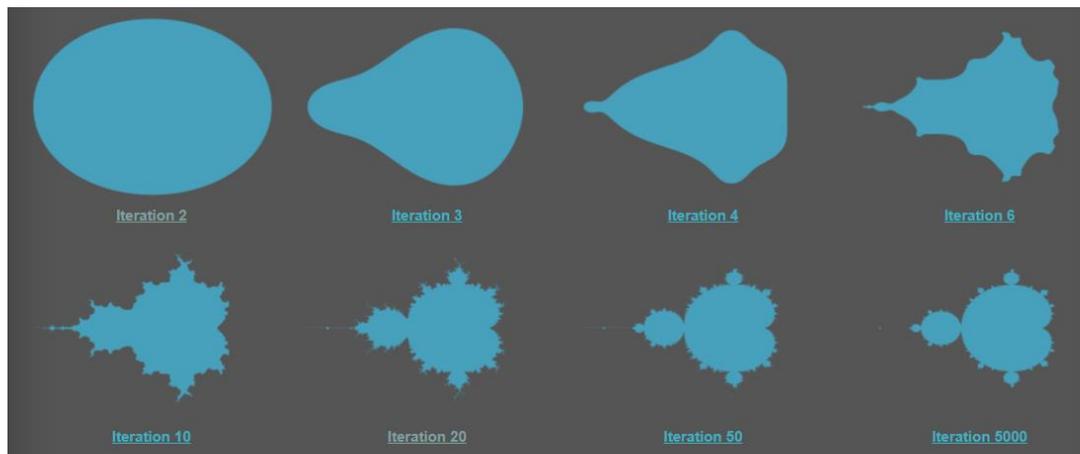


Abb. 17: Detailgrad der Mandelbrotmenge nach Iterationen

Der Farbwert der Darstellung ist abhängig davon, wie viele Iterationen das Pixel benötigt, um größer als zwei zu werden. Bleibt er kleiner als zwei, so ist er Teil der Mandelbrotmenge und wird der Pixel schwarz eingefärbt. Die anschließend aufgeführten Farben können beliebig festgelegt werden. Ist der Schwellenwert bereits nach der ersten Iteration überschritten, so färbt man den Pixel grau, Farbe Blau zweite Iteration, Hellrot die Dritte, usw. wird diese Berechnung nun für alle Pixel angewendet, wird das Apfelmännchen grafisch dargestellt.³⁵ Diese Färbemethode nennt man auch escape time Algorithmus.

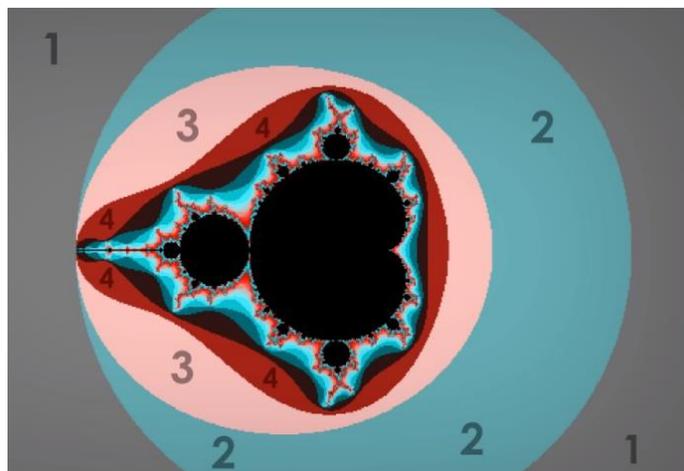


Abb. 18: Escapetime Färbemethode

³⁴ Schröder, S. 5.

³⁵ Schnellgedacht, 2018

Um die Mandelbrotmenge zu optisch zu variieren, kann man Veränderungen in der Formel vornehmen. Wählt man höhere Potenzen als 2 verändert sich das Fraktal dementsprechend und es bekommt mehr Äste, z.B. bei Potenz 3, 2 Äste, 4, 3 Äste, 8, 7 Äste, Kombinationen der Formel mit $\sin(x) + C$, \cos , etc. bringen Variationen und verändern das Aussehen des Fraktals. Ein negatives Vorzeichen führt zu einer Spiegelung an der vertikalen Achse.³⁶

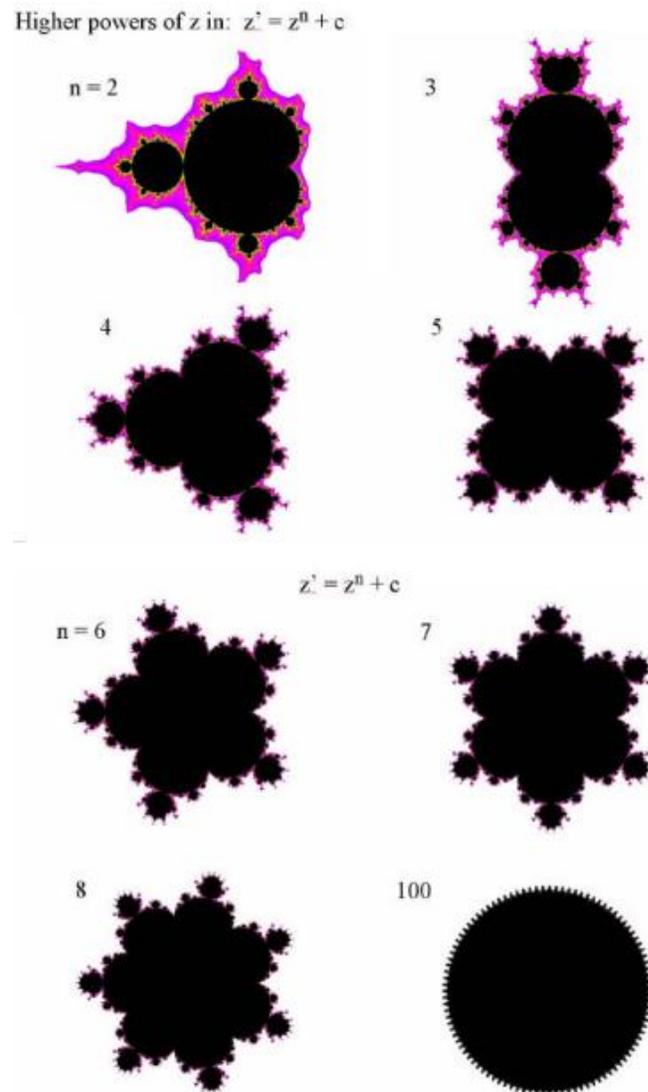


Abb. 19: Beeinflussung des Fraktals bei Potenz- oder Vorzeichenänderung

³⁶ Vgl. Dickerson, 2003, S.17-19.

1.2.2 Julia Menge

Die Julia Menge ist benannt nach deren Entdecker und französischen Mathematiker Gaston Julia und zählt mit zu den bekanntesten Fraktalen. Die Berechnung der Julia Menge kann über verschiedenste Formeln erfolgen. Hierzu benötigt man die Grundgleichung des jeweiligen Fraktals, für das man die Julia Menge errechnen möchte. Im Beispiel wird der Fokus auf die Julia Menge des Mandelbrotfraktals gelegt. Zu jedem Punkt der Mandelbrotmenge und seinen Varianten, kann man sich dessen Julia Menge berechnen lassen. In den folgenden Abbildungen sieht man rechts die Julia Menge zu dem links gewählten Mandelbrotpunkt und deren Ähnlichkeit in Strukturen und Eigenschaften. Wählt man in dem Mandelbrotfraktal einen Punkt außerhalb der Menge, liegt dieser in der Juliamenge ebenfalls außerhalb. Bei einem Punkt innerhalb in der Juliamenge ebenfalls innerhalb. Wählt man den Punkt auf Abbildung 20, rechts unten, erhält man als Julia Menge einen perfekten Kreis.³⁷

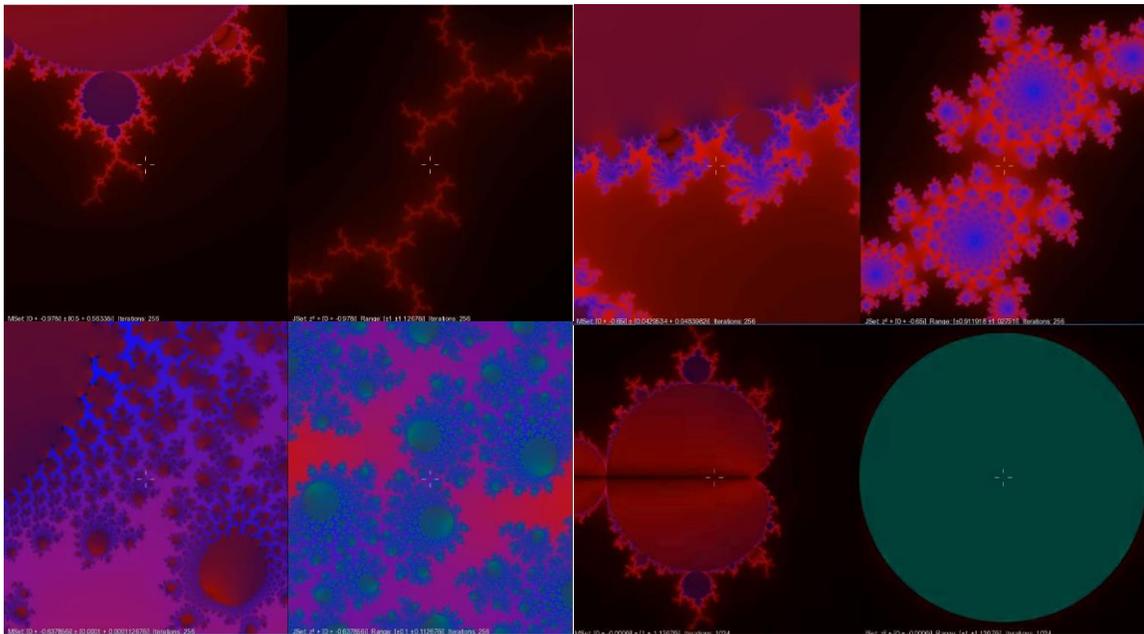


Abb. 20 Abhängigkeit von Mandelbrotmenge und Julia Menge

1.2.3 Berechnung der Julia Menge in Abhängigkeit der Mandelbrotmenge

Die Berechnung erfolgt mit der gleichen Formel $z = z^2 + c$ und nach dem gleichen Schema.³⁸ Die Unterschiede liegen darin, dass man jetzt für c die Koordinaten des Punktes im Mandelbrotfraktal

³⁷ Vgl. Damnimp, 2017

³⁸ Vgl. Damnimp, 2017

einsetzt, an dem man die Julia Menge berechnen möchte und für z nimmt ab der ersten Iteration nun die Pixelkoordinaten der komplexen Ebene, sprich den Mittelpunkt, der beliebig gewählt werden kann, an dem die Julia-Menge gezeichnet werden soll. Bei der Mandelbrotmenge startet man hingegen mit $z = 0 + i0$.³⁹

Bei der Veränderung der Hochzahl der Grundgleichung um eins, bekommt die Julia Menge einen "Ast" mehr, allerdings auch immer einen mehr als das Ursprungsfraktal.⁴⁰ Ist für ein gegebenes c und z , $z^2 + c$ größer als z , enthält die Fluchtmenge als Punkte z , die sehr groß sind. Wählt man hingegen z so, dass $z = z^2 + c$, dann steht die Iteration still und es bildet sich die Gefangenenmenge. Beide Mengen ergänzen sich und überdecken einen Teil der komplexen Ebene, denn die Begrenzung der Gefangenenmenge ist gleichzeitig die Begrenzung der Fluchtmenge.⁴¹

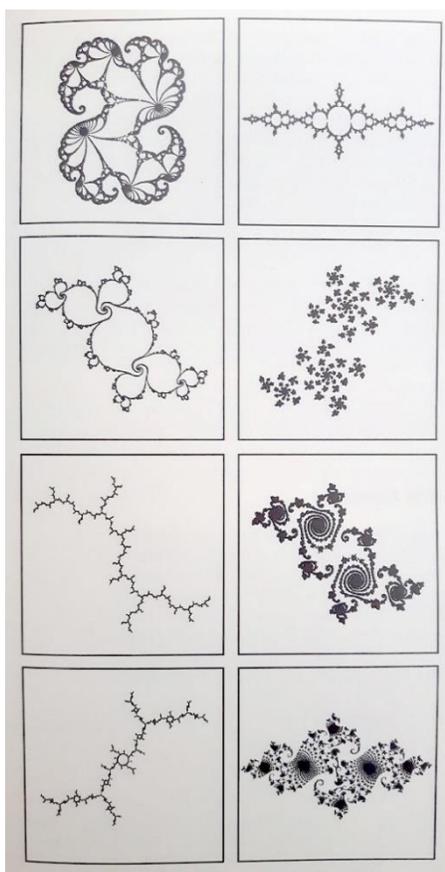


Abb. 21: Beispiele Julia Mengen

³⁹ Vgl. Damnimp, 2017

⁴⁰ Vgl. Damnimp, 2017

⁴¹ Vgl. Bausteine des Chaos, 1992, S. 148ff.

1.3 Wie kommt das 2D Fraktal in die dritte Dimension?

1990 hat Rudy Rucker, ein Pionier der Fraktalentwicklung, amerikanischer Mathematiker, Computerwissenschaftler und Science Fiction Autor, seine Idee, das 2D Fraktal in die dritte Dimension zu bringen, in einer Formel festgehalten. Er hat allerdings nicht viel Aufmerksamkeit dafür erhalten, da er zu der damaligen Zeit noch kein hochwertiges Rendering des 3D Fraktals vorweisen konnte, weil die Hardware es nicht unterstützte.⁴² 2007 griff Daniel White die Idee neu auf und wollte ein vollständiges 3D Fraktal finden und darstellen. Er arbeitete mit Mitgliedern von FractalForum zusammen, nahm die gleichen Formeln wie bei der 2D Erzeugung und schrieb eine eigene Software zur Darstellung. Zuerst entstand ein nach Entfernung gestaffeltes Graustufenbild, mit der untersten Ebene schwarz, die Oberste weiß. Er erhöhte die Potenz der Formel und bemerkte immer mehr Ebenen. White prägte den Namen Mandelbulb nach Rudy Ruckers Vorbild, fand die Qualität allerdings noch nicht zufriedenstellend, da die Abbildung nicht so organisch und detailreich wie die 2D Version wirkte.⁴³

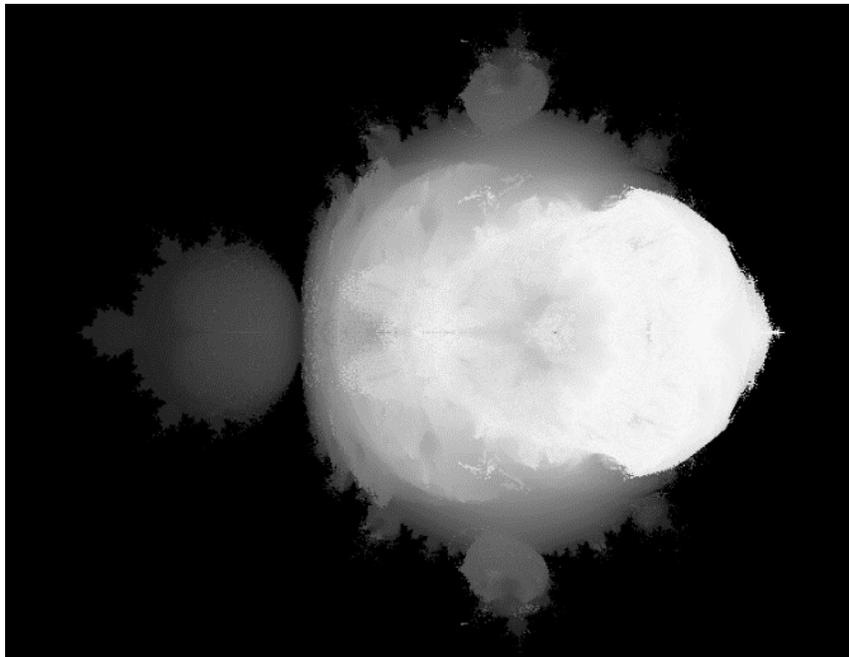


Abb. 22: Daniel Whites gestaffeltes Graustufenbild

Paul Nylander setzte zwei Jahre später den Gedankengang fort und nutzte Daniel Whites Formel und renderte eine Version eines Fraktals mit der 8. Potenz und einen hohen Detailgrad in der

⁴² Vgl. Fractal Institute Nylander, 2018

⁴³ Vgl. Fractal Institute White, 2018

dreidimensionalen Darstellung festzuhalten.⁴⁴

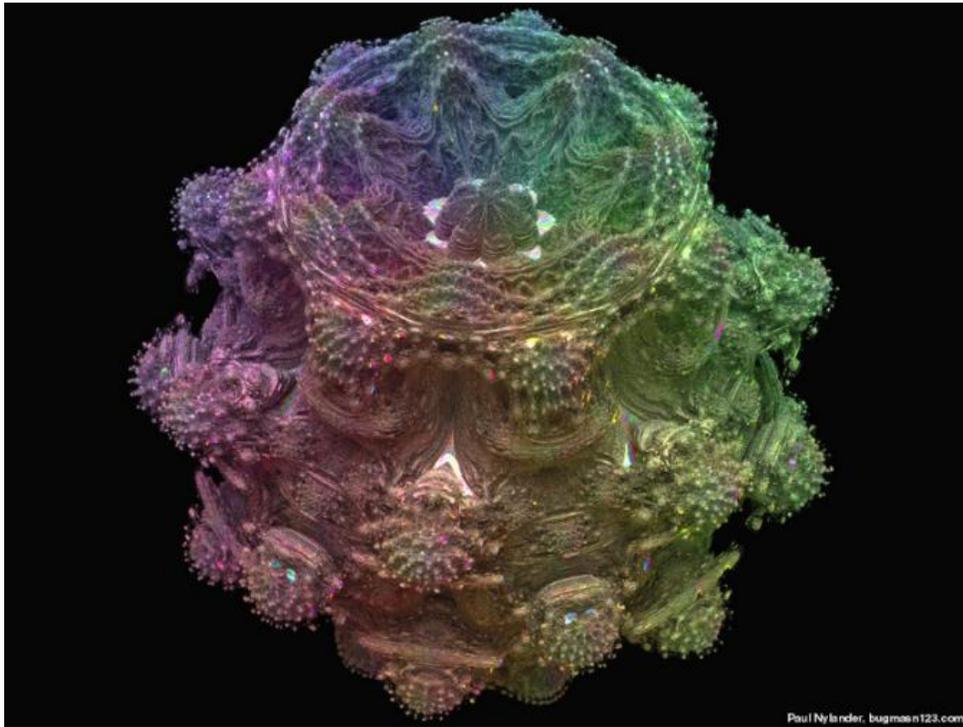


Abb. 23: Paul Nylanders Rendering des Fraktals

1.3.1 Mandelbulb

Die Idee hinter der dreidimensionalen Berechnung ist, um Phi und Theta in Form einer dreidimensionalen Kugel zu rotieren und die Punktkoordinaten x , y und z zu berechnen. Der Term kann mit radius r folgendermaßen beschrieben werden:

$$\{x,y,z\}^2 = r^2 \{ \sin(\theta * n) * \cos(\phi * n), \sin(\theta * n) * \sin(\phi * n), \cos(\theta * n) \}$$

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

$$\theta = \text{atan2}(\sqrt{(x^2 + y^2)}, z)$$

$$\phi = \text{atan2}(y,x)$$

Der Additionsterm $z = z^n + c$ ist ähnlich zu der regulären komplexen Addition:

$$\{x, y, z\} + \{a, b, c\} = \{x+a, y+b, z+c\} \quad ^{45}$$

Der Rest des Algorithmus ist ähnlich zu dem der 2D Mandelbrotmenge:

⁴⁴ Vgl. Fractal.Institute White, 2018

⁴⁵ Vgl. White, 2009

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

$$\text{theta} = \text{atan2}(\sqrt{(x^2 + y^2)}, z)$$

$$\text{phi} = \text{atan2}(y, x)$$

$$\text{newx} = r^n * \sin(\text{theta} * n) * \cos(\text{phi} * n)$$

$$\text{newy} = r^n * \sin(\text{theta} * n) * \sin(\text{phi} * n)$$

$$\text{newz} = r^n * \cos(\text{theta} * n)$$

Je größer die Anzahl der Iterationen wird, desto höher wird auch hier der Detailgrad.⁴⁶

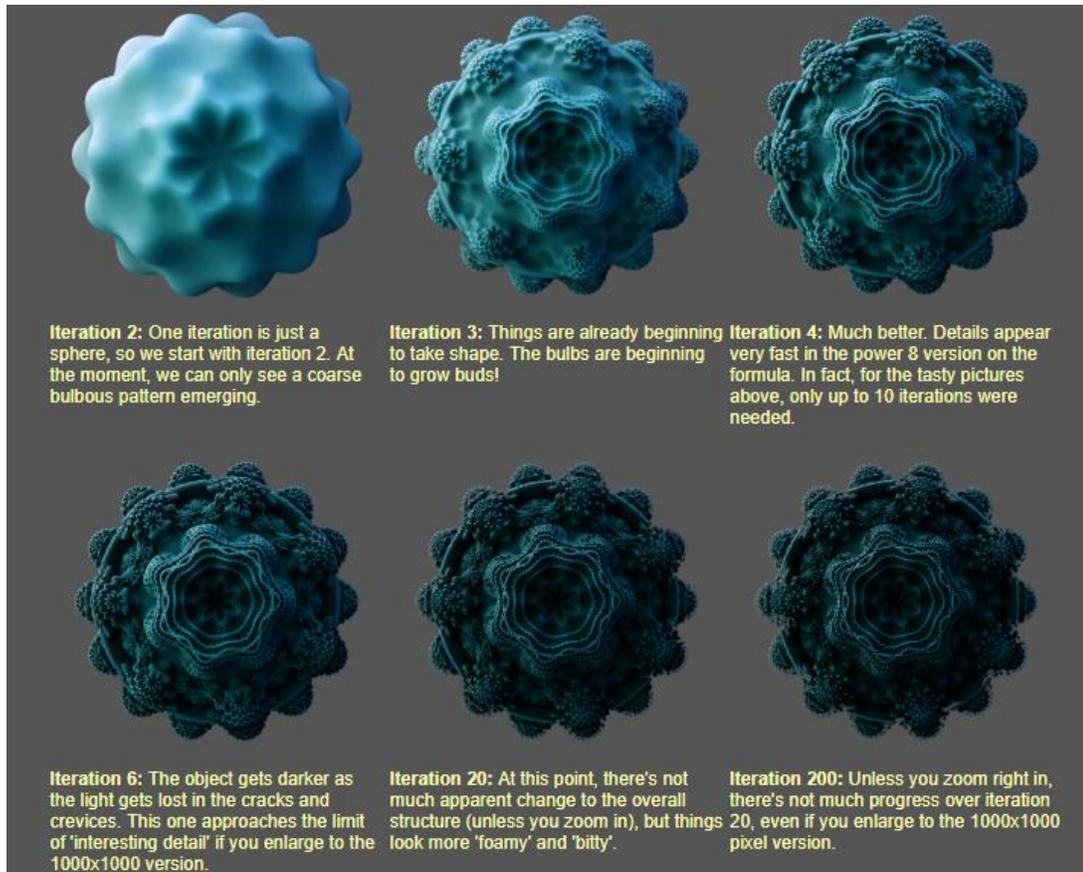
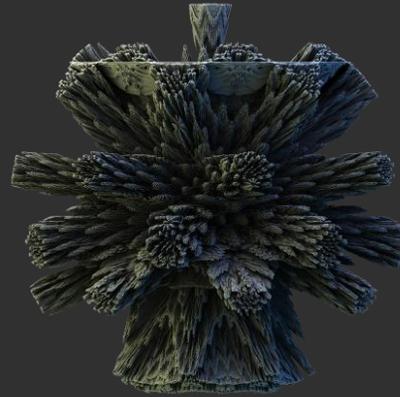
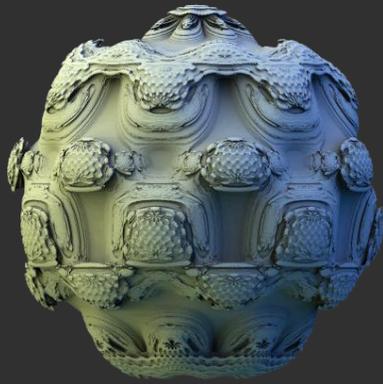


Abb. 24: Mandelbulb verschiedener Iterationsstufen

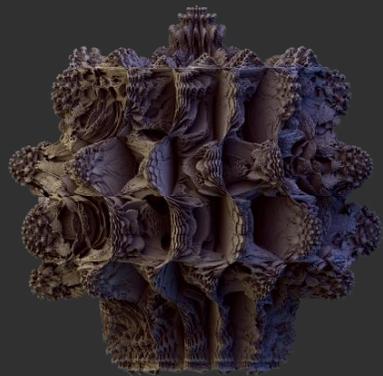
Je nachdem wie die Ursprungsgleichung verändert oder ergänzt wird, erhält man die unterschiedlichsten Formen an Fraktalen.⁴⁷

⁴⁶ White, 2009

⁴⁷ White, 2009



To create these two 'hilly' and 'smooth' versions above, use a lower or higher power instead of the usual square root, when calculating the radius in the conversion from Cartesian to polar 3D.



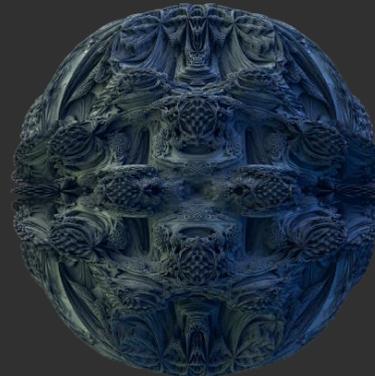
Instead of assigning:
 $newy = radius * \sin(\theta) * \cos(\phi)$,
 this one uses:
 $newy = radius * \sin(\theta) * \tan(\phi)$.



Instead of assigning:
 $newx = radius * \sin(\theta) * \cos(\phi)$,
 this one uses:
 $newx = radius * \cos(\theta) * \cos(\phi)$.



Rudy Rucker's original formula has a small 'mistake', but it still produces great results when put to a higher power, as these two pictures show. This one is shown in the XY plane.



Same object as the left, but viewed in the YZ plane

Abb. 25: Auswirkungen auf das Fraktal bei Änderung der Grundgleichung

1.3.2 Mandelbox

Die Mandelbox wurde von Tom Lowe entdeckt und ist ein Multi-Fraktal, das keine genaue fraktale Dimension besitzt und auf Faltungsoperationen basiert. Das kann man sich wie ein Stück Papier vorstellen, welches gefaltet wird, anschließend wird etwas herausgeschnitten, danach erneut gefaltet, usw. Vergleichen kann man das mit Einschneiden auf ein gefaltetes Stück Papier, bei dem jeder Einschnitt Einfluss auf jede Ebene des gefalteten Objekts hat.⁴⁸ Die Mandelbox gilt als Karte der Faltfraktale, welche auch Kaleidoskopische Fraktale genannt werden.⁴⁹

Die Mandelbrot Gleichung $z = z^2 + c$ wird ersetzt durch:

$$v = s * \text{ballFold}(r, f * \text{boxFold}(v)) + c$$

Hier steht $\text{boxFold}(v)$ für jede Achse a :

$$\begin{array}{ll} \text{if } v[a] > 1 & v[a] = 2 - v[a] \\ \text{else if } v[a] < -1 & v[a] = -2 - v[a] \end{array}$$

und $\text{ballFold}(r, v)$ steht für die Magnitude m von v :

$$\begin{array}{ll} \text{if } m < r & m = \frac{m}{r^2} \\ \text{else if } m < 1 & m = \frac{1}{m} \end{array}$$

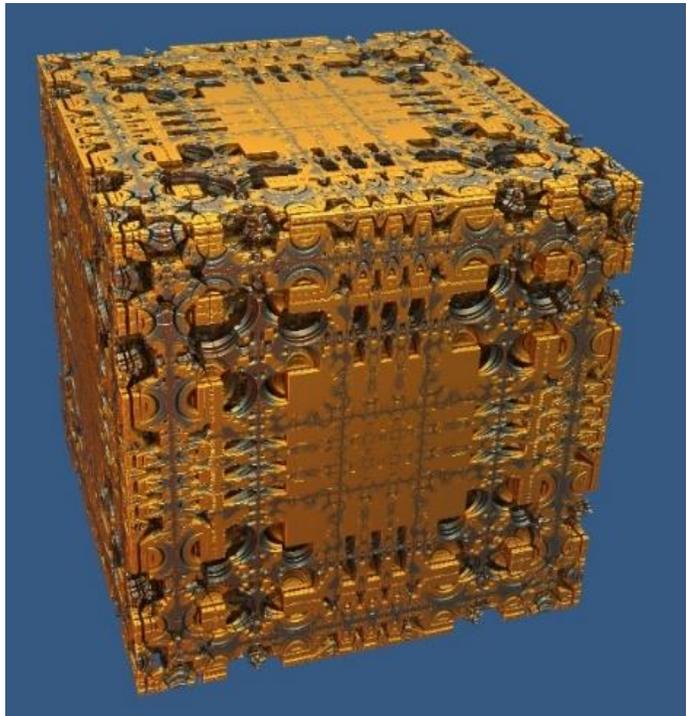


Abb. 26: Mandelbox

⁴⁸ Vgl. Kleinhuis, 2013

⁴⁹ Vgl. Mandelbox

2. Erstellen von Fraktalen

Die Möglichkeit auffallende visuelle 3D-Welten aus fraktalen Techniken künstlich zu erschaffen, ist auf Grundlage von FractalForum und anderer Communities entstanden. Es gibt zahlreiche Programme, die das Erzeugen und Erkunden von Fraktalen ermöglichen, dazu zählen Mandelbulb 3D, Mandelbulber2, Ultra Fractal und viele mehr.⁵⁰ Da diese Programme beschränkte Render- und Exportmöglichkeiten bieten, kommt die VFX Industrie bei deren Verwendung nicht um Workarounds herum, die in Kapitel drei näher behandelt werden. Neuste Entwicklungen, wie das VFX Fractal Toolkit, sollen eine Alternative zu den bisherigen Workarounds bieten, eine schnellere Arbeitsweise und einfachere Integrierung in eine VFX Pipeline und 3D Softwares ermöglichen.⁵¹

2.1 Kreation von Fraktalen in Mandelbulb 3D

Um ein Verständnis für die Möglichkeiten einer Fraktal Generierung zu bekommen, kommen im Folgenden Details zur Arbeitsweise in Mandelbulb 3D (MB3D). MB3D basiert auf der Arbeit von Daniel White und Paul Nylander. Entwickelt wurde es von Jesse und weiteren FractalForum Mitgliedern.⁵² Das Programm steht allen Interessenten kostenlos zum Download und auch zur kommerziellen Benutzung zur Verfügung. Das Programm arbeitet nicht mit Scanline oder Raytrace Renderern,⁵³ sondern mit der sogenannten Distance Estimation (DE) Methode, bei der die Berechnung einer approximierten Entfernung eines gegebenen Punktes zur Oberfläche des Fraktals erfolgt. Je kleiner der DE Faktor gewählt wird, desto genauer wird das Fraktal.⁵⁴

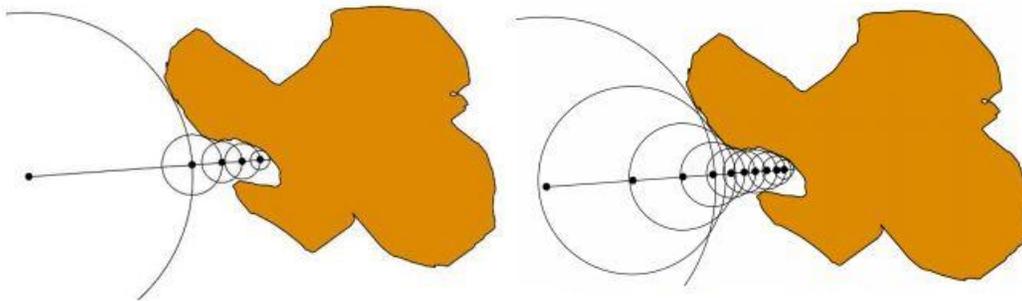


Abb. 27: Distance Estimation mit Faktor 1 (links) und Faktor 0.5 (rechts)

⁵⁰ Vgl. Fractal Foundation

⁵¹ Vgl. Animationsinstitut

⁵² Vgl. Haggett

⁵³ Vgl. Wikibooks, 2017

⁵⁴ Vgl. Mandelbulber Manual, S 4.

Würde dieses Verfahren nicht angewendet werden, müsste stets eine Neuberechnung erfolgen und bis zu 10 000 Schritte benötigt werden, um den Lichtstrahl eines jeden Pixels zu berechnen, da die ein Fraktal unendlich tief ist und die Oberfläche also nie exakt erreicht werden kann.⁵⁵ Die Farbdarstellung erfolgt über den escape time Algorithmus. Wenn man MB3D öffnet erscheint zunächst das Hauptfenster, dessen oberes Menü wichtige Tools wie Animation, BTracer, Navigator und MutaGen beinhaltet. Außerdem kann man hier Dateien öffnen, speichern, Untermenüs auswählen und Einstellungen ändern. Rechts befinden sich eine Reihe von Untermenüs, wie z.B. Formulas, Lighting und Postprocessing. In der Mitte ist der nicht zu übersehende Renderbereich, dessen Auflösung und Aspect Ratio im Viewing Image Menü eingestellt wird. Es gibt zudem viele Demo Files mit bereits erzeugten Fraktalen. Zu finden sind sie unter Open m3p, damit kommt man zu deren Speicherort, den M3Parameter Folder. Mit Doppelklick fügt man es in Mandelbulb ein und kann es sich über Calculate 3D anschauen, im Navigator erkunden, im MutaGen mutieren oder Formel Parameter verändern. Alle Einzelheiten zu den Menüpunkten in den nachfolgenden Kapiteln.

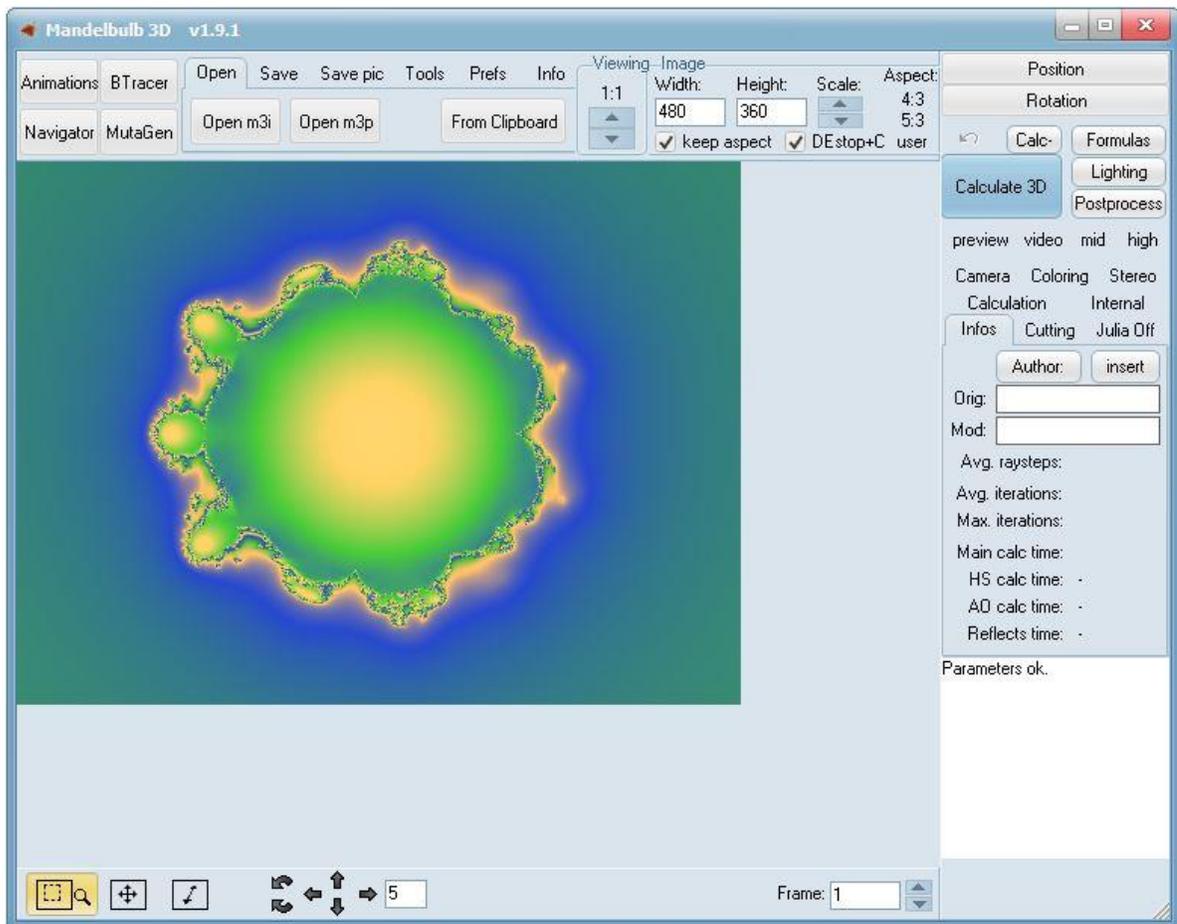


Abb. 28: Hauptfenster MB3D

⁵⁵ Vgl. Mandelbulber Manual, S 4.

2.1.1 Formeln wählen und kombinieren

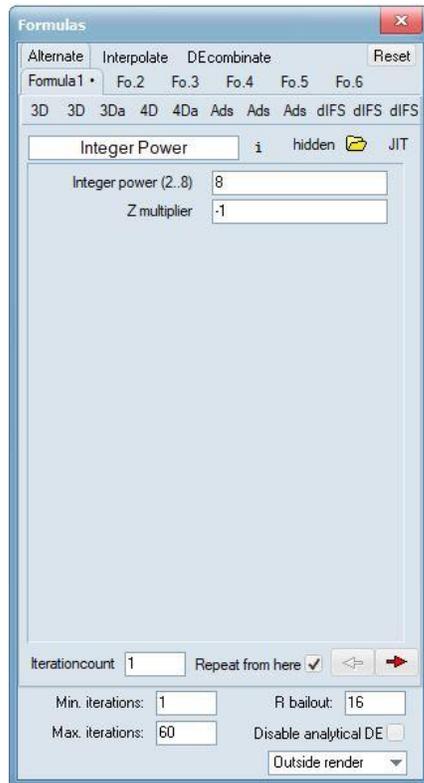


Abb. 29: Formula Fenster MB3D

Um ein 3D Fraktal zu erzeugen, muss man sich zunächst für eine Formel entscheiden und anschließend im Hauptfenster auf *Calculate 3D* klicken, um dieses zu rendern. Die Formeln findet man unter dem Menüpunkt *Formulas*, dahinter verbirgt sich das neue Fenster *Formeln*, in dem man bis zu sechs Formeln miteinander kombinieren kann. Die Menüpunkte *3D*, *3Da*, *4D*, *4Da*, *Ads* und *dIFS*, besitzen jeweils Listen mit zahlreichen Fraktalformeln, bei denen zwischen *Escapetime*, *Transform* und *dIFS* Formeln unterschieden wird. *3D*, *3Da*, *4D* und *4Da* beschreiben die *Escapetime* Formeln, die für *Mandelbulbs*, *Mandelboxes* etc, verwendet werden und errechnete Werte iterieren, um das Ergebnis zu erhalten. Man unterscheidet hier wiederum zwischen den schneller zu berechnenden analytischen (*3Da* und *4Da*) die eine schnellere *DE* Kalkulationen besitzen und den nicht analytischen Fraktalen (*3D* und *4D*), die langsamer in der Berechnung sind.⁵⁶ Als nächster Menüpunkt folgt *Ads*, diese

sind *Escapetime transforms*, das bedeutet zusätzliche Formelteile, welche aber alleine kein Fraktal beschreiben, sondern nur in Verbindung mit anderen Formeln Verwendung finden. Gekennzeichnet sind diese durch einen Unterstrich vor dem Namen. Die nächsten zwei Menüpunkte sind *dIFS* Shapes, diese bieten eine Reihe von geometrischen Formen (*Shapes*) und sind im Kontrast zu *Escapetime* Formeln eher simpel. Diese *Shapes* werden nun iteriert und bilden komplexe Gebilde, die einen fraktalen Charakter besitzen. Der dritte *dIFS* Punkt ist *dIFS transform*, dieser bietet Transformationsmöglichkeiten für *dIFS* Shapes. Diese können ebenfalls nicht alleine stehen und auch nicht in Kombination mit *Escapetime* Formeln verwendet werden.⁵⁷ Unter der Menüleiste steht die Formel, die gerade aktiv verwendet wird, bei Default ist das „Integer Power“, „i“ steht für eventuell existierende Informationen zu der Formel, *hidden* zeigt ausgeblendete Formeln an, der Ordner zeigt den Dateipfad der jeweiligen Formel, in den natürlich auch eigene Formeln hinzugefügt werden können und *JIT*, in dessen Fenster der Code der Formel bearbeitet werden kann. Darunter befinden sich die zu manipulierenden Parameter, diese können sich je nach ausgewählter Formel ändern. Möchte man nun in den etwas komplexeren Teil eintauchen, so kann man Formeln kombinieren, um

⁵⁶ Vgl. Tomori, 2018

⁵⁷ Vgl. Wikibooks, 2017

einen bestimmten Look mit Charakteristiken zu erhalten, die mit nur einer Formel nicht erreicht werden können. Dafür bietet Mandelbulb die Berechnungsmodelle, *Alternate*, *Interpolate* und *DE Combine*. *Alternate* beschreibt das Verfahren, bis zu sechs Formeln bei jeder Iteration alternierend miteinander zu kombinieren und im fertigen Fraktal Eigenschaften von allen Formeln wiederzufinden. *Interpolate* arbeitet bei den Iterationen zunächst ebenfalls alternierend, aber nur zwischen maximal zwei Formeln. Hier wird nun zusätzlich der Gewichtungparameter *weight* gegeben, um zu entscheiden, ob ein Fraktal dominanter oder beide gleich gewichtet werden sollen. *Weight* steht bei Default bei Formel 1 auf 1 und bei Formel 2 auf 0. Stellt man bei beiden das Gewicht 1 ein, so steht für jede Iteration der ersten Formel eine Iteration der zweiten Formel, die Iteration Proportion ist somit 1:1. Bei 2:1 steht es für 2 Iterationen der ersten Formel zu einer Iteration der zweiten Formel. Nützlich ist diese Kombinationsmethode z.B., wenn man ein Fraktal leicht deformieren möchte, die Eigenschaften eines Fraktals aber noch klar zu sehen sein sollen. Hierzu stellt man bei dem einen Fraktal ein sehr hohes Gewicht ein und bei dem anderen ein Niedriges.⁵⁸ Die letzte Kombinationsmöglichkeit ist *DE Combine*, wobei zwei voneinander unabhängige Fraktale entstehen. Man hat die Möglichkeit aus sechs Fraktalen maximal zwei Sets berechnen zu lassen, das kann über die Zahl oben rechts gewählt werden. Ein Beispiel: sechs Fraktale sind aktiviert, man wählt oben die Zahl 3, so werden Fraktal 1 und 2 kombiniert und Fraktale 3, 4, 5 6 miteinander. Wählt man die Nummer 4, werden Fraktal 1,2,3 zusammen berechnet und 4,5,6 miteinander.⁵⁹ Die entstandenen 2 Fraktale sind unabhängig voneinander, werden aber in einem Fenster angezeigt und gerendert. *DE Combine* bietet im Unteren Bereich des Formula Fensters weitere Modi an, wie Min, Max, Inv Max, Min lin, Min nlin, Mix. Min lässt beide Sets überlappen. Max zeigt ausschließlich Teile des zweiten Sets, die mit den Teilen des ersten Sets überlappen, der Rest ist nicht sichtbar. Inv Max ist das Gegenteil von Max und zeigt ausschließlich den Fraktalteil des ersten Sets, der nicht mit dem zweiten Set überschneidet. Im Modus Min lin wird das zweite Set durch eine kurvige Form ersetzt, die aussieht als wäre es aufgeblasen worden. In der Min nlin Einstellung sieht es so aus als werden beide Sets mit einem runden und weichen Übergang verbunden.⁶⁰ Bei den beiden zuletzt genannten Parametern kann auch deren Distanz D_s manuell verändert werden. Bei Mix dient das erste Set als escapetime formular, d.h. es generiert um die Koordinaten für das zweite Set, das aus IFS Formeln bestehen muss, da es sonst nicht richtig funktioniert.⁶¹

⁵⁸ Vgl. Cloudpictures, 2014

⁵⁹ Vgl. DevianArt, 2016

⁶⁰ Vgl. Cloudpictures, 2014

⁶¹ Vgl. Lawrence Post, 2012

2.1.2 Navigator

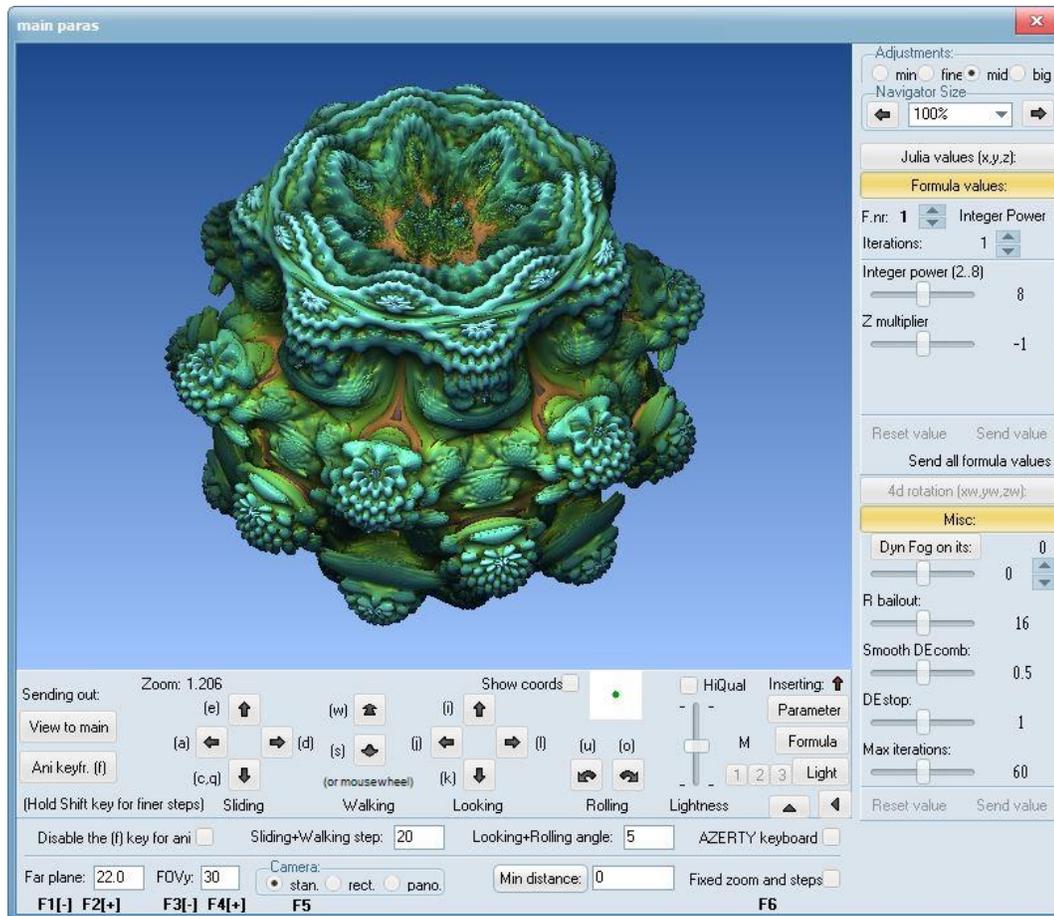


Abb. 30: Navigator MB3D

Um ein Fraktal zu erforschen, öffnet man den *Navigator* oben links im Hauptfenster. Falls nicht das aktuell ausgewählte Fraktal erscheint, muss unten rechts auf *Parameter* geklickt werden, um den Navigator zu aktualisieren. Zum Navigieren werden vier Optionen bereitgestellt: *Sliding* (hoch, runter, links, rechts), *Walking* (vorwärts, rückwärts), *Looking* (vgl. reine Kopfbewegung, ohne den Standort zu verändern), *Rolling* (Drehen der Ansicht, ohne die Position zu verändern, vgl. Kopf zur Seite neigen). Alle Navigationsoptionen haben ebenfalls eine Tastaturbelegung, die Maus kann durch einmal klicken und bewegen *Sliding* steuern und *Walking* kann durch das Mausrad erzeugt werden. Die Checkbox *Show coords* dient als Orientierungshilfe im 3D Raum und blendet die drei Koordinatenachsen nach Bedarf ein oder aus. Zudem gibt es einen *Lightness* Slider, welcher die Lichthelligkeit steuert. Rechts findet man die gleichen Formelparameter wie im *Formular Fenster*. Falls die abgebildete Menüleiste rechts nicht erscheint, klickt man auf den kleinen Pfeil ganz unten rechts. Hier kann man die Parameter in der Formel verändern und in *Adjustments* feinere Abstufungen wählen. Um schnelles und angenehmeres Navigieren zu ermöglichen, sollte man die

Auflösung des Viewports geringhalten. Das kann man indem man die *HiQual* Checkbox nicht anwählt und die *Navigator Size* klein hält. Zusätzliche Parameter kann man öffnen, indem man auf den Button *Misc* klickt. Diese Parameter sind nicht fraktalspezifisch, sondern gelten für alle gleichermaßen. Hier gibt es die Einstellungen der DE Genauigkeit (*DE stop*) und deren Weichheit, *R bailout*, der den Renderbereich verschiebt und maximalen Iterationen.⁶² Wählt man einen kleinen Wert, hat das Fraktal weniger Detail und wird weichgezeichnet, ist der Wert hoch, steigt die Berechnungsdauer. Ist man zufrieden mit dem gewählten Ausschnitt und möchte diesen rendern, so muss man die Daten mit dem *View to main* Button an das Hauptfenster schicken und anschließend auf *Calculate 3D* klicken. Eine weitere Funktion ist der Julia Modus, der mit Julia Sets arbeitet. Er kann über das Hauptfenster über *Julia Off*, als auch über den Navigator *Julia Values* (*x, y, z*) aktiviert werden. Der Modus funktioniert nur mit *3D, 3Da, 4D* und *4Da* Formeln. Man kann die Beeinflussung separat für die x,y und z-Achse vornehmen, Alternativ auch in einer Kugelform, über *Sphere coords*.⁶³ Die Formelparameter können weiterhin unabhängig davon verändert werden.

2.1.3 MutaGen

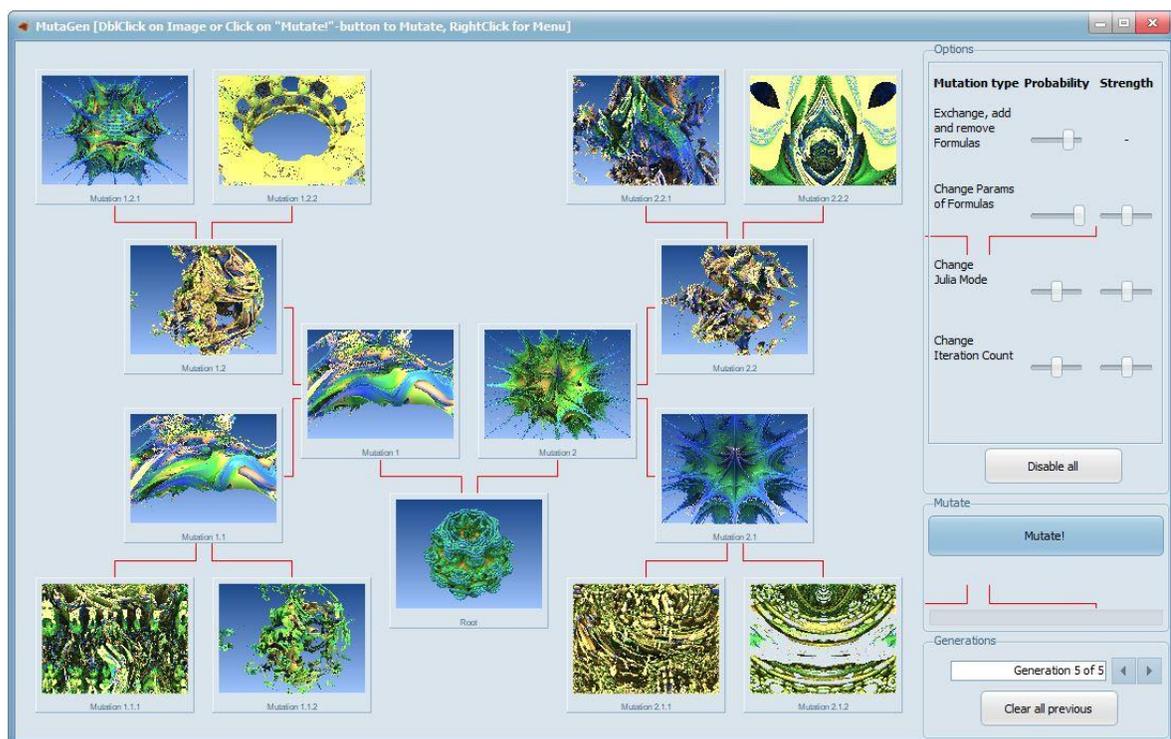


Abb. 31: MutaGen MB3D

⁶² Vgl. A V, 2014

⁶³ Vgl. Lawrence Julia, 2011

Der Mutations Generator, MutaGen, im Hauptfenster links oben zu finden, ist perfekt dazu geeignet schnell viele unterschiedliche Fraktale zu generieren, sich inspirieren zu lassen oder diese später zu erkunden. Das vorher gewählte Fraktal *root*, unten mittig zu sehen, dient als Grundlage des Mutationsprozesses. Rechts kann man vier Mutationsparameter nach Belieben prozentual einstellen und von dreien die Stärke angeben. Die Slider ganz nach links bedeutet, dass diese Eigenschaft nicht in das Ergebnis eingerechnet wird, der Slider bis Anschlag nach rechts hingegen, dass bei jeder Mutation der Parameter mit einfließt. Die verfügbaren Einstellungen sind: Formeln addieren, austauschen, entfernen, Formelparameter ändern, Julia Mode ändern und die Iterationszahl ändern. Nach einem Klick erhält man 14 verschiedene Fraktale und kann per Doppelklick auf das Lieblingsfraktal, dieses weiter mutieren lassen oder rüber Rechtsklick in das Hauptfenster holen, anschließend im Navigator erkunden oder speichern. Die Mutationsschritte werden automatisch gespeichert und man kann sich die Vorhergehenden über die Pfeiltasten unten rechts anzeigen lassen oder nach Belieben löschen. Nachteil ist, dass der *MutaGen* viel Speicherplatz und eine hohe CPU Leistung benötigt. Nicht mehr benötigte Dateien sollten daher über *Clear all previous* gelöscht werden.⁶⁴

2.1.4 Lighting

Mandelbulb bietet Möglichkeiten das Fraktal zu beleuchten, hierzu findet man im Hauptfenster den Button *Lighting*, durch Klicken öffnet sich das Lighting Fenster. Es stehen insgesamt sechs Lichter zur Verfügung, die miteinander kombiniert werden können. Um die Farbe des Lichts zu ändern, klickt man auf das Farbfeld und wählt die gewünschte Farbe aus. Die *Diffusion*, also die Lichtstreuung, kann durch das Drop Down Menü verändert werden. Man kann zwischen den Berechnungsformen Cos , cos^2 , $\frac{\text{cos}}{2} +$ und $(\frac{\text{cos}}{2} +)^2$ wechseln und, je nach Wunsch, den passenden Look auswählen. Die Intensität des Lichts ist in *1e0* angegeben, umgerechnet lautet dies $1e0 = 1 \times (10^0) = 1$, bei Erhöhung auf $1e1 = 1 \times (10^1) = 10$ wird das Licht heller.⁶⁵ Für *Specular* können Werte zwischen 2 und 256 gewählt werden. *HS* steht für Hard Shadows und *On* schaltete das Licht an oder aus.

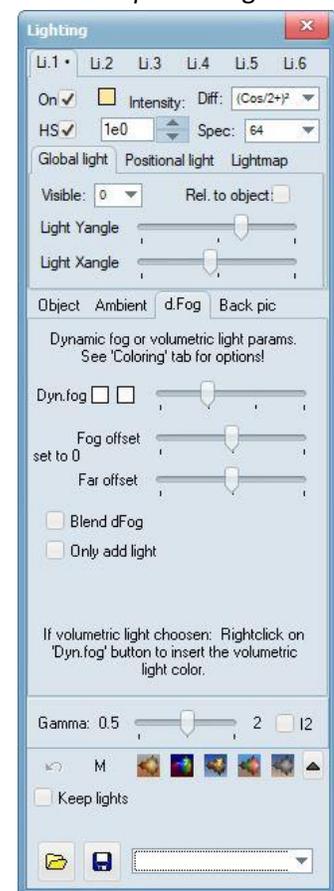


Abb. 32: Lighting MB3D

⁶⁴ Vgl. FlinkDimensions, 2016

⁶⁵ Vgl. Webreference

Verfügbare Arten des Lichts sind *Global Light*, *Positional Light* und *Lightmap*. Das *Global Light* ist vergleichbar mit der Sonne. Die Regler *Light y angle* ändert die Höhe des Lichts und *Light x angle* bewegt es nach links und rechts in Form eines Orbits um das Fraktal herum. Das *Positional Light* kann man positionieren, indem man auf *mid* klickt. Jetzt sieht man im Main View ein Kreuz, wenn man nun auf die Position im Fraktal klickt, an der man die Lichtquelle setzen möchte, erscheint das Licht genau an diesem Punkt. Mit *Xpos*, *Ypos* und *Zpos* kann man die Position in den Achsen verändern. Möchte man, dass das Licht im Render sichtbar ist, kann man *Visible* von 0 auf 1 ändern. Das dritte Licht ist eine *Lightmap*, in der die Beleuchtungsinformationen gespeichert sind und das Fraktal je nach Map unterschiedlich beleuchtet. Die Map kann aus vielen Vorlagen gewählt werden oder auch eigene hinzugefügt werden.

Im Object Tab können die Transparenz, Diffuse und Specular Color in der Escapetime Ramp unabhängig voneinander bestimmt werden. Man sieht jeweils drei Farben übereinander, die Oberste steht für Transparenz, die Mittlere für Specular Color und die unterste für Diffusecolor. Mit einem Rechtsklick kann die Farbe ausgewählt werden. Man kann die Farben verschieben, indem man den *Glue Slider* aushakt und neue Farben hinzufügen, indem man den rechten Farbstapel nach links verschiebt. Zudem kann man sich die Farben zufällig generieren lassen, indem man auf *random* klickt. Um ein direktes Farbergebnis angezeigt zu bekommen muss *Auto update image* angehakt sein, ansonsten muss es manuell upgedated werden.⁶⁶

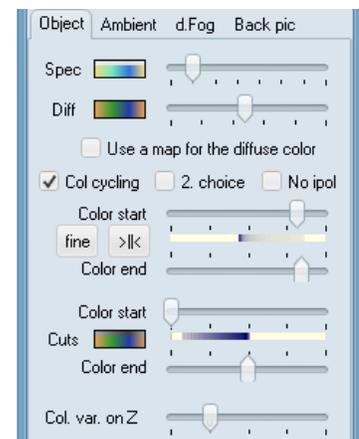


Abb. 33: Object Tab – Lighting MB3D

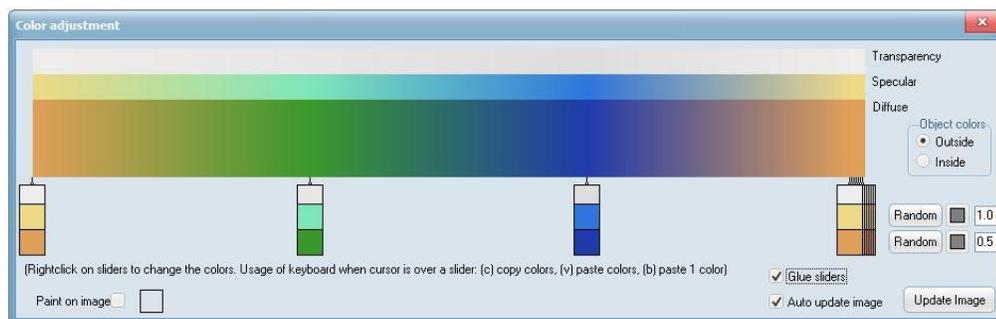


Abb. 34: Escapetime Ramp - Object Tab MB3D

Das Histogramm der Farbverteilung im Object Tab wird repräsentiert durch *Color start* und *Color end*. Kleinere Abstufungen können gemacht werden, indem man *fine* aktiviert, dann bekommt man eine bessere Repräsentation durch einen blauen Balken. Unter *2. Choice* ist es möglich eine zweite Wahl

⁶⁶ Vgl. Lawrence Lighting, 2011

zu treffen und die *Color variation on Z* beeinflusst nur die Z Achse. Man kann außerdem ein Bild als Colormap verwenden und *Use a map for the diffuse Color* anhaken und die gespeicherten oder eigene Texture Maps verwenden.

Über den Ambient Tab kann man den Einfluss des Lichts und der Umgebung auf das Fraktal über *Ambient* und *Depth* anpassen. Die beiden Farbfelder bei Ambient beschreiben die Reaktion auf das Licht (Farbfeld links) und Schatten (Farbfeld rechts), allerdings ist das unabhängig von der Lichtquellen Farbe selbst. In *Depth* wird eingestellt, wie viel Einfluss der Hintergrund auf das Fraktal hat. Die zwei Farbfelder stehen für die obere und untere Farbe des Hintergrunds. Den Verlauf des Hintergrunds kann man in den drei Feldern unter den Slidern wählen. Man kann die zwei Farben gleichmäßig verteilen oder einer mehr Raum geben. Die Einstellungen für das gesamte Lichtsetup kann man sich ganz unten in eigenen Presets abspeichern.

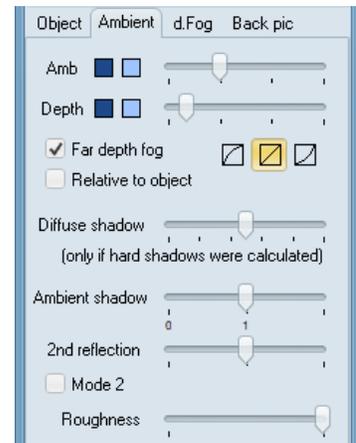


Abb. 35: Ambient Tab – Lighting MB3D

Dynamic Fog ist eine unabhängige Lichtquelle, die das Fraktal umgibt und wirkt, je nach Einstellung, wie ein Schein (Glow) um das Fraktal herum. Der Slider bei *Dyn.fog* beeinflusst die Intensität, das erste Farbfeld steht für die Hauptfarbe und die Nebensfarbe, *fog offset* macht das Bild heller oder dunkler, *far offset* definiert wie viel des Hintergrunds oder ob er nur das Fraktal beeinflusst werden soll. Außerdem kann der d.Fog über *Blend dFog* von einer Lichtquelle zu einem Filter, der über das gesamte Bild gelegt wird, geändert werden. *Only add light* funktioniert nur, wenn der *Far Offset* Slider sich im linken Bereich befindet, da *Far Offset* im linken Bereich Licht

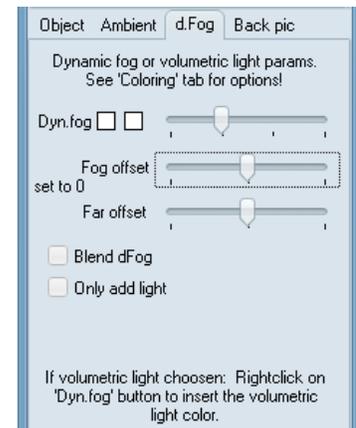


Abb. 36: Dynamic Fog – Lighting MB3D

vom Hintergrund subtrahiert, falls das aber nicht gewünscht ist und der Hintergrund unberührt bleiben soll, so muss der Haken bei *Only add light* an sein. Um ein Licht als volumetrisches Licht zu rendern, muss man im Hauptfenster auf *Coloring* klicken und *Dyn. Fog on it* anschalten. Der Text ändert sich nun zu *Volume light nr.* Jetzt muss nur noch die Nummer des Lichts angegeben werden, das man als volumetrisches Licht haben möchte, anschließend beschreiben Im dFog Tab nun alle Parameter das Volumetric Light, auch wenn sich deren Beschriftung nicht ändert.⁶⁷

⁶⁷ Vgl. Bib993

Hintergrundbilder können durch den *Back pic* Tab hinzugefügt werden, indem man *Background image* anhakt und im Explorer das Bild auswählt und als Sphere hinzufügt. Möchte man keine Sphere, so muss die Checkbox *as full Background Sphere* aus sein. Die x, y und z-Achse können wieder angepasst werden, genau wie die Helligkeit unter Intensität.

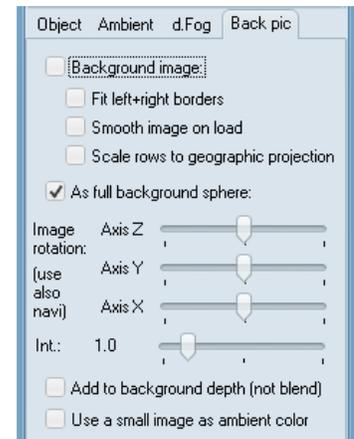


Abb. 37: Background Image – Lighting MB3D

Es ist möglich das Fraktal zu schneiden, indem man in dem Hauptfenster rechts auf Cutting klickt, dann nach Belieben eine oder mehrere Achsen auswählt. Man kann auch beliebige Koordinaten angeben oder im Viewport über *Get values from image* eine Koordinate picken, an der geschnitten wird.

2.1.6 Post Processing

Eine Postprocessing Möglichkeit ist durch das *Postprocess* Fenster gegeben, welches man rechts im Hauptfenster findet. Alle Veränderungen, die hier vorgenommen werden, erfordern eine Neuberechnung des Bildes, um die Einstellung zu beurteilen. *Recalculate a selection* rendert eine mit der Maus gezogene Region des Bildes, ohne das komplette Bild rendern zu müssen. *Normals on Z-Buffer* kann man verwenden, um die Normalen neu zu berechnen. Harte Schatten werden nicht automatisch berechnet, sondern müssen händisch aktiviert werden. Im Hard Shadows Tab kann gewählt werden, welches Licht in die Berechnung mit einbezogen werden soll. Wenn man nicht möchte, dass ein bestimmtes Licht einen Schatten verursacht, kann man dieses hier aushaken. Wenn man nur ein aktives Licht einbezieht, bekommt man die Möglichkeit weiche Schatten bei *Softer H.S.* einzustellen und mit *Radius* die Stärke der Weichheit einstellen. Die Reichweite des Schattens kann über *Max. length calc* vergrößert werden. Die Ambient Shadows werden automatisch berechnet, man kann nach Bedarf den Haken bei Ambient Shadows ausstellen und sie manuell aktivieren. Es gibt vier Arten der Schattenberechnung, SSAO15, SSAO24, SSAO24r, DEAO, die unterschiedliche Looks erzeugen. Für jede Art gibt es Parameter, die verändert werden können, wie z.B. die Anzahl

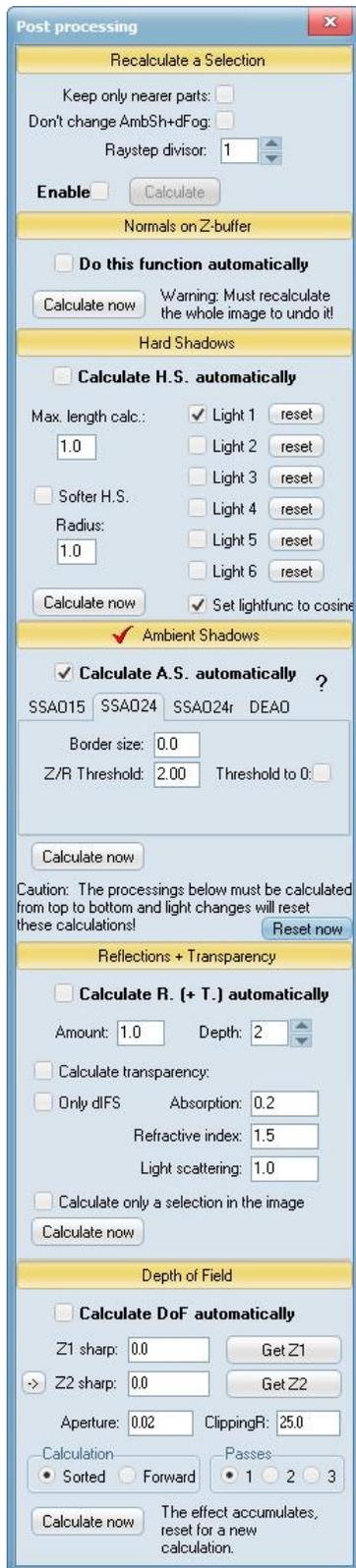


Abb. 38: Post processing – MB3D

der Rays oder Änderung des Threshold etc. Wenn man Reflexionen verwenden möchte, nimmt man am besten eine dIFS Formel, da diese kontinuierliche Oberflächen besitzen, Escapetime Fraktale hingegen keine flachen Oberflächen oder Kanten haben, die das Licht korrekt reflektieren. Die verfügbaren Parameter sind hier Amount, der wie ein Multiplizierer funktioniert, verdoppelt man die Zahl verdoppelt sich die Intensität und Depth, der die Raytiefe der Reflexionen angibt. Die Reflexionen verlängern die Renderzeit enorm. Unter dem gleichen Tab gibt es die Option Transparency, welche angehakt werden muss, falls man Transparenz miteinbeziehen möchte.⁶⁸ Hier gibt es weitere Parameter, wie *Only dISFAbsorption*, *Refractive index*, auch bekannt als IOR der Refraktion und *Light Scattering*. Tiefenschärfenoptionen bekommt man im Depth of Field Tab. Indem man *Get Z1* auswählt und anschließend den Teil des Bildes anklickt, auf dem der Fokus liegen soll und über *Get Z2* einen den Bereich Z1 bis Z2 festlegt, der scharf sein soll.⁶⁹ Unter *Aperture* kann die Blende der Kamera eingestellt werden. Über *ClippingF* wird bestimmt, wie stark die Unschärfe sein soll. Je nach Bedarf, kann zwischen *Sorted* und *Forward* gewählt werden.

2.1.7 Animation

Fraktale und Kamera kann man über den *Animation Maker* animieren, zu finden ist dieser im Hauptfenster ganz oben links. Der obere Bereich dient der Visualisierung der Keyframes, welche man im Navigator festlegt und keyed. In dem Bereich *On inserting a new keyframe* kann man die Frameanzahl angeben, die zwischen den Keyframes vergehen soll und bei der Interpolation zwischen *Linear* oder *Bezier* wählen. Als Kalkulationstyp wählt man je nach Bedarf 2D oder 3D. *File Index* beschreibt die Nummerierung der Frames. *Increment* die Schrittzahl der Frames beim Export, z.B. bei 1 = 1,2,3,4 oder 2 = 1,3,5. Als Output kann gewählt werden zwischen

⁶⁸ Vgl. Sabine62

⁶⁹ Vgl. Brad Stefanov, 2014

BMP, PNG und JPG. Möchte man stereoskopisch rendern, so hakt man *Render stereo animation* an. Bei *Output folder* wird der Speicherpfad angegeben, allerdings nicht der Dateiname selbst, den wählt man unten Links bei dem *Diskettensymbol m3a*. Bei *Start index* gibt man den Startframe und bei *End* den letzten Frame ein. Im Navigator kann man über *Ani keyfr.* oder *F* die Keyframes im *Animation maker* hinzufügen. Danach kann man beliebige Änderungen der Parameter vornehmen und den nächsten Keyframe einstellen. Man fügt somit automatisch neue Frames im Animation Maker hinzu. Man kann in dessen oberen Fenstern weiterhin die Subframes bearbeiten und vergrößern oder verringern. Außerdem kann man hier den *Z Buffer* exportieren. Um eine Vorschau der Animation zu erhalten, kann man einen Preview rendern lassen. Über *Start rendering animation images* wird die Bildsequenz in der Originalqualität gerendert, man kann die Qualität noch erhöhen indem man das *Antialiasing* erhöht.⁷⁰

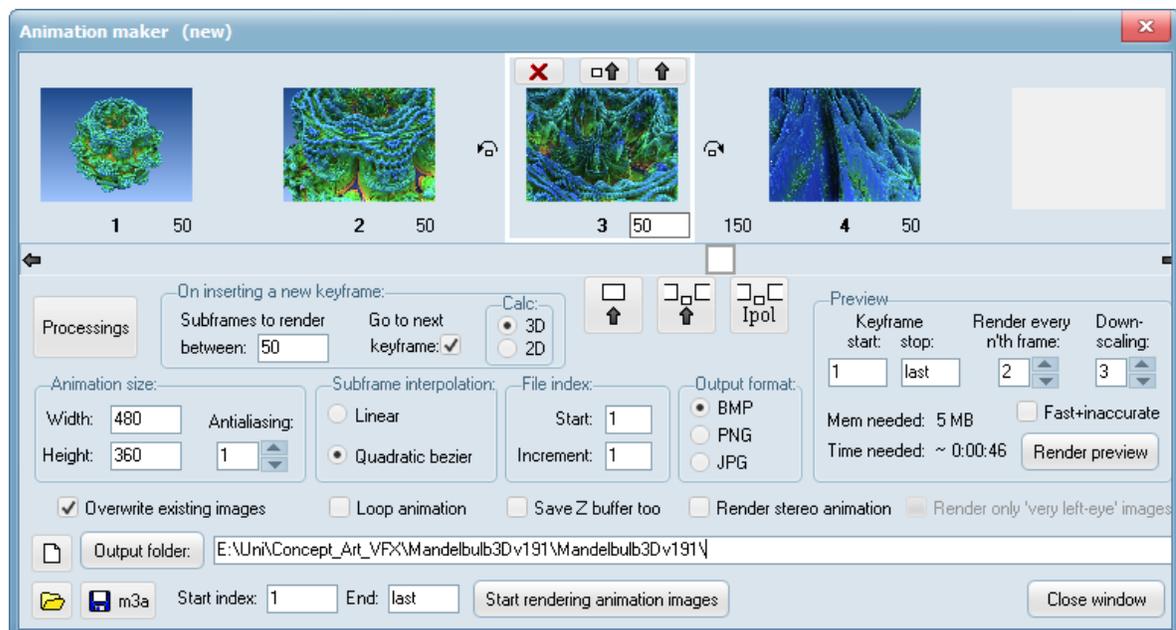


Abb. 39: Animation Maker – MB3D

2.1.8 Exportmöglichkeiten

Ist man zufrieden mit seinem Fraktal, gibt es multiple Wege dieses zu speichern. Im Hauptfenster findet man den Save Tab. Hier gibt es die Option *m3i*, um alle Parameter, die Formeln, Lighting, Post Processing Einstellungen und das aktuelle Rendering zu speichern. *M3p*, um nur die Parameter der Formeln und Lighting, Post Processing, aber ohne das Rendering zu speichern. *JPEG + P*, für Speichern als *m3p* und ein separates JPEG des Fraktals. *To Clipboard*, bei dem alle Parameter und den Namen

⁷⁰ Vgl. Fraterchaos

des Fraktals als Text im Zwischenspeicher gespeichert werden, diesen Text kann man dann mit Strg V in ein Textfile einfügen und speichern. Wenn man nur das Bild speichern möchte, bietet Mandelbulb 3D im *Save Pic* Tab drei Möglichkeiten, *PNG* hier gibt es die zusätzliche Möglichkeit als bitmap *bmp* zu speichern, *JPEG*, hier kann die Qualität und Schärfe ausgewählt werden, *ZBUF* zur Speicherung der Tiefeninformation des Fraktals als *png* oder *bmp*. Zusätzlich kann man unter *Infos* den Autor des Fraktals angeben und mit *insert* einfügen.⁷¹ Möchte man anschließend Rendern, bietet das Hauptfenster verschiedene Render Presets, dazu gehören *preview*, *video*, *mid* und *high*. Es gibt mehrere Optionen, die im Hauptfenster im Tab *Calculation* zu finden sind, um die Bildqualität und das Bildrauschen zu reduzieren. Bei *DE Stop*, *Raystep Multiplier*, *Stepwidth limiter* verbessern kleinere Werte die Bildqualität und reduzieren das Bildrauschen, erhöhen aber die Renderzeit, welche unter *Infos* genauer ausgelesen und verglichen werden können. Des Weiteren können die Normalen gesmoothed werden, um dem Fraktal einen weicheren Look zu verleihen. Die Bildgröße des Renders wird oben unter *Image* in Pixel eingestellt. Zu den angegebenen Aspect Ratios kann man das Dritte *user* durch rechts klicken ein beliebiges Seitenverhältnis einstellen. Wichtig zu beachten ist, dass der *Viewing* Tab auf 1:1 steht, wenn man das Bild speichert, denn bei 1:2 oder anderen Werten wird die Auflösung gestaucht oder gestreckt.

Bei einer VFX Produktion wird Realbild mit 3D Elementen, bzw. hier mit Fraktalen kombiniert, daher sind Kamera- und Meshdaten hierfür essenziell. Die 3D Kamerafahrten müssen mit der des Drehs identisch und zum Abgleichen importier- oder exportierbar sein. Des Weiteren ist es von Vorteil wenn man, das gewünschte Fraktal, auch als Mesh exportieren und dann in der gewünschten Szene platzieren kann. Zur weiteren Bearbeitung und Postproduktion sind Renderpasses sehr wichtig. Mandelbulb bietet für die genannten Punkte keine direkten Exportmöglichkeiten, man kann die Ziele allerdings über Workarounds erreichen. Kameradaten können nicht direkt exportiert werden, durch Rendern der gewünschten Sequenz und anschließendem tracken der Kamera in z.B. Nuke, PFTrack oder vergleichbaren Programmen kann das Problem gelöst werden. Ein Importieren von Kameradaten in Mandelbulb ist nicht möglich, Kamerafahrten sind tatsächlich nur über Augenmaß nachahmbar, den FOV hingegen kann man genau festlegen. Allerdings fällt jedes noch so gute Augenmaß auf der großen Leinwand auf, daher gibt es die Lösung das getrackte Rendering in Nuke einzufügen und auf das Footage zu reprojecten. Mandelbulb bietet das sog. Voxel Stacking als obj Exportmöglichkeit im *Bulb Tracer* an, den man oben links im Hauptfenster findet.⁷² Als Vorschau

⁷¹ Vgl. Lawrence, 2011

⁷² Vgl. Horsthuis VFX, 2015

sieht man, zur besseren Beurteilung eine Schnittsequenz durch den ausgewählten Fraktalteil oder das gesamte Fraktal. Man kann zusätzlich entscheiden, ob man nur die äußere Hülle, das Innere oder beides exportieren möchte.⁷³ Auf diese Weise kann man ein Stück des Fraktals exportieren und in andere 3D Softwares laden. Je detaillierter man das Fraktal exportiert haben möchte, desto größer muss die Voxel Anzahl (*Size*) gewählt werden. Dementsprechend größer wird die Datei am Ende und desto länger die Exportdauer.⁷⁴ Zudem benötigt man, nach dem Export, zunächst ein Mesh Clean Up in ZBrush oder einer vergleichbaren Software.⁷⁵

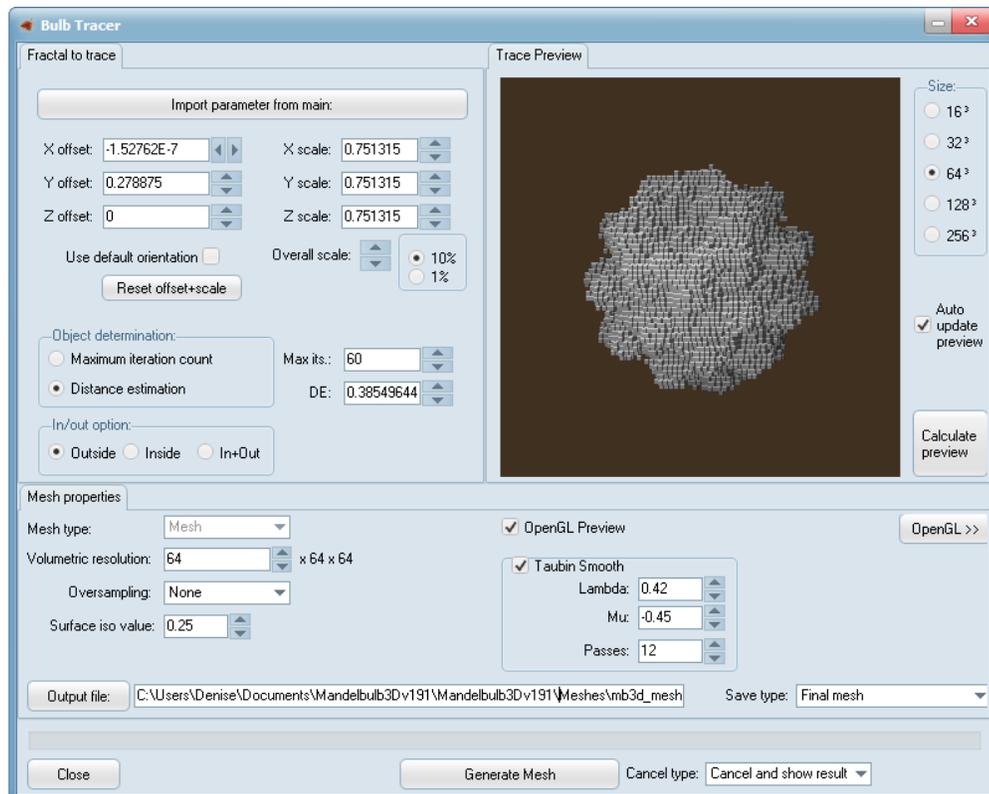


Abb. 40: Bulb Tracer – MB3D

Es existiert ein Python Skript für Nuke, geschrieben von Julik Tarkhanov, das die exportierten Voxel Daten nimmt, sie aufeinandersetzt und daraus eine 4K 32 bit exr Bitmap generiert, die als Displacement Map in 3D Softwares erkannt wird und man daraus ein hochaufgelöstes Heightfield Terrain erhält. Eine weitere Option wäre es eine Bildsequenz zu rendern und diese in Photogrammetrie Softwares wie Agisoft hineinzuladen und diese arbeiten zu lassen.⁷⁶ Zum erhalten bestimmter Render Passes, ist der Workaround recht aufwendig und rechenintensiv. Den

⁷³ Vgl. FlinkDimensions, 2016

⁷⁴ Vgl. FlinkDimensions, 2016

⁷⁵ Vgl. Horsthuis VFX, 2015

⁷⁶ Vgl. Horsthuis VFX, 2015

Z-Buffer kann man über den Post Processing Tab rendern, allerdings hat er maximal 8 Bit, Depth of Field Einstellungen im Compositing funktionieren damit problemlos. Channels für Reflexionen kann man nicht direkt als Pass erhalten, sondern über einen rechenintensiven Umweg über zwei Renderings. Hierzu benötigt man ein Render mit Reflexionen und ein Zweites ohne Reflexionen.⁷⁷ Anschließend, kann man über eine Compositing Software eine Differenz errechnen lassen und dadurch den Reflection Pass erhalten. Mandelbulb erkennt die Normalen im Frame Buffer, aber es gibt keine Möglichkeit diese zu exportieren. Um die Normalen zu erhalten, muss man im Lighting Tab eine rot, grün, blau, gelbe Bitmap verwenden und durch die Rotation Slider, den richtige Ausrichtung finden. Wichtig hierbei ist es, diese Map von Ambient Occlusion, sämtlichen Lichtern und Schatten zu befreien. Es ist eine sehr mühselige Herangehensweise und bringt vermutlich nicht zu 100 Prozent das gewünschte Ergebnis.⁷⁸

2.1.9 Eignung

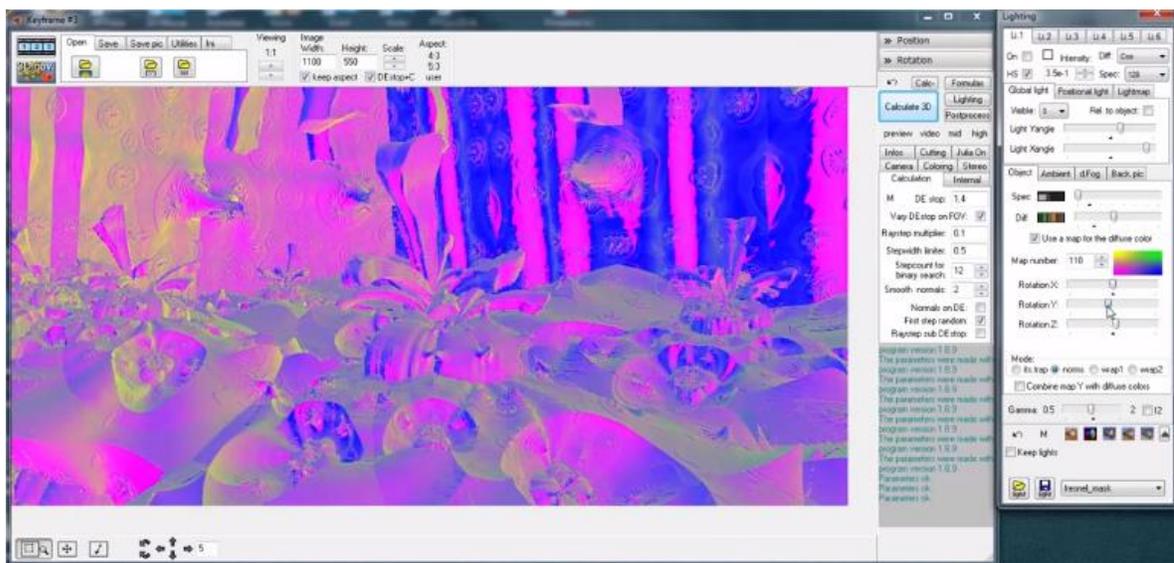


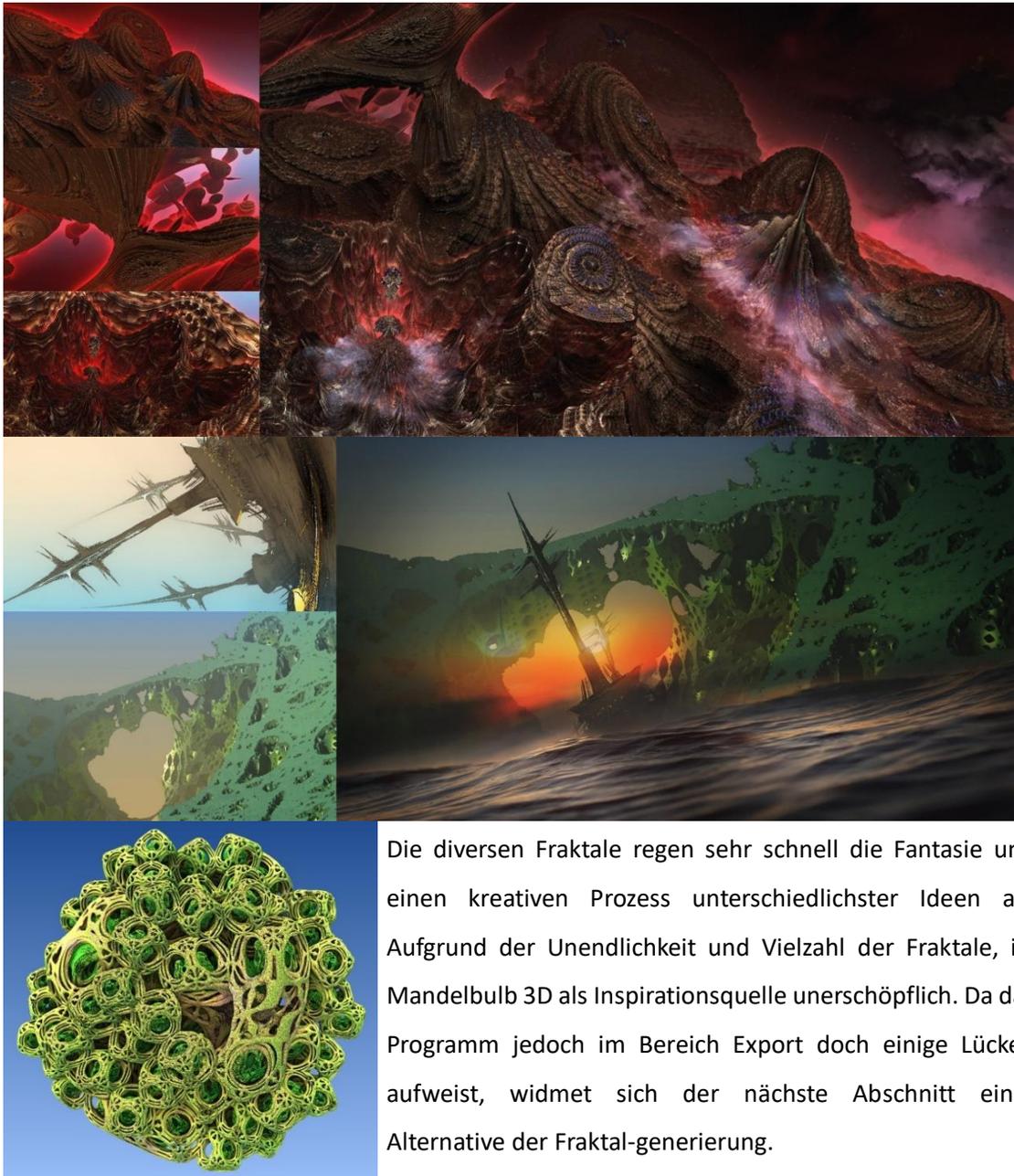
Abb. 41: Annäherung an Normal Map durch vierfarbige BitMap – Lighting MB3D

Mandelbulb 3D eignet sich sehr gut für das erste Experimentieren mit Fraktalen, um diese kennenzulernen und ein besseres Verständnis zu bekommen wie sie funktionieren. Die Oberfläche ist leicht verständlich und benutzerfreundlich. Viele Buttons und Optionen sind mit informativen Hinweisen, über die jeweilige Funktion, ausgestattet. Das Programm eignet sich hervorragend als Inspirationsquelle für Regisseure, Concept oder Environment Artists. Die Artists können Fraktale erforschen, verändern, färben, beleuchten, animieren und neue Welten entdecken, ohne jegliche

⁷⁷ Vgl. Horsthuis VFX, 2015

⁷⁸ Vgl. Horsthuis VFX, 2015

Programmierkenntnisse besitzen zu müssen. Die, nach einer kurzen Einarbeitungsphase, in den fraktalen Welten gefundenen Elemente und Formen können die Grundlage für Designs für Environments, Props oder sogar Character bieten, wie die Arbeit von Markus Brackelmann in 3.1.3 und im Folgenden eigene Testbeispiele zeigen. Die erkundeten Fraktale erinnern an bekannte oder auch ganz fremde Welten. Eine dunkle Welt eines anderen Planeten, mit tiefen Kratern und fossilartigen Strukturen. Ein Schiff auf hoher See, das einen natürlich entstandenen Torbogen durchquert. Oder ein Fraktal, das an Eulenköpfe erinnert, welches die Grundlage für ein Characterdesign oder ein fiktives Baumhaus sein könnte.



Die diversen Fraktale regen sehr schnell die Fantasie und einen kreativen Prozess unterschiedlichster Ideen an. Aufgrund der Unendlichkeit und Vielzahl der Fraktale, ist Mandelbulb 3D als Inspirationsquelle unerschöpflich. Da das Programm jedoch im Bereich Export doch einige Lücken aufweist, widmet sich der nächste Abschnitt einer Alternative der Fraktal-generierung.

Abb. 42: Eigene Testbeispiele und Concept Art mit Hilfe von Mandelbulb 3D

2.2 Fraktalerstellung in Houdini

Houdini ist eine, von Side Effects Software Inc. entwickelte, 3D Software für Film und TV, Gamedev, Motion Graphics und VR. Aufgrund ihres prozeduralen Workflows und ihrer Robustheit, bietet sie Artists in der Industrie eine hohe gestalterische Freiheit und Zuverlässigkeit.⁷⁹ In Houdini ist es ebenfalls möglich Fraktale über die interne Expression Programmiersprache VEX. Diese leistungsstarke Programmiersprache besitzt Teile von C, C++ und RenderMans Shading language und wird in Bereichen wie Rendering, Compositing, Particles, Modeling, Channels und Fur genutzt.⁸⁰ Moritz Schwind von Entagma zeigt, in seinem Tutorial, alle nötigen Details wie man Distance Field Fraktale, wie z.B. die Mandelbrot Menge und Mandelbulb in VEX programmieren und rendern kann. Das folgende Kapitel orientiert sich an dessen Inhalt und Gedankengängen, um einen Einblick in das Potential von Houdini im Zusammenhang mit der Erzeugung von Fraktalen zu bekommen, denn die Fraktalgenerierung in Houdini findet auch Verwendung in der Industrie. Fx Lead Matt Ebb hat VEX in Guardians of the Galaxy Vol. 2 verwendet, dazu mehr im dritten Kapitel.

2.2.1 Houdini VEX Tutorial

Der erste Schritt der Übersetzung von zunächst 2D Mandelbrot Code in Houdini VEX Code ist das Erzeugen eines Grids im *Geo Node*, und Erhöhung dessen Subdivisions, um das Fraktal später darauf abzubilden. Anschließend hängt man einen *pointwrangle Node* dran, in dem nun ein eigenes Programm geschrieben wird. Zunächst legt man den Datentyp der zurückgegebenen Werte der Methode, hier genannt *Mandel()* fest und definiert zwei float Funktionswerte für die Koordinaten $x0$, $y0$ und der Integer Wert *imax* für die maximale Iterationzahl in deren Klammer. In der Methode werden anschließend float Funktionsvariablen initialisiert $x = 0$, $y = 0$, $xnew$, $ynew$, und *int i* für die Iterationsschritte festgelegt und $x = x0$, $y = y0$ definiert. Die for Schleife legt für die Iterationen *i* fest, ob die Punkte zur Mandelbrot Menge gehören oder nicht, je nachdem ob sich die Koordinationswerte bei der Berechnung der Iterationsschritten in Richtung Unendlich entwickeln oder nicht. Wird der Wert also recht groß, wird die for-Schleife verlassen, ist er klein wird er als zugehörig eingefärbt. Die for-Schleife wird so lange wiederholt und *i* um eins erhöht bis der maximal festgelegte Wert für *imax* erreicht ist.⁸¹ Aus den alten *x* und *y* Werten errechnen sich die neuen *xnew*

⁷⁹ Vgl. SideFX

⁸⁰ Vgl. Houdini 17.5 VEX

⁸¹ Vgl. Entagma, 2016

und *ynew* Werte folgendermaßen:
 $x_{new} = x * x - y * y + x_0$; $y_{new} = 2 * x$
 $+ x + y_0$; . In der if Bedingung *if* (x_{new}
 $* x_{new} + y_{new} * y_{new} > 8$) ist die
Wertübersteigung von 8 als
Abbruchbedingung festgelegt und
soll in diesem Fall die Iterationstiefe *i*
wiedergeben, bleibt der Wert unter
8, so wird *imax* zurückgegeben. Um
die Funktion nun verwenden zu
können, müssen den Funktions-
attributen die aktuellen Koordinaten
zugewiesen werden, indem man mit
@P. vor die jeweilige Koordinate *x*, *y*
schreibt. Zudem macht es Sinn eine
Variable für die maximale Anzahl an
Iterationsschritten *maxiter* zu defi-
nieren. In einer if else Methode
werden die Punkte nach dem
Ergebnis der Funktionen schwarz
oder weiß eingefärbt. Entweder der
Wert bewegt sich in Richtung
Unendlich und der Punkt wird weiß
vektor $v@Cd = set(1,1,1)$ eingefärbt oder nicht,
dann bekommt der Pixel die Farbe Schwarz $v@Cd =$
 $set(0,0,0)$. Durch klicken auf *apply* wendet man den
eigenen Code an und die Mandelbrotmenge wird
auf dem Grid angezeigt. Je höher man *maxiter*
wählt, desto mehr Detail bekommt die Abbildung,
diese hängt zusätzlich auch von der Auflösung des
Grids ab.⁸²

VExpression - Pointwrangle Node Mandelbrot Menge

```
//---Functions ---

function int Mandel(float x0, y0; int imax){
    float x=0, y=0, z=0, xnew, ynew;
    int i;

    x = x0;
    y = y0;

    for(i=0; i < imax; i++){
        xnew = x*x - y*y + x0;
        ynew = 2 * x * y + y0;

        if (xnew*xnew + ynew*ynew > 8){
            return(i);
        }

        x = xnew;
        y = ynew;
    }
    return(imax);
}

//--- Main ---

int maxiter = 64;

if (Mandel(@P.x, @P.y, maxiter) < maxiter){
    v@Cd = set(1,1,1);
}
else {
    v@Cd = set(0,0,0);
}
```

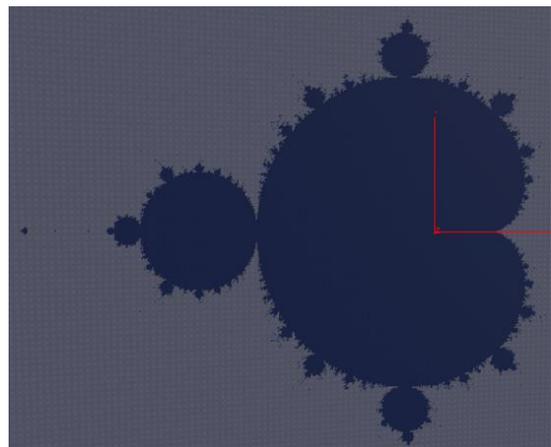


Abb. 43: Rendering der Mandelbrot Menge –
Houdini VEX

⁸² Vgl. Entagma, 2016

Um die dreidimensionale Repräsentation der Mandelbrot Menge zu erhalten, auch genannt Mandelbulb, benötigt man die den Pseudocode aus 1.3.3:

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}$$

$$\theta = \text{atan2}(\sqrt{(x^2 + y^2)}, z)$$

$$\phi = \text{atan2}(y, x)$$

$$\text{newx} = r^n * \sin(\theta * n) * \cos(\phi * n)$$

$$\text{newy} = r^n * \sin(\theta * n) * \sin(\phi * n)$$

$$\text{newz} = r^n * \cos(\theta * n) \quad 83$$

Die für die Mandelbrotmenge erzeugten Methoden müssen nun durch die dritte Koordinate z erweitert werden: $z = 0$, $z = z_0$, z_{new} . Zudem benötigt man nun die float Variablen n , r , θ und ϕ . Die Formeln hierfür können aus dem Pseudocode übernommen werden und in $x_{new} = \text{pow}(r, n) * \sin(\theta * \cos(\phi * n)) + x_0$; umgeschrieben werden, ebenso y_{new} und z_{new} . Außerdem ersetzt man das Grid nun durch ein Volume, da die Ebene nur einen Querschnitt

abbilden würde, aber jetzt ein 3D Objekt dargestellt werden soll. Der Code wird vom *Pointwrangle* in einen *Volumewrangle Node* kopiert. Nun soll die Dichte *density* des Volumes von den Iterationswerten gesteuert werden. Aus diesem Grund ändert man $v@Cd = \text{set}(1,1,1)$; zu $@density = 0.0$ und $v@Cd = \text{set}(0,0,0)$; zu $@density = 1.0$; ⁸⁴

VExpression - Pointwrangle Node Mandelbulb

```
//---Functions ---

function int Mandel(float x0, y0, z0; int imax){
    float x=0, y=0, z=0, xnew, ynew, znew;
    int i;

    x = x0;
    y = y0;
    z = z0;

    for(i=0; i < imax; i++){
        //xnew = x*x - y*y + x0;
        //ynew = 2 * x * y + y0;

        r = sqrt(x*x + y*y + z*z )
        theta = atan2(sqrt(x*x + y*y) , z)
        phi = atan2(y,x)

        xnew = pow(r,n) * sin(theta*n) * cos(phi*n) + x0;
        ynew = pow(r,n) * sin(theta*n) * sin(phi*n) + y0;
        znew = pow(r,n) * cos(theta*n) + z0;

        if (xnew*xnew + ynew*ynew > 8){
            return(i);
        }

        x = xnew;
        y = ynew;
    }
    return(imax);
}

//--- Main ---

int maxiter = 64;

if (Mandel(@P.x, @P.y, @P.z, maxiter) < maxiter){
    @density = 0.0;
}
else {
    @density = 1.0;
}
```

⁸³ Vgl. White, 2009

⁸⁴ Vgl. Entagma, 2016

Um das Fraktal rendern zu können, muss noch ein *convertvdb node* hinzugefügt und die *VDB Class* zu *Convert Fog to SDF* geändert werden. Erhöht man nun die *maxiter* und Auflösung des Volumes bekommt das Fraktal mehr Detail. Möchte man die Form des Fraktals ändern, macht man dies über den Parameter *n*. Um das Fraktal nun korrekt rendern zu können, muss in der Objekt Ebene das *mandel Objekt* ausgewählt werden und in dessen Rendertab drei Parameter hinzugefügt werden. Diese fügt man hinzu indem man auf *Edit Parameter* Interface geht. Hier sucht man links im Render Properties Tab nach *vol* im mantra und dessen Sampling Ordner und wählt *Isosurface* und *Volume Density* aus und fügt beide über Drag and Drop in den Sampling Ordner rechten Spalte ein. Jetzt sind die Parameter dem Render und Sampling Tab hinzugefügt und man ändert die Werte von *Volume Density* von 1 auf 0 und hakt *Volume Isosurface* an und das Fraktal ist fertig zum rendern. Eine Beschleunigung des Renderings kann durch ein manuelles Erstellen einer Bounding Box erzielt werden. Hierzu kopiert man *volume* und *volumewrangel Node* und stellt im *volume* die *Uniform Sampling Divisions* niedriger ein, z.B. auf 40 und erhöht die Size auf z.B. fünf. Zu guter Letzt fügt man einen *volumebound Node* hinzu, in dem das *Bounding value* auf 0.001 gesetzt wird und anschließend einen *peak SOP*, damit wird die Box noch minimal größer ist. Durch die Verbindung der nodes mit dem *volume* und das Abgleichen der *Sampling Divisions* mit denen des *volumes* oder einer Verbindung über einen Expression, umschließt die Bounding Box nur den aktiven Teil des Fraktals. Somit muss der umgebende Teil nicht berechnet werden, das zu einer effizienteren Renderzeit führt.⁸⁵ Diese Methode kann natürlich auch mit anderen Fraktal Formeln umgesetzt werden.

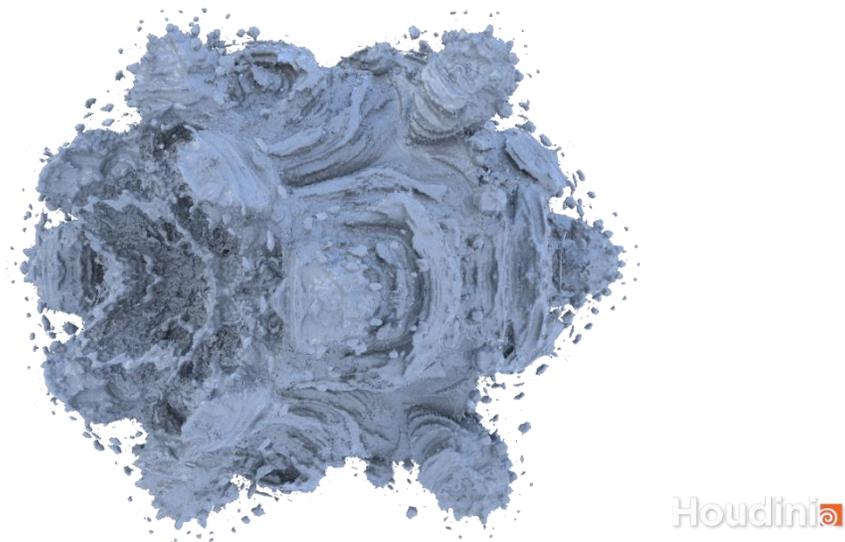


Abb. 44: Rendering Mandelbulb – Houdini VEX

⁸⁵ Vgl. Entagma, 2016

2.2.2 VFX Fractal Toolkit

In naher Zukunft wird das VFX Fractals Toolkit (VFT) von Technical Director Student Juraj Tomori als Open Source Plugin für Houdini verfügbar sein. Er entwickelt dieses im Rahmen seiner Diplomarbeit für den Diplomfilm Strands of Mind, an der Filmakademie Ludwigsburg. Bei dem Film handelt es sich um ein Virtual Reality Musik Video voll mit Fraktalen und abstrakten Formen, der im Laufe des Jahres 2019 veröffentlicht wird. Der bisherige Stand wurde im April 2018 auf der FMX präsentiert, im Moment befindet sich das Toolkit weiterhin in der Bearbeitungsphase. Das VFT ist eine erweiterte Form des in 2.2.1 vorgestellten Vorgehens. Es ist ein node-based Fractal Modeling und Raymarching Tool für Houdini, welches in OpenCL und Python geschrieben wurde. Es ermöglicht die schnelle Generierung und Erforschung einer großen Varianz an Fraktalen innerhalb von Houdini, ist dabei möglichst innovativ und daran orientiert speziell für die VFX Pipelines und deren Ziele, fraktale Lösungen zu bieten, da verfügbare Fraktal Programme zwar eigene Renderer bieten, aber bisher nicht direkt mit VFX Digital Content Creation (DCC) Paketen kompatibel sind. VFT basiert wie Mandelbulb 3D auf Distance Field Repräsentationen fraktaler Oberflächen.⁸⁶ Das Toolkit ist als Grundgerüst konzipiert, dadurch leicht erweiterbar und für jegliche Bedürfnisse anpassbar. Juraj Tomori möchte mit seinem VFT eine schnelle Lösung für fraktale Generierung bieten, aus diesem Grund verwendete er OpenCL für die GPU unterstützte Berechnung und Python für Benutzerinteraktionen. Neue Kompilierungen wurden möglichst reduziert, damit nicht der gesamte Code neu berechnet werden muss, sobald der Anwender einen Parameter ändert. Zudem wurde der Raymarching Prozess optimiert, um ausschließlich die geringste Anzahl an Samples zu benötigen. Außerdem wird nur der sichtbare Bereich der Kamera berechnet oder ein Bereich mit einer Bounding Box festgelegt. Er hat es außerdem in den modernsten DCC-Applikationen integriert, was es einfach macht, es als Setup und Animation in einer VFX Pipeline zu verwenden.⁸⁷

Das VFT basiert auf Distance Estimation und Raymarching.⁸⁸ Raymarching sendet einen Strahl (Ray) durch die Kamera und die DE Funktion wird an diesem Strahl entlang so lange gemessen, bis der DE Wert kleiner als der festgelegte Threshold ist. Dann ist die Oberfläche gefunden, oder das festgelegte Maximum an Schritten (Steps) erreicht. Wenn der Ray die Oberfläche erreicht, werden dort Normalen Vektor und Farbinformationen berechnet.⁸⁹ Die Farben werden abgeleitet von der Orbit Trap Methode. Die Orbitfalle bezeichnet ein geometrisches Objekt, z.B. einen Punkt, Kreuz, Quadrat

86 Vgl. Animationsinstitut

87 Vgl. Tomori, 2018

88 Vgl. Animationsinstitut

89 Vgl. Wong, 2016

oder Kreis, in der komplexen Ebene, die verwendet wird, das Fraktal zu färben. Bei der Verwendung einer Orbitfalle wird, anstelle der Escapetime Methode, der Abstand zwischen der Falle und der Umlaufbahn eines Punktes zur Färbung des Fraktals verwendet. Beim Iterieren eines Punktes entlang seiner Umlaufbahn wird der Abstand zur Bahnfalle von jedem Punkt seiner Umlaufbahn berechnet, dann wird der Mindestabstand verwendet, um den Ursprungspunkt einzufärben. Die Iteration wird für eine feste Anzahl von Schritten fortgesetzt oder bis ein Punkt auf der Umlaufbahn ausreichend an die Falle herankommt, in diesem Fall wird er in die Umlaufbahn „gefangen“ und je nach Abstand gefärbt.⁹⁰

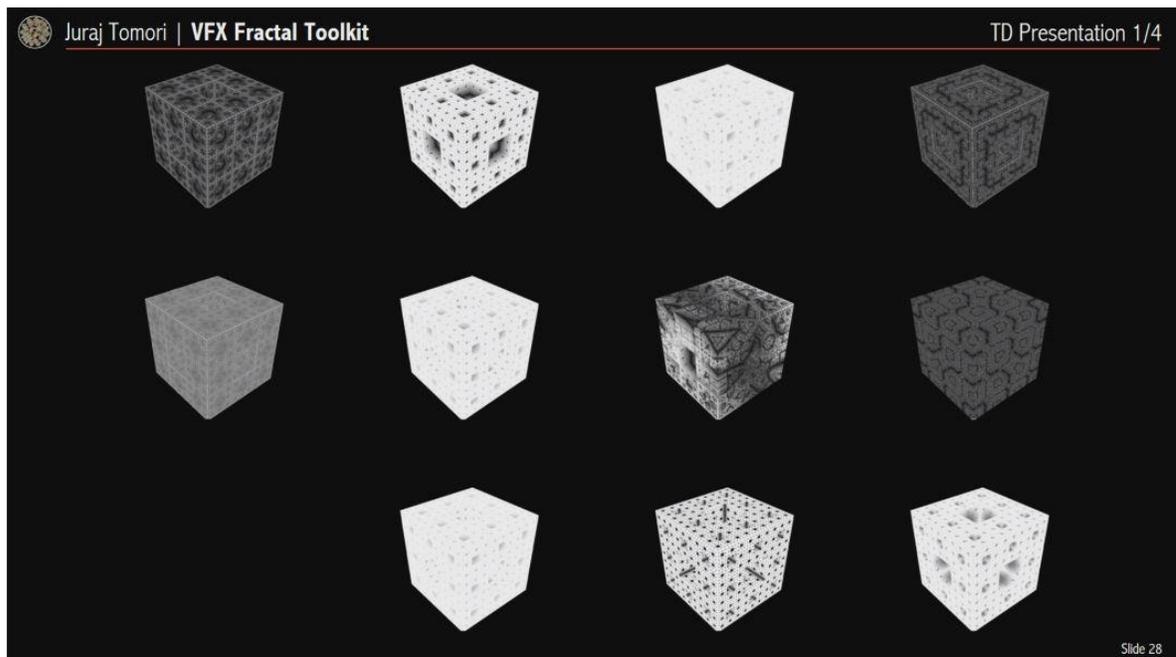


Abb. 45: Shading Optionen Stand April 2018 – VFX Fractal Toolkit

Der Aufbau in Houdini ist simple. Die oberen Nodes repräsentieren die jeweiligen Fraktale mit verschiedenen Parametern wie z.B. Weight, Julia mode, Julia coords, Power und der untere Node Rendering und Shading Parameter. Jedes Fraktal hat einen Julia Mode, bei dem mit Julia coords eine Koordinate bestimmt werden kann, an der das Julia Set berechnet werden soll. Dadurch bietet es Zugang zu einer hohen Varianz an Fraktalen, deren Parameter sogar animiert werden können.⁹¹

90 Vgl. Christersson, 2015

91 Vgl. Tomori, 2018

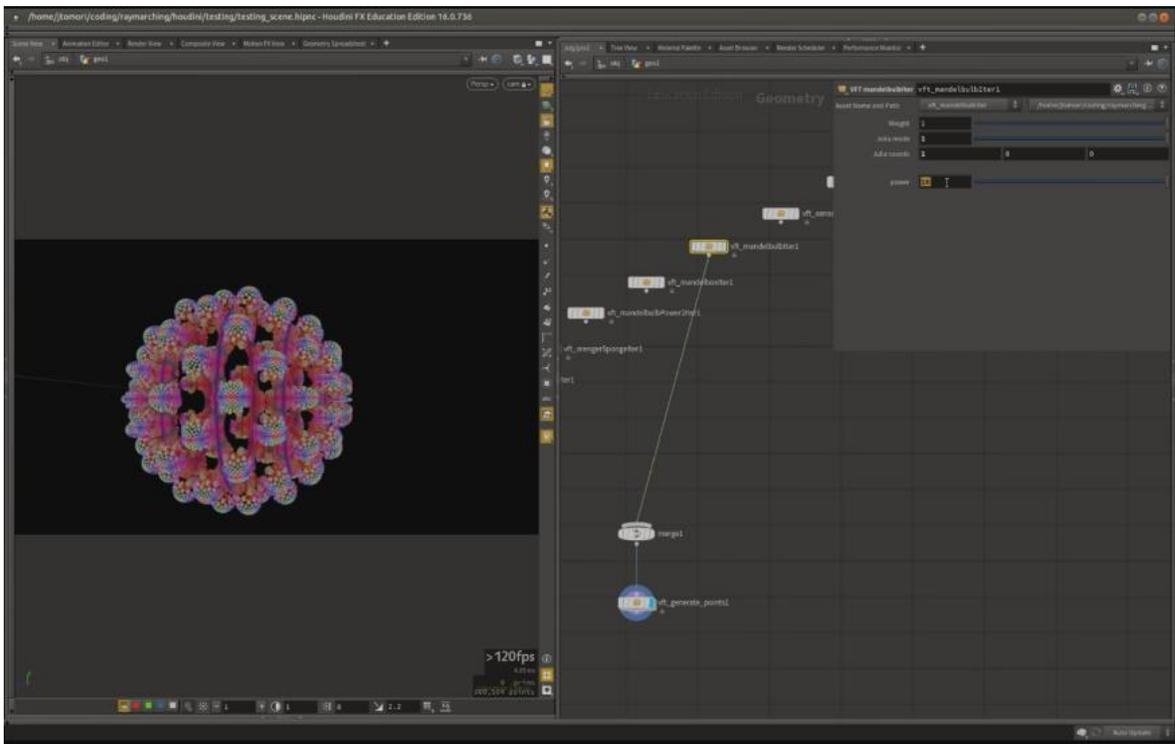


Abb. 47: Darstellung in Houdini – VFX Fractal Toolkit

Das VFT erlaubt das Kombinieren von mehreren Fraktalen durch einen *Merge Node*, hier hängt der Kombinationsmodus von der Reihenfolge ab. Es können Escapetime Fraktale miteinander, oder mit Julia Modes anderer Fraktale kombiniert werden. Eine Kombination bezeichnet man als Hybriden. Des Weiteren können Boolean Operationen verwendet werden und die Fraktale vereinen, schneiden oder subtrahieren. Das wiederum geht auch mit Primitiven wie sphere, box, torus, cones, und mehr.⁹²

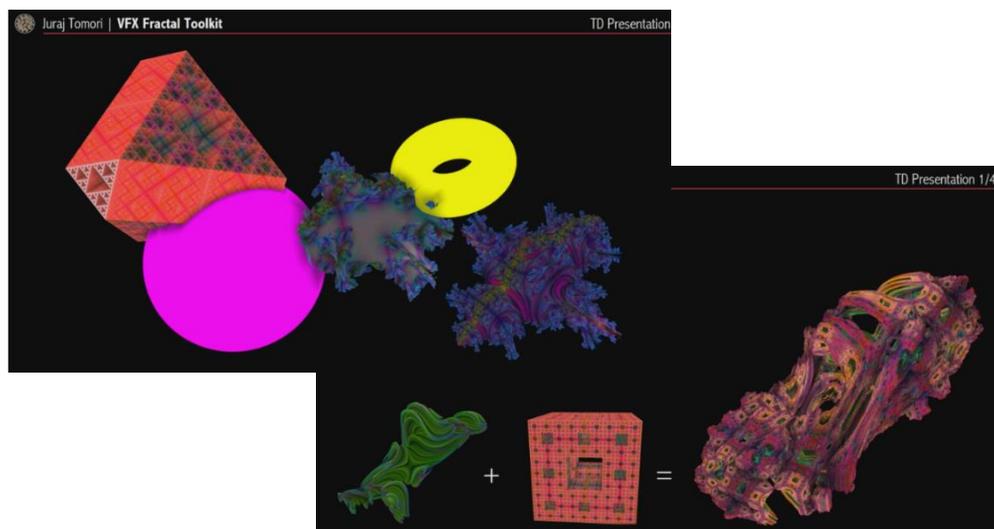


Abb. 46: Kombination von Fraktalen miteinander oder mit Primitiven

⁹² Vgl. Tomori, 2018

Das Fraktal kann von jedem Renderer gerendert werden, denn als Output bekommt man mehrere Color Channels und Normalen, die in DCC Anwendungen verwendet werden können. Geplant als zukünftige Exportmöglichkeiten sind VFX freundliche Point Clouds oder VDBs. Das Tool soll flexibel und leistungsstark sein und es dem Benutzer ermöglichen beliebige Fraktal Szenen zusammenzubauen und zu animieren. Der node based Workflow ermöglicht es intuitiv zu arbeiten und bietet eine akkurate und übersichtliche visuelle Darstellung des fraktalen Aufbaus. Für die Nutzung sind Programmierkenntnisse nicht erforderlich, da die Szenen aus den einfach anzuwendenden Nodes aufgebaut sind. Eigene Erweiterungen oder Änderungen durch Programmierung sind aber möglich, falls sie gewünscht sind.⁹³

2.2.3 Flyknit – ManvsMachine

In einem Interview stellt Simon Holmedal, Motion Designer, Technical Director und 3D Artist von ManvsMachine, die unzähligen Möglichkeiten von Houdini, im Zusammenhang mit Fraktalen, dar. ManvsMachine nutze Fraktale für den Nike Flyknit Werbespot, um darin zu zeigen, wie schützend, leicht und dennoch stark und präzise der Nike Flyknit Schuh ist. Es handelt sich hierbei zwar nicht um eine VFX Produktion, dennoch ist sie eine erwähnenswerte Produktion, da sie die Möglichkeiten und Vorteile der Benutzung Houdinis, für fraktale Inhalte, aufzeigt. Simon hat viele Fractal Algorithms und repeating patterns geschrieben und daraus hunderte Fraktale erstellt. Deren Komplexität animierbar gemacht, um herauszufinden, ob eher komplexe oder simple Fraktale zu dem Film passen. Jedoch wollte Nike später mehr Fokus auf den Aufbau der Oberflächenstruktur, anstelle von abstrakten Strukturen.⁹⁴

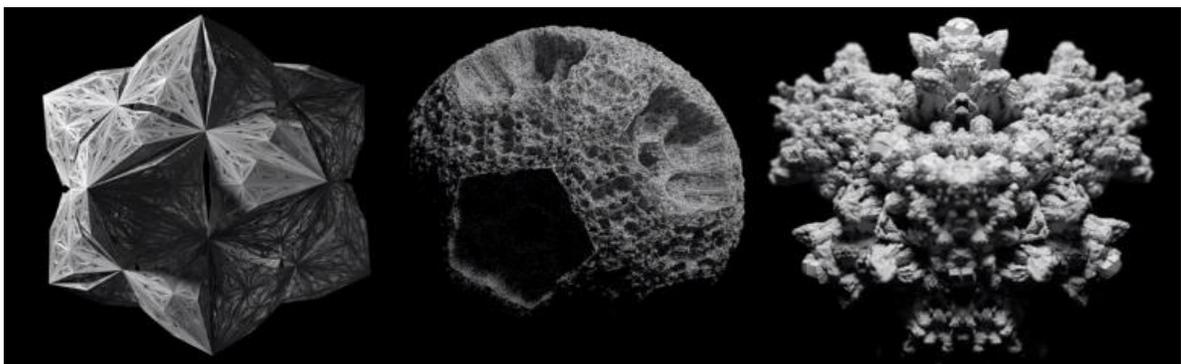


Abb. 48: Research und Development Phase Nike Flyknit Teil 1 – ManvsMachine

⁹³ Vgl. Juray Tomori, 2018

⁹⁴ Vgl. Holmedal, 2017

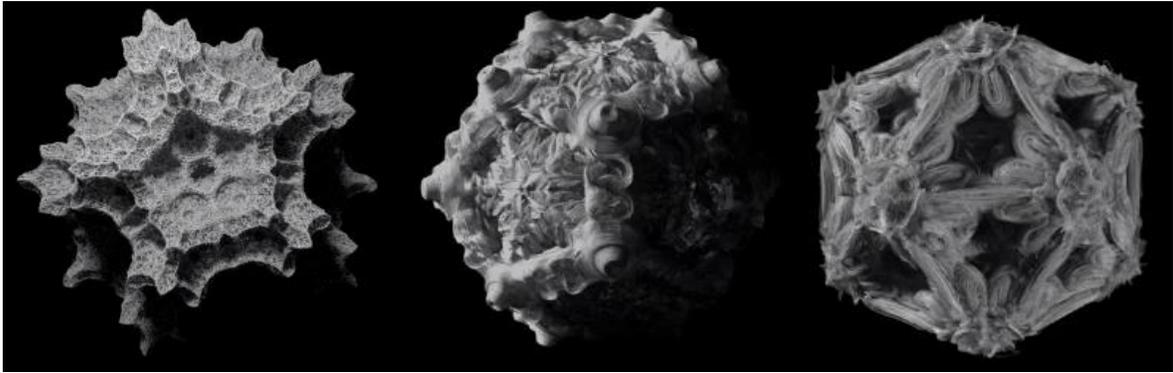


Abb. 49 : Research und Development Phase Nike Flyknit Teil 2 – ManvsMachine

“Houdini is much more like a discovery, so you don’t really get bored of the ideas, that you are developing, because a tweak will change the entire outcome of whatever you are doing.”⁹⁵

Houdini bietet den Vorteil, dass auch späte Veränderungswünsche des Kunden, leicht vorgenommen werden können, ohne nochmal von vorne beginnen zu müssen. ManvsMachine machte es möglich die Fraktale auf simple Geometrie anzuwenden. Somit konnte die Basisgeometrie später auf Wunsch zu einem Schuh geändert werden. Auch ältere Ideen können, durch den prozeduralen Aufbau, mit neuen Techniken und Ideen kombiniert, sowie daraus eigene Tools entwickelt werden.⁹⁶



Abb. 50: Ausschnitte aus Nike Flyknit - ManvsMachine

⁹⁵ Holmedal, 2017

⁹⁶ Vgl. Holmedal, 2017

3. Einsatzgebiete von Fraktalen in VFX Produktionen

3.1 Guardians of the Galaxy Vol. 2

Marvel Studios präsentierte, im April 2017, die Welt der Guardians of the Galaxy Vol. 2, geschrieben und unter Regie von James Gunn. Die „Guardians Of The Galaxy“ sollen ein Monster bekämpfen, doch Rocket, kann sich mal wieder nicht beherrschen und klaut nach vollbrachter Aufgabe, eine mächtige Energiequelle. Daraufhin werden die Guardians von den Ravagers gejagt, um das Entwendete zurückzuholen. Sie werden bald voneinander getrennt und treffen auf verschiedene und teilweise fraktale Welten. Animal Logic, Trixter, Method Studios und Weta Digital haben alle eine zentrale Rolle bei der Benutzung von Fraktalen gespielt.

3.1.1 Animal Logic

Paul Butterworth, Animal Logic's Visual Effects Supervisor und CG Supervisor Richard Sutherland, arbeiteten, mit einer kleinen VFX Einheit, mit ca. 70 Leuten, an über 150 Shots mit 147 im finalen Filmschnitt.⁹⁷ Animal Logic übernahm die meisten innen Szenen des Palastes, in denen Ego seine Ursprünge erklärt und seinen wahren, böartigen Zweck enthüllt. Außerdem kümmerten sie sich um die Gartenszene, in der Quill lernt seine himmlische Energie herbei zu beschwören und mit Ego Ball spielt.⁹⁸

Die Innenausstattung sollte wirken, als wäre sie von einer menschenähnlichen, jedoch künstlichen Intelligenz, basierend auf fraktaler Mathematik gefertigt worden, mit Böden und Wänden, aber gleichzeitig enorm komplex. Sie sollten etwas noch nie zuvor Gesehenes erschaffen und einigten sich auf einen fraktalen Look der Architektur. Die Innenausstattung des Palastes musste sich stark an dem Concept Art, von Marvels Production Designers, orientieren.⁹⁹ Als Grundlage, für den Entwurf, galt die fraktale Arbeit des, amerikanischen Fractal Concept Artists, Hal Tenny. Er war in den Entstehungs- und Designprozess des Palasts direkt involviert und stellte Animal Logic einen Teil seiner fraktalen Daten zur Verfügung. Die Daten konnten allerdings nicht direkt benutzt werden, sondern wurden stattdessen von dem Concept Art Team verwendet, um Bildausschnitte zu finden, die zusammengesetzt, die Dynamik und Impression besaßen, die sie rüberbringen wollten. Die

⁹⁷ Vgl. Ebb, 2017

⁹⁸ Vgl. Frei, 2017

⁹⁹ Vgl. Frei, 2017

Schwierigkeit bestand darin, dass Fraktale eher für die Erschaffung von fremden, organischen Planeten geeignet sind und weniger für die hier benötigten statischen Strukturen. Fraktale sind sehr schöne und abstrakte Gebilde, das Problem ist allerdings, dass sie sich, in Bezug des Art Directings, nicht viel sagen lassen. Schon kleine Veränderungen in der des Fraktals zu Grunde liegenden Mathematik, haben immense Auswirkungen auf das Aussehen und die Form des Fraktals.

"[The thing with fractals is that its chaos - and that's the point - you have a few little numbers that control how it works.. you can deploy them and get something you could never have thought of yourself, but you can't easily control them - they do what they are going to do." ¹⁰⁰



Abb. 51: Innenausstattung Egos Palast - Guardians of the Galaxy Vol. 2

Matt Ebb, FX Lead, hat mehrere Wochen damit verbracht, zufällige Posts in fraktalen Foren zu studieren, um dort Fraktale und Entwicklungstools zu untersuchen und Code herauszuschreiben wo immer er einen finden konnte. Er entwickelte daraus einen modularen, interaktiven Fraktal Visualisierer innerhalb Houdinis, der fraktale Formeln in VEX Code übersetzte. "This was a really important step," erklärt Richard Sutherland, CG Supervisor, "we could now easily look for forms we wanted." Diese Arbeit erweiterte sich zu einer vollständigen Pipeline für die Erstellung verwendbarer Fraktalstücke. Der Vorteil in seinem Visualizer liegt darin, dass immer nur das Fraktalstück sichtbar wird, das sich gerade in der jeweiligen Bounding Box befindet. Diese Box kann von den Artists beliebig verschoben und skaliert werden, um den passenden Ausschnitt des Fraktals zu finden.¹⁰¹ Die Artists konnten somit komplizierte fraktale Geometrien heraussuchen, extrahieren,

¹⁰⁰ Seymour GotG2, 2017

¹⁰¹ Vgl. Seymour GotG2, 2017

manipulieren und für die Konstruktion der Palastarchitektur nutzen.¹⁰² Jetzt hatte man also die Geometrie, jedoch handelte es sich hierbei nicht um normale Polygone, die texturiert, ausgeleuchtet und traditionell gerendert werden können. Ebb nutzte außerdem Sphere-Tracing, um die fraktale Oberfläche

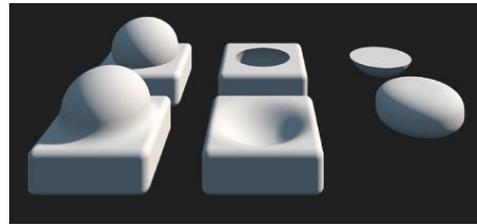


Abb. 52: Sphere-Tracing Prinzip

effizient vor der Kamera auszuschneiden und somit einen freien Blick auf das Fraktal zu ermöglichen, wie in der Abbildung zu sehen.¹⁰³ Anstatt Pixel zu rendern, erzeugte sein entwickeltes Tool eine dichte Punktwolke als Houdini-Geometrie, wobei Daten der Normalen, Farbe, Okklusion und andere Fraktal spezifische Attribute, in jedem Punkt gespeichert wurden.¹⁰⁴ Als Output bekam man eine enorme Point Cloud, die je nach Kamera Öffnungswinkel, ein sichtbares Raster von Pixeln, mit gewünschter Dichte erzeugt, das dann in die Szene projiziert wird. In anderen Worten ist der Effekt so etwas wie eine tiefe Bildmatte, die von der Kamera projiziert wird und im 3D – Raum endet. Wann immer sich die Kamera bewegt, projiziert sich diese erneut. Dies ermöglichte es den Artists die fraktalen Welten in beliebigem Maßstab zu erforschen und Teile herauszusuchen, die man



Abb. 53: Punktwolke aus Max Ebb's Tool

weiterverwenden kann.¹⁰⁵

Es zeigte sich schnell, dass diese Technik nicht nur zur Visualisierung, sondern auch zur Generierung von Endmodellen diente. Im Modelling führte Jonathan Ravagnani sein Artist Team vom Erstellen der Grund Architektur, über das Erzeugen von Low Resolution Bounding – Objekten, zur Begrenzung der “Fraktalisierung”, bis hin zur high-resolution Geometrie für das Gerüst, um die fraktalen Elemente herum. Die meisten fraktalen Objekte besaßen zwischen zehn und 100 Millionen Punkte. Da nur die äußerlich sichtbaren Oberflächen ausgewertet wurden, konnte ein hoher Detailgrad mit

¹⁰² Vgl. Ebb, 2017

¹⁰³ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹⁰⁴ Vgl. Frei, 2017

¹⁰⁵ Vgl. Seymour GotG2, 2017

einem niedrigem Geschwindigkeits- und Speicherbudget erreicht werden. Die final generierte Punktwolke konnte, mit allen Standard Tools aus Houdini und mit einem hohen Anteil kreativer Freiheit manipuliert werden. Einige Beispiele hierfür sind: carved (geschnitzt), warped (verzogen), dupliziert und komplett neu angeordnet. Das Team, das für die Oberflächen zuständig war, nutzte die fraktalen Daten, die in den Punktwolken gespeichert waren, um weitere Attribute wie Dichte, Okklusion und Krümmung, um die Shader Parameter zu steuern.¹⁰⁶ Alle Versuche zum Umwandeln der Pointcloud zu normaler polygonaler Geometrie über Skinning, Meshing oder Volume Sampling, scheiterten. Die Ergebnisse sahen einfach nicht komplex genug aus. Zusätzlich gab es Probleme mit der Speicherplatzkapazität, denn Fraktale haben keine solide Form, stattdessen bestehen sie aus unendlich vielen Netzen, die im Inneren liegen und niemals gesehen werden, dadurch steigt die Größe der Datei ins Unglaubliche an. Sutherland kam auf die Idee die Punktwolken für das finale Rendering so dicht zu machen, dass sie wirke, als wären die Elemente aus einer festen Geometrie. Das Rendering sah allerdings sehr rau aus, da sich eine Punktwolke mit dieser immensen Anzahl an Punkten verhält, wie ein Körper mit sehr hoher Rauigkeitseinstellung. Das kompensierte Animal Logic mit erarbeiteten Wegen der Optimierung der Oberflächennormalen und ihrem hauseigenen Renderer Glimpse.¹⁰⁷ Die Punktwolke wurde mit Geometrie verbunden und als Millionen dicht gepackte Kugeln gerendert. Dabei hat die gespeicherte Fraktal Normale, die Shading Normale der Kugel, überschrieben, um den Eindruck eines fraktalen Körpers zu erwecken. Dieses Verfahren war sehr effektiv und viel schneller als Workarounds wie die Geometrie zu konvertieren und zu cleanen.¹⁰⁸ Der Renderer hat mit viel instanzierter Geometrie zu tun und mit Point Cloud Containern, innerhalb der Säulen, welche wiederum bei Drehung spezielle Renderwinkel zu den fraktalen Punktwolken, besitzen.¹⁰⁹ Die Instanzierung der fraktalen Punktwolken in Glimpse wurde hauptsächlich genutzt, um den Speicherverbrauch zu begrenzen. Eine der finalen Mengen beinhaltete 19 fraktale Mengenstücke mit ganzen 646 Millionen Punkten, ohne Instanzierung wären es 3,35 Milliarden gewesen. Die Beleuchtung der Szene erfolgte über verschiedene Lichtgruppen, unter anderem eine Innen-beleuchtung der fraktalen Säulen.¹¹⁰ Die Punktwolke wird für jeden Frame neu aufgebaut, d.h. sie muss ständig neu berechnet werden, sobald sich der Kamerawinkel ändert. Das Team kündigt an, dass die Schatten nicht korrekt abgebildet werden, aber das fällt kaum auf.¹¹¹

¹⁰⁶ Vgl. Frei, 2017

¹⁰⁷ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹⁰⁸ Vgl. Frei, 2017

¹⁰⁹ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹¹⁰ Vgl. Frei, 2017

¹¹¹ Vgl. Seymour GotG2, 2017



Abb. 54: Gerenderte Säulen als dicht gepackte Kugeln

Animal Logics Auftrag erweiterte sich, um die Erstellung fraktaler Pflanzen eines außerirdischen Gartens, in dem Ego und Peter Ball spielen. Das zuvor entwickelte Tool, findet hier erneut Verwendung bei der Erschaffung fraktaler Pflanzen.¹¹² Sie bauten eine große Artenvielfalt, an fraktaler Formen, die man als glaubwürdige Elemente auf einem fremden Planeten verwenden konnte und gut zur restlichen Pflanzenwelt passte, die Method Studios erstellt hatte.

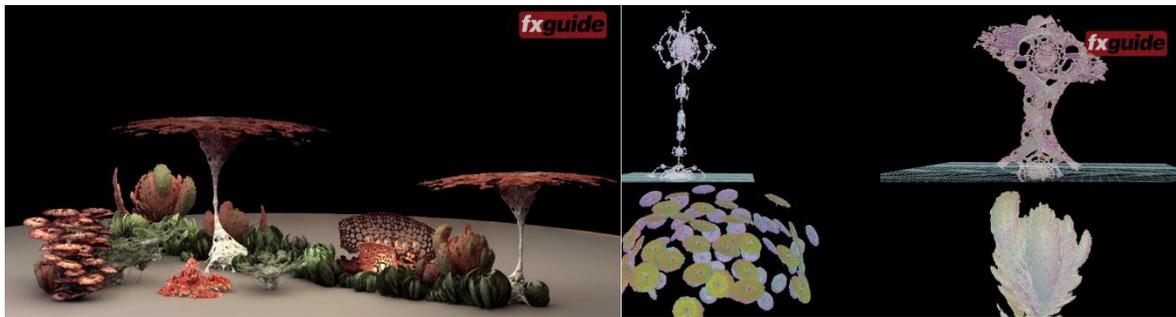


Abb. 55: Fraktale Pflanzen

Ursprünglich war die Vorgabe die Pflanzen rot zu gestalten. Butterworth wollte die Szene natürlich halten, also entschied er sich die Pflanzen zum Test grün zu gestalten, um zu testen, ob die Pflanzen funktionieren und sich natürlich einfügten. Die Produktion verliebte sich jedoch in die grünen Pflanzen, also gab es nun eine Kombination aus grün und rot. Bei dem blauen Energieball von Quill kam zunächst auch die Idee auf hierfür Fraktale zu verwenden, um den exotischen Look aufrechtzuerhalten, allerdings entschied man sich dann doch dagegen.¹¹³

¹¹² Vgl. Ebb, 2017

¹¹³ Vgl. Frei, 2017



Abb. 56: Egos Garten – Außenbereich des Palastes

3.1.2 Method Studios

Method Studios wurde damit beauftragt, das beeindruckende Äußere von Egos Planeten zu entwerfen, die das Publikum mit der von Fraktalen kontrollierten und doch antiken Welt vertraut machen soll. Die erhielten kreative Vorgaben des Art Departements und erweiterten diese durch die Verwendung fraktaler Mathematik als Grundlage. Nur vier Personen, unter der Leitung von Art Director Ming Pan, setzen den Look fest. Sie erweiterten die Farbpalette um leuchtendes grün, blaugrün, gelb und brachten den Look in Einklang mit Animal Logics Arbeit.¹¹⁴



Abb. 57: Landschaft Egos Planet

¹¹⁴ Vgl. Seymour Got2, 2017

Die Höhlenumgebung um Baby Groot und Rocket wurde, von Method, sehr geometrisch konzipiert und besteht aus einem Mix des Mandelbulb und Apollonischem Dichtungsfraktal. Wenn man den Boden und die Wände genau betrachtet, sieht man, dass die Apollonische Dichtungsfraktale zusätzlich mit traditionellem Gesteinsmaterial vermischt wurden und diese Formen auf der Oberfläche sehr oft vertreten sind.¹¹⁵



Abb. 58: Mandelbulb und Apollonisches Fraktal als Höhlenoberfläche

3.1.3 Trixter

Trixter arbeitete an den Waldszenen, dem Schneeplanet IronLotus und der Sequenz bei der Rocket, Groot und Yondu durch eine Vielzahl an Environments springen. Bei der Sprungsequenz war der Auftrag sich verschiedenste Hintergründe für verrückte Welten auszudenken. Dabei hat sich Trixters Concept Artist, Markus Brackelmann, unter Anderem, Fraktalen gewidmet und diese als eine Grundlage für seine Designs gewählt, da sie unheimlich hilfreich bei der Erstellung unterschiedlichster Hintergründe waren. Dabei ließ er sich von der Plattform Deviantart und dem Künstler Gutralin inspirieren.¹¹⁶



Abb. 59: Concept Art Sprungsequenz Teil 1 - Brackelmann

¹¹⁵ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹¹⁶ Vgl. Brackelmann, 2019, S.1



Abb. 60: Concept Art Sprungsequenz Teil 2 - Brackelmann

Bei seiner Research Phase stieß er auf das Programm Mandelbulb 3D, das er später zur Erstellung dreidimensionaler Fraktale verwendete. Für zweidimensionale Arbeiten nutzte er die kostenlose Software Apophysis. Diese verwendete er oft für die Sprung Sequenz, aber auch für stellare Nebel.¹¹⁷

„Oftmals war es schwer die Geometrie, aus oben genannter Software, zu exportieren. Ich war somit auf den internen Renderer angewiesen. In Zukunft würde ich verstärkt daran arbeiten die Geometrie in anderen Softwares weiter zu bearbeiten.“¹¹⁸



Abb. 61: Concept Art Sprungsequenz Teil 3 - Brackelmann

Keines seiner fraktalen Designs wurde bei Guardians of the Galaxy Vol. 2. für den fertigen Film verwendet, allerdings haben es andere seiner Concept Art Arbeiten für Hintergründe, die teils direkt als DMP weitergegeben wurden und Assets, wie Käfer oder Props, auf die Leinwand geschafft.¹¹⁹

¹¹⁷ Vgl. Brackelmann, 2019, S. 1

¹¹⁸ Brackelmann, 2019, S. 1

¹¹⁹ Vgl. Brackelmann, 2019, S. 2

3.1.4 Weta Digital

Guy Williams war der Visual Effects Supervisor bei Weta Digital, in Neuseeland und arbeitete zusammen mit den Produktionsleitern Kevin Smith, Daniel Macarin und Charlie Tait.¹²⁰ 490 Artists finalisierten rund 600 Shots, von denen 530 im Film zu sehen waren. Rund 80 Prozent davon spielten im Untergrund und im dritten Akt. Die Arbeit für Weta begann, wenn Rockets Schiff in Egos Palast abstürzt, die anschließenden Ego- und Palast Shots wurden von ihnen umgesetzt. Sie bekamen Assets und Geometrie für den Palast von Animal Logic und mussten damit nahtlos weitermachen. Zunächst dachten sie, sie bekamen LIDAR Daten geschickt oder es handle sich um einen besonderen Stil aus Pailletten. Sie benötigten etwas Zeit, um die Arbeitsweise von Animal Logic nachzuvollziehen.¹²¹ Als Vorlage diente auch hier die Arbeit von Hal Tenny, denn die Filmemacher mochten seine Arbeiten sehr und wollten basierend darauf die Welt aufgebaut haben. Die ursprüngliche Idee von Weta war es, einen kompletten Planeten aus einem low-resolution Fraktal zu bauen, das Lighting Artists und Animatoren beliebig kontrollieren können. Jedoch konnte der benötigte Code in der kurzen Zeit nicht geschrieben werden.¹²² Weta nutzte jedoch andere Kamerapositionen als Animal Logic und da die Modelle kameraabhängig sind, waren die Punktwolken an diesen Stellen nur spärlich in ihrer Dichte. Nach einem Gespräch mit Animal Logic verstanden sie den Ansatz, da sie selbst schon vergleichbar mit Punktwolken gearbeitet hatten. Sie konnten matchen, was Animal Logic gemacht hat, allerdings mussten sie, an einigen Stellen, die Punktwolken auseinanderbrechen, da das Schiff im Film in den Palast einschlägt.

Für den Hohlraum von Egos Planet war das Sierpinski Dreieck der Ausgangspunkt. Sie begannen allerdings nicht mit einem Dreieck, sondern einem Kreis, bzw. im dreidimensionalen mit einer Kugel. Die mathematische Herangehensweise ist in Kapitel 1.1.2 bereits erklärt worden. Bei Weta handelt es sich um eine Kugel, mit vielen Kugeln innerhalb, die sich selbst rekursiv ausschneiden. Dadurch erhält man eine turmartige Struktur, die bereits sehr nah an die Vorstellung der Produktion herankam. Das Problem war allerdings wieder einmal, dass es unmöglich war die Fraktale zu kontrollieren. Weta ließ die erste Phase der Iteration aus und begannen stattdessen mit einem von Hand gemodelten, bzw. durch gewählte kurven bestimmte Geometrie. Jede weitere fraktale Phase startet jetzt mit der richtigen Basis Form. Sie bogen Fraktale entlang oder innerhalb begrenzter Formen, die bestimmbar waren. Bereits nach drei Iterationen des Ausschneidens, bekam Weta ein

¹²⁰ Vgl. Frei Weta, 2017

¹²¹ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹²² Vgl. Frei Weta, 2017

schönes, aber auch komplexes Ergebnis, vergleichbar mit dieser Abbildung:¹²³

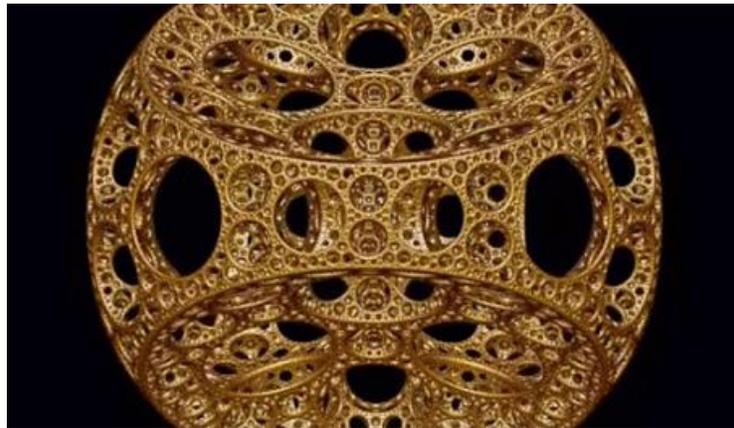


Abb. 62: Sierpinski Fraktal mit Kugeln generiert

Um dem Ganzen mehr Detail hinzuzufügen, wollte Weta Mandelbulb 3D nutzen und damit richtige Sierpinski Fraktale generieren. Allerdings bieten dessen Ausgabemöglichkeiten keinen richtigen Geometrie Export an. Während die Bilder auf dem Bildschirm großartig aussahen, gab es keine Möglichkeit diese für die Modeling und Rendering Pipeline nutzbar zu machen. Sie versuchten wochenlang die Fraktale zu meshen, jedoch gleichzeitig ihren Detailgrad zu behalten. Alle Arbeit war vergebens, trotz der besten Rechner hatte alles zu wenig Detail und Auflösung. Die Kanten waren nicht so scharf wie sie in Mandelbulb zu sehen waren und die Objekte sahen eher aus wie geschmolzenes Wachs. Pascal Rambuit hatte die geniale Idee ein Mandelbulb Rendering mit einer Photogrammetrie Software zu testen und lieferte dadurch perfekte Ergebnisse. Das Fraktal war nun sehr gut in der Pipeline verwendbar, besaß eine hohe Qualität und Detailgrad.¹²⁴ Das reichte allerdings noch nicht für den finalen Film, da in dem acht Kilometer großen Set, im Hohlraum, die Handlung an verschiedenen Stellen stattfindet und sich die Kamera ändert. Es mussten sehr viele Ausschnitte Hero Level Qualität besitzen und extra vorbereitet werden, damit es realistisch und organisch aussieht. Um das Bild zu finalisieren, brachen sie ein paar Formen auf und fügten über eine Noise Funktion einen künstlerisch festgelegten Grad an Abnutzung hinzu, damit das Ergebnis nicht so clean aussah. Sondern eher wie eine zehntausend Jahre alte Welt, die wirklich ein lebendiger Planet sein und existieren könnte.¹²⁵

¹²³ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹²⁴ Vgl. Seymour GotG2, 2017

¹²⁵ Vgl. Frei Weta, 2017



Abb. 63: Sierpinski Fraktal im Film Teil 1

Die Beleuchtung war eine Herausforderung, da sich das Fraktal insgesamt in einer Kugel befindet und somit einen geschlossenen Raum bildet. Vorstellen kann man sich das, als würde man einen Raum beleuchten, der aber keine Lampen besitzt. Sie lösten das mit versteckten Lichtern in Wänden, die allesamt aber nicht so hell waren wie die Sonne. Ausgeleuchtet wurden die Szenen mit komplexen atmosphärischen Lichtern und Area Lights. Durch das Einsetzen der Atmosphäre "transportierten" sie die Lichtstrahlen weiter nach innen und hellten den Innenraum damit noch mehr auf. Am Ende kamen, nur für den Hohlraum, über 361 Milliarden wieder instanziierte Polygone in dem Rendering zusammen.¹²⁶



Abb. 64: Sierpinski Fraktal im Film Teil 2

¹²⁶ Vgl. Frei Weta, 2017

Laut Guy Williams war das Nachwachsen und die Verwandlung Egos eine der größten technischen Herausforderungen, denn damit folgte eine weitere Szene mit der Erstellung von Fraktalen. Sie recherchierten, wie sie einen menschlichen Körper zerstören können, dabei aber gleichzeitig jugendfrei bleiben. Sie endeten bei dem fraktalen Motiv, da sie da trotzdem Teile vom Fleisch und Knochen zeigen, es aber zeitgleich sauber halten konnten. Sie zerstörten virtuell einen menschlichen Körper und entfernten alle Bruchstücke und füllten die Kanten anschließend über eine fraktale Wachstumssimulation wieder auf. Diese haben sie gemeshed und in renderbare Oberflächen umgewandelt, damit es aussieht als würde die Haut in einer fraktalen Art wieder zusammenwachsen.¹²⁷



Abb. 65: Verwandlung Ego mit fraktalen Strukturen

¹²⁷ Vgl. Frei Weta, 2017

3.2 Doctor Strange

“Opinions about the plot, characterization, and racial politics of Doctor Strange have been mixed, but one point has been more or less unanimous among critics: It’s freaking gorgeous. [...] Though Benedict Cumberbatch may be playing the titular mage, the wizard at the postproduction keyboard was production visual-effects supervisor Stephane Ceretti.”¹²⁸

Doctor Strange wird als einer der visuell atemberaubendsten Visual-Effects Filme aller Zeiten bezeichnet. Die Nutzung von Fraktalen spielte bei der Produktion eine große Rolle und führte zu einem noch nie da gewesenen, einzigartigen Look.¹²⁹ Die Marvel Produktion Doctor Strange handelt von dem erfolgreichen Chirurg Strange, dessen Karriere aufgrund eines schweren Autounfalls abrupt endete. Auf seiner unermüdlichen Reise auf der Suche nach einer Möglichkeit seine Hände zu heilen, trifft er auf einen Tempel in Kathmandu, wird dort in die magische Welt hineingeführt und erlernt die schwarze Magie.¹³⁰ Regisseur Derrickson und VFX-Supervisor Ceretti ließen sich von mehreren Quellen inspirieren. Die physischen Unmöglichkeiten von M.C. Eschers Zeichnungen, die erzwungene Perspektive in dem Spiel Monument Valley, die City-Bending Szene in Inception und die mathematische psychedelische Eigenschaft von Fraktalen, um nur einige zu nennen. Bereits im Jahr 1963 fanden sich in den Doctor Strange Comics Zeichnungen von Steve Ditko, Farben und Formen, die aussahen wie die damals noch gar nicht bekannten Fraktale.¹³¹ Fraktale wurden in der London-, Cathedral- und New Yorker Sanctum-Szene, sowie in verschiedenen Kampf-Szenen eingesetzt. Die Idee war, dass die Materie, wenn die Zeloten den Raum beugen, mit Hilfe der Mandelbrotmuster, gebrochen und gedehnt wird. Die größte Herausforderung bestand darin, diese 3D-Fraktale auf kontrollierbare Weise zu texturieren und animieren. Alle Dienstleister mussten sich auf verschiedensten Ebenen damit auseinandersetzen und miteinander abstimmen.¹³² Softwares, die in der Produktion verwendet wurden, waren Maya und Houdini. Ceretti arbeitete in Zusammenarbeit mit Marvel, des Weiteren gab es vier VFX Dienstleister: Luma Pictures, Framestore, Method Studio und ILM.¹³³

¹²⁸ Riesman, 2016

¹²⁹ Vgl. Awn, 2016:

¹³⁰ Vgl. Seymour Strange, 2016

¹³¹ Vgl. Riesman, 2016

¹³² Vgl. Frei Strange, 2016

¹³³ Vgl. Fawcett, 2016

3.2.1 Luma Pictures

Luma Pictures kreierte mit weniger als 200 Personen und der VFX Supervision von Vince Cirelli, verschiedene Schlüsselszenen des Films. Darunter die Eröffnungssequenz, in der die Zeloten von der Ältesten bekämpft werden, London kaleidoskopiert, in sich zusammenfaltet und Mandelbrote in verrückte Reihen sich bewegender Formen übergehen. Die nächste Szene war die Transformation der Kathedrale, in der Kaecilius die Macht von Dormammu beschwört und die finale Sequenz, an der Luma arbeitete, war die dunkle Dimension.¹³⁴ Um seine Visionen umzusetzen und die VFX Shots absolut verblüffend zu gestalten, entwickelte das Luma-Team maßgeschneiderte Tools und teilen manche davon sogar mit der Community.¹³⁵

"With what we needed to do we needed to art direct the speed, the movement and look at all of these 'fractals'," says Cirelli. "We created tools that allowed us to visualise the scenes inside the viewport of Maya. We developed tools for volume so we could sculpt what volumes the fractals would take as the building stretched and turned." ¹³⁶



Abb. 66: Zusammenfallen der Gebäude - London Szene

¹³⁴ Vgl. Frei Luma, 2016

¹³⁵ Vgl. Seymour Luma, 2016

¹³⁶ Seymour Luma, 2016

Für die Londoner Sequenz entwickelte Luma eigene Anwendungen, damit sie einerseits das massive Rendering von dichten und komplexen Fraktalen mit den entsprechenden Texturen bewältigen und andererseits die Architektur durch die Fraktale ergänzen konnten. Das Team durchlief hunderte von fraktalen Designs und mathematischen Gleichungen, um das gewünschte Endergebnis zu erzielen.¹³⁷ Diese Arbeit basiert auf der Mandelbox, siehe Kapitel 1.3.2. Die Mandelbox erlaubte es Luma die Frequenz des Volumens der Londoner Gebäude zu arrangieren, spiegeln, manipulieren und zu schneiden. Luma entwickelt einen künstlerfreundlichen Ansatz, da eine visuelle Vorstellung durch die rein mathematische Gleichung nicht möglich ist.



Abb. 67: Spiegelwelt Effekt - London Szene

Das selbst entwickelte Rigging Tool für den Mandelbroteffekt, verwendet drei Ebenen. Die erste Ebene beinhaltet das Blocking der Szene mit dem richtigen Timing der Basisanimation. Die Elemente arbeiten zeitgesteuert, um mit den Auftritten des Schauspielers zu matchen. Diese Ebene bildet den Begrenzungsrahmen und besteht aus einfachen Bausteinen der Szene und inkludiert alle Elemente, die choreographiert werden müssen. In der zweiten Ebene folgt die Platzierung der Fraktalvolumen. Dieses ermöglicht es den Luma-Animatoren zu kontrollieren und zu visualisieren, wie die Objekte kalideoskopiert und die Objekte instanziiert werden. Im dritten Schritt folgen die Fraktale mit Rendering und Shading Prozess mit samt ihren Materialeigenschaften.¹³⁸ Die Fraktale wurden auf der Basisebene passend zeitgesteuert animiert und diese Animation sitzt nun auf allen Instanzen. Somit ist alles von der dritten Ebene auf die erste, Animationsebene, ausgerichtet und bewegt sich mit. Falls es zu zeitlichen Änderungen oder Bewegungsänderungen kommt, müssen Anpassungen

¹³⁷ Vgl. Awn, 2016

¹³⁸ Frei Luma, 2016

nur auf der ersten Ebene erfolgen.¹³⁹ Die Animation war die Grundlage für alles was in diesen Sequenzen passiert. Die Aufteilung in eine Basisfunktion hat den Vorteil, dass eine Bewegung entsteht, die organisch und nicht prozedural generiert ist, sondern von Menschen Hand choreographiert. Die Bewegung wirkt somit authentischer.¹⁴⁰

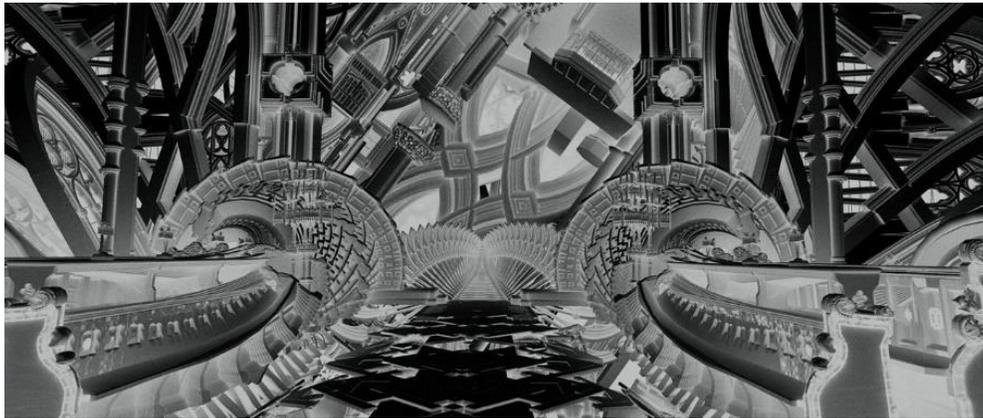


Abb. 68: Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 1

Durch das Überlappen und Durchdringen der Ebenen bekommt Luma die interessantesten Bilder. Man erreichte die gewollte Komplexität und die Szene gewann an visuellem Reiz, daher wurde keine Durchdringungslösung in Form eines Edge Solvers benötigt. Trotz ihrer enormen Komplexität wurde die Szene ohne größere Probleme in Arnold gerendert und der Ray wanderte, sowohl durch die Volumen, als auch die Fraktale.¹⁴¹

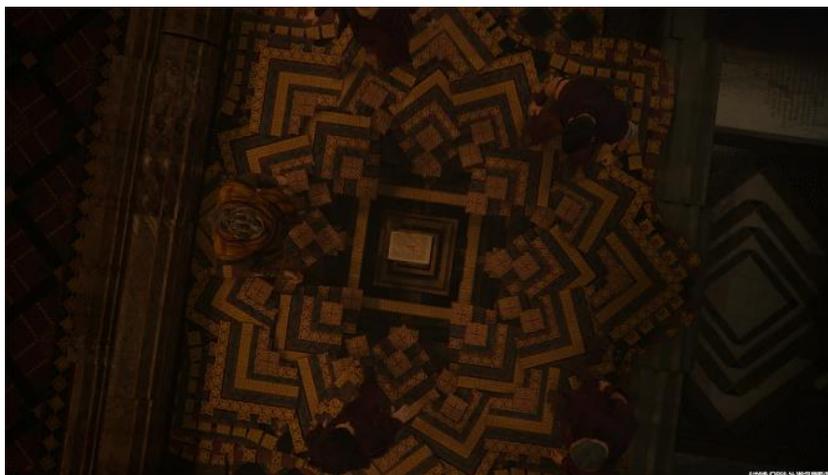


Abb. 69: Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 2

¹³⁹ Vgl. Seymour Luma, 2016

¹⁴⁰ Vgl. Frei Luma, 2016:

¹⁴¹ Vgl. Seymore Luma, 2016

3.2.2 Framestore

Framestore arbeitete unter der Supervision von Jonathan Fawkner, Mark Wislon und Rob Duncan. Hierbei erarbeiteten sie über 365 VFX Shots in elf Monaten. Diese gingen von CG Environments über komplexe Mandelbrot Sets, bis hin zu Szenen mit High-resolution Digi-Doubles von Hauptdarstellern und der Kreation der Astralprojektion bis zur Animation des Umhangs. Die entstandenen Mandelbrot Mengen im Film sind komplizierte Muster und kaleidoskopische Innenaufnahmen, die die Umgebung falten. Es war schwer einzuschätzen, wie weit das Team mit den Effekten gehen sollte, besonders, weil die Live-Action-Charaktere in die Szenen integriert werden mussten, denn das Verwenden von Fraktalen war ein komplett neues Gebiet für Framestore. Unter der Leitung des Animation Supervisors Nathan McConnell wird eine neue Pipeline eingeführt, bei der das Animationsteam ein eigenes Rigging-Tool bekommt. Sie entwickeln eine Toolbox für die Animatoren, die alle Bewegungsebenen und Drehpunkte integriert. Die Animatoren waren somit in der Lage, alles selbst zu manipulieren und hatten die Möglichkeit, die Geometrie bei Bedarf zu duplizieren und animieren. Es gibt alle Möglichkeiten von Biegen, Formen, Klonen und Rekonfigurieren. Sie wollen eine Form frei definieren können und sich erst danach um fraktale Details kümmern. Aufgrund der Bewegungsvielfalt innerhalb des gesamten Sets musste fast alles animiert werden.¹⁴²



Abb. 70 Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 3

¹⁴² Vgl. Seymour Strange, 2016

Nachdem die Animatoren die Assets animiert hatten, platzierte das FX Team dann zusätzliche Mandelbrot-Schwämme mit fraktalen Mustern darauf, um die fraktale Illusion zu erschaffen. Das erzeugte ein mathematisches, aber gleichzeitig organisches Wachstum. Sie nutzen einen prozeduralen Houdini ISO-Surface-Shader, der die Schwämme, über Raymarching oder Distance Estimation, erst beim Rendern durch eine Schnittpunkts Berechnung an dieser Stelle sichtbar macht. Somit blieb es möglich in der Szene gut zu navigieren und animieren. Das ermöglichte es ihnen eine Reihe von sehr komplexen und detaillierten Strukturen zu erstellen, ohne extra Volumendaten speichern zu müssen. Sie integrierten Lighting und Shading der Oberflächen nahtlos in ihr PBR Rendering System. Die Lösung bestand darin, dass jede Oberfläche auf den Raum eines bestimmten polygonalen Objekts beschränkt war. An dieses Objekt sind Informationen über die mathematische Funktion und ihre Parameter gebunden, die beim Rendern der Oberfläche verwendet werden. Dadurch konnten die FX Artists Parameter für jedes Objekt individuell ändern und verschiedene Oberflächen in der Szene kombinieren. Sie benutzten das gleiche polygonale Objekt, um andere Informationen wie die Textur Parametrisierung zu speichern, welche es ermöglichte, die Fraktale wie jedes andere Objekt zu betrachten und beleuchten.¹⁴³

3.2.3 Method Studios

Chad Wiebe, Visual Effects Supervisor von Method betreute das kanadische Team bei der Produktion von insgesamt 270 Shots mit 140 Artists. Sie arbeiteten an vielen bedeutenden Szenen wie, dem Training auf dem Dach, der Bibliotheksszene der Erkenntnis der Zeitkontrolle mit dem Apfel, dem Autounfall, dem Digi-Double von Cumberbatch und der MMT. MMT ist der Flug von Strange durch verschiedene Dimensionen, ausgelöst von der Ältesten, dessen Hintergrund aus fraktalen Elementen besteht. Als Referenzen nutzten sie Mandelbrot Gleichungen, Mandelbulbs, fraktale Oberflächen und Volumes. Sie wollten bevorzugt organische Formen aus den Fraktalen herausholen.¹⁴⁴ Mit der Hilfe von Mandelbrot und Mandelbulb Gleichungen, erzeugten sie Objekte, die gut in den Shot passen. Diese vereinfachten sie durch volumetrische Repräsentationen, damit sie diese wie gewohnt in der Method Pipeline nutzen konnten. Zudem haben sie einerseits fraktale Mathematik verwendet, um Geometrie zu platzieren, andererseits aber auch von Hand gearbeitet. Auf Grundlage der mathematischen Gleichungen wurde iteriert und die Rekursion nach einer bestimmten Schrittzahl abgebrochen, sodass keine unendlichen Fraktale erzeugt wurden, sondern nur nach Fraktalen aussehende Geometrie. Die erzeugte Geometrie wurde dann in die Method Pipeline eingefügt

¹⁴³ Seymour Strange, 2016

und konnte beliebig bearbeitet werden. Die Geschwindigkeit und Frequenz konnten durch ausführliches Research und Development verlässlich kontrolliert werden. Die Animation wurde am Ende geoffsetet und anschließend in den Shot eingefügt.¹⁴⁵



Abb. 71: Ausschnitte der MMT Sequenz mit Fraktalen

3.2.4 ILM

„Every Single Shot was a challenge“, erklärt Ceretti.¹⁴⁶

¹⁴⁵ Vgl. Seymour Strange, 2016

¹⁴⁶ Seymour Strange, 2016

Für ILM hat Stéphane Ceretti die VFX Supervision für 400 der von ILM produzierten Shots übernommen. Postproduktionsdauer waren kurze fünfeinhalb Monate. Die eigentliche Arbeit begann allerdings schon zehn Monate zuvor mit der Planung der New York Szene, in der sich Manhattan zusammenfaltet und das Lookdevelopment der Astralprojektionsszene. Außerdem arbeitete ILM an der sehr aufwändigen New York und Hong Kong Szene. Sie erarbeiteten das Environment in Houdini und fügten dieses in ihre traditionelle Modeling Pipeline ein, anschließend wurden die Daten zu Katana übertragen und in RenderMan gerendert. Am Anfang gab es eine bestimmte Referenz, in den Nahaufnahmen musste die Welt allerdings auf die Bewegungen und das Timing der Schauspieler abgestimmt werden, aber dennoch fraktalen Charakter besitzen. Sie arbeiteten mit Deformationen, Fraktalen, 3D Kaleidoskope, Clone Duplizierung mit Offsetting und Deformern, um Gebäude und deren Oberfläche zu verändern.¹⁴⁷

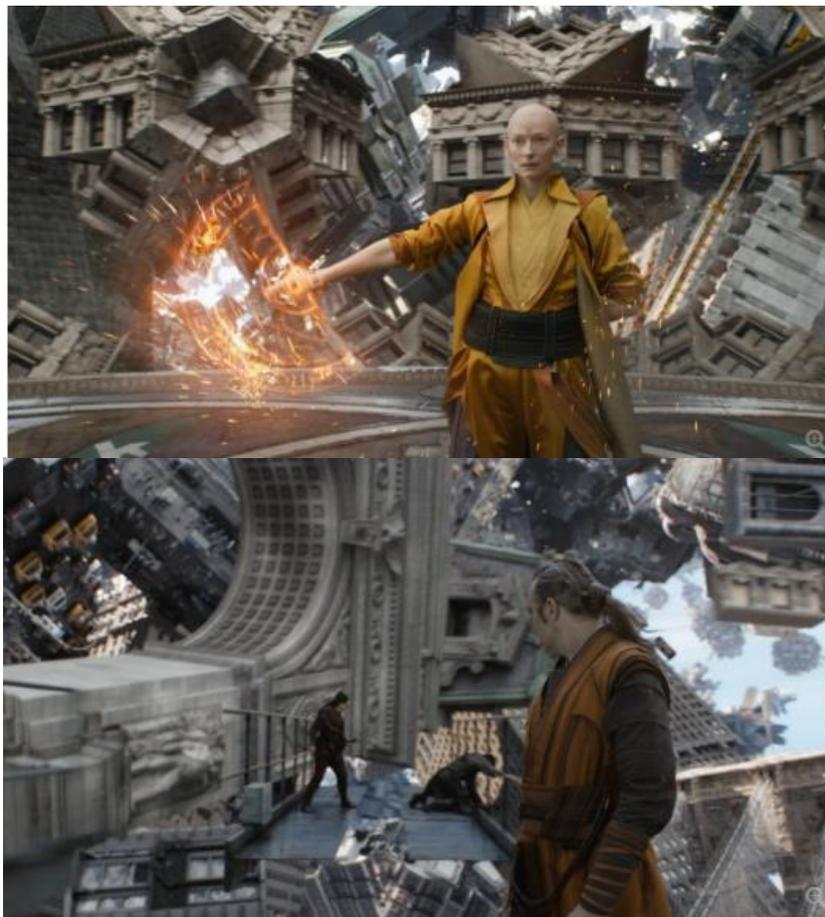


Abb. 72: Ausschnitt aus der New York Szene

¹⁴⁷ Vgl. Seymour Strange, 2016

3.3 Suicide Squad

Um der Strafvollzugsanstalt zu entgehen, stimmen eine Gruppe von Extrem Kriminellen dem Vorschlag des Officer Amanda Waller zu, ihm bei der Bekämpfung von Kriminalität zu helfen. Die Wissenschaftlerin June Moon wurde zur Zauberin, nachdem sie über eine geheime Kammer einer abgelegenen Burg gestolpert war. Verwandeln kann sie sich indem sie den Satz: "The Enchantress" - Die Zauberin ausspricht. Enchantress und ihr Bruder Incubus wollen der Menschheit einen Denkkzettel verpassen, da diese sie nicht als Götter respektieren, sondern als zerstörerische Maschinen. Enchantress entscheidet sich dafür eine der komplexesten und tödlichsten Maschinen zu bauen. Götter sind tatsächlich beide nicht, sie sind einfach so fortgeschritten in ihrer Technologie, dass sie in der Vergangenheit als Götter bezeichnet wurden. Im Gegensatz zu Guardians of the Galaxy benötigte Sony Pictures Imageworks (SPI) bei Suicide Squad organische fraktale Strukturen.¹⁴⁸ Der Visual Effects Supervisor Mark Breakspear arbeitete Hand in Hand mit Jerome Chen, dem Production Side Supervisor. Beide entwickelten zusammen mit Regisseur David Ayer die Idee für die visuellen Effekte. Mit der Assistenz von Tim Borgman und dem CG Team entwickelten sie das Design für die Charaktere. Sie betreuten insgesamt alle der 300, von SPIs Team 150 Leuten gelieferte VFX Shots. Der Hauptfokus und Verantwortung lag für SPI auf dem Endkampf bei Zauberin Enchantress, ihrem Bruder Incubus, einer riesigen Schneekugel, Mega Diavolo und alle toten Körperteile des Endkampfs. Enchantress baut in dieser Szene eine gigantische Waffe aus Fraktalen und Wirbelströmen.¹⁴⁹



Abb. 73: Enchantress Endkampf

¹⁴⁸ Vgl. Seymour Squad, 2016

¹⁴⁹ Vgl. Sarto 2016

David wollte eine neue Darstellung von Magie zeigen, die bisher in noch keinem Film gesehen wurde. Nach dem Ablehnen sämtlicher Filmreferenzen entschieden sie sich am Ende für die Darstellung von Magie, die sehr stark von Mandelbulbs beeinflusst wird.¹⁵⁰ Die Verwendung von Fraktalen und Wirbelströmen in *Suicide Squad*, soll die Macht und Wut der tödlichen Zauberin Enchantress verdeutlichen, verstärken und in ihrer Komplexität darstellen. Sie wollten weiter als Simulation gehen.¹⁵¹ Es war eine der größten technischen Herausforderungen diesen fraktalen Look zu kreieren. Zuerst versuchten sie ein paar Tricks, doch diese führten nicht zu dem gewünschten Ergebnis.¹⁵² Die Mathematik, die Mark Breakspear VFX Supervisor und sein Team von SPI verwenden wollten, basiert auf einer Idee von Daniel Rucker. Das Problem mit Fraktalen ist, dass sie durch mathematische Formeln gesteuert und geformt werden. Man kann also nicht einfach einen Ausschnitt bestimmen, den man größer haben möchte, denn man kann ein Fraktal nicht in X, Y oder Z skalieren. Man kann auch nicht einfach eine fraktale Struktur auf ein 3D Objekt legen. Diese Fraktale Magie musste an ihrem Ursprung, der Mathematik bestimmt werden. Mit einer kleinen Veränderung in der Formel verändert sich allerdings leider meist das komplette Fraktal. Die erste Herausforderung für das Team war die Erstellung der Fraktale in Houdini. Dort gibt es zwar die Möglichkeit Fraktale zu erzeugen und auch zu rendern, allerdings kann man das Fraktal nicht als FBX herausspeichern. Die erste Idee von SPI war eine Displacement Map, mit den fraktalen Informationen, auf ein anderes Objekt zu mappen. Das Ergebnis hat leider zu weich und falsch ausgesehen. David Ayer hatte allerdings noch spektakuläreres im Sinn. Er wollte zudem Vortical Flows, übersetzt Wirbelströmung wie aus den Turbinen eines Flugzeugs, als Schockwellen hinzugefügt haben, die aus dem fraktalen Objekt herauskommen, sobald eine Waffe abgefeuert wird. Diese Schockwellen Ströme durften aber nicht aussehen wie richtige Wirbelströme oder fluid simulation, sondern sollten selbst eine fraktale Struktur besitzen. Zusammengefasst möchte er noch mehr super komplexe Mathematik mit zusätzlich interagierender Partikelsimulation und, dass aus dem ohnehin schon sehr komplexen Objekt nochmal Millionen von winzigen Mandelbulbs, mit jeder Schockwelle, entweichen. Umgesetzt



Abb. 74: Fraktale Waffe Endkampf

¹⁵⁰ Vgl. *Frei Squad*, 2016

¹⁵¹ Vgl. *Seymour Squad*, 2016

¹⁵² Vgl. *Sarto*, 2016

wurde es letztendlich durch richtige Fraktale in den größeren Bereichen, die in der Nähe einer Kamera befanden. Die Kleineren und von weiter weg zu sehenden Fraktale wurden über Texturen gelöst. Bei beiden Ansätzen wurde die Bewegung der Wirbelströmung korrekt simuliert.

4. Fazit

Bei der Entscheidung, den besonderen Look der Fraktale in die Produktion mit einzubauen, muss sich zum Teil von den regulären Arbeitsschritten verabschiedet und die Pipeline, um die Fraktale herum, angepasst werden. Normalerweise würde es beispielsweise mit dem Concept Artist beginnen und an den Mattepainter übergehen, usw. Ein gutes Beispiel hierfür, ist der hinzukommende und interessante Schritt, des Location Scoutings im Fraktal selbst. Hier kann nicht erwartet werden, dass der Scout genau das findet, was im Skript oder zuvor vom Concept Artist beschrieben wurde. Es kann passieren, dass der Scout ganz andere Welten entdeckt, die vielleicht in einer anderen Szene verwendet werden können. Die Producer müssen viel Flexibilität und Offenheit für Neues mitbringen, da Fraktale nun mal nicht sehr gut zu bestimmen und kontrollieren sind. Möchte man fraktale Strukturen in der eigenen Produktion verwenden oder Teile exportieren ist die Nutzbarkeit in Hinsicht der Exporte der Fraktale, im Moment, noch eingeschränkt. Workarounds sind kompliziert und der Einbau in die VFX Pipeline aufwendig. Es gibt bei dem Bulb Tracer in Mandelbulb leider keine genaue Übersicht, welche Einstellungen, für die zu exportierende Geometrie, geeignet sind. Das macht es schwer einen guten Export hinzubekommen und die richtigen Werte zu finden. Es handelt sich mehr um ein langes Probieren und Abschätzen.¹⁵³ Die Exportdaten eignen sich eher für Modelle, die von weiter weg zu sehen sind, als für nahe Einstellungen.¹⁵⁴ Die VFX Industrie würde sich freuen, wenn der Entwickler von Mandelbulb 3D eine neue Version mit besserer Darstellung, mehr Bearbeitungs- und Exportmöglichkeiten, herausbringen würde, damit ein genaueres Finetuning am Fraktal vorgenommen werden kann.¹⁵⁵ Allerdings bringt die Aussage von Julius Hothuis, Fractal Artist mit VFX Vergangenheit, diesbezüglich keine Hoffnung:

¹⁵³ Vgl. Brackelmann, 2019, S. 2

¹⁵⁴ Vgl. Schaller, 2019, S. 1

¹⁵⁵ Vgl. Brackelmann, 2019, S. 2

„ [T]he developers is just one guy, and he decided to discontinue it, so there won't be any updates and feature requests are futile. The source code can be obtained but is written in a very obscure language, I'm told. It's also a mess, so little chance someone will dive in to make new releases.“¹⁵⁶

Die Alternative Houdini bietet generell viel Freiheit, aber auch im Bereich Export mehr Flexibilität, daher sind zuvor genannte Produktionen auch darauf umgestiegen. Bisher muss man hier alles selbst programmieren, daher wären erweiterbare Plugins für Houdini wohl eine gute zukünftige Lösung.¹⁵⁷ Anwendungen, wie das VFX Fractal Toolkit, sollen Abhilfe schaffen und intuitiv zu einen schnelleren Workflow, sowie Einbau in die VFX Pipeline, führen.¹⁵⁸ Großen Produktionen mangelt es häufig an Zeit, sich intensiv mit den Programmen vertraut zu machen und tief in die Materie einzutauchen. Bei den Fraktalen waren die Artists auf glückliche Zufälle angewiesen, statt die Fraktale wirklich zu kontrollieren.¹⁵⁹ Daher wäre ein leicht zu verstehendes Tool, das dennoch viel kreative Freiheit, Raum für eigene Programmierung und gute Exportmöglichkeiten, bietet, die ideale Lösung. Die Kreativität und das Durchhaltevermögen der Produktionen, trotz zeitintensiver Workarounds, verdeutlichen das bestehende Interesse an Fraktalen. Weitere kreative Köpfe werden, mit Sicherheit, zukünftig weiter an der Nutzbarkeit von Fraktalen in VFX Produktionen arbeiten und diese verbessern. Der Mut, sich für die Integration der Fraktale, in die eigene Produktion, zu entscheiden, zahlt sich in jedem Fall aus, wie die erfolgreichen Produktionen Doctor Strange, Guardians of the Galaxy Vol. 2 und Suicide Squad zeigen. Da sie sich von klassischen VFX Filmen abheben und durch die Fraktale einen einzigartigen und neuen visuellen Reiz für das Publikum schaffen. Auch in Zukunft werden Fraktale weiterhin ein Teil neuer VFX Produktionen sein, da sie viele Einsatzmöglichkeiten besitzen, wie das folgende Zitat von Markus Brackelmann bestätigt.

„In vielen Produktionen wurden und werden Fraktale ständig verwendet, z.B. bei Fluidsimulations. [...] Ich denke das fraktale Welten praktisch unendliche Variationen haben können und hoffe, dass es in Zukunft noch mehr verrückte Fraktale, wie in GotG2, zu sehen geben wird. Ich denke, dass Fraktale hier und da weiterhin auftauchen werden, wenn auch nur als roughe Vorlage im Designprozess.“¹⁶⁰

¹⁵⁶ Horsthuis

¹⁵⁷ Vgl, Schaller, 2019, S.2

¹⁵⁸ Vgl, Eyedesyn

¹⁵⁹ Vgl. Brackelmann, 2019, S. 1f

¹⁶⁰ Brackelmann, 2019, S. 3

Literaturverzeichnis

3Blue1Brown: Hilbert's Curve: Is infinite math useful?, 3Blue1Brown, 2017, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=3s7h2MHQtxc> , aufgerufen am 10.01.2019

Artstation Teil 1: GotG2:: Jump Scene Concept, Markus "Braxxy" Brackelmann, URL: <https://www.artstation.com/artwork/BWx09> , aufgerufen am 26.03.2019

Artstation Teil 2: GotG2:: Jump Scene Concept, Markus "Braxxy" Brackelmann, URL: <https://www.artstation.com/artwork/kXAW2> , aufgerufen am 26.03.2019

Artstation Teil 3: GotG2:: Jump Scene Concept, Markus "Braxxy" Brackelmann, URL: <https://www.artstation.com/artwork/Wk41y> , aufgerufen am 26.03.2019

A V, 2014: Mandelbulb3D Render Settings: What R Bailout Does!, A V, 2014, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=nFozHTMUiTQ> , aufgerufen am 09.03.2019

Animationsinstitut: VFX Fractal Toolkit, Juraj Tomori, 2018, URL: https://animationsinstitut.de/fileadmin/user_upload/files_forschung/pdf/Publications/18_cvmp_vft_juraj_tomori_paper.pdf , aufgerufen am 11.02.2019

Awn, 2016: Luma Pictures Rewrites Physics for Marvel's 'Doctor Strange', AWN Staff Editor, 22.11.2016, URL: <https://www.awn.com/news/luma-pictures-rewrites-physics-marvel-s-doctor-strange> , aufgerufen am 24.01.2019

Bausteine des Chaos, 1992: Bausteine des Chaos - Fraktale, Preitgen/ Heinz-Otto / Jürgens, Hartmut / Saupe, Dietmar, 1992, Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York

Berkemeier: Mandelbrotmenge, Jürgen Berkemeier, 2018, URL: <https://www.j-berkemeier.de/Mandelbrotmenge.html?crmin=-2.05;crmax=0.55;ccmin=-1.3;ccmax=1.3;maxiter=32;size=0> , aufgerufen am 24.01.2019

Bib993: Mandelbulb3D Quick Volumetric Lighting Tutorial, bib993, 2017, <https://www.deviantart.com/bib993/art/Mandelbulb3D-Quick-Volumetric-Lighting-Tutorial-370027124> , aufgerufen am 18.02.2019

Brackelmann, 2019: Interview mit Trixters Concept Artist Markus Brackelmann zur Produktion Guardians Of The Galaxy Vol. 2, Interview vom 24.03.2019, Siehe Anhang

Brad Stefanov, 2014: Susing DOF in Mandelbulb 3d, Brad Stefanov, 2014, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=udg6ksSc1IY> , 3:49min, aufgerufen am 18.02.2019

Christersson, 2015: Orbit trap Fractals, Malin Christersson, 2015, URL: <http://www.malinc.se/m/OrbitTraps.php> , aufgerufen am 18.03.2019

Cloudpictures, 2014: Mandelbulb 3D Formel – Berechnung – Alternate, Interpolate und DE Combine, Cloud Pictures, 2014, URL: <http://www.cloudpictures.de/mandelbulb-3d-formel-berechnung-alternate-interpolate-und-de-combine/2637/> , aufgerufen am 14.02.2019

Damnimp 2017: Hidden Structures of the Mandelbrot and Julia Sets, Damnimp, 2017, <https://www.youtube.com/watch?v=vfteiiTfE0c>, aufgerufen am 12.01.2019

DevianArt, 2016: MandelBulb3D DEcombine Mix Mode Tutorial, LukasFractalizer, 2016, URL: <https://www.deviantart.com/lukasfractalizer/journal/MandelBulb3D-DEcombine-Mix-Mode-Tutorial-599738133>, aufgerufen am 14.02.2019

Dickerson, 2003: Higher Order Mandelbrot Fractals: Experiments in Nanageometry, Richard E. Dickerson, URL: <http://www.fractal.org/Bewustzijs-Besturings-Model/Higher-order-Mandelbrot-Fractals.pdf>, aufgerufen am 24.01.2019

Ebb, 2017: Guardians of the Galaxy 2, Matt Ebb, 2017, URL: <https://cargocollective.com/mattebb/Guardians-of-the-Galaxy-2>, aufgerufen am 15.01.2019

Entagma, 2016: VEX in Houdini: Mandelbrot and Mandelbulb, Moritz Schwind, 2016, URL: <https://vimeo.com/176911687>, aufgerufen am 04.03.2019

Eyedesyn: Cinema 4D Tutorial - Abstract Fractal Animations Using Vectron in Octane 2018, Eyeseyn, 2019, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=VoURMYmfUH8>, aufgerufen am 21.03.2019

Fawcett, 2016: Stephane Ceretti and the VFX of 'Doctor Strange', Spencer Fawcett, 2016, URL: <https://www.awn.com/vfxworld/stephane-ceretti-and-vfx-doctor-strange>, aufgerufen am 24.01.2019

FlinkDimensions, 2016: New in Mandelbulb3D v1.91 | The Bulb Tracer and MutaGen Modules, FlinkDimensions, 2016, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=3n9QPYognsc>, aufgerufen am 17.02.2019

Fractal Foundation: Fractal Software, Fractal Foundation, URL: <https://fractalfoundation.org/resources/fractal-software/>, aufgerufen am 09.03.2019

Fractal Institute Nylander, 2018: An Interview with Paul Nylander, Fractal.Institute, 2018, URL: <https://fractal.institute/an-interview-with-paul-nylander/>, aufgerufen am 15.01.2019

Fractal Institute White, 2018: Daniel White – The man that coined the name Mandelbulb, Fractal.Institute, 2018, URL: <https://fractal.institute/daniel-white-the-man-that-coined-the-name-mandelbulb/>, aufgerufen am 15.01.2019

Fraterchaos: Basic Mandelbulb Animation Tutorial, Fraterchaos, <https://www.deviantart.com/fraterchaos/art/basic-Mandelbulb-Animation-Tutorial-343119371>, aufgerufen am 20.02.2019

Frei Luma, 2016: Doctor Strange: Vincent Cirelli – VFX Supervisor – Luma Pictures Vincent Frei, 2016, URL: <https://www.artofvfx.com/doctor-strange-vincent-cirelli-vfx-supervisor-luma-pictures/>, aufgerufen am 24.01.2019

Frei Squad, 2016: <https://www.artofvfx.com/suicide-squad-mark-breakspear-vfx-supervisor-sony-pictures-imageworks/>, Vincent Frei – The Art of VFX – 2016, aufgerufen am 15.01.2019

Frei Strange, 2016: SUICIDE SQUAD: MARK BREAKSPEAR – VFX SUPERVISOR – SONY PICTURES IMAGEWORKS, Vincent Frei, 2016, URL: <https://www.artofvfx.com/doctor-strange-stephane-ceretti-production-vfx-supervisor/>, aufgerufen am 24.01.2019

Frei Weta, 2017: GUARDIANS OF THE GALAXY VOL. 2: GUY WILLIAMS – VFX SUPERVISOR – WETA DIGITAL, Vincent Frei, 2017, URL: <https://www.artofvfx.com/guardians-of-the-galaxy-vol-2-guy-williams-vfx-supervisor-weta-digital/>, aufgerufen am 17.01.2019

Frei, 2016: Doctor Strange: Vincent Cirelli – VFX Supervisor – Luma Pictures, Vincent Frei, 2016, URL: <https://www.artofvfx.com/doctor-strange-vincent-cirelli-vfx-supervisor-luma-pictures/>, aufgerufen am 24.01.2019

Frei, 2017: GUARDIANS OF THE GALAXY VOL. 2: PAUL BUTTERWORTH – VFX SUPERVISOR – ANIMAL LOGIC, Vincent Frei, 2017, URL: <https://www.artofvfx.com/guardians-of-the-galaxy-vol-2-paul-butterworth-vfx-supervisor-animal-logic/>, aufgerufen am 16.01.2019

Haggett: Mandelbulb 3D (MB3D) Fractal Rendering Software, Matthew Haggett, URL: <http://www.mandelbulb.com/2014/mandelbulb-3d-mb3d-fractal-rendering-software/>, aufgerufen am 10.02.2019

Holmedal, 2017: ManvsMachine's Simon Holmedal // Houdini Connect, Houdini, 2017, URL: https://www.youtube.com/watch?v=2_QdoTYj4os&t=195s, aufgerufen am 26.03.2019

Horst, 2014: Apollonische Kreise, Horst, 2014, URL: <https://lsandig.org/blog/2014/04/apollonische-kreise/>, aufgerufen am 22.03.2019

Horsthuis Events: Events, Julius Horsthuis, URL: <http://www.julius-horsthuis.com/events/>, aufgerufen am 25.01.2019

Horsthuis VFX, 2015: Fractals in VFX, Julius Horsthuis, 2015, URL: <http://www.julius-horsthuis.com/tutorials#/fractals-in-vfx/>, aufgerufen am 20.03.2019

Horsthuis: Fractals in VFX, Kommentar, Julius Horsthuis, 2015, URL: <https://vimeo.com/117291999>, aufgerufen am 20.03.2019

Houdini 17.5 VEX: Houdini 17.5 > VEX, SideFX, URL: <http://www.sidefx.com/docs/houdini/vex/index.html>, aufgerufen am 11.03.2019

Inigi Quilez: Distance Functions, Sphere-Tracing Prinzip, <http://iquilezles.org/www/articles/dist-functions/distfunctions.htm>, aufgerufen am 06.02.2019

Kleinhuis, 2013: chaosTube Tutorials #3.5 The Mandelbox/Amazing Box Explained in 3d, Christian Kleinhuis, 2013, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=1yeANz-sxWA>, aufgerufen am 16.01.2019

Lawrence, 2011: Mandelbulb 3D Tutorial: The Basics, Jody Lawrence, 2011, URL: <http://mandeluber.blogspot.com/2011/06/mandelbulb-3d-tutorial-for-beginners.html>, aufgerufen am 13.02.2019

Lawrence Lighting, 2011: Mandelbulb 3D Tutorial: Lighting and Colouring, Jody Lawrence, 2011, http://mandelubber.blogspot.com/2011/06/mandelbulb-3d-tutorial-for-beginners_27.html , aufgerufen am 13.02.2019

Lawrence Julia, 2011: Mandelbulb 3D Tutorial: Julia Mode, Jody Lawrence, 2011, URL: <http://mandelubber.blogspot.com/2011/09/mandelbulb-3d-tutorial-julia-mode.html> , aufgerufen am 10.03.2019

Lawrence Post, 2012: Mandelbulb 3D Tutorial: The 'DE combinate' button, Jody Lawrence, 2012, URL: <https://mandelubber.blogspot.com/search?q=mandelbulb+post+process> , aufgerufen am 14.02.2019

Mandelbox: What is a Mandelbox, URL: <https://sites.google.com/site/mandelbox/what-is-a-mandelbox> , aufgerufen am 25.01.2019

Mandelbrot, 1987: Die fraktale Geometrie der Natur, Benoît B. Mandelbrot, 1987, Birkhäuser Verlag, Basel

Mandelbulber Manual, 2016: Mandelbulber, Krzysztof Marczak / Graeme McLarekin / Sebastian Jennen, 2016, URL: http://cdn.mandelbulber.org/doc/Mandelbulber_Manual_v091.pdf , 2016, aufgerufen am 09.03.2019

Riesman, 2016: What Inspired Doctor Strange's Visual Effects? Incaption, a Mobilde Game, and Black-Light Posters, Abraham Riesman, 2016, URL: <https://www.vulture.com/2016/11/what-inspired-doctor-stranges-visual-effects.html> , , aufgerufen am 24.01.2019

R&D Flyknit: Video Development Reel, ManvsMachine, URL: <https://mvsm.com/project/flyknit> , aufgerufen am 26.03.2019

Sabine62: Mandelbulb3D Reflections_Transparency, Sabine62, URL: <https://www.deviantart.com/sabine62/art/Mandelbulb3D-Reflections-Transparency-by-Sabine62-523514776> , aufgerufen am 18.02.2019

Sarto, 2016: Imageworks Takes on DC Comics' Enchantress, Incubus and El Diablo, Dan Sarto, 2016, <https://www.awn.com/vfxworld/imageworks-takes-dc-comics-enchantress-incubus-and-el-diablo> , aufgerufen am 15.01.2019

Schaller, 2019: Interview mit Viviana Schaller zur Studioproduktion Hidden Worlds, Interview vom 24.03.2019, Siehe Anhang

Schnellgedacht, 2018: Wenn Mathe mal schön ist (Mandelbrotmenge für Einsteiger), Schnellgedacht, 2018, URL: <https://www.youtube.com/watch?v=78kGnsYXLc> , aufgerufen am 25.01.2019

Schröder: Apfelmännchen selbst programmiert, Klaus G. Schröder, <http://www.schroediwi.de/ar-corspiegel/klaus/sierpinski/apfel.pdf>, aufgerufen am 11.01.2019

Seymour GotG2, 2017: The fractal nature of Guardians of the Galaxy Vol. 2, Mike Seymour, 2017, URL: <https://www.fxguide.com/featured/the-fractal-nature-of-guardians-of-the-galaxy-vol-2/> , aufgerufen am 15.01.2019

Seymour Luma, 2016: Bonus: Luma Pictures' new tools for Doctor Strange , Mike Seymour, 2016, URL: <https://www.fxguide.com/quicktakes/bonus-luma-pictures-new-tools-for-doctor-strange/> , aufgerufen am 24.01.2019

Seymour Squad, 2016: Suicide Squad, vortical flows and fractal machines, Mike Seymour, 2016, URL: <https://www.fxguide.com/featured/suicide-squad-vortical-flows-and-fractal-machines/> , aufgerufen am 14.01.2019

Seymour Strange, 2016: Doctor Strange's Magical Mystery Tour in time, Mike Seymour, 2016, <https://www.fxguide.com/featured/dr-stranges-magical-mystery-tour-in-time/> , am 18.01.2019

SideFX: Houdini Overview, SideFX, URL: <https://www.sidefx.com/products/houdini/> , aufgerufen am 11.03.2019

Sierpinski Carpet Fractal Antenna: Design and Implementation of Sierpinski Carpet Fractal Antenna for Wireless Communication, Rahul Batra, P.L. Zade, Dipika Sagne, 2012, International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJRET), Volume 1 Issue3, pp043-047, ISSN 2278-0882, Nagpur University, URL: https://www.researchgate.net/profile/James_Peters/post/What_are_the_ingredients_of_a_good_design/attachment/59d61db679197b80779797e6/AS%3A272440393961483%401441966259944/download/Sierpinski-antennas.pdf , aufgerufen am 15.01.2019

Teragon, 2019: Teragon, Wikipedia, 2019, URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Teragon> , aufgerufen am 26.03.2019

Tomori, 2018: FMX2018 Filmakademie Projects Technical Directing, Juraj Tomori, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=SNa18n5d8UY> , aufgerufen am 08.03.2019

Tutorialspoint: Computer Graphics Fractals, Tutorialspoint, https://www.tutorialspoint.com/computer_graphics/computer_graphics_fractals.htm , aufgerufen am 25.01.2019

Video Nike Flyknit: Video Flyknit, ManvsMachine, <https://mvsm.com/project/flyknit> , aufgerufen am 26.03.2019

Webreference: Primitive Data Types, Arrays, Loops, and Conditions / Part 2 - Page 2, Webreference, URL: <http://webreference.com/programming/javascript/beginning-oojs2/2.html> , aufgerufen am 13.02.2019

Weta Digital, 2018: Guardians of the Galaxy Vol.2 - Weta Digital VFX Overview, Weta Digital, 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=K7act--iMgU>, aufgerufen am 17.01.2019

White, 2009: The Unravelling of the Real 3D Mandelbulb, Daniel White, 2009, URL: <http://www.skytopia.com/project/fractal/2mandelbulb.html> , aufgerufen am 04.03.2019

Wikibooks, 2017: Mandelbulb3D/Reference/Formulas/Formula types, Wikibooks, 2017, URL: https://en.wikibooks.org/wiki/Mandelbulb3D/Reference/Formulas/Formula_types , aufgerufen am 11.02.2019

Wong, 2016: Ray Marching and Signed Distance Functions, Jamie Wong, 2017, URL: <http://jamie-wong.com/2016/07/15/ray-marching-signed-distance-functions/> , aufgerufen am 18.03.2019

Zhong, 2015: Looks like a 4-dimensional Sierpinski Gasket of spheres, Ann Zhong, 2015, URL: <https://plus.google.com/115963237025699693031/posts/gvRUt2Jp1iP> , aufgerufen am 16.01.2019

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Küstenlinie, Bausteine des Chaos, S.233	8
Abb. 2: Selbstähnlichkeit Blumenkohl, Bausteine des Chaos, 1992, S.82	9
Abb. 3: Darstellung der Kantor Menge, Bausteine des Chaos, 1992, S.87	10
Abb. 4: Konstruktion Sierpinski Dreieck, Bausteine des Chaos, 1992, S.99	11
Abb. 5: Konstruktion Sierpinski Teppich, Bausteine des Chaos, 1992, S. 102	11
Abb. 6: Konstruktion Koch-Kurve, Bausteine des Chaos, 1992, S.112	12
Abb. 7: Koch-Teragon: Teragon, 2019	13
Abb. 8: Hilbert Kurve – Ordnung 1: 3Blue1Brown	13
Abb. 9: Kontruktionschritte der Hilbert Kurve - Ordnung 2: 3Blue1Brown.....	14
Abb. 10: Kontruktion der Hilbert Kurve – Ordnung 3: 3Blue1Brown.....	14
Abb. 11: Hilbert Kurve höhere Ordnung: 3Blue1Brown	14
Abb. 12: Apollonisches Dichtungsfraktal: Horst, 2014.....	15
Abb. 13: Zoomfahrt Mandelbrotmenge: Schröder, S. 8.....	15
Abb. 14: Einzeichnung der Mandelbrotmenge in die komplexe Ebene: Dickerson, 2003, S. 3, aufgerufen am 24.01.2019	16
Abb. 15: Iterationen C_1 , Schröder, S. 4	17
Abb. 16: Iterationen C_2 , Schröder, S. 4	17
Abb. 17: Detailgrad der Mandelbrotmenge nach Iteratione: White, 2009.....	18
Abb. 18: Escapetime Färbemethode: Schnellgedacht, 2018	18
Abb. 19: Beeinflussung des Fraktals bei Potenz- oder Vorzeichenänderung: Dickerson, 2003, S.17 19	19
Abb. 20: Abhängigkeit von Mandelbrotmenge und Julia Menge: Damnimp 2017	20
Abb. 21: Beispiele Julia Mengen: Bausteine des Chaos, S. 149.	21
Abb. 22: Daniel Whites gestaffeltes Graustufenbild: Fractal Institute White, 2018.....	22
Abb. 23: Paul Nylanders Rendering des Fraktals: Fractal Institute Nylander, 2018.....	23
Abb. 24: Mandelbulb verschiedener Iterationsstufen : White, 2009.....	24
Abb. 25: Auswirkungen auf das Fraktal bei Änderung der Grundgleichung: White, 2009.....	25
Abb. 26: Mandelbox: Seymour Luma, 2016	26
Abb. 27: Distance Estimation mit Faktor 1 (links) und Faktor 0.5 (rechts): Mandelbulber Manual, 2016, S 4.....	27
Abb. 28: Hauptfenster MB3D: Eigene Darstellung.....	28
Abb. 29: Formula Fenster MB3D: Eigene Darstellung.....	29
Abb. 30: Navigator MB3D: Eigene Darstellung	31
Abb. 31: MutaGen MB3D: Eigene Darstellung.....	32
Abb. 32: Lighting MB3D: Eigene Darstellung	33
Abb. 33: Object Tab – Lighting MB3D: Eigene Darstellung	34
Abb. 34: Escapetime Ramp - Object Tab MB3D: Eigene Darstellung	34
Abb. 35: Ambient Tab – Lighting MB3D: Eigene Darstellung	35
Abb. 36: Dynamic Fog – Lighting MB3D: Eigene Darstellung.....	35
Abb. 37: Background Image – Lighting MB3D: Eigene Darstellung.....	36
Abb. 38: Post processing – MB3D: Eigene Darstellung	37
Abb. 39: Animation Maker – MB3D: Eigene Darstellung	38
Abb. 40: Bulb Tracer – MB3D: Eigene Darstellung.....	40
Abb. 41: Annäherung an Normal Map durch vierfarbige BitMap – Lighting MB3D: Horsthuis VFX,	

2015	41
Abb. 42: Eigene Testbeispiele und Concept Art mit Hilfe von Mandelbulb 3D: Eigene Darstellung..	42
Abb. 43: Rendering der Mandelbrot Menge – Houdini VEX: Eigene Darstellung.....	44
Abb. 44: Rendering Mandelbulb – Houdini VEX: Eigene Darstellung.....	46
Abb. 45: Shading Optionen Stand April 2018 – VFX Fractal Toolkit: Tomori, 2018	48
Abb. 46: Darstellung in Houdini – VFX Fractal Toolkit, Tomori, 2018.....	49
Abb. 47: Kombination von Fraktalen miteinander oder mit Primitiven, Tomori, 2018	49
Abb. 48: Research und Development Phase Nuke Flyknit Teil 1 – ManvsMachine: R&D Flyknit	50
Abb. 49: Research und Development Phase Nuke Flyknit Teil 2 – ManvsMachine: R&D Flyknit	51
Abb. 50: Ausschnitte aus Nike Flyknit – ManvsMachine: Video Nike Flyknit.....	51
Abb. 51: Innenausstattung Egos Palast - Guardians of the Galaxy Vol. 2: Frei, 2017 und Ebb, 2017	53
Abb. 52: Sphere-Tracing Prinzip: Inigi Quilez	54
Abb. 53: Punktwolke aus Max Ebbs Tool: Video 3, Seymour GotG2, 2017	54
Abb. 54: Gerenderte Säulen als dicht gepackte Kugeln: Video 4, Seymour GotG2, 2017	56
Abb. 55: Fraktale Pflanzen: Video 5, Seymour GotG2, 2017.....	56
Abb. 56: Egos Garten – Außenbereich des Palastes: Seymour GotG2, 2017	57
Abb. 57: Landschaft Egos Planet: Seymour GotG2, 2017	57
Abb. 58: Mandelbulb und Apollonisches Fraktal als Höhlenoberfläche: Seymour GotG2, 2017	58
Abb. 59: Concept Art Sprungsequenz Teil 1 – Brackelmann: Artstation Teil 1	58
Abb. 60: Concept Art Sprungsequenz Teil 2 – Brackelmann: Artstation Teil 2	59
Abb. 61: Concept Art Sprungsequenz Teil 3 – Brackelmann: Artstation Teil 1	59
Abb. 62: Sierpinski Fraktal mit Kugeln generiert: Zhong, 2015.....	61
Abb. 63: Sierpinski Fraktal im Film Teil 1: Seymour GotG2, 2017	62
Abb. 64: Sierpinski Fraktal im Film Teil 2: Seymour GotG2, 2017	62
Abb. 65: Verwandlung Ego mit fraktalen Strukturen: Weta Digital, 2018.....	63
Abb. 66: Zusammenfallen der Gebäude - London Szene: Frei Luma, 2016.....	65
Abb. 67: Spiegelwelt Effekt - London Szene: Seymour Luma, 2016	66
Abb. 68: Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 1: Awn, 2016	67
Abb. 69: Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 2: Frei, 2016.....	67
Abb. 70: Veränderung des Gebäudeinteriors durch Kaecilius Teil 3: Seymour Strange, 2016:	68
Abb. 71: Ausschnitte der MMT Sequenz mit Fraktalen: Seymour Strange, 2016	70
Abb. 72: Ausschnitt aus der New York Szene, Seymour Strange, 2016	71
Abb. 73: Enchantress Endkampf: Sarto, 2016.....	72
Abb. 74: Fraktale Waffe Endkampf: Sarto, 2016:.....	73

Interview mit Trixters Concept Artist Markus Brackelmann zur Produktion Guardians Of The Galaxy Vol. 2

1. Das Concept Art für Guardians of the Galaxy Vol. 2 hatte verstärkt mit Fraktalen zu tun. An welchen dieser Szenen haben Sie mitgearbeitet?

Trixter hat insbesondere an den Waldszenen / IronLotus (Schneeplanet) und der QSH Sequenz gearbeitet, bei der Rocket, Groot und Yondu durch eine Vielzahl an Environments springen. Für die Sprungsequenzen mussten wir uns verschiedenste, verrückte Welten und Hintergründe ausdenken, bei denen ich des Öfteren Fraktale verwendete.

2. Wie sind Sie an die Aufgabe herangegangen und welche Inspirationsquellen haben Sie genutzt?

Bei meiner Research Phase bin ich, zu Anfang meiner Arbeit, über diverse fraktale Kunstwerke gestoßen vor allem auf der Plattform Deviantart. Über diese Plattform bin ich dann letztendlich bei dem Programm Mandelbulb 3D gelandet. Fraktale waren nicht ausschließlich die Inspirationsquelle, aber es war unheimlich hilfreich beim Erstellen verrückter Hintergründe.

3. Als Vorlage der Fraktalen Welten galt Hal Tennys Fraktale Kunst. Konnten Sie seine zur Verfügung gestellten Dateien nutzen?

Nein ich hatte zu dem Zeitpunkt noch nichts von Hal Tenny gewusst, kannte aber Künstler wie Gutralin die mir als Inspiration dienten. Bei der Arbeit an sich war ich oft auf die "happy accidents" angewiesen.

4. Mit welcher Software haben Sie gearbeitet?

Für dreidimensionale Fraktale verwendete ich die kostenlose Software Mandelbulb 3D und für zweidimensionale Fraktale, die ebenfalls kostenlose Software Apophysis, die oft für die QSH-Sequenz sowie Stellare Nebel verwendet wurde.

5. Haben Sie selbst eigene Fraktale erzeugt und sind dabei an Grenzen geraten? Welche waren das und wie haben Sie diese überwunden oder umgangen?

Oftmals war es schwer die Geometrie, aus oben genannter Software, zu exportieren. Ich war somit auf den internen Renderer angewiesen. In Zukunft würde ich verstärkt daran arbeiten die Geometrie in anderen Softwares weiter zu bearbeiten. Grenzen entstanden vor allem durch die Natur der Fraktale an sich. Der Zeitdruck in der Produktion ließ es nicht zu tief in die Materie einzutauchen und sich mit dem Programm vertraut zu machen. Gerne würde ich, beim nächsten Projekt, daran

arbeiten mehr Kontrolle bei der Erstellung und Bearbeitung der Fraktale zu haben.

6. Wie wurden Ihre Arbeiten in der Produktion weiterverwendet?

Bei GotG2 hat es so spezifisch keines meiner Fraktale auf die Leinwand geschafft, dafür aber andere Hintergründe, auf Basis anderer Konzepte. Es kommt immer ein bisschen darauf an, wie viel ich in der Concept Phase vorbereitet habe. Benutze ich z.B. 3D Modelle, kann ich die anschließend natürlich an das 3D Department weitergeben. Die haben dann schonmal eine Basis. Manche meiner Concepts, bzw. ich glaube sogar nur ein oder zwei, wurden direkt als Digital Mattepainting verwendet. Das hängt immer ganz von der Qualität des Concepts und vor allem von dem Shot selbst ab. 80% der Zeit würde ich sagen, dass meine Arbeit als Design Grundlage diene, die restlichen 20% waren dann Assets, die ich direkt an die Produktion weitergegeben habe. Das waren aber mehr Modelle, wie Käfer oder andere Props.

7. Würden Sie beim nächsten Mal etwas an Ihrer Herangehensweise ändern?

Nicht zwangsläufig, aber wie oben genannt, mehr Zeit und Kontrolle, bzw. mehr Vertrautheit mit der Software.

8. Was würden Sie sich für die Nutzbarkeit und Handelbarkeit von Fraktalen für die Zukunft wünschen?

Mandelbulb 3D hatte in eine der letzten Versionen einen Fraktal-Exporter implementiert. Ein genaues Verständnis oder bzw. eine Übersicht, über die zu exportierende Geometrie zu bekommen wäre super. Momentan ist der Prozess eher ein Abschätzen und dann so lange Probieren bis man die richtigen Werte gefunden hat.

9. Worin besteht Ihrer Meinung nach Bedarf Softwaretechnisch etwas zu verändern?

Falls möglich eine bessere Art die Fraktale zu bearbeiten und weiter zu verwenden. Siehe z.B. Punkt 7. Bei Erstellen der Fraktale, bzw. dem Finden interessanter Strukturen gibt es zahlreiche Möglichkeiten das Fraktal zu verändern. In meiner spezifischen Software sehe ich aber meistens erst ein Ergebnis, wenn ich den Renderprozess starte. Davor gibt es maximal eine sehr verpixelte Preview, die es meist schwer macht, ein genaueres "Feintuning" am Fraktal vorzunehmen.

10. Haben Sie von technischen Neuerungen für die Nutzbarkeit von Fraktalen für die Zukunft gehört?

Noch nicht, ich verfolge es momentan auch nicht aktiv.

11. Denken Sie es wird verstärkt VFX Produktionen mit Fraktalen Elementen geben oder ist diese Phase bereits wieder am Abklingen?

In vielen Produktionen wurden und werden Fraktale ständig verwendet, z.B. bei Fluidsimulations. Insofern auf jeden Fall. Ich denke das Fraktale Welten praktisch unendliche Variationen haben können und hoffe, dass es in Zukunft noch mehr verrückte Fraktale, wie in GotG2, zu sehen geben wird. Ich denke, dass Fraktale hier und da weiterhin auftauchen werden, wenn auch nur als roughe Vorlage im Designprozess.

Vielen Dank!

Interview mit Viviana Schaller zur Studioproduktion Hidden Worlds

1. Welche Inspirationsquellen haben Sie verwendet und gab es Filme oder Künstler, die Sie beeindruckt haben?

Der Film Doctor Strange war wohl der erste Anstoß, mich näher mit Fraktalen zu befassen. Später habe ich, auf Pinterest, viele fraktale Kugeln gefunden und bin auf die Arbeiten von Julius Horsthuis gestoßen. Seine Arbeit geht weg vom Mathematischen und fokussiert sich auf die künstlerische Darstellung der Fraktale. Das hat mich sehr beeindruckt und dazu inspiriert so etwas auch zu probieren.

2. Wie sind Sie an die Aufgabe herangegangen?

Ich habe mit Tutorials angefangen und dann sehr viel experimentiert.

4. Mit welcher Software haben Sie gearbeitet?

Hauptsächlich mit Mandelbulb 3D und für die Postproduktion mit Nuke. Ich habe, zwischendurch, auch Photogrammetrie mit den Fraktalen versucht, den Namen der Software weiß ich aber leider nicht mehr.

5. Das Fraktal war auf dem Tisch in der Hütte zu sehen, wie haben Sie es exportiert?

Über den Voxel Export aus Mandelbulb habe ich es als obj exportiert. Das exportierte Fraktal war nur eine Annäherung und für die Verwendung okay, solange es nur von weiter weg zu sehen war. Wenn man näher ranfährt, haben wir einen Kamerasprung in das Fraktal gemacht. Hier haben wir dann das direkte Rendering aus Mandelbulb verwendet.

6. Haben Sie Shader oder Texturen aus Mandelbulb exportiert?

Wir haben keine Texturen oder Ähnliches aus Mandelbulb exportiert, sondern mit Absicht einen einfachen metallischen Look gewählt, um den Sprung zu vertuschen. Wir haben darauf geachtet, dass die Shader sehr ähnlich aussehen. Wenn man aber genauer hinschaut sieht man, dass es nicht das gleiche Fraktal ist. Ich hatte es auch über Photogrammetrie versucht zu exportieren, das hat eigentlich gut funktioniert. Man musste es dann aber noch nachbearbeiten, wofür wir über Umwege

Renderpasses exportiert bzw. doppelt gerendert und den Pass in Nuke herausgefiltert haben.

7. Wie haben Sie Kamera und Licht gematcht?

Dadurch, dass das exportierte Fraktal dann auch in der Szene auf dem Tisch stand, musste keine Kamera oder Licht gematched werden. Die Fahrt war gefaked und durch den Cut unterbrochen. Die Innenfahrt war komplett unabhängig von Licht und Kamera vorherigen der 3D Szene.

8. Würden Sie beim nächsten Mal etwas an Ihrer Herangehensweise ändern?

Ich denke, da würde ich mich für Houdini statt Mandelbulb 3D entscheiden, da man darin einfach professioneller arbeiten kann. Man muss zwar alles selbst programmieren, aber wenn man es für eine Filmproduktion benötigt, muss man vermutlich sowieso selbst ein eigenes Tool entwickeln. Mandelbulb 3D ist meiner Meinung nach mehr eine Spielerei als professionell.

9. Wenn Sie ein weiteres Projekt in diesem Bereich machen würden, was würden Sie sich für die Nutzbarkeit und Handelbarkeit von Fraktalen für die Zukunft wünschen?

Houdini bietet da schon viel Flexibilität, man muss nur leider alles selbst programmieren. Bei Mandelbulb 3D würde ich mir wünschen, dass man die Render Passes separat exportieren könnte, das hat man zwar irgendwie alles hinbekommen, aber eben über Umwege. Denke das Plugins für Houdini die beste Lösung wären.

10. Haben Sie von Neuerungen für die Nutzbarkeit von Fraktalen für die Zukunft gehört?

Nein bin auch gar nicht mehr in dem Bereich tätig. Das war damals eher ein Spaßprojekt.

Vielen Dank!