

Darstellung und Rolle von Ozeanoberflächen im Animationsfilm

Lukas Mathä



MASTERARBEIT

eingereicht am
Fachhochschul-Masterstudiengang

Digital Arts

in Hagenberg

im September 2018

© Copyright 2018 Lukas Mathä

Diese Arbeit wird unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz *Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International* (CC BY-NC-ND 4.0) veröffentlicht – siehe <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Hagenberg, am 24. September 2018

Lukas Mathä

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	iii
Kurzfassung	vi
Abstract	vii
1 Einleitung	1
1.1 Fragestellung	1
1.2 Struktur der Arbeit	2
2 Wassereffekte	3
2.1 Das Element Wasser	3
2.2 Sekundäreffekte	5
2.3 Stilisierung versus Realismus	6
3 Bedeutung von Wellen in Animation	7
3.1 Wellen als Mittel zur Narration	7
3.2 Die Katastrophenwelle	8
3.3 Zeitlicher Wandel und Personifikation des Ozeans	10
4 Wasser in 2D-Animation	12
4.1 Entwicklung	12
4.2 Umsetzung	13
4.3 Der Drang zur Repetition	16
5 Wasser in 3D-Animation	18
5.1 Simulation von Wasser	18
5.2 Definition und Entwicklung	18
5.2.1 Orbitalbewegungen	20
5.2.2 Navier-Stokes	20
5.2.3 Tessendorf	21
5.3 Simulation und Animation	23
5.3.1 Ozeanoberflächen	23
5.3.2 Unterwasser	27
5.4 Solver	27
5.4.1 Funktion	27

5.4.2	Ozeanspektren	29
6	Beispiele	33
6.1	Wasser in 2D-Animationsfilmen	33
6.2	Wasser in 3D-Animationsfilmen	35
6.3	Alternative Methoden	46
7	Fish for Life	48
7.1	Handlung	48
7.2	Der Ozean im Film	48
7.3	Stil	49
7.4	Pipeline	49
7.5	Boot-Animation	50
8	Fazit	51
A	Inhalt der CD-ROM/DVD	53
A.1	PDF-Dateien	53
A.2	Bildmaterial	53
A.3	Online-Ressourcen	53
	Quellenverzeichnis	54
	Literatur	54
	Audiovisuelle Medien	56
	Online-Quellen	56

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt die Darstellung des Ozeans im Animationsfilm. Dabei werden nicht nur die Techniken, mit denen Ozeane für einen Film erstellt werden, betrachtet, sondern auch die Rolle, die Ozeane und Wasserwellen im Film spielen, analysiert. Für diese Arbeit werden sowohl die „klassische“ Zeichentrick-Animation, als auch die, in den letzten Jahren immer populärer gewordene, 3D-Animation herangezogen.

Dieses Werk soll Künstlern helfen zu verstehen, welche Aspekte, bei der Erschaffung einer Szene mit einem Ozean, für einen Animationsfilm beachtet werden müssen. Um dies zu erreichen, werden mögliche Animationsformen von Wasser thematisiert und der Ablauf der Animation-Pipeline mehrerer Fallbeispiele aufgearbeitet. Der Schwerpunkt der Arbeit ist die Verwendung von Ozeanspektren. Diese sind empirische Datensätze, welche die Bewegung eines Ozeans, zu gewissen vorhandenen Bedingungen, beschreiben. Ozeanspektren werden hauptsächlich in der 3D-Animation verwendet um, mithilfe von Simulationen, eine weitläufige Ozeanoberfläche zu erzeugen. Ein Verständnis für diese Daten kann jedoch auch Künstlern, die sich in anderen Arten der Animation spezialisiert haben, von Nutzen sein. Ein weiterer Fokus dieser Arbeit liegt in der Verwendung von Wasserwellen im Zusammenhang mit der Geschichte eines Films. Wellen haben eine starke narrative Wirkung, die im Laufe der Jahre einen Wandel durchlebt hat. Während sie, am Anfang der Filmgeschichte, meist als Naturkatastrophe dargestellt wurden, so haben sich die Rollen, die eine Welle im Film spielen kann, stark erweitert.

Da mehrere Ansätze zur Ozeangeneration beleuchtet werden sollen, wurden für diese Arbeit mehrere Filmbeispiele herangezogen, in denen der Ozean eine prominente Rolle spielt. Zusätzlich wird die Anwendung der beschriebenen Aspekte auf das Masterprojekt *Fish for Life* (Kerstin Blätterbinder, Lisa Gierlinger, Lukas Mathä und Victoria Wolfersberger. 2018), das zeitgleich mit dieser Arbeit entstand, behandelt.

Abstract

The following thesis addresses the depiction of the ocean in animated movies. This includes traditional 2D animation, as well as 3D animation, which has seen a steady growth in popularity for years. In addition to the techniques used to create said ocean, the narrative usage of water and waves in movies is also discussed.

The goal of this work is to give artists an understanding, which aspects are important in special effects generation, especially for large bodies of water. To achieve this, multiple parts of the animation pipeline of select films are analyzed. In relation to 3D animation, the work emphasizes the usage of ocean spectra. These records describe the movement of an ocean surface during certain conditions. Spectra are used in conjunction with simulation software, in order to create a widespread ocean surface. Understanding the used processes and techniques can also benefit artists, who are not invested in 3D animation. Another focus of this thesis lies in the role of waves in movies and the change in their portrayal during the last few decades. A wave can have an important narrative impact in a story. While they used to be portrayed as mindless forces of nature, modern movies sometimes depict them as their own character.

Multiple examples, in which the ocean plays an important role, are used to discuss the listed topics. One of these examples is the master project *Fish for Life* (Kerstin Blätterbinder, Lisa Gierlinger, Lukas Mathä and Victoria Wolfersberger. 2018), which was created in connection with this thesis.

Kapitel 1

Einleitung

In der modernen Filmindustrie spielt die Verwendung von Spezialeffekten eine enorm wichtige Rolle. Unmengen an Zuschauern strömen in die Kinosäle, nicht nur um interessante Geschichten zu sehen, sondern auch, um die neueste Filmtechnik zu bestaunen. Während in den frühen Tagen des animierten Films Effekte hauptsächlich zur Begleitung der Performance von Charakteren verwendet wurden, gewannen in den letzten Jahrzehnten die Effekte selbst immer mehr an Bedeutung. Die gewaltige Nachfrage an besseren und beeindruckenderen Spezialeffekten, hat für technische Innovationen und Entwicklung von neuer, spezialisierter Software gesorgt. Spezialeffekte werden in heutigen Filmen oft dazu verwendet, die Handlung voranzutreiben. Aufwendig simulierte Naturkatastrophen zwingen Protagonisten dazu, Helden zu werden, oder sie werden als Mittel zum Zweck verwendet, um ein höheres Ziel zu erreichen.

Die Darstellung von Wasser in verschiedenen Formen, wird im Bereich der Spezialeffekte oft als Königsdisziplin bezeichnet. Das hohe Maß an Bewegung und die große Anzahl an möglichen Sekundäreffekten, kann die Erstellung eines Wasserkörpers zu einer der aufwendigsten Aufgaben, auf dem Gebiet der Animation, machen. Besondere Bedeutung wird dabei der Erschaffung eines Ozeans zugeschrieben. Die Wassermassen, die sich bis an den Horizont erstrecken, bilden den Schauplatz einer Myriade an möglichen Szenarien. Ein stiller Ozean kann als Rückzugsort gesehen werden. Stürme, die über die See peitschen, reißen Schiffe mit sich. Gewaltige Wellen und Strömungen, stellen lebensgefährliche Hindernisse dar, die es zu überwinden gilt. Der technische Fortschritt in Hardware und Software hat dazu geführt, dass Künstler heutzutage mehr Optionen haben, wenn es um die Erstellung von Wassereffekten geht. Eine dieser modernen Techniken, ist die Verwendung von Ozeanspektren zur Erzeugung von Wellen für 3D-Animationsfilme. Diese Wellenspektren sind Datensätze, die mathematisch die Form des Meeres zu gewissen Zeiten und Situationen zeigen.

1.1 Fragestellung

Die Erschaffung eines Ozeans für Animation kann eine sehr herausfordernde Aufgabe sein. Für die Erstellung glaubwürdiger Ozeanbewegungen, ist es wichtig, ein Grundverständnis für die physikalischen Grundsätze von Wellenbewegungen zu besitzen. In großen Studios liegt es oft in der Verantwortung eines spezialisierten „Visual Effects“-

Teams, die erforderlichen Szenarien zu erstellen. Nichtsdestotrotz gibt es viele unterschiedliche Ansätze, um visuell ansprechende Ergebnisse zu erzielen. Einige davon eignen sich auch für kleinere Teams und Studios. Ausschlaggebend ist in der Animation von Wasser und Ozeanen meist die Kooperation zwischen Departements, die Festlegung eines Arbeitsablaufs und die Entscheidung für einen konsistenten Stil.

Fragen, mit denen sich die Arbeit befasst, betreffen, unter anderem, die narrative Bedeutung des Ozeans. Den Lesern dieser Arbeit wird ein Überblick gegeben, was mit Wasserkörpern und Wellen in der Animation vermittelt werden kann. Zusätzlich soll untersucht werden, wie wichtig Realismus für Wellenbewegungen ist und wie eine Stilisierung funktionieren kann. Zuletzt wird die Relevanz der Kooperation, die Rolle der betroffenen Departements und der Arbeitsablauf der Erstellung von Wassereffekten analysiert. Dabei wird ein genauer Blick auf die vollständige Pipeline geworfen, die eine Ozeanimation durchläuft.

1.2 Struktur der Arbeit

Der Bereich der Spezialeffekte ist sehr weitläufig und vernetzt. Die Regeln, zur Animation von Effekten, lassen sich zum Teil auf mehrere Teilbereiche übertragen. Diese Regeln, Richtlinien und Verbindungen werden im ersten Teil der Arbeit näher beleuchtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung des Verhaltens der Elemente, welche Bedeutung der Fluss von Energie hat und welche Rolle die Stilisierung spielt. Darauf folgend wird der Fokus auf den Ozean und die Wellen gelegt. Mithilfe einer aktuellen Arbeit des Filmkritikers Stefan Helmreich wird erörtert, welchen narrativen Nutzen Wellen besitzen.

In den weiteren Kapiteln werden die Pipeline für die 2D- und 3D-Animation näher beleuchtet. Hier findet man schließlich auch den Schwerpunkt der Arbeit in der Verwendung von Spektren zur Animation. Mithilfe von Beispielen werden unterschiedliche Arbeitsansätze behandelt, um Wasser in einem bestimmten Stil zu animieren und dabei Konsistenz zu bewahren.

Zum Abschluss wird ein Blick auf das Filmprojekt *Fish for Life* [32] geworfen. Der Film, dessen Handlung beinahe vollständig auf dem Ozean stattfindet, bot mehrere Herausforderungen, die es zu überwinden galt.

Kapitel 2

Wassereffekte

Der Bereich der Spezialeffekte umfasst viele verschiedene Aufgaben und Disziplinen. Die Grenzen, an denen das Gebiet der Animation stoppt und das der Spezialeffekte beginnt, verschwimmen immer mehr. Während in der Vergangenheit als „Spezialeffekt“ hauptsächlich die Darstellung der Elemente verstanden wurde, so dehnte sich der Bereich, mit Fortschreiten der Filmtechnik, immer weiter aus.

Für die 2D-Animation ist der Ablauf der Erstellung von Spezialeffekten deutlich simpler, als für 3D-Animation. Dies soll jedoch keinesfalls so gedeutet werden, dass 2D-Animation einen geringeren Arbeitsaufwand beinhaltet. Die Zeit, die investiert werden muss, ist letztendlich meist vom Stil und der Menge an Details abhängig.

VFX-Künstler fügen für 2D-Animationen die geforderten Effekte meist auf neuen Ebenen der Komposition ein. Dies beinhaltet sowohl Wasser und Feuer, als auch Licht und Schatten [27, S. 187–188]. Im Bereich der 3D-Animation haben Künstler Zugriff auf mehrere unterschiedliche Arbeitsprozesse. Effekte können nicht nur per Hand animiert, sondern auch vom Animationsprogramm simuliert werden. Damit beschreibt man einen aufwendigen Rechenvorgang, bei dem Effekte unter Beachtung von physikalischen Gesetzen erstellt werden.

2.1 Das Element Wasser

Die Elemente waren schon seit der Steinzeit ein wichtiger Teil gezeichneter Kunst, da sie die Menschen oft verwirrt und verängstigt haben. Naturgewalten wurden mystifiziert, da keine einfache Erklärung für sie vorhanden waren [9, S. 2]. Naturphänomene wurden meist durch imposante Malereien dargestellt, die ein Ereignis, wie eine Welle, mitten im Höhepunkt der Bewegung zeigten.

Eine der wichtigsten Inspirationen für Wasser- und Wellenanimationen ist das Werk *Die große Welle vor Kanagawa* [44] des japanischen Künstlers Katsushika Hokusai [27, S. 92]. Der Holzschnitt, der um 1830 entstand, zeigt eine gewaltige, brechende Welle und eine handvoll Fischerboote, die gegen diese ankämpfen (siehe Abb. 2.1). Das Werk besitzt weltweite Berühmtheit und war Inspiration für eine große Zahl anderer Kunstwerke, wie auch Animationen. Herausragend in der Darstellung der Welle ist ihre starke Aggressivität. Der Schaum in der Zeichnung bildet eine Vielzahl scharfer Spitzen, die als Klauen eines chinesischen Drachen gedeutet werden können [10, S. 31]. Zusätzlich wird

durch die harten Formen die Kälte des Wassers und die damit verbundenen Gefahren hervorgehoben. Die Welle scheint nach Booten zu „greifen“. Außerdem sieht man in der dargestellten Szene Japans höchsten Berg, den Mount Fuji. Dieser ist jedoch bewusst in der Mitte des Bildes platziert, um die Illusion zu geben, dass die gewaltige Kraft der Welle auch diesen Berg verschlingen kann.



Abbildung 2.1: *Die große Welle vor Kanagawa* - Holzdruck von Katsushika Hokusai ca. 1830 [44].

„Das Beeindruckende an der Arbeit von Hokusai war die meisterhafte Art und Weise, wie er so viele visuelle Informationen mit minimalen, einfachen, genial gezeichneten Linien vermitteln konnte.“ [27, S. 291]

Der Beginn der Darstellung von Wellen in filmischen Werken, ist in einer sehr dokumentarischen Form zu finden, doch diese ist essentiell für die Abbildung von Wellen in den darauffolgenden Jahren. Étienne Jules Marey - Entwickler der Chronophotografie und bekannt für seine Bewegungsstudien - erschuf in 1891 den Kurzfilm *La Vague* [35]. Das Werk, welches kürzer als eine Minute ist, zeigt eine Welle, die an der Küste Neapels bricht. Der Zweck des Films war, die Bewegungen einer Welle zu studieren und dokumentieren. Erschaffen wurde der Film durch eine Aneinanderreihung von Fotos, welche eine Weiterführung der Arbeit von Eadweard Muybridge darstellt. Muybridge hatte bereits die Bewegung von Pferden auf ähnliche Weise dokumentiert [11, S. 2].

Im Laufe der Filmgeschichte wurden Wellen auf unterschiedlichste Arten produziert. Spezialeffekte sind häufig ein guter Indikator dafür, in welchen technischen Bereichen zur Produktionszeit des Films gerade Fortschritte gemacht wurden. Während in frühen Filmen hauptsächlich mit Modellen gearbeitet wurde, griff man, sobald mehr Möglichkeiten zur Bearbeitung eines Films möglich wurden, zu diversen photographischen Tricks. Heutzutage ist der Bereich der Spezialeffekte vollständig von Computeranimation und physikalischen Simulationen dominiert [11, S. 2].

Obwohl ein großer Teil der Arbeit von einer Simulationssoftware übernommen werden kann, ist ein Verständnis für die physikalischen Abläufe bei der Bildung einer Welle essentiell, um die Ergebnisse kontrollieren und verbessern zu können.

Alle Wellen haben Bewegungen und Gegenbewegungen, die glaubwürdig aufeinander abgestimmt sein müssen. Teile derselben Welle können sich in unterschiedliche Richtungen bewegen und eine Art „pulsierenden“ Effekt erzeugen [9, S. 136].

Große Wellen sind meist das Ergebnis eines weit entfernten Sturms. Diese bilden oft die Grundbewegung der Wasseroberfläche und geben die generelle Fließrichtung vor. Kleine Wellen können hingegen durch lokale Winde erzeugt sein. Da die massive Energie, die in der großen Welle steckt, nicht von diesen lokalen Winden beeinflusst wird, kann es dazu kommen, dass sich große Wellen in eine Richtung bewegen, überlagerte kleine Wellen jedoch in eine vollkommen andere. Auch im Aussehen können sie sich stark unterscheiden. Während die großen Wellen breit und glatt sind, können die kleinen Wellen kurz und abgehackt wirken. Beim Animieren von Wasser ist es immer wichtig zu beachten, wohin das Wasser in seiner Bewegung verdrängt wird. Dies gibt vor, wie stark sich Wellen überlagern. Wasser ist konstant in Bewegung. Verschiedenste Formen können sich jederzeit neu bilden oder verschwinden [9, S. 24].

Es gibt meist einen Hauptwind, der die Richtung der Welle vorgibt und den „main swell“ bildet. Sekundärwellen werden von Winden aus anderen Richtungen erzeugt. Die harten Kanten an der Oberfläche werden meist durch Gegenwind gebildet, der gegen die Richtung des „main swell“ geht. Diese Art von Wellen ist sehr gefährlich für kleine Boote [10, S. 29].

Legen Wellen große Distanzen zurück, verlieren sie einen Teil ihrer Energie und ihre Formen werden weicher. Die Energie der Welle geht in ihrer Formation in eine rollende Wasserbewegung über. Dies bildet nach kurzer Distanz eine Kreisbewegung, in der sich Wassermassen zyklisch fortbewegen. Erreichen diese Wassermassen nun einen Ort mit höherem Meeresboden, wie etwa in Küstennähe, so werden sie zusätzlich nach oben gedrückt. Dies bewirkt mehr Energie im Aufschwung des Wasserzyklus, wodurch die Welle schließlich bricht. Je steiler der Anstieg des Meeresboden ist, desto turbulenter und gefährlicher ist die entstehende Welle. Näher am Strand sind die meisten Wellen bereits gebrochen und bewegen sich als aufgewühlte, kleinere Wellen hinfert. Direkt am Strand haben die Wellen das Meiste ihrer Energie verloren und breiten sich als flache Wassermassen aus [10, S. 25–34].

2.2 Sekundäreffekte

Ein Phänomen, das auf Ozeanoberflächen häufig auftritt, ist die Bildung von Schaum. Dieser Schaum, oder „foam“ im Englischen, wie er meist in Simulationsprogrammen genannt wird, tritt durch unruhiges Verhalten der Wasseroberfläche auf und kann das Aussehen derselben stark verändern. Schaum entsteht, unter anderem, durch brechende Wellen, Wasserspritzer, oder durch Hindernisse im Wasser. Eine Spur an Schaum wird auch durch das Fahren oder Gleiten von Objekten über das Wasser gebildet, da das Wasser aufgewirbelt wird, doch er muss auf eine Art erstellt und bewegt werden die, im Zusammenhang mit der dargestellten Wasserbewegung, Sinn macht.

Schaum kann nicht nur dazu verwendet werden, um Wasser einen realistischeren Look zu geben, sondern auch, um verschiedene Wellentypen, Wetterverhältnisse und auch Orte zu unterscheiden. Sogar verschiedene Arten von Booten erzeugen unterschiedliche Schaumtypen [3, S. 76].

Schaum tritt in unterschiedlichen Formen auf. Dabei macht es Sinn, sich Referenzmaterial zu suchen und zu entscheiden, welche Art von Schaum dem angestrebten Stil am besten entspricht.

In der Erzeugung von Schaum kann man auch einen Unterschied zwischen „stehen-

dem“ und „interaktivem Schaum“ machen. Stehender Schaum kann mit prozeduralen Funktionen und Noise-Texturen als Teil des Shaders produziert werden. Interaktiver Schaum hingegen, wird bewusst platziert und ist das Ergebnis von Interaktionen zwischen Wellen und Objekten [3, S. 76].

Ähnlich wichtig, wie die Generierung von Schaum, ist die Darstellung von „whitewater“. Mit diesem Begriff bezeichnet man Wassermassen, die durch schnelle und turbulente Bewegungen aufgewirbelt werden. Man findet sie, zum Beispiel, im inneren und an der Spitze einer brechenden Welle. Die Menge dieses Effekts gibt einer Welle eine starke Wirkung und explosionsartige Energie. Die Simulation von „whitewater“ ist meist sehr aufwändig, da sie abhängig von der Bewegung der Wassermassen ist [3, S. 83].

2.3 Stilisierung versus Realismus

Naturphänomene spielen eine wichtige Rolle im Film, sowohl in Animationen, als auch im Realfilm. Wenn es zu physikalisch korrekten Simulationen dieser Phänomene kommt, stehen Künstler oft einem Paradoxon gegenüber. Moderne Simulationen sind darauf ausgelegt, ein Ergebnis zu erreichen, das so realistisch wie möglich ist. Sie sollen garantieren, dass Betrachter eines Films ein plausibles Ergebnis sehen, welches auf ihren Erfahrungen in der echten Welt basiert. Dies widerspricht jedoch oft den Regeln, die in einer Filmwelt etabliert werden. Unterschiedliche Filmwelten können verschiedene Naturphänomene erzeugen. Es ist die Aufgabe des Art Directors, darauf zu achten, dass die erzeugten Effekte in die etablierte Welt passen und die Betrachter nicht aus dem Geschehen reißen. Animations- und Effektkünstler sehen sich daher oft dazu gezwungen, Animationen wieder und wieder neu zu generieren, um der Handlung und den Anforderungen des Regisseurs gerecht zu werden. Dabei können die Regeln der Simulationen oft ein Hindernis darstellen, das überwunden werden muss. Die Zeit, die für die Art Direction aufgewendet wird, kann in manchen Fällen sogar Zeit und Aufwand, die für die Entwicklung der Simulationstechnik benötigt werden, übertreffen [20, S. 1].

Animatoren bringen einen menschlichen Aspekt in die Technologie ein, die den Unterschied bei Animationsfilmen ausmacht.

„Die karikaturistische Darstellung des Realen, die durch Beobachten und Zeichnen erzielt wird, verwandelt das Banale in etwas Reales und Überzeugendes, wenn es animiert wird. Dies erreicht man jedoch nur, indem man das, was man sieht über die Realität hinaus in etwas übersetzt, das wiederum ein eigenes Leben und eine eigene Persönlichkeit besitzt.“ [27, S. 291]

Kapitel 3

Bedeutung von Wellen in Animation

3.1 Wellen als Mittel zur Narration

Wellen in Filmen können unterschiedliche Bedeutungen besitzen. Oft werden sie dazu verwendet, um die Beziehung zwischen der Menschheit, oder einem einzelnen Menschen, und einem Wasserkörper, meist dem Ozean, zu zeigen. Zu diesem Zweck wird die Welle als narratives Element eingesetzt, das die Handlung beeinflusst oder vorantreibt [11, S. 2].

In seinem Buch *The Anatomy of Story* teilt John Truby den Ozean strikt in zwei Teile. Für ihn bildet die Ozeanoberfläche die „ultimative“ zweidimensionale Landschaft. Es ist eine scheinbar endlose Fläche, an die Objekte gebunden sind. Da unter der Wasseroberfläche andere Regeln herrschen und Objekte und Charaktere frei schwebend im Raum sind, bildet der Unterwasser-Raum die „ultimative“ dreidimensionale Landschaft. Der Ozean kann jedoch auch als Teilung von Zivilisationen und Werten gesehen werden [24, S. 34]. Allen Dingen, die Unterwasser sind, wird eine gewisse Mysteriösität zugeschrieben. Alles, was vor dem Betrachter versteckt ist, kann als heraufziehende Bedrohung gesehen werden.

Der Autor Lynley Stace vergleicht eine Ozeanoberfläche mit einem Schachbrett. Die schiere Größe der Fläche wirkt oft abstrakt und surreal, obwohl sie völlig realistisch ist [47]. Auf dieser abstrakten Fläche kann sich im Film ein Kampf um Leben und Tod abspielen, der durch Einsamkeit verstärkt wird.

Die amerikanische Professorin für Film und Medien Kristen Whissel, prägte in ihrem Buch *Spectacular Digital Effects: CGI and Contemporary Cinema* den Begriff „Effekt-Emblem“ [25]. Mit diesem wird einem Spezialeffekt eine besondere Wichtigkeit, im Zusammenhang mit der Thematik und Handlung des Films zugeordnet [11, S. 8]. Als diese Embleme, haben Wellen in Filmen bereits mehrere Rollen erfüllt. Sie können sowohl ein pessimistisches, als auch ein optimistisches Bild zeichnen. Sie stehen für Kräfte außerhalb der Kontrolle der Menschen und sind Allegorien für Rache und soziale Ungleichheiten. Aber sie stehen auch für positive Veränderungen und Neuanfänge.

Der Philosoph Gilles Deleuze behauptet, dass man auch in einem stillen Bild fast immer eine Bewegung herauslesen kann. Dazu beschreibt er die entsprechenden Bilder als „movement-images“ und „time-images“. Eine Welle stellt hier einen besonderen Fall dar, da sie tatsächlich beides sein kann. Beim Anblick einer Welle kann man nicht nur

erkennen, in welche Richtung sie sich bewegt, sondern der Betrachter kann auch an der Wellenform erahnen, wie die Welle vor dem gezeigten Augenblick aussah und wie sie in Kürze aussehen wird. Die gegenwärtige Darstellung einer Welle enthält immer Spuren, sowohl ihrer Vergangenheit, als auch ihrer Zukunft. Wellen bieten sich daher an, die Fantasie des Betrachters anzuregen, da sie ein Bild für Veränderung sind [11, S. 3].

3.2 Die Katastrophenwelle

Wellen waren lange Zeit in Form einer Bedrohung für die Protagonisten, im Genre des „Katastrophenfilms“ zu finden. Filmgenres verhalten sich in ihrer Popularität selbst ähnlich einer Welle. Der Katastrophenfilm erfreute sich bis in die 70er Jahre sehr großer Beliebtheit. In den folgenden Jahren schien jedoch eine Marktsättigung erreicht zu sein, was dazu führte, dass weniger Katastrophenfilme produziert wurden. Erst in den 90er-Jahren wurde diese Art von Film allmählich wieder beim Publikum beliebter. Angetrieben vom Phänomen des „Y2K“ und einer, daraus resultierenden, Untergangsstimmung, wurden wieder mehr Filme mit Naturdesastern als Handlungsrahmen produziert [11, S. 2]. Durch die vermehrte Produktion dieser Filme, wurde auch die Entwicklung neuer Methoden zur Generierung der notwendigen Spezialeffekte stark vorangetrieben.

Katastrophenfilme stellen Wellen als etwas „unmenschliches“ dar. Sie sind eine massive, gedankenlose Kraft, die menschlichen Willen oder Kooperation testen soll. Eine Darstellung dieser Art von Wellen findet man oft in Filmpostern von Katastrophenfilmen [11, S. 4]. Meist sieht man eine gigantische Welle, kurz vor dem Zusammenstoß mit einer Großstadt. Das Poster drückt bereits Bewegung, Veränderung, Drohung und Gefahr aus.

Wellen werden im Film eine gewisse Moralität zugewiesen, sie sind „Boten“ an die Menschheit. Ein Kampf zwischen Welle und Mensch ist ein Kampf zwischen „chaotischer Form“ und „den künstlichen, doch reinen Strukturen der Menschheit“ [11, S. 8].

Frühe Katastrophenfilme, die in einer Zeit ohne Computeranimation entstanden, verwendeten echtes Wasser für Effekte. Schauspieler wurden mithilfe von großen Behältern vollgespritzt, Miniaturmodelle für Städte wurden angefertigt und unter Wasser gesetzt. In manchen Fällen wurde die Technik der „Superimposition“ dazu verwendet, um Bilder von Städten und eine ankommende Welle besser ineinander blenden zu können [11, S. 4].

Die Kombination aus echtem Wasser mit Mini-Versionen von Städten sieht jedoch meist sehr unrealistisch aus. Dies liegt daran, dass die Kräfte, die für die Bewegung der Wassermassen verantwortlich sind, nicht skalierbar sind, sondern konstante Werte besitzen, was wiederum dazu führt, dass die Bewegung auf die Betrachter mit einer unerwarteten Geschwindigkeit wirkt. Skaliert man reale oder simulierte Wellen etwa zu groß, so kann die Bewegung im Zusammenhang mit gezeigten Charakteren und Requisiten zu langsam aussehen.

Das Problem der Skalierung wurde durch die Verbreitung und Entwicklung von CG und Animations-Software etwas erleichtert. Animation erlaubt ein Experimentieren mit verschiedenen Skalierungen des Wassers, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen. Das Wasser und die dargestellte Welt können leichter unabhängig voneinander bearbeitet und später als ein Kompositionsbild zusammengefügt werden, um mit verschiedenen Skalierungen eine Änderung in der Narrative zu erreichen [6, S. 127].

Filmemacher können sich heutzutage einer großen Zahl an Simulationen bedienen, um Wellen, mit den physikalischen Gesetzen der Natur, korrekt darzustellen. Diese Gesetze können jedoch genauso gut ausgehebelt werden, um darzustellen, wie eine Welle aussehen könnte, indem man die Limitierungen der verwendeten Wellengleichungen aufhebt oder bearbeitet, oder indem man Teile der Wellengleichung komplett aus der Simulation löscht.

Wenn eine gigantische Welle auf einen Menschen zu rast, so kann dieser auf unterschiedliche Weise reagieren. Er kann versuchen zu flüchten, sich ihr entgegenstellen oder sich den Wassermassen ergeben. Die Reaktion der Menschen steuert dabei das Verhalten der Welle, da die Welle mit gewissen narrativen Elementen synchronisiert werden muss. Den Personen im Film muss Zeit für eine Reaktion gegeben werden. Diese Zeit hätten sie in einer ähnlichen Situation im echten Leben vermutlich nicht. Filme müssen jedoch zeitlichen Raum für Gesichtsausdrücke, Fluchtversuche oder Abschiede der Betroffenen bieten [11, S. 5].

Stefan Helmreich behauptet, dass Wellen immer als eigener Charakter zu behandeln sind. Sie sind eine narrative Kraft, die einem Individuum entgegnet und dieses testet. Der Charakter der Welle steht dabei in direktem Zusammenhang mit ihrer Größe. Große Wellen besitzen, aufgrund ihres Zerstörungspotenzials, immer einen bedrohlichen Faktor. Das Behandeln von Wellen als Charaktere trifft nicht nur in narrativer Ebene zu, sondern auch im Animationsprozess. Wellen werden oft mit einem Rig erstellt, der ähnlich zu den Animationsskeletten anderer Charaktere, wie Menschen oder Tieren, ist. In manchen Produktionen wird daher die Animation der Wellen von denselben Künstlern übernommen, die auch Menschen, Tiere oder Kreaturen animieren [11, S. 5].

Die Form der Welle und die Bewegung der Kamera sind wichtig für die Wahrnehmung der Zuschauer. Eine Kamera, die sich durch eine Welle unter die Wasseroberfläche bewegt, kann zur Erzeugung einer bedrohlichen Atmosphäre verwendet werden, da dem Zuschauer das Gefühl gegeben wird, von der Welle überrollt zu werden. Der flüssige Übergang zwischen Luft und Wasser ist dank digitalem Film leicht möglich und bietet neue narrative Möglichkeiten. Die Verbindung der Welten über und unter der Wasseroberfläche wird damit verstärkt [11, S. 6].

In einer großen Zahl an Filmen sind Wellen meist nicht vollständig an die Gesetze der Realität gebunden. Oft werden sie als eine Mischform aus Realität und Fantasie behandelt. Das Verhalten dieser kann für narrativ wichtige Momente angepasst werden, um gewünschte Situationen zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist das Phänomen, dass Lebewesen im Film oft versuchen vor einer ankommenden Welle zu flüchten. Während dies in der Realität aufgrund der enormen Geschwindigkeit der Wassermassen unmöglich ist, schaffen es im Film die Menschen oft noch, durch die Flucht Zeit zu gewinnen, oder Schutz zu finden. Die Narrative übertrumpft in diesem Fall die Gesetze der Physik und Hydrodynamik. Die Zuschauer akzeptieren dieses Verhalten meist, ohne die Bewegung der Welle zu hinterfragen, da sie mehr an das, durch die Manipulation der Welle, entstandene Drama gebunden sind [11, S. 8].

Eine Welle ist immer in Bewegung. Sie kann nicht stehen bleiben, was den Zuschauern bewusst ist. Dank den Methoden der Computeranimation, kann jedoch auch mit dieser Tatsache bewusst gearbeitet und Erwartungen der Zuschauer widerlegt werden. Wellen, die sich doch verlangsamen, stellen immer eine Drohung vor dem eventuellen Einbruch dar und können daher als weiteres Mittel zum Spannungsaufbau eingesetzt

werden. Dies wird auch von Kristen Whissel in ihrer Einteilung der Effektembleme bestätigt. Wellen sind für sie eine Art von Emblem, das zur Repräsentation eines drohenden Endes verwendet wird. Dieses Ende kann sich auf eine Zivilisation, eine Ära, oder die Menschheit als Ganzes beziehen. Doch auch die Stimmung eines Neubeginns kann damit vermittelt werden [11, S. 8].

Die Vertikalität von großen Wellen ist ebenfalls bedeutend für ihre narrative Wirkung. Große, rapide Veränderung bringen Chaos und einen Machtkampf in die Szene. Eine große Zahl an Filmen besitzt eine horizontale Narration, was bedeutet, dass Handlungen in der Horizontalen von links nach rechts geschehen. Eine Welle kann diese Handlung mit ihren vertikalen Bewegungen aus den Anker bringen und Verbindungen brechen [26, S. 25].

3.3 Zeitlicher Wandel und Personifikation des Ozeans

Stefan Helmreich stellt in seiner Arbeit die Theorie auf, dass Wellen als Repräsentation für Möglichkeiten, Limitationen und Entwicklungen der Filmindustrie gesehen werden können. Hierfür zieht er die Entwicklung der Filmlandschaft der letzten Jahrzehnte her. In den 60er Jahren wurde das Kino durch die weite Verbreitung des Fernsehers bedroht. Das Verlangen, sich vom Fernsehen abzuheben, führte in der Filmindustrie zu einer rapiden Entwicklung neuer Technik und Spezialeffekte. Diese Ereignisse wiederum ermöglichen eine realistische Darstellung der Elemente und somit auch des Ozeans. In den letzten Jahren werden neue Technologien wie Computerspiele und Virtual Reality immer mehr zu Konkurrenten der traditionellen Filme. Die Änderung heutzutage kommt jedoch nicht durch eine enorme Steigerung in der bildlichen Darstellung, sondern durch eine Änderung der Narrative. Filmemacher überlegen sich neue Arten, die verbesserte Darstellung der Elemente zu verwenden und damit einzigartige Charaktere zu kreieren, um neue und interessante Geschichten zu erzählen. Helmreich spricht dabei von einer „Neu-Erfindung der Welle“ als kontrollierbares und zum Teil vermenschlichtes Element [11, S. 22].

Ein bedeutendes Argument, das in Helmreichs Arbeit genannt wird, ist die Änderung der Rolle von Ozeanwellen mit dem technischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte. Mit modernen Methoden, kann das Element Wasser in mehr Filmrollen schlüpfen. Durch die Arbeit mit Computermethoden, hat sich auch die Möglichkeit zur Darstellung von Fantasy-Elementen erweitert. Indem sich die Effekte vom Material „Film“ befreit haben, gab es mehr Möglichkeiten zur Erschaffung von Bildern, die physikalisch nicht korrekt sein müssen [11, S. 2–4].

Die Wellen des Ozeans können auch gezähmt werden. Diese Manipulation der Naturkräfte, oder auch das „Anfreunden“ mit Menschen ist ein wiederkehrendes Thema in Animationsfilmen, und im Speziellen in Kinder- und Familienfilmen [11, S. 17]. Ein Beispiel hierfür ist der japanische Animationsfilm *Gake no Ue no Ponyo* [47], in welchem sich Wellen manchmal wie Tiere verhalten. Einzelne Wellen sind eigene Charaktere, die gelegentlich physiologische Merkmale solcher besitzen. So kommt es vor, dass Wellen im Film unter gewissen Umständen „Augen“ bilden, wodurch sie sofort von Zuschauern aller Altersgruppen als ein eigener Charakter erkannt werden. Wasser ist eine gewaltige Naturkraft, die jedoch in Harmonie mit Menschen existieren kann, solange diese es schaffen, sich mehr an die Natur anzupassen, anstatt sie zu verformen und verdrängen

zu wollen. In Filmen, die diese Thematik aufgreifen, haben Kinder oft ein anderes Bild der Natur, als Erwachsene. Beispiele dafür findet man in den Charakteren von *Gake no Ue no Ponyo* oder *Die Melodie des Meeres* [39].

Die Animation von Wellen als Charaktere ist in den letzten Jahren populärer geworden, was auf die besseren Animationstechniken zurückzuführen ist. Die Verwendung von Wasser und Wellen als narrative Elemente, hat sich durch neue Techniken enorm erweitert. Als solches erfreut sich auch diese Art des Animationsfilms, der auf ein jüngeres Publikum ausgerichtet ist, größerer Beliebtheit [11, S. 17].

In Disneys *Moana* [36] wird dem Ozean ebenfalls sowohl ein eigener Charakter und Willen, als auch eine eigene Persönlichkeit zugeschrieben. Der Ozean bildet zur Manipulation seiner Umwelt animierte Gliedmaßen, die zum Schutz und Nutzen der Protagonistin des Films verwendet werden. Auch ein Gesicht wird im Laufe des Films von der Wasseroberfläche gebildet, was dem Wasser noch einmal mehr an Bedeutung gibt. Manche Wellen im Film widerstehen Schwerkraft und Zeit. Da jedoch auch von den Charakteren im Film dies mit einem gewissen Staunen und Unglauben reagiert wird, reißt es den Zuschauer nicht aus der Handlung des Films heraus. Durch die Anerkennung eines fantastischen Ereignisses im Film durch die Charaktere, wirkt die aufgebaute Welt für außenstehende Betrachter glaubwürdiger. Ein plötzliches Brechen der Naturgesetze, ohne zuvor die Regeln der Filmwelt zu erklären, hätte dazu geführt, dass die Zuschauer möglicherweise mehr Elemente der Handlung in Frage stellen. Die Welle wird nicht mehr nur als Element betrachtet, sondern als Charakter, der über den Naturgesetzen steht [11, S. 18]. Die Anthropomorphisierung des Wassers stellt das Gegenstück zu Katastrophenwellen dar. Wellen können somit, je nach Wunsch oder Absicht der Filmemacher, als lebendiges Wesen, oder als elementare, unzählbare Kraft gesehen werden.

Kapitel 4

Wasser in 2D-Animation

4.1 Entwicklung

Das künstlerische Feld der Animation machte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gewaltige Fortschritte. Obwohl jede Region ihre eigenen Techniken, Stile und Werke kreierte, gilt Walt Disneys 1923 gegründete Firma als Vorreiter in neuen Technologien und im kreativen Erzählen von Geschichten. Die Erschaffung von Effekten war dabei nur einer von vielen Bereichen, in denen das Animationsstudio aus Kalifornien glänzte. Handgezeichnete Effekte für Animation wurden von Disney ab den 30er Jahren populärisiert und auf ein völlig neues Niveau gebracht [9, S. 1].

Der Comiczeichner Winsor McCay illustrierte in seinen Werken anfangs des 20. Jahrhunderts eine stilisierte, jedoch physikalisch realistische Darstellung von Naturelementen. Obwohl es noch keine ausgereifte Möglichkeit zur „Frame by Frame“-Analyse der Bewegungen gab, schaffte es McCay, ein Bild der Elemente zu produzieren, das auf den Betrachter glaubwürdig wirkte. Étienne-Jules Mareys *La Vague* [35] hielt zwar die Grundbewegungen einer brechenden Welle bereits 1891 erstmals in einem filmähnlichen Format fest, zur genauen Studie der Details, die für die Animation notwendig sind, war dies jedoch noch nicht geeignet [9, S. 5].

Die Animation von Effekten war zu Beginn der Animationsgeschichte von geringer Bedeutung. Der Fokus der Studios lag gänzlich auf dem Animieren der Charaktere und dem Erzählen einer Geschichte. Effekte wurden nur in seltenen Fällen hinzugefügt und meist von Leuten animiert, deren Stärken in der Problemlösung in der Produktion lag.

„The men and women who solved these problems were skilled craftspeople of diverse background who had been thrown together in the catchall department, special effects.“ [9, S. 7]

1930 hatte Disney nur zwei Effekt-Künstler angestellt. Einer davon war Ugo D’Orsi, welcher die Wassereffekte in Disneys *The Sorcerer’s Apprentice* [31] animierte. Nach Veröffentlichung und Erfolg des Films, wurde schließlich erkannt, wie wichtig gute Effekte für einen Film sein können und wie ein Studio von Spezialisten in diesem Feld profitieren kann. In den „Goldenen Jahren der Animation“, womit die Zeitperiode von 1935 bis 1941 beschrieben wird, stieg die Zahl an Effektkünstlern rapide an. Gegen Ende der 30er waren bei Disney schließlich um die 100 Künstler für Effekte beschäftigt

[9, S. 6]. Dieser starke Anstieg an Personal zeigt nicht nur, wie stark an Bedeutung die Effektanimation gewonnen hat, sondern auch, wie viel Aufwand hinter professionell produzierten Effekten stehen kann.

Experimente und Beobachtungen sind zwei bedeutende Aspekte für das Feld der Spezialaffektanimation. Künstler, die sich diesem Feld widmen, zeigen ein Interesse an Natur und den Elementen. Das Untersuchen und Verstehen derselben ist essentiell für die Arbeit in diesem Bereich. Die Animation von Spezialeffekten hat zwei Seiten. Die eine Seite ist die romantisierte, in der den Elementen „Leben“ eingehaucht wird. Die andere Seite jedoch besteht aus unzähligen Stunden an harter und genauer Arbeit, um die gewünschten Effekte in einem erforderlichen Detailgrad zu erzielen [9, S. 9].

Heutige Animationsfilme sind großteils abhängig von Animationsprogrammen, die den Künstlern einen Teil der Arbeit abnehmen. Da die erfolgreichsten Filme der letzten Jahre allesamt vollständig auf Computern und meist in 3D animiert wurden, wird die Zukunft von klassischer Animation immer wieder in Frage gestellt. Die effiziente Verwendung der verwendeten Programme geht jedoch in den meisten Studios immer noch Hand in Hand mit der Erfahrung von Künstlern, die Erfahrung in klassischer Animation besitzen [9, S. 11–12].

4.2 Umsetzung

Essentiell für die Animation von Effekten, ist ein Verständnis für die Energien, die auf sie wirken. Im Fall von Wasser sind dies unter anderem Schwerkraft, Wind und die Kollision mit Objekten, die den Weg des Wassers kreuzen. Letzteres führt zu Sekundäreffekten wie Wirbel, Blasen, Schaum und Spritzern [9, S. 27–28]. Bevor man beginnt, den Effekt auszuarbeiten, ist es ebenso wichtig die Richtung der Energien zu erarbeiten. Besonders in der Arbeit mit Wasser ist dies sehr wichtig, da Wellen ein direktes Produkt von Wind sind.

Zusätzlich soll früh in der Produktion etabliert werden, wozu ein Effekt verwendet werden soll. Meist werden sie dazu benutzt, einer Szene zusätzliche Details zu geben, oder einen Shot aufzuhübschen. Ein simpler Effekt sollte allerdings niemals eine Charakteranimation überschatten, wenn diese wichtiger für das Gesamtbild ist [9, S. 44].

Spezialeffekte müssen der Stilrichtung des Films folgen, damit das Gesamtbild der Charaktere, Hintergründe und Effekte zusammenpasst. Im Idealfall soll ein Film so wirken, als wäre er von einem einzigen Künstler kreiert worden. Eine Stilisierung der Effekte ist wichtig, nicht nur um die Effekte an den Rest des Films anzupassen, sondern auch um mit einem sinnvollen Detailgrad zu arbeiten. Eine große Welle enthält eine immens große Anzahl an kleinen Details, die unmöglich – in einem zeitlich begrenzten Rahmen – zu zeichnen wären. Das Vereinfachen von Effekten und das Anpassen an die Charaktere und die dargestellte Welt, kann eine sehr schwere Aufgabe sein [9, S. 47].

„In representing our effects through simplified versions of reality, we are free to focus our attention on the forces underlying the effects, the patterns in motion, the timing and the physics. Details can always be added once our effects animation is working well in all these respects, but if we get lost in the details, we will have lost the natural physics of our effects animation.“ [9, S. 48]

Spezialeffekte in 2D-Animation entstehen meist durch eine schrittweise Annäherung an die gewünschte Form. Effektkünstler beginnen mit der Silhouette des Effekts als Basis, damit sie die Perspektive festlegen können. Auf diese Basis werden Schritt für Schritt erst grobe, danach feine Details hinzugefügt, bis das gewünschte Ergebnis erreicht wird. Als letzter Schritt wird der Effekt als sauberes Ganzes noch einmal neu gezeichnet, nach Vorlage der vorangegangenen Schritte. Hierbei ist es wichtig, dass im Stil des Endprodukts gearbeitet wird [9, S. 58].

Ein Ozean in einer 2D-Animation, besteht meist aus mehreren Ebenen, die in der „Compositing“-Phase zusammengefügt werden. In der Vergangenheit waren die einzelnen Ebenen alleinstehende Zeichnungen, die auf durchsichtigen Folien übereinander gelegt wurden. Heutzutage entstehen diese Ebenen meist beim Animieren in Form von Layern in Animationsprogrammen [9, S. 92].

Das Aussehen des Wassers ist vorgegeben durch die Reflexion und Durchdringung des auftreffenden Lichts. Eine Änderung der Oberflächenstruktur führt zu einer Änderung in Reflexion und Durchdringung. Die Durchdringung macht sich in Form von hellen Linien am Boden des Wasserkörpers und an den „Ripples“ bemerkbar. Diese Teile des Effektes müssen in der richtigen Reihenfolge übereinander gelagert werden, um einen korrekten Effekt zu bekommen. Hierbei ist es wichtig, das Gesamtbild in simple Formen herunterzubrechen, um von der Menge an Details nicht überwältigt zu werden. Die Vereinfachung von Wasser hat den Vorteil, dass Effekte schneller und billiger zu produzieren sind [9, S. 104].

„It is important to keep in mind always, that while we do learn a great deal from observing reality, it is the special effects animator’s magic to be able to exaggerate and thus almost improve upon nature’s staggering beauty.“ [9, S. 92]

Während es in der Animation von Charakteren und Objekten immens wichtig ist, die Formen immer gleich zu halten, liegt in der Animation von Wasser der Fokus beim Volumen. Solang das Volumen des Wassereffektes von einem Frame zum nächsten eine plausible Ähnlichkeit aufweist, können sich die Formen auch frei und inkonsistent bewegen [10, S. 150–152].

Eine simple Animation von Wasser in 2D kann in zwei Schritten erzeugt werden. Zuerst muss man sich für eine Farbe entscheiden, die als Hintergrund für das Wasser dient. Auf diesem Hintergrund wird daraufhin eine Reihe an animierten Formen gelegt, um das Gefühl der Bewegung von fließendem Wasser nachzuahmen. Diese Formen können realistisch, stilisiert oder sogar abstrakt sein, je nach angestrebtem Look oder gegebener Situation. Die gewählten Formen müssen konsistent in eine Richtung fließen und einem festgelegten Handlungspfad folgen. Die animierten Formen können auch in einem Loop verwendet werden, was sich speziell bei begrenzter Zeit oder beschränktem Budget anbietet. Da Wasserbewegungen jedoch nie mechanisch wirken sollen, ist es meist notwendig mehrere Loops zu produzieren und diese in einer zufälligen Reihenfolge zu verwenden, um keine Wiederholungen zu erkennen. Sind die Grundformen animiert, so sollten sie in einer dunkleren Variante der Hintergrundfarbe eingefärbt werden. Sollte man stürmisches Wasser erzeugen wollen, so kann man mehr Animationslayer verwenden, um zusätzliche Wassereffekte zu generieren. So kann etwa ein weiterer Layer dazu benutzt werden, um die weißen Spitzen von härteren und größeren

Wellen, die sogenannten „whitecaps“, zu zeigen. Animierte „whitecaps“ sollten auf einem extra Layer erzeugt werden. Auf diese Weise kann man unterschiedliche Varianten der Wellen und „whitecaps“ miteinander mischen, um mehr Varianz zu erzeugen, oder ungewollte Wiederholungen auf einer Ebene zu maskieren. Ein weiterer Layer bietet auch die Möglichkeit, wieder mit verschiedenen Helligkeitswerten zu experimentieren, da ein allzu helles weiß vermutlich zu stark wäre. Diese Schritte müssen zwar je nach Szene angepasst werden, doch sie bieten sich im Grunde für alle Formen von fließendem Wasser an. Dies beinhaltet Bäche und Flüsse, aber auch fließendes Wasser aus einem Wasserhahn und reißende Wasserfälle [28, S. 148].

Ein weiteres Element, das charakteristisch für die Darstellung von Wasserkörpern ist, ist die Reflexion von Licht und die Spiegelung von Himmelskörpern auf der Wasseroberfläche. In traditioneller Animation kann dies erreicht werden, indem Ebenen mit unterschiedlichen weißen Flächen an den Reflexionsstellen angefertigt werden. Der gewünschte Effekt einer glitzernden Reflexion wird schließlich dadurch erzielt, dass die erstellten Flächen ineinander überblendet werden. Die Geschwindigkeit kann dabei dadurch angepasst werden, indem eine Reflexion für mehr oder weniger Frames an Wasser verwendet werden. Auch hier kann mit mehreren Ebenen gearbeitet werden, um noch eindrucksvollere Ergebnisse zu erreichen. Die verschiedenen Ebenen können auch unterschiedliche Geschwindigkeiten besitzen, um die Wiederholungen noch besser zu verdecken. Sollte man die Oberfläche eines Sees oder des Meeres darstellen wollen, kann man eine ähnliche Technik verwenden, wobei sich dies eher für kleine, unregelmäßige Wellen anbietet. Mehrere Ebenen an Wellen werden gezeichnet und schließlich nacheinander, in der gewünschten Geschwindigkeit abgespielt oder überblendet. Diese Technik bietet sich auch bei einer kleinen Anzahl von Ebenen an [28, S. 148].

Wenn wir Wasser betrachten, ist ein Großteil von dem, was wir sehen das Ergebnis von Reflexionen und der Durchdringung von Licht. Wasserkörper sind wie Spiegel. Was um sie herum geschieht und zu einer Störung der Oberfläche führt, kann komplizierte, neue Formen erschaffen. In der Animation eines 3D-Films werden diese Prozesse dem Künstler meist von der Software abgenommen. Der Künstler muss lediglich eingeben, wie stark die Reflexion und Durchdringung sein soll, während der Computer die Berechnungen übernimmt und das Ergebnis anschließend darstellt. Für einen 2D-Film ist dies weitaus aufwendiger. Die Künstler müssen selbst die Szene auf Stellen analysieren, in welchen diese Prozesse dargestellt werden müssen. Dies ist einer der wichtigsten Gründe dafür, das Aussehen des Wassers zu vereinfachen und zu stilisieren. Hierbei darf jedoch nicht vergessen werden, alle Elemente, die für die Abbildung von Wasser notwendig sind, auf gleiche Weise zu bearbeiten, um zu garantieren, dass das Wasser weiterhin glaubwürdig ist, und keine Diskrepanzen entstehen. Der Detailgrad ist entscheidend, da man herausfinden muss, wie viel Wasserdetail für den gewünschten Look wirklich braucht [10, S. 127–129].

Traditionelle Animation stand, vor der Entwicklung von Animationssoftware, vor einem großen Problem. Figuren und Objekte, die gespiegelt werden sollten, mussten nicht nur umgedreht, sondern auch auf sinnvolle Weise aufgebrochen werden, um eine glaubwürdige Verzerrung zu erzeugen. Diese Verzerrung ist üblicherweise proportional zur Unruhe des Wassers. Je rauer das Gewässer, desto deutlicher die Weißflächen in der Reflexion. Regen kann auf eine ähnliche Art wie Wind behandelt werden. Regen wird in Filmen üblicherweise eher als Schleier wahrgenommen. Nur selten wird dem

Zuschauer die gewaltige Masse an Tropfen klar. Daher kann eine kleine Anzahl an Bildern mit Tropfen erstellt werden, die zufällig nacheinander abgespielt werden, um den Effekt von Regen zu erzeugen. Der Effekt kann dadurch verbessert werden, indem man mehrere Ebenen an Regen benutzt. Jede Ebene sollte dabei etwas andere Texturen und Farben aufweisen. Zusätzlich verstärken kann man den Effekt dadurch, indem man den Hintergrund, bei besonders starkem Regen, aus dem Fokus bringt [28, S. 149].

4.3 Der Drang zur Repetition

Beim Zeichnen von Natur ist es wichtig, gegen den menschlichen Drang für Ordnung und Wiederholung vorzugehen. Ein Beispiel für diesen Ordnungszwang findet man in der vereinfachten Darstellung von Elementen. Beim Zeichnen eines Ozean kann es passieren, dass man Wellen als repetitive Spitzen darstellt, die völlig homogen wirken, während ein realistischer Ozean beinahe vollständig unregelmäßig ist. Um Effekte glaubwürdig zu erstellen, müssen verschiedene Richtungen und Geschwindigkeiten übereinander gelagert werden. Man kann den Prozess auch als Choreographie sehen, bei der die Bewegungsabläufe verschiedener Teile des Effekts gesteuert werden, um unerwünschte Wiederholungen zu vermeiden und den Blick des Betrachters zu lenken. Diese Wiederholungen werden auch „Twinning“ genannt [9, S. 33–39].

Menschen neigen dazu, Wiederholungen in vielen Bereichen der Kunst zu verwenden. Dies beinhaltet, unter anderem Musik und Design, aber auch Architektur. Wellen können auch in dieser, sich wiederholenden, Form dargestellt werden, allerdings wirkt es meist sofort unrealistisch [10, S. 44].

Bei Effekten ist die Varianz ein maßgeblicher Faktor für die Wirkung des Endproduktes. Die Elemente bewegen sich nie gleichmäßig, sondern schwanken immer wieder in Stärke und Richtung. Eine Animation kann unglaublich wirken, wenn zu lange die selben Einflüsse verwendet werden [28, S. 144].

Zur Erstellung interessanter Formen, ist die Vermeidung von vollständiger Symmetrie wichtig. Asymmetrische, aufgebrochene Effekte, geben ein interessanteres Gesamtbild. Dies wird besonders deutlich, wenn der Effekt stilisiert ist, da in diesem Fall weniger Details vorhanden sind, die eine eventuelle Asymmetrie verursachen könnten [9, S. 52–53].

Parallele Linien sind ebenfalls zu vermeiden. Parallelität findet man in der Natur kaum vor, wodurch ein Effekt mit vielen parallelen Linien schnell artifiziell wirkt. Durch die Versetzung von Linien kann man dem Effekt auch mehr Dynamik und Volumen geben [9, S. 54].

Keine zwei Wellen sind gleich. Wie das in Animation dargestellt wird, ist meist von der Distanz zum Wasser abhängig. Von großer Distanz können die Unterschiede zwischen Wellen geringer sein, doch wenn man Wellen im Detail darstellt, so muss man auch das Chaos, das an der Oberfläche herrscht, darstellen [10, S. 45].

Symbole für Wasser sind meist einfache, sich wiederholende Linien. Diese sind zwar leicht erkennbar, allerdings stellen sie Wasser, aufgrund von Wiederholungen nicht korrekt dar. Antike Symbole sind dafür gedacht, dass man schnell und unabhängig des kulturellen Hintergrundes versteht, worum es sich bei dem Dargestellten handelt. Nichtsdestotrotz können diese Symbole die Basis für gezeichnetes, detaillierteres Wasser bilden. Man muss nur die Wiederholung aufbrechen und die Basis erweitern [10, S. 47–48].

Oft ist es hilfreich, bei der Animation von Effekten mit den Grundformen des erzielten Effekts zu arbeiten. Diese Grundform kann mithilfe von Symbolen etabliert werden. Bei der Detaillierung müssen dann chaotische Elemente hinzugefügt werden. So wie beim Zeichnen von menschlichen Figuren ist es auch bei Wasser wichtig, die Essenz der Bewegung und der Form zuerst festzuhalten. Erst danach sollte man zu den Details und zum Shading übergehen [10, S. 49].

Kapitel 5

Wasser in 3D-Animation

5.1 Simulation von Wasser

Seit Jahren ist die physikalisch korrekte Simulation von Wasser eine Technik, die regelmäßige Verwendung im Bereich der 3D-Animation findet. Die Werkzeuge, die es dafür gibt, sind sehr vielfältig. Sowohl kommerzielle, als auch „open-source“ Anwendungen, besitzen Möglichkeiten, um Flüssigkeiten wie Wasser, nicht nur zu animieren, sondern auch zu simulieren. Manche Simulationen stützen sich dabei auf Flüssigkeitsdynamik-Daten, die über mehrere Jahrzehnte hinweg angesammelt wurden. Die bei den Berechnungen verwendeten Formeln sind ebenfalls sehr unterschiedlich, da verschiedene Ingenieure, Techniker und Programmierer über viele Jahre hinweg unterschiedliche Methoden entwickelt haben, die in ihren Augen die nützlichsten Ergebnisse erzielen. Im Kern jedoch, lassen sich die gleichen Grundbausteine in jeder Simulation finden.

Während Wissenschaftler in der Vergangenheit noch, zum Teil frei gewählte, Daten verwendeten, die bei Anwendung eine Oberfläche einer Flüssigkeit zwar glaubwürdig, allerdings nicht realistisch darstellte, so greift man heutzutage meist auf empirische Daten zurück. Zusätzlich zu einer Handvoll von bestimmten Formeln zur Flüssigkeitsbeschreibung, treten verschiedene Datensätze in Kraft, die man „Ozeanspektren“ nennt.

Die Simulation von Wasser kann ein angemessener Ausgangspunkt für Animationsprojekte sein, die Szenen auf oder am Wasser beinhalten. Wellen, die von diesen Simulationen generiert werden, sind jedoch häufig nicht sofort für die Szene geeignet. Aufgrund dessen ist ein Grundverständnis für die Dynamik der Wellen und der verwendeten Fachbegriffe wichtig, um die Simulation auf eine Weise zu bearbeiten, die sie für die Animation nützlich macht.

5.2 Definition und Entwicklung

Neben dem Bereich der Animation, ist das Modellieren und Simulieren von Flüssigkeiten auch ein wichtiger Teil des Ingenieurwesens und diverser wissenschaftlicher Disziplinen [2, S. 3]. Angewandte Simulationen basieren auf einem mathematischen Framework, bestehend aus diversen Gleichungen aus dem Gebiet der Strömungsmechanik. Zu den wichtigsten Gleichungen dieser Disziplin gehören, unter anderem, die „Navier-Stokes“-Gleichungen, mit welchen der Fluss von Flüssigkeiten beschrieben wird und die Fourier-

Analyse im Zusammenhang mit Wellenfrequenzen. Bezogen auf das Ingenieurwesen, spielt das Aussehen der simulierten Flüssigkeiten nur eine Nebenrolle. Es gibt viel Literatur zur Berechnung der verwendeten Gleichungen und zu ihren Anwendungsbereichen. Meist ist die Wahl des „solvers“, der programmierten Umsetzung der Gleichungen, abhängig vom betrachteten physikalischen Problem und der verfügbaren Rechenleistung.

In der Computeranimation findet man eine umgekehrte Situation vor. Interessante und ästhetisch ansprechende Formen sind wichtiger als physikalisch akkurates Verhalten, welches in manchen Fällen sogar komplett vernachlässigt werden kann. Frühe Formen von Modellen zur Animation von Flüssigkeiten wurden daher hauptsächlich nach dem Aussehen entwickelt, statt nach physikalischer Genauigkeit. Anfängliche Strömungsmodelle wurden aus einfachen Polynomen entwickelt, welche benutzt wurden, um Partikel oder einfache Geometrie zu animieren [48, S. 1].

Modernere Animationen greifen jedoch zunehmend zu physikalisch korrekten Wellenmodellen. Diese sind eine große Unterstützung bei der Entwicklung und Implementierung von Werkzeugen zur Simulation von Flüssigkeiten, da sie viel realistischere Ergebnisse liefern. Diese realistische Darstellung von Flüssigkeiten wie Rauch, Wasser und Feuer, sind für viele der atemberaubenden Filmmomente der letzten Jahre verantwortlich. Typischerweise benötigen diese Simulationen jedoch hohe Rechenleistung und lange Renderzeit auf spezialisierten Renderfarmen. Obwohl es inzwischen auch Anwendungen und Werkzeug für Einzelbenutzer gibt, so nimmt die Simulationsarbeit auf einem einzelnen Gerät deutlich mehr Zeit in Anspruch. Im Gegensatz zu Keyframe-Animation, erlaubt das Arbeiten mit Simulationen eine vergleichsweise einfache Erstellung von Flüssigkeitsbewegungen. Zusätzlich nehmen Simulationen den Künstlern das Berechnen von Kollisionen und virtuellen Kräften ab. Andererseits wiederum, geben die Künstler durch das Verwenden von Simulationen einen Teil der Kontrolle über die Flüssigkeit ab [48, S. 1].

Die Bewegung einer Flüssigkeit ist oft dargestellt durch die lokale Geschwindigkeit als Funktion von Position und Zeit. In Computeranimation wird von Flüssigkeiten meist angenommen, dass diese „inviscid“ und „incompressible“ sind, was bedeutet, dass sie sich mehr wie Wasser als Öl verhalten, und, dass sich das Volumen nicht über Zeit ändert. Diese Annahmen sind essentiell für die verwendeten Bewegungsgleichungen [16, S. 635].

Die Simulation von Wasser unterscheidet sich von anderen Elementen, wie Rauch und Feuer, in einem Punkt sehr deutlich. Feuer und Rauch wird durch die Dichte des Elements in einem gegebenen Volumen dargestellt. Im Fall von Wasser jedoch, ist der visuell interessante Teil die Grenze zwischen Luft und dem abgebildeten Wasserkörper. Aufgrund dessen muss bei Simulationen von Wasser ein expliziter Unterschied, zwischen Zellen, in denen Wasser und Zellen, in welchen Luft vorhanden ist, beachtet werden [16, S. 660].

Für Echtzeitanwendungen ist die Darstellung von Flüssigkeiten nach wie vor eine große Herausforderung, da sie oft hohe Rechenleistung benötigt und die Daten einer Simulation in manchen Fällen nicht einfach in die Render-Engine einer Echtzeit-Umgebung einzubauen sind. Oft kann die Anwendung von Simulationen zu Instabilitäten führen [16, S. 633].

Während eine große Zahl an Autoren sich mit der Kontrolle von Flüssigkeiten und dem Angleichen an eine vorgegebene Animationsbasis beschäftigt haben, so gibt es wenig

Arbeiten, die sich in diesem Zusammenhang mit Ozeanen beschäftigen [17, S. 2].

5.2.1 Orbitalbewegungen

Die Simulation von Wasseroberflächen hat ihren Ursprung in der Arbeit von Franz Josef von Gerstner, welcher 1804 die Theorie aufstellte, dass sich Wellen in kreisförmigen Bewegungen ausbreiten (siehe Abb. 5.1). Zusätzlich stellte Gerstner bereits fest, dass der Radius dieser kreisförmigen Bewegungen zum Meeresboden hin kleiner wird.

Fournier und Reeves verwendeten Gerstners Modell für Orbitalbewegungen 1986 erstmals im Bereich der Computergrafik, um die Bewegungen einer Oberfläche mithilfe individueller Punkte zu beschreiben. Diese Punkte bewegen sich in einer kreisförmigen Bewegung, wenn eine Welle an ihnen vorbeifließt [21, S. 8–9].

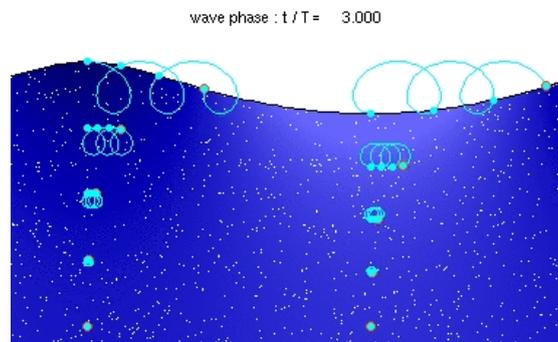


Abbildung 5.1: Orbitalbewegungen von Wellen nach Stokes, basierend auf Theorie von Gerstner [46].

Bei der Implementierung zeigten sich jedoch einige technische Probleme. Punkte, die stark angeregt wurden, vollzogen eine „Loop“-Bewegung und die Oberfläche der Welle überschlug sich somit. Gerstner-Wellen sind außerdem sehr limitiert, da sie Wellenbewegungen nur anhand einer einzelnen Sinuswelle beschreiben werden. Ein realistischeres Ergebnis unter Verwendung des Modells kann dadurch erzielt werden, indem man mehrere dieser Wellen addiert.

Die Animation von Gerstner-Wellen ist abhängig von der Frequenz der einzelnen Komponenten. Sowohl für Gerstner-Wellen, als auch für einige andere, in dieser Arbeit beschriebenen Modelle, ist die Beachtung der Ozeantiefe wichtig, da seichtes Wasser einen verlangsamen Effekt auf die Oberflächenbewegung hat.

Gerstner-Wellen finden in moderner ozeanografischer Literatur nur geringe Beachtung, da sich inzwischen auf statistische Modelle und Bewegungen gestützt wird. In diesen statistischen Modellen ist die Wellenhöhe eine Zufallsvariable, die aus der horizontalen Position und der Zeit gebildet wird [21, S. 8–9].

5.2.2 Navier-Stokes

Die Navier-Stokes Gleichung bildet die Grundlage für eine allgemeine Flüssigkeitsanimation, da sie Newtons zweites Gesetz in Flüssigkeiten und genereller Flüssigkeitsbewegung

verkörpert. Aufgrund dessen ist die Gleichung, oder eine Abwandlung derselben, oft ein Teil der für die Simulation angewandten „solver“ [5, S. 1].

Die ersten dynamischen Modelle nach Navier-Stokes-Gleichungen wurden zuerst auf zweidimensionale Simulationen angewendet, um Texturen zu generieren, die eine Flüssigkeitsbewegung darstellten. Während diese ersten Simulationen bereits gewisse, für Flüssigkeiten relevante, Aspekte, wie Rotationskräfte und Druckunterschiede beachteten, so waren sie zum Teil instabil und auf zwei Dimensionen beschränkt. Eine Abänderung der Navier-Stokes-Gleichung wurde schließlich zur Simulation in drei Dimensionen von Foster und Metaxas entwickelt. Diverse Bewegungen, wie etwa Strudel oder die Kollision mit anderen Objekten, wurden in dieser bereits automatisch berechnet. Die Arbeit von Foster und Metaxas basiert wiederum zum Großteil auf einem Algorithmus von Harlow und Welch aus dem Jahr 1965. Auch diese Methode hatte jedoch noch einige Schwierigkeiten, insbesondere Instabilitäten bei einer langen Simulationsdauer. Nach mehreren Jahren Forschung wurde die Gleichung jedoch für die Simulation in drei Dimensionen angepasst und weiterentwickelt. Jos Stam behandelte 1999 bereits eine Methode zur vollständigen Auflösung der Navier-Stokes-Gleichung in einer Echtzeitumgebung. Das Modell ist für technische Anwendungen nicht geeignet, für damalige Computeranimation erfüllte es jedoch seinen Zweck [48, S. 1].

Ein großes Problem von frühen Simulation war die Darstellung von kleineren Detailwellen mit hoher Frequenz, da der Anspruch an Rechenleistung dadurch stark stieg. Berechnungen im Fourier-Bereich können zwar mit diesen Wellen umgehen, doch trifft man auf Probleme, sobald man die Interaktion des Wassers mit anderen Objekten zeigen will. Die Darstellung des Ozeans mithilfe von früheren Navier-Stokes-Ableitungen, basierte darauf, dem Ozean ein Höhenfeld zu geben, mit dem die Bewegung des Wassers als Sinus- und Cosinuswellen dargestellt wurden. Dieser Ansatz führte allerdings dazu, dass willkürliche Flüssigkeitsbewegungen vernachlässigt wurden [13, S. 2].

Shallow Water Equations (SWE) stellen eine simplifizierte Form der Gleichungen dar, die die Bewegung einer Flüssigkeit beschreiben: die Navier-Stokes Gleichung. Die Abwandlung dieser Gleichung führt zu einer Gleichung, die die Verteilung des hydrostatischen Drucks einer Oberfläche und damit Geschwindigkeiten in der vertikalen Ebene beschreibt. In Verbindung mit dem Abstand der Wasseroberfläche zu einem hypothetischen Boden kann somit die Höhe der Flüssigkeit in Form einer Velocity Map angegeben werden [1, S. 2].

5.2.3 Tessendorf

In 2001 hat Jerry Tessendorf eine neue Methode zur Darstellung eines Ozeans in 3D entwickelt. Seine Technik generiert ein Höhenfeld für einen Ozean, welches sich über Zeit ändert. Diese Methode ist abhängig von einem Wellenspektrum und einem Pseudo-Zufallsnummern-Generator, welche eine Ausgangsform eines Ozeans in 2D produzieren.

Dieser Ausgangspunkt wird dann über Zeit mit einer Kombination aus Werten für Wellenlängen und Wellengeschwindigkeit geändert. Diese Abhängigkeit der Bewegung von diesen Werten nennt man auch „Zerstreuungsverhältnis“. Zuletzt werden die erhaltenen Werte mithilfe einer invertierten Fast-Fourier-Transformation in ein 2D-Höhenfeld, eine horizontale Displacement-Map und eine Wellenkamm-Map gewandelt.

Die entstandenen Wellen besitzen ein markantes Aussehen und werden oft als Tessendorf-

Wellen bezeichnet. Das Tessendorf-Modell findet Anwendung in einer großen Zahl an kommerziellen und proprietären Ozean-Simulations-Toolkits, in welchen Tessendorfs Berechnungen auf unterschiedliche Bedingungen angepasst wurden. Mit der aaOcean Suite und dem HOT-Toolkit gibt es allerdings auch open-source Alternativen, die Plugins für eine Vielzahl an 3D-Programmen bieten [12, S. 1].

Das Tessendorf-Modell wurde seit seiner Vorstellung in 2001 von einer großen Anzahl an Künstlern für unterschiedliche Szenarien verwendet um einen realistischen Ozean darzustellen. Durch die Verwendung in diversen Projekten wurden einige Herausforderungen in der Arbeit mit diesem Model bekannt. Während diese Herausforderungen oft zur Erstellung von neuen, verbesserten Tools geführt haben, so sind diese kaum dokumentiert, weswegen ein Verständnis für die Limitationen des originalen Tessendorf-Modells wichtig ist.

Die Steigerungszunahme des Modells ist nicht gegeben, sondern muss visuell angepasst werden. Das Modell lässt sich sowohl für einen ruhigen, als auch einen stürmischen Ozean anwenden, jedoch muss man diesen Parameter in den meisten Fällen mehrmals ändern, um zum gewünschten Ergebnis zu kommen.

Die im Modell verwendeten, gerichteten und ungerichteten Ozeanspektren sind nur bedingt empirisch im Vergleich zu beobachtetem Verhalten eines realen Ozeans. Das Tessendorf-Modell erstellt Wellen, die nach Wellenlänge gleichmäßig auf dem Ozean verteilt sind. Visuelle Referenzen hingegen zeigen, dass in realen Situationen eine Mehrzahl an Wellen im oberen Frequenzspektrum zu finden sind. Dies wird nochmal gesteigert, sobald der Seegang zunimmt. Dies wird von Künstlern in einigen Fällen durch die Verwendung von Filtern und einer Kombination mehrerer „wave fields“ verbessert und zu einem ästhetisch gewünschtem Bild gewandelt. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung eines Bandpass-Filters, um die mittleren Wellenlängen des Spektrums herauszufiltern. Die gewünschten Wellenlängen werden isoliert und mit anderen „wave-fields“ kombiniert, um die gewünschten Formen zu skulpturieren. Die Verwendung von mehreren Filtern und Kombinationen aus verschiedenen „wave fields“ kann jedoch schnell zu Verwirrung und unerwünschten Effekten führen, da jeder dieser Filter eigene Parameter besitzt und die Effekte eines „wave fields“ unerwünschte Effekte auf die anderen Wellen der anderen „fields“ haben kann. Modernere Methoden verbinden Tessendorfs Technik mit empirischen Ozeanmessungen, um einen realistischen Ozean zu erzeugen.

Das Modell funktioniert nicht vollständig korrekt in der Darstellung von seichtem Wasser, da die Amplituden nicht entsprechend angepasst werden. Dies kann zwar von Hand angepasst werden, indem man die Zunahme der Steigerung ändert. Allerdings führt das auch zu einer gleichmäßigen Verminderung aller Wellenlängen im Spektrum, während der Effekt eher im Bereich der großen Wellen sichtbar sein sollte.

Die Richtungsgebung des Modells entsteht durch einen Falloff, der für alle Wellenlängen gleich ist. Ohne Anpassungen am Modell ist es somit unmöglich, gewisse Wellenformen, wie zum Beispiel Dünungswellen, korrekt darzustellen [12, S. 2].

5.3 Simulation und Animation

5.3.1 Ozeanoberflächen

Da wir Flüssigkeiten in unserem täglichen Leben in vielen Formen antreffen, ist die korrekte Darstellung dieser ein wichtiger Aspekt, wenn wir die Realität mit Medien, wie Filmen oder Spielen, abbilden wollen. Während die ersten Ansätze, für die Simulation von Flüssigkeiten für Computergraphik bereits Ende der 80er niedergeschrieben wurden, so sind vollständige 3D-Simulationen von Flüssigkeiten erst mit dem starken Anstieg in Rechenleistung von Computern nach der Jahrtausendwende populär geworden. Viele der heutzutage verwendeten Simulationen basieren auf der Lösung von Navier-Stokes Gleichungen nach der Vorlage von Jos Stam, oder nach dem Modell von Jerry Tessendorf.

Der Ablauf einer Flüssigkeitsanimation ist oft abhängig von der Natur des Filmes. In Charakter-bezogenen Filmen etwa, ist ein starkes Augenmerk auf die Kameraführung, zum Fokus auf die Bewegungen des Charakters, zu legen. Eine Methode, die angewendet werden kann ist, eine „Pre-Visualisierung“ zu erstellen. Effekt-Künstler können eine Ausgangs-Simulation des Wassers, basierend auf Vorgaben des Directors erzielen. Diese wird angefertigt um die richtigen Kamerawinkel für die Szene zu finden, da die Kamerapositionen und -bewegungen stark von der Position und Geschwindigkeit des Wassers beeinflusst werden. Die erste Simulation der Flüssigkeit wird mit niedriger Auflösung durchgeführt und, anhand dieser, erste Kameraeinstellungen festgelegt [4].

Physik-basierte Animation in einer regulären VFX-Pipeline erzeugt oft einige Probleme. Es gilt für die Künstler oft einen Balanceakt zwischen zwei Aspekten der Animation zu vollziehen. Auf einer Seite ist der geplante Endlook, der in der „Previs“ festgelegt und vom Director abgesegnet wurde. Auf der anderen Seite ist physikalischer Realismus, die Bewegung des Wassers ohne künstlerische Kontrolle, wie es meist das Ergebnis von herkömmlichen Simulationen erzeugt. „Previs“-Künstler verwenden zur Erzeugung der angestrebten Formen verschiedene Techniken, wie etwa Prozedurale Noises und Deformer. Ziel der „Previs“ ist es, die Formen und das Timing für die Erzählung der Geschichte festzulegen. Die resultierende Geometrie kann jedoch nicht direkt in eine Simulationsumgebung übertragen werden, um den finalen Shot zu entwickeln. Eine Möglichkeit, die Effekt-Künstler haben, ist die Generierung einer großen Ozeanfläche, die daraufhin nach dem gewünschten Bild durchsucht wird. Je komplexer und genauer die „Previs“-Wellen sind, desto schwerer und mühsamer wird diese Suche. Eine Alternative dazu, ist die Verwendung von Wellendetails in Form von Displacement-Maps, die auf die „Previs“-Geometrie überlagert werden. Ein Problem dieser Methode ist die Angleichung der Geschwindigkeiten der Details auf ein Gesamtbild, dass physikalisch gesehen Sinn macht. Die Geschwindigkeit der Previs Wellen entspricht meist nicht dem Ergebnis der Simulation. Die Anpassung der Previs Wellen auf einen realistischeren Look, durch die Abflachung von Tälern und das Härten von Wellenspitzen, ist besonders schwierig [17, S. 1].

Nachdem die Kamerabewegungen schließlich festgelegt wurden, können die Details der Simulation erhöht werden, ohne dabei die Testanimationen zu ändern. Dieser Vorgang kann jedoch neue Probleme hervorrufen. Simulationen sind anfällig für Änderungen in der Geometrie. Sollten gewisse Parameter sich zu stark ändern, passen die Testani-

mationen nicht mehr mit der Wasseroberfläche zusammen. In diesem Fall muss die Animation oder die Simulation wieder entsprechend angepasst werden.

Ein weiteres Problem kann durch die Reihenfolge von Shots, welche nicht genau mit dem Ablauf der Simulation übereinstimmen, entstehen. Wenn das Ergebnis einer Simulation geschnitten wird, anstatt sie im Ganzen zu lassen, so können Kontinuitätsfehler in der Bewegung der Flüssigkeit entstehen. Zusätzlich muss auf die Geschwindigkeit und Skalierung der verwendeten Geometrie geachtet werden.

Im Pixar-Film *Ratatouille* [38] aus dem Jahr 2007 hat man sich zum Beispiel dazu entschlossen, jeden einzelnen Shot als eigenständige Simulation zu behandeln. Dabei musste auf die Position der Kamera, natürliche Bewegung des Wassers und Kontinuität zu anderen Shots geachtet werden (siehe Abb. 5.2). Um das Wasser in die gewünschte Form zu bringen, verwendeten die Effekt-Künstler in diesem Film verschiedene Techniken, unter anderem die Anwendung von „lattice deformern“, um die generierte Oberfläche steuern zu können. Zusätzlich platzierten sie Kollisionsobjekte und neue Wasserquellen direkt im simulierten Feld. Außerdem wechselte das Team in Teilen der Szene von einer Simulation auf ein nicht-simuliertes, von Hand erzeugtes, „height-field“, woraufhin die Kamera noch einmal angepasst wurde. Das Team ersparte sich somit jedoch einiges an Zeit.



Abbildung 5.2: Eine Szene des Films *Ratatouille*, die in den Abwasserkanälen unter Paris spielt [7].

Nachdem das Wasser im Detail simuliert wurde, geht das Material wieder ins Animationsdepartement, um den Charakter zu animieren. Nach diesem Schritt, kommen die Shots noch einmal in das Effects-Departement um diverse Wassereffekte wie Schaum, Nebel, Spray und Blasen, sowie die Interaktion zwischen Objekte und Wasser hinzuzufügen [7].

Bei der Arbeit für die „Previs“ ist es wichtig, bereits auf physikalisch korrekte Bewegungen zu achten, damit die Simulation keine falschen Ergebnisse kreiert. Niedrigfrequente Wellen etwa, bewegen sich in Realität schneller als hochfrequente Wellen [17, S. 6–7].

Die Menge, die an diesen zusätzlichen Effekten generiert werden muss, ist abhängig von der dargestellten Wasserbewegung. Bei schnellen Bewegungen muss normalerweise eine große Menge an Schaum und Spray dargestellt werden. Für die Erzeugung dieser stützt man sich meist auf zusätzliche Partikelsysteme, die Hand in Hand mit der Simulationssoftware arbeiten können [4].

Pixar verwendete für *Ratatouille* sogenannte „agitator“-Objekte um die Punkte zu definieren, an welchen Partikel generiert werden. Sobald simuliertes Wasser mit diesen

in Berührung kam, wurde das entsprechende Partikel erzeugt. Dabei wurde die Geschwindigkeit des Wassers auf das Partikel übergeben [7].

Auch die Kameraeinstellung spielt eine immens wichtige Rolle in der Simulation von Flüssigkeiten. Ein Regentropfen, der auf eine Wasseroberfläche trifft, erzeugt eine Reaktion des Wassers. Aus normaler Augenhöhe betrachtet, ist diese Reaktion meist eine Serie kleiner Wellen, die vom Aufprallpunkt ausgehen. Wird die Kameraeinstellung jedoch geändert und die Szene aus den Augen eines kleineren Lebewesens betrachtet, so ändert sich das Bild dramatisch. Kleine Pfützen werden zu Teichen und ein Regentropfen wird zu einem Objekt mit signifikanter Kraft, das große Spritzer und Wellen auslösen kann. Niedrige Kamerawinkel und Nahaufnahmen führen zu einer anderen Wahrnehmung des Wassers. Um glaubwürdige Resultate zu erzielen wird eine Anpassung der Dynamik und des Detailgrads gefordert.

Physikalisch korrekte Simulationen bieten überzeugende Dynamiken, jedoch sind solche Simulationen oft nicht auf den Detailgrad, der in extremen Nahaufnahmen benötigt wird, ausgelegt. Niedrige Kamerawinkel geben gewissen Elementen mehr visuellen Impakt Bedeutung, was dazu führt, dass diese Elemente mit mehr Detail als üblich dargestellt werden müssen und möglicherweise mehr Arbeit als sonst verlangen. Wertänderungen im Bereich weniger Zentimeter können entscheidend sein, ob eine Komposition funktioniert oder versagt. Diese Tatsache führt dazu, dass man für diese Details manchmal zwingend ein Partikelsystem benötigt.

Um die Spritzer des Tropfens nach dem Aufprall zu kreieren, kann eine NURBS Oberfläche verwendet werden. Die Bodenfläche dieses Spritzer muss dafür auf der selben Ebene liegen wie die Oberfläche des Wassers. Von der NURBS-Oberfläche werden schließlich Partikel emittiert und mit Kräften nach oben und zur Seite versehen. Einzelne Partikel, die zu hoch flogen, können durch einen Grenzwert ausgefiltert werden. Um den Partikeln eine glaubwürdige Bewegung zu verleihen, wird ihnen mit einer Noise eine zufällige Masse gegeben. Die unterschiedlichen Massen erlauben es den Partikeln mit unterschiedlicher Geschwindigkeit zu fallen, was der Szene Dynamik und Glaubwürdigkeit gibt. Der Aufprall eines Regentropfens erzeugt eine Antwort der Wasserfläche in Form eines Rückpralls und einer dezenten Welle, die sich vom Punkt des Aufpralls ausbreitet. Der Rückprall sendet kleine Mengen an Wasser in Form von neuen Tropfen in die Luft. Der Aufprall dieser führt dazu, dass die kreisförmigen Wellen nicht nur am Punkt des ersten Aufpralls erzeugt werden müssen, sondern auch an den Aufprallpunkten aller folgenden Spritzer [4].

Für viele Entwickler von Simulationstools ist es wichtig, ein Ozeansystem zu erzeugen, das leicht verständlich ist und kein zusätzliches Training der Künstler benötigt. Es ist wichtig, die Parameterzahl gering zu halten, und die zu verändernden Werte verständlich zu machen, damit eine Referenz effizient nachgeahmt werden kann. Außerdem ist es Künstlern oft wichtig, beim Erstellen von Ozeanen, die Auflösung des Höhenfelds frei ändern zu können, ohne, dass dabei eine andere Form entsteht [12, S. 9].

Die Einstellung der Auflösung und des Detailgrads hat einen großen Effekt auf unsere Wahrnehmung des Ozeans. Eine zu niedrige Auflösung kann zu Formen führen, die zu weich für Wasser sind, während ein zu hoher Detailgrad dazu führt, dass eine Welle wie ein Berg wirkt. Die Tessendorf Methode verformt eine Oberfläche sowohl positiv, als auch negativ. Eine Ebene bekommt somit „Hügel“ und „Täler“. Diese Tatsache muss bei der Position des Meshes zu anderen Objekten beachtet werden, um Effekte

wie „Clipping“ zu vermeiden. Eine Anhebung der Kanten der Ozeans kann zu einem stärkeren Gefühl der Tiefe in den Wellentälern führen.

Obwohl Realismus ein wichtiger Aspekt von physikalischen Animationen ist, ist die Anwendung von Flüssigkeitssimulationen oft abhängig von den Möglichkeiten zur Kontrolle der simulierten Elemente. Üblicherweise wollen Animatoren so viel Kontrolle über das Geschehene wie möglich besitzen und greifen nur zu unkontrollierten Simulationen, wenn es absolut notwendig ist. Da Flüssigkeiten sich oft chaotisch und unvorhersehbar verhalten, ist das Abschätzen des Endergebnisses sehr schwierig. Eine Änderung des Verhaltens durch die Anpassung einer globalen Variable ist daher oft sehr mühsam und ineffizient. Bei der Animation mancher Szenarien, wie eines Charakters, der aus einer Flüssigkeit besteht, gibt es keine plausiblen Referenzen. Nichtsdestotrotz ist es wichtig, dass die Bewegungen für den Betrachter Sinn ergeben. In vielen Fällen ist für Animatoren die Kontrolle über die Grundbewegungen von Flüssigkeiten am wichtigsten. Die Erschaffung feiner Details kann der Simulation überlassen werden. Partikel bieten sich für die Animation von Flüssigkeiten an, da sie in den meisten 3D-Anwendungen vertreten sind. Sie können intuitiv bearbeitet werden und Animatoren, die Partikel auch für andere Effekte verwenden, sind mit ihrer Handhabung bereits vertraut. Kontrollpartikel sind unabhängig vom darunterliegenden Flüssigkeitsmodell und können daher auf verschiedene Szenarien angepasst werden [23, S. 1].

Einer der Simulationsparameter für Ozeane, die Künstlern etwas fremd sein können, ist der „Fetch“-Wert. Dieser spielt eine extrem wichtige Rolle in der Arbeit mit rauen Seegängen, starken Winden und großen Ozeantiefen. Der Wert beschreibt dabei die Distanz, die der Wind zurücklegt und dabei seine Kraft ins Wasser überträgt. Eine kleine „Fetch“-Zahl produziert verteilte, abgehackte Wellen, während eine große „Fetch“-Zahl riesige, weiche und konzentrierte Wellen erzeugt. Ist der Input der Künstler für die Parameter konsistent mit einem physikalischen Modell für große Wellenfrequenzen, so entsteht durch die Anwendung der behandelten Methode ein hochpräziser Ozean [12, S. 9].

Die Interaktion mit anderen Objekten führt zu interessanteren Bewegungen von Flüssigkeiten. Die Bewegung einer Flüssigkeit durch einen Riss oder Spalt, bringt ein Ergebnis, das viel glaubwürdiger erscheint, als die Emission dieser Flüssigkeit von einer Fläche mit der Form der Öffnung. Eine einfache Variante dieser Methode ist die Approximation eines Objektes mit einfachen Formen und das Hinzufügen der Bewegungsgeschwindigkeit zu einem „velocity-field“. Eine andere Möglichkeit zum Berechnen von Kollisionen ist, die Objekte als Voxel zu behandeln und eine Reihe an „inside-outside“- und „obstacle-velocity“-Texturen zu erzeugen, die die Barrieren des Objektes darstellen, die dann von der Simulation berücksichtigt werden [16, S. 643–651].

Sogenannte „Capillary“-Wellen spielen eine große Rolle in der Simulation von Flüssigkeiten. Diese Wellen entstehen aus der Oberflächenspannung, welche die Flüssigkeit zu einer Reduktion der Oberfläche zwingt, obwohl das Volumen beibehalten wird [18, S. 261].

In Simulationen von Flüssigkeiten muss angenommen werden, dass sich die „fluid domain“ konstant bewegt. Die „fluid domain“ beschreibt die Fläche des Simulationsrasters, die die dargestellte Flüssigkeit enthält. Dieses muss sich anpassen, wenn es zur Interaktion mit anderen Objekten kommt, oder wenn Flüssigkeiten sich konstant bewegen, so wie es bei Wasser meist der Fall ist. Bei komplexen Grenzen zwischen Flüssigkei-

ten zu Barrieren ist es notwendig, das Verhalten dieser Flüssigkeiten an den Barrieren festzulegen [16, S. 644].

5.3.2 Unterwasser

Unter der Oberfläche eines Ozeans können mehrere Effekte auftreten, welche zum Teil von der Simulation der Oberfläche abhängig sind. Licht, das auf Wasser trifft, wird vom Volumen des Wassers zurückgeworfen und absorbiert. Dies ist zum Teil abhängig von Wassermolekülen, organischer Materie und anorganischer Materie. Absorption ist in den meisten Ozeanen abhängig von Wassermolekülen und organischer Materie. Streuungseffekte sind größtenteils von organischer Materie gelenkt. All diese Effekte können durch Koeffizienten in einem angepassten Shadersystem gesteuert werden.

„Caustics“ sind Lichtmuster, die sich an Oberflächen Unterwasser bilden, wenn eine Fläche Sonnenstrahlen aus mehreren Punkten aufgrund von Brechungen erhält. „Godrays“ werden im gleichen Vorgang produziert, wie die beschriebenen „Caustics“. Licht, das beim Eintreten ins Wasser von Partikeln gestreut wird, trifft zum Teil direkt auf die Kamera. Dies bildet klar erkennbare Lichtstrahlen unter Wasser [21, S.20–21].

Luftblasen werden für Unterwasser-Einstellungen meist durch Partikelsysteme produziert. Partikel-Emitter werden in der Szene platziert, welche Blasen-Partikel an bestimmten Punkten freigeben. Diese Emitter werden oft an besonders turbulenten Stellen und an Charakteren und Objekten, die im Wasser schwimmen oder treiben, platziert. Die Blasen werden mit einem Buoyancy Wert an die Oberfläche gezogen und ihre Bewegungen vom Fluss des Wassers beeinflusst. Um eine Änderung im Wasserdruck darzustellen, können die Blasenpartikel als 3D-Objekte erzeugt und entsprechend deformiert werden [7].

5.4 Solver

5.4.1 Funktion

Bei der Simulation von Flüssigkeiten arbeitet man meist mit sogenannten „solvern“. Diese „solver“ stellen die Umsetzungen der benötigten Gleichungen als Programmiersprache dar. Ein „solver“ ist somit ein Programmcode-Abschnitt, der dem Simulations-Toolkit die benötigten Gleichungen und deren Lösungen vorgibt. Die Kontrolle über Simulationen ist üblicherweise über das vorsichtige Einstellen einer großen Anzahl an Parametern innerhalb des „solvers“ ermöglicht. Das Einstellen dieser Parameter wird jedoch von mehreren Faktoren erschwert. Einer der größten Nachteile ist, dass die Änderung einer Simulation durch Parameter nur eine indirekte Kontrolle über die Animation gibt. Zusätzlich gibt es meist kein interaktives visuelles Feedback, da die Simulation zu viel Rechenleistung benötigt. Zuletzt führt die nicht-lineare Bewegung von Flüssigkeiten dazu, dass Parameterwerte nur umständlich von einer Simulation mit niedriger Auflösung auch eine hochaufgelöste Simulation übertragen werden können. Dies führt dazu, dass Animation von Flüssigkeiten mithilfe einer Simulation oft in einer „trial-and-error“-Schleife endet. In der Arbeit mit Simulationen kann dies einen gewaltigen Zeitverlust verursachen, da die Simulation mit neuen Parametern komplett neu gestartet werden muss [15, S. 2].

Im Bereich der Computergrafik gab es viele Beteiligungen in der Entwicklung von Höhenfeldern für die Erstellung von Ozeanen. Die ersten brechenden Wellen wurden von Fournier und Reeves in 1986 durch die Kombination von mehreren Gerstner Wellen als Vertex Deformationen erzeugt. Die Interaktion von flachem Wasser mit Objekten wurde von Kass und Miller in 1990 demonstriert. Ein SIGGRAPH Kurs von Tessendorf in 2001 stellte schließlich die Darstellung eines physikalischen Ozeans durch FFT Wellen vor [22]. Diese wurde von Stam weiterentwickelt und bildet die Basis für viele FFT basierte 2D solver [12, S. 2].

Die Simulation von Flüssigkeiten für Computergrafiken ist ein komplexes Problem. Aus den vielen unterschiedlichen Ansätzen zur Wellenberechnungen, entstanden viele Kombinationen von Gleichungen und, verbunden damit, viele Arten an „solvern“. Ein guter „solver“ ist immens wichtig für das Darstellen von Flüssigkeiten wie Wasser, aber auch Feuer und Rauch, und sind ein essentieller Teil für die Special-Effects Industrie. „Solver“ für Flüssigkeiten können jedoch auch in anderen Bereichen Anwendung finden. So können sie etwa dafür verwendet werden, um traditionelle Zeichentechniken wie Öl- und Wassermalerei in einer digitalen Umgebung nachzuahmen. Im Bereich der Texturierung kann die Simulation von Flüssigkeiten Einfluss auf das Äußere von Objekten haben, indem Effekte wie Erosion erzeugt und beeinflusst werden [48, S. 1].

„Solver“ sind oft periodisch, was bedeutet, dass sich die Grenzen der simulierten Flüssigkeit überfalten. Dieses Verhalten ist zwar in der Realität unmöglich, für Computergrafik bietet es jedoch einige Anwendungen. So kann etwa die resultierende Simulation als sich-wiederholende und animierte Textur verwendet werden. Ähnliche Texturen wurden auf diese Art bereits für Terrains, Windfelder, stochastische Bewegungen und auch Ozeane verwendet. Die vorhandene Literatur zum Bereich der Flüssigkeitsdynamik erfordert meist Vorwissen in diesem Bereich und kann einschüchternd auf Novizen in diesem Bereich wirken [19, S. 43].

Die Ergebnisse eines „solvers“ werden nach einem gewissen Zeitschritt aktualisiert. Die Simulation ist daher eine Bildsequenz der Geschwindigkeiten der Flüssigkeit über Zeit. Wie sich die Simulation dabei entwickelt, ist abhängig von den eingegebenen Parametern [19, S. 44].

Ein wichtiger Schritt in der Arbeit des „solvers“ ist der „Selbsteinfluss“ der Flüssigkeiten. Dieser ist verantwortlich für das chaotische und unvorhersehbare Verhalten von Flüssigkeiten in Bewegung. Flüssigkeiten bestehen aus einer Masse, die von der Geschwindigkeit beeinflusst wird. Über Zeit bewegen sich Masse und Geschwindigkeit jedoch an eine andere Stelle, wobei das Wasser an dieser Stelle wieder auf andere Art bewegt wird [19, S. 46].

Die Grundaufgabe des „solvers“ ist die Berechnung der Bewegung einer Flüssigkeit, abhängig von Position und Zeit. Um die beinhalteten Gleichungen zu lösen, muss man zuerst das Gebiet, in dem sich die Flüssigkeit bewegt, diskretisieren. Mit dieser Diskretisierung beschreibt man, dass die berechneten Punkte im Raum fixiert sind und sich nur der berechnete Wert in diesen Punkten ändert. Diese Werte können, je nach „solver“, sowohl skalare Werte, wie Druck und Temperatur, als auch Werte für Vektoren, wie etwa Geschwindigkeit, sein [16, S. 636].

5.4.2 Ozeanspektren

Das Aussehen von Wasser ist das Ergebnis einer Unmenge an Variablen. Reflexionen und Refraktionen sind fast immer Teil dieses Aussehens und führen zu visuell imposanten Interaktionen mit Licht, das nicht nur vom Wasser zurückgeworfen wird, sondern auch hindurch scheint. Wasser schlingt sich um sich selbst, teilt und vereinigt sich wieder und interagiert mit anderen Objekten. Allen Hemberger, ein FX-Künstler bei Pixar, argumentiert, dass es keine „korrekte“ Art gibt Wasser darzustellen, was einen Aspekt für die interessante Arbeit mit diesem Element darstellt. Jeder Shot mit Wasser kann auf eine andere Art produziert werden mit Tools und Software, die sich konstant ändern und weiterentwickeln. Eine der einfachsten Darstellungen von Wasser ist ein offener Ozean, da dieser sich nicht mit anderen Objekten schneidet und viele der auftretenden Schwierigkeiten im Bereich der Wassersimulation, ausspart. In den 90ern stellte Jerry Tessendorf die Theorie auf, dass eine Darstellung eines realistischen, offenen Ozeans mit einem gegebenen Set an Wellenlängen möglich ist. Der Zustand eines Ozeans wird in der Marinetechnik „sea state“ genannt. Dieser Zustand des Ozeans und damit sein Aussehen, kann mathematisch ausgedrückt werden. An mehreren Orten auf der Erde werden Messungen dieser „sea states“ durchgeführt. Diese Messungen können sowohl von Satelliten, als auch von Bojen direkt vor Ort, durchgeführt werden. Die gemessenen Daten werden in ein Datenset gesammelt, das als „Wellenspektrum“ bezeichnet wird. Dieses Spektrum beinhaltet Information über die vorkommenden Wellenlängen im gemessenen „sea state“. Die Daten des Spektrums werden üblicherweise bearbeitet, damit ein Mittelwert des Ozeans bei einem bestimmten „sea state“ dargestellt wird. Jeder generierte, zufällige Ozean hat nur ein einziges assoziiertes Spektrum. So, wie jede Ozeanoberfläche einzigartig ist, so ist auch jedes Spektrum einzigartig. Die gegebenen Modelle repräsentieren den Mittelwert einer großen Anzahl an zufälligen Ozeanen mit den selben physikalischen Eigenschaften [12, S. 3–4].

Bei der Messung der Daten zur Erstellung für ein Ozeanspektrum ist es wichtig, die Messung über einen langen Zeitraum und an mehreren Orten durchzuführen. Unregelmäßige Ereignisse wie Stürme oder die Wellen von Booten könnten sonst die Ergebnisse verfälschen [29, S. 213].

In einer Arbeit von Y.M. Krylov wurden 1966 eine große Zahl an Ozeanspektren veröffentlicht. Dies umfasste die Datensätze von mehr als 200 Wissenschaftlern, unter anderem von Krylov selbst [14]. Mehrere dieser Spektren sind bis heute Teil diverser Simulationsmodelle. Beispiele dafür sind die Modelle von Davidan, Hasselmann und Mitsuyasu.

Ein Spektrum wird angefertigt, indem mithilfe der Fourier-Analyse, der gesammelte Datensatz mit Werten des periodischen Wellensignals, in seine Teilfrequenzen zerlegt wird [29, S. 213]. Diese Teilfrequenzen bilden ein Muster, welches, auf ein 3D-Mesh angewendet, eine 3D-Darstellung eines Ozeans bildet. Die Methode wurde seit Tessendorfs erster Implementierung verändert und verbessert, die Grundidee ist jedoch die selbe. Tessendorf-Wellen sind in einer großen Zahl an bekannten Hollywood-Filmen zu finden, die sich auf Computergrafik stützen, um einen Ozean zu zeigen. Die Untersuchung von Ozeanspektren ist nicht nur wichtig für Animation, sondern auch für Hydrotechnik, weshalb dieses Gebiet einem ständigen Wandel unterliegt. All diese Spektren basieren auf Parametern, die unterschiedlichen Datensets von Ozeanwellen entsprechen. Wichtig für

die Arbeit mit Wellenspektren ist das mathematische Verhältnis zwischen Bewegungsgeschwindigkeit der Wellen und deren Wellenlänge. Dies wird „dispersion relationship“ genannt und ist abhängig von Schwerkraft, Ozeantiefe und anderen physikalischen Parametern [12, S. 3–4].

Wellen breiten sich über eine gewisse Zeit flächenmäßig aus. Diese Ausbreitung wird in Spektren durch die Konzentration von Energie in gewissen Wellenlängen angegeben. Diese Energie ist beeinflusst von der Entwicklung des Seegangs und damit eine Funktion aus Windgeschwindigkeit, Fetch und dem Ozeanspektrum. Zusätzlich muss bei der Ausbreitung der Wellen ein Unterschied zwischen lokalen Wellen und den Dünungen gemacht werden. Während die Irregularität von Wellen üblicherweise durch lokale Windereignisse kreiert wird, mischt sich manchmal ein zweites System in dieses lokale Ereignis hinein, die sogenannten Dünungen. Dünungen ist die Bezeichnung für Wellen, die sich aus dem Gebiet, in dem sie generiert wurden, entfernt haben. Dies kann, zum Beispiel, durch einen fernen Sturm passieren. Während Dünungen über die Wasseroberfläche reisen, überholen sie kleinere und schwächere Wellen. Die entstehenden, relativ großen Wellen bewegen sich oft parallel zueinander fort und können auch in Gebieten anzutreffen sein, wo gerade Windstille herrscht, da sie in einem anderen Bereich entstanden sind. Wenn sich Dünungen mit lokalen Wellen mischen, ist dies im Wellenspektrum eindeutig erkennbar, weshalb „solver“, die mit Wellenspektren arbeiten ebenfalls realistische Dünungen erzeugen können [12, S. 6].

Wellenspektren können sehr unterschiedlich zueinander sein. Die gesammelten Daten und damit auch die Form der Wellen, ist abhängig, nicht nur vom Ort, sondern auch von der Stärke und Dauer des Windes, der „fetch distance“, der möglichen Präsenz, Voroder Nachhut eines Sturms, und der Auswirkungen von Dünungen. Trotz einer großen Anzahl von Faktoren, die unterschiedlichste Spektren erzeugen können, gibt es doch Konstanten, die für alle Varianten gilt. Eine dieser Konstanten ist die Eigenschaft, dass das Spektrum eine „Sättigung“ an Energie erreichen kann. Ist diese Sättigung erreicht, so stellt dies den Moment dar, an dem Wellen zu brechen beginnen. Neue Energie, die in das System einfließt, wird ab diesem Moment an die Brechung der Wellen verloren [29, S. 218].

Ozeanspektren können übereinandergelagert werden, womit sehr einzigartige Oberflächen gebildet werden können. Möglicherweise ist der im Film angestrebte Look nur möglich, indem mit dem Zusammenspiel dieser Spektren experimentiert wird.

Die stochastische Untersuchung von Ozeanwellen begann in den 1950er Jahren, als durch Pierson 1954 das erste Spektrum Modell für Wellen vorgestellt wurde. In 1964 wurde schließlich mit dem Pierson-Moskowitz Spektrum ein Modell präsentiert, das auch heute noch Anwendung findet [12, S. 2].

In 1958 hat Phillips das Konzept eines „vollständig entwickelten Ozeans“ entwickelt. Dies bedeutet, dass wenn Wind über große Distanzen, auf große Flächen an Ozean, größer als die betrachteten Wellenlängen, über einen großen Zeitraum trifft, die Wellen ins Gleichgewicht mit dem Wind kommen. In diesem Zustand wird keine zusätzliche Energie an den Ozean übertragen und er ist „vollständig entwickelt“. Das „PM Spektrum“ arbeitet unter dieser Annahme. Es verwendet Daten, die von britischen Wetterschiffen im Nordatlantik gesammelt wurden. Pierson und Moskowitz erweiterten die Formel von Phillips mit Koeffizienten aus diesen Daten.

Ochi stellt 1998 das A,B Spektrum als Konzept vor, dass sich vom PM Spektrum nur

in der Verwendung anderer konstanter Koeffizienten unterscheidet. Sowohl das PM, als auch das Tessendorf und A,B Spektrum sind im Grunde im Aufbau gleich, allerdings verwenden sie anderen Multiplikatoren. Unterschiede in den Werten beim Tessendorf und PM Spektrum, lassen sich auf andere Wind-Messhöhen beim Sammeln von Daten zurückführen [12, S. 4].

Hasselmann entwickelte das JONSWAP Spektrum in 1973. Bei der Entwicklung dieses Spektrums fand Hasselmann heraus, dass Ozeane nie eine „vollständige Entwicklung“ erreichen können. Nichtlineare Interaktionen zwischen Wellen, das Brechen von großen Wellenkämmen, die Diffusion von Windenergie und Windturbulenzen tragen zu einer ständigen Weiterentwicklung der Ozeanoberfläche bei. Das JONSWAP Spektrum erweitert das PM Spektrum daher um eine weitere Variable, indem das Spektrum mit einem „peak enhancement factor“ multipliziert wird. Ein wichtiger Teil des JONSWAP Spektrums ist der Fetch. Fetch kann als Größe für das Windereignis verstanden werden, dass mit einer gewissen Distanz und Zeit aufs Wasser trifft. Das JONSWAP Spektrum ist zwar ähnlich zum PM Spektrum, allerdings wachsen die Wellen kontinuierlich mit Distanz und Zeit und entwickeln eine definiertere Spitze. Dies führt zu einer stärkeren Darstellung von Primärwellen, während andere Wellenlängen abgeschwächt werden [12, S. 5].

Das JONSWAP Spektrum wurde nach Beobachtungen des Verhaltens von tiefem Wasser entwickelt. Kitaigorodskii, Hughes und Bouws entwickelten auf der Grundlage des JONSWAP Spektrums eine neue Methode, die den Beobachtungen der Bewegungen von seichtem Wasser entspricht. Indem das JONSWAP Spektrum mit einer Tiefen-Abschwächungs-Funktion multipliziert wird, entsteht ein neues Spektrum, das TMA-Spektrum, welches für seichtes Wasser, bis 40 Meter Tiefe, geeignet ist. Das TMA, oder „Texel MARSEN ARSLOE non-directional wave“ Spektrum entstand in 1985 und ist eine effiziente Methode um einen plausiblen Ozean nach Referenz von seichteren Gewässern zu kreieren, da es mit einer großen Reichweite an Daten, wie etwa Ozeanhöhe, Windgeschwindigkeit, Fetch und Ozeantiefe, arbeiten kann [12, S. 2-5].

Für das TMA Spektrum wurden drei verschiedene Datensätze bezüglich Windeinwirkung und Wellenwachstum in seichtem Wasser gesammelt. MARSEN (Marine Remote Sensing Experiment at the North Sea) und ARSLOE (Atlantic Remote Sensing Land-Ocean Experiment) waren Datensammelstationen an Ozeanstandpunkten von einer Wassertiefe bis zu 40 Meter. Während ARSLOE im Atlantische Ozean stationiert war, fand das MARSEN Experiment in der südlichen Hälfte der Nordsee statt. Das Texel Datenset besteht aus mehreren Messungen, die während eines langlebigen Sturms nahe Rotterdam gesammelt wurden. Seinen Namen erhält das Datenset vom naheliegenden Texel-Lichtschiff. Das gesammelte Datenset enthält Parameter für Windstärken zwischen 4 und 25 Meter pro Sekunde, Zusammensetzung des Meeresbodens, welcher in diesem Fall eine Mischung aus groben und feinem Sand war, Neigungen des Meeresbodens und Wassertiefen zwischen 5 und 45 Meter. Bouws hat dieses Datenset mit verschiedensten Windzuständen getestet um eine Qualität zu garantieren, die dem JONSWAP Spektrum für tiefes Wasser entspricht. Zusammengefasst ist das TMA Spektrum das Produkt des JONSWAP Spektrums mit der Kitaigorodskii Tiefen-Abschwächungs-Funktion [12, S. 6].

Abbildung 5.3 zeigt einen Vergleich diverser Spektren bei einer Ozeantiefe von 15 Metern. Das PM, das JONSWAP und das TMA Spektrum – zu sehen in Reihenfolge

von oben nach unten – wurden dabei auf einen 250 Meter Ozeanpatch angewendet. Der Ozean ist 15 Meter tief und die Windgeschwindigkeit beträgt 25 Meter pro Sekunde. Das dargestellte Wasser ist bei jeder Anwendung in einem aufgewühlten Zustand, allerdings führt die Verwendung des TMA Spektrums mit seiner Tiefen-Abschwächungs-Funktion dazu, dass dem Wasser mehr Detail gegeben wird und, für die dargestellte Situation, vergleichsweise niedrige Ozeantiefe, plausibler wirkt. Sowohl das PM, als auch das JONSWAP Spektrum wirken für diesen Fall stark übertrieben. Die Abbildung zeigt auch die Simplizität in der Anwendung des Spektrums, da man bei Verwendung des TMA Spektrums lediglich Windgeschwindigkeit und Ozeantiefe setzen muss, um ein realistisches Ergebnis zu erhalten. Bei den anderen Spektren ist die Anpassung von diversen anderen Parametern notwendig, um ein gleichwertiges Endergebnis zu erhalten. Das TMA Spektrum erzeugt sofort ein glaubhaftes Bild, das den gegebenen Parametern entspricht [12, S. 6].

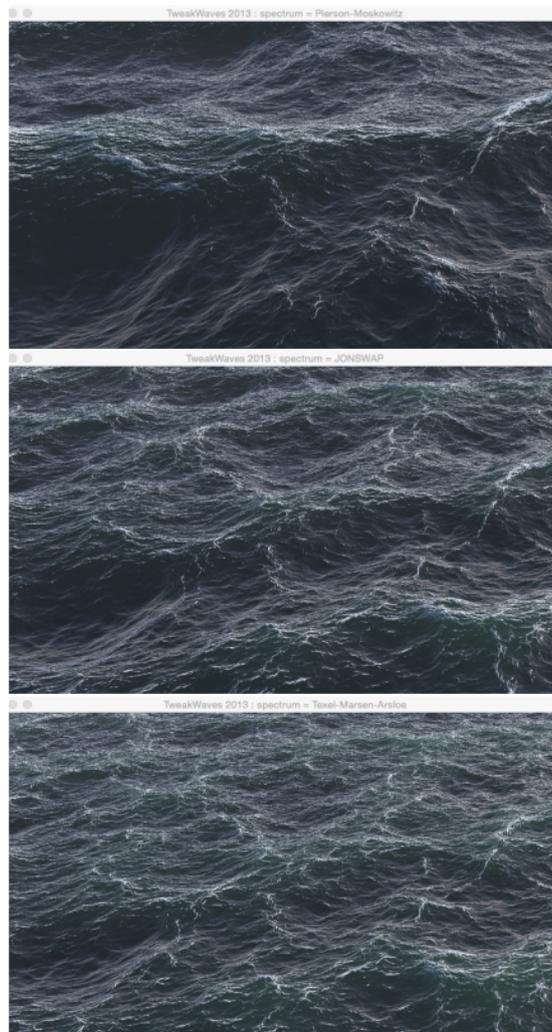


Abbildung 5.3: Von oben nach unten: Vergleich zwischen PM, JONSWAP und TMA Spektren als Teil des gleichen „solvers“ [12, S. 6].

Kapitel 6

Beispiele

Zur Untersuchung der Ozeandarstellung in Animation, wurden eine handvoll an Animationsfilme der letzten Jahre ausgewählt, und auf die Bewegung des Wassers und den Look des Ozeans analysiert. In allen behandelten Filmen spielt der Ozean eine tragende Rolle, entweder als Katastrophenwelle oder eigener Charakter.

Für die 3D-Beispiele wird auch der Arbeitsablauf thematisiert, da es dazu detaillierte Dokumentationen gibt.

6.1 Wasser in 2D-Animationsfilmen

Gake no Ue no Ponyo – kurz: *Ponyo* [33] – ist ein japanischer Animationsfilm aus dem Jahr 2008. Er entstand im Animationsstudio Ghibli unter der Leitung des bekannten Regisseurs Hayao Miyazaki.

Der Film erzählt die Geschichte eines Fischmädchens, welches menschlich werden will. Durch die Störung des Naturgleichgewichts, die dadurch entsteht, löst sie mit ihrem Wunsch jedoch unweigerlich schwere Katastrophen, wie Stürme und Überschwemmungen, aus. Der Ozean wird im Film befüllt mit Leben dargestellt. Eine immense Artenvielfalt etabliert ihn als Heimat, sowohl von Meerestieren, als auch von magischen Lebewesen, die ihn bewohnen. Die Unterwasser-Welt wirkt im Film etwas liebevoller gezeichnet, als die Wasseroberfläche. Von der farblich flachen Oberfläche des Wassers, taucht man in eine Umgebung ab, in der eine Vielzahl an Farben, Lichtbüschel und Kaustik zu finden ist.

Der Ozean ist nicht nur die Heimat vieler Tiere und Kreaturen, sondern auch er selbst wird zum Teil als lebendiges Wesen gesehen. Der Tsunami, der im Film die Landschaft überrollt, besteht nicht nur aus Wasser, sondern ist eine Schar an riesigen Fischen, die sich aus den Wassermassen gebildet haben. Diese Fische strömen mit gewaltiger Geschwindigkeit über die Wasseroberfläche, zerfallen und formen sich wieder neu. Wichtig ist hier dabei jedoch, dass dieser Tsunami unter Kontrolle der Protagonistin entsteht. Die Unnatürlichkeit des Tsunamis wird noch einmal dadurch unterstreicht, dass Wellen überspitzt schmal und hoch sind. Da dem Zuschauer jedoch früh im Film bewusst gemacht wird, dass Wasser magisch manipuliert werden kann, ist dieses unrealistische Verhalten im Rahmen der Handlung leicht zu akzeptieren.

In *Ponyo* ist ein hohes Maß an Varianz im Detailgrad des Ozeans zu finden. In den

Totalen wird das Wasser meist sehr minimalistisch gehalten. Die Oberfläche besteht nur aus wenigen, animierten Formen, die sich zyklisch über das Bild bewegen (siehe Abb. 6.1). Diese Vereinfachung hilft dabei, große Wassermassen und Interaktionen mit Booten in einer weiten Distanz, ausreichend darzustellen.



Abbildung 6.1: Der Ozean wird in *Ponyo* zum Teil sehr minimalistisch dargestellt [33].

In den Supertotalen wird der Wasseroberfläche ein sehr handgezeichneter Look verliehen, der an Wasserfarbmalerie erinnert. Diesen Stil findet man im Film dann vor, wenn wenig Interaktionen vorhanden sind, und ein Landschafts-Shot mit mehr Farben untermalt werden soll. Nahaufnahmen sind farblich weitaus simpler gestaltet, um einen überschaubaren Animationsaufwand zu erreichen. Farbverläufe sind kaum vorhanden. Wellenerhöhungen sind etwas dunkler als ihre Umgebung und „whitewater“ und Gischt sind klar vom Wasser getrennt.

Der Film *Song of the Sea* [39], welcher durch ein irisches Animationsteam, unter Leitung von Tomm Moore entstand, erzählt die Geschichte einer Familie und ihrer Verbindung zu den „Selkies“ – Fabelwesen, die im Meer beheimatet sind.

Der Ozean des Films wird durch die Überlagerung mehrerer Ebenen an Wasser und Wellen erzeugt. Diese Ebenen teilen sich meist einen gemeinsamen Farbverlauf, um den Eindruck einer verbundenen Fläche zu geben. Zusätzlich besitzt jede Ebene jedoch auch einen eigenen, minimalen Farbverlauf, um Wasserfluss und Wellen zu erzeugen. Durch den geringeren Farbverlauf, werden die Grenzen zwischen den Ebenen sichtbar, an welchen sich die Erhöhungen und Vertiefungen von Wellen befinden. Der Film verwendet zum Großteil einen Stil, der abstrakter Wasserfarbmalerie ähnelt. Farbkleckse sind dabei leicht zu erkennen, was dem Film noch einmal ein zusätzlich magischen und leicht kindliches Aussehen verleiht (siehe Abb. 6.2).

Zusätzliche Wellen werden durch die Überlagerung von weißen Linien erschaffen, die mehrere Dreiecke bilden, was dem Wasser einen etwas Comic-artigen Look gibt. Schaum und Gischt sind durch weiße, dicke Linien klar vom Wasser abgegrenzt und erhalten zusätzliches Detail durch Verschnörkelungen, welche an stilisierte Darstellungen von Wolken erinnert.

Wird der Ozean nicht von der Seite gezeigt, so verwendeten die Animatoren mehrere überlagerte Texturen im Wasserfarben-Stil. Diese Texturen „morphen“ im Raum, um die Wasserbewegung zu erzeugen. Die Unterwasser-Szenen des Films sind befüllt mit magischen Elementen. Hier werden nicht nur blaue Farben verwendet, sondern auch Gelb- und Rottöne sind zu finden.

Wellenspitzen werden durch direkte Lichteinstrahlung noch einmal erhellt, indem



Abbildung 6.2: Der Ozean in *Song of the Sea* besitzt eine Textur, die an Wassermalerei erinnert [39].

mehr Wellen eine weiße Kontur gegeben wird. Bootwellen werden durch eine Masse an dreieckigen Formen erzeugt, welche sich am Rumpf des Bugs formen, skaliert und verschoben werden, und schließlich wieder verschwinden. Im Sturm findet man eine geringere Anzahl an Ebenen vor. Harte Kanten und Spitze Formen werden verwendet, um der Naturgewalt mehr Kraft zu verleihen.

In den brechenden Wellen sind klare Linien zu erkennen. Stilistisch ähneln auch in diesem Film die brechenden Wellen dem Werk von Katsushika Hokusai.

6.2 Wasser in 3D-Animationsfilmen

Kubo and the Two Strings [34] ist ein Animationsfilm, welcher 2016 vom Animationsstudio LAIKA veröffentlicht wurde. Das Studio und dessen Mitarbeiter, sind auf Stop-Motion-Filme spezialisiert und daher geübt im Umgang mit einer Vielzahl an Props und mechanischen Effekten. In vergangenen Projekten wurden Spezialeffekte, wie Wasser und Feuer, vom Studio wie praktische Effekte behandelt. Erst beim Zusammenführen der Bilder wurde auf die Unterstützung durch Computerbearbeitung zurückgegriffen. *Kubo and the Two Strings* war LAIKAs erstes Projekt, bei dem Wasser als ein, zum Großteil computergenerierter, Effekt behandelt wurde, anstelle eines praktischen Effekts [43].

Bei der Planung von *Kubo and the Two Strings* wurde den LAIKAs Mitarbeitern schnell klar, dass die Menge an dargestelltem Wasser auf eine andere Art generiert werden muss, als bei vergangenen Projekten, da sie keinesfalls genug „Gelatine“ zusammenbekommen würden, welche für die im Film abgebildeten Wassermassen notwendig sein würde. Aufgrund dessen begannen sie, an einer computerbasierten Lösung zu arbeiten [43].

Für einen Film dieser Art, ist ein konsistenter Animationsstil entscheidend. Da *Kubo and the Two Strings* ein Stop-Motion Film ist, muss das Wasser, obwohl es in 3D generiert wird, dem traditionellen Stop-Motion Stils des Films entsprechen.

LAIKA entschied sich bei dem Film für einen Stil, der stark von klassischer japanischer Kunst inspiriert ist. Ein Großteil dieser Inspiration stammt von japanischem Holzschnitten, wie etwa der Arbeit von Hokusai.

Steve Emerson beschreibt den Holzschnitt Stil damit, dass sich simple Farbflächen in

starkem Kontrast mit Flächen befinden, die sehr detailliert sind und viele Informationen erhalten. Außerdem war es den Künstlern wichtig, die Holztextur darzustellen, die beim Druckprozess entsteht [43].

Für den Film wurden zuerst 2D Referenzen im angestrebten Stil angefertigt. Für den Ozean bedeutete dies Bilder, die einen stürmischen Ozean voller starker Kontraste zeigen. Dunkle, weiche Farbflächen in den Wellentäler wechseln sich mit harten, jedoch detaillierten Wellenkämmen ab. An den helleren Stellen des Bildes sind die Texturen, die auch im finalen Werk verwendet werden sollen, klar zu sehen. Anschließend wurde nach einer Möglichkeit gesucht, diese Form der Animation, ohne Verwendung einer Animations- oder Simulationssoftware, zu erstellen. Mehrere von LAIKAs Departements, unter anderem das Animations-, Kamera-, und Riggingteam arbeiteten in dieser Phase eng zusammen. Aus dieser Zusammenarbeit entstand eine Maschine, auf der verschiedene Materialien auf einem Raster aufgespannt werden konnten und mithilfe von Metallstäben auf diesem Raster auf ab bewegt wurden. Somit wurden Wellenbewegung erzeugt. Ein, für das Team interessanter, Effekt wurde schließlich mit einem Material erzielt, das in der Beschaffenheit ähnlich einer Mülltüte war. Dieser Stil kam jedoch nur für die simpleren Abschnitte des Ozeans infrage. Für die Spitzen der Wellenberge waren mehr Details und eine größere Reichweite an Farben gefragt [41].

Nach einer Vielzahl an Tests und einer Erweiterung des Teams galt es den fotorealistischen Look aus den Tests auf eine Art umzusetzen, die in das Gesamtbild des Films passte. Im Laufe mehrerer Monate wurden verschiedene Techniken schließlich in einer 3D-Animationsumgebung umgesetzt. Das Wasser entstand schließlich aus einer Mischung mehrerer Techniken [41]. Um den angestrebten Look des Wassers zu erreichen, arbeitet *Kubo and the Two Strings* stark mit Displacement der Geometrie. Dieses Displacement wird durch die Verwendung von „Worley-Noise“ erreicht (siehe Abb. 6.3). In Bewegung stellt die realistische Simulation des Wassers einen dezenten Kontrast zur Stop-Motion-Animation dar. Durch die verwendete Stilisierung passt der Ozean trotzdem ins Gesamtbild des Films.



Abbildung 6.3: Die Geometrie des Meeres in *Kubo and the Two Strings* entsteht durch Displacement einer Worley-Noise [34].

Die Geometrie der Fläche mit dem Displacement durch die „Worley-Noise“, wurde anschließend mit einer Ozeansimulation gemischt. Der Anteil dieser beiden Elemente wurde wieder durch Tests verfeinert. Durch diese Verfeinerung wurde schließlich erzielt, dass der Ozean glaubwürdige Bewegungen durchlief, jedoch zur gleichen Zeit einen Stil

aufwies, der in die Stop-Motion Welt von *Kubo and the Two Strings* passte. Dieser Stil wurde auch zum Teil dadurch erreicht, dass Holztexturen und prozedurale Noises und Fraktale in den Shader gemischt wurden.

Die großen Sturmwellen zu Beginn des Films wirken leicht künstlich, da ihre Formen, verglichen mit realen Wellen, relativ deutlich und perfekt sind. Dies spielt in die Handlung des Films mit ein, da sie durch Einfluss des Antagonisten entstanden sind. Das surreale Aussehen des Films ist deutlich inspiriert von japanischer Kunst, wie Origami und Holzschnitt. In den Credits findet man eine direkte Referenz zum Bild *Die große Welle vor Kanagawa*.

In der Farbe des Wassers sind deutlich Linien zu erkennen. Diese besitzen unterschiedliche Blautöne, um den Eindruck einer größeren Tiefe zu vermitteln. Um die Repetition des Wassermusters aufzubrechen, wird eine zusätzliche Noise verwendet. Somit kann die Stärke des Displacements durch Varianz in der Intensität der Textur gesteuert werden.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Kreation des Ozeans in *Kubo and the Two Strings* beachtet werden musste, ist die Skalierung der einzelnen Elemente. Der Ozean musste sich physikalisch korrekt bewegen, jedoch im richtigen Verhältnis zu den Puppen stehen. Da die Puppen nicht lebensgroß waren, mussten die Bewegungen des Wassers dementsprechend angepasst werden [42].

Ein Problem, das mit der Umstellung LAIKAs auf computergenerierte Effekte auftrat, war die Masse an generierten Daten, die durch die Simulationen entstanden. Ozeansimulationen brauchen sehr viel Speicher, was eine rigorose Planung des Renderablaufs benötigte. Das Hauptprogramm hinter LAIKAs Wassersimulation für dieses Projekt war die Animations und Effektsoftware Houdini von SideFX. Nach Angaben des LAIKA Teams wurden während der Produktion des Films große Fortschritte im Bereich der Software gemacht, was die Erstellung einiger Szenen stark vereinfachte [41].

Für VFX-Lead David Horsley war das Zusammenspiel aus lebensechter Wasserphysik und Stop-Motion Bewegungen der wichtigste Aspekt des Ozeans. Nur so konnten die Zuschauer in den Kinos davon überzeugt werden, dass sowohl Figuren, als auch das Wasser Teil der Welt im Film sind. David Horsley bezeichnet Wasseranimation als Symphonie. Das Anpassen eines kleinen Teils führt zur Änderung des Gesamtbildes und man muss möglicherweise mehrere andere Teile wieder ändern, um ein stimmiges Endergebnis zu erhalten [41].

Ein Beispiel für einen 3D-Animationsfilm, in dem erstmals Wellen bewusst möglichst genau kontrolliert wurden, ist Sony Pictures *Surf's Up* [40]. Der Film ist eine „Mockumentary“, eine Parodie, auf Dokumentationen. Als solches wurden mehrere ungewöhnliche Stilmittel verwendet, um das gewünschte Filmgefühl zu erreichen.

Surf's Up erzählt die Geschichte einer Gruppe von surfenden Pinguinen. Die Charaktere des Films werden von einem Kamerateam begleitet und während Trainingseinheiten und Wettbewerben auf dem Wasser gefilmt. Als solches war es wichtig, den Look und das Gefühl einer frei in der Hand gehaltenen Kamera zu vermitteln, die sich immer mitten im Geschehen befindet [3, S. 1]. Der Film sollte auf den Zuschauer wie eine typische Surfing-Dokumentation wirken, was sich auch in den Kameraeinstellungen widerspiegelt. Der Film verwendet viele Nahaufnahmen und in Actionszenen ist die Kamera meist mitten im Geschehen, was den Zuschauern ein noch größeres Immersions-Gefühl bieten soll.

Ausschlaggebend für den Erfolg der Produktion war die Entwicklung eines Wellensystems und der Anwendung dessen in der gesamten Produktions-Pipeline und jedem Departement [3, S. 1]. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass eine große Zahl an Wellen animiert werden mussten, von denen viele brechende Wellen waren, die nochmal zusätzliche Effekte benötigen.

Außerdem mussten Ressourcen in die Entwicklung eines eigenen „Looks“ des Wassers und neuer Belichtungstechniken investiert werden, um die brechenden Wellen so realistisch wie möglich zu gestalten [3, S. 2].

Die Darstellung von Interaktionen zwischen Wasser, Charakteren und Objekten, ist in den meisten Fällen sehr aufwendig. Obwohl jede Software Bereiche hat, in denen sie besser ist als andere, kann es auch von Vorteil sein, so viele Aspekte des Films wie möglich im gleichen Programm zu erstellen. Das Team hinter *Surf's Up* beschloss daher, sofern es möglich war, so viel Arbeit wie möglich innerhalb einer einzigen Animationssoftware zu erledigen, da Softwaresprünge immer mit zusätzlicher Arbeit verbunden sind. Es gilt, im Vorhinein einer Produktion, abzuwägen, ob sich diese Sprünge letztendlich lohnen, oder nicht [3, S. 12].

Manipulation der Zeit, kann im Film zum Ändern der Stimmung und zum Strecken von Filmmaterial eingesetzt werden. Produziert man Szenen eines Animationsfilm mit einer hohen Anzahl an Frames, ist zu jeder Zeit des Segments eine „Slow Motion“-Einstellung möglich. Die Verlangsamung des Wassers und die damit verbundene Darbietung eines höheren Detailgrads führt zu einem sehr hochqualitativen und realistischen Look. Es ist die Aufgabe des Layout-Departements, die Geschwindigkeit für Kamerabewegungen festzulegen. Abhängig von dieser, kann die Geschwindigkeit der Animation ebenfalls manipuliert werden, um schließlich eine Einstellung mit langsamer Animation zu erhalten, in der sich die Kamera jedoch mit normaler Geschwindigkeit bewegt. Das Team hinter *Surf's Up* führte für die Produktion eine „camera-speed“-Variable ein, die beim Erhalten der geforderten Geschwindigkeiten helfen sollte. Dieser Parameter konnte animiert werden, um fließende Änderungen der Geschwindigkeit und einen weichen Übergang, zwischen Slow-Motion und normaler Geschwindigkeit, zu erzeugen [3, S. 14–16].

In den meisten Produktionen erfolgt die Einteilung des Animationsteams meist nach Verantwortung für bestimmte Charaktere. Sony Pictures teilte das Team für diesen Film jedoch nach Animationssequenzen auf. Lead-Animatoren wurden Parts zugeteilt, die ihren Stärken entsprachen. Einer dieser Spezialbereiche ist die Animation der Surfbewegungen, die viele spezielle Bewegungsabläufe benötigten und aufgrund dessen zur Bildung eines „Surfing-Teams“ im Animationsdepartement führten. Auch in diesem Projekt wird die enge Zusammenarbeit der Departements betont. Das Ziel war es ständig, Material durch die Pipeline voran zu bekommen, nicht zurück. Kleine Details können große Auswirkungen haben, wenn ein Shot das Departement wechselt [3, S. 20].

Der Stil des Films wird als „karikierte Realität“ beschrieben. Es wurde zwar darauf geachtet, dass die Dynamik der echten Welt und die Gesetze der Natur nicht gebrochen werden, doch zugunsten der Animation wurde auf einen vollständigen Realismus verzichtet. In manchen Sequenzen wurde die Grenze zu Cartoon-ähnlicher Physik zwar überschritten, doch wurde dies immer bewusst und nie grundlos durchgeführt. Die schmalen Grenzen zwischen Cartoon-Physik und Realität müssen bewusst wahrgenommen werden. Eine Animation in einer Welt, in der Cartoon-Regeln etabliert sind, kann

Regeln und Gesetze brechen. Will man einem Filmprojekt jedoch auch nur einen Hauch an Realismus geben, wird ein Brechen dieser Gesetze schnell als Brechung im Filmgefühl empfunden. Die Regeln, denen die kreierte Welt zu folgen hatte, wurden bereits vor Produktion von den Regisseuren etabliert. Diese mussten im Laufe des Filmes immer konstant bleiben und von allen Filmbeteiligten respektiert werden [3, S. 34].

„Physics could not change to suit a certain animators style, regardless of how interesting that performance might be.“ [3, S. 34]

Wellen sind tragende Elemente des Films. Sie definieren jede Szene in denen sie vorkommen. Ohne Wellen gäbe es schließlich keine Geschichte zu erzählen. Eine Wasseroberfläche, die eine derart wichtige Rolle im Film spielt, muss demnach mit extra Sorgfalt behandelt werden. Wie auch andere „Environments“, muss das Wasser in der Layout-Phase aufgebaut und für die ersten Animationsvorgänge vorbereitet werden.

In *Surf's Up* kommen viele verschiedene Wellenformen vor. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den brechenden Wellen zu, da es sich ja um einen Film über das Surfen handelt. Viele Szenen enthalten deshalb Wellen, die eine Art „Hohlraum“ besitzen, damit den Surfern das sogenannte „tube riding“ erlaubt wird. Während die meisten Wellen herkömmliche Wellengrößen besitzen, so kommt es gegen Ende des Films auch zur Bildung von gigantischen, gefährlichen Wellen. Diese Diversität in Wasserformen machte klar, dass eine gewisse Kontrolle über die Wellen herrschen musste. Die Künstler mussten im Stande sein, mehrere verschiedene Formen zu kreieren und die Details dieser anzupassen. Da die Wellen meistens Charaktere in oder auf ihnen haben, muss auch eine Interaktion zwischen Charakter und Wasser dargestellt werden. Die Wellen in *Surf's Up* wurden daher selbst als eigene Charaktere betrachtet, statt einfach nur ein Effekt zu sein [3, S. 41].

Somit musste, wie für alle anderen Charaktere auch, ein „Rig“ erstellt werden. In der Produktion dessen, konnten überraschende viele Elemente eines regulären Charakter-Rigs auf den Wellen-Rig übertragen werden. Der Rig bestand, wie andere Rigs im Film auch, aus Controllern und der Geometrie [3, S. 42].

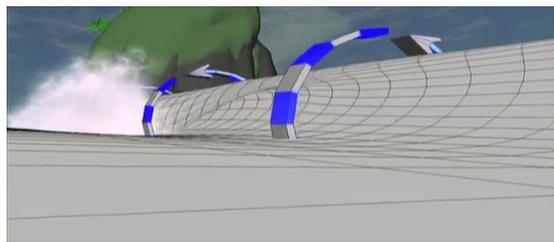


Abbildung 6.4: Durch Verwendung eines Rigs können Wellen präziser animiert werden, als mit alleinstehender Simulation [30].

Nach einiger Zeit der Forschung und Entwicklung, beschloss das Team, zwei verschiedene Wellen-Rigs anzufertigen. Diese Rigs bilden die Wellenformen, die schließlich nach Houdini gebracht und dort weiterverarbeitet werden. Der Programmsprung wurde an dieser Stelle akzeptiert, da die Künstler keinen Weg sahen, die Erstellung einer gesamten Ozeanoberfläche mit einer Unzahl an Oberflächenwellen und -detail, zufriedenstellend in ihre Pipeline zu integrieren. Die beiden Rigs waren in ihrem Aufbau zwar

ähnlich, doch besitzen sie unterschiedliche Parameter, die die Künstler anpassen konnten um unterschiedliche Wellenformen zu erzeugen. Ziel der beiden Rigs war es, drei verschiedene Arten von Wellen, die im Film häufig vorkommen, oder eine besondere Bedeutung haben, effizient kreieren zu können [3, S. 42].

Der erste Wellentyp ist die „pipeline-wave“. Diese Wellen entstehen üblicherweise über flachen Riffen und nehmen die Form einer, sich brechenden, Welle an, die einen sehr runden Hohlraum besitzt. Inspiriert wurde diese Welle im Film von der Hawaiianischen „Banzai“ Pipeline. Der zweite Wellentyp ist die Maverick-Welle, die man in Half Moon Bay in Kalifornien finden kann. Maverick Wellen sind gewaltige Wellen, die sich ebenfalls brechen und dabei eine Röhre bilden, allerdings nehmen sie kantigere Formen an, da sie sich nicht über einem Riff, sondern an Felsformationen unter Wasser, bilden. Der dritte und letzte Typ ist der sogenannte „spilling breaker“, eine Welle, die sich bricht, jedoch keine Röhre bildet [3, S. 42].

Beim aktiven Designen der Wellen ist es wichtig zu beachten, aus welchen Teilen eine Welle besteht und welche sekundäre Phänomene auftreten können. „Whitewater“ entsteht, wenn Wasser durch hohe Geschwindigkeiten und steile Flusswinkel verwirbelt wird und sich daher eine große Menge an Schaum und Blasen bildet. „Whitewater“ kann in der Gestaltung von Wellen ein Indikator dafür sein, wie schnell sie bricht und welche Wassermassen dahinter stehen. Während kleine Wellen nur wenig enthalten, kann eine riesige, brechende Welle zum Großteil von „whitewater“ überdeckt werden. Für *Surf's Up* wurde ein Plug-In erstellt, das „whitewater“ in Echtzeit anhand der Animation darstellte, um den Animatoren zu zeigen, wie stark der Effekt ist, ob er korrekt mit Charakteren und Welle interagiert und ob er eventuell Charaktere verdeckt [3, S. 44].

Wenn sich Objekte über Wasser bewegen, versetzen sie dabei eine gewisse Menge an Wasser, abhängig vom Volumen des Objekts, in Bewegung. Die daraus resultierenden Spuren nennt man „wakes“ oder „trails“ [3, S. 45].

Ein weiteres Plug-In wurde für *Surf's Up* entwickelt, welches neue Geometrie in Form einer Plane kreierte, um die Spur der Surfer auf dem Wasser zu visualisieren. Da die Plane direkt an die Wellengeometrie gebunden war, sahen die Animatoren, wie sich die Spur mit Bewegung der Welle mitentwickelt. Die Visualisierung der Spur des Surfbretts erlaubte es auch, die Rotation des Bretts besser an die Welle anzupassen, da man einen klareren Pfad am Wasser erkennen konnte. Zusätzlich bringt eine „wake“ den Vorteil, dass man erkennen kann, ob sich eine Welle zu schnell oder zu langsam bewegt, da sich diese mit der Welle mitbewegt und verformt. Da Wellen sehr komplex sind, ist es meist unmöglich die gesamte Geometrie, die letztendlich im Render zusehen ist, im Viewport darzustellen. Shots wurden im Layout-Prozess daher aufgeteilt. Ein Z-Depth Bild, das die gesamte Wassergeometrie darstellte, wurde gerendert und in die Kamera-Plane in Maya eingefügt, um Szenen auf mögliche Layering- oder Displacement Fehler kontrollieren zu können [3, S. 45].

Animiert man mit Wellen, tendiert man als erstes dazu, der Animation der Welle mit seinen Objekten oder Charakteren zu folgen. Nicht nur muss ein Pfad kreierte werden, der für die Wellenbewegung passt, sondern die Charaktere müssen ebenfalls passend dazu animiert werden. Dies kann nur funktionieren, wenn die Animation der Wellen bereits komplett abgeschlossen ist. Dies ist jedoch fast nie der Fall. Es kommt fast immer zu notwendigen Änderungen, sobald mehr Elemente einer Szene hinzugefügt werden. Die Animation des Charakters kann etwa darauf aufmerksam machen, dass sich eine Welle

zu schnell bewegt oder zu niedrig ist, woraufhin die Welle selbst angepasst werden muss, was wiederum dazu führt, dass die Animation des Charakters auseinanderfällt. Oft muss dann ein Teil der Animation gelöscht und neu erstellt werden, was wieder einen höheren Zeitaufwand darstellt.

Eine mögliche Lösung für dieses Problem, ist die Verwendung von „Constraints“. Im Falle von *Surf's Up* wurde beschlossen, dass sich das Brett horizontal mit der Wellengeschwindigkeit mitbewegen muss, und dass das Brett auf der vertikalen Achse an die Oberfläche des Wassers gebunden werden muss. Da die glaubwürdige Bewegung der Surfbretter ein essentieller Teil des Films ist, war es wichtig, eine realistische Geschwindigkeit für den Surfer zu erzeugen [3, S. 48–49].

Eine unrealistische Geschwindigkeit, Fehler oder Unbeständigkeiten würden spätestens bei Erstellung der Spezialeffekte garantiert sichtbar werden. Es ist ein schwerer Fehler, wenn erst das Effects-Departement feststellt, dass sich im Shot ein Objekt oder Charakter sich zu schnell oder zu langsam bewegt. Der Shot muss daraufhin wieder in der Pipeline zurückgeschickt werden, und verbraucht noch mehr Zeit und Ressourcen.

Laut Aussagen der Animatoren, war die Welle der schwerste zu animierende Charakter, von einem technischen Standpunkt gesehen. Enge Zusammenarbeit zwischen den Departements und eine teilweise Neustrukturierung der Pipeline waren für den Film notwendig [3, S. 52].

Die Erstellung einer visuell realistischen Welle erfordert ein hohes Maß an Kontrolle für das „Directing“. Die Produktion von Wellen ist eine gegenseitige Abhängigkeit mehrerer Departements, weshalb die Schaffung einer möglichst effizienten Produktionspipeline unabdingbar ist.

Regisseure haben bei den Wellen einen bestimmten Grad an Realismus angestrebt. Das Wasser sollte auf die Zuschauer echt wirken, auch, wenn die Charaktere stark stilisiert sind. Dies beinhaltet ein möglichst glaubwürdiges Verhalten der Wellen, um das Gefühl des Surfens und das Bild einer Dokumentation zu stärken. Das Wasser betreffend, wurde Stilisierung größtenteils nur als Anpassung der Farbpalette und Muster an der Wasseroberfläche erlaubt. Eine leichte Simplifizierung der komplexen Wellenoberfläche kann dabei helfen, stilisierte Charaktere und reales Wasser glaubwürdig in der gleichen Welt darzustellen [3, S. 53].

Eine Recherche in der Lookdev-Phase hat den Künstlern klargemacht, wie unterschiedlich die Verhältnisse auf einer Wasseroberfläche sein können. Viele Faktoren spielen eine Rolle, wenn es zum Aussehen des Wassers kommt. Wellen kommen in verschiedenen Formen, Farben und Bewegungen. Dies gibt Künstlern zwar eine große Wahl an möglichen Designs für die Wellen, doch kann diese Varietät auch ein bisschen überwältigend sein. Konzeptzeichnungen des Art Departements können dazu verwendet werden um die, für den Film benötigten, Wellenformen etwas einzugrenzen. Dies ist notwendig, um eine bessere Übersicht und mehr Fokus auf die relevanten Aspekte zu erlangen [3, S. 53].

Für Filme, in denen das Wasser eine handlungstragende Rolle spielt, ist es wichtig, dass Wasserbewegungen sich manipulieren lassen und sich nicht überraschend verhalten. Wenn man mit Wasser und Wellen arbeitet, tendiert man schnell zu physikalischen Simulationen. Diese erstellen zwar korrekte und visuell ansprechende Ergebnisse, doch sie sind auch sehr zeitaufwendig und Künstler haben oft Probleme, mit Simulationen die gewünschten Formen zu erreichen. Kontrolle über Simulationen ist meist limitiert oder

kompliziert. Für diese Art von Film, in der Wellen so eine wichtige Rolle spielen, war es wichtig ein Rig zur Kontrolle von Wellen zu erstellen, mit dem die Künstler einfach arbeiten konnten. Im Idealfall funktioniert dieses Rig auch in Echtzeit, um so schnell wie möglich Anpassungen durchführen zu können. Es muss den Ansprüchen von Layout-, Animation-, Effects- und Lightning-Departements entsprechen. Bei Verwendung eines nicht-simulierten Rig ist Vorsicht geboten, da es zu viel Flexibilität bieten kann [3, S. 54–56]. Ein Rig mit zu viel Kontrollmöglichkeiten kann dazu führen, dass Wellen zu künstlich wirken, unrealistisch aussehen und Parameter sich auf eine Weise ändern, die keinen Sinn für den Zuschauer machen.

Eine handlungsrelevante Welle, kann man innerhalb einer eigenen Plane isolieren und getrennt von anderen, unwichtigeren Wellen behandeln. Dies ist jedoch problematisch für den weiteren Verlauf der Produktion, da diese Plane meist nur die mindestens benötigte Fläche abdeckt. Die Oberfläche des Ozeans erstreckt sich bis an den Horizont. Ist dies in der Animation nicht der Fall, so ist die Szene sofort unglaubwürdig.

Dies kann dadurch gelöst werden, indem der Ozean in zwei Teile geteilt wird. Ein Teil stellt dabei die handlungsrelevante Fläche dar, auf der die „hero wave“ zu finden ist. Der zweite Teil bildet den Hintergrund. Der Hintergrund kann entweder aus mehreren zusätzlichen Planes bestehen, oder aus einer großen Plane, in die ein Loch für die Geometrie der „hero wave“ geschnitten wurde. Hierbei muss darauf geachtet werden, möglichst genau zu arbeiten, um die Schnittstelle unauffällig zu halten.

Während die Auflösung der wichtigen Wellen im Idealfall sehr hoch ist, kann durch die Hintergrundplanes an Rechenleistung und Renderzeit gespart werden, da sie weniger Details benötigen. Zusätzlich kann man auch mit „displacement maps“ arbeiten, um die Deformation des Hintergrunds erst bei Renderzeit zu erzeugen.

Das Effects-Departement verwendet Form und Bewegung der Ozean-Plane zum Erstellen von Partikeln und anderen Effekten. Eine unrealistische Bewegung der Oberfläche löst eine Kettenreaktion aus, die zu einer ebenso unrealistischen Generierung von Partikeln und anderen Zusatzeffekten führt. Zwischen Shots muss ein gewisses Maß an Konsistenz garantiert werden. Unbrauchbare Animationsdaten sollen nicht an die folgenden Abschnitte der Pipeline weitergegeben werden.

Um die Korrektheit des Shots zu überprüfen, sollte man eine „Pre-Vis-Verification“ anhand mehrerer Parameter durchführen [3, S. 56]. Im Rahmen dieser Prüfung, soll die Textur des Wassers auf „surface stretching“ und „compression“ untersucht werden. Zusätzlich sollen die „wake trails“ analysiert werden, da an ihnen die Relation der Geschwindigkeit der Charaktere zu den Wellen abgelesen werden kann. Zuletzt muss man, bei Verwendung eines Partikelsystems, auf die korrekte Position der Generierung achten.

Visualisations-Tests können bereits in der Layout- oder frühen Animationsphase stattfinden, um für einen besseren Überblick zu sorgen. Änderungen in der Wellengeometrie kann dazu führen, dass ein Shot in der Animationsphase gut aussieht, in späteren Phasen jedoch Fehler dazukommen.

Statt Wellen immer wieder frisch zu generieren und dann zu prüfen, kann man auch eine Bibliothek an akzeptierten Wellen-Voreinstellungen anfertigen, die als Ausgangspunkte für neue Shots dienen.

Die Grundform einer signifikanten Welle, sollte möglichst früh im Produktionsprozess festgelegt werden. Gewisse Aspekte einer Welle beeinflussen alle andere Departements der Produktion. Die Entwicklung und Erstellung einer effizienten Pipeline zur

Erschaffung einer Welle, kann in manchen Fällen mehr Zeit beanspruchen, als die Animation der Wellen selbst [3, S. 57].

Frühe Wellenanimationen sollen auch dazu verwendet werden, so wenig „kickback“ wie möglich zu erzeugen. Spricht man von „kickback“, so meint man damit die Rückgabe eines Shots an eine frühere Stelle in der Pipeline, meist ausgelöst durch übersehene Fehler oder Änderungen. Die Animation des Charakters sollte immer den Bewegungen des Wassers und der Wellen folgen, nicht umgekehrt. Ist ein Charakter bereits animiert, wenn eine Änderung am Wasser durchgeführt wird, so wird ein großer Teil der Animation anschließend oft unbrauchbar. Während kleine Änderungen manchmal akzeptabel sind, so können große Änderungen im schlimmsten Fall dazu führen, dass ein Shot zurück in die grobe Layout-Phase geschickt werden muss, um die Einstellung neu zu planen [3, S. 60].

Um in frühen Phasen der Produktion die Generierung von Partikel zu testen, empfiehlt es sich, mit Platzhalter-Objekten zu arbeiten, die, auf dem Wasser treibende, Gegenstände oder Fahrzeuge simulieren. Diese Platzhalter können durch eine Bewegungseinschränkung eines Locator- oder null-Objekts auf die Oberfläche des Wassers erstellt werden. Für die Produktion von *Surf's Up* wurden diese Objekte „wave rider“ genannt [3, S. 66]. Diese können im Blocking einen Charakter oder ein Prop repräsentieren, und als Ausgangspunkt von Effekten und Partikelsystemen eingesetzt werden.

Das Ziel des Special-Effects-Teams, ist die Erstellung von Wasser und Wellen mit dem erforderlichen Maß an Realismus, eine maximale Flexibilität für Anpassungen und einem System zum Blocking, das in der Layout- und frühen Animations-Phase verwendet werden kann. Soll eine bestimmte Wellenform ausschließlich mit Simulationen erzeugt werden, kommt es schnell zu einem sehr aufwendigen Prozess, in dem unzählige Variablen penibel angepasst werden müssen. Dies kann zwar umgangen werden, indem die Grundbewegung per Hand animiert wird, doch dadurch entstehen wiederum neue Herausforderungen.

In Disneys *Moana* [36] war das Wasser nicht nur ein bedeutsames Element für die Umgebung und die Charaktere, sondern es war selbst ein eigener Charakter. Der Ozean war, im Rahmen des Filmes, ein lebendiges Lebewesen, das sich in mehreren Formen präsentierte. Für den Film wurde eine eigene Pipeline angefertigt und ein proprietärer „fluid-solver“ zur Erstellung realistischer Wellen kreiert. Die große Herausforderung, die dabei entsteht, wenn man Wasser eine Performance geben will ist, dass die Simulationen zu einem gewissen Grad steuerbar sein sollen. Die Simulationen müssen dabei, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, gewissen Naturgesetzen widersprechen, jedoch in einem Rahmen bleiben, der den Zuschauern plausibel erscheint und sie nicht aus dem Geschehen herauszieht. Für den Film wurden die natürlichen Dünungen und Bewegungen von Ozeanwasser in den Aufbau von designeten Formen miteinbezogen, was zwar die typischen, anthropomorphen Merkmale eines solchen Charakters limitierte, doch den Zuschauern besser aufzeigte, dass es sich bei dem simulierten Charakter, um den Ozean als Ganzes handelte [8, S. 1].

In Szenen, in denen der Ozean die Gestalt eines Charakters annahm, wurde er behandelt, wie andere Charaktere des Films. Für die Layout- und Animations-Departements wurde ein Rig als Rahmenwerk zur Verfügung gestellt. Da ein Rig für das Animations-Departement in den meisten Fällen jedoch nicht zum Animieren ausreicht und eine Form der Visualisierung benötigt wird, war es auch notwendig eine Simulation mit niedriger

Auflösung bereits zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich wurden auch „flow-curves“ bereit gestellt, die die Fließrichtungen des Wassers vorgeben. Da den Animationskünstlern mit den „flow-curves“ und dem vorbereiteten Mesh bereits mehr Material zum Arbeiten gegeben wurde, war es zu späteren Zeitpunkten in der Pipeline einfacher für das Effects-Department, die Effekte an die Bewegungen der Animatoren anzupassen. Die Rolle des Layout-Departements war es, die Formen des Wassers derart anzupassen, dass es möglichst nahe an vorgegebene Kompositionsparameter kam. Das Animations- und das Effects-department arbeiteten konstant eng zusammen, um den Charakter des Wassers optimal zu gestalten. Es war sehr wichtig herauszuarbeiten, zu welchen Zeitpunkten in der Pipeline, welche Aspekte des Wassers zu bearbeiten waren. Ein besonderer Augenmerk wurde darauf gelegt, wie viel Arbeit vom Animationsdepartment zu erledigen waren, bevor erste Effekte simuliert und hinzugefügt werden konnten. Grobe Animationen und Timing war wichtig, um herauszufinden, ob der Charakter und sein Aufbau für die Shots und die weitere Arbeit durch das Effects-Department funktionierten. Die Autoren stellen noch einmal fest, wie wichtig die enge Zusammenarbeit zwischen den Departments war, insbesondere zwischen dem Animations- und dem Effects-Department, um für jeden Shot die Ziele und eine entsprechende Herangehensweise festzulegen. Es musste klar eingeteilt werden, welche Aufgaben auf welche Bereiche fallen und welche Elemente von welchem Department bearbeitet werden mussten, um einen Shot mit dem Element des Wassers und dem entsprechenden Character zu bereichern [8, S. 1].



Abbildung 6.5: In *Moana* wurde der Ozean als eigener Charakter behandelt. In manchen Szenen wurde er ähnlich wie eine Sockenpuppe animiert [36].

Zu Beginn der Filmentwicklung gab es nur einen Workflow, der auf der Anwendung eines relativ simplen Rigs aufgebaut war. Im Laufe der Erschaffung des Films wurde jedoch klar, dass der Charakter des Wassers mehr Möglichkeiten für eine eigene Performance erhalten muss. Daher wurde aus dem einzelnen Workflow ein neuer Ansatz entwickelt, der in Form mehrerer Module aufgebaut war. Die einzelnen, modularen Komponenten wurden so offen wie möglich gestaltet, um Künstlern mehr Spielraum für Erweiterungen und Verbesserungen zu geben. Das daraus entstehende Netzwerk war Kern der Wasseranimation, von dem aus die einzelnen Shots gestaltet werden konnten. Dies galt auch für Shots, die Komponenten enthielten, welche einmalig im Projekt verwendet wurden. Die Bewegung selbst war eine Kombination aus Simulation und prozeduraler Deformation, die entsprechend animiert wurde [8, S. 1].

Durch die Kollaboration der Departments, wurden schnell die Bedingungen für die Darstellung des Ozeans und des Wasser-Charakters festgelegt. Emotionen und Dynamik waren hierbei wichtige Faktoren. Eine zweite Simulationsebene erzeugte sekundäre Be-

wegungen, Verzögerungen und sorgte für eine zusätzliche Flüssigkeit in der Bewegung der Oberfläche, auf welche schließlich eine Simulation von Partikeln angewendet wurde. „Flow-curves“ gaben den Animatoren die Möglichkeit, die Fließrichtung des Wassers durch das Rig zu steuern. Die Richtung der Wellen wurde meist aufeinander abgestimmt. Die Grundfließrichtung des Ozeans wurde durch einen Gradienten festgelegt. Auf diesem wurde an den gewünschten Positionen eine Noise-Textur angewandt und dem Gradienten beigemischt. Auf diese Weise konnte der Charakter des Wassers mit einer Fließrichtung dargestellt werden, die sich zwar mit dem Rest des Ozeans mitbewegte, jedoch auch von der Oberfläche abhob oder darauf zubewegte [8, S. 2]. Grundsätzlich besitzen die Wassersimulationen in *Moana* eine Ruheposition, die als Ausgangsbasis einer jeden Szene dient. Auf diese Ruheposition wurde animiert und Kontrollen hinzugefügt, um zwischen der finalen Simulation und der Ausgangsposition zu überblenden, oder die Intensität der Bewegungen zu steuern. Der Fluss des Wassers wurde auch durch den Charakter „Moana“, beziehungsweise ihrem Rock gesteuert. Das Simulations-Modul für den Rock sorgte dafür, dass das Wasser in Moanas Richtung fließt und, dass die Kleidung korrekt auf Wasserbewegungen reagiert [8, S. 2].

Um dem Wasser-Charakter eine gewisse Glaubwürdigkeit zu verschaffen, war es nötig, dass, nachdem Aktionen durchgeführt wurden, er auf natürliche Weise „zerfällt“ und wieder Teil des Ozeans wird. Dies versicherte auch, dass der Charakter als Ozean oder Teil des Ozeans gesehen wurde, statt als separate Entität. Um diesen Effekt zu erreichen, wurden sekundäre Simulationen in die Hauptsimulation zugefügt. Als Beispiel wird eine „high-five“-Bewegung zwischen Moana und dem Wasser genannt. Moanas Handfläche wird dazu benutzt, festzustellen, wann es zu einer Kollision zwischen ihr und dem Wasser kommt, woraufhin an der Stelle der Kollision zum entsprechenden Zeitpunkt Partikel generiert werden. Sobald sich das Wasser zurückzieht, wird die Simulation der animierten Partikel langsam durch eine Simulation von Partikeln, die physikalisch korrekt auf Schwerkraft reagieren, ersetzt. Um den Übergang nicht zu hart zu machen, wird der Zerfall durch eine Noise-Textur angegeben. Hier kommen auch wieder zusätzliche Kollisionsobjekte ins Spiel, um die Interaktionen glaubwürdiger zu machen [8, S. 2].

In *Moana* gibt es Filmszenen, in denen der Ozean geteilt wird, wodurch Wasserwände entstehen. Beim ersten Mal, wo dieser Effekt vorkommt, wird relativ seichtes Wasser in Küstennähe geteilt. Das Wasser wurde auch hier wieder durch modellierte Basis-Meshes erzeugt, auf welche anschließend Ozean-Deformer angewendet wurden. Ziel war es hierbei, das Wasser als relativ ruhig darzustellen. Wichtig dabei war die Menge an Refraktion. Eine niedrige Refraktion erlaubt es den Zuschauern, tief in das Wasser zu blicken. Glatte Wasserwände und eine Anpassung des Refraktionsindex für manche Szenen wurden verwendet, um diesen Effekt zu erreichen. Zusätzliche Sekundäreffekte wie Blasen und Wasserspritzer wurden hinzugefügt, wo sie benötigt wurden. Der Autor stellt klar, dass man mit diesen Sekundäreffekten sparsam umgehen soll. Nicht die Menge ist wichtig, sondern die effektive Anwendung an den essentiellen Stellen. Die Spaltung des Wassers findet auch im Klimax des Films statt. In diesem war es von hoher Bedeutung, dass die „flow curves“, die die Fließrichtungen des Ozeans vorgaben, korrekt dirigiert wurden. Die immense Größe des dargestellten Ozeans machte es den Effekt-Künstlern jedoch schwer, eine angemessene Simulation durchzuführen [8, S. 2]. Die Wasserwände in der finalen Szene stehen, sobald sie aufgebaut sind, für fast die gesamte restliche Dauer derselben. Auch hier wurde letztendlich mit Modulen gearbeitet. Effekt-Künstler fertigt-

ten mehrere Wand-Abschnitte an, für die die Wasserbewegungen simuliert wurden. Dies beinhaltete die primäre Wassersimulation, aber auch Sekundäreffekte wie Schaum oder aufgewirbeltes Sediment. Um die Wände auf die großen Distanzen zu erzeugen, wurden diese Abschnitte mehrmals dupliziert, skaliert, gespiegelt und in der Animationszeit verschoben. Für das Layout-Departement wurden Proxys verwendet, um die Komposition zu gestalten. Die Simulation wurde daraufhin an den Positionen der Proxys neu durchgeführt, um die Wand zu erschaffen. Die Autoren stellen fest, dass für die zeitgerechte Fertigstellung der Szene, viel Planung zum Management der Daten notwendig war. Wiederverwertung der Daten, das Verwenden von Simulations-Paneeelen und effiziente Anwendung von Surface- und Point-Blending zum Überblenden der Paneele, spielten eine große Rolle [8, S. 2].

Die Kooperation zwischen den Departements muss so früh wie möglich in einem großen Projekt geschehen, um die Grundsteine für die verwendete Technik zu legen. Flexibilität in der erzeugten Technik und den angewendeten Workflows erlaubt Künstlern in verschiedenen Departements einzigartige Szenen zu erzeugen, obwohl ein gemeinsamer Kern dahinter steht. Auf diese Weise kann Wasser entstehen, das natürlich und glaubwürdig wirkt, obwohl es Bewegungen durchführt, die in der echten Welt nie geschehen könnten, was dem Zuschauer sonst auch bewusst ist.

6.3 Alternative Methoden

Ozeane lassen sich auch auf andere Arten für eine Animation erstellen. Eine dieser Möglichkeiten, ist die Animation von Wasser in „Stop-Motion“.

In früheren LAIKA-Projekten wurde Wasser durch eine Kombination aus 3D-Druck und einer Technik namens „Replacement Animation“ dargestellt. Eine Vielzahl an unterschiedlichen Wasserstrahlen wurden am Computer modelliert und anschließend von einem 3D-Drucker ausgedruckt. Diese Technik ist der Grundstein, auf dem ein Großteil der Animation LAIKAs aufbaut und geht zurück auf den ungarisch-amerikanischen Filmemacher George Pal. Für Pals Filme wurden Puppen produziert, die aus austauschbaren Einzelteilen bestanden, welche je nach Bedarf verwendet und getauscht wurden. Anstatt die Puppen aus einem weichen Material herzustellen, das im Laufe der Animation verformt wurde, werden bei Pals Technik die Einzelteile, wie zum Beispiel der Kopf der Puppe, an bestimmten Zeitpunkten gewechselt, um Mundbewegungen oder Emotionen darzustellen. Die Verwendung dieser Technik bedarf einer genauen Planung, allerdings sind die fertigen Teile wiederverwendbar und schnell austauschbar [45].

Für den 2012 Film *Paranorman* [37] verwendete LAIKA eine Kombination aus Pals Technik und der Animation eines weichereren, verformbaren Materials. Wasserspritzer wurden wieder ausgedruckt und bei jedem neuen Frame getauscht, allerdings wurden auch verschiedene Arten von formbaren Gelatin verwendet, um Wasserkörper darzustellen. Dieses Gelatin wurde, im Gegensatz zu den Wasserspritzern, nicht bei jedem neuen Frame ausgetauscht, sondern einfach in die gewünschte Form gebracht [43].

Ein Ozean muss aber nicht immer nur aus Wasser bestehen. Für gewisse Sequenzen bieten sich auch andere Materialien an. *Kubo and the Two Strings* [34] beinhaltet eine Traumsequenz, in welcher alles aus Papier besteht. Die Oberfläche des Ozeans, sieht wie eine Masse an dicken, papierähnlichen Blättern aus, die übereinandergelagert wurden, um eine gewisse Beständigkeit im Traum zu erschaffen. Dies wird begleitet von einer

sanften Wellenbewegung zur Erzeugung einer gewissen Ruhe.

Entscheidet man sich, für einen Ozean, der nicht aus Wasser, sondern einer anderen Flüssigkeit besteht, so muss man die Viskosität beachten, da diese ausschlaggebend für alle Bewegungen ist. Mit höherer Viskosität werden die Bewegungen der Flüssigkeit langsamer. Dünnere Flüssigkeiten bewegen sich hingegen schneller und verteilen sich auch weiter [9, S. 148].

Auch andere Materialien bieten sich dazu an, Wellenbewegungen zu erzeugen. Flaggen sind ein beliebtes Beispiel für Wellenbewegungen in Objekten. Sogar Geräusche und Licht bewegen sich in Wellen.

Kapitel 7

Fish for Life

Fish for Life [32] ist ein animierter 3D-Kurzfilm, welcher im Rahmen des Masterstudiums Digital Arts als Abschlussprojekt entstand.

7.1 Handlung

Der Film handelt vom skandinavischen Fischer Manolin. Während sein Heimathafen in den letzten Jahren immer moderner wurde, bleibt Manolin seinen rustikalen Methoden treu. Doch dies ist nicht zu seinem Vorteil. Frustriert durch geringe Fangerfolge und der starken Konkurrenz, beschließt er weiter als sonst aufs offene Meer zu fahren, um dort sein Glück zu versuchen.

Manolin verbringt die Nacht weit außerhalb seiner gewohnten Fanggründe. Am nächsten Morgen schließlich, beißt etwas an. Der Fischer glaubt, endlich seine Pechsträhne beendet zu haben, doch als er versucht den Fisch einzuholen, muss er feststellen, dass dieser weit stärker ist als er. Ein Zweikampf zwischen Fischer und Fisch entbrennt, der Manolin immer weiter hinaus aufs Meer und in eine lebensgefährliche Situation bringt.

7.2 Der Ozean im Film

Fish for Life spielt sich zum Großteil auf offenem Meer ab. Dementsprechend ist die Darstellung von Wasser und Wellen einer der wichtigsten Aspekte des Films. Das Meer ist für den Hauptcharakter seine Heimat. Er fühlt sich vollkommen wohl auf seinem Boot, was sich in der idyllischen Stimme zu Beginn des Films widerspiegelt. Dies ändert sich jedoch, sobald er den Fisch fängt. Der Fisch zieht ihn aus seinen gewohnten Gewässern heraus. Der Protagonist wird aus seinem sicheren Fanggebiet in die Gefahr des offenen, weiten Ozeans befördert.

Mit steigender Distanz zu seinem Heimathafen, verstärkt sich auch die Unruhe des Ozeans. Je weiter er aufs Meer gezogen wird, desto stürmischer wird es. Der Kampf gegen Fisch und Sturm soll Manolin zum Helden machen. Indem er überlebt und endlich einen großen Fang nach Hause bringt, könnte er endlich wieder mehr Freude an seinem Leben als Fischer finden. Doch sobald Manolin über Board geht, ändert sich die Stimmung sofort. Manolin sieht den majestätischen Fisch, der ebenso wie er um sein Leben kämpft. Die Strömung des Ozeans und die Leine der Angel führen dazu, dass der Fisch in einer

ähnlich hilflosen Situation ist, wie Manolin auch.

Eine gewaltige Welle spült letztendlich am Höhepunkt des Sturms Manolin und den Fisch an Land. Die Bewegungen des Ozeans in *Fish for Life* sind essentiell für die Handlung des Films. Nicht nur, weil sie den Protagonisten transportieren, sondern, weil durch den Kampf im Sturm eine Verbindung zwischen Angler und Meereslebewesen entsteht. Durch den gemeinsamen Überlebenskampf auf hoher See, findet Manolin einen neuen Respekt für seinen Beruf und das Leben im Meer.

7.3 Stil

Eine der größten Herausforderungen während der Produktion war, einen konsistenten Stil festzulegen. Da die Basis des Wasser-Meshes vollständig simuliert wurde, gaben erste visuelle Tests ein sehr realistisches Bild von sich. Dies schien anfangs einen akzeptablen Look für den Film zu bieten. Erst als die ersten Render mit allen Elementen des Films durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass der Stil des Wassers nicht zum Aussehen der Charaktere und Requisiten passte.

Der Shader des Wassers verzichtet zum Großteil auf „Refraction“. Da das Wasser nicht vollständig realistisch aussehen soll, kann auf diese Weise etwas Renderzeit eingespart werden. Die Reflexion hingegen ist in den meisten Einstellungen am Maximum. Nur in gewissen Shots mit tiefem Sonnenstand und starker Belichtung wurde der Wert etwas zurückgeschraubt.

7.4 Pipeline

Der Film wurde fast vollständig in der Animationssoftware Maya erzeugt. Die Ozeanoberfläche entstand dabei durch Mayas Bifröst Ocean Simulation System, oder kurz: BOSS.

BOSS erzeugt die Geometrie, die für einen Ozean benötigt wird, durch die Anwendung eines Ozeanspektrums auf eine flache Ebene. Das System erlaubt es dabei seinen Anwendern, aus einer kleinen Zahl an ausgesuchten Spektren zu wählen, um die gewünschten Formen zu erhalten.

Für eine Großteil der ersten Hälfte des Filmes, besteht der Ozean in *Fish for Life* aus Wellen, die mit dem TMA-Spektrum erstellt wurden. Die Anwendung dieses Spektrums sorgt, aufgrund der Tiefen-Abschwächungs-Funktion, für eine Wellenlandschaft mit geringerer Varianz in Höhe, als andere Spektren. Das Wasser wirkt als solches deutlich ruhiger und glatter.

Sobald Manolin aufs Meer gezogen wird, nimmt die Intensität der Wellen rasant zu. Die folgenden Szenen entstanden deshalb aus einer Mischung mehrerer Spektren, die übereinandergelagert wurden. Das JONSWAP-Spektrum bildete dabei die mittelgroßen Wellen, die das Boot hin und her schaukeln. Für die spitzen Details der Wellen war dieses Spektrum jedoch nicht geeignet, da es zu weiche Formen bildet. Hier kam das Krylov-Spektrum zum Einsatz, welches als Displacement zur Renderzeit aufgetragen wurde, und die Details der Ozeanoberfläche bildet.

Der Film verlässt sich jedoch nicht vollständig auf die Verwendung von Spektren. Da man nur eine sehr begrenzte Kontrolle über die Position und Größe der Wellen, die



Abbildung 7.1: Die Wellen in *Fish for Life* entstanden durch Überlagerung und Skalierung mehrerer Ozeanspektren [32].

durch ein Spektrum entstehen, besitzt, wurden die wichtigsten und größten Wellen mit „Deformern“ an der Geometrie erzeugt. Dies sorgte dafür, dass die Höhe und Form der gefährlichsten Wellen genauer gesteuert werden konnten.

7.5 Boot-Animation

Die Bewegung des Bootes am Meer war zu Beginn der Produktion schwer umzusetzen. Die Verwendung eines „Locators“, der an die Oberfläche gebunden wurde, sorgte zwar dafür, dass das Boot schwamm, allerdings sah das Ergebnis sehr unglaubwürdig aus. Durch die Bewegung der Wellen kam es häufig zu einem „Zucken“ des Bootes, sobald der „Locator“ auf eine Erhöhung an der Geometrie traf. Die Bewegung des Bootes wurde schließlich durch die Verwendung des Mittelwertes einer Fläche erzeugt. Die vier Ecken einer Plane wurden an die Wasseroberfläche gebunden. Der Mittelpunkt dieser Fläche diente schließlich als Position des Bootes im Wasser. Dies erzeugte eine weitaus sanftere Bewegung, die auch glaubwürdiger ist. Zur Vorwärtsbewegung wurde ein Pfad an die Wasseroberfläche gebunden, der sich mit der Geometrie verformte.

Kapitel 8

Fazit

Das Gebiet der Spezialeffekt-Animation, hat im letzten Jahrhundert einen gewaltigen Wandel erlebt. Wurden Effekte früher nur zur Begleitung der Charakter-Animation benutzt, so sind bahnbrechende und moderne Effekte für viele Konsumenten heutzutage die Hauptmotivation, um sich im Kino einen Film anzusehen.

Auch die Darstellung von Ozeanen ist von diesem technologischen Wandel stark betroffen.

Simulationen von Flüssigkeiten haben bereits einen langen Entwicklungsweg hinter sich, doch mit der immer populäreren Anwendung für Filme und interaktive Anwendungen, kann man sicherlich neue Innovationen und Tools in den nächsten Jahren erwarten.

Eine große Zahl an Wissenschaftlern beschäftigt sich bereits seit zwei Jahrhunderten mit der Bildung von Wellen. Da dies nicht nur für die Animation wichtig ist, sondern auch für die Hydro- und Marinetechnik, war der Schritt zu genaueren, empirischen Messungen des Wasserverhaltens sehr wichtig. Ozeanspektren bieten dabei die Möglichkeit, Daten, die an gewissen Stellen im Meer und in verschiedenen Zuständen gemessen wurden, effektiv in Simulationsmodelle einzubauen.

Für Künstler und Animatoren können Simulationen eine gute Möglichkeit zur Erstellung von Ozeanen und anderen Wasserkörpern sein. Spektren helfen auch dabei, möglichst genau an eine gewisse Referenz zu kommen. In gewissen Fällen kann eine Simulation sogar ausreichend sein und den Künstlern damit eine Menge Arbeit abnehmen. Oft ist es allerdings notwendig, die Ergebnisse von Simulationen zusätzlich anzupassen.

Man darf sich als Animator nicht nur auf Simulation stützen, wenn für ein Projekt eine Ozeanszene animiert wird. Ein Grundverständnis für Wellenverhalten ist ebenso notwendig, wie eine Vertrautheit mit den verwendeten Begriffen. Simulationen können durch die Anwendung von Wellenfiltern und Änderung von Simulationsparametern stilisiert werden und helfen vor allem dabei, dem Künstler die mühsame Erstellung von Details zu erleichtern.

Mit der Erweiterung technischer Möglichkeiten, hat sich auch die Liste an möglichen Rollen, die ein Ozean spielen kann, erweitert. Katastrophenfilme dominierten früher die Filmlandschaft, wenn es zu Spezialeffekten kam. Wellen wurden so groß und gefährlich wie möglich dargestellt, welches ihnen den Namen „Katastrophenwelle“ brachte. Doch mit besseren Möglichkeiten zur Erzeugung und Steuerung von Wasser, hat sich dieses Bild geändert. Wasser und Wellen sind in heutigen Filmen oft eigene Charaktere, die an der Seite der Protagonisten stehen. Der Ozean hat einen eigenen Charakter und kann

mit seinen Bewegungen seine Gefühle vermitteln.

In der Animation von wichtigen und großen Effekten wie Ozeanen, ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Departements extrem wichtig. Ozeane und insbesondere Wellen, sind Effekte, die einen starken Einfluss auf die Animation haben, wodurch eine gegenseitige Abhängigkeit entsteht. Findet zu wenig Kommunikation statt, oder geschehen Fehler in der Übertragung von Daten, kommt es zu hohen und kostspieligen Zeitverlusten. Aufgrund dessen ist eine frühe Festlegung der Produktions-Pipeline, ein Einhalten etablierter Regeln und eine ausgiebige Zusammenarbeit aller Departements essentiell für eine erfolgreiche Produktion des Films.

Anhang A

Inhalt der CD-ROM/DVD

Format: CD-ROM, Single Layer, ISO9660-Format

A.1 PDF-Dateien

Pfad: /

Mathae_Lukas_2018.pdf Masterarbeit

A.2 Bildmaterial

Pfad: /images

*.jpg, *.png Bildmaterial der Masterarbeit

A.3 Online-Ressourcen

Pfad: /images

*.jpg, *.png Archivierte Onlinequellen

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] Roland Angst u. a. „Robust and Efficient Wave Simulations on Deforming Meshes“. *Computer Graphics Forum* 27.7 (Okt. 2008), S. 1895–1900. URL: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-8659.2008.01337.x> (besucht am 26.05.2018) (siehe S. 21).
- [2] Stephen F Barstow u. a. *Measuring and analysing the directional spectrum of ocean waves*. Brussels: COST Office, 2005 (siehe S. 18).
- [3] Rob Bredow u. a. „Surf’s Up: The Making of an Animated Documentary“. In: *ACM SIGGRAPH 2007 courses*. ACM. 2007, S. 1–123 (siehe S. 5, 6, 37–43).
- [4] Gary Bruins und Jon Reisch. „Rat-Sized Water Effects in Ratatouille“. In: *ACM SIGGRAPH 2007 Sketches*. SIGGRAPH ’07. San Diego, California: ACM Press, 2007. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1278780.1278863> (besucht am 20.09.2018) (siehe S. 23–25).
- [5] J.X. Chen u. a. „Real-Time Fluid Simulation in a Dynamic Virtual Environment“. *IEEE Computer Graphics and Applications* 17.3 (Mai 1997), S. 52–61. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/38.586018> (besucht am 20.09.2018) (siehe S. 21).
- [6] Adam Davis. „Never Quite the Right Size: Scaling the Digital in CG Cinema“. *Animation* 9.2 (2014), S. 124–137 (siehe S. 8).
- [7] Eric Froemling, Tolga Goktekin und Darwyn Peachey. „Simulating Whitewater Rapids in Ratatouille“. In: ACM Press, 2007, S. 68. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=1278780.1278862> (besucht am 26.05.2018) (siehe S. 24, 25, 27).
- [8] Ben Frost, Alexey Stomakhin und Hiroaki Narita. „Moana: Performing Water“. In: *ACM SIGGRAPH 2017 Talks*. SIGGRAPH ’17. Los Angeles, California: ACM, 2017, 30:1–30:2. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3084363.3085091> (besucht am 20.09.2018) (siehe S. 43–46).
- [9] Joseph Gilland. *Elemental Magic, Volume 1: The Art of Special Effects Animation*. New York: Focal Press, 2009 (siehe S. 3–5, 12–14, 16, 47).
- [10] Joseph Gilland. *Elemental Magic, Volume 2: The Technique of Special Effects Animation*. New York: Focal Press, 2012 (siehe S. 3, 5, 14–17).
- [11] Stefan Helmreich. „Massive movie waves and the anthropic ocean“. *Social Science Information* (2018), S. 1–22 (siehe S. 4, 7–11).

- [12] Christopher J. Horvath. „Empirical Directional Wave Spectra for Computer Graphics“. In: ACM Press, 2015, S. 29–39. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2791261.2791267> (besucht am 21.05.2018) (siehe S. 22, 25, 26, 28–32).
- [13] Stefan Jeschke. „Water Surface Wavelets“. In: *ACM Transactions on Graphics, Vol. 37, No. 4, Article 1*. Aug. 2018. URL: http://pub.ist.ac.at/group_wojtan/projects/2018_Jeschke_WaterSurfaceWavelets/WaterSurfaceWavelets.pdf (besucht am 21.05.2018) (siehe S. 21).
- [14] YM Krylov. „Spectral methods of studying and predicting of wind waves“. *Gidrometeoizdat, Leningrad* (1966) (siehe S. 29).
- [15] Pierre-Luc Manteaux u. a. „Space-time sculpting of liquid animation“. In: ACM Press, 2016, S. 61–71. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2994258.2994261> (besucht am 27.05.2018) (siehe S. 27).
- [16] Hubert Nguyen. *Gpu Gems 3*. First. Addison-Wesley Professional, 2007 (siehe S. 19, 26–28).
- [17] Michael B. Nielsen, Andreas Söderström und Robert Bridson. „Synthesizing Waves from Animated Height Fields“. *ACM Transactions on Graphics* 32.1 (Jan. 2013), S. 1–9. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2421636.2421638> (besucht am 26.05.2018) (siehe S. 20, 23, 24).
- [18] Karthik Raveendran u. a. „Controlling Liquids Using Meshes“ (2012) (siehe S. 26).
- [19] Jos Stam. „A Simple Fluid Solver Based on the FFT“. *Journal of Graphics Tools* 6.2 (2001), S. 43–52 (siehe S. 28).
- [20] Alexey Stomakhin und Andrew Selle. „Fluxed Animated Boundary Method“. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 36.4 (2017), S. 68 (siehe S. 6).
- [21] Tesselendorf. „Simulating Ocean Water“. In: *In Siggraph Course Notes*. 1999 (siehe S. 20, 27).
- [22] Jerry Tesselendorf u. a. „Simulating Ocean Water“. *Simulating Nature: Realistic and Interactive Techniques. SIGGRAPH* 1.2 (2001), S. 5 (siehe S. 28).
- [23] N. Thiéry u. a. „Detail-preserving fluid control“. *Graphical Models* 71.6 (Nov. 2009), S. 221–228. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S152407030900022> (besucht am 27.05.2018) (siehe S. 26).
- [24] John Truby. „The Anatomy of Story: 22 Steps to Becoming a Master Storyteller“. *New York: Faber and Faber* 55 (2007), S. 56 (siehe S. 7).
- [25] Kristen Whissel. *Spectacular Digital Effects: CGI and Contemporary Cinema*. Durham: Duke University Press, 2014 (siehe S. 7).
- [26] Kristen Whissel. „Tales of Upward Mobility: The New Verticality and Digital Special Effects“. 59 (Juni 2006), S. 23–34 (siehe S. 10).
- [27] Tony White. *Digitale Animation: Vom Bleistift zum Pixel*. Heidelberg: Spektrum Akad. Verlag, 2008 (siehe S. 3, 4, 6).
- [28] Tony White. *The Animator’s Workbook*. New York: Watson-Guption Publications, 1988 (siehe S. 15, 16).

- [29] I. R. Young. *Wind Generated Ocean Waves, Volume 2*. Oxford: Elsevier, Apr. 1999 (siehe S. 29, 30).

Audiovisuelle Medien

- [30] Sony Pictures Animation. *Surf's Up - Waves Featurette*. Sony Pictures Animation, 2014. URL: https://www.youtube.com/watch?v=wQoK3bku_98 (besucht am 20.09.2018) (siehe S. 39).
- [31] *Fantasia*. Film. Drehbuch: Lee Blair und Elmer Plummer, Regie: James Algar und Samuel Armstrong, Produktion: Walt Disney. 1940 (siehe S. 12).
- [32] *Fish for Life*. Film. Abschlussprojekt von: Kerstin Blätterbinder, Lisa Gierlinger, Lukas Mathä und Victoria Wolfersberger. 2018 (siehe S. 2, 48, 50).
- [33] *Gake no ue no Ponyo (Ponyo on the Cliff by the Sea)*. Film. Drehbuch und Regie: Hayao Miyazaki, Produktion: Toshio Suzuki. 2008 (siehe S. 33, 34).
- [34] *Kubo and the Two Strings*. Film. Drehbuch: Marc Haimès und Chris Butler, Regie: Travis Knight, Produktion: Travis Knight und Arianne Sutner. 2016 (siehe S. 35, 36, 46).
- [35] *La Vague*. Film. Regie: Étienne-Jules Marey. 1891 (siehe S. 4, 12).
- [36] *Moana*. Film. Drehbuch: Jared Bush u.a., Regie: Ron Clements und John Musker, Produktion: Osnat Shurer. 2016 (siehe S. 11, 43, 44).
- [37] *ParaNorman*. Film. Drehbuch: Chris Butler, Regie: Sam Fell und Chris Butler, Produktion: Travis Knight und Arianne Sutner. 2012 (siehe S. 46).
- [38] *Ratatouille*. Film. Drehbuch: Jim Capobianco u.a., Regie: Brad Bird und Jan Pinkava, Produktion: Brad Lewis. 2007 (siehe S. 24).
- [39] *Song of the Sea*. Film. Drehbuch: Will Collins, Regie: Tom Moore, Produktion: Tom Moore u.a. 2014 (siehe S. 11, 34, 35).
- [40] *Surf's Up*. Film. Drehbuch: Lisa Addario u.a., Regie: Ash Brannon und Chris Buck, Produktion: Chris Jenkins. 2007 (siehe S. 37).

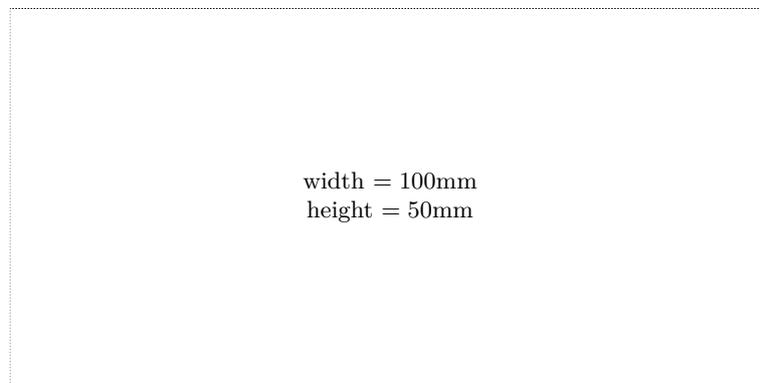
Online-Quellen

- [41] fxguide/fxphd. *LAIKA's Steve Emerson: Water Effects for Kubo*. Sep. 2016. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ccZgRQwild0&feature=youtu.be> (besucht am 14.09.2018) (siehe S. 36, 37).
- [42] Carolyn Giardina. *How "Kubo and the Two Strings" Merged Stop-Motion Animation and 3D Printing (Plus a 400-Pound Puppet)*. Dez. 2016. URL: <https://www.hollywoodreporter.com/features/how-kubo-two-strings-merged-stop-motion-animation-3d-printing-a-400-pound-puppet-955406> (besucht am 14.09.2018) (siehe S. 37).
- [43] Jeff Heusser, John Montgomery und Mike Seymour. *Kubo and the Two Strings: water effects*. Sep. 2016. URL: <https://www.fxguide.com/featured/kubo-and-the-two-strings-water-effects/> (besucht am 14.09.2018) (siehe S. 35, 36, 46).

- [44] Katsushika Hokusai. *Kanagawa oki nami ura*. 1829-1833. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0a/The_Great_Wave_off_Kanagawa.jpg/1920px-The_Great_Wave_off_Kanagawa.jpg (besucht am 14. 09. 2018) (siehe S. 3, 4).
- [45] Arnold Leibovit. *The George Pal Site: Techniques:Replacement Animation*. Dez. 1996. URL: https://www.awn.com/heaven_and_hell/PAL/GP10.htm (besucht am 14. 09. 2018) (siehe S. 46).
- [46] *Orbitalbewegung (Wasserwellen)*. Page Version ID: 173744966. Feb. 2018. URL: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Orbitalbewegung_\(Wasserwellen\)&oldid=173744966](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Orbitalbewegung_(Wasserwellen)&oldid=173744966) (besucht am 08. 06. 2018) (siehe S. 20).
- [47] *Ponyo by Miyazaki Symbolism and Structure*. Apr. 2016. URL: <http://www.slaphappylarry.com/film-study-ponyo-by-hayao-miyazaki/> (besucht am 26. 08. 2018) (siehe S. 7, 10).
- [48] Jos Stam. *Stable Fluids*. URL: <http://www.dgp.toronto.edu/people/stam/reality/Research/pdf/ns.pdf> (besucht am 26. 05. 2018) (siehe S. 19, 21, 28).

Messbox zur Druckkontrolle

— Druckgröße kontrollieren! —



— Diese Seite nach dem Druck entfernen! —