



Echoes of the Depth

*A Digital Experience About
the Effects of Deep-Sea Mining*

Bachelorarbeit

—

Max Severin Rodenkirchen

*Bei Prof. Eva Vitting
und Manfred Olschewski*

—

*Fachhochschule Aachen
Fachbereich Gestaltung*

—

2025



Echoes of the Depth

*A Digital Experience About
the Effects of Deep-Sea Mining*

Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen des
Tiefseebergbaus auf die Lebewesen der Meere.

Regelmäßig stranden Wale aufgrund von anthropogenen
Lärmereignissen in den Meeren. Ein großflächiger
Tiefseebergbau bedeutet weitere Tiere zugefährden.

In einem interaktiven Virtual-Reality-Animationskurzfilm
wird das Ausmaß der Lärmbelastung aus der Perspektive
einer kleinen Familie von Schnabelwalen dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

<i>Inhaltliche Recherche</i>	7
<i>Bioakustik</i>	7
<i>Tiefseebau</i>	17
<i>Lärmverschmutzung</i>	25
<i>Cuvier-Schnabelwal</i>	37
<i>Gestalterische Arbeit</i>	41
<i>Konzeption</i>	41
<i>Vorbereitung</i>	45
<i>Technische Umsetzung</i>	53
<i>Visuelle Umsetzung</i>	61
<i>Auditive Umsetzung</i>	75
<i>Informative Medien</i>	79
<i>Reflexion</i>	83
<i>Appendix</i>	85
<i>Quellenverzeichnis</i>	89



Inhaltliche Recherche



Bioakustik

In diesem Kapitel wird ein Einblick in den Ablauf der Themensuche und Recherche gegeben. Der Weg zum Bachelorthema begann mit einem Talk des Earth Species Project mit Kay Firth-Butterfield, Aza Raskin und Dr. Karen Bakker zum Thema Walkommunikation und den aktuellen Fortschritten in der Dekodierung der Sprache mithilfe von KI-Algorithmen. Im Rahmen dieses Talks berichtete Karen Bakker zudem von weiteren faszinierenden bioakustischen Entdeckungen. In ihrem Buch „The Sounds of Life“ geht sie ausführlicher auf die Geschichte der Bioakustik ein und schildert die neuesten Erkenntnisse.

Anthropozentrismus

Unser bisheriges Verständnis der Welt war ausgehend von dem, was wir wahrnehmen, geprägt. Wir glaubten lange, dass was wir nicht sehen und nicht hören können, auch nicht existieren kann. Die Wissenschaft war geprägt durch ein anthropozentrisches Weltbild, dem Menschen als Mittelpunkt. Man nahm an, Organismen, die nicht wie wir kommunizieren, navigieren und wahrnehmen, könnten nicht so intelligent sein wie wir. Dabei sind wir diejenigen, die im Vergleich zu anderen Spezies eine sehr eingeschränkte Wahrnehmung haben. Das menschliche Gehör nimmt im Bereich von etwas 20 Hz bis 20 kHz Geräusche wahr. Viele Spezies kommunizieren allerdings über oder unter dem von uns wahrgenommenen Frequenzspektrum, im Ultra- oder Infraschallbereich und sind somit für uns oft einfach nicht hörbar. Zudem nutzen andere Organismen nicht wie wir ihre Augen zum Navigieren, sondern kreieren sich ein Bild der Umwelt durch Echolot. Sie senden akustische Signale aus und empfangen Reflexionen von Objekten. Um zu verstehen, wie andere Organismen leben, müssten wir in ihre Haut schlüpfen und ihre Umwelt so wahrnehmen, wie sie es tun.

(Vgl. Bakker, 2022, S. 9-10)

Die Sprache der Wale

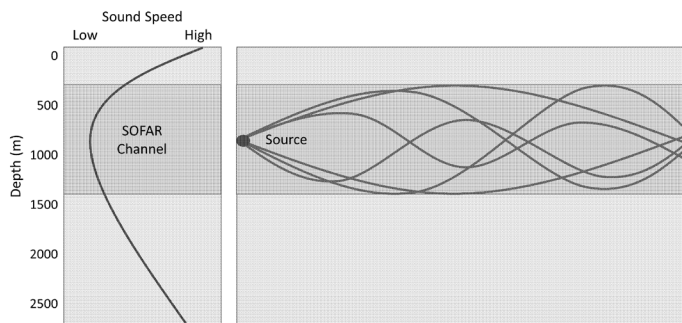
Wale entwickelten eine Bandbreite an Kommunikationsformen. Zum ersten eine Art Pfeifen oder Quieken, welches als sozialer Ruf gilt. Diese, theoretisch auch für Menschen hörbaren, Rufe können bis zu 200 Dezibel laut werden. Verschiedene Walschulen haben dabei Dialekte, welche an die Kälber weitergetragen werden. Eine weitere Form der Kommunikation ist der allgemein genannte Walgesang. Diese lang gezogenen, rhythmischen Tonfolgen gehen vom tiefen Infraschallbereich bis in den für uns hörbaren Frequenzbereich. Die Tonmuster werden wahrscheinlich von männlichen Tieren in der Paarungszeit gesungen. Zur Navigation nutzen die meisten Wale Biosonar, auch Echolot genannt. Das klingt wie schnelle rhythmische Klicks, die bis in den Ultraschallbereich gehen. Sie messen die Entfernung und Richtung des Echos und können so ihre Umgebung scannen.

(Vgl. Bakker, 2022, S. 29-31)

SOFAR-Kanal

Während des Kalten Krieges baute die US Navy weltweit Horchposten in der Tiefsee auf. Sie dienten zum Auffinden von feindlichen U-Boot-Sonaren im SOFAR-Kanal. SOFAR steht für “sound fixing and ranging channel” und entsteht zwischen 500 und 1500 Metern Tiefe durch verschiedene Temperatur- und Druckverhältnisse. In diesem Kanal streut sich Schall nicht komplett, sondern wird an Decke und Boden reflektiert und dadurch weiter getragen. Sie fanden heraus, dass Wale in diese Tiefen abtauchen, um über tausende Kilometer hinweg kommunizieren zu können.

(Vgl. Bakker, 2022, S.26-28)



(PW, 2025)

Indigenes Wissen & Deep Listening

Vieles Wissen über unsere Ökosysteme stammt von indigenen Völkern, die in diesen leben und so in direkter Verbindung mit ihnen stehen. Während wir aus der Ferne lauschen und uns auf digitale Technologien verlassen, befinden sie sich in der direkten Umwelt von anderen Spezies. Früher wurde dieses Wissen von westlichen Wissenschaftlern oft nicht gehört.

(Vgl. Bakker, 2022, S.50-51)

Die Iñupiat sind Ureinwohner Alaskas und jagen seit jeher mit kleinen Booten und Harpunen Wale. Allerdings treten sie, anders als industrielle Walfänger, in Dialog mit den Tieren. Diese Methode nennt man Deep Listening und ist auch bei anderen indigenen Völkern zu finden. Die Iñupiat halten ihr Ruder ins Wasser und können so den Klängen der Wale lauschen. Sie würdigen den Lebensraum des Tieres und nur wenn es auftaucht, die Jäger inspiziert und sich freiwillig hingibt, wird es harpuniert. Der Vorgang vom Bau der Boote bis hin zur Aufteilung des Tieres ist dabei ein zeremonieller Akt und würdigt den Geist der Wale.

(Vgl. Bakker, 2022, S.49, S.58-61)



(Rowell, 2018)

Datensammlung

Vor Jahrzehnten war es wesentlich schwieriger, Tiere wie Wale zu beobachten. Man musste entweder das Wissen und die Fähigkeiten indigener Völker, oder teure Monitoring Geräte haben. Das Wale sich beispielsweise auch zahlreich unter dem Eis befinden, konnten westliche Wissenschaftler nur vermuten, während die Inupiat ziemlich genau wussten, dass sich zahlreiche Tiere dort befinden und zum Luft holen Löcher ins Eis brechen.

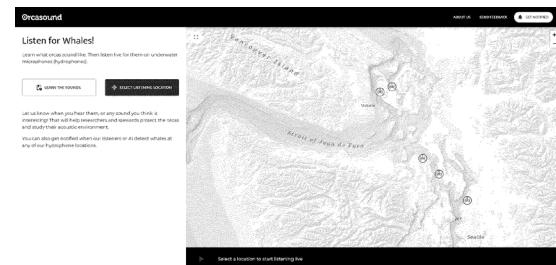
(Vgl. Bakker, 2022, S.46-50)

Heute sind Geräte wie Hydrophone für Unterwasser-Akustik Aufnahmen wesentlich zugänglicher und vernetzen die ganze Welt. Inzwischen existieren enorme Datenbanken, welche Ökosysteme dokumentieren und Plattformen, wo auch zivile Forscher Einblicke bekommen.

(Vgl. Bakker, 2022, S.46-50)

Auf der Plattform Orcasound kann man an fünf Standorten in der Nähe von Vancouver Island dem Ozean lauschen und hoffen, zwischen auftretendem Schiffslärm auch Orcas zu hören.

(Orcasound, o.D.)



<https://www.orcasound.net/>

Machine Learning

Die neue Herausforderung, welche mit solchen großen Datensätzen kommt, ist das Auswerten dieser Daten. Wann ist was zu hören? Welche Spezies ist zu hören? Wie viele sind zu hören? Die Daten alle manuell zu analysieren ist eine nicht mehr machbare oder viel zu aufwendige Aufgabe. Heutzutage werden Machine Learning Algorithmen darauf trainiert, in Echtzeit Video-, Foto- und Audioaufnahmen nach erkennbaren Mustern zu durchkämmen.

(Vgl. Bakker, 2022, S.55)

Dadurch müssen wir jetzt nicht mehr Tag und Nacht auf Orca-sound verbringen, um irgendwann einen Orca zu hören, sondern können uns von OrcaHello benachrichtigen lassen, wenn der Algorithmus Orca Geräusche entdeckt.

(OrcaHello, o.D.)

Die Anwendungen gehen aber natürlich in noch viel komplexere Gebiete, wie das Deklarieren von einer Großzahl Meeresorganismen. Ein Beispiel dafür ist die Plattform FathomNet auf der Bilder und Daten von namhaften Institutionen wie National Geographic, MBARI (Monterey Bay Aquarium Research Institute) & NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), deklariert und kategorisiert werden.

(FathomNet, o.D.)

AI to Decode

Die Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens eröffnen faszinierende Möglichkeiten für die Kommunikation mit Tieren. Projekte wie Project CETI und das Earth Species Project sind davon überzeugt, dass wir bald in der Lage sein werden, mit Walen zu kommunizieren. Diese Initiativen analysieren die „Sprache der Wale“ und nutzen Algorithmen, um in Reaktionstests die erlernte Kommunikation unter Wasser wiederzugeben. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass wir die Bedeutung der gesendeten Signale falsch interpretieren. Anstatt eine freundliche Begrüßung wie „Hallo!“ zu senden, könnten wir unbeabsichtigt eine Warnung wie „Gefahr!“ auslösen und so das Tier unnötig stressen.

(Vgl. Rutz et al., 2023; Andreas et al., 2022)

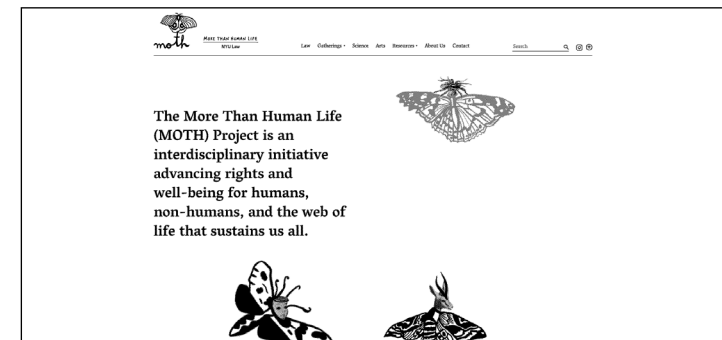
Diese Situation wirft eine wichtige ethische Frage auf: Sollten wir überhaupt die Möglichkeit haben, mit Tieren zu sprechen? Besteht nicht das Risiko, dass wir bestehende, funktionierende Systeme stören? Befürworter der Technologie sehen in der Anwendung von KI hingegen eine Chance, die Bedürfnisse und das Leiden der Tiere besser zu verstehen und gezielt handeln zu können. Darüber hinaus könnte dies das Bewusstsein dafür schärfen, dass wir nicht die einzigen intelligenten Wesen sind und dass wir von den älteren und weiseren Spezies auf unserem Planeten lernen können.

(Vgl. Andreas et al., 2022)

Ein wichtiger Prozess, der parallel zur technischen Entwicklung passiert, ist die Erstellung von Regularien für die Nutzung der modernen Technologien. Das “More Than Human Life Project” (MOTH) beschäftigt sich mit einer genau solchen

Gesetzgebung. Es wird diskutiert, an welchen Stellen Technologien offen zugänglich sein können und wo eine Lizenzierung erforderlich ist. Für eine Lizenzierung spricht der mögliche Missbrauch und die daraus folgende Ausbeutung der Tiere. Sie könnten bspw. durch gezielte Fehlleitung in Fallen gelockt werden.

(Vgl. Warner, B., 2024; *More Than Human Rights*, o.D.)



<https://mothrights.org/>

Biotremologie

Kommunikation von Organismen geht über das Visuelle und Akustische hinaus. Bei der Biotremologie senden Organismen mechanische Schwingungen aus, z.B. durch Bewegung, welche durch Substrate übertragen werden.

(Vgl. Bakker, 2022, S.301-303)

Die Nischen-Theorie

Die Nischen-Theorie, entwickelt von dem Ökologen und Musiker Bernie Krause, besagt, dass sich Tiere innerhalb eines Lebensraumes im Frequenzspektrum verteilen. Dadurch erkennen sie schneller Angreifer und andere Gefahren, die höhere oder tiefere Töne ausgeben. Außerdem passen sie sich damit ihrem Habitat an. Würde das Tier in den selben Frequenzen wie der daneben liegende Wasserfall kommunizieren, würde es wahrscheinlich nicht gehört werden. Tiere adaptieren sich also an ihre Umwelt, was durchaus auch durch Lärmverschmutzung verstärkt wird. Bei Walen wurde beobachtet, dass ihre Töne über die Jahre höher wurden, um sich gegen den vermehrten Schiffslärm durchzusetzen.

(Vgl. Krause, 1993)



Inhaltliche Recherche



Tiefseebergbau

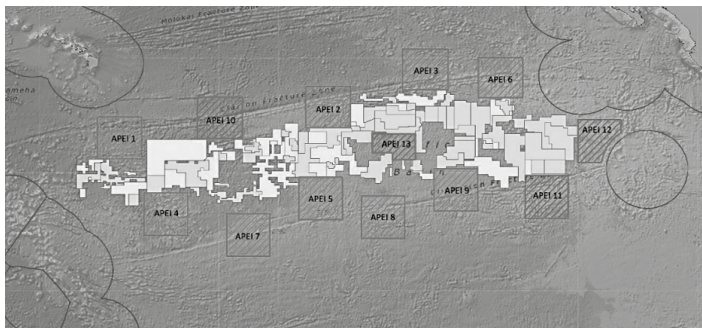
Tiefseebergbau wird in den letzten Jahren immer intensiver diskutiert. Die Abbaugeräte verbessern sich, der Bedarf an Metallen steigt, und dennoch ist unklar, in welchem Ausmaß der Abbau dem Ökosystem der Tiefsee schaden würde.

In folgendem Kapitel erleutere ich grundlegenden Fakten rund um den Tiefseebergbau. Um was geht es? Wieso soll abgebaut werden und warum warnen Experteninnen?

Zonen & Hoheitsgebiete

Abbaugelände befinden sich weltweit in den Ozeanen. Die Clarion-Clipperton-Zone (CCZ) ist dabei ein besonders begehrtes Gebiet aufgrund des hohen Vorkommens an Manganknollen. Die International Seabed Authority ist zuständig für die Regulierung des Meeresbodens in internationalen Gewässern und die Sicherstellung, dass diese allen Menschen gleichermaßen von Nutzen sind. Außerdem kontrollieren sie, dass Aktivitäten am Seeboden keinen Schaden verursachen. Die ISA vergibt aktuell an Länder und Unternehmen Lizenzen zur Erkundung des Tiefseebergbaus, des Ökosystems und möglichen Folgen. Erste Zonen wurden bereits, aufgrund nachgewiesener hoher Biodiversität, für den Abbau gesperrt. Die sogenannten APEIs (areas of particular environmental interest“ machen zusammen eine Fläche von 1,97 Millionen km² aus. (Stand Dezember 2021)

(Vgl. Vox, 2022; Vgl. Peacock, 2020;
International Seabed Authority, o.D.)

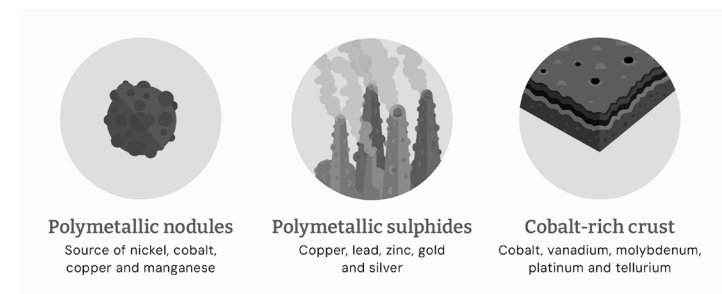


Die APEIs umzäunen weitere Abbaugelände in der CCZ.
(International Seabed Authority [ISA], o.D.)

Mineralien

Besonders interessant beim Abbau sind die Manganknollen, welche sich in enormen Mengen auf dem Meeresgrund befinden. Sie formen sich über Millionen Jahre zu kleinen steinartigen Klumpen und enthalten Metalle wie Mangan, Nickel, Kupfer und Kobalt. Diese Metalle werden vor allem für die Batterieproduktion gebraucht und könnten wichtig sein für die Zukunft der E-Mobilität. Des Weiteren werden Kobaltkrusten an Unterwasserbergen und Massivsulfide in der Nähe von hydrothermalen Quellen abgebaut, welche ebenfalls wertvolle Metalle enthalten.

(Vgl. Vox, 2022; Vgl. Peacock, 2020)



(Harrison, o.D.)

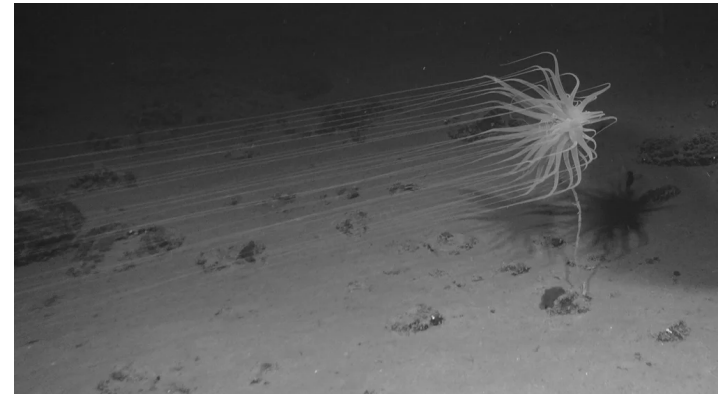
Das Ökosystem Tiefsee

Man unterteilt verschiedene Meerestiefen in Zonen, gegeben durch verschiedene Licht-, Temperatur- und Druckverhältnisse, an die sich auch das Leben dort anpassen muss. Die Epipelagische Zone erstreckt sich von 0 - 200 Meter Tiefe, die Mesopelagische Zone (Dämmerungszone) von 200 - 1000 Meter Tiefe, die Bathypelagische Zone (Mitternachtszone) von 1000 - 4000 Meter Tiefe, die Abyssopelagische Zone (Abyssalzone) von 4000 - 6000 Meter Tiefe und die Hadopelagische Zone (Hadalzone) von 6000 - 11000 Meter. Zudem gibt es noch die Bodenlebensräume welche man Benthos nennt. Der tiefste Punkt der Weltmeere ist der Marianengraben mit 11.000 Meter. Der tiefste Punkt in der CCZ, wo Manganknollen abgebaut werden sollen, ist etwa 6000 Meter tief.

(Vgl. Drazen et al., 2020; Vgl. Peacock, 2020)

Viele von uns erforschten Tiere der Meere leben in den oberen Meeresschichten und sind für uns leichter auffindbar. In der dunklen Tiefsee sind allerdings gute Forschungssysteme wie ROVs und Sonare nötig, um überhaupt etwas sehen zu können. Der Hauptteil der dort lebenden Organismen ist uns noch unbekannt. Forschende entdecken regelmäßig auf ihren Tauchexpeditionen neue Spezies. Teilweise leben Organismen in der CCZ dabei auf den Manganknollen. Tiere passen sich an die verschiedenen Licht- und Druckverhältnisse an, indem sie beispielsweise mit Biosonar navigieren oder Biolumineszenz entwickeln, also selbst als Lichtquelle dienen.

(Vgl. Woody, 2023; Vgl. Peacock, 2020)



Relicanthus sp., (NOAA, 2021)



Dumbo Oktopusse sind die Stars der Tiefsee. Sie legen ihre Eier auf dem Meeresboden an harte Oberflächen wie Manganknollen. (NOAA, 2021)

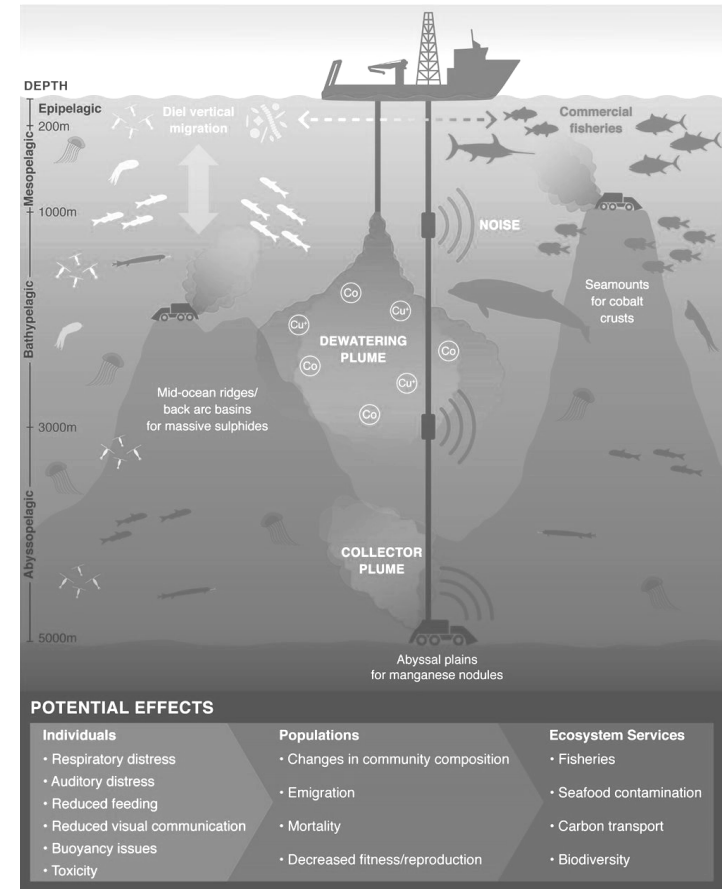
Der Abbau und potentielle Auswirkungen

Grob zusammengefasst gibt es beim Abbau von Manganknollen drei Schritte. Als erstes muss das Abbaugelände vom Schiff aus gemappt werden. Dann wird eine Extraktionsmaschine runtergeschickt, welche wie ein Staubsauger die Knollen einzieht. Über Hydraulikpumpen werden die Knollen auf das Schiff gezogen und dort vom Sediment befreit. Das Sediment wird anschließend wieder ins Wasser gepumpt.

(Vgl. Drazen et al., 2020; Vgl. Peacock, 2020)

Durch das Entfernen der Manganknollen wird vielen Spezies der Lebensraum genommen. Ob diese sich an einen aufgewühlten Boden adaptieren könnten, ist unwahrscheinlich. Durch ein Aussterben von Spezies wäre das Nahrungs-Netzwerk gefährdet. Selbst Wale tauchen teilweise in diese Tiefen ab, um nach Nahrung zu suchen. Zudem entsteht durch das Aufsaugen Lärm, der die Organismen stören könnte. Genauso wie das vom aufgewühlte Sediment am Seeboden das Wasser trübt und somit die Nahrungsaufnahme erschwert. Auf dem Weg zum Schiff verursachen die Hydraulikpumpen in mittleren Meerestiefen Geräusche, die auch wieder die Navigation anderer Tiere stören und diese stressen könnten. Ein wesentlicher Punkt ist der erhöhte Schiffsverkehr zum Abtransport und Monitoring, von dem eine enorme Lärmverschmutzung ausgeht. Man beobachtet außerdem die Auswirkungen von dem vom Schiff abgesonderten Sediment. Egal in welcher Tiefe man das Sediment wieder rauslässt, trübt und verpestet es das Wasser. Und das über einen weitaus größeren Raum als das eigentliche Abbaugelände groß ist.

(Vgl. Drazen et al., 2020; Vgl. Peacock, 2020)



(Dillon, 2020)

Abwägung

Die Industrie argumentiert für den Tiefseebergbau damit, dass unsere Landminen auf Dauer nicht reichen werden und auch nicht unter menschenwürdigen Bedingungen abgebaut werden, sowie Landschaften zerstört und verpestet werden. Die Manganknollen kann man relativ einfach abbauen und somit schnelle Lösungen gegen den Klimawandel finden. Allerdings ist die Tiefsee selbst ein Ökosystem, welches viel für unser Klima leistet. Abgesehen davon, dass dort Lebewesen leben, die ein Recht haben, in Ruhe gelassen zu werden. Naturschützer argumentieren, dass dies eine Verschiebung der eigentlichen Aufgaben, wie das Recycling der Metalle ist, die aktuell zu 80% auf dem Müll landen.

Ob der Tiefseebergbau beginnt, hängt von politischen Entscheidungen ab, die zusammen mit der ISA und Forschenden besprochen werden. Man versucht aktuell die Auswirkungen zu messen und weitere Organismen zu entdecken, um eine hohe Biodiversität beweisen zu können. Es ist ein Lauf gegen die Zeit, da der politische Druck von der Industrie aus höher wird.

Es braucht schnell mehr Forschung, um die Tiefsee vor möglichen Katastrophen zu retten!

(Vgl. Peacock, 2020)



Inhaltliche Recherche



Lärmverschmutzung

In EU-Gewässern haben sich die Emissionen von Unterwasserlärm zwischen 2014 und 2019 verdoppelt.

(OceanCare, o.D.)

Lärmverschmutzung findet überall statt und sorgt auch bei uns Menschen für gesundheitliche Folgen. In folgendem Kapitel beziehe ich mich jedoch ausschließlich auf die Lärmverschmutzung Unterwasser. Dort, wo Schall etwa fünfmal schneller ist und Organismen mit sensiblen Hörorganen leben.

Ambient Noise

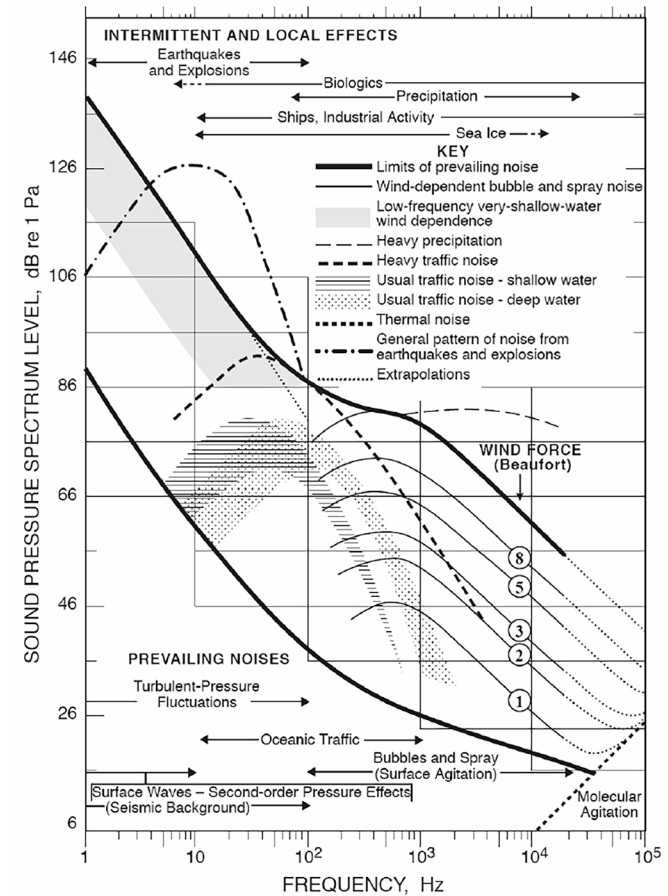
Die Unterwasserwelt ist auch ohne uns Menschen keine leise. Denn neben anthropogenen Lärmquellen sorgen Meereslebewesen und natürlich auftretende Prozesse wie Regen und brechenden Wellen für das sogenannte Ambient Noise. Diese Hintergrundgeräusche variieren stark je nach Regionen und Gegebenheiten. Erhöhte Windstärken sorgen für mehr Wellengang und somit für erhöhte Lautstärken. Weitere natürliche auftretende Geräuschquellen sind unter anderem brechendes Eis, Unterwasser-Vulkane und -Erdbeben. Viele der Meereslebewesen navigieren, kommunizieren und jagen mit Schall. Sie tragen somit zur natürlichen Unterwasser Klanglandschaft bei.

(Vgl. DOSIT, o.D.)

Antropogene Lärmquellen

Einen erheblich größeren Teil der Unterwassergeräusche entsteht jedoch durch uns Menschen. Unser kommerzieller Schiffsverkehr sorgt für einen stetigen Anstieg an Lärm. Die ausgehenden Geräusche befinden sich grob im Frequenzbereich zwischen 20 und 1000 Hz und können weite Strecken zurücklegen. Das sorgt wiederum dafür das Schiffe über weite Bereiche zum Umgebungsgeräuschpegel beitragen. Zudem steigt die Schifffahrt über die Jahre weiter und trägt immer mehr zu einem Anstieg des Umgebungslärms bei.

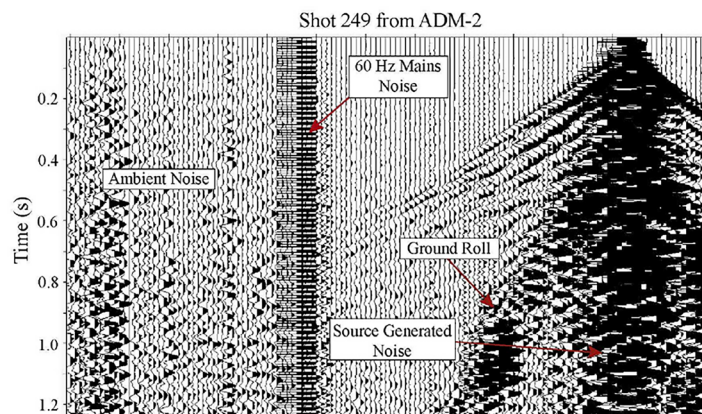
(Vgl. DOSIT, o.D.)



Ambient Noise Spektren (Wenz, 1962)

Doch neben dem Schiffsverkehr sorgt die Industrie auch mit seismischen Untersuchungen, nach unter anderem Erdgas, für eine extreme Lärmverschmutzung. Sie nutzen zur Erkundung des Meeresbodens eine Kette von Druckluftkanonen (siehe Abbildungen), die hinter dem Schiff hergezogen werden und wieder und wieder explodieren. Die immense Lautstärke kann Meerestiere schädigen, desorientieren und sogar töten. Mit ähnlich lauten Mitteln arbeitet das Militär. Auch sie führen Sprengungen durch und testen Waffen. Hinzu kommen ihre Sonargeräte welche kurzzeitig Impulse aussenden um Objekte über weite Strecken hinweg aufzuspüren.

(Vgl. OceanCare, o.D.)



Ein Seismogramm der Explosion einer Kanone. „Types of noise include ambient noise in the area, electrical noise from power lines, ground roll, and source generated noise.“ (Leetaru, o.D.)



Seismische Sprengungen (Lawrence, 2015)



Seismische Sprengungen (Lawrence, o.D.)

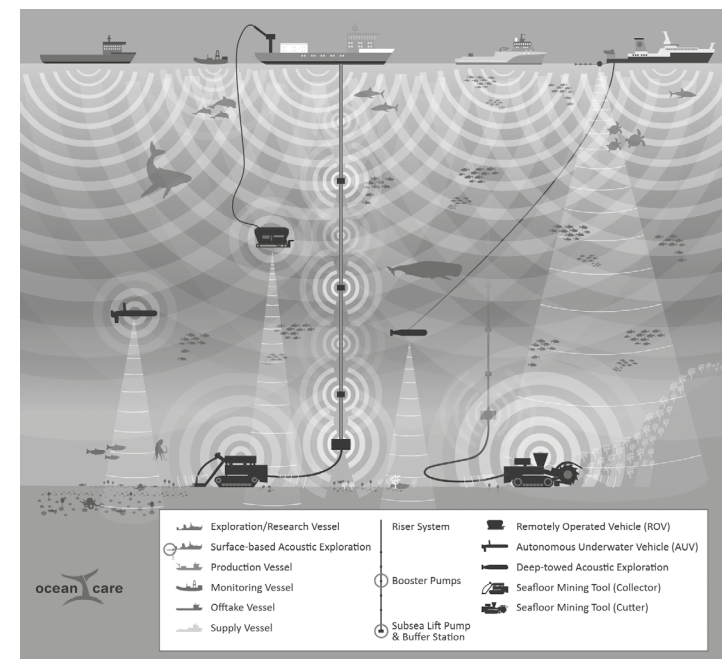
Emissionen durch Tiefseebergbau

Wie die meisten industriellen Aktivitäten stellt auch der Tiefseebergbau ein erhebliches Risiko für die Meeresbewohner dar. An verschiedenen Stellen im Abbauprozess könnte eine enorme Lärmbelastung entstehen. Leider stellen nicht alle forschenden Unternehmen ihre Daten zur Verfügung. Anhand der Daten von ähnlichen industriellen Geräten können jedoch Annahmen zum Ausmaß des Lärms getroffen werden.

Schon vor dem eigentlichen Abbau muss der Meeresboden kartiert werden. Dafür werden unter anderem Multibeam-Sonare eingesetzt, die vom Schiff aus fächerförmig den Meeresboden scannen. Die ausgesendeten Töne liegen im Bereich von 12 kHz bis 400 kHz und erreichen Schalldruckpegel von 200 bis 300 dB. Dadurch können Organismen in ihrem Weg geschädigt oder sogar getötet werden. Beim Abbau von Manganknollen befindet sich eine Extraktionsmaschine auf dem Meeresboden, die die Knollen aufsammelt. Neben Vibrationen im Boden und Maschinengeräuschen entsteht durch das Baggern zusätzlicher Lärm. Zudem werden durch das Aufwühlen des Bodens Sedimentwolken erzeugt, die das Wasser trüben. Die gesammelten Manganknollen werden über Hydraulikpumpen zum Schiff hochbefördert. Diese Pumpen erzeugen Geräusche in der mittleren Meeresschicht. An der Wasseroberfläche befindet sich ein Schiff, das die Manganknollen aufnimmt und von dem Sediment trennt. Das Sediment wird anschließend zurückgepumpt und verpestet über große Flächen hinweg das Wasser. Neben dem bekannten Schiffslärm müssen Tiefseebergbau-Schiffe dynamisch positioniert werden, um über den Abbaugeräten zu bleiben. Dieser Prozess wird als das lauteste Element beim Tiefseebergbau vermutet. Neben diesen Haupt-

akteuren werden vermutlich weitere Schiffe für den Transport eingesetzt. Außerdem könnten Remotely Operated Vehicles (ROVs), Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) sowie Deep-towed Acoustic Exploration-Maschinen zur weiteren Erkundung genutzt werden.

(Vgl. Martin et al., 2022, S. 13-19)



(Figure 1, Martin et al., 2022, S. 17)

Auswirkungen auf Meeresbewohner

Viele der Unterwasser lebenden Organismen brauchen ihr Gehör zum kommunizieren und navigieren. Anthropogene Lärmquellen schneiden in diese funktionierenden Systeme ein und gefährden das Leben der Tiere. Nicht mehr mit seinem Pot kommunizieren zu können und alleine umher zu schwimmen könnte den Tod bedeuten.

Bei Walen konnte man feststellen, dass diese ihre Kommunikation ändern um nicht vom Schiffslärm maskiert zu werden. Die Tiere passen außerdem ihr Verhalten und ihre Routen an. Sie meiden Gebiete mit viel Lärm wo sie sonst auf Jagd gegangen wären. Das erschwert ihnen die Nahrungssuche. Zudem können Schiffsrouten wie eine Lärmbarriere wirken, Tiere zu nah an die Küste treiben und in die Gefahr einer Strandung bringen. Der Weg durch die Lärmbarriere könnte eine Kollision, oder von einer Schiffsschraube getroffen zuwerden bedeuten, wie es leider öfter anhand von Narben zu sehen ist.

(Vgl. NOAA, o.D.)



Ein von Schiffsschrauben gezeichneter Buckelwal. (NOAA, HIHWNMS, o.D.)

Noise source	Source location			Source Pressure Level (SPL) in dB re 1µPa @ 1 m	Frequency	Temporal Scale	References
	Surface	Mid-water	Near-Seabed and Seabed				
Vessels/platforms							
> production vessel/platform	x			155- 197 ⁴¹	30 Hz- 40 kHz ⁴¹	nearly constantly	Nedwell & Edwards (2004) ¹⁷¹ ; McPherson <i>et al.</i> (2016) ¹⁷² ; Theobald <i>et al.</i> 2019 ¹⁷³ ; Lin <i>et al.</i> (2019) ¹⁷⁴ ; Tallisman Energy (UK) Ltd (2006) ¹⁷⁵ ; Wyatt (2008) ¹⁷⁶ ; Xodus (2014) ¹⁷⁷
> other vessels using DP (offset, research, monitoring)	x			180- 197	30 Hz- 3 kHz	nearly constantly when present (offset vessel ca. once every 10 days)	Tallisman Energy (UK) Ltd (2006) ¹⁷⁵ ; Wyatt (2008) ¹⁷⁷ ; Xodus (2014) ¹⁸⁰
> other vessels transiting (offset, supply, research, monitoring)	x			192	40 - 100 Hz	Offtake vessels ca. once every 10 days; supply vessel ca. once a month	Hildebrand (2009) ¹⁴¹
Acoustic exploration							
> surface based sonars	x			200- 230	3.5 kHz- 400 kHz	days up to months	Cholewiak <i>et al.</i> (2017) ¹⁸² ; Rühlmann (2021) ¹⁸³ ; Mitchley <i>et al.</i> (2014) ¹⁸⁴
> near seabed sonars			x	212- 218	120- 300 kHz	unknown	Rühlmann (2021) ¹⁸⁵
> Seismic	x		x	max. 259 (p-p)	10 Hz to 10 kHz	days up to months	Greene <i>et al.</i> (1995) ¹⁸⁶ ; Lin <i>et al.</i> (2019) ¹⁸⁷ ; Weilgart (2010) ¹⁸⁸
Submersibles, ROVs, AUVs	x	x	x	100- 200	unknown	hours to days	Lin (2019) ¹⁸⁹ ; Buszman & Mironiuk (2018) ¹⁹⁰
Riser systems							
> material transport sounds	x	x	x	unknown	unknown	constantly during mining	
> pumps	x	x	x	165- 175	out to at least 40 kHz	constantly during mining	Solwara 1 Project ¹⁹¹ ; McPherson <i>et al.</i> (2014) ¹⁹²
> dynamic positioning			x	unknown	unknown	unknown	
Extraction and Machinery							
extraction (dredging, drilling, scraping)			x	130- 195 ⁴¹	3 Hz- 20 kHz ⁴¹	48 hrs. per cycle of 72 hrs.	Baron <i>et al.</i> (2020) ¹⁹³ ; McQueen <i>et al.</i> (2020) ¹⁹⁴ ; Bassila <i>et al.</i> (2019) ¹⁹⁵ ; Broudic (2014) ¹⁹⁶ ; Greene (1987) ¹⁹⁷ ; Nedwell & Howell (2004) ¹⁹⁸ ; Reine <i>et al.</i> (2012b) ¹⁹⁹ ; Reine <i>et al.</i> (2014) ²⁰⁰ ; Verichev <i>et al.</i> 2014 ²⁰¹ ; Wenger <i>et al.</i> (2017) ²⁰²
extraction machine noise			x	125 ⁴¹	up to 200 Hz ⁴¹	48 hrs. per cycle of 72 hrs.	Bassila <i>et al.</i> (2019) ²⁰³ ; Verichev <i>et al.</i> (2014) ²⁰⁴
seafloor visualization (sidescan sonar)			x	210- 230	100- 500 Hz	constantly during mining	Verichev <i>et al.</i> (2014) ²⁰⁵
seafloor mining tool positioning (sidescan sonar)			x	210- 230	100- 500 kHz	constantly during mining	Verichev <i>et al.</i> (2014) ²⁰⁶

(Table 1, Martin *et al.*, 2022, S. 17)

Wesentlich gravierender sind die Folgen von seismischen Untersuchungen und Militär Übungen. Diese plötzlich auftretenden und extrem lauten Knalle führen zu unmittelbarer Desorientierung. Abgetauchte Wale flüchten durch den Stress zu schnell an die Wasseroberfläche und erleiden die sogenannte Taucherkrankheit. Dabei bilden sich durch das zu schnelle Auftauchen Gasbläschen im Blut. Bei gestrandeten Walen stellt man nach Untersuchungen blutende und verstopfte Gewebe um Ohren, Gehirn und Nieren fest.

(OceanCare, o.D.)

Diese Strandungen sind leider kein Einzelfall. Immer wieder wird von Strandungen berichtet die in den meisten Fällen in Verbindung mit Sonargeräten gebracht werden können.



Am 27. November 2024 strandet ein Cuvier-Schnabelwal an der Küste von Almería in Spanien. (OceanCare, o.D.)



Gasblasen in den Herzkranzgefäßen eines Schnabelwals. (Fernández, 2023)

Mass Strandings of Beaked Whales			
Year	Location	Species (numbers)	Assoc. activity, when avbl.
1914	New York, US	Zc (2)	
1960	Sagami Bay, Japan	Zc (2)	
1963	Gulf of Genoa, Italy	Zc (15+)	US Fleet Naval maneuvers
1963	Sagami Bay, Japan	Zc (8-10)	US Fleet
1964	Sagami Bay, Japan	Zc (2)	US Fleet
1965	Puerto Rico	Zc (5)	
1966	Ligurian Sea, Italy	Zc (3)	Naval maneuvers
1967	Sagami Bay, Japan	Zc (2)	US Fleet
1968	Bahamas	Zc (4)	
1974	Corsica	Zc (3), Striped dolphin (1)	Naval exercise
1974	Lesser Antilles	Zc (4)	Naval explosion
1975	Lesser Antilles	Zc (3)	
1978	Sagami Bay, Japan	Zc (9)	US Fleet
1978	Suruga Bay, Japan	Zc (4)	US Fleet
1979	Sagami Bay, Japan	Zc (13)	US Fleet
1980	Bahamas	Zc (3)	
1981	Bermuda	Zc (4)	
1981	Alaska, US	Zc (2)	
1983	Galapagos	Zc (6)	
1985	Canary Islands	Zc (12+), Me (1)	Naval maneuvers
1986	Canary Islands	Zc (5), Me (1), Ziphiid spp. (1)	
1987	Canary Is.	Me (3)	
1987	Italy	Zc (2)	
1987	Suruga Bay, Jpn	Zc (2)	US Fleet
1987	Canary Is.	Zc (2)	
1988	Canary Is.	Zc (3), bottlenose whale (1), pygmy sperm (2)	Naval maneuvers
1989	Sagami Bay, Jpn	Zc (3)	US Fleet
1989	Canary Is.	Zc (15+), Me (3), Md (2)	Naval maneuvers
1990	Suruga Bay, Jpn	Zc (6)	US Fleet
1991	Canary Is.	Zc (2)	Naval maneuvers
1991	Lesser Antilles	Zc (4)	
1993	Taiwan	Zc (2)	
1994	Taiwan	Zc (2)	

(cont'd)

Mass Strandings of Beaked Whales (cont'd)			
Year	Location	Species (numbers)	Assoc. activity, when avbl.
1996	Valencia, Spain	Beaked whales (2)	Naval exercise
1996	Kyparissiakos Gulf, Greece	Beaked whales (21)	Naval LFAS trials
1997	Ionian Sea, Greece	Beaked whales (9)	NATO Naval exercise
1997	Greece	Zc (3)	
1997	Greece	Zc (9+)	Naval maneuvers
1998	Puerto Rico	Zc (5)	
1999	Virgin Is.	Zc (4)	Naval maneuvers
2000	Bahamas	Zc (9), Md (3), Ziphiids (2), minke, dolphin	Naval MF sonar
2000	Galapagos	Zc (3)	Seismic research
2000	Madeira	Zc (3)	Naval MF sonar
2000	Ionian Sea, Greece	Beaked whale (1) stranded alive	NATO Naval exercise
2001	Oran, Algeria	Beaked whales (2)	Naval exercise
2001	Solomon Is.	Zc (2)	
2002	Canary Is.	Zc (9), Me (1), Md (1), Ziphiid spp. (3)	Naval MF sonar
2002	Mexico	Zc (2)	Seismic research
2003	Wash. State	Harbor porpoise (14), Dall's porpoise (1)	Naval MF sonar
2004	Hawaii	Melon-headed whales (~200)	Naval MF sonar
2004	Canary Is.	Zc (4)	Naval maneuvers
2005	N. Carolina	Pilot whales (34), dwarf sperm (2), minke	Naval maneuvers
2006	Almeria, Spain	Beaked whales (4)	NATO exercise
2011	Fontane Bianche, Italy	Beaked whales (2)	NATO naval exercise
2011	Ionian Sea, Greece & Italy	Beaked whales (12)	Italian naval exercises and seismic surveys

Strandungen von Schnabelwalen zwischen 1914 und 2011. (Weilgart, 2014)



Inhaltliche Recherche

—

Cuvier-Schnabelwal

Der Cuvier-Schnabelwal ist ein sehr akustisch sensibles Tier. Diese Spezies der Schnabelwale taucht bis zu 3000 Meter tief und gilt somit als Rekordhalter ihrer Art. In diesen Tiefen müssen sie sich auf ihre akustischen Systeme voll verlassen können. Es ist somit nicht wunderlich, dass anthropogene Lärmquellen diese Tiere bis an den Strand treiben.



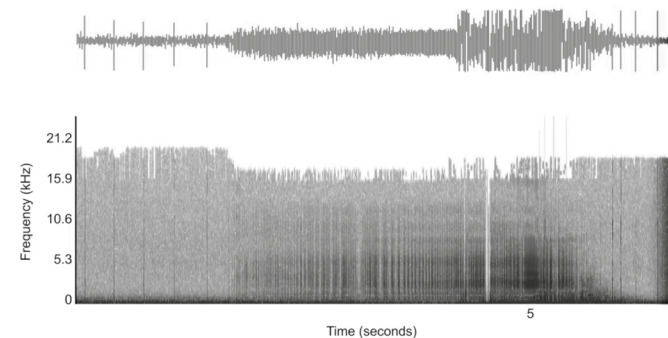
(Lifemarenatura, o.D.)

Ziphius cavirostris

<i>Länge</i>	4.5 bis 7 Meter
<i>Gewicht</i>	1.8 bis 3 Tonnen
<i>Lebensdauer</i>	bis 60 Jahre
<i>Tauchzeit</i>	20 bis 40 Minuten
<i>Tauchtiefe</i>	bis 3 km
<i>Nahrung</i>	Tintenfisch und Oktopus

(Futurismo, NOAA Fisheries, o.D.)

Cuvier-Schnabelwale leben in kleinen Gruppen von zwei bis sieben Tieren und werden zirka sechzig Jahre alt. Sie tauchen auf extreme Tiefen von bis zu 3000 km ab um dort nach Nahrung wie Tintenfischen zu suchen. Ein normaler Tauchgang dauert in der Regel 20 bis 40 Minuten. An der Wasseroberfläche sind sie jedoch eher ruhig um nicht von möglichen Fressfeinden entdeckt zu werden.

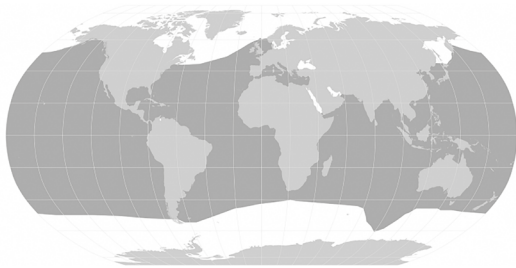


(DOSITS, o.D.)

Diese Audioaufnahme stammt von einem Blainville-Schnabelwal. Sie zeigt neben den Echolot Klicks auch Buzz Töne, welche zur Jagd genutzt werden. Die Klick Signale werden, in Intervallen von 0.2-0.4 Sekunden zum Suchen benutzt und befinden sich zwischen 26 und 51 kHz. Die Buzz Signale sind eine schnell Abfolge von zirka 300 Klicks pro Sekunde und werden auf kurze Distanz von zirka 3 Metern genutzt um die Beute zu betäuben. Männliche Cuvier-Schnabel besitzen nur zwei Zähne, weibliche gar keine. Sie erzeugen ein Vakuum in ihrem Mund und saugen so ihre Beute auf.

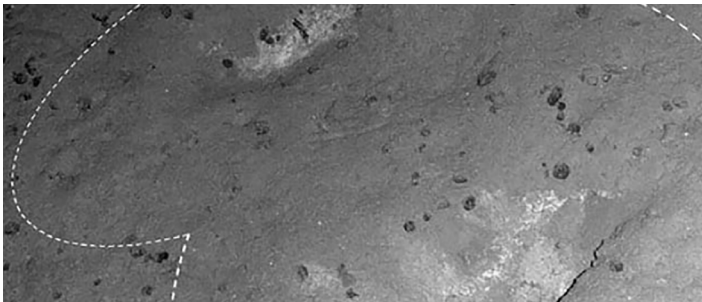
(Vgl. NOAA Fisheries, DOSIT, Futurismo, o.D.)

Durch ihre lange Tauchphasen werden Cuvier-Schnabelwale nicht oft gesichtet. Anhand der Strandungen kann man allerdings ungefähre Lebensräume bestimmen. Sie bevorzugen wohl temperierte Gewässer mit über 1000 Metern Tiefe.



(Vgl. & Bild: NOAA Fisheries, o.D.)

Es ist wahrscheinlich, dass die Schnabelwale auch in der Clarion-Clipperton Zone leben. Bisher vermutete man allerdings, dass sie dort nicht bis ganz runter auf den Meeresboden tauchen würden. Bilder einer Expedition, geleitet von Dr. Leigh Marsh zeigen jedoch Spuren bei den angenommen wird, dass es sich hier um tieftauchende Schnabelwale handeln könnte.



(Vgl. & Bild: DSM Observer, 2018)

Gestalterische Arbeit

—

Konzeption

Meeresbewohner sind bereits extremem anthropogenen Lärmbelastungen ausgesetzt und laufen durch den Tiefseebergbau Gefahr zusätzlicher Stressoren. Einen Start des großflächigen Abbaus könnte zu zahlreichen weiteren Strandungen führen. Dieselben Sonare und Maschinen wie bei anderen industriellen und militärischen Operationen werden auch hier höchstwahrscheinlich bei Tieren Stress, Krankheiten, Lebensraumverlust und letztlich den Tod verursachen.

Es gibt zahlreiche weitere Gründe für und gegen den Tiefseebergbau. Ich fokussiere mich in meiner Bachelorarbeit bewusst auf die potentielle Lärmverschmutzung, da sie bereits eine große Herausforderung für das Unterwasser Ökosystem darstellt. Zudem bestehen hier bereits an anderen Stellen Daten mit denen sich die potentiellen Auswirkungen gut errechnen lassen.

Zielsetzung

Die größte Herausforderung bei der Diskussion um dem Tiefseebergbau ist, dass die Zeit gegen die Forschung spielt. Die Industrie übt immer mehr Druck auf die ISA aus und versucht den Abbau möglichst schnell zu starten. Glücklicherweise ruften laut OceanCare am 2. August 2024 32 Staaten zu einem Moratorium auf. Sie wollen die Entscheidungen über den Tiefseebergbau pausieren bis mehr Forschung verfügbar ist. Wir haben nun die Chance überlegte Entscheidungen zu treffen und nicht wie üblich, ohne Rücksicht auf Verluste die Erde auszubeuten.

Ich möchte mit meiner Bachelorarbeit über das Thema aufklären und Leute dazu anregen die Forschung zu unterstützen. OceanCare, Greenpeace, We Move Europe und viele weitere Institutionen bieten Petitionen für die ich Leute gewinnen möchte.

Virtual Reality Experience

Als gestalterischer Mittelpunkt meiner Bachelorarbeit steht eine Virtual Reality Experience in der die Auswirkungen der Lärmverschmutzung des Tiefseebergbaus immersiv dargestellt werden. Betrachtende werden in die Rolle eines Cuvier-Schnabelwals versetzt, welcher zusammen mit seiner Familie nach Nahrung sucht. Sie werden dabei von einem Multibeam Sonar überrascht und müssen plötzlich vor dem ohrenbetäubenden Lärm der Abbaugeräte fliehen. Die Gruppe verliert sich und schwimmt orientierungslos umher. Die Tiere müssen zu schnell auftauchen und verenden letztendlich nebeneinander am Strand.

Ich interpretiere mit der VR-Anwendung das Gefühl welche die Wale in solchen Situationen haben müssen. Betrachtende sollen nicht von außen auf das Geschehen gucken, sondern mittendrin sein und an eigenem Leib erfahren was eine solche Lärmbelastung bedeutet. Zudem möchte ich einen Einblick in das Ökosystem, das faszinierende Leben der Wale und der Tiefsee bieten. Zusätzlich werden potentiell genutzte Abbaumaschinen gezeigt und Lärmquellen audiovisuell dargestellt.

Die VR-Anwendung schafft durch den Rundumblick und das 3D-Audio ein immersives Erlebnis. Zudem können sich Nutzende durch eine Echolot-Mechanik umschaun und mit Objekten interagieren. Die Anwendung ist daher ein interaktiver VR-Animationskurzfilm und wird in den folgenden Texten als VR-Anwendung, VR-Film oder VR-Animation bezeichnet.

Informative Medien

Neben der VR-Anwendung soll fundiertes Wissen zum Tiefseebergbau vermittelt werden. Der Fokus liegt dabei auf den potenziellen Auswirkungen für Cuvier-Schnabelwale. Zusätzlich werden grundlegende Informationen zur Tiefsee sowie spannende Fakten genannt und mögliche Handlungsoptionen aufgezeigt. Neben der textlichen Ebene dienen illustrative Darstellungen zur Veranschaulichung.



Gestalterische Arbeit

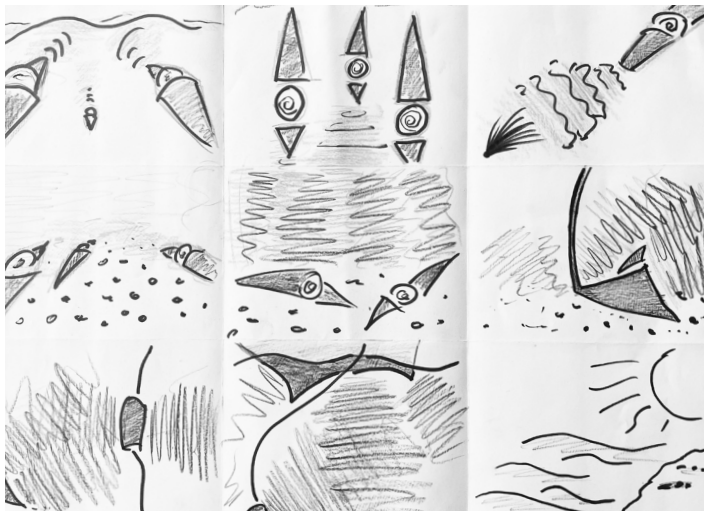
—

Vorbereitung

Auf den folgenden Seiten wird ein Einblick in die Vorbereitung, den Arbeitsprozess und die finale Umsetzung gegeben. Zusätzlich werden Erkenntnisse sowie neu erlernte Techniken erläutert.

Vorbereitung

Vor der technischen und gestalterischen Umsetzung wurde ein klarer Storyablauf in Form eines Treatments verfasst. Es folgten die Entwicklung eines Storyboards, die Erstellung einer Karte zur Positionierung, das Sammeln der wichtigsten Daten und das Anfertigen von Skizzen für die spätere visuelle Gestaltung. Eine gründliche Vorbereitung war bei diesem Projekt essenziell, da es sich um ein komplexes Thema handelt und zahlreiche Techniken genutzt wurden, bei denen die Gefahr bestand, den Überblick zu verlieren. Zusätzlich wurde eine grobe zeitliche Einteilung vorgenommen und die Aufgaben nach Priorität geordnet.



Ein grobes Storyboard, hilft zur Präsentation der Ideen.

Logline

Eine Familie von Schnabelwalen ist den Lärmauswirkungen von Tiefseebergbau-Maschinen ausgesetzt.

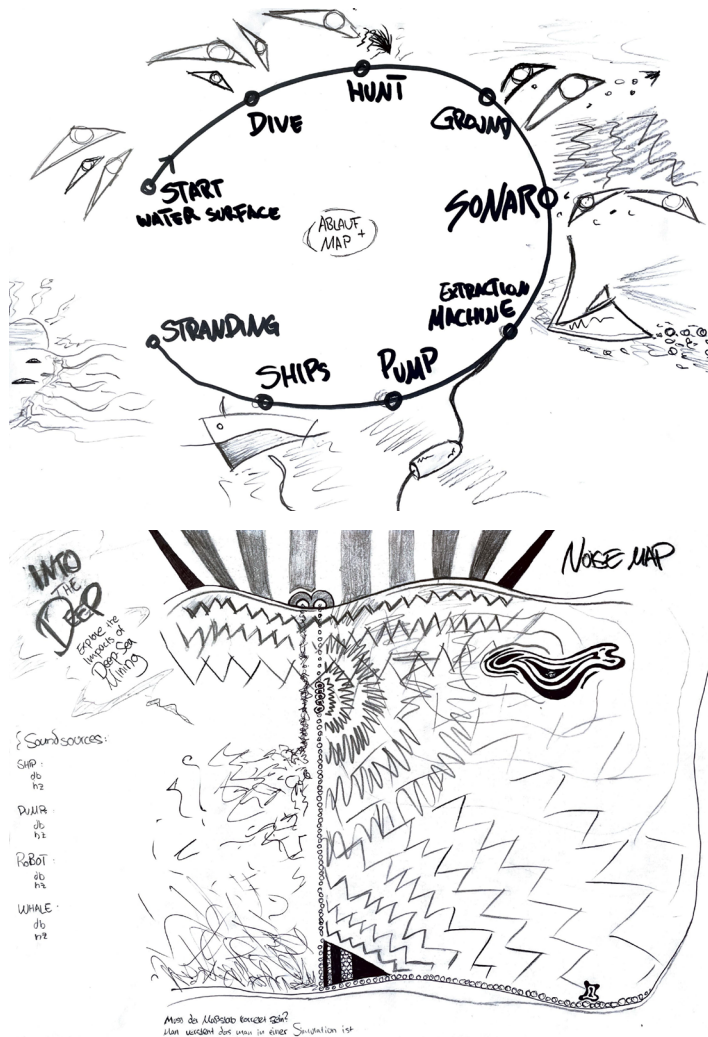
Treatment

Wir befinden uns in einer kleinen Familie von Schnabelwalen an der Meeresoberfläche. Hier füllen sie ihre Lungen für den nächsten Tauchgang. Sie kommunizieren jetzt, bevor sie länger abtauchen, damit sie später nicht so leicht von anderen Raubtieren gehört werden.

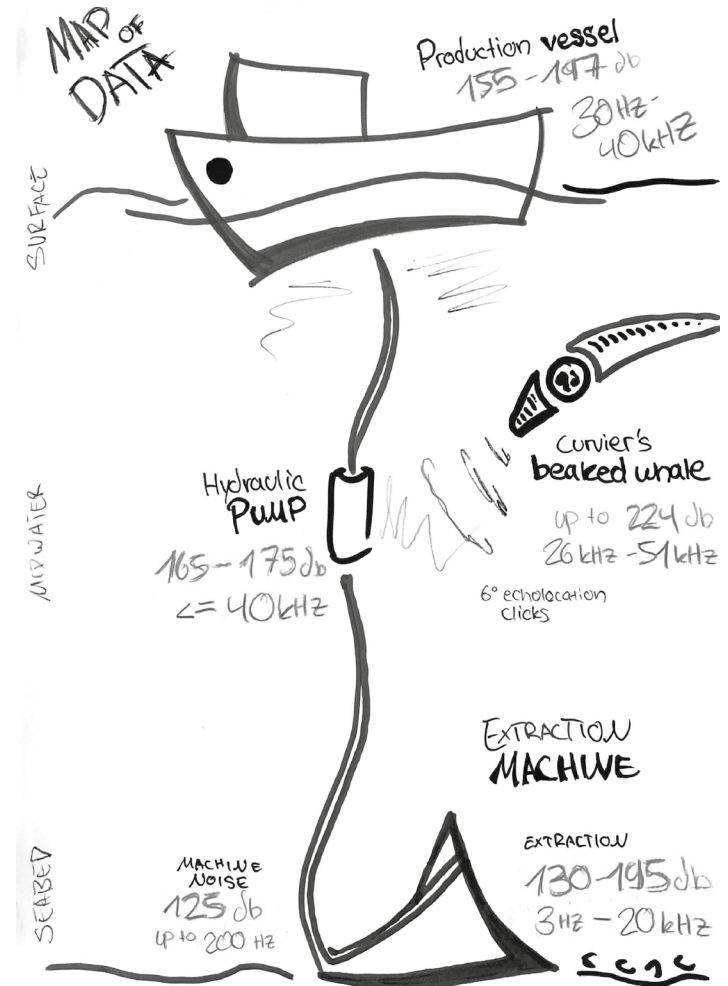
Gemeinsam abgetaucht senden sie Echolot-Klicks zur Navigation aus. Wenn sie auf Tintenfische treffen, nutzen sie schnellere Buzz-Töne, um ihre Beute zu betäuben und somit leichter aufzuschlüpfen. Am Meeresboden angekommen streifen die Tiere über Manganknollen, um nach weiterem Essen zu suchen.

Mit einem Knall befinden sich die Wale auf einmal vor einer riesigen Schallmauer. Ein Multibeam-Sonargerät scannt den Meeresboden. Der Schalldruck schädigt das Hörvermögen der Wale, welche nun nicht mehr wirklich navigieren können. Egal, in welche Richtung sie schwimmen, treffen die Wale auf Abbaugeräte, Hydraulikpumpen und Schiffe, welche so laute Geräusche von sich geben, dass sich die Gruppe verliert.

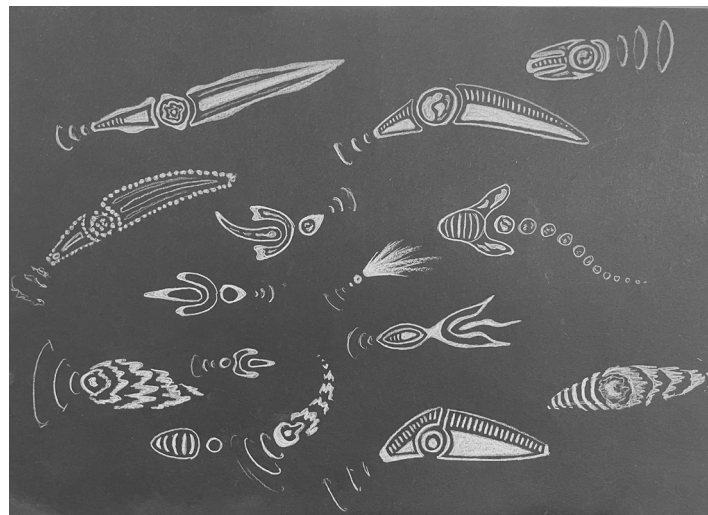
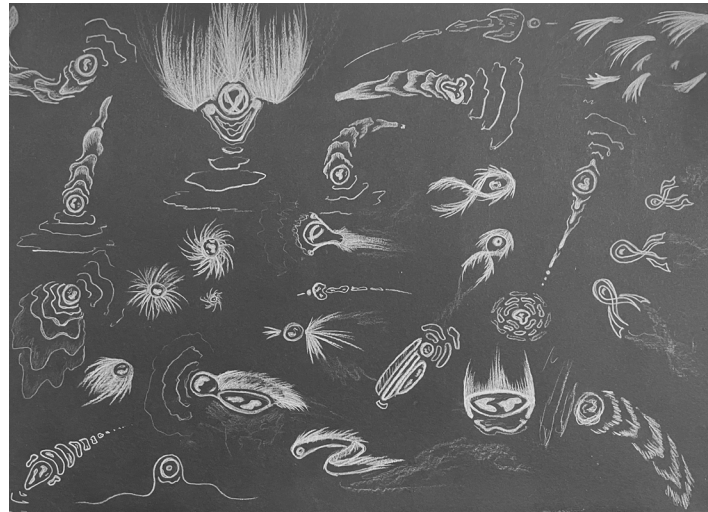
Die Wale versuchen, schnell aufzutauchen, um den Geräuschen zu entfliehen. Doch durch das zu schnelle Auftauchen werden sie krank. Vollkommen desorientiert und eingezäunt durch die Abbaugeräte treiben sie ins Flachgewässer und stranden schließlich an der Küste.



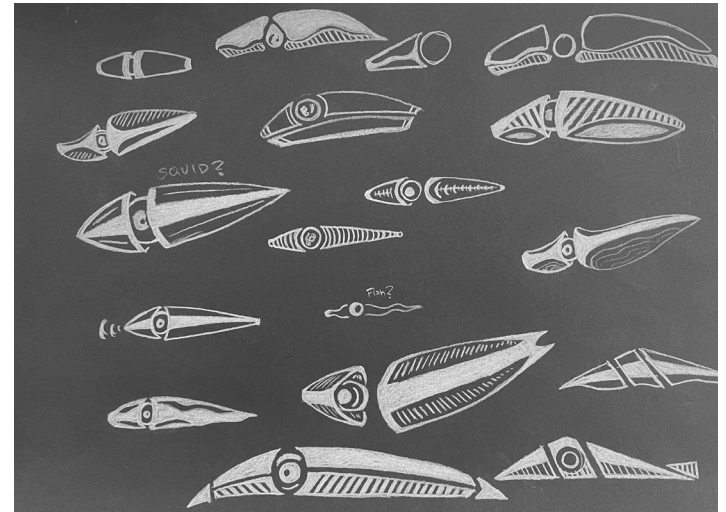
Map für Ablauf und Positionierung, sowie eine Visualisierung der Schallquellen.



Eine Sammlung der Schallquellen und ihrer Lautstärke und Frequenzspektren.



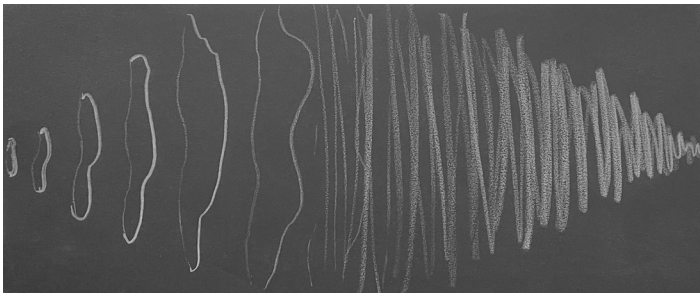
Die Skizzen sind von Zeichnungen indigener Völker inspiriert.





Gestalterische Arbeit

Technische Umsetzung



Die Skizzen verdeutlichen bereits den Kontrast zwischen Natur und Maschine. In der unteren Darstellung sind aufeinandertreffende Schallvisualisierungen zu sehen.

Setup

In Gesprächen mit dem Zweitprüfer Manfred Olschewski wurde Unity als geeignete Plattform für die Arbeit in Virtual Reality (VR) empfohlen. Erste Erfahrungen mit Unity waren bereits vorhanden, jedoch bestand noch keine Erfahrung mit VR. Herr Olschewski bot seine Unterstützung an und versicherte, dass die Implementierung einer VR-Brille in Unity machbar sei. Das technische Setup bestand aus einem leistungsstarken Windows-PC, Unity und einer über Kabel verbundenen Oculus Quest 2. Mithilfe zahlreicher Tutorials gelang es schließlich, die Brille so einzurichten, dass die Unity-Anwendung per Knopfdruck darauf wiedergegeben werden konnte.

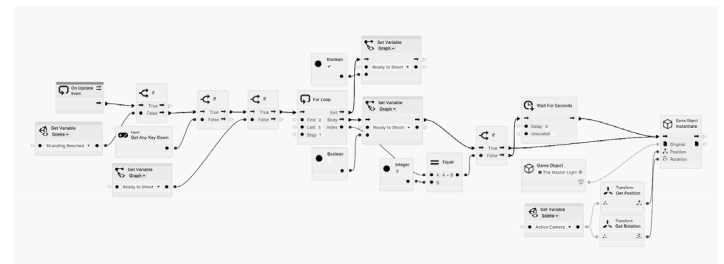
Erste Tests

Ich machte mich dran einen funktionierenden Ablauf zu bauen. Ein kleiner Prototyp der anhand von Low-Poly Modellen ein Gefühl für Geschwindigkeit, Zeit und Raum gibt. Ich schaute mir zudem andere VR-Anwendungen an um Inspirationen für Bewegungsformen und Interaktionen zu kriegen. Ich entschloss mich für eine langsame Kamerafahrt, bei der Nutzende rundum gucken können und sieht trotzdem vorwärts bewegen. Für die Kamerafahrt nutze ich das Unity Plugin Cinemachine. Das Plugin bietet sogenannte Spline auf denen man eine Kamerafahrt animieren kann. Dieselbe Technik nutzte ich auch um die Wale entlang eines sichtbaren Pfades zu animieren.



Die Cinemachine Spline Tracks für die Bewegungen der Kamera und der Wale aus der Vogelperspektive.

Die Interaktionsform der Echolot-Mechanik wurde zügig umgesetzt. Dennoch erforderte sie zahlreiche Tests, um eine gute Balance zwischen Geschwindigkeit, Anzahl und Größe der visualisierten Echolot-Signale zu finden. Hierfür wurde die visuelle Programmierumgebung „Visual Scripting Machine“ innerhalb von Unity genutzt. Diese komponentenbasierte Methode ermöglichte eine flexible und intuitive Entwicklung der Mechanik.



Ein Teil der Echolot Funktionalität in der Visual Scripting Machine.

Herausforderungen

Zu diesem Zeitpunkt im Prozess begann die intensive Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Funktionen in Unity, um die jeweils passende Lösung zu finden. Ein Nachteil solch umfangreicher Programme ist die Vielzahl an Möglichkeiten, ein Problem anzugehen. Die Schwimmbewegungen der Tiere konnten beispielsweise durch Character Rigging, prozedurale Animationen, Keyframe-Animationen, Programmierung oder sogar durch Shader realisiert werden. Jede dieser Techniken bietet spezifische Vor- und Nachteile, erfordert jedoch Zeit für die Einarbeitung und Umsetzung.

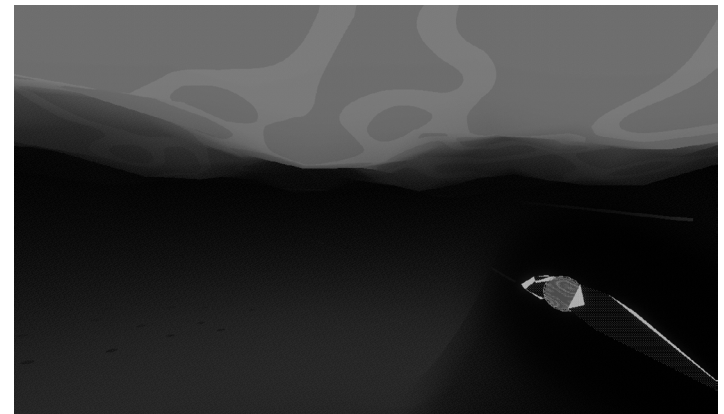
Eine der größten Herausforderungen war der Umgang mit Licht und Nebel. Die ursprüngliche Idee bestand darin, Licht als Biosonar zu nutzen, um die Umgebung sichtbar zu machen. Der Nebel sollte dabei einen Verlauf in der Lichtintensität und Helligkeit schaffen, um verschiedene Meerestiefen realistisch zu simulieren. Das Projekt wurde jedoch in der Universal Render Pipeline von Unity umgesetzt, die standardmäßig weder Nebel noch volumetrisches Licht (bei dem Lichtstrahlen sichtbar werden) unterstützt.

Um diese Effekte dennoch zu realisieren, kamen Drittanbieter-Plugins zum Einsatz, die zwar die gewünschten Ergebnisse lieferten, jedoch die Performance so stark beeinträchtigten, dass die Anwendung auf der VR-Brille nicht mehr lauffähig war.

Der Workflow mit der VR-Brille erwies sich als sehr zeitaufwendig. Jedes Mal, wenn etwas getestet werden musste, war es notwendig, die Brille aufzusetzen, zu warten und dabei den Blick auf die Bildschirme zu verlieren. Dies war nicht nur lang-

sam, sondern auch äußerst unpraktisch, insbesondere beim Debuggen, wenn beispielsweise Daten aus der Konsole überprüft werden sollten.

Die Lösung für die Probleme bestand in einer Vereinfachung der Arbeitsweise. Zunächst wurde die VR-Brille beiseitegelegt, und die Kamerabewegungen sowie Interaktionen wurden per Maus gesteuert. Dies führte auch zu einer Reduzierung der Funktionen auf das Wesentliche: keine Drittanbieter-Plugins, keine komplexen Character Riggings und vor allem kein Licht. Es stellte sich heraus, dass Licht unter Wasser sowohl aus Performance-Gründen als auch aufgrund der möglichen falschen Interpretation nicht sinnvoll war. Der Fokus lag fortan darauf, alle Elemente der Anwendung selbst zu erstellen, wobei es wichtig war, die eigenen Ideen und Ziele klar umzusetzen und die Dinge so darzustellen, wie sie ursprünglich konzipiert wurden.



Eine Szene mit Drittanbieter-Nebel und Wasser.

Partikel System

Das in Unity standardmäßig eingebaute Partikelsystem wurde aufgrund seiner Vielseitigkeit gewählt. Es bietet zahlreiche Funktionen, um eine Vielzahl von Objekten nach bestimmten Regeln über einen definierten Zeitraum hinweg auszusenden.

Das Partikelsystem wird in der Anwendung an verschiedenen Stellen unterschiedlich eingesetzt. Beispielsweise kommt es bei allen Geräuschquellen zum Einsatz. Die Darstellung des Maschinenlärms erfolgt durch ein Partikelsystem, das sogenannte Trails hinter den Partikeln erzeugt. Diese bewegen sich zufällig hin und her, wodurch der Eindruck von Unruhe und Lärm verstärkt wird. Durch das gezielte Anpassen einzelner Parameter können vielfältige visuelle Effekte erzielt werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten des Partikelsystems umfassen die Darstellung der Kommunikation der Wale, die Visualisierung ihrer Buzz-Sounds, das Multibeam-Sonar sowie die Simulation von Sedimentwolken.

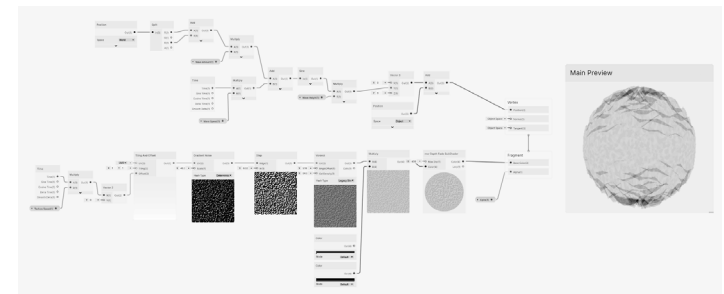


Das Partikel System stellt die Lärmverschmutzung der Abbaumaschinen dar.

Shader Graph

Ein weiteres zentrales Tool ist der Shader Graph, der eine neue Welt von Gestaltungsmöglichkeiten eröffnet. Ähnlich wie bei der Visual Scripting Machine können hier durch das Verbinden von Komponenten Shader erstellt werden. Shader finden vor allem in 3D-Anwendungen Verwendung und vermitteln Informationen wie Farbe und Position von Vertices eines 3D-Modells an die Grafikkarte.

Im Shader Graph lassen sich diese Informationen aufrufen, manipulieren und durch benutzerdefinierte Inputs wie Texturen erweitern. Der Shader Graph wird in der Anwendung umfassend genutzt, besonders für die Erstellung von Sinusbewegungen in Wellen und bei einzelnen Tieren. Dazu wird ein Time-Input verwendet, der mit einer Sinusfunktion verbunden wird, um die Position der Vertices eines Objekts im World Space zu definieren. Dieses Verfahren ermöglicht organische, dynamische Bewegungen, die das Verhalten der Unterwasserwelt simulieren.



Im Shader Graph animierte Wellenbewegungen.



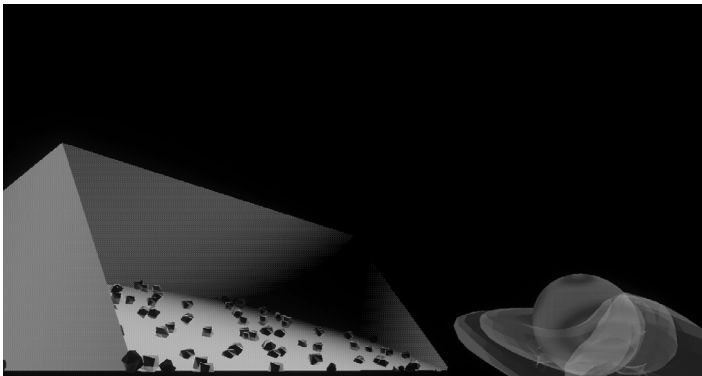
Gestalterische Arbeit



Visuelle Umsetzung

Visuelles Konzept

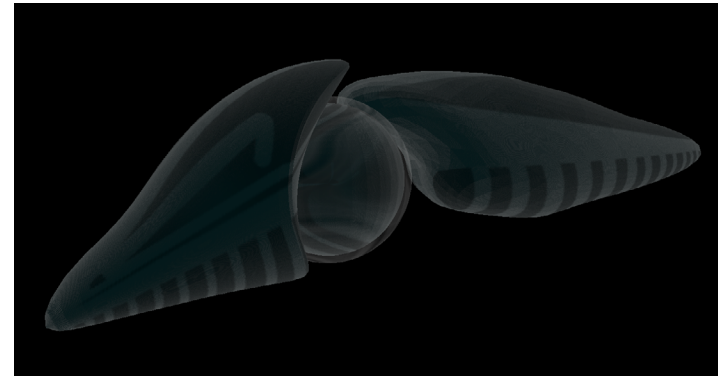
Das visuelle Konzept der VR-Anwendung betont den Konflikt zwischen dem bedrohten Ökosystem und der ausbeutenden Industrie. Klare Kontraste unterstreichen, dass die Abbaumaschinen nicht in die Unterwasserwelt gehören und dort einen massiven Eingriff darstellen. Diese Trennung wird durch die Gestaltung der Formen erreicht: Das Ökosystem wird mit kurvigem, organischen Formen dargestellt, während die Abbaumaschinen durch harte, kantige Strukturen herausstechen.



Die Abbaumaschine und ein Oktopus.

Ein zentrales gestalterisches Prinzip ist die Reduktion von Objekten auf ihre wesentlichen Eigenschaften. Ein Wal muss nicht naturgetreu dargestellt werden, sondern vielmehr als ein soziales, akustisch sensibles Tier erkennbar sein, das sich per Schall orientiert. Ebenso sind die Maschinen nicht realistisch modelliert, sondern zeigen vor allem ihre Eingriffe und die Auswirkungen ihres Handelns auf das Ökosystem.

Modelle und Shader



Beim Wal werden viele verschiedene Gestaltungstechniken kombiniert.

Die Modelle werden in Blender basierend auf Skizzen erstellt. Ausgangspunkt sind grobe Formen, die mithilfe von Modifiern weiterentwickelt werden. Im Texture Paint werden danach die Texturen der Wale hangezeichnet und zur Weiterverarbeitung in den Unity Shader Graph importiert.

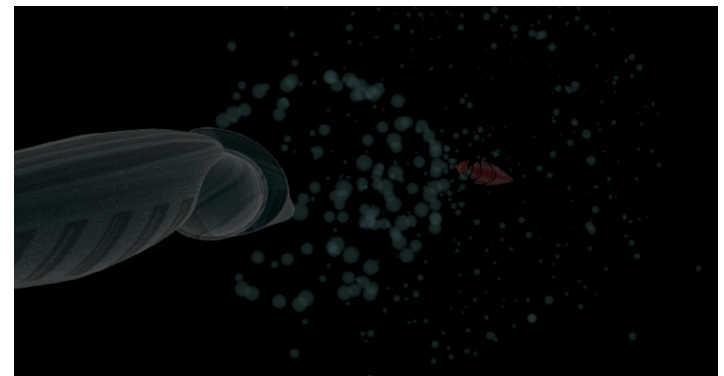
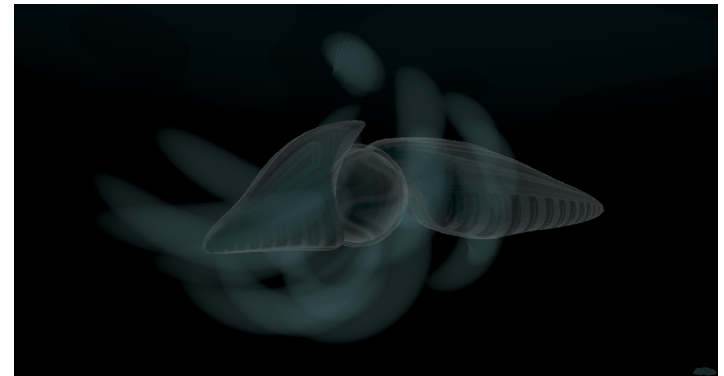
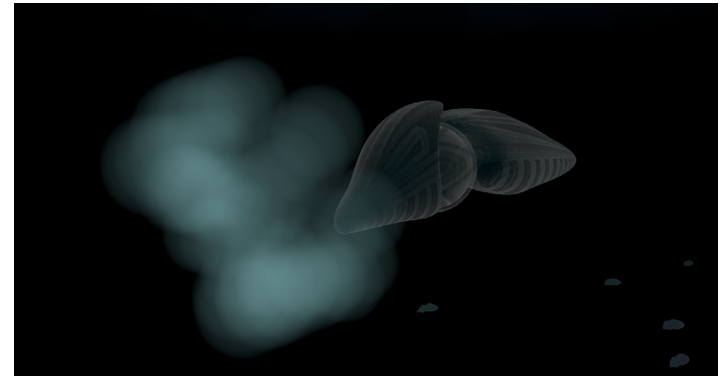
In den Shadern kommen unter anderem Transparenz und additive Blend-Modi zum Einsatz. Ein häufig verwendetes Element ist der Fresnel-Effekt, der die Konturen von Objekten betont und ihnen eine besondere visuelle Tiefe verleiht. Neben der Bearbeitung von Farben im Fragment-Shader werden teilweise die Positionen von Vertices verändert, um den Objekten eine komplexere und dynamische Form zu geben. So basieren beispielsweise die Oktopus-Modelle auf übereinanderliegenden Torussen, deren Formen durch Sinuskurven im Vertex-Shader gestaltet werden.

Darstellung von Schall

Das visuelle Konzept der Modelle wird auch bei der Darstellung von Schall angewendet, wobei eine klare Unterscheidung zwischen natürlichen und anthropogenen Geräuschen im Fokus steht. Die Geräusche von Abbaumaschinen werden durch ein Partikelsystem dargestellt, das zackige, kantige Linien umfasst. Die Menge der Linien repräsentiert das Ausmaß des Schalls, die Dicke die Intensität und die Geschwindigkeit die Frequenz. Diese Elemente sollen eine bedrängende und störende Wirkung auf die Betrachtenden haben.



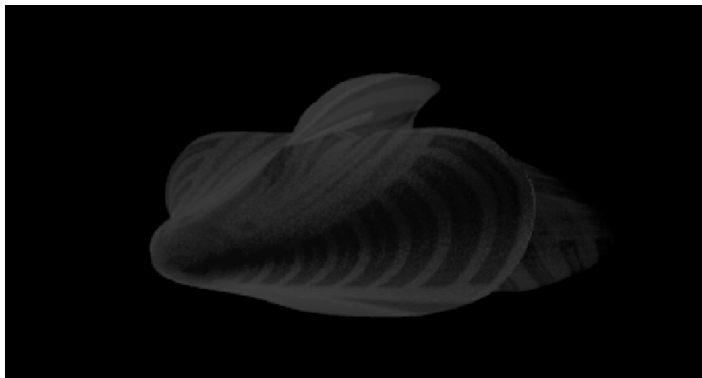
Im Gegensatz dazu werden die Geräusche der Wale durch sanfte Verläufe und kurvige Animationen visualisiert. Die Echolot-Klicks der Wale werden als runde Partikel mit einer schnellen Vorwärtsbewegung dargestellt, während die soziale Kommunikation in spiralförmigen Mustern rund um den Wal verteilt ist. Der Jagd-Buzz zeigt eine schnelle, spiralförmige Bewegung zum Ziel hin.



Post-Processing und Distance-Fade

Globale Post-Processing-Effekte verstärken die Dramaturgie der Szenen und Übergänge. In der Endszene wird beispielsweise eine Tiefenschärfe hinzugefügt und der Kontrast reduziert, um den Verlust von Energie und Leben der Tiere zu verdeutlichen.

Ein Distance-Fade-Effekt wird eingesetzt, um Objekte mit zunehmender Entfernung unsichtbar zu machen. Ursprünglich wurde dies mit Drittanbieter-Nebel-Assets versucht, jedoch wird die Distanzsteuerung letztlich über einen eigens entwickelten Sub-Shader gelöst. Dieser berechnet die Entfernung eines Objekts zur Kamera und passt Helligkeit oder Transparenz des Materials entsprechend an. Der Sub-Shader wird in andere Shader integriert, wobei Minimal- und Maximalwerte individuell angepasst werden.



Durch den Distance-Fade erscheint der große Wal plötzlich aus dem Nichts.

Einsatz von Text

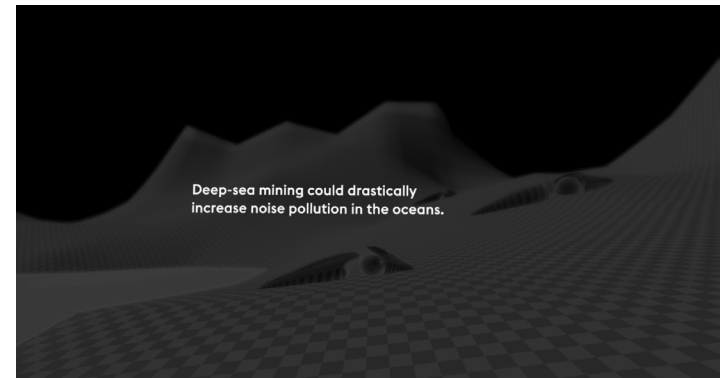
Während der Story werden textliche Elemente bewusst vermieden, um die Immersion nicht zu unterbrechen. Erst im abschließenden Teil der Anwendung wird die Story mit realen Ereignissen verknüpft und über die Gefahren des Tiefseebergbaus gewarnt. Abschließend wird zum Unterstützen der Forschung aufgerufen.

Was this exhausting for you?

Imagine being a whale.

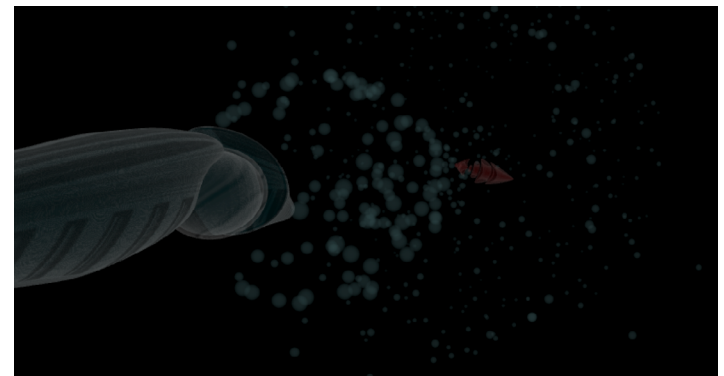
*Deep-sea mining would drastically
increase noise pollution in the oceans.*

Protect the deep sea – sign the petition!



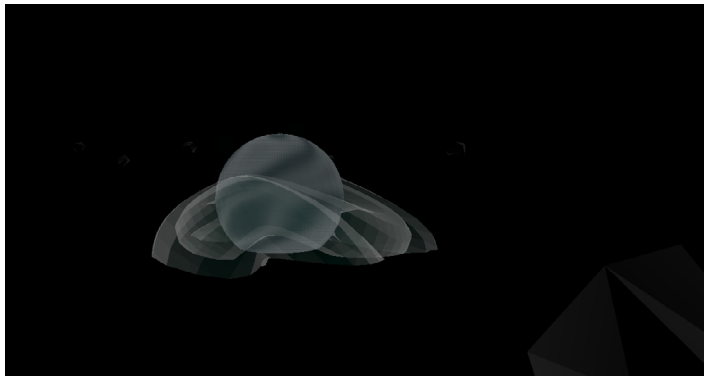
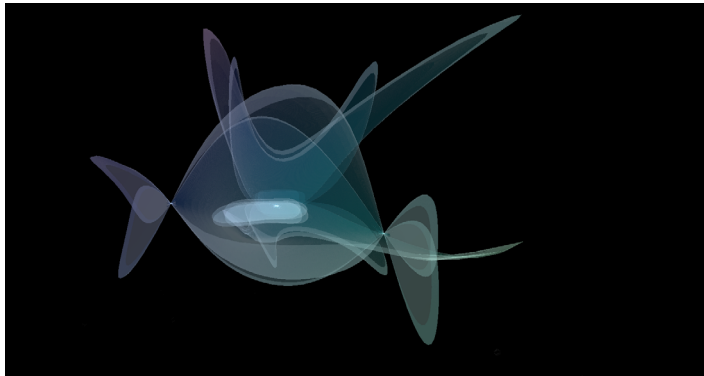
Ablauf

Die Startszene dient als Übergang von der Realität in das Storytelling und die virtuelle Umgebung. Die organischen Formen stellen bereits eine Verbindung zu den im Hintergrund singenden Walen her.

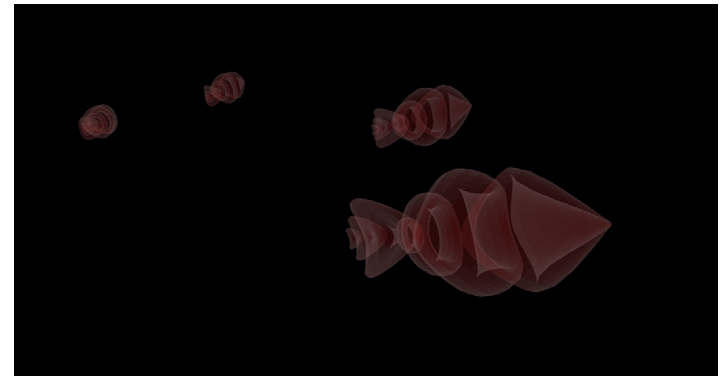


Betrachtende befinden sich nun in einer Gruppe von Walen. Sie können sich umschaun, auf Knopfdruck Echolot aussenden und mit Fischen sowie anderen Walen interagieren.

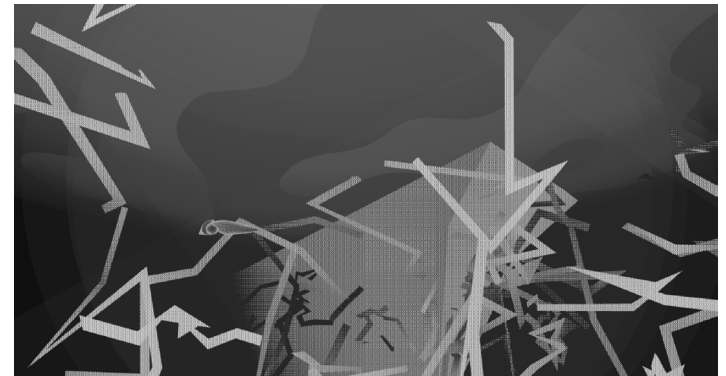
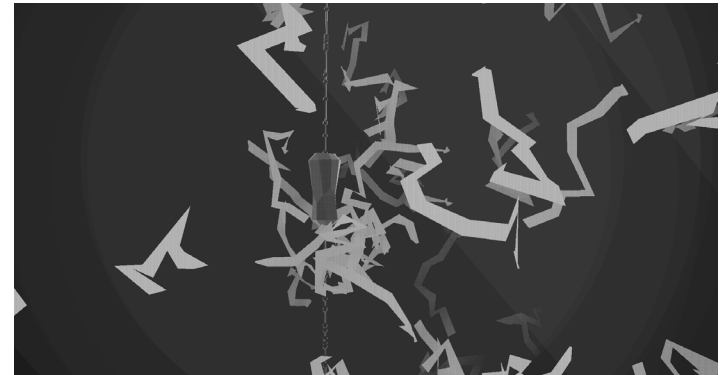
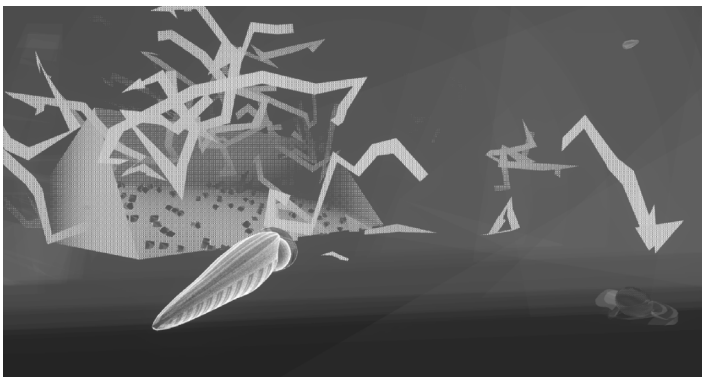
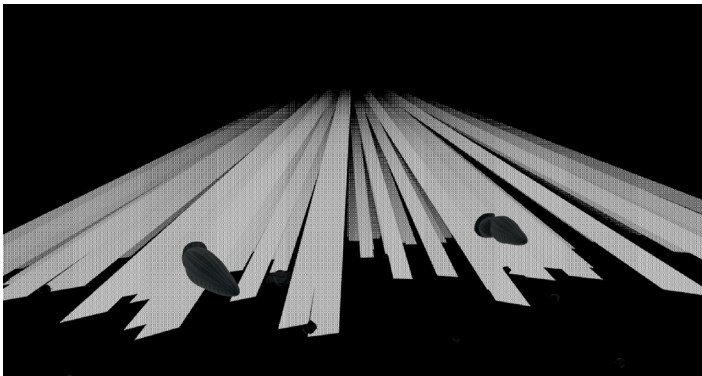
Die Gruppe trifft auf einen größeren Wal, der in die entgegengesetzte Richtung schwimmt. Sie beginnen ihren Tauchgang. Ein Wal schafft es, einen Tintenfisch zu betäuben und aufzusaugen.



In der Tiefsee angekommen, treffen die Wale auf verschiedene Tiere. Oktopusse sitzen auf dem Boden und versuchen, sich zu tarnen. Tintenfische und Quallen schwimmen in Ruhe umher. Sie erschrecken vor Echolotsignalen und schwimmen davon.

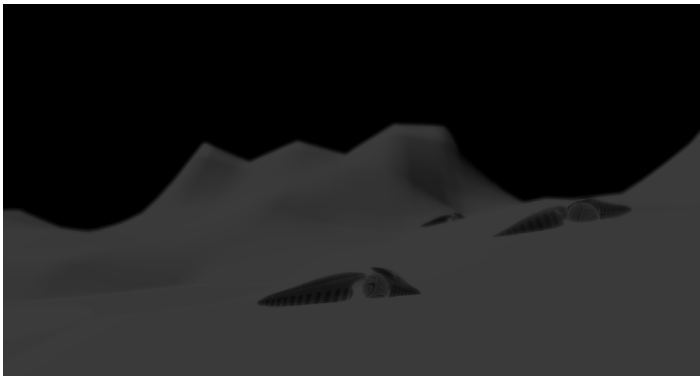


Plötzlich nähern sich rasant die Schallwellen eines Multibeam-Sonars. Vollkommen geschockt flüchten die Wale in eine andere Richtung. Doch ihre Sinne sind geschädigt, und sie schwimmen mitten in eine Abbaumaschine.



Die Wale wollen schnell an die Wasseroberfläche und verlieren sich dabei. Ihre Kommunikation und Navigation werden massiv durch den Lärm der Hydraulikpumpe und des Schiffes beeinträchtigt. Egal, in welche Richtung sie flüchten, wird ihnen der Weg abgeschnitten.

Die Sicht wird immer schlechter, bis schließlich gar nichts mehr zu sehen ist. Mit letzter Kraft, vollkommen unscharf, sieht man die kleine Familie tot an der Küste liegen.



Durch die Einblendung von Text werden Betrachtende zurück in die Realität gebracht. Mit Sätzen wie „Deep-sea mining would drastically increase noise pollution in the oceans.“ wird eine Verbindung zwischen dem Storytelling und realen Ereignissen geschaffen.



Gestalterische Arbeit



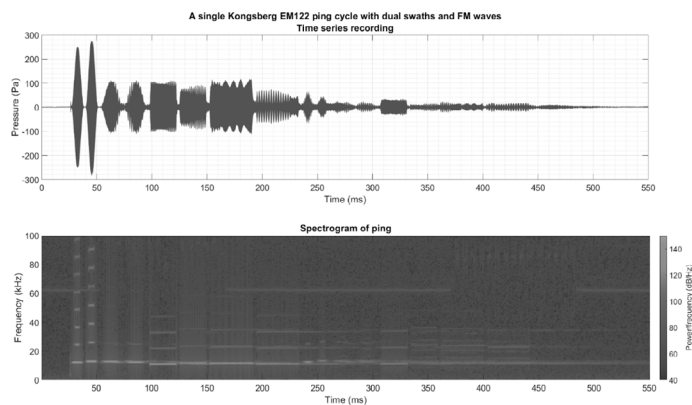
Auditive Umsetzung

Ein zentrales Element der VR-Story ist das Zusammenspiel verschiedener Klänge und Geräusche. Der Einschnitt des Maschinenlärms in das lebendige Ökosystem der Tiefsee wird durch gezieltes Sounddesign dargestellt. Das Projekt legt daher einen starken Fokus auf die akustische Ebene, um den Kontrast zwischen natürlichen und anthropogenen Geräuschquellen zu verdeutlichen.

Klangkonzept

Inhaltlich relevante auditive Elemente der Story umfassen die Navigations- und Kommunikationslaute der Wale sowie die Geräusche des Multibeam-Sonars und weiterer Abbaugeräte. Ergänzt werden diese durch Umgebungsgeräusche unter Wasser und an Land, welche Informationen über die Gegebenheiten wie den sich verändernden Wasserdruck vermitteln.

Die Klänge orientieren sich an realen Aufnahmen, wobei manche Geräusche ohne direkte Referenzen interpretiert werden. Beispielsweise basiert die Darstellung der Kommunikation von Cuvier-Schnabelwalen auf Aufnahmen von Blainville-Schnabelwalen, da Ähnlichkeiten in deren Kommunikationsmustern vermutet werden. Die Klangerzeugung und Bearbeitung folgen demselben Konzept wie die visuelle Ebene: Sie verdeutlichen den Kontrast zwischen natürlichen und anthropogenen Geräuschen und deren Intensität.



Ein Multibeam-Sonar dargestellt als Wellenform und Spektrogramm.
(DOSITS, o.D.)

Sounddesign

Natürliche Klänge, wie die Echolot-Klicks der Wale, werden mit Percussioninstrumenten erzeugt, um ihnen einen warmen, analogen Charakter zu verleihen. Diese Aufnahmen orientieren sich an den Klangkurven und Frequenzen der jeweiligen Referenzen. Im Gegensatz dazu entstehen die Sounds der Maschinen durch den Einsatz eines digitalen Synthesizers in Ableton Live. Diese Geräusche besitzen einen harten, kalten und digitalen Charakter und decken ein breiteres Frequenzspektrum ab, wodurch sie die Walgeräusche teilweise maskieren.

Die Umgebungsgeräusche bestehen aus Aufnahmen von Wasser, Percussioninstrumenten und einem Field Recording der Meeresorgel aus Zadar, Kroatien. Diese Aufnahme wird subtil im Hintergrund eingesetzt, um der Tiefsee eine mystische und bedrohliche Charakteristik zu verleihen.



Eingesetzte Percussioninstrumente für Tier- und Umgebungsgeräusche.

Dramaturgischer Spannungsbogen

Die Klangbearbeitung und Komposition sind eng mit dem dramaturgischen Verlauf der Story verknüpft. Zu Beginn werden die Rezipienten ruhig und entspannt in die Unterwasserwelt eingeführt, wo sie unter anderem von den Walen „begrüßt“ werden. Mit dem Abtauchen ändert sich die Stimmung zunehmend, da die Wale zu jagen beginnen und die Umgebung dunkler wird. Eine akustische Spannung wird aufgebaut, die eine bevorstehende Bedrohung erahnen lässt.

Plötzlich setzen Störgeräusche ein, und mit einem lauten Knall beginnt eine stressvolle Phase. Diese Geräusche werden zunehmend intensiver und erscheinen aus unterschiedlichen Richtungen, was die dramatische Wirkung verstärkt. Nach dieser akustischen Eskalation folgt eine Phase der Ruhe, in der Wellengeräusche dominieren. Diese vermeintliche Stille trägt jedoch eine bedrohliche Note, da sie eine trügerische Sicherheit suggeriert.

Surround-Sound in Virtual Reality

Virtual Reality bietet die Möglichkeit, begehbare 3D-Klanglandschaften zu erschaffen. Durch die räumliche Platzierung der Klänge wird die Immersion weiter verstärkt. Wenn die Nutzer*innen ihren Kopf drehen, verändert sich die Richtung der Klangquelle, wodurch eine zusätzliche räumliche Tiefe entsteht. Dieses räumliche Klangdesign unterstützt den Eindruck, sich tatsächlich innerhalb der dargestellten Unterwasserwelt zu befinden.



Gestalterische Arbeit



Informative Medien

Ausstellungskontext

Die VR-Anwendung ist als Station einer möglichen Ausstellung zu Tiefseebergbau und den Auswirkungen von Lärmverschmutzung in den Meeren konzipiert. Besucherinnen sollen sich hier auf einer emotionalen Ebene mit dem Thema auseinandersetzen. Der interaktive Film zielt darauf ab, eine nicht-anthropogene Perspektive zu vermitteln.

Ein Schild warnt Personen mit Epilepsie, Thalassophobie (die Angst vor tiefen Gewässern) oder Achluophobie (die Angst vor Dunkelheit) vor potenziell belastenden Szenen. Die Anwendung ist auch für Menschen geeignet, die noch nie eine VR-Brille genutzt haben, da die Steuerung auf das Wesentliche reduziert wurde und keine umfangreiche Erklärung erfordert. Es sollte jedoch eine Betreuungsperson vor Ort sein, um beim Aufsetzen der Brille und beim Überreichen des Controllers zu unterstützen.

Am Ende der Station werden Informationen zum weiteren Handeln bereitgestellt, die je nach Kontext der Ausstellung variieren können. So können beispielsweise der Flyer der Tiefseekampagne von Greenpeace, die Webseite von OceanCare oder andere relevante Plattformen empfohlen werden. Zudem besteht an dieser Stelle die Möglichkeit, die Forschung direkt zu unterstützen. Besucherinnen und Besucher können eine Petition oder einen Aufruf für ein Moratorium unterzeichnen, um aktiv einen Beitrag zum Schutz der Tiefsee zu leisten.

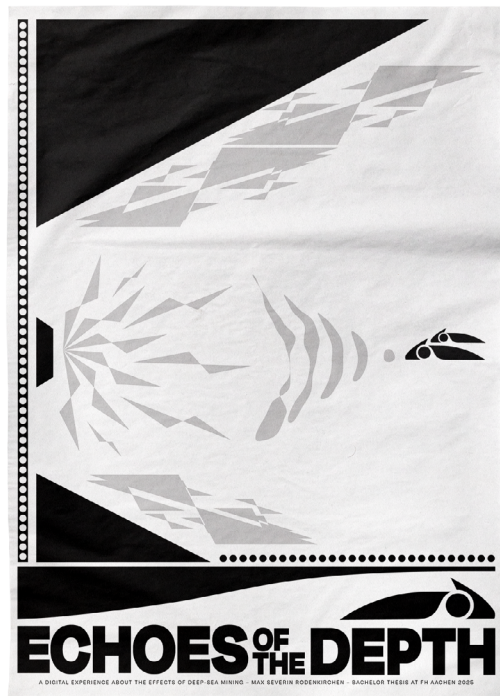
Leporello

Parallel zum VR-Film existiert als ergänzendes informatives Medium ein Leporello-Heft. Es untermauert die Story mit Fakten und vermittelt grundlegendes Wissen zum Tiefseebergbau.

Im ersten Drittel des Heftes liegt der Fokus auf den Cuvier-Schnabelwalen und erklärt, warum diese Tiere besonders gefährdet sind. Im weiteren Verlauf werden Fakten über die Tiefsee genannt, der Abbauprozess von Manganknollen erläutert und mögliche Folgen beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der potenziellen Lärmverschmutzung durch die Maschinen. Im letzten Teil wird über den aktuellen Stand berichtet und aufgezeigt, welche wichtigen nächsten Schritte erforderlich sind.



Das Cover des Leporello zeigt bereits den Titel und Teile des Abbauprozesses als grafische Elemente. Aufgeklappt stellt die Rückseite die wichtigsten Punkte des VR-Films dar. Die Abbaumaschinen und Wale, sowie ihr Schallwellen werden als geometrische Formen dargestellt. Die Grafik wird auch als Plakat genutzt und dient als erster Blickfang.



Reflexion



Herausforderungen

Die größte Herausforderung dieser Bachelorarbeit lag in der Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben, die innerhalb kurzer Zeit bewältigt werden mussten. Dazu gehörten die inhaltliche Recherche, das Entwickeln von Konzepten, das Erstellen einer Story, der Aufbau einer 3D-Welt sowie das Erlernen zahlreicher neuer Techniken, das Programmieren und Animieren. Für zukünftige Projekte wäre die Zusammenarbeit mit Kolleginnen wünschenswert, um solche Aufgaben gemeinsam zu bewältigen. Dies würde nicht nur den Arbeitsprozess beschleunigen, sondern auch dessen Effizienz steigern. Trotz der hohen Anforderungen bot dieser vielschichtige Arbeitsprozess eine wertvolle Lernkurve und führte zu einem Ergebnis, das den ursprünglichen Vorstellungen entspricht.

Inhaltliche Recherche

Besonders hervorzuheben ist die inhaltliche Recherche, die einen zentralen Teil dieser Arbeit ausmacht. Sie ermöglichte ein tiefes Eintauchen in das Thema und führte zudem zu neuen Erkenntnissen in angrenzenden Bereichen wie der Biotremologie. Das positive Feedback aus der Universität und dem persönlichen Umfeld zeigt, dass die Arbeit Wissen vermitteln konnte, was besonders motivierend ist, da das Ziel darin liegt, mit dem Beruf einen positiven Einfluss zu bewirken. Die Fähigkeit, Interesse und Begeisterung bei anderen zu wecken, unterstreicht, dass der Weg in die richtige Richtung führt. Gleichzeitig war es bereichernd, selbst eine Faszination für das Thema zu entwickeln und nun gespannt auf zukünftige Entwicklungen zu blicken.

Appendix

Im Verlauf dieser Arbeit sind zahlreiche interessante Quellen und Plattformen aufgefallen, von denen einige auch in den Anmerkungen aufgeführt sind. Auf den folgenden Seiten werden ausgewählte Ressourcen hervorgehoben, die aufgrund ihres Informationsgehalts und ihrer Relevanz besonders wichtig sind.

OrcaSound und OrcaHello

An fünf Standorten kann man live über Hydrophone der Unterwasserwelt lauschen und hoffen, Orcas zu hören. Dabei wird schnell deutlich, dass Hintergrundgeräusche und der laute Lärm von Schiffen viel präsenter sind. OrcaHello ist eine KI, die den Nutzer informiert, sobald Orcas erkannt werden.

<https://www.orcasound.net>

<https://aifororcas.azurewebsites.net>

Discovery of Sound in the Sea (DOSIT)

Die DOSIT-Plattform bietet umfassendes Wissen zum Thema Klang im Meer. Sie deckt ein breites Spektrum ab, von grundlegender Klanglehre über das Tierreich bis hin zu anthropogenen Lärmquellen. In der Galerie sind Bild- und Audioaufnahmen gut strukturiert zu finden, die einen tiefen Einblick in die Thematik ermöglichen.

<https://dosits.org>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

NOAA ist eine wissenschaftliche Institution, welche Expeditionen in die Tiefsee unternimmt. Neben Artikeln sind auf ihrer Webseite auch ein Benthic Animal Identification Guide zur Klassifizierung von Tiefseetieren zu finden. Sie bieten Livestreams von ihren Expeditionen und archivieren diese.

<https://oceanexplorer.noaa.gov>

OceanCare

Die Schweizer Institution OceanCare setzt sich für den Schutz der Meere, Tiere und Artenvielfalt ein. Sie informieren über die Auswirkungen von Plastik- und Lärmverschmutzung und warnen vor den Folgen des Tiefseebergbaus. In ihrer Petition *Because Our Planet Is Blue* sammeln sie Unterschriften für ein weltweites Moratorium für den Tiefseebergbau.

<https://www.oceancare.org>

<https://www.oceancare.org/becauseourplanetisblue>

WoRMS & WoRDSS

Das World Register of Marine Species (WoRMS) ist eine wissenschaftliche Online-Datenbank zur Kategorisierung von Meereslebewesen. Eine speziell auf Tiefseetiere ausgerichtete Datenbank ist WoRDSS, das World Register of Deep-Sea Species. Dort ist unter anderem auch eine CCZ-Checkliste zu finden, die Spezies auflistet, die in der Clarion-Clipperton Zone entdeckt wurden.

<https://www.marinespecies.org>

<https://www.marinespecies.org/deepsea>

ISA DeepData Database

Die International Seabed Authority (ISA) führt ein Online-Datenarchiv zu Aktivitäten im Tiefseebergbau. In dieser Datenbank sind Informationen darüber zu finden, welche Unternehmen Expeditionen in Tiefseebergbaugebieten durchführen.

<https://www.isa.org/jm/deepdata-database>



Sonic Sea - Der Sound der Meere

Der 2016 erschienene Dokumentarfilm *Sonic Sea* beleuchtet das Ausmaß der Lärmverschmutzung in den Meeren, insbesondere durch den Schiffsverkehr und seismische Untersuchungen. Er zeigt die daraus resultierenden Folgen, wie die Strandungen zahlreicher Schnabelwale, und bietet einen kritischen Blick auf das Thema. Der Film nimmt Zuschauende mit auf eine emotionale Reise durch die Ozeane und vermittelt eindrücklich die Dringlichkeit, die Meereswelt vor weiterer Lärmverschmutzung zu schützen.

<https://vimeo.com/ondemand/sonicsea?autoplay=1>

Songs of the Humpback Whale & Wild Wet World

Ob Wale so sprechen wie wir es tun, ist unklar. Doch dass ihre Lieder eine Form der Kommunikation sind, ist spätestens nach *Songs of the Humpback Whale*, den Buckelwal-Aufnahmen von Dr. Roger Payne aus dem Jahr 1970, klar. Musik ist eine Sprache, die von jeder Spezies gesprochen wird. In *Wild Wet World* musiziert Cosmo Sheldrake zusammen mit Buckelwalen, Pottwalen, Robben, Korallenriffen, Fischen, Garnelen und vielen weiteren Tieren. Sie erzählen zusammen die Geschichten von den Weiten der Meere.

Quellenverzeichnis

- Andreas, J., Beguš, G., Bronstein, M. M., Diamant, R., Delaney, D., Gero, S., Goldwasser, S., Gruber, D. F., de Haas, S., Malkin, P., Pavlov, N., Payne, R., Petri, G., Rus, D., Sharma, P., Tchernov, D., Tønnesen, P., Torralba, A., Vogt, D., & Wood, R. J. (2022). Toward understanding the communication in sperm whales. *iScience*, 25(6), 104393. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104393>
- Bakker, K. (2022). *The sounds of life: Die verborgene Welt der Tiere und Pflanzen*.
- Dillon, A. (2020). Potential impacts from deep-sea mining [Image]. In J. C. Drazen, C. R. Smith, K. M. Gjerde, et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30), 17455-17463. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>
- DOSITS. (o.D.). Beaked Whales [Audio]. Abgerufen von <https://dosits.org/galleries/audio-gallery/marine-mammals/toothed-whales/beaked-whales/>
- DOSITS. (o.D.). Multibeam echosounder. Abgerufen von <https://dosits.org/galleries/audio-gallery/anthropogenic-sounds/multibeam-echosounder/>
- Drazen, J. C., Smith, C. R., Gjerde, K. M., Haddock, S. H. D., Carter, G. S., Choy, C. A., Clark, M. R., Dutrieux, P., Goetze, E., Hauton, C., Hatta, M., Koslow, J. A., Leitner, A. B., Pacini, A., Perelman, J. N., Peacock, T., Sutton, T. T., Watling, L., & Yamamoto, H. (2020). Midwater ecosystems must be considered when evaluating environmental risks of deep-sea mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30), 17455-17463. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>
- Dillon, A. (2020). Potential impacts from deep-sea mining [Image]. In J. C. Drazen, C. R. Smith, K. M. Gjerde, et al., *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30), 17455-17463. <https://doi.org/10.1073/pnas.2011914117>
- FathomNet. (o.D.). FathomNet. Abgerufen von <https://fathomnet.org>

- Fernández, A. (2023, Oktober 19). Noise pollution: What we learnt and forgot from whale deaths in the Canary Islands 21 years ago. *Euronews*. Abgerufen von <https://www.euronews.com/green/2023/10/19/noise-pollution-what-we-learnt-and-forgot-from-whale-deaths-in-the-canary-islands-21-years>
- Futurismo. (o.D.). Cuvier's Beaked Whale [Abbildung]. Abgerufen von <https://www.futurismo.pt/species/cuviers-beaked-whale/>
- Harrison, E. (o.D.). Graphic: Ed Harrison / Dialogue Earth. Abgerufen von <https://dialogue.earth/en/ocean/6677-deep-seabed-mining-2/>
- Krause, B. (1993). *The niche hypothesis*. ResearchGate. Abgerufen von <https://www.researchgate.net/publication/295609070>
- Leetaru, H. (o.D.). Figure 5 - uploaded by Hannes Leetaru. Abgerufen von https://www.researchgate.net/figure/Example-of-the-noise-recorded-in-a-shot-gather-at-the-north-end-of-the-north-south-2D_fig5_228077500
- Lifemarenatura, (o.D.) Abgerufen von: <https://www.lifemarenatura.eu/it/media-kit/>
- Martin, C., Weilgart, L., Amon, D. J., & Müller, J. (2022). Deep-Sea Mining: A noisy affair. *OceanCare*. Abgerufen von <https://www.oceancare.org>
- Marshmallow Laser Feast. (o.D.). In the Eyes of the Animal. Abgerufen von <https://intheeyesoftheanimal.com>
- NOAA Fisheries. (o.D.). Whales in a world of sound. NOAA. Abgerufen von <https://www.fisheries.noaa.gov/feature-story/whales-world-sound>

NOAA, HIHWNMS. (o.D.). *Marine mammals and other marine organisms can be impacted by vessel strike, which may lead to injury or death in animals*. Abgerufen von <https://sanctuaries.noaa.gov/science/sentinel-site-program/hawaii-humpbackwhale/vessel-impacts.html>

OceanCare. (o.D.). *Wal stirbt nach Strandung*. Abgerufen am [aktuelles Datum], von https://www.oceancare.org/stories_and_news/wal-stirbt-nach-strandung/

OrcaHello. (o.D.). *OrcaHello*. Abgerufen von <https://aifororcas.azurewebsites.net>

Orcasound. (o.D.). Abgerufen von <https://live.orcasound.net>

DSM Observer. (2018, September 6). *Deep diving whales lay tracks across the CCZ*. Abgerufen von <https://dsmobserver.com/2018/09/deep-diving-whales-lay-tracks-across-the-ccz/>

Peacock, T. (2020). *Mining the deep sea* [Video]. TEDxMIT. Abgerufen von <https://youtu.be/6TpibStjOww?si=YJNqzFZRQ6wIcaz1>

PW. (2025). *Figure 6.4.2 Sound propagation in the SOFAR channel. Sound waves emanating from a source will be refracted towards the region of slower speed, "trapping" the sound in the SOFAR channel*. Abgerufen von <https://rwu.press-books.pub/webboceanography/chapter/6-4-sound/>

Rowell, G. (2018, April 25). *Inuit hunters in Utqiagvik, Alaska, paddle an umiak after a bowhead whale*. Hakai Magazine. Abgerufen von <https://umaincertaan-tropologia.org/2018/04/25/when-whales-and-humans-talk-hakai-magazine/>

Rutz, C., Bronstein, M., Raskin, A., Vernes, S. C., Zacarian, K., & Blasi, D. E. (2023). *Using machine learning to decode animal communication*. *Science*, 381, 152–154. <https://doi.org/10.1126/science.adg7314>

Woody, T. (2023). *Researchers detect 5,000 species threatened by deep sea mining*. *Mining.com*. Abgerufen von <https://www.mining.com/web/researchers-detect-5000-species-threatened-by-deep-sea-mining/>

Wenz, M. F. (1962). *Composite of ambient noise spectra* [Abbildung]. In *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12), 1691–1701. Abgerufen von https://www.researchgate.net/figure/Composite-of-ambient-noise-spectra-from-Wenz-1962_fig1_234472513/actions#caption

Weilgart, L. (2014). *Protecting Cuvier's Beaked Whales from Underwater Noise*. *OceanCare*. Abgerufen von https://www.oceancare.org/wp-content/uploads/2022/05/Underwater-Noise_Pollution_Cuviers-Beaked-Whales_Presentation-CMS_OceanCare_EN_21p_2014.pdf

Ziffioi. (o.D.). *Zifiotí*. Abgerufen von <https://www.lifemarenatura.eu/en/species/zifhius-cavirostris/>

ISA. (o.D.). *Clarion-Clipperton Zone* [Abbildung]. Abgerufen von <https://www.isa.org.jm/protection-of-the-marine-environment/regional-environmental-management-plans/ccz/>

NOAA. (2021, Oktober 1). *Photograph: NOAA*. Abgerufen von <https://www.theguardian.com/environment/gallery/2021/oct/01/the-otherworldly-species-threatened-by-deep-sea-mining-in-pictures>

Lawrence, J. (2015). *A ship conducting a seismic survey. Airguns are towed directly behind the boat; hydrophones trail away to listen to sound reverberations*. Abgerufen von <https://www.nature.com/articles/nature.2015.18342#citeas>

Quellenverzeichnis

Lawrence, J. (o.D.). Credit: John Lawrence Photography/Alamy. Abgerufen von <https://www.shearwatergeo.com/marine-acquisition-survey-method>

NOAA, HIHWNMS. (o.D.). Marine mammals and other marine organisms can be impacted by vessel strike, which may lead to injury or death in animals. Abgerufen von <https://sanctuaries.noaa.gov/science/sentinel-site-program/hawaii-humpbackwhale/vessel-impacts.html>

Vox. (2023). The race to mine the bottom of the ocean [Video]. YouTube. Abgerufen von https://www.youtube.com/watch?v=pf1GvrUqeIA&list=PLIZ01VQ6n_lwb_AtZ3DWZykRyTlsnTloh

Warner, B. (2024). AI could help us talk to animals—but should it? Atmos. <https://atmos.earth/using-ai-to-decode-animal-communication>

Für die Anbindung der VR-Brille wurden von Meta und Unity integrierte Plugins genutzt.

Das „Auto Save“ Skript von EckTech Games diente zur automatischen Speicherung des Projektes.

Die Schriftfamilien Valnera VF, Euclid Flex und Degular finden Verwendung in Text und Gestaltung.

Die Mockups für Flyer und Poster stammen von www.mockups-design.com.

ChatGPT wurde zur Korrektur und Umstrukturierung von Texten genutzt.

Prüfungsamt und
Prüfungsausschüsse
FB Gestaltung
Boxgraben 100
52064 Aachen

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG FÜR DIE ABSCHLUSSARBEIT

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit mit dem

Titel: Echoes of the Depth

Untertitel: A Digital Experience About the Effects of Deep-Sea Mining

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, Grafiken, Schemata, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Studierende/r Max Severin Rodenkirchen
Name, Vorname:

Ort, Datum Aachen, 22.01.2024
Unterschrift:



Dokument: Eidesstattliche Erklärung_Abschlussarbeit_200115



Vielen Dank an

Prof. Eva Vitting und Manfred Olschewski
für die tolle Unterstützung.

Danke an den Kurs, meine WG und alle,
die mit Feedback geholfen haben.

