



Bachelorarbeit im Studiengang Medienwirtschaft

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of Arts

Procedural Audio

Untersuchung der Praktikabilität prozeduraler Klangsynthese in der
Videospiegelvertongung

Vorgelegt von: **David Stolz**

an der **Hochschule der Medien Stuttgart**

am 12.04.2020

Erstprüfer: **Prof. Oliver Curdt**

Zweitprüfer: **Prof. Uwe Schulz**

Erklärung

Hiermit versichere ich, David Stolz, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: „Procedural Audio. Untersuchung der Praktikabilität prozeduraler Klangsynthese in der Videospiegelvertonung“ selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

Ich habe die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die prüfungsrechtlichen Folgen (§26 Abs. 2 Bachelor-SPO (6 Semester), § 23 Abs. 2 Bachelor-SPO (7 Semester) bzw. § 19 Abs. 2 Master-SPO der HdM) sowie die strafrechtlichen Folgen (gem. § 156 StGB) einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Elchesheim-Illingen, den 12. April 2020

A handwritten signature in blue ink that reads "David Stolz". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

David Stolz

Kurzfassung

Der Ansatz der prozeduralen Videospielvertonung, Klänge in Echtzeit zu synthetisieren, ermöglicht im Gegensatz zur samplebasierten Vertonung die Nachbildung realistischer Klangverhaltens auf Basis von in der Spielsituation gegebenen Zuständen und Parametern. Aufgrund des dürftigen Forschungsstands zu diesem Verfahren gibt es jedoch wenige Informationen bezüglich seiner Durchführung im Sounddesignprozess und seiner Implementierung in Spiele-Engines. Ziel dieser Arbeit ist daher, die Praktikabilität des prozeduralen Ansatzes in der Videospielvertonung zu untersuchen und aufzuzeigen, wie prozedurale Klänge erstellt werden können, für welche Arten von Klangobjekten sich Procedural Audio eignet, welche Spielkonzepte hierfür vorteilhaft sind sowie den aktuellen Forschungsstand mit einem Ausblick auf die zukünftige Bedeutung von Procedural Audio zu bewerten.

Hierfür wurde eine Spielsituation entworfen, die möglichst differenzierte Aspekte und Chancen des Ansatzes abbildet und anhand derer demonstriert wurde, wie der prozedurale Designprozess ablaufen kann. Der Fokus lag hierbei auf der Bestimmung der in Pure Data zu kreierenden Klangsysteme und insbesondere auf deren systematischer Erstellung anhand ermittelter Anforderungen an das Klangbild sowie auf deren Steuerbarkeit durch bestimmte Parameter.

Die Erkenntnisse aus der praktischen Untersuchung zeigen, dass die Beantwortung der Praktikabilitätsfrage von vielen Kriterien abhängt. Vorteilhaft für eine prozedurale Vertonung sind fiktive, wenig komplexe Klänge, die gut synthetisierbar sind und ein gut abstrahierbares Klangverhalten aufweisen. Weiterhin ist ein besonders systemischer Aufbau der Spielmechanik und deren tiefgehende Physikprogrammierung förderlich. Prozedurale Klangsynthese spart signifikant Speicherplatz, führt gleichzeitig aber auch zu einer höheren CPU-Last. Aufgrund der unzureichenden Unterstützung der Implementierung prozeduraler Systeme in gängige Spiele-Engines und einer im Vergleich zu Samples niedrigeren Detailstufe, die einer Hollywood-Realität noch nicht gerecht werden kann, wird Procedural Audio die samplebasierte Vertonung in absehbarer Zukunft nicht ablösen, jedoch sicherlich erweitern.

Abstract

The approach of procedural video game sound design to synthesize sounds in real time allows, in contrast to the sample-based approach, the reproduction of realistic sound behaviour based on states and parameters given in the game situation. However, due to the poor state of research on this method, there is little information available regarding its execution in the sound design process and its implementation in game engines. Therefore, the goal of this thesis is to evaluate the practicability of the procedural approach in video game sound design. To this end, it aims at showing how procedural sounds can be created, for which types of sound objects Procedural Audio is suitable, which game concepts are advantageous for procedural sound design, and to evaluate the current state of research by also giving an outlook on the future importance of Procedural Audio.

For this purpose, a game situation was designed which reflects as many differentiated aspects and chances of the approach as possible. This game situation was used to demonstrate how the procedural design process can be carried out. The focus lay on the determination of the sound systems to be

created in Pure Data and in particular their systematic creation based on defined requirements for the sound image as well as their controllability by certain parameters.

The findings from the practical examination show that whether procedural audio design is practicable depends on many criteria. Advantageous for a procedural approach are fictitious, less complex sounds that can be synthesized well and the sound behaviour of which can be easily abstracted. Furthermore, a particularly systemic structure of the game mechanics and a detailed physics programming are beneficial. Procedural sound synthesis saves a considerable amount of memory space, which, however, also results in a higher CPU load. Due to the insufficient support for the implementation of procedural systems in common game engines and – compared to samples – its lower level of detail, which cannot yet meet the standards of Hollywood reality, Procedural Audio will not replace sample-based sound design in the foreseeable future, but will certainly expand and enrich it.

Inhalt

1.	Einleitung.....	1
2.	Traditioneller Ansatz der Spielevertontung.....	2
2.1	Eventgebundenheit	2
2.2	Beeinflussung von Samples in Echtzeit durch DSP-Effekte	2
2.3	Nachteile der samplebasierten Vertontung	2
2.4	Realismusfrage und Beeinflussung durch Filmsounddesign aus Hollywood	4
2.5	Losgelöstheit der Audio-Engine von den restlichen Systemen	5
3.	Procedural Audio.....	5
3.1	Definition	5
3.2	Die Bedeutung des Klangverhaltens.....	6
3.3	Vorteile von PA im Vergleich zum samplebasierten Ansatz.....	7
3.3.1	Vielfalt.....	7
3.3.2	Flexibilität und Pragmatik.....	8
3.3.3	Ressourcenschonung.....	8
3.3.4	Spielerprogrammierung.....	9
3.3.5	Mixing.....	9
3.4	Vorgehen bei prozeduralem Sounddesign	9
3.4.1	Modell.....	10
3.4.2	Methode.....	10
3.4.3	Implementierung.....	11
3.5	Einschränkungen von PA	11
4.	Auswahl des Testkonzepts für das Demonstrationslevel.....	13
4.1	Kriterien für die Spielsituation	13
4.2	Geeignete Testkonzepte.....	14
4.3	Eignung des Testkonzepts Schusswaffen und resultierendes Spielsetting	14
4.3.1	Reale Waffen	15
4.3.2	Fiktive „Voltgun“	15
4.3.3	Aufbau der Spielsituation	16
5.	Ermittlung des Klangverhaltens & Analyse von Beispielklängen	16
6.	Aufbau des Klangsystems für reale Waffen (Modell).....	18
6.1	Detonationsimpuls	18
6.2	Vibration des Waffenkörpers	19

6.3	Mündungssignatur	19
6.4	Mechanik.....	19
6.5	Hülsenklang	19
6.6	Projektilschall	20
6.7	Schalldämpfer.....	20
6.8	Minigunantrieb.....	20
7.	Design der realen Waffen (Methode & Implementierung).....	21
7.1	Detonationsimpulse	22
7.1.1	Detonationsimpuls 1	22
7.1.2	Troubleshooting: Gewährleistung des Phasenstarts im Nulldurchgang	23
7.1.3	Detonationsimpuls 2	24
7.2	Mündungssignatur	25
7.3	Vibration des Waffenkörpers	25
7.1	Bandpassfilter-Subpatch für Resonanzen des Waffenkörpers.....	27
7.1	Rauschnachhall.....	28
7.2	Mechanik.....	29
7.3	Hülsenklang	30
7.4	Minigunantrieb.....	31
7.5	Projektilschockwelle (N-Wave).....	33
7.6	Schallverzögerung in Abhängigkeit von Distanz und Projektilflug	34
7.7	Beeinflussung des LOAD durch Distanz sowie Mixing-Funktionen	35
7.8	Dedizierte Einstellungen für die einzelnen Modelle	36
7.8.1	AK 47.....	39
7.8.2	M4.....	40
7.8.3	Sniper.....	41
7.8.4	Leichtes MG.....	42
7.8.5	Schweres MG.....	42
7.8.6	Minigun.....	43
8.	Analyse und Aufbau der Voltgunnelemente (Modell)	44
8.1	Analyse physikalischer Klangerzeugungsprozesse	44
8.2	Funktionsweise der Voltgun	45
8.3	Aufbau der Voltgun: Klangelemente und deren Vorbilder	45
8.3.1	Brummen.....	45
8.3.2	Elektrizitätsball (EB).....	45
8.3.3	Drehelement.....	46

8.3.4	Antriebsklang.....	46
8.3.5	Peakverstärker.....	46
8.3.6	Schussimpuls	46
8.3.7	Funkenknall	46
8.3.8	Mechanik.....	46
8.3.9	Signale	46
8.3.10	Abkühlklang.....	46
8.4	Berechnung des Ladungsparameters.....	47
9.	Design der Voltgun (Methode & Implementierung).....	47
9.1	Vom Ladungsvalue abgeleitete Steuergrößen	47
9.2	Elektrizität.....	48
9.2.1	Kammfilter.....	48
9.2.2	Brummen.....	49
9.3	Elektrizitätsball	49
9.3.1	Zwitscherimpuls.....	50
9.3.2	Steuerung des EB durch den Ladungsvalue	51
9.4	Drehelement.....	52
9.5	Peakverstärker.....	53
9.6	Antriebsklang.....	54
9.7	Schussimpuls	55
9.8	Funkenknall	55
9.9	Mechanik.....	56
9.10	Signale	56
9.11	Abkühlklang.....	56
10.	Implementierung der Synthesysteme	57
10.1	Steuerung der Patch Parameter durch OSC.....	57
10.2	Implementierung der realen Waffen	58
10.3	Implementierung der Voltgun.....	59
11.	Bewertung und Erkenntnisse	60
11.1	Beurteilung der Klänge:.....	60
11.1.1	Detailstufe	60
11.1.2	Klangverhalten.....	61
11.1.3	Implementierung der Parametersteuerung.....	62
11.1.4	Ressourcenschonung.....	62
11.1.5	Wiederverwertbarkeit erstellter Patches.....	62

12.	Fazit	64
13.	Literaturverzeichnis.....	66
14.	Grundlegende Terminologie	69
15.	Pure Data: Funktionen und Objekte.....	73
16.	Weitere Inspirationen für die Voltgun	78
17.	Anlagenverzeichnis.....	79

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Spektralverteilung echte AK47.....	17
Abb. 2: Spektralverteilung AK47 aus Battlefield 3	17
Abb. 3: Spektralverteilung M4 aus Battlefield 3	17
Abb. 4: Spektralverteilung G36C aus Battlefield 3	17
Abb. 5: AK 47 Battlefield 3 Spektralverteilung Einzelschuss	18
Abb. 6: Echte AK47 Spektralverteilung Einzelschuss.....	18
Abb. 7: Hüllkurvenfunktion	22
Abb. 8: Exponentialfunktion des Detonationsimpulses	22
Abb. 9: Signal aus der Wrapfunktion.....	23
Abb. 10: Signale aus Warp-Funktion und Cosinus-Funktion ohne Ausgleich durch den Additionswert (links) bzw. nach Ausgleich durch den Additionswert (rechts)	24
Abb. 11: Subpatch Waffenkörpervibrationsklang.....	25
Abb. 12: Waffenkörper-Vibrationsgenerator	26
Abb. 13: Ausgangssignal eines Phasor-Objektes	26
Abb. 14: Ausgangssignal eines Phasor-Objektes mit verarbeitetem Sinussignal mit Spitzenwert unter 1 (links) und über 1 (rechts)	26
Abb. 15: Ausgangssignal des Phasor-Objektes.....	27
Abb. 16: Bandpassfilterreihe für die Resonanzen des Waffenkorpus.....	28
Abb. 17: Rauschnachhall für AK47	28
Abb. 18: Triggern der Zahlenwerte durch Delayketten (Ausschnitt)	29
Abb. 19: System zur Variation und Weiterleitung der Basiswerte.....	31
Abb. 20: Ladekurve eines Kondensators	32
Abb. 21: Minigunantrieb	32
Abb. 22: Schockwellengenerator	34
Abb. 23: Verzögerungsfunktion für Schockwelle und Schuss	34
Abb. 24: Kammfilter	48
Abb. 25: Subpatch Brummen	49
Abb. 26: Subpatch Drehelement.....	52
Abb. 27: ADSR-Hüllkurve.....	70
Abb. 28: Nachgewiesene kreuzmodale Korrespondenzen.....	72

Abkürzungsverzeichnis

EB Elektrizitätsball

k. S. keine Seitenzahl

LV Ladungswerte

PA Procedural Audio

WKVK Waffenkörpervibrationsklang

1. Einleitung

Prozedurale Synthese bezeichnet in der Videospieldproduktion die Erstellung von Inhalten in Echtzeit durch einen Algorithmus anhand vorgegebener Regeln. Mithilfe solcher Verfahren kann viel Inhalt bei geringerem Zeitaufwand speicherplatzsparend und flexibel erzeugt werden.¹ Dieses Verfahren der algorithmischen Generierung wird immer häufiger für die Erstellung von Leveldesign, Grafikelementen und allgemeiner Spielmechanik genutzt.² Während beispielsweise im Titel „Borderlands“ (2009) 17 Millionen unterschiedliche Waffenmodelle prozedural erstellt werden,³ arbeitet das 2016 erschienene „No Man’s Sky“ sogar hauptsächlich mit prozeduraler Synthese. In einer Kombination aus „Action-Adventure“ und „Survival“⁴ entdeckt der Spieler hier ein ganzes Universum, stellt sich Gefahren und sucht als Weltraumentdecker auf bis zu 18 Trillionen Planeten mit individueller Flora und Fauna nach Ressourcen, die vom System anhand weniger Prototypen erschaffen werden.⁵ Im Falle der Alien-Kreaturen bestehen die dazu dienenden Vorlagen bspw. aus Prototypen von Extremitäten, Köpfen, Schwänzen, unterschiedlichen Texturen und typischen Grundformen des gesamten Körpers.⁶

Doch die Möglichkeiten der prozeduralen Synthese sind mit der Generierung von Spielwelten und Objekten keineswegs erschöpft. Auch die Erzeugung von Geräuschen und Musik zur Videospilvertonung kann prozedural durchgeführt werden. Ein prozedurales Klangsystem kann als komplexer modularer Softwaresynthesizer angesehen werden, dessen Parameter sich von der Spiele-Engine steuern lassen. Dies ist das Konzept des Procedural Audio.

Obwohl dieses Verfahren im Vergleich zur traditionellen, samplebasierten Vertonung einzigartige Chancen bietet, ist das Gebiet noch wenig erforscht. Ziel dieser Arbeit ist es daher, zu untersuchen inwieweit eine prozedurale Vertonung durchführbar ist, wie solche Klangsysteme erstellt werden können, welche Spielkonzepte geeignet sind und ob die Ergebnisse aktuellen Maßstäben genügen. So wird geprüft, ob dieser Ansatz mit der samplebasierten Vertonung mithalten kann und sie in Zukunft erweitern oder gar ablösen könnte. Im praktischen Teil der Arbeit wurden ausgehend von einer besonders für Procedural Audio geeigneten Spielsituation zwei Klangsysteme in Pure Data erstellt, die jeweils unterschiedliche Dimensionen des prozeduralen Vertonungsansatzes abbilden. Die Ergebnisse werden anhand eines in Unity realisierten Demonstrationslevels präsentiert, welches in den Anlagen zu finden ist.

Die Prinzipien von Procedural Audio unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht vom geläufigen, samplebasierten Sounddesign für Spiele. Dies wird im Folgenden kurz veranschaulicht.

¹ Vgl. Smith (2015): S. 1

² Vgl. Weir (2016): ca. 13:22

³ Vgl. Robinson (2009)

⁴ Vgl. Leenders (2011): S.19 ff.

⁵ Vgl. Hiranand (2015)

⁶ Vgl. Weir (2016): ca. 14:40

2. Traditioneller Ansatz der Spielvertonung

2.1 Eventgebundenheit

Das generelle Konzept der traditionellen, samplebasierten Spielvertonung beruht auf der Kopplung von bestimmten Ereignissen (*Events*) der Spielsituation an die Wiedergabe von vorliegenden Audiodateien (*Samples*).⁷ Jegliche Elemente der auditiven Ebene eines Spiels können auf ein einzelnes Auftreten oder einen Zustand, bzw. eine Reihe von Zuständen heruntergebrochen werden. In Klangobjekten, die mehrere Zustände haben können, wie bspw. ein Fahrstuhl, der starten, fahren, stoppen und stillstehen kann, sind allen Zuständen eigene Sample zugewiesen. Der Wechsel von einem Zustand in den nächsten kann also auch als Event bezeichnet werden. Sind die festgelegten Bedingungen eines Events erfüllt, wird das Sample abgespielt. Die Audio-Engine ist hierbei nicht wirklich mit den logischen Vorgängen im Spiel verknüpft.⁸

2.2 Beeinflussung von Samples in Echtzeit durch DSP-Effekte

Um den unveränderlichen Klang der Samples zu variieren und somit der Wahrnehmung eine gewisse Vielfalt zu suggerieren, werden die Aufnahmen mithilfe von Echtzeiteffekten wie Equalizer, Hall oder Dynamikbearbeitungstools manipuliert. Die Effekte, darunter auch Hüllkurven⁹ und Tonhöhenverschiebungen (*Pitching*)¹⁰ werden nach dem Zufallsprinzip auf Klangobjekte angewendet. Insbesondere auch solche, die besonders häufig wiederholt werden, wie es bspw. für Fußschritte oder Schussgeräusche gilt. Der Sounddesigner legt den Bereich fest, innerhalb dessen die Variationen erzeugt werden. Um die Variationen nicht zu eindimensional zu gestalten empfiehlt es sich, mehrere dieser Effekte auf den Klang anzuwenden. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass nur die Sounds, die von einer wechselnden Umgebung betroffen sein sollen, manipuliert werden dürfen.¹¹ Diese Echtzeitbearbeitung der Klänge spiegelt jedoch nicht das eigentliche Verhalten der betreffenden Klänge wider und ist somit nicht als prozedurale Vertonung anzusehen.¹²

2.3 Nachteile der samplebasierten Vertonung

Auch wenn die samplebasierte Vertonung insbesondere in der Klangqualität Vorteile bietet, so bringt diese Technik auch gewisse Nachteile mit sich, die im Folgenden erläutert werden.

Bei der eventgesteuerten Vertonung mit Samples müssen jedem Event, ob Zustand oder Aktion, jeweils ein eigener Trigger¹³ zugewiesen werden, was bei umfassenderen Spielen schnell zu einer extrem hohen Anzahl benötigter Audiotrigger führt. Das Herunterbrechen der Ereignisse auf Events, die Audio steuern können, wird zusätzlich immer schwieriger, je abstrakter die Spielweise und deren Mechanik aufgebaut ist.¹⁴

⁷ Vgl. Weir (2016): 9:05

⁸ Vgl. Farnell (2011): S. 321

⁹ siehe Abschnitt 6

¹⁰ siehe Abschnitt 6

¹¹ Vgl. Leenders (2012): S. 104

¹² Weir (2016): ca. 20:00

¹³ siehe Abschnitt 6

¹⁴ Vgl. Weir (2016): ab 9:31

Der besonders im Hinblick auf die Fragestellungen dieser Arbeit wichtige Nachteil der samplebasierten Methode ist allerdings weniger technischer, sondern vielmehr inhaltlicher Natur. Wie bereits erwähnt, werden Samples aus einem Pool mehrerer Versionen derselben Kategorie abgespielt, um die Situation bestmöglich nachzubilden.¹⁵ Schritte werden beispielsweise für jedes Untergrundmaterial mehrmals in leicht unterschiedlicher Art aufgenommen und durch zufälliges Auswählen mit einem im Spiel stattfindenden Schritt verknüpft.

Das gehörte Geräusch wird in der Wahrnehmung analysiert und der Klangerzeuger wird bspw. als „Schuh auf Kieselsteinen“ identifiziert. Der menschliche Sinn für die Korrektheit einer bestimmten Identifikation steigt, je mehr Varianten des Klangs eines Objektes wahrgenommen werden. Jede neue Variante hilft der Wahrnehmung, ein zugrundeliegendes Modell der Gesetzmäßigkeiten des Klangentstehungsprozesses zu enthüllen.¹⁶ Der Wahrnehmende analysiert und zerlegt die sensorischen Reize so, dass die tiefere zugrundeliegende Struktur des Klangs erkennbar wird, indem er Regelmäßigkeiten in den Reizen identifiziert.¹⁷

Die Variation eines Samples durch DSP-Effekte verändert jedoch nur ein eindimensional vorhandenes Abbild eines Klangs. Diese Art von Manipulation kann jedoch das Erkennen des zugrundeliegenden Modells erschweren, oder es sogar in der Wahrnehmung trüben und verwaschen. Farnell führt hierzu einen Vergleich mit Gesichtererkennung an: Je mehr Gesichter wir sehen, desto besser können wir lernen, welchem System das betrachtete Muster folgt. Eine Reihe von verzerrten und im Farbspektrum variierten Versionen desselben Portraits würde der Erkennung des Musters eher entgegenwirken.¹⁸

Auf den Hörsinn übertragen, lässt sich dies mit dem Klangereignis einer vom Tisch fallenden Plastikflasche veranschaulichen. Allein dieser simple Vorgang kann in Abhängigkeit von Parametern wie Fallhöhe, Auftreffwinkel, dem Material des Untergrunds sowie Füllstand der Flasche unzählige unterschiedliche Variationen des Klangereignisses „Flasche fällt zu Boden“ erzeugen. Hingegen kann eine samplebasierte Vertonung dieses Vorgangs jedoch nur einen winzigen Bruchteil der Varianten des betreffenden Klangereignisses abbilden. Die Wahrnehmung des Ereignisses wird dadurch auf nur wenigen akustischen Perspektiven ermöglicht. Jedes Sample hält durch seine Aufnahme zwangsläufig nur die Parameter fest, die während der Aufnahme gegeben sind und können deswegen bei der Wiedergabe im Spiel meist nur näherungsweise zur dargestellten Spielsituation passen.

Hieraus lassen sich in Bezug auf die Spielevertonung zwei Arten von Realismus ableiten:

1. *Starrer Realismus.*

Sie bildet Klangereignisse jeweils aus lediglich *einer* akustischen Perspektive ab (statische Aufnahme). Diese Eindimensionalität wird anschließend mithilfe von DSP-Effekten verschleiert. Es ist somit von oberflächlichem, ästhetischem Realismus oder Sinneseindrucksrealismus die Rede. Er liefert die richtigen *Sinneseindrücke* eines akustischen Ereignisses.

2. *Dynamischer Realismus.*

Er kann auch als Realismus in der Tiefe, Charakteristik- oder essenzieller Realismus bezeichnet werden. Diese Vorgehensweise liefert die richtige *Wahrnehmung* zum in der Spielsituation

¹⁵ Vgl. Leenders (2014): S. 41

¹⁶ Vgl. Farnell (2011): S. 324 m. w. N.

¹⁷ Vgl. Bregman (1994): S. 34 f.

¹⁸ Vgl. Farnell (2011): S.324

stattfindenden Geschehen. Der Klangerzeugungsprozess folgt Gesetzmäßigkeiten, die sich aus der Physics-Engine und daraus abgeleiteten Syntheseregeln ergeben.

Die Erzeugung dieses essenziellen Realismus ist ein Ziel der prozeduralen Vertonung, die versucht, das Klangverhalten eines Objektes nachzubilden. Die Prinzipien dieses Ansatzes werden in Abschnitt 3 genauer beleuchtet.

2.4 Realismusfrage und Beeinflussung durch Filmsounddesign aus Hollywood

Farnell stellt die vorherrschende Definition von Wirkung, Fülle, Immersion und Realismus im Sounddesign in Frage. Die Bedeutung dieser Begriffe müsse in Bezug auf Struktur und Verhalten des Klangs neu definiert und bewertet werden. Mit der statisch linearen Filmvertonung aus Hollywood entstanden Werte, die auch die Videospiegelvertonung geprägt haben. Im Hinblick auf interaktives Audio gilt es jedoch, diese Werte zu hinterfragen und gegebenenfalls auch zu verwerfen, da sie im nicht linearen und interaktiven Kontext möglicherweise unangemessen sind.¹⁹ Das durch Hollywood geprägte „Larger than life“-Prinzip lässt sich gut anhand des Revolverschussgeräuschs aus Indiana Jones aufzeigen. Da ein echter Revolver aufgenommen vergleichsweise harmlos klingt, wurden stattdessen Aufnahmen einer Schrotflinte verwendet. Infolge solcher Tricks entstand beim Publikum eine Erwartungshaltung bezüglich des Klangs von Handfeuerwaffen, die nicht der Realität, sondern vielmehr einer „Hollywood-Realität“²⁰ entspricht. Natürlich ist gegen eine solche Überzeichnung der Klangwelten zugunsten von Erlebnis und Immersion prinzipiell nichts einzuwenden. Allerdings kann eine komplette Ausrichtung an diesen Werten manchmal auch unpassend für die interaktive Welt von Spielen sein. Stefan Strandberg, Lead Audio Director des insbesondere im Bereich Audio vielfach ausgezeichneten Titels Battlefield 3²¹, erklärt, dass die Klangwelt von Games von den Tonschaffenden in diesem Zusammenhang gerne etwas übertrieben gestaltet wird. Der Vorgänger BF Bad Company 2 war aufgrund solcher Überzeichnungen dadurch nach einiger Spielzeit etwas lärmend. Aufgrund der Tatsache, dass einige Spieler ein solches Spiel mehrere hundert Stunden lang spielen, wurde der Klang von Battlefield 3 „sauberer“, präziser und weniger reißerisch gestaltet. Dies erleichtert dem Spieler die Übersicht über das Spielgeschehen, und die Möglichkeit zur Lokalisation von Schallereignissen wird verbessert. Obwohl es viel von Sounddesignern aus Hollywood zu lernen gibt und sich viele Tonschaffende im Bereich Games am Film orientieren, sollte es nicht das Ziel sein, einen filmischen Sound zu kreieren, insbesondere nicht bei auf Mehrspielermodus ausgelegten Titeln. Nach dem Motto „Games is Games“ (Spiele sind Spiele [...und nicht Filme]) sei es besser, den Sound nicht zu sehr zu ästhetisieren, da die Klangwelt der Natur bereits viele ikonische Sounds zu bieten hat, welche der Spieler kennt und in einer Welt, die nach Immersion strebt, erleben sollte.²² Unter diesem Gesichtspunkt sollte der Anspruch eines Game-Sounddesigns nicht auf ästhetisierten Klängen basieren, die von Überzeichnung und Überbetonung leben.

¹⁹ Vgl. Farnell (2011): S. 334

²⁰ Leenders (2014): S. 38

²¹ IMDb (Internet Movie Database) (2012): Battlefield 3. Awards. [online] <https://www.imdb.com/title/tt1954263/awards> zuletzt abgerufen am 12.02.2020

²² Strandberg (2011): k. S., ebs. Vgl. Maynes (2007): S. 1

2.5 Losgelöstheit der Audio-Engine von den restlichen Systemen

Abgesehen von Klangqualität und -verhalten gibt es eine weitere Dimension der Vertonungsfrage, in der der samplebasierte Ansatz ein Dilemma auslösen kann, das anhand der Kollision zweier Objekte im Spiel verdeutlicht werden kann.

Im Falle einer Kollision zweier Objekte entsteht die Frage, welches der Objekte nun den entsprechenden Klang verursacht. Diese Problematik entsteht allerdings erst durch die Losgelöstheit der Audio-Engine von der Physics-Engine. Für die prozedurale Vertonung einer solchen Objektkollision müssten lediglich die betroffenen Strukturen und deren kinetische Energie als Ausgangspunkte der Berechnung genutzt werden, um ein adäquates Klangbild zu erzeugen.²³

Bei samplebasierter Vertonung ist es zwar möglich, Skripte zu programmieren, die einer Kollision ein entsprechendes Sample zuordnen, diese Lösung spiegelt jedoch meist die Intensität der Kollision nicht passend wider. Für das Zuschlagen einer Tür werden in den meisten Spielen mit samplebasiertem Ansatz mehrere Aufnahmen hinterlegt, die jedoch unabhängig von der Heftigkeit des Aufpralls rein zufällig ausgewählt werden. So wird bei wiederholtem Vorkommen des Ereignisses schnell erkennbar, dass der gehörte Klang nicht wirklich zur Spielsituation passt und die Immersion geht verloren. Ein ähnliches Szenario, das die Immersion zunichtemacht, besteht im „Festhängen“ geloopter Samples, die durch einen Fehler in ihrer Wiedergabe nicht beendet werden und somit in einer unpassenden Situation hörbar sind. Zwar sind solche Fehler durch Vorkehrungen wie eine zeitgesteuerte Abschaltung eindämmbar, jedoch zeigt dies auf, dass die Audio-Engine wie eine zweite, vom Spielgeschehen unabhängige Instanz agiert.

Ein gesampelter Klang kann mit keiner Technik so variiert werden, dass er dem wahren physikalischen Verhalten eines Objektes entspräche. Dies ist in der visuellen Darstellung des Spielgeschehens hingegen der Fall. Sie basiert hauptsächlich auf der Steuerung durch Parameter, die auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten beruhen. Im Gegensatz hierzu ist das Vertonungssystem weitestgehend von der zugrundeliegenden Physik- und Grafik-Engine losgelöst.²⁴ Mit der direkten Beeinflussung eines Klangsynthesystems durch im Spiel vorhandener Parameter stellt das Konzept der prozeduralen Vertonung diese bisher fehlende Verbindung zu einem in sich kohärenten System her.

3. Procedural Audio

3.1 Definition

Procedural Audio (PA) bezeichnet in der Videospielvertonung die Generierung von Klängen in Echtzeit, die tiefgreifend in das restliche Spielsystem integriert ist und auf vorgegebenen Regeln basiert. Diese Techniken ermöglichen ein breiteres Spektrum an Variabilität und können zu einer vielfältigeren, weniger vorhersagbaren Klangkulisse führen als es mit traditioneller linearer Vertonung möglich wäre.²⁵

²³ Vgl. Farnell (2011): S. 330

²⁴ Vgl. Farnell (2010): S. 318 f.

²⁵ Vgl. Weir (2016): 22:50

Für Andy Farnell bedeutet das Konzept von PA das Verständnis von Klang als Prozess. Klang als Code, als System, das nicht einfach abgespielt, sondern in der jeweiligen Situation ausgeführt wird. Die Frage ist nicht, was der Klang *ist* (Identifikation), sondern was er *tut* (Verhalten). Traditionelles Sounddesign versucht einen Klang einzufangen, aufzunehmen und an ein abgebildetes Geschehen zu knüpfen. PA erschafft den Klang basierend auf der Untersuchung und Nachbildung der zugrundeliegenden Prinzipien. „Physical modelling“, Klangsyntheseverfahren, objektbezogenes Wissen und Psychoakustik bilden die PA zugrundeliegenden Prinzipien.²⁶ In der Vertonung von Spielen stellt der einzelne Klang so eher eine Dienstleistung anstelle eines Produkts dar.²⁷

Frühe Spielekonsolen und PC-Systeme nutzten bereits Synthesizerchips, die Soundeffekte und Musik in Echtzeit erzeugten. Jedoch wurden jene durch die Etablierung der realistischer klingenden Sampletechnik verdrängt.²⁸ Die Rückkehr vom statischen Sampling zum prozessbasierten Ansatz entspräche keinem Rückschritt, sondern einer grundlegenden Veränderung, wie über Game-Sounddesign nachgedacht wird. Bild und Ton stehen als audiovisuelles Gesamtmodell in kohärenter Beziehung. Identität des Klangs wird ersetzt durch Erkennung von Verhalten, durch Prozess und insbesondere durch Kausalität und Verbindung zur Umgebung.

3.2 Die Bedeutung des Klangverhaltens

Bei der prozeduralen Vertonung ist es eine zentrale Aufgabe des Sounddesigners, das Klangverhalten der zu vertonenden Objekte zu verstehen und nachzubilden. Dies erfordert zunächst eine Vereinfachung der Prozesse. Es gilt, nicht die Entstehung des Klangs exakt nachzubilden, sondern alle erforderlichen Prinzipien so zusammenzuführen, dass ein erwünschtes Klangverhalten für eine bestimmte Bandbreite von Gebrauchsszenarien erreicht wird. In dieser Hinsicht gibt es Überschneidungen von PA mit traditionellen Sounddesignmethoden, -tricks, -vereinfachungen und auditiven Täuschungen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine „kopierende Synthese“ allein nicht ausreicht: Es wäre zwar möglich ein analysiertes Tonsignal synthetisch zu reproduzieren, allerdings würde das Ergebnis eben nicht das Klangverhalten im Hinblick auf den Klangentstehungsprozess erfassen.²⁹ Ein Beispiel für diese Vorgehensweise wäre die Verwendung des Programms „Synthbot“. Matthew Yee-King und Martin Roth gelang es mit der Entwicklung dieser Software ein Programm zu erstellen, das anhand der MFCCs³⁰ einen vorgegebenen Klang durch Finden der richtigen Syntheseparametereinstellungen synthetisch nachbilden kann. Der Algorithmus erzeugt Imitationen des vorgelegten Klangs und vergleicht dessen spektrale Eigenschaften mit denen des vorgegebenen Klangs und erstellt basierend auf den Ergebnissen iterativ verfeinerte Nachbildungen, bis der Nutzer zufrieden ist.³¹ In Hörvergleichen übertraf das Ergebnis sogar die Leistungen sehr erfahrener Syntheseexperten. Diese gaben an, ein solches Programm gerne bei Verfügbarkeit zu nutzen, was jedoch derzeit nicht möglich ist.³² Im Kontext der prozeduralen Klangsynthese könnte eine solche Herangehensweise leicht zu geeignet klingenden „Inseln“ führen, die einen gewünschten Klang zwar überzeugend nachbilden, aber nicht flexibel wären. Dies liegt darin begründet, dass die Synthese nicht

²⁶ Vgl Farnell (2011): S. 313

²⁷ Vgl. ebd. S. 332

²⁸ Vgl. Weir (2016): 20.05

²⁹ Vgl. Farnell (2011): S. 313

³⁰ *Die Mel-Frequenz-Cepstrum-Koeffizienten (MFCC) sind kurzfristige, spektralbasierte Merkmale eines Klangs, die besonders in Bezug auf Spracherkennung genutzt werden.* (Logan (2000): S. 1)

³¹ Yee-King; Roth (2008): S. 1

³² Yee-King; Roth (2008): S. 3 f.

auf Basis eines physikalischen Modells der Schallquelle beruht, sondern auf der Imitation spektraler Verteilungen im zeitlichen Verlauf. Deshalb kann auf eine strukturierte Analyse und Nachbildung des gewünschten Klangs nach logischen Prozessen nicht verzichtet werden. Als Syntheseassistent würde das Programm jedoch den Zeit- und Arbeitsaufwand in vielen Fällen signifikant senken.

Farnell vergleicht prozeduralen Sound im Hinblick auf das Klangverhalten mit einem Footballmatch. Es umfasst die Essenz von Football – mit Spielern, Regeln, dem Ball und den Zuschauern. Alles geschieht kausal. Der genaue Verlauf und das Endergebnis sind nicht vorhersagbar, jedoch bleibt es immer ein Footballmatch. Natürliche Geräusche funktionieren nach diesem Prinzip. Im gleichen Kontext würden brechende Zweige niemals das exakt gleiche Geräusch erzeugen, jedoch wäre es immer das eindeutige Geräusch eines brechenden Zweigs.³³ Ziel des prozeduralen Synthesystems ist es somit, ein Modell zu entwickeln, das eine ausreichende Breite an Stimulationen bietet (Verhaltensparameter), jedoch eng genug gefasst ist, um einen in der Wahrnehmung definierten Wiedererkennungswert zu gewährleisten. Ein solches System befindet sich dann im sogenannten „Reality Window“.³⁴ Das Klangkonzept einer Dose dient wie folgt zur Veranschaulichung des Klangverhaltens. Ein prozedurales Synthesystem würde mit Parametern verschiedene Anstoßpunkte oder Beeinflussungen wie Stoßen, Rollen oder Zerdrücken steuern. Die Dose sollte bei jeglicher Parameterveränderung immer als solche zu erkennen sein. Die Spektren der so entstehenden Klänge wären zwar je nach Art der Stimulation sehr unterschiedlich, dennoch würden sie von der Wahrnehmung richtig als Dose kategorisiert werden können.

3.3 Vorteile von PA im Vergleich zum samplebasierten Ansatz

Da die Grundprinzipien der prozeduralen Vertonung nun veranschaulicht sind, werden im Folgenden die besonderen Vorteile dieses Ansatzes vorgestellt.

3.3.1 Vielfalt

Sind die Klangsynthesysteme in ihrem Aufbau auf die Steuerung durch verschiedene, in der Spielwelt vorhandene Parameter ausgelegt, ergibt sich aufgrund der mannigfaltigen Kombinationsmöglichkeiten betreffender Parametereinstellungen eine Vielfalt, die weit über die eines Samplesystems hinausreicht. Dies ermöglicht eine deutlich tiefergehende Immersion in das Spielgeschehen, da die Klänge je nach Potenzial des Synthesystems sehr vielschichtige Ereignisse nachbilden können. Im Fall der Dose kann der Spieler die Bewegung und Beschaffenheit eines Objektes fortlaufend beeinflussen und dabei adäquates Audio-Feedback erhalten.³⁵

Wird der exakt selbe Klang mehrmals hintereinander wahrgenommen, klingt dies unnatürlich, insbesondere innerhalb kurzer Zeitintervalle, oder gar im Bereich des Echogedächtnisses.³⁶ Dieses Phänomen wird auch als „Machine-Gun-Effekt“ bezeichnet.³⁷ Farnell kritisiert in diesem Zusammenhang, dass eine ganze Generation mit dieser Erfahrung aufwuchs und diese Empfindungen gewohnt ist. Selbst mit der besten Aufnahmetechnik unter höchster Klangqualität des Samples tritt dieser Effekt auf.³⁸ Zerstört dies nicht den eigentlich erwünschten Realismus? Es gilt zu hinterfragen,

³³ Vgl. Farnell (2011): S. 323

³⁴ Vgl. ebd. S. 323

³⁵ Vgl. Farnell (2011): S. 322

³⁶ siehe Abschnitt 6

³⁷ Vgl. Pejrolo; DeRosa (2007): S. 140

³⁸ Vgl. Farnell (2011): S. 323

ob maximale Klangqualität wirklich wichtiger ist als Immersion durch korrektes Klangverhalten. Um das „Machine-Gun-Effect“-Problem zu umgehen, werden in der Standardspieleversion mehrere Aufnahmen eines Klangereignisses angefertigt, die zusätzlich zur Manipulation mit DSP-Effekten dann in zufälliger Reihenfolge abgespielt werden. Dies kann sehr aufwändig sein und verhindert eine Wiedererkennbarkeit der Samples nur dann wirklich, wenn viele Versionen verwendet werden, was zwangsläufig zu mehr Speicherplatzbedarf und höheren Ladezeiten führt. Mit einem prozeduralen System, das in den einzelnen Prozessschritten so aufgebaut ist, dass der Gesamtklang niemals exakt gleich ist, kann es von vornherein nicht zu besagtem Problem kommen. Für Stinger, also einmalig auftretende Klänge, mag dies keinen Unterschied machen. Für repetitive Sounds, wie Schüsse oder Schritte, kann PA jedoch ein besseres Ergebnis liefern.

3.3.2 Flexibilität und Pragmatik

In diesem Sinne kann auch die Kombination von prozedural erzeugtem Inhalt und Samples den nächsten Schritt in der zukünftigen Spieleversion bedeuten. Weir zeigt auf, dass Audio den Fortschritten der Generierung sonstiger Inhalte hinterherhinkt. Mit PA erstellte Inhalte können einfach skaliert werden. Die Einbeziehung synthetisierter Inhalte in händisch erstellte kann flexibel und einfach erfolgen. Es ist die Idee, durch Kombination beider Varianten die jeweiligen Vorteile zu verbinden.³⁹ Ist ein Klangsynthesystem erstellt, können mit wenig bis keiner zusätzlichen Rechenlast weitere mögliche Klänge erzeugt werden. Dieser Gesichtspunkt wird unter anderem mit der Dokumentation des Designprozesses in Abschnitt 7 und 9 aufgezeigt.⁴⁰ Die Synthesysteme der prozedural erzeugten Klänge sind zudem im Gegensatz zu Samples nicht in Stein gemeißelt und können flexibel zu jedem Zeitpunkt des Produktionsprozesses verändert werden.

3.3.3 Ressourcenschonung

Ein technischer Vorteil dieses Ansatzes liegt im geringen Speicherplatzbedarf. Dies ist besonders für mobile Spiele relevant, da die Mehrheit der Videospiele das Smartphone als Plattform nutzt.⁴¹ Bei einer geringen Anzahl von vertonungsbedürftigen Objekten ist eine samplebasierte Spieleversion zwar deutlich schneller durchführbar, jedoch bewegt sich der Trend aktueller Spieletitel rasch in Richtung gewaltiger Mengen individuell soundbedürftiger Objekte. Im Hinblick darauf scheint ein prozeduraler Ansatz zum Sounddesign ohne Sampledateien wichtiger als je zuvor.⁴² Ein prozedural ausgerichtetes System bietet für besonders umfangreiche Spiele Chancen effizienterer Vertonung – beispielsweise ein für gleichartige Objekte standardisiertes Klangerzeugungssystem, das mithilfe von Daten wie Material, Größe, Gewicht und Textur automatisch ein Klanggrundgerüst erstellt. So könnte der Sounddesigner sich im Anschluss auf jene Klangobjekte und Situationen konzentrieren, die besonders wichtig für ein immersives Spielerlebnis sind.⁴³ Zudem würde mit dem eingesparten Speicherplatz wie bereits erwähnt auch eine Reduktion der Ladezeiten einhergehen.

³⁹ Vgl. Weir (2016): 13:22; 14:15

⁴⁰ Vgl. Farnell (2011): S.330

⁴¹ Vgl. Stevens, Raybould (2015): S. 60

⁴² Vgl. Stevens, Raybould (2015): S. 60

⁴³ Vgl. Farnell (2010): S. 321

3.3.4 Spieleprogrammierung

Paul Weir sieht in der Entwicklung Richtung systemgesteuerter Ansätze viele Chancen für die Spielevertonung. Dieses Konzept verfolgte er mit den Audiosystemen für „No Man’s Sky“. Den systemisch strukturierten Zuständen (*States*) der Spielsituation sind durch Weir festgelegte Regeln abgeleitet, die von den einzelnen Klangsystemen befolgt werden. Er erklärt, dass bei der Verknüpfung der Spielsysteme mit der Audio-Engine von „No Man’s Sky“ nur wenige Audio-Events nötig waren, da die Audio-Engine darauf ausgelegt ist, die tiefschichtig angelegten States durch Parameterveränderungen der Klangsysteme widerzuspiegeln. So bedarf es im Vergleich zur samplebasierten Methode nur weniger direkter Eventverknüpfungen. Ein Event wäre in diesem Fall so allgemein gefasst wie „spiele Atmo ab“, das anschließend eine umfangreiche Anpassung von Parametern entsprechend der aktuellen Spielumgebung bewirkt.⁴⁴ Die Einteilung in States ist auch für andere generative Systeme vorteilhaft. Je besser ein Spiel auf States ausgerichtet ist, desto besser lassen sich auch andere solchermaßen steuerbare Systeme bauen. Die Einbindung von Samples wird durch eine State-fokussierte Strukturierung keineswegs erschwert. Es lohnt sich also, in diese Richtung zu gehen, auch wenn eine prozedurale Vertonung noch nicht den Hauptpfeiler des Sounddesigns ausmachen soll. Wird dieser Weg eingeschlagen, wird die Einbindung von PA-Elementen auch effizienter und attraktiver.

3.3.5 Mixing

Ein weiterer Vorteil des Procedural Audio betrifft einen Aspekt des Mixings. Durch eine Stufung der Synthesysteme auf ein variables Detaillierungslevel kann je nach Bedeutungsgrad des Klangobjekts in der jeweiligen Situation eine entsprechende Detailstufe („level of audio detail“, kurz: LOAD; nicht zu verwechseln mit Rechenlast) erzeugt werden. So kann ein in den Hintergrund wandernder Klang allmählich auf sein psychoakustisches Grundgerüst reduziert werden, anstatt einfach nur mit einem Filter gedämpft oder in der Lautstärke reduziert zu werden.⁴⁵ Dies hätte nicht nur Vorteile für ein dynamisches Mixing, sondern auch im Hinblick auf die erforderliche Rechenleistung des Prozessors.⁴⁶

3.4 Vorgehen bei prozeduralem Sounddesign

Ziel ist es, ein Design zu erstellen, das die kennzeichnenden Merkmale und Verhaltensweisen des betreffenden Klangs simuliert. Dieser Designprozess kann in drei Teile aufgegliedert werden: *Modell*, *Methode* und *Implementierung*. Diese sind im Idealfall unabhängig voneinander veränderbar und austauschbar. Diese modulare Entwurfspraxis empfiehlt sich, da so einzelne Schichten verändert oder ausgetauscht werden können, ohne die Funktion der anderen zu beeinträchtigen. Bspw. kann ein vollständig klingendes Klangobjekt nachfolgend in der Syntheseform oder der Reihenfolge von Manipulationsprozessen variiert werden. So kann ein entwickeltes Modell einfach kopiert und in einer anderen DSP-Implementierung leicht verändert eingesetzt werden. Dieser dreistufige Prozess wird ab Abschnitt 12 anhand eines Demonstrationsprojekts durchgeführt.

⁴⁴ Vgl. Weir (2016): 8:05

⁴⁵ Vgl. ebd. S. 322

⁴⁶ Vgl. Farnell (2011): S. 318; 332

3.4.1 Modell

Das Modell ist eine abstrahierte Form des erwünschten Klangverhaltens. Physikalische Vorgänge stellen eine Repräsentation der Realität dar, mit deren Hilfe die Schallsignale von Objekten beschrieben werden können. In vielen Fällen bietet sich deshalb eine physikalische Modellierung des Klangerzeugungsprozesses an. Es ist möglich bspw. ein Instrument mathematisch zu beschreiben und es so mit all seinen Klangverhaltensweisen zu rekreieren.⁴⁷

Farnell erklärt dies am Beispiel fließenden Wassers: Der Aufbau des Klangs ist reduzierbar auf sich überlappende frequenzmodulierte Sinuswellen, die durch Helmholtzoszillatoren in Form von austretenden Lufthohlräumen angeregt werden. Ohne zu hinterfragen, warum das Wasser ein Muster von in ihrer Frequenz ansteigenden Sinuswellen erzeugt, könnte auch eine vereinfachte Klangnachbildung erstellt werden. Durch Bestimmen der durchschnittlichen Tonhöhe der Wellen, ihrer Dauer und Häufigkeit könnte ein verhältnismäßig umfassendes Klangmodell generiert werden. Dieses würde auch den erwünschten Frequenzschwerpunkt im Spektrum aufweisen. Ein entsprechendes Modell wäre jedoch unflexibel und schon bei geringer Veränderung von Einflussgrößen wie Fließgeschwindigkeit oder Volumen der Lufthohlräume und der Wassertiefe nicht mehr passend.

Was ein prozedurales Modell im Idealfall aufweisen muss:

- Eine Oberfläche zur Abbildung und Steuerung von Parametern
- Kleinstmögliche Anzahl nützlicher Kontrollwerte, welche die Werte der Einflussgrößen aus dem zu simulierenden Szenario widerspiegeln und die Veränderung entsprechend auf das System übertragen. Je effektiver dies erfolgt, desto besser spiegelt das Modell die Natur des nachgebildeten Klangobjekts wider.
- Die Einflussgrößen bzw. Parameter sind zum Teil Konstanten, wie beispielsweise die Höhe eines Wasserfalls, sich fließend verändernde Variablen wie Flussgeschwindigkeit oder ordinale Größen wie Texturmerkmale eines Materials.⁴⁸
- Ziel des Modellentwurfs ist keine genaue physikalische Nachbildung, sondern ein am Grundkonzept der Vorgänge orientiertes Modell.⁴⁹

Im Erschaffen eines Systems, das sich diesen Parameterveränderungen immer realitätsabbildend anpasst, liegt die größte Herausforderung des prozeduralen Sounddesigns. Bezogen auf die Videospielvertonung sind die Parameter des Klangsynthesystems im Idealfall gleichzeitig die Parameter, die das Klangobjekt auch auf der physischen bzw. grafischen Ebene des Programms steuern. Dies geht gleichzeitig mit einer geringeren Anzahl nötiger Rechenprozesse einher.

3.4.2 Methode

Nach der Erstellung eines Modells werden geeignete Methoden ausgearbeitet, die beschreiben, wie das abstrakte Modell in eine DSP-Plattform implementiert werden kann. Die Methoden leiten sich von verfügbaren Signalerzeugungstechniken ab, die spezifisches Spektral- oder zeitabhängiges Klangverhalten bieten. Dazu zählen beispielsweise Syntheseformen wie additiv, subtraktiv, frequenzmodulierend, granular, generativ oder die Wavetablesynthese. Hierbei handelt es sich

⁴⁷ Vgl. Weir (2016): 17:15; Farnell(2011): S. 317

⁴⁸ Vgl. Farnell (2011): S. 317

⁴⁹ Vgl. Weir (2016): S. 24:14

letztendlich um mathematisch formulierte, zeitabhängige Funktionen aus denen Audiosignale gewonnen werden.

3.4.3 Implementierung

Im letzten Schritt, der Implementierung, werden die Methoden bei der Erzeugung des Klangs mithilfe von Software wie Pure Data oder Max/MSP angewandt. Ein prozedural erzeugtes Klangobjekt fängt ein Merkmal einer echten Geräuschquelle dann gut ein, wenn ein oder mehrere Parameter des Systems entsprechend echten physikalischen Variablen zugeschrieben werden können.⁵⁰ Die Implementierung erfolgt immer individuell in der gewünschten Detailstufe, welche selbstverständlich – wie im traditionellen Sounddesign – in gewissem Maße von der technischen Kompetenz des Sounddesigners abhängt. Dieser Schritt wird in Abschnitt 14 ausführlich anhand eines Demonstrationsprojekts veranschaulicht.

3.5 Einschränkungen von PA

Selbstverständlich bringt eine prozedurale Vertonung auch Nachteile mit sich, da auch dieser Ansatz Einschränkungen unterliegt, die im Folgenden besprochen werden.

Seltenheit

Der zum Verfassungszeitpunkt dieser Arbeit offensichtlichste Nachteil von PA ist die Seltenheit des Verfahrens. Es gibt nicht viele Plattformen, die diese Vorgehensweise unterstützen. PA zählt somit (zumindest derzeit) nicht zu den Standardwerkzeugen eines Sounddesigners.⁵¹

Höhere CPU-Belastung

Die enorme Speicherplatzeinsparung durch Echtzeitsynthese erfordert Opportunitätskosten im Bereich der CPU-Leistung, da die für die Audiobereitstellung benötigten Prozesse konstanter Prozessorleistung bedürfen.⁵² Bei Bedarf kann diese jedoch durch geringere Komplexität der Synthesysteme reduziert werden.

Mangelnde Verfügbarkeit von Information und Werkzeugen

Informationen zur Durchführung des Ansatzes sind knapp. Andy Farnells Buch „Designing Sound“ (2010) ist das einzige Werk, das den prozeduralen Designprozess anhand praktischer Anwendungen erklärt.⁵³ Abgesehen von Programmen wie Pure Data oder Max/MSP ermöglichen populäre DAWs nur Sounddesign, das auf einer Zeitachse basiert und daher nicht für die Gestaltung non-linearer Klangverhaltensweisen ausgelegt ist.⁵⁴ Hinzu kommt, dass die Einbindung prozeduraler Systeme nur unzureichend von den meisten Spiele-Engines unterstützt wird. Eine Ausnahme stellt hier unter anderem die von Rockstar Games entwickelte Audio-Engine RAGE dar, die für den Bestseller-Titel GTA V prozedurale Synthese von Hintergrundgeräuschen einsetzt.⁵⁵ Auch die Unreal-Engine hat seit 2017 eine Synthesefunktion integriert, die jedoch noch nicht für umfangreiche prozedurale Vertonung geeignet ist.⁵⁶

⁵⁰ Vgl. Farnell (2011): S. 325

⁵¹ Vgl. Roth (2014): k. S.

⁵² Vgl. Weir (2016): 17:15

⁵³ Vgl. Weir (2016): 43:56

⁵⁴ Vgl. Roth (2014): k. S.

⁵⁵ Vgl. Roth (2014): k. S.

⁵⁶ Vgl. Reynolds (2019): k. S.

Falsche Erwartungen

Das Versprechen mit „No Man’s Sky“ schier unendlich viele, allesamt faszinierende Welten zu entdecken, war für viele Spieler besonders reizvoll. Entsprechend hohe Erwartungen an die Diversität der Flora und Fauna der Planeten wurden durch Werbe-Screenshots von besonders schönen und interessanten Beispielen verstärkt. Sie waren sicherlich bewusst so gewählt, dass sie das Beste zeigten, was mit prozeduraler Generierung möglich ist und für die Spieler erfahrbar werden sollte. Folglich hielt das tatsächliche Spielerlebnis im Vergleich zu den übertriebenen Erwartungen der Spieler weniger Diversität und Überraschung bereit. Dementsprechend schneller ließ die Entdeckungslust der Nutzer nach.⁵⁷

Abhängigkeit vom Physiksystem

Ein prozedurales Klangsystem kann in der Abbildung von Klangereignissen nur so weit reichen, wie das Physiksystem, an das es gekoppelt ist. Ein gutes Beispiel hierfür stellen zerbrechende Objekte wie Blumentöpfe oder andere „Dekorationen“ dar. Grafisch ist zwar gut zu sehen, wie das Objekt in einzelne Teile zerfällt, jedoch gibt es diese Bruchstücke nicht wirklich als umweltbeeinflussende Objekte in der Spielwelt. Es handelt sich lediglich um eine Animation, die durch ein Event, wie z. B. eine Kollision mit Schwertern oder Projektilen, aktiviert wird. Um einen solchen Vorgang prozedural vertonen zu können, muss die Physik des Spiels genauso tiefgehend programmiert werden wie das gewünschte Klangverhalten reichen soll.

Filmsequenzen

Ein weiteres Problem stellt in diesem Zusammenhang die Vertonung von Filmsequenzen dar. Sind diese rein visuell, ohne tatsächliche Spielweltprogrammierung ausgeführt, gibt es für die prozeduralen Systeme keine aktiven Ansteuerungsparameter und Signale. Der Sounddesigner müsste in solchen Fällen die Klangsysteme manuell auf passende Einstellungen bringen und diese als Samples exportieren, da eine rein samplebasierte Vertonung der Filmszene die sonst im Spiel etablierte Klangcharakteristik in ihrer Konsistenz durchkreuzen würde.

Detailstufe und Fehlidentifikationen

Praktisch gesehen ist ein prozedurales System für einige komplexe Klänge nicht so detailreich wie es eine Aufnahme sein kann. Beim Nachbilden eines gewünschten Klangs kann durch bestimmte, zweideutige Klangbeschaffenheiten schnell eine falsche Identifikation des Klangs erfolgen. Dies lässt sich mit der Gestalttheorie nach Max Wertheimer erklären. Im Sinne dieser Theorie werden Reize von der Wahrnehmung in bestimmte Kategorien eingeteilt. Die Klangfarbe, der Zeitverlauf sowie Tonhöhe, Textur und Lautstärke sind innerhalb einer Kategorie variabel. Die Gestalt ist mehr als die Summe ihrer Einzelteile, da im Prozess der Wahrnehmung mit der Gestalt etwas entsteht, das nicht in den Teilen enthalten ist.⁵⁸ Um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, müssen die prozedural erzeugten Klänge in ihrer Gestalt richtig wahrgenommen und kategorisiert werden können. Die Gestaltfaktoren sind die Prinzipien, nach denen unsere Wahrnehmung Sinnesreize unendlich vieler Variationen gruppiert und als Objektkategorie in Raum und Zeit interpretiert. Sie sind nicht in den Signalen zu finden, sondern verkörpern das gemeinsame Konzept. Die in Bezug auf die prozedurale Vertonung in dieser Arbeit besonders wichtigen Gestaltfaktoren sind:

⁵⁷ Heaven (2016): k. S.

⁵⁸ Vgl. Görne (2017): S. 93

- **Prägnanz:** Die Wahrnehmungshypothese mit der ein oder mehrere Sinnesreize am einfachsten und sinnhaftesten gedeutet werden.
- **Ähnlichkeit der spektralen Struktur:** Klangfarbe, Tonhöhe
- **Ähnliche zeitliche Struktur:** Zeitliche Abfolge der Klangelemente
- **Zeitliche Nähe:** Synchronität, bzw. Zuordnung des Klangs zum wahrgenommenen Auslöser⁵⁹

In der Tongestaltung kommen mehrdeutige Gestalten häufig vor. Was für Foleyarbeit nützlich ist, kann bei der prozeduralen Vertonung aber auch nachteilig sein. Es ist wichtig, dass in der hier vertonten Spielsituation ein Dauerfeuer nicht als Helikopter wahrgenommen wird. Sobald ein Klang als ein bestimmtes Objekt erkannt wurde, bleibt der Eindruck der ersten Identifikation bestehen und wird „Realität“. Es gibt in diesem Sinne aus der Perspektive des Wahrnehmenden nur *eine* „korrekte“ Wahrnehmung, bis der Vergleich mit anderen Sinnesreizen, z. B. durch Sichtbarwerden des Klangerzeugers, diese als falsch erkannt wird.⁶⁰ Das Phänomen kann als fehlerhafte Identifikation der Klangursache betrachtet werden. Hierbei liegt die Ursache der Identifikation in einer falschen Mustererkennung entweder durch ähnliches Klangspektrum oder teilweise gleiches Klangverhalten. Wahrgenommene Regentropfen am Fenster können tatsächlich die Blätter eines Astes sein, der durch Wind an der Wand reibt.⁶¹ Allerdings bringt dies auch nützliche Effekte mit sich. Ein prozedurales Synthesystem für Jet-Düsen kann mit wenig Modifikation den Klang unterschiedlicher Motorenklänge oder Ladesignale synthetisieren.⁶² Im Sinne einer gewünschten Identifikation können ein erklärender Kontext durch die bildliche Darstellung und Atmo-Geräusche hilfreich sein sowie andere Klangbestandteile, die zusammen mit der mehrdeutigen Gestalt eindeutig kategorisiert werden können. Selbstverständlich besteht diese Gefahr nicht prinzipiell, wie die spätere Untersuchung zeigt, sondern sollte lediglich beachtet werden.

4. Auswahl des Testkonzepts für das Demonstrationslevel

4.1 Kriterien für die Spielsituation

Um die Praktikabilität der prozeduralen Vertonung zu untersuchen und die oben genannten Vor- und Nachteile zu prüfen, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Demonstrationslevel erstellt, dessen Klangwelt für eine solche Untersuchung geeignet ist.

Die Spielsituation für das Demonstrationslevel sollte zu vertonende Elemente enthalten, die ein gut beobachtbares Klangverhalten aufweisen, das in Abhängigkeit von definierbaren Zuständen Veränderungen unterliegt. Diese Veränderungen sollten auf wechselnde Parameterwerte zurückgeführt werden können, um entsprechende Regeln zu erstellen, die die Klangsysteme steuern. Am besten gelingt dies, wenn die nachzubildende Klangerzeugung auf physikalische Vorgänge untersuchbar ist, und diese gut vereinfacht werden können, was eine strukturierte Klangsynthese ermöglicht.

⁵⁹ Vgl. ebd S. 94

⁶⁰ Vgl. Vicario (2003): S. 24

⁶¹ Vgl. Vicario (2003): S. 23. f.

⁶² Vgl. Farnell (2011): S. 313

Die erstellten Klänge sollten sich außerdem häufig wiederholen, bzw. durchgängig zu hören und in einzelne Klangelemente aufteilbar sein, die eine Reduktion des Gesamtklangs auf ein psychoakustisches Grundgerüst ermöglichen.

Nicht zuletzt ist auch die Durchführbarkeit der Levelprogrammierung in Unity von Bedeutung.

4.2 Geeignete Testkonzepte

- **Fahrzeugmotor:** Prozedurale Synthese des Motorengeräuschs des fliegenden „Hovercar“ aus der aktuellen Unity-Demo „Megacity“. Hier manövriert der Spieler ein fliegendes Auto durch eine Großstadt im Stil des Cyberpunk. Besonders interessant wären hierbei die Konzeption eines „unbekannten“ Antriebsklangs in Abhängigkeit von Beschleunigung, Geschwindigkeit und insbesondere der sich ständig ändernden Position zur Kamera der dritten Person.
- **Schusswaffen:** Verschiedenartige Schusswaffen, die allesamt mit einem einzigen Klangsynthesensystem vertont werden, das nur durch Änderungen einzelner Parameter den Klang eines anderen Modells nachbildet.
- **Regen, Wind, Wasser:** Bspw. In Tropfengröße und Stärke variierender Regen, der auf verschiedene Oberflächen trifft.
- **Kräfteeinwirkung auf ein Objekt:** Ein einzelnes Objekt unterliegt verschiedensten Anregungen und Beeinflussungen physikalischer Kräfte, bspw. eine Plastikflasche, die als Helmholzresonator fungiert, zerdrückt wird oder mit verschiedenen Geschwindigkeiten mit anderen Objekten kollidiert.

4.3 Eignung des Testkonzepts Schusswaffen und resultierendes

Spielsetting

Auch wenn alle der vorgestellten Konzepte einzigartige Aspekte des prozeduralen Sounddesigns erforschbar machen würden, so scheint ein Szenario mit Schusswaffen für diese Arbeit am geeignetsten.

Schusswaffen liefern ein gut bestimmbares und beständiges Klangverhalten. Das Geräusch der durch den Schuss vibrierenden Waffenbauteile hat einen ähnlichen Charakter wie idiophone Klangkörper, die eine sofortige und konsistente Reaktion auf Stimuli liefern.⁶³ Die hierbei zu erwartenden Reaktionen des Klangverhaltens sind gut vorhersagbar. Daher eignen sich Schusswaffen für eine Analyse, die auf verschiedensten Schuss-Samples basiert, welche leicht und in großer Anzahl verfügbar sind. Auch die Komplexität der zu erzeugenden Klänge bewegt sich in einem Rahmen, der den Umfang dieser Arbeit nicht übersteigt. Sie sind vergleichsweise gut synthetisierbar, da Klänge von einzelnen mechanischen Objekten gut auf ihre zugrundeliegende Physik untersuchbar sind. So können die Klangentstehungsprozesse zum einen durch „reverse engineering“⁶⁴ der physikalischen Vorgänge nachgebildet werden und zum anderen auch durch die Analyse und kreative Imitation der Samples. Dies geschieht in Bezug auf die angeregten Bauteile sowie den Detonationsimpuls der Patronenladung und den Klang der Patronenhülsen. Entwickelte Waffenklänge können gut alleinstehend beurteilt werden, da sie kaum anderer Elemente in der Spielwelt bedürfen um zu funktionieren. Darüber hinaus

⁶³ Vgl. Farnell (2011): S. 313

⁶⁴ Reverse Engineering bezeichnet die Umkehrung des Entwicklungs- bzw. Produktionsprozesses vom Produkt hin zur Konstruktionszeichnung bzw. zum Quellcode. (Angermeier (2017): k. S.)

stellen Schusswaffen in vielen Spieletiteln ein wichtiges Element dar, das stark im Fokus des Spielgeschehens und somit der Aufmerksamkeit steht. Die Implementierung der Klänge in ein Demonstrationslevel kann mit viel Fokus auf Audio erfolgen, da die Erstellung einer solchen Spielsituation nicht zu aufwändig ist. Bereits Basiswissen über die Programmiersprache C# und Unity ist ausreichend, um ein funktionierendes Level zu erschaffen. Da Schussgeräusche sehr häufig wiederholt werden müssen, bietet sich eine prozedurale Vertonung, die ein bestimmtes Klangverhalten widerspiegeln kann, besonders an, da minimale Veränderungen in den Syntheseprozess eingebaut werden können. So wird derselbe Klang kein zweites Mal erzeugt.

Im Hinblick auf die Untersuchung der Praktikabilität ist es auch besonders sinnvoll, stets im Vordergrund stehende Klangelemente prozedural zu vertonen. Im Bestseller-Titel GTA V werden zwar Hintergrundgeräusche wie Ventilatoren oder Fahrräder prozedural erzeugt, jedoch gibt es kaum Umsetzungen für derart im Fokus des Spielers stehende „reale“ und „nicht musikalische“ Klänge wie die der benutzten Waffen.⁶⁵ Mit diesem Testszenario kann daher besser bewertet werden, ob und wie sich die synthetischen Klänge im Zentrum der Spielerwahrnehmung behaupten können.

Wesentlich für eine Eignung zur prozeduralen Vertonung ist auch die Steuerbarkeit durch Parameter. In dieser Hinsicht bietet sich eine Aufteilung des vorgestellten Konzepts in real existierende und fiktive Waffentypen an. Der genaue Aufbau und Fokus dieser beiden Teilprojekte wird im Folgenden konkret festgelegt.

4.3.1 Reale Waffen

Erster Teil der praktischen Untersuchung ist die Entwicklung eines einzelnen Klangsynthesystems, das verschiedene Typen von realen Schusswaffen vertont, die sich in Aufbau, Kalibergröße und Größe der Bauteile unterscheiden. Der Fokus liegt hier auf der Nachbildung von in der Realität vorkommenden, echten Klängen. Ziel ist es, zu untersuchen und zu zeigen, wie flexibel ein prozedurales Synthesesystem sein kann, wenn alle Syntheseelemente darauf ausgelegt sind, durch Parameter gesteuert zu werden. Außerdem können die einzelnen Elemente nach dem Prinzip des Variablen „Level-of-audio-detail“ gut auf das psychoakustische Grundgerüst reduziert werden. Für die Ermittlung des Klangverhaltens wird sowohl mit physikalischer Herleitung als auch mit ausgiebiger Sampleanalyse gearbeitet.

4.3.2 Fiktive „Vultgun“

Im zweiten Teil der praktischen Untersuchung wird eine fiktive Schusswaffe vertont, die so konzipiert ist, dass sie möglichst viele Klangelemente aufweist, die es in dieser Kombination so in der Realität nicht gibt und die allesamt von ein und demselben Parameter gesteuert werden. Für ein PA-Demomodell ist vor allem geeignet, was gut zu parametrisieren ist und kein Vorbild in der Realität hat. Fiktive Klangobjekte unterliegen nicht den Realismusmaßstäben von existenten Objekten, insbesondere nicht derer, welche jedem Rezipienten aus dem Alltag bekannt sind. Zwar gibt es für Laserkanonen und Raumschiffe auch bestimmte Erwartungen, die durch Sounddesigninnovationen aus Filmen und Spielen entstanden sind, was jedoch auch im visuellen Bereich gilt. Ein Beispiel hierfür wäre das klischeehaft explodierende Auto, das in keinem Actionfilm fehlen darf. Es geht in diesem Kontext nicht um Realismus, sondern um Gefallen und Interessantheit. Fehlt der Anspruch an eine

⁶⁵ Vgl. Roth (2014): k. S.

korrekte Nachbildung realer Klänge, rückt die größte Schwäche des prozeduralen Sounddesigns in den Hintergrund. Auf diese Weise kann eine Bewertung ohne Vergleich mit Aufnahmen erfolgen. Der genaue Aufbau und die Funktionsweise dieses fiktiven Geräts wird in Abschnitt 8 erläutert.

4.3.3 Aufbau der Spielsituation

Der Spieler befindet sich auf einer texturlosen Ebene ohne Hall oder sonstige Geräusche und feuert die verschiedenen Waffentypen ab. Übergeordnete Parameter für das Synthesystem sind bauteilspezifische Faktoren wie Lauflänge, Größe, Kaliber und situationsbedingte Faktoren wie Distanz zum Hörer und Projektilgeschwindigkeit. Das System der Voltgun steuert den Klang aller Elemente allein auf Basis des Ladungszustands.

Die Programmierung des Demolevels in der Spiele-Engine Unity erfolgte mit Hilfe von Dritten und ist daher nicht als Eigenleistung zu betrachten. Es hat rein demonstrative Funktion und soll als visuelle Ergänzung zu den geschaffenen Klangsystemen gesehen werden.

5. Ermittlung des Klangverhaltens & Analyse von Beispielen

Wie bereits erwähnt ist es für eine prozedurale Vertonung wichtig, das Klangverhalten zu bestimmen um es abstrahiert nachbilden zu können. Eine angemessene Analyse legt Verhaltensmerkmale offen und ermöglicht deren Abstrahierung aus Beispielsignalen. Neben der Analyse der physischen Komponenten können Verhaltensweisen umso genauer bestimmt und abstrahiert werden, je mehr Beispiele analysiert werden.⁶⁶

Erkenntnisse für reale Waffen

Insgesamt wurden 26 Samples echter und designer Waffen analysiert. Hier ist wichtig anzumerken, dass die Begriffe „reale Waffen“ und „echte Waffen“ differenziert verwendet werden. „Echt“ bezieht sich auf Aufnahmen von tatsächlich aufgenommenen und nicht durch Sounddesign veränderten Schussgeräuschen. „Real“ bedeutet, dass es diese Objekte tatsächlich gibt, die analysierten Samples jedoch speziell für eine Spielwelt designt wurden. Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, stellt das Klangbild der Samples aus Battlefield 3 ein ideales Vorbild dar. Deshalb werden im Folgenden vor allem Analyseergebnisse dieser Samples mit Abbildungen vorgestellt.

Bei der Durchführung kamen technische Methoden wie Spektralanalyse sowie ein intensives Analysieren der Klänge durch Zuhören in Originalform, in Teilen und bei starker Verlangsamung zum Einsatz. Da sich insbesondere das Klangverhalten der designer Klänge bei Dauerfeuer signifikant ändert, werden die Ergebnisse in die Kategorien Einzelschuss und Dauerfeuer unterteilt.

Einzelschuss:

Die Aufnahmen der echten Waffen weisen im Bereich der tiefen Mitten und dem Bass allesamt einen Peak zwischen 150 Hz und 300 Hz auf. Unterhalb davon bestimmt ein Abfall der Amplitude den Bassbereich (siehe Abb. 1). Interessanterweise ist die Energie im Bereich von 150 Hz bis 300 Hz bei den Spielewaffen am niedrigsten. Der tieffrequente Anteil ist nach unten verlagert. Im Durchschnitt liegt der dominante Bassanteil zwischen 60 Hz und 180 Hz. Insgesamt ist der Frequenzgang der designer Waffen deutlich ebener, was für den Hörenden meist angenehmer klingt.

⁶⁶ Vgl. Farnell (2011): S. 313

Auffällig ist auch, dass der Frequenzbereich designer Waffen im Schnitt bis circa 18 kHz konstant hohe Signalamplituden aufweist. Die Aufnahmen echter Waffen fallen im Schnitt schon ab 15 kHz ab, was auch daran liegen könnte, dass die Mikrofonierung nicht so nah erfolgte wie es bei den hochfrequenten Mechanikanteilen für die Spielwaffen sicherlich der Fall war.

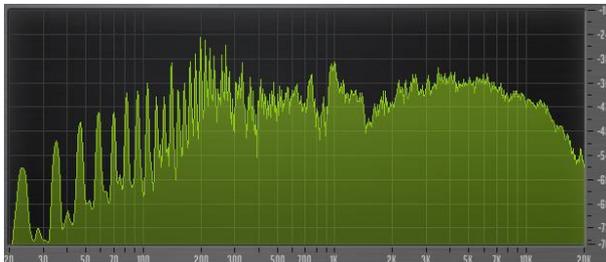


Abb. 1: Spektralverteilung echte AK47

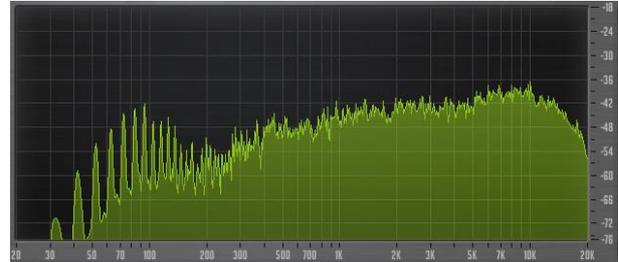


Abb. 2: Spektralverteilung AK47 aus Battlefield 3

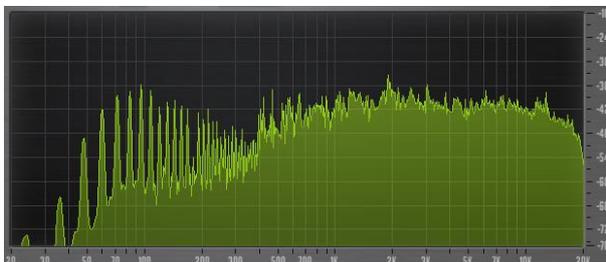


Abb. 3: Spektralverteilung G36C aus Battlefield 3



Abb. 4: Spektralverteilung M4 aus Battlefield 3

Die Waffenmechaniken wie Abzug, Nachlademechanik und der Hülsenklang sind bei den Spielwaffen extrem gut zu hören. Insbesondere bei schallgedämpften Waffen, die kaum tieffrequenten Impulsanteil und nur selten rauschähnliche Anteile aufweisen. Im Film- und Game-Sounddesign gibt es zwei Varianten, wie der Klang einer schallgedämpften Waffe klingen kann. Entweder ist der Detonationsimpuls vor allem im Bassbereich deutlich leiser, der Rauschanteil fehlt fast gänzlich und die Mechaniken stechen so noch deutlicher hervor, oder ein gut hörbarer Down-Sweep von ca. 3,5 kHz zu 800 Hz tritt an die Stelle des sonst atonalen Detonationsimpulses. Letzteres kommt jedoch hauptsächlich im Filmbereich vor.

Der Hülsenklang ist nur bei den designer Sounds wirklich wahrnehmbar. Er ist jeweils 70 – 100 Millisekunden nach dem Detonationsimpuls zu hören und beginnt mit dem letzten Klicken der Mechanik.

Beim Vergleich der Spektralverteilungen von einer echten AK 47 mit dem designer Schuss der gleichen Waffe aus Battlefield 3, fällt bei der designer Version besonders die sichtbare Unterteilung des Klanges in einzelne, impulshafte Signale auf. Dies ist auf eine Betonung der Mechanikgeräusche im Verhältnis zum Knall zurückzuführen. Auch wenn etwas Realismus verloren geht, so klingen die Schüsse mit deutlichem Mechanikanteil sehr interessant und passend. Gut zu sehen ist in Abb. 5 auch der Klang der ausgeworfenen Hülse und deren zweimaliges Auftreffen auf dem Boden. Der dominanteste Anteil dieses Klanges liegt bei circa 10 kHz mit ein paar kürzer andauernden, annähernd harmonischen Schwingungen, insbesondere im Bereich über 10 kHz.

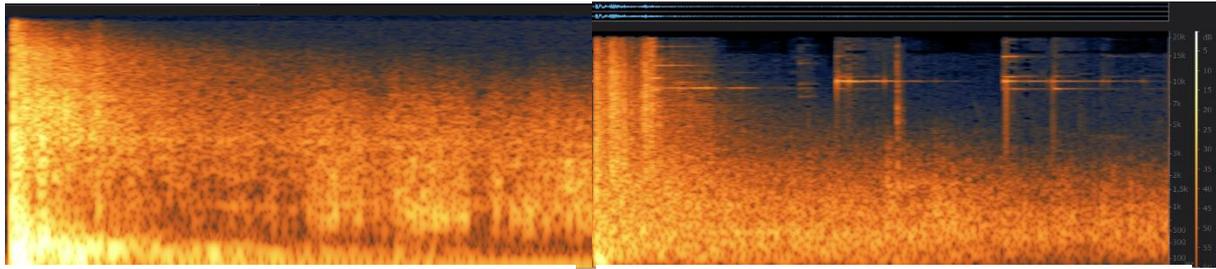


Abb. 5: Echte AK47 Spektralverteilung Einzelschuss

Abb. 6: AK47 Battlefield 3 Spektralverteilung Einzelschuss

Besonderheiten bei Dauerfeuer:

Das allgemeine Klangverhalten der einzelnen Impulse bei Dauerfeuer echter Waffen ist gleichbleibend und weniger divers als in Spielen. Auch die Detonationsimpulse und die Mündungssignaturen sind als Hauptbestandteil gut hörbar. Dies ist ebenfalls ein entscheidender Unterschied zu den analysierten Spielesounds. Hier ist nur der erste Schuss komplett mit gut hörbarem Impuls wie beim Einzelschuss zu hören. Bei den darauffolgenden Schüssen innerhalb einer Salve verliert er jedoch etwas an Prägnanz und büßt einen Teil der hohen Frequenzen ein. Dies scheint bewusst durch designtechnische Maßnahmen festgelegt zu sein. Ebenfalls signifikant ist der Klang der ausgeworfenen Hülse im Dauerfeuer, da er nur nach dem letzten Schuss gut zu hören ist. Ein für das Mixing interessanter Aspekt ist die präzisere Abbildung der Mechaniken und des Hülsenklangs, wenn die Waffe zum Zielen angelegt wird. Die Explosionsgeräusche werden im Vergleich hierzu nahezu unverändert wiedergegeben. In Spielen variiert auch die Feuerrate eines Modells von Titel zu Titel.

Im Interesse des Zusammenhangs und zur Vermeidung von Redundanz, werden weitere Analyseergebnisse bezüglich der realen Waffen sowie Inspirationsquellen für die Voltgun erst im Fließtext der nächsten Abschnitte aufgezeigt.

6. Aufbau des Klangsystems für reale Waffen (Modell)

Die Klangsysteme sollen die Möglichkeiten des prozeduralen Sounddesigns demonstrieren. Im Falle der realen Waffen sollte jedes einzelne Klangelement möglichst viele Steuergrößen beinhalten, die beispielsweise das Klangbild, die Tonhöhe, Lautstärke und Länge variabel machen, sodass eine Vielzahl verschiedener Waffentypen dargestellt werden können. Ziel ist hier, nicht die physikalischen Klangerzeugungsvorgänge realitätsnah nachzubilden, sondern mithilfe von Synthese und Wissen über entsprechende Vorgänge ein Klangverhalten zu erzeugen, das dem Spieler ein immersives und logisch stimmiges Audioerlebnis zuteilwerden lässt. Obwohl der Hall einen großen Teil der Schussgeräusche vieler Waffen ausmacht und das Gesamtbild des Klangs deutlich beeinflusst, wird hier der trockene Klang des Schusses isoliert behandelt, da die Ergebnisse der prozeduralen Systeme ohne Hall oder sonstige DSP-Effekte aufgezeigt werden sollen.

Das Modell für die einzelnen Elemente des Klangsynthesystems der realen Waffen wird im Folgenden auf Basis der physikalischen Erzeugungsvorgänge und den Analyseergebnissen erstellt.

6.1 Detonationsimpuls

In der zusammengedrückten Metallfeder ist die Initialenergie gespeichert, die bei Betätigung des Abzugs den Schlagbolzen auslöst, der auf die Rückseite der Blechhülse der Patrone trifft. Dadurch verbrennt die in der Patrone liegende Schwarzpulverladung explosionsartig, was eine Explosion des

Fulminats in der Hauptkammer der Patronenhülse zur Folge hat. Dies setzt die eigentliche Energie für den Schuss frei. Da die Explosion nur wenige Nanosekunden andauert, ist sie für das Klangerzeugungssystem als sofortig zu betrachten. Der Schall einer explodierenden Patrone ist somit ein extrem lautes, impulsartiges Klicken.⁶⁷ Eine Reproduktion dieses Impulses liefert im Vergleich zu designten Detonationsklängen nicht genug druckvollen Bassanteil. Im Durchschnitt liegt dieser bei designten Schussgeräuschen im Bereich von 60 Hz bis 180 Hz. Deshalb wird dem Klangsystem ein zweiter, tieferer Impuls hinzugefügt, der den Gesamtklang im Bereich von 90 Hz kräftigt. Durch diese Trennung von hohem und tiefem Impulsklang klingt der Patronendetonationsimpuls insgesamt kräftiger, aber gleichzeitig aufgeräumt. *Spezialfall Dauerfeuer*: Gemäß den Vorbildern soll der erste Schuss komplett mit gut hörbarem tiefem Impuls wie beim Einzelschuss zu hören sein. Bei den darauffolgenden Schüssen innerhalb einer Salve soll der tiefere Impuls jedoch etwas an Prägnanz verlieren.

6.2 Vibration des Waffenkörpers

Die Detonation versetzt die anderen Teile der Waffe in Vibration und eine Schockwelle bewegt sich durch alle Komponenten. Ungefähr 10 % der Explosionsenergie werden durch die Vibration des Waffenkörpers abgestrahlt und verstärkt. Das Geräusch einer feuernden Waffe besteht in der Faltung des Klangs vom Waffenkorpus mit dem Impuls der Patronenexplosion.⁶⁸ Somit ist dieser Teil des Waffengeräuschs stark von der Konstruktion der Teile und deren Materialien abhängig.

6.3 Mündungssignatur

Das Projektil wird durch das heiße, sich ausdehnende Gas entlang des Laufes mit stabilisierendem Drall aus der Waffe befördert. Stickstoff, Wasserstoff und Chlorgas explodieren am Ausgang des Laufs und verursachen ein Blitzen. Der hierdurch erzeugte Klang wird Mündungssignatur genannt. Sie hat eine deutlich niedrigere Frequenz als der Anregungsknall, etwa wie ein Luftballon, und dauert in der Regel zwischen 20 und 40 Millisekunden.⁶⁹ Der Klang des durch die Patrone geriebenen Laufs ist im Vergleich zur Lautstärke des austretenden Gases zu vernachlässigen.

6.4 Mechanik

Automatische Waffen zapfen den Auslass der Explosion an, um ein Rückstoßsystem anzutreiben, welches die Feder wieder spannt und eine Mechanik antreibt, die die verbrauchte Hülse nach außen treibt und eine neue aus dem Magazin in die Kammer befördert. Das Antreiben dieser Mechanik durch das Magazinverbindungsstück erzeugt den Klang, der oftmals die Identifikation des Waffentyps durch Hören ermöglicht.⁷⁰ Je nach Größe dieser Mechanikbauteile variiert die durchschnittliche Tonhöhe der einzelnen dadurch erzeugten metallischen Klickgeräusche.

6.5 Hülsenklang

Der Klang der ausgeworfenen Hülse ist nur bei den designten Sounds wirklich wahrnehmbar. Er ist kurz vor dem letzten Klicken der Mechanik zu hören. Auch wenn die Hülse Eigenschaften eines Helmholtz-

⁶⁷ Vgl. Farnell (2010): S. 594

⁶⁸ Vgl. Farnell (2010): S. 594 f.

⁶⁹ Vgl. Farnell (2010): S. 595, 598

⁷⁰ Vgl. Farnell (2010): S. 595 f.

Resonators aufweist, dessen Eigenfrequenz je nach Kalibergröße variiert, so hat der Hauptanteil des Klanges idiophonen Charakter.

6.6 Projektilschall

Lediglich 30 % der Energie stecken im Projektil in Form von kinetischer Energie. Luft, die vor dem Projektil im Lauf war wird mit Überschallgeschwindigkeit herausgepresst. Als Folge breitet sich eine Überschallwelle in Richtung der Flugbahn des Projektils aus. Dieser Schall ist wenige Millisekunden vor der Mündungssignatur zu hören.⁷¹ Es handelt sich hierbei um eine N-Welle⁷² mit hohem Anstieg, linearem Übergang und schnellem Rückschwung. Von der Schützenposition ist sie kaum hörbar, macht entlang der Schusslinie jedoch den lautesten Teil aus. Ganz ohne Hall ist das Schussgeräusch allerdings selbst im offenen Feld nicht, da Bodenreflexion der Mündungssignatur und des Projektilflugs wahrnehmbar sind.⁷³ Bei größerer Entfernung des Hörers zum Schützen ist die Schockwelle aufgrund ihrer Überschallgeschwindigkeit früher zu hören als der Rest des Schussklanges. Daher sollte dieses Element des Synthesystems leicht von den anderen getrennt bezüglich Verzögerung und Klangeigenschaften verändert werden können.

6.7 Schalldämpfer

Bei einer schalldämpften Waffe kann das Explosionsgas in ein größeres Volumen fließen, bevor es vollständig ins Freie strömt.⁷⁴ Dies erzeugt eine deutliche Reduktion der Lautstärke und äußert sich zudem in einem milderem Transienten des Detonationsimpulses. Für den schalldämpften Klang werden keine dedizierten Patch-Elemente erstellt. Vielmehr sorgt eine Parameteranpassung der bereits vorhandenen Patches für das gewünschte Klangbild. Es erfolgt eine gezielte Reduktion der Lautstärke und Präsenz von zu dämpfenden Elementen, die Hervorhebung der eigentlich leiseren Mechanik und des Hülsenklangs, sowie eine immense Verlängerung der Releasezeit des Detonationsimpulses.

6.8 Minigunantrieb

Zentraler Bestandteil des Gesamtklanks einer Minigun stellt der Betrieb des Motors dar, welcher die sich drehende Lauftrommel antreibt. Ziel des Synthesystems ist ein Motorgeräusch, das sein Klangverhalten entsprechend der Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors anpasst, über ein Leerlaufgeräusch verfügt sowie das Hochfahren, den Betriebszustand und ein Herunterfahren des Motors klanglich erfahrbar macht. Im Hinblick auf die spätere Implementierung in das Demolevel ist wichtig, dass das Synthesystem unentwegt anhand der aktuellen Umdrehungsgeschwindigkeit gesteuert werden soll, d. h. nicht basierend auf einem Event wie „Maustaste gedrückt“ und „Maustaste nicht mehr gedrückt“. Diese direkte Verkopplung mit dem von der Spiele-Engine berechneten Drehzahl des Motors ermöglicht eine exakte auditive Rückmeldung der Umdrehungsgeschwindigkeit, die auch bei unterbrochenem und wieder fortgesetztem Hoch- und Herunterfahren ein korrektes

⁷¹ Vgl. Farnell (2010): S. 596

⁷² Die akustische Signatur einer solchen N-Welle ist durch scharfe Luftdruckschwankungen am Anfang und Ende der Wellenform und einen langsameren Druckabfall in der Mitte definiert. Der Buchstabe N gleicht einer solchen Form. (Vgl. Vernon; Webb (2000): k. S.)

⁷³ Vgl. Farnell (2010): S. 596 f.

⁷⁴ Vgl. Farnell (2010): S. 601

Audiofeedback liefert. Eine steigende Drehzahl soll sich auch in einer entsprechend höheren Lautstärke ausdrücken.

Durch Variation der Parameter sollen folgende Modelle klanglich nachgebildet werden

1. AK47
2. M4
3. Scharfschützengewehr
4. Leichtes Maschinengewehr
5. Schweres Maschinengewehr
6. Minigun

7. Design der realen Waffen (Methode & Implementierung)

Die Erstellung der Klangsysteme erfolgte in der Programmiersprache Pure Data. Zum Verständnis des Designprozesses ist ein Basiswissen über die Funktionsweise des Programms vorteilhaft. Entsprechende Erklärungen der wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Objekte sind im Anhang in Abschnitt 15 aufgeführt.

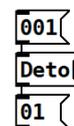
Die Grundlage für das Design der zu synthetisierenden realen Schussklänge bildet Andy Farnells Patch-Modell für Schusswaffengeräusche⁷⁵, welches umfassend verändert und erweitert wird.

Die meisten Bestandteile des Klangsynthesystems, die eine in sich abgeschlossene Synthesefunktion innehaben, sind im Interesse besserer Übersichtlichkeit und Bedienbarkeit als sogenannte *Subpatches* angelegt. Sie sind als System im System zu betrachten und sind durch die Kennzeichnung „pd“ am Anfang der Objektbezeichnung zu erkennen.⁷⁶

Besonders wichtige bzw. komplexe Bestandteile der Klangsysteme sind im Fließtext abgebildet. Eine Übersicht der kompletten Patches und Subpatches liegt dieser Arbeit als Anlage im Ordner „Patch-Abbildungen“ vor. Die Abbildungen der einzelnen Patches und Subpatches sind nach Klangelementen geordnet.

Im rechten Bildrand wird auf beigefügte Audiodateien verwiesen, die den Klangsyntheseprozess der besprochenen Schritte auditiv widerspiegeln. Sie sind im Anlagen-Ordner „Syntheseschritte“ zu finden. (Kontinuierliche Klänge werden jeweils ca. 4 Sekunden wiedergegeben; bei kurz andauernden Klängen je zwei Wiederholungen). Die Benennung folgt dieser Struktur:

totale Nr._Klangelement_Nummer



Beispiel: 001_Deto.1_01

Die Ergebnisse der Klangsysteme werden in den Video Captures „DemolevelVideoCapture“ und „Patch-Demonstration“ vorgestellt (siehe Anlagenverzeichnis in Abschnitt 17).

⁷⁵ Siehe Farnell (2010): S. 593 ff.

⁷⁶ Vgl. Puckette (2007): S. 96

7.1 Detonationsimpulse

7.1.1 Detonationsimpuls 1

Für die akustische Darstellung der Patronendetonation gilt es zunächst, einen energetischen Impuls von wenigen Millisekunden zu erzeugen. Mithilfe von Standardobjekten zur Signalerzeugung ist dies nur unzureichend möglich, daher wird der gewünschte Effekt durch einen Gleitsinus (*Sweep*) erzielt.⁷⁷ Im Sinne von Procedural Audio eignet sich diese Vorgehensweise auch, da die Einflussgrößen so unabhängig voneinander verändert werden können.

Anstelle eines Signalgenerators wie `osc~` oder `phasor~` kommt eine Kette mathematischer Funktionen zum Einsatz. Zur besseren Übersichtlichkeit ist dieses eigenständige System in einem Subpatch mit der Bezeichnung `pd shell` angelegt. Die Vorgehensweise dieser generativen Synthese findet in ihren Grundzügen auch in anderen Teilen des Synthesystems Anwendung und wird daher besonders detailliert veranschaulicht.

7.1.1.1 Funktionsweise des Sweepgenerators in `pd shell`

Die drei obersten Objekte bilden zusammen das Konstrukt einer Hüllkurve. Deren Verlauf wird durch die Werte aus der vorangestellten Message-Box definiert: Die Signalamplitude beginnt sofort mit dem „Sustainwert“ 1 und fällt innerhalb der Releasezeit linear auf 0. Der Releasezeitwert wird durch das Inlet als Float in den Subpatch transportiert und substituiert dort den Wert \$1 in der Messagebox.

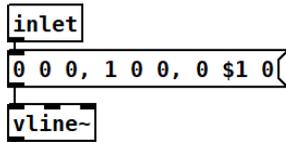


Abb. 7: Hüllkurvenfunktion

Das erzeugte Signal wird im nächsten Schritt mit einem Faktor, der knapp über 1 liegt, multipliziert und anschließend durch die *Powerfunktion* (`pow~`) mit einem Exponenten potenziert. Dadurch ergibt sich ein Werteverlauf, wie er in Abbildung 8 zu sehen ist.

Zu einem abspielbaren Signal wird dieser Werteverlauf mithilfe der *Wrapfunktion* (`wrap~`) umgewandelt. Übersteigt ein eingehendes Signal einen ganzzahligen Wert, so subtrahiert diese Funktion diesen ganzzahligen Wert vom Signal. Übrig bleiben die Nachkommastellen. Durch dieses

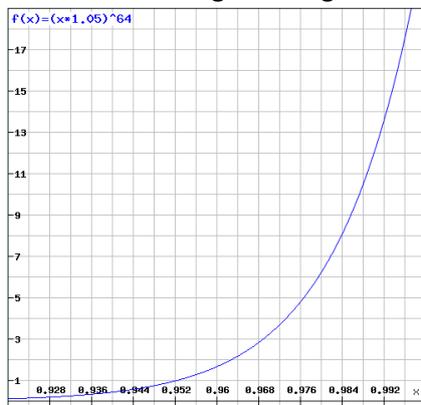


Abb. 8: Exponentialfunktion des Detonationsimpulses

Vorgehen entsteht ein periodisches, zeitabhängiges Signal in sägezahnähnlicher Form, dass in jedem Wellenzug abrupt bei 1 beginnt und auf 0 fällt und anschließend erneut von 1 startet.⁷⁸ Die Länge der Wellenzüge nimmt proportional zur Steigung der Exponentialfunktion ab. Es entsteht ein fallender Sweep mit zunehmender Wellenlänge. Die Anzahl der Wellenzüge entspricht hierbei dem aufgerundeten Ergebnis der Exponentialfunktion. In diesem Fall $1.05^{64} = 22,7$, das entspricht 23 Wellenzügen. (Releasezeit im Hörbeispiel 100 ms)



⁷⁷ Vgl.: Farnell (2010): S. 597

⁷⁸ Vgl. Farnell (2010): S. 211



Abb. 9: Signal aus der Wrapfunktion.

Das nun erzeugte Phasorsignal bewegt sich bisher nur im positiven Wertebereich. Durch eine angehängte Cosinusfunktion $|\cos\sim|$ wird das Signal in eine obertonlose, bipolare Wellenform umgewandelt, die den Bereich von 1 bis -1 umfasst.⁷⁹



7.1.1.2 Bedeutung und Auswirkung der drei Variablen

a) Releasezeit

Je länger die Releasezeit der Hüllkurve ist, desto langsamer verläuft die Umwandlung des Amplitudenwerts der Hüllkurve in Wellenzüge des Signals. Es ergeben sich mehr einzelne Berechnungswerte bei der Berechnung der *Wrapfunktion*, bis ein weiterer ganzzahliger Wert erreicht ist und der nächste Wellenzug beginnt. Wie viele Werte pro Ganzzahlbereich berechnet werden wirkt sich folglich direkt auf die Länge des dabei entstehenden Wellenzugs aus. Demnach beginnt das Signal bei einer höheren Releasezeit mit einer entsprechend niedrigeren Initialfrequenz. Der Releasewert bestimmt demnach nicht nur die Dauer des Signals, sondern auch den Frequenzbereich.

b) Multiplikator

Für den Verlauf der Frequenzabnahme ist fast ausschließlich der Wertebereich definierend, für den die Exponentialfunktion einen Wert über 1 liefert. Wie in Abbildung 8 zu erkennen, ist dies bereits bei X-Werten unter 0.952 der Fall. Ab hier beginnt bereits der letzte Wellenzug, da bis zur 0 kein weiterer ganzzahliger Wert erreicht wird. Daher ist besonders der Multiplikator eine entscheidende Steuergröße für das System. Ist er höher, so führen deutlich mehr X-Werte zu einem Exponentialfunktionsergebnis von über 1. Also verlängert sich die Dauer des hörbaren Sweeps. Dies spielt besonders bei der Klanggestaltung für den Schalldämpfermodus eine Rolle. Der Multiplikator beeinflusst auch den Wert der Initialfrequenz, jedoch in weitaus geringerem Maße als der Exponent.

c) Exponent

Der Exponent ist entscheidend für die Steilheit der Funktion. Er hat keinen Einfluss auf die Länge des hörbaren Signals, jedoch beeinflusst er die Klangfarbe besonders, da er bestimmt, über welchen Frequenzbereich sich der Sweep erstreckt. Besonders die Initialfrequenz und Aliasing bei den ersten Wellenzügen hängen von diesem Wert ab. Letzteres Phänomen wird in Kürze besprochen und ist für die Synthese des Schussimpulses der Voltgun entscheidend.

7.1.2 Troubleshooting: Gewährleistung des Phasenstarts im Nulldurchgang

Die Steuerung der Phasenlage erfolgt bei Oszillatorobjekten normalerweise durch das rechte Inlet. Da hier jedoch eine rein generative Synthese ohne Oszillatorobjekte vorliegt, wird das Problem durch eine Funktion gelöst.

Ändern sich die Parameter von Multiplikator und Exponent, so treffen entsprechend unterschiedliche Anfangswerte auf die Warpfunktion. Hierbei ist der Wert der Nachkommastellen problematisch, da er die Phase des durch die Wrap-Funktion entstehenden Phasors unmittelbar beeinflusst. Dies äußert sich in unerwünschtem Knacksen, welches das Klangbild besonders bei kurzen Sweeps erheblich

⁷⁹ Vgl. Farnell (2010): S. 211 f.

verändert. Um eine einheitlich beginnende Phase zu gewährleisten wurde das System um eine Funktion erweitert. Zuerst wird die Nachkommastelle in Abhängigkeit der eingestellten Variablen ermittelt und von 1 subtrahiert. Dies ist der Additionswert, der nun im Signalfluss dem Ergebnis der Powerfunktion addiert werden muss. Dadurch ergeben sich unabhängig von den Parametereinstellungen immer ganzzahlige Werte, die dann durch die Warpfunktion fließen. Folglich beginnt der daraus hervorgehende Phasor immer mit dem Anfangswert 1.

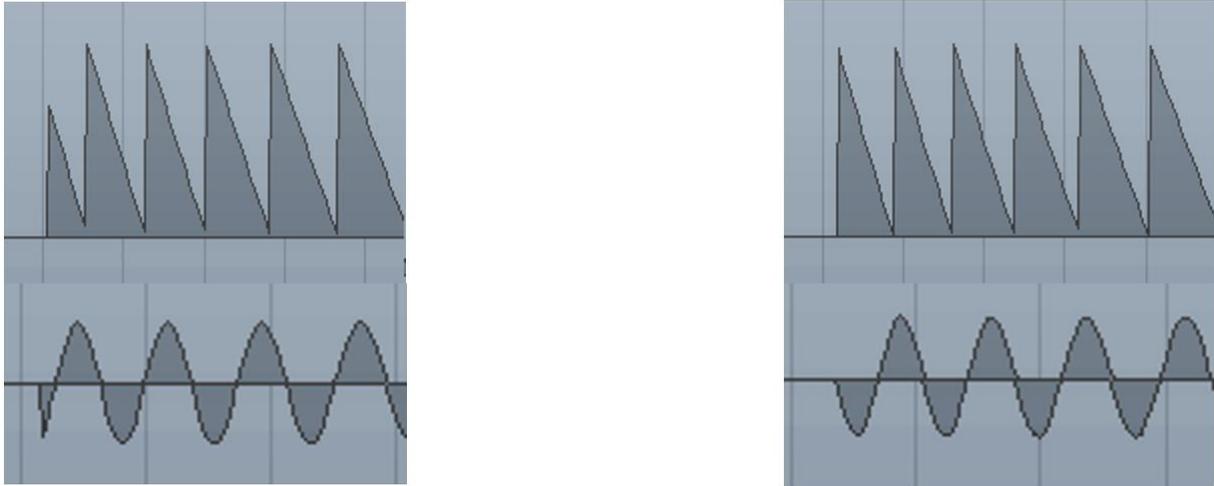


Abb. 10: Signale aus Warp-Funktion und Cosinus-Funktion ohne Ausgleich durch den Additionswert (links) bzw. nach Ausgleich durch den Additionswert (rechts)

Pure Data würde diesen Additionswert theoretisch in jeder Rechenoperation dem Signal aufaddieren, Dies würde zur Folge haben, dass der Signalwert auch im „Leerlauf“ immer eine positive Auslenkung um den Betrag des Additionswertes aufwies. Deshalb wurde diese Addition durch eine zugehörige Hüllkurve gesteuert, die den Additionswert innerhalb von 5 Millisekunden langsam auf 0 reduziert. Dieser kurze „Wertefade“ ist nicht hörbar und für das Klangergebnis vernachlässigbar.

7.1.3 Detonationsimpuls 2

Im Durchschnitt dominiert im Bassanteil des Schussgeräuschs von Spielen ein Frequenzbereich von 60 bis 180 Hz. Da der soeben besprochene Detonationsimpuls in diesem Bereich nicht präsent ist, wird ein weiterer Impulsgenerator mit entsprechend anderen Einstellungen verwandt, um dem Klang der Detonation mehr Druck zu verleihen. Dadurch klingt der Bass insgesamt kräftiger, aber gleichzeitig aufgeräumt. Dieser zweite Impuls wirkt in der Wahrnehmung nicht mehr wie ein Sweep, sondern eher wie ein Stoß von ca. 100 Hz. Eine Amplitudenhüllkurve reduziert nach einem Delay von 12 ms zusätzlich den Pegel um 70 % innerhalb von 5 ms, was die Stoßhaftigkeit des Klangs weiter verstärkt. Nach Vorbild der analysierten Sounds wird der Pegel dieses Impulses im Dauerfeuer leicht abgesenkt, um so mehr Raum für die anderen Klangelemente zu schaffen und eine bessere Aufgeräumtheit des Dauerfeuerklangs zu erzielen. Hierzu prüft ein Teil des Patches, ob ein vorheriger Schuss vor weniger als 120 ms abgespielt wurde. Ist dem so, muss es sich um Dauerfeuer handeln und eine leisere Variante des Detonationsimpuls 2 wird stattdessen getriggert. Je nach Feuerrate des ausgewählten Waffentyps wird dieser Schwellwert entsprechend angepasst.



Aufgrund der kurzen Dauer dieses tieffrequenten Impulses klingt er über Kopfhörer deutlich schwächer als über Lautsprecher. Wird ein entsprechender Impuls über ein Lautsprechersystem in einem Raum wiedergegeben, so regt er Raummoden an, die den Gesamtklang durch kurzes Nachschwingen verlängern und zudem für Dekorrelation sorgen. Um das Signal des Detonationsimpuls 2 etwas zu dekorrelieren, wird es zusätzlich mit etwas Hall versehen, welcher nur kurz (50 ms) andauert und die starre Phasenbeziehung des Signals beider Kanäle auflöst. Dies resultiert in einem volleren und angenehmeren Klang des tiefen Detonationsimpulses, wenn er über Kopfhörer abgehört wird. Einige Spieletitel unterstützen eine Anpassung des Mixes auf die Abhörsituation (Hi-Fi; Kopfhörer, „enhanced stereo mode“). Daher ist die eben besprochene Funktion an- und abschaltbar.

004
Deto
04

7.2 Mündungssignatur

Ähnlich wie für den Detonationsimpuls stellt auch eine Hüllkurve, die von 1 auf 0 fällt das Initialsignal für die Mündungssignatur dar. Faktor und Exponent der nachgeschalteten Exponentialfunktion sind jeweils zwei. Folglich ergibt sich ein Sweep von vier Wellenzügen. Der Amplitudenverlauf wird ebenfalls durch die Hüllkurve beeinflusst, die auch das Ausgangssignal der Sweeps liefert. Daher sinkt die Lautstärke des Sweeps gleichmäßig, um nach der Zeitdauer, die durch das Inlet gesendet wird auf digital Null zu gelangen. Für den Wert 30 ergibt sich ein Sweep um ca. 200 Hz.⁸⁰

005
MSignatur
01

7.3 Vibration des Waffenkörpers

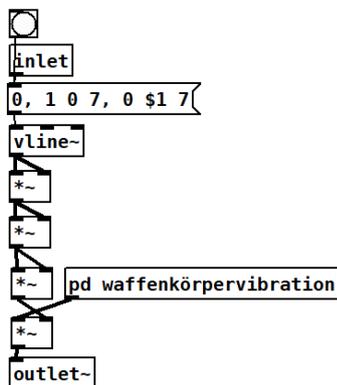


Abb. 11: Subpatch
Waffenkörpervibrationsklang

Da eine einzelne Analyse des individuellen Klangverhaltens aller Bauteile und Komponenten zum einen ohne verfügbare echte Waffen nicht möglich wäre und zum anderen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird ein einzelner Klang zusammenfassend erzeugt. Ein zufriedenstellendes Ergebnis kann hier durch subtraktive Synthese mithilfe eines Stoßes von weißem Rauschen erzielt werden, dass durch einige manipulierende Maßnahmen verändert wird.

Eine Hüllkurve steuert den Amplitudenverlauf des Rauschens, nachdem sie drei Mal mit sich selbst multipliziert wurde. Durch das mehrmalige quadrieren ergibt sich eine parabolische Kurve, die besonders im ersten Drittel ihres Verlaufs einen steilen Abfall aufweist. Mithilfe dieser Methode wird eine Annäherung eines natürlichen Decay-Verlaufs

erzielt.⁸¹

Je höher der Wert aus dem Inlet gewählt wird, desto länger wirkt der Rauschstoß. Ein hinzukommen weniger Millisekunden bewirkt hier eine höher empfundene Lautheit, da bei kurzen, impulshaften Signalen gilt: je kürzer die Signaldauer, desto leiser wird dessen Lautstärke wahrgenommen.⁸² Dieser Wert repräsentiert folglich in bedeutendem Maße die Größe von Waffenkörper und Kaliber.

⁸⁰ Vgl. Farnell (2010): S. 598

⁸¹ Vgl. Farnell (2010): S. 210

⁸² Vgl. Völz (1999): S. 52

Weißes Rauschen würde den Klang eines vibrierenden Waffenkörpers nur äußerst unzureichend nachbilden. Daher wird ein dedizierter Subpatch angelegt, mithilfe dessen ein prozedural ansteuerbares und deutlich überzeugender klingendes Signal erzeugt werden kann.

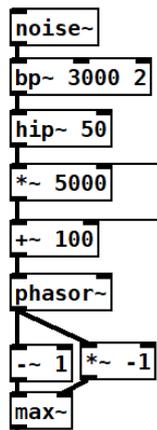


Abb. 12:
Waffenkörper-
Vibrationsgenerator

Als Ausgangssignal hierfür dient weißes Rauschen, das zunächst ein Bandpassfilter mit Mittenfrequenz von bspw. 3 kHz und geringer Güte ($Q = 2$) durchläuft. Die Mittenfrequenz variiert je nach Waffentyp. Ein nachgeschaltetes Hochpassfilter reduziert zusätzlich Signalanteile unter 50 Hz. Um die anschließende Signalmanipulation verständlich zu machen, muss zunächst die Funktionsweise des Phasor-Objekts in Bezug auf eingehende Zahlenwerte und Signale veranschaulicht werden.

Wird ein Zahlenwert in das linke Inlet gesendet, bestimmt dieser, wie oft das Ausgangssignal des Phasors linear von 0 auf 1 pro Sekunde ansteigt. Wie bei einer Sägezahnwelle springt das Ausgangssignal nach Erreichen des maximalen Amplitudenwerts, hier 1, unmittelbar zurück auf 0 und der nächste Durchlauf beginnt.

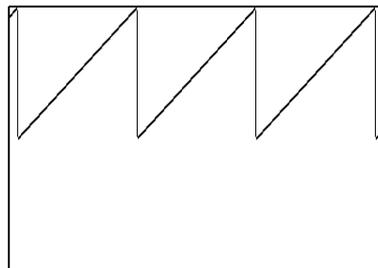


Abb. 13: Ausgangssignal eines Phasor-Objektes

Wird jedoch ein Signal in das linke Inlet gesendet, so wird die *Wellenform* des finalen Signals selbst verändert. Nimmt das Eingangssignal Werte größer als 1 an, lässt der Phasor das Signal nicht mehr unverändert passieren, sondern verwirft dessen ganzzahligen Anteil und gibt nur den Nachkommaanteil als Amplitudenwert aus. Analog zum Sprung von 1 auf 0, springt das Ausgangssignal entsprechend von 0 auf 1, wenn das Inputsignal eine negative Steigung aufweist.

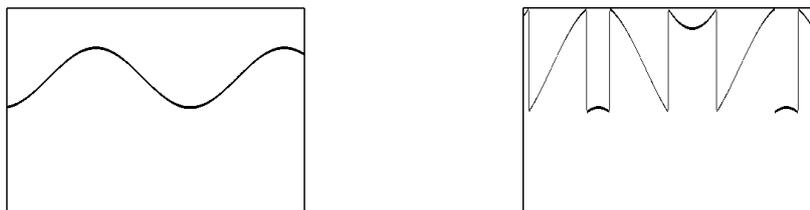


Abb. 14: Ausgangssignal eines Phasor-Objektes mit verarbeitetem Sinussignal mit Spitzenwert unter 1 (links) und über 1 (rechts)

Die obertonreichen Sprungstellen zwischen 0 und 1 sind maßgeblich für den Höreindruck verantwortlich.

Für eine interessante Klangersynthese ist es besonders nützlich sowohl ein Signal, als auch einen Zahlenwert an das Phasor-Objekt zu senden. Dadurch bildet die durch den Zahlenwert festgelegte, konstante Sägezahnwellenfrequenz eine zentrale Tonhöhe im Klangbild, welche hinzukommend durch die vom Inputsignal zusätzlich verursachten Sprungstellen so beeinflusst wird, dass das Klangbild um

die konstante Frequenz „herumschwingt“. Der Grad dieser Verzerrung ist abhängig von der Amplitude des Inputsignals. Je höher diese ist, desto größer sind die Verzerrungen der konstanten Frequenz. Ist die Steigung der Inputsignalamplitude positiv, verfrüht sie den nächsten Sprung zwischen 0 und 1 bzw. verzögert ihn bei negativer Steigung. Abbildung 13 zeigt die Wellenform eines so erzeugten Ausgangssignals. Die Amplitude des Inputsignals ist hier so niedrig gewählt, dass sie lediglich einen zusätzlichen Sprung pro zahlenwertbasierten Sprung verursacht. Im für den Waffenkörpervibrationsklang verwendeten Patch ist die Amplitude des Inputsignals jedoch mehrere tausendfach größer gewählt.

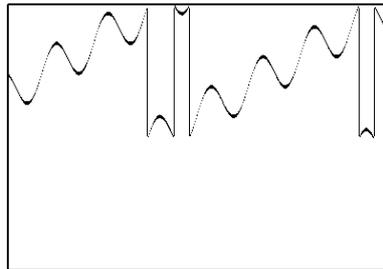
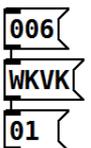


Abb. 15: Ausgangssignal des Phasor-Objektes

Die Anwendung des eben besprochenen Verfahrens wird nun in Bezug auf das band- und hochpassgefilterte Rauschen für den Waffenkörpervibrationsklang (WKVK) erläutert.

Das gefilterte Rauschsignal wird nun mit einem hohen Faktor (z. B. 5000) multipliziert und somit in seiner Amplitude massiv verstärkt. Bevor es das nachgeschaltete Phasor-Objekt durchläuft, wird der Zahlenwert wie bspw. 100 addiert. Das Phasor-Objekt wandelt diese Informationen nun zu einem rauschähnlichen Signal um, das ein tiefes, kraftvolles klangliches Zentrum um die Frequenz aufweist, die der Zahlenwert festlegt.



Im letzten Schritt des Subpatches wird das sägezahnwellenähnliche Signal zu einer angenehmer klingenden, obertonärmeren Dreieckswelle umgewandelt. Dies geschieht mithilfe der Maximalfunktion (siehe Abschnitt 15).

Je nach Waffentyp werden Multiplikationsfaktor und Zahlenwert individuell gewählt, um die Klangeigenschaften der dargestellten Waffe prozedural zu steuern. Ein höherer Zahlenwert führt zu einer höheren Grundvibrationsfrequenz des gesamten Körpervibrationsklangs, welche einen entsprechend kleineren Waffenkörper verklängt. Wie dominant diese im Gesamtklang wirkt, wird durch den Multiplikationsfaktor bestimmt. Je höher dieser gewählt ist, desto mehr nähert sich das Ausgangssignal einem weißen Rauschen an und die Zahlenwertfrequenz wird schwerer hörbar.

7.1 Bandpassfilter-Subpatch für Resonanzen des Waffenkörpers

Die Resonanz von Gehäuse, Lauf und Schaft werden durch eine Reihe von parallel geschalteten Bandpassfiltern verkörpert, die zusammen ein breites Frequenzspektrum abdecken. Je nach Waffentyp werden die Mittelfrequenzen und Güten der einzelnen Filter spezifisch durch die Spiele-Engine festgelegt. Wie in Farnells Grundgerüst, wird für diese Bandpassfilterung ein dedizierter Subpatch angefertigt. So ergibt sich die Möglichkeit auch die anderen Bestandteile des gesamten Schussklanges wie Detonationsimpuls oder Mündungssignatur auf die gleiche Weise zu manipulieren, wie der rauschähnliche Stoß der Körpervibration, was zu einem kohärenten Gesamtklang führt.

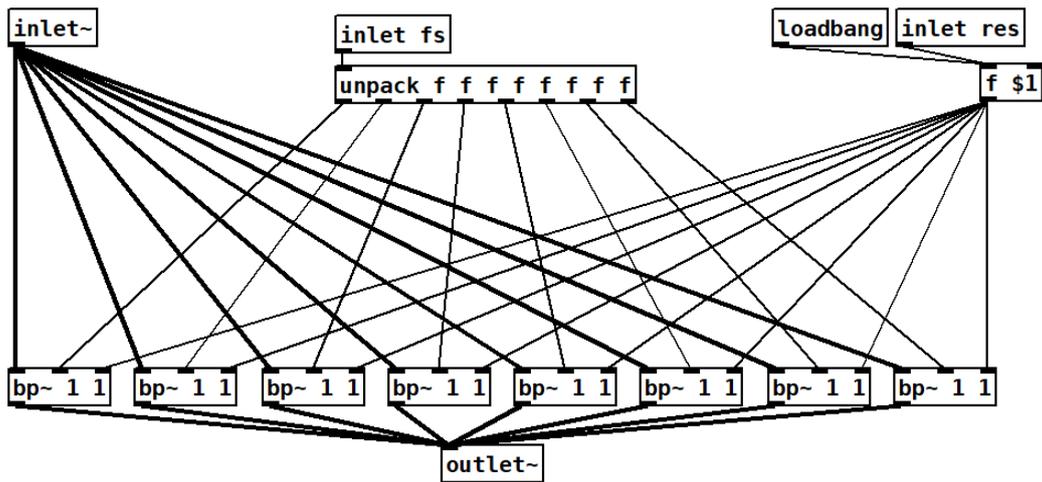


Abb. 16: Bandpassfilterreihe für die Resonanzen des Waffenkorpus

Nach dieser Filterung durchläuft das Signal aus Detonationsimpuls, Mündungsfeuer und Vibrationsklang verschiedene Objekte zur Verzerrung und damit einhergehender Kompression. Der Vibrationsklang wird jedoch zusätzlich durch eine weitere, eigene Kopie des Bandpassfilter-Subpatches (siehe Hörbeispiel 007) geleitet. So können die Parameter für Filtergüte und anschließende Verstärkung je nach verwendetem Waffentyp individuell festgelegt und dem Gesamtklang für eine präzisere Betonung klar und unverzerrt beigemischt werden. Die Mechanikgeräusche durchlaufen ausschließlich eine dedizierte Kopie des Filter-Patches.

007
WKVK
02

7.1 Rauschnachhall

Um dem Vibrationsklang etwas mehr Tiefe zu verleihen, wird der WKVK in einem weiteren Patch-Element erneut erzeugt (hier in pd rauschnachhall), jedoch ohne Resonanzen und mit einem stark abgewandelten Amplitudenverlauf. Anstieg und Abfall verlaufen langsamer und die Decayzeit ist deutlich höher. Den eigentlichen Charakter erhält dieser Klang jedoch durch einen Bandpassfilter, dessen Mittelfrequenz in der Standardeinstellung über einen Zeitraum von 2 Sekunden von 1100 Hz auf 50 Hz sinkt, während die Güte des Filters in einer Sekunde von 0 auf 2 ansteigt. So entsteht ein zunächst rauschähnlicher, dann immer mehr tieffrequenter Klang, wie er in den meisten analysierten Spielen als Teil des Nachhalls zu hören ist. Er ist dynamischer und weicher an- und abklingend als der eigentliche Vibrationsklang und ahmt dessen Wiederhallen in der Umgebung nach, ohne eine direkt der Umgebung zuordenbare Reflexion abzubilden. Er ist dem Gesamtklang des Schussgeräuschs nur leicht beigemischt und fällt in manchen Einstellungen erst durch sein Fehlen auf.

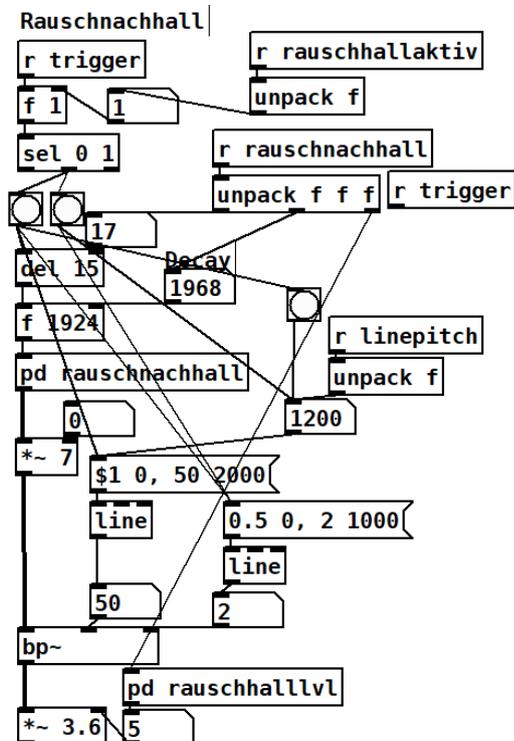


Abb. 17: Rauschnachhall für AK47

008
RauschNH
01

7.2 Mechanik

Das Geräusch der Mechanik macht einen bedeutenden Anteil des Wiedererkennungswerts eines Schussklanges aus. Auch wenn dieser bei echten Aufnahmen kaum hörbar ist, so spielt er im Sounddesign für Spiele und Filme eine wichtige Rolle und ist dort sehr definiert zu hören. Je getrennter der Mechanikklang vom Schussimpuls wahrnehmbar ist, desto grober, rüttelnder und rabiater wirkt der Klang.⁸³

Die Grundlage für das Mechanikgeräusch stellt Farnells Gerüst für Nachladesounds⁸⁴ dar, das für eine Eingliederung in das Schussgeräusch abgewandelt und für eine prozedurale Steuerung je nach Waffentyp erweitert wurde. Es werden sowohl additive als auch subtraktive Synthese angewandt. Mit diesem Klangsystem wird die Mechanik nachgeahmt, die mithilfe der Energie des Detonationsimpulses die leere Patronenhülse auswirft und eine neue in die Kammer führt. Durch diesen Vorgang entstehen metallische Klickgeräusche.

Da die Synthese der Mechaniken die Prozessschrittreichste aller Klangelemente darstellt und viele Subpatches umfasst, wird hier nur ein zusammenfassender Überblick über den Synthesevorgang gegeben.

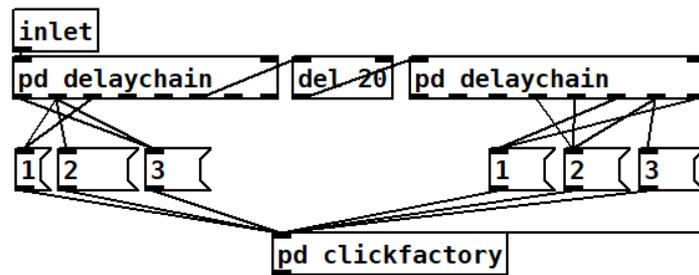


Abb. 18: Triggern der Zahlenwerte durch Delayketten (Ausschnitt)

Zunächst wird ein Subpatch getriggert, der 8 hintereinandergeschaltete Delays beinhaltet, die jeweils ein dediziertes Outlet triggern. Diesen Outlets sind entsprechend eine oder mehrere von drei Messageboxen nachgeschaltet, die jeweils den Zahlenwert 1, 2 oder 3 beinhalten. Werden sie so durch ein Delayoutlet getriggert, senden sie den entsprechenden Zahlenwert in das Inlet eines weiteren Subpatches, der „Clickfactory“. Erste Instanz dieses Subpatches ist ein Select-Objekt, das je nach Zahlenwert (1, 2 oder 3) eine Gruppe von jeweils drei Rauschstoßsystemen aktiviert, die sehr extrem eingestellte Bandpassfilter durchlaufen. Güte und Mittelfrequenz der Bandpassfilter bestimmen die Klangfarbe des dadurch entstehenden Klickens. Die Zahlenwerte der Messageboxen unter den Delayketten steuern also jeweils einen metallischen Klick, der aus 3 einzelnen Klicks besteht. Welches Delayoutlet eine Klickgruppe triggert legt also die zeitliche Abfolge der Klickgruppen fest, die durch die geringen Delayzeiträume als Einheit wahrgenommen werden. Das Hörbeispiel 009 zeigt zunächst die drei verschiedenen Klickgeräusche der Rauschgruppen und anschließend den ganzen Mechanikklang.

Abhängig davon, welcher Waffentyp ausgewählt wird, gibt es 2 Parameter, mit denen das gesamte Mechanikklangsystem prozedural angepasst werden kann. Der erste gibt einen Multiplikationsfaktor an, der die Zeitabstände zwischen den einzelnen Delayfolgen verlängert oder verkürzt. Dies führt zu

⁸³ Vgl. Raison; Petty (2012): k. S.

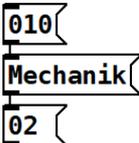
⁸⁴ Siehe Farnell (2010): S. 602 f.

einem scharfen Mechanikklang bei kurzen Delayzeiten, bzw. einem „klackernden“ Mechanikklang, der größere Mechanikteile nachahmt (lange Delayzeiten).

Der zweite Parameter zur prozeduralen Steuerung stellt einen Faktor dar, der mit den Bandpassfiltermittelfrequenzen multipliziert wird. Ist er beispielweise kleiner 1, so werden alle Mittelfrequenzen abgesenkt, was zu tiefer klingenden Klickgeräuschen führt, die zu schwereren Waffentypen passen.

Der Gesamtklang des Mechanikgeräuschs lässt sich in zwei Abschnitte einteilen, die jeweils das Vor- und Zurückbewegen des Lademechanismus verkörpern. Immer gleichbleibend ist die Zuordnung der Messageboxen zu bestimmten Outlets der Delayketten. Sie stellen die universale Abfolge von getriggerten Klickgruppen dar, die mal schneller und mal langsamer hintereinander abgespielt werden. Das erste Klicken verkörpert das Vorbewegen des Laders und ist in seiner Klickabfolge zeitlich mehr aufgeteilt als das Zurückbewegungsklicken. Es klingt somit etwas weicher, mehr nach fließender Bewegung, während der zweite Klick abrupt und scharf mit mehreren zeitgleichen Klicks endet, was die schlagartig zum Stillstand kommende Mechanik verklanglicht.

Des Gesamtklang der Mechanik wird je nach Feuerrate und Waffentyp leicht variiert, sodass er erst nach den Detonationsimpulsen zu hören ist und ungefähr mit dem Waffenkörpervibrationsklang zusammenfällt. Das Hörbeispiel 010 stellt verschiedene Typ-Variationen des Mechanikklangs vor. Der Zeitpunkt des zweiten Klickens ist auch für den Hülsenklang wichtig, der nun genauer besprochen wird.



7.3 Hülsenklang

Der Klang der leeren Patronenhülse, die nach dem Schuss die Kammer verlässt, stellt einen Helmholtz-Resonator dar. Durch die mechanische Anregung versetzt die rohrähnliche Hülse mit spitz zulaufender Öffnung die Luft in ihrem Inneren so in Schwingung, dass eine Eigenfrequenz hörbar wird, die unmittelbar vom Volumen des Luftraums in der Hülse abhängig ist.⁸⁵ Die in Abschnitt 5 gewonnenen Erkenntnisse über die Tonhöhen von Patronenhülsen in der Spielevertonung unterscheiden sich hiervon jedoch deutlich. Da eine exakte Nachbildung der physikalischen Klangerzeugungsprozesse nicht das Ziel dieser Arbeit darstellen und die zu erzeugenden Klänge demnach vielmehr der Erwartungshaltung von Spielern entsprechen sollen, wird sich in der Wahl der Frequenzen der Hülsenklänge folglich an den analysierten Spielen orientiert. Je nach Kaliber variiert die Eigenfrequenz bei Modellen anderen Kalibers.

Der Klang einer ausgeworfenen Hülse kann durch wenige reine Sinusschwingungen nachgebildet werden. Daher bietet sich eine rein additive Synthese als Methode an. Der Subpatch für die Hülsenklangsynthese enthält eine Reihe von Sinusoszillatoren, die jeweils in Dreiergruppen aufgeteilt sind. Das linke Inlet liefert den Basisfrequenzwert, der zufällig leicht variiert wird, an die einzelnen Gruppen. Bevor der Frequenzwert den jeweiligen Zieloszillator erreicht, durchläuft er in allen Fällen je eine Multiplikationsoperation, die ihn mithilfe eines entsprechenden Faktors in einen entweder (meist nur annähernd) harmonischen oder leicht inharmonischen Oberton umwandelt. Diese Manipulation bewirkt ein metallisches Klangbild, das insbesondere durch Mischung harmonischer und inharmonischer Frequenzen entsteht. Die Amplituden der Oszillatorsignale sind ebenfalls zunächst durch einen Basisparameter („Intensität“) festgelegt und werden anschließend, ähnlich wie die

⁸⁵ Vgl. Dickreiter (2009) S. 17 f.

Frequenzwerte, individuell für jeden Oszillator variiert. Nachdem die so erzeugten Sinusschwingungen jeder Dreiergruppe miteinander addiert wurden, steuert eine Amplitudenhüllkurve den individuellen Pegelverlauf der Gruppe. Der Basiswert für die Decayverläufe wird ebenfalls als Parameter durch ein Inlet in den Subpatch geroutet, um dann durch einen für jede Dreiergruppe dediziert vorhandenen Multiplikator erhöht oder verringert zu werden. Durch die umfassende Variation der jeweiligen Basiswerte kann ein verhältnismäßig komplexer Klang mit nur drei Parametern prozedural gesteuert werden, die je nach ausgewähltem Waffen- und Kalibertyp entsprechend anpassbar sind.

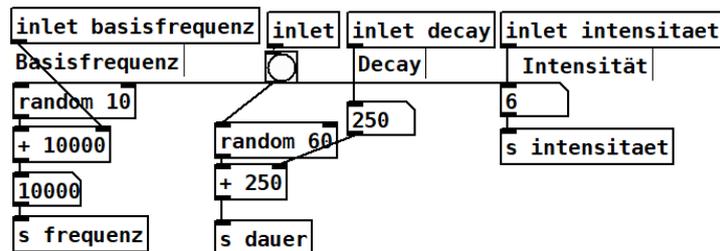
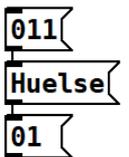


Abb. 19: System zur Variation und Weiterleitung der Basiswerte

Das Ergebnis aller Oszillatorgruppen wird im letzten Schritt aufgesplittet. Ein Teil wird zur Obertonanreicherung leicht geclippt, der andere mit etwas Hall versehen, um den luftigen Charakter des Hülsenklangs zu betonen.

Dieses Klangsynthesystem wird gleichzeitig mit beschriebenem Vorgang ein weiteres Mal mit anderen Basiswerten und geringerem Lautstärkepegel durchgeführt. Der hierdurch erzeugte Klang dient zur Untermauerung des ersten, sehr hochfrequenten Hülsenklangs, welcher ggf. alleine nicht präsent genug wahrnehmbar ist. Das Hörbeispiel 011 demonstriert den Aufbau der beiden Versionen, indem die einzelnen Sinus-Dreiergruppen nacheinander hinzugefügt werden, und gibt anschließend den Gesamtklang wieder. Der Hülsenklang wird mithilfe eines Delays stets kurz vor dem zweiten Klicken der Mechanik abgespielt, da die Hülse den Waffenkörper in diesem Moment verlässt.

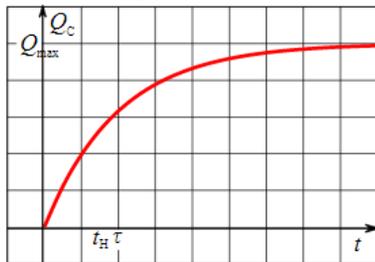


7.4 Minigunantrieb

Der Waffentyp Minigun erscheint in Spielwelten in zahlreichen Varianten und Klanggestalten. Bis auf wenige Ausnahmen ist immer ein Antriebsgeräusch des Motors zu hören, der mehrere Läufe um eine gemeinsame Achse dreht. Dieser Antrieb benötigt in den meisten Spieletiteln ein bis zwei Sekunden, um auf eine betriebsfähige Umdrehungsgeschwindigkeit hochzufahren, weshalb das hier vorgestellte System eine Aufladungszeit von 2 Sekunden von Leerlauf bis Betriebsgeschwindigkeit aufweist. Die Grundlage für die Klangsteuerung stellt der Drehzahlwert des Motors dar. Dieser wird gleichmäßig erhöht solange die Maustaste gedrückt wird und sinkt entsprechend ab, wenn sie losgelassen wird. Diese Information liefert die Spiele-Engine mit zwei Zahlenwerten. Die eigentliche Berechnung der Drehzahl geschieht durch einen Patch in Pure Data, der in Abschnitt 8.4 in ähnlicher Form genauer erläutert wird.

Das Antriebsgeräusch wird aus dem Leerlauf heraus gestartet, sobald die Minigun im Spiel ausgewählt wird. Wird eine andere Waffe ausgewählt, so sendet deren Aktivierungspatch (siehe Abschnitt 10.2) den Wert 1 an den Patch der Minigun und schaltet diesen komplett aus. Dadurch muss in Unity kein zusätzliches System programmiert werden, das lediglich festlegen würde, ob die Minigun gerade ausgewählt ist.

Im Interesse einer praktikableren Steuerung des Klangsynthesystems wird der Umdrehungswert zunächst durch 1000 dividiert und beträgt somit im Maximum 0,1. Das Antriebsgeräusch wird durch 6 parallel geschaltete Sinusoszillatoren erzeugt, deren initiale Frequenz jeweils durch das Produkt aus Umdrehungswert und Zahlenwert festgelegt wird. Dieser konstante Zahlenwert wird in einer Message-Box definiert. Beide Werte werden zunächst jeweils in einen Signalwert umgewandelt, um anschließend miteinander multipliziert zu werden. Allerdings durchläuft der Signalwert des Umdrehungswertes zuvor noch ein Tiefpassfilter mit sehr niedriger Grenzfrequenz (hier: 0,6 Hz). Aus



einer sprunghaften Werteänderung wird somit ein weicher Verlauf, vergleichbar mit der Ladekurve eines Kondensators. Zu Anfang steigt der Wert schnell, um sich im weiteren Verlauf asymptotisch dem Maximum anzunähern, wie in Abb. ZAHL prinzipiell abgebildet. Im Höreindruck gleicht dies der Massenträgheit der bewegten Teile eines Motors.

Abb. 20: Ladekurve eines Kondensators⁸⁶

Um die Zahlenwerte für die jeweiligen Sinusoszillatorfrequenzen zu erarbeiten, wurden ausgehend

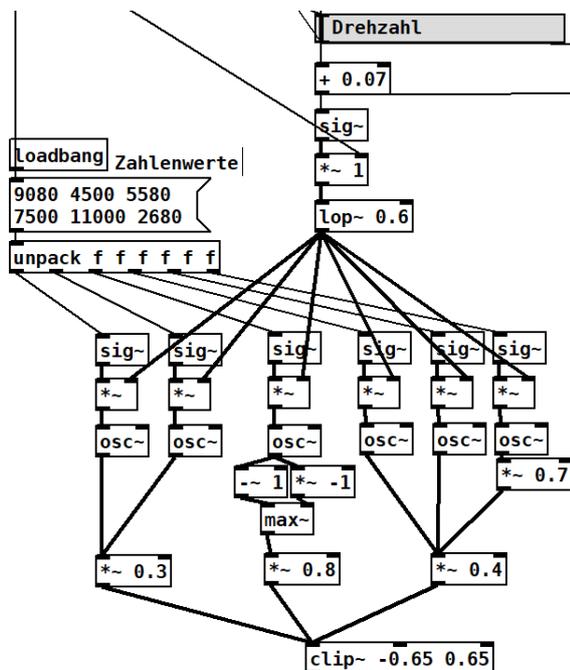


Abb. 21: Miniguantrieb

von einer Ausgangsfrequenz (hier 260 Hz) zunächst weitere Frequenzen mit harmonischem Verhältnis zueinander berechnet, die dann jeweils so erhöht oder gesenkt wurden, dass durch ihre anschließende Überlagerung unterschiedlich auffällige Schwebungen entstanden. Überlagern sich zwei Schwingungen mit annähernd gleicher Frequenz und gleicher Amplitude, so entsteht eine Schwingung, deren Amplitude sich in periodischen Abständen von 0 bis zum Doppelten der jeweiligen Ausgangsamplitude ändert. In diesem Fall ist von einer vollkommenen Schwebung die Rede. Variieren die Amplituden der sich überlagernden Schwingungen jedoch, so ist die sich periodisch ändernde Amplitude der entstehenden Schwingung geringeren Schwankungen unterworfen.⁸⁷ Dieser

Effekt wurde bei der Addition der unterschiedlich lauten Schwingungen des hier dargestellten

Synthesystems ausgenutzt, um so ein motorähnliches Geräusch zu erzeugen. Insbesondere bei niedriger Drehzahl sind diese Schwebungen deutlich hörbar. Die durch die Zahlenwerte festgelegten Initialfrequenzen wurden nach persönlichem Höreindruck so ausgewählt, dass der Gesamtklang ein tonales Zentrum um 558 Hz sowie geräuschhafte, atonale Nebenklänge sowohl über als auch unter dieser Mittenfrequenz aufweist. Da diese den dominantesten Klanganteil liefert, wurde die

⁸⁶ Joachim Herz Stiftung (2020) abrufbar unter:

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/kondensator-kapazitaet/grundwissen/ein-und-ausschalten-von-rc-kreisen>

⁸⁷ Vgl. Dickreiter (2009): S. 47

Sinusschwingung (mittlerer Oszillator) mit der Maximalfunktion in eine obertonreichere Schwingung umgewandelt. Alle Schwingungen wurden zunächst individuell oder in Paaren im Lautstärkepegel angepasst und dann zusammen in ein Clipping-Objekt gesendet, welches die Signale zunächst addiert und das resultierende Signal anschließend jenseits des Bereiches von -0,65 bis 0,65 des Amplitudenwerts clippt. Dies bewirkt eine rauere, noch obertonreichere Klangstruktur. Das inharmonische Verhältnis zwischen den Tonhöhen betont außerdem den mechanischen und rauen Klangeindruck des Geräts.

Ein besonderer Vorteil dieser Synthesemethode ist die unbedingte Abhängigkeit der Klangtonhöhe vom Umdrehungswert. Auf diese Weise spiegelt der erzeugte Klang immer die Drehzahl des Motors wider, selbst wenn der Hochfahrvorgang unterbrochen und dann wieder aufgenommen werden sollte. Wäre das Signal nur mit einem Initial- und Stopp-Event verknüpft, würden solche Unterbrechungen zu einem Springen der Tonhöhe führen, da der Startwert für das Stopp-Event festgelegt ist und nicht die momentane Drehzahl berücksichtigt.

Die Drehzahl des Motors macht sich auch in seiner Lautstärke bemerkbar. So ist er im Leerlauf sehr leise und wird mit zunehmendem Umdrehungswert lauter. Um die Lautstärke stärker als proportional zu einer steigenden Drehzahl zu erhöhen, wird diese von einem dedizierten System ausgelesen und durch eine Potenzfunktion so verändert, dass sie leicht überproportional ansteigt. Dieses Ergebnis wird anschließend mit dem fertigen Motorsignal multipliziert und beeinflusst dessen Amplitude entsprechend. Das Hörbeispiel 012 demonstriert das Zusammenspiel der einzelnen Oszillatorgruppen sowie deren Verhalten während des Betriebs.



Durch die enorm schnelle Feuerrate einer Minigun ist es ausnahmsweise nicht sinnvoll, jedem Schuss, der in der Spielwelt erfolgt, separat einen Klang zuzuweisen. Im Gegensatz zu den Patches der anderen realen Waffentypen wird der eigentliche Schuss der Minigun daher nicht durch die Spiele-Engine, sondern ebenfalls durch die Drehzahl gesteuert. Ein System prüft, ob die nötige Umdrehungsgeschwindigkeit erreicht ist (0,1), und aktiviert bei positivem Ergebnis ein Metronom-Objekt, das im Abstand von wenigen Millisekunden ein Bangsignal an das Schussystem des Haupt-Patches sendet. Es steuert dementsprechend direkt die Feuerrate der Schüsse. Fällt der Umdrehungswert unter 0,1, so deaktiviert das System das Metronom. Dasselbe System aktiviert bei Erreichen des Wertes 0,1 zusätzlich noch ein weiteres Metronomsystem (siehe Kommentar im Patch „*Feuersoundvariation*“), welches die im ersten Metronom festgelegte Feuerrate kontinuierlich zwischen 28 ms und 25 ms variiert. Somit ergibt sich ein dynamischer Klang des Dauerfeuers, der sich durch die fließenden Änderungen der Zeitabstände zwischen den Schüssen so geringfügig ändert, dass das Klangbild in der Wahrnehmung natürlicher und weniger synthetisch wirkt.



7.5 Projektilschockwelle (N-Wave)

Die durch den Überschallprojektilflug verursachte Schockwelle ist durch einen rapiden Anstieg auf ein positives Überdruckmaximum mit darauffolgendem, ebenso schnell erreichtem Unterdruckminimum gekennzeichnet. Aufgrund der Ähnlichkeit ihrer Erscheinung in grafischer Darstellung mit dem Buchstaben N, wird dieses non-lineare Verhalten auch als N-Welle bezeichnet. Das Zeitintervall zwischen Ober- und Unterdruck verhält sich proportional zur Größe des Projektils.⁸⁸ Prozedural kann

⁸⁸ Maher (2006): S. 2 f.

dieses Verhalten simpel durch den bereits vorhandenen Parameter der Kalibergrößer gesteuert werden.

Das Signal wird wieder einmal durch ein Hüllkurvenobjekt `vline~` erzeugt. Der Anstieg auf 100 % des positiven Amplitudenwerts erfolgt innerhalb einer Millisekunde, ebenso wie das Zurückfallen des negativen Minimums auf den Ausgangspunkt. Entscheidend ist das Zeitintervall zwischen den beiden Amplitudenmaxima. Es ist bestimmt durch den Wert des linken Inlets und gibt die Dauer der Werteveränderung von + 1 auf - 1 an. Dieser wird von einer Umrechnungsfunktion im Hauptpatch

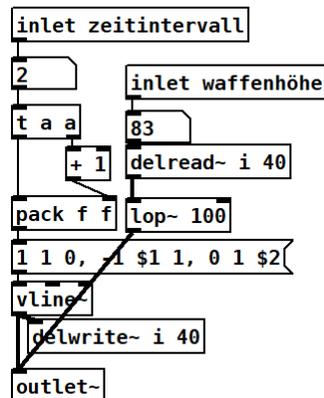


Abb. 22: Schockwellengenerator

gesendet, welche vereinfachend die aktuelle Kalibergröße so in einen Millisekundenwert umrechnet, dass für Neunmillimetergeschosse 2 Millisekunden berechnet werden. Dieser Wert nimmt in der Hüllkurvenfunktion den Wert \$1 an. Das Zurückschwingen der Amplitude auf 0 erfolgt stets 1 ms nach dem Erreichen des Minimums. Dies wird mit der Addition von 1 zum \$1 Verlaufswert gewährleistet. Um die gedämpfte Bodenreflexion in Abhängigkeit zur Projektillentfernung zum Boden abzubilden, wird die erzeugte Schockwelle mit einem Delay verzögert, das den Bodenabstand widerspiegelt, und anschließend mit einem Tiefpassfilter gedämpft. Selbstverständlich ist eine Echtzeitberücksichtigung der Projektilhöhe sehr einfach in ein solches Synthesystem einzubeziehen, sofern die Physik-Engine des Spiels entsprechende Werte auslesen kann.

014
SchockW
01

7.6 Schallverzögerung in Abhängigkeit von Distanz und Projektilflug

Die Synthese der vom Projektilflug verursachten Schockwelle geschieht losgelöst von den restlichen Bestandteilen des gesamten Synthesystems, da sie sowohl im Klangbild, als auch in der Spielwelt als eigenständiges Element existiert, das sich vom Spieler weg durch den Raum bewegt. Folglich wird dieser Klang in Abhängigkeit von der Position des Audiolisteners entsprechend gesondert von den anderen Klangelementen hörbar. Befindet sich der Audiolister entlang der Schusslinie, beispielsweise 340 m vom Schützen entfernt, so ist die Schockwelle eines mit Überschall fliegenden Projektils früher beim Audiolister hörbar, da der restliche Schall eine längere Zeitdauer benötigt, um an dieser Position „anzukommen“. Bei 340 m Entfernung wäre dies ca. eine Sekunde.

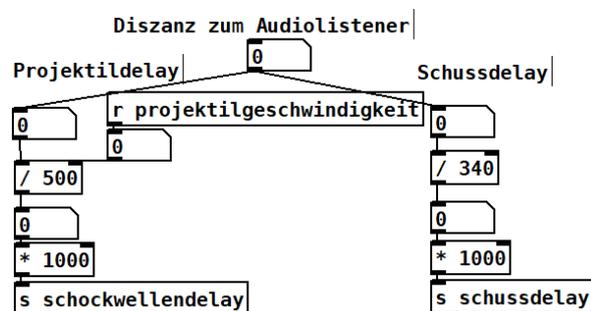


Abb. 23: Verzögerungsfunktion für Schockwelle und Schuss

Um diese entfernungsbedingte Klangverzögerung zu ermöglichen, wird die Synthese von Schussgeräusch und der Schockwelle abhängig von Parametern verzögert, welche durch die Engine festgelegt werden. Hierfür liefert sie Zahlenwerte für die Entfernung des Audiolisteners zum Schützen und die Geschwindigkeit des Projektils. Die Distanz wird im Falle der Schockwelle durch die Projektilgeschwindigkeit dividiert und

anschließend mit 1000 multipliziert um einen Sekundenwert zu berechnen. Zur Berechnung der Verzögerung des restlichen Schussgeräuschs erfolgt diese Berechnung mit der Schallgeschwindigkeit (ca. 340 m/s) als Faktor. Selbstverständlich wäre es prozedural auch möglich, die von der Temperatur abhängige Beeinflussung der Schallgeschwindigkeit durch einen entsprechenden Parameter korrekt nachzubilden. Zwar wäre dies in einem Spiel wie *No Mans Sky* besonders interessant, da sich die

Temperaturverhältnisse der unterschiedlichen Planeten stark unterscheiden. Das ist jedoch in der hier dargestellten Spielsituation selbstverständlich unbedeutend. Trotzdem zeigt dieses Beispiel auf, wie einfach ein prozedurales Synthesystem durch weitere Parameter entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Spielwelt gesteuert werden kann, wenn die Physik tiefgehend genug systematisiert ist.

7.7 Beeinflussung des LOAD durch Distanz sowie Mixing-Funktionen

Wie bereits angemerkt, stellt die mögliche Anpassung des Detailgrades eines Synthesystems einen einzigartigen Vorteil der prozeduralen Vertonung dar. Abhängig von der Distanz des Schützen zum Hörer wird der Klang des Schusses nicht nur durch Filterung und Lautstärkeminderung des Gesamtklangs angepasst, sondern durch Reduktion des Gesamtklangs auf sein Grundgerüst durch Ausblenden einzelner Syntheseelemente. Zum einen gleicht dies eher der Wahrnehmung in der realen Welt, zum anderen bietet es auch Vorteile für das Mixing, da der reduzierte Klang sich besser in den Gesamtmix einfügt.

Durch die individuelle Steuerbarkeit der einzelnen Syntheseschritte können diese abhängig vom Distanzwert im Pegel reduziert oder abgeschaltet werden. Das designte Lautstärkeverhältnis zwischen den einzelnen Klangelementen ist, wie bereits erwähnt, nicht realitätsabbildend. Bei größerer Distanz zwischen Hörer und Schütze ist es deshalb erforderlich, die für kurze Distanz hervorgehobenen Elemente so im Pegel zu reduzieren, dass sich ein natürlicheres, realistischeres Klangbild ergibt. Ein Beispiel wäre hierfür ein schnellerer Abfall des Hülsenklangpegels, da dieser tatsächlich eher leise ist. Zudem weist er hauptsächlich hohe Frequenzen auf, die bei steigender Distanz schneller unhörbar werden, als tieffrequente Elemente wie der Detonationsimpuls 2. Wichtig ist hierbei, dass das modellabhängige Lautstärkeverhältnis der einzelnen Klangelemente zueinander durch eine Anpassung des *level of audio detail* nicht verloren geht. Vereinfachend kann das hier durchgeführte Verfahren wie folgt beschrieben werden.

Ausgehend vom Distanzwert soll ein Wert zwischen 1 und 0 berechnet werden, der sich bei steigender Entfernung asymptotisch dem Wert 0 annähert. Dieser *LOADgain-Wert* wird mit dem typabhängigen Pegelwert des betreffenden Klangelements multipliziert und mindert so dessen Lautstärke. Je nach Bedeutung im psychoakustischen Grundgerüst des Klanges und seinem Frequenzspektrum wird der distanzabhängige Pegelabfall der einzelnen Klangelemente durch einen dediziert festgelegten *Dämpfungs-Faktor* zusätzlich beschleunigt. Der Hülsenklang hat hier aufgrund seiner schnell abfallenden Frequenzbestandteile mit 0,2 den niedrigsten Dämpfungs-Faktor, der WKVK (ohne Resonanzverstärkung) mit 1 den höchsten. Diese Faktorwerte sind klangelementspezifisch und unabhängig vom Modelltyp.

Das hier vorgestellte Klangsynthesystem berücksichtigt ausschließlich einen Pegelabfall von kompletten Elementen. Selbstverständlich wären in der Umsetzung der LOAD-Reduktion eine Vielzahl aufwändigerer Programmierungen denkbar, wie bspw:

- Gänzlichliches Abschalten bestimmter Klangelemente ab einer bestimmten überschrittenen Entfernung
- Die leiseren, hochfrequenten Teile des Hülsenklangs werden bereits bei niedriger Distanz ausgeschaltet
- Reduktion des Verzerrungsgrades bei größerer Distanz

- Sofern die Typidentifizierung vernachlässigt werden soll: Deaktivieren bedeutender, ggf. ressourcenlastiger Syntheseschritte, bspw.:
 - Deaktivierung der Synthese des Detonationsimpuls 2 – bei ausgleichender Verlängerung des Det.i. 1, welcher dadurch auch tiefere Frequenzen erzeugt.
 - Deaktivierung einiger Vline~-Objekte der Bandpassfilter zur Erzeugung der Körpervibrationsresonanz

Daneben erfolgt zur Simulation von Distanzdämpfung auch entsprechend gesteuerte (geringe) Hoch- und Tiefpassfilterung.

In den analysierten Spieletiteln verändert sich das Pegelverhältnis zwischen den einzelnen Elementen, wenn zum Zielen angelegt wird. Hülsenklang und Mechaniken werden noch weiter hervorgehoben und der Gesamtpegel steigt leicht an. Ist ein prozedurales Synthesystem erst einmal erstellt, kann eine Beeinflussung einzelner Kennwerte, wie hier der Lautstärkepegel einzelner Patch-Elemente, mit sehr wenig Aufwand erfolgen. So bewirkt das Aktivieren eines Schalter-Objekts die Überschreibung des aktuellen Pegelwerts gewünschter Klangelemente und des Gesamtpegels.

7.8 Dedizierte Einstellungen für die einzelnen Modelle

Nachdem die Funktionsweise des Synthesystems nun erläutert ist, werden nun die waffentypspezifischen Einstellungen präsentiert. Insgesamt 40 verschiedene Steuergrößen formen den Klang der einzelnen Patch-Elemente. Wird im Spiel ein Waffentyp ausgewählt, aktiviert dies eine Überschreibung der Steuergrößen durch Laden eines Presets. Die Festlegung der einzelnen Werte bedeutet in diesem Zusammenhang das eigentliche Sounddesign. Das Demolevel-Video-Capture

Wie in Abschnitt 14 erläutert, schaffen kreuzmodale Metaphern assoziativ Bedeutung und können im Sounddesign von großem Nutzen sein. Neben absoluten Eigenschaften wie Tonhöhe oder Lautstärke kann ein Klang auch Assoziationen von Größe, Form oder Haptik kommunizieren.⁸⁹ Diese Zusammenhänge spielen bei der Bestimmung geeigneter Parameter für die einzelnen Typklänge eine wichtige Rolle. Das gezielte Erzeugen gewünschter Assoziationen hebt den Klang aus der dokumentarischen Ebene in die überwirkliche Ebene eines designten Klangs, um Bedeutung und Wirkung zu unterstreichen.⁹⁰ Jedoch ist es nicht das Ziel, die Eigenschaften der verschiedenen Modelle im Sinne einer „Hollywood-Realität“ zu überzeichnen, sondern lediglich die Charakteristika betreffender Typen herauszuarbeiten, um ein immersives und mit der visuellen Darstellung des Demolevels übereinstimmendes Klangerlebnis zu gewährleisten.

Vor der Erstellung der verwendeten Typ-Presets wurde zunächst ein „Standard“-Preset erstellt, das alle Parameter so einstellt, dass eine saubere Phasenlage, ein ausgeglichenes Lautstärkeverhältnis der Klangelemente sowie Delayeinstellungen für deren lückenloses Ineinanderfließen ein stimmiges Schussklangbild erzeugen. Dieses klingt nicht charakteristisch für einen bestimmten Typ, sondern dient als Startpunkt, von dem aus die Bewegung in eine gewünschte Richtung möglich ist. So fällt es leichter, die einzelnen Typen zu vergleichen und bestimmte Charakteristika eines Typs gezielt von dieser Basis ausgehend herauszuarbeiten. Die Einstellungen dieses Basiswerts werden nun etwas ausführlicher

⁸⁹ Vgl. Görne (2017): S. 110

⁹⁰ Vgl. Görne (2017): S. 115

dokumentiert, sodass sich bei der Beschreibung der Einstellungen für die einzelnen Modelle auf wichtige Besonderheiten konzentriert werden kann. Alle Preset-Patches sind im Anhang verzeichnet.

Zunächst ist noch anzumerken, dass mehrere ähnliche Schallsignale, die in einer Abfolge innerhalb von 40 ms wahrgenommen werden, durch den generalisierten Präzedenzeffekt⁹¹ zu einem Hörereignis verschmelzen können. Detonationsimpuls, Mündungsfeuer und WKVK sollten daher in diesem Zeitintervall wiedergegeben werden. Dieser Effekt kann auch aus designtechnischer Sicht von Nutzen sein, wie das M4-Preset in Abschnitt 7.9.2 zeigt.

Die Einstellungen zur Variation von Dauer, Lautstärke und Klangfarbe werden für das Standard-Preset nach einzelnen Klangelementen geordnet erläutert, um alle Möglichkeiten der Klangbeeinflussung aufzuzeigen.

Detonationsimpulse

Mit einem Releasewert von 50 ms für beide Detonationsimpulse (DI) weist der DI 1 ein geeignetes Verhältnis zwischen spitzem „Biss“ und noch hörbarem Abwärtsgleiten auf. Bei höherer Releasezeit wird er nicht nur länger, sondern auch dominanter und tiefer.⁹² Mit einem Pegelwert von 2 verschmilzt er mit dem DI 2, der weder verzerrt, noch durch den Waffenkörperresonanzfilter geleitet wird, zu einer druckvollen, aber nicht zu spitz klingenden Impulseinheit. Im Sinne eines klareren Klangbildes bei Dauerfeuer wird der Pegelwert des DI 2 nach dem ersten Schuss um 30 % reduziert.

Schockwelle

Die Verzögerungszeit der Schockwelle erfordert im Vergleich zu denen der restlichen Klangelemente eine besonders präzise Einstellung, da sie de facto gleichzeitig mit den ebenfalls sehr kurzen Detonationsimpulsen abgespielt wird. Kleinste Variationen der Verzögerungszeit erzeugen im Zusammenspiel dieser drei Elemente bereits hörbare Veränderungen im Pitch und bewirken zudem ein „stolperndes“ Klangbild. Um einen möglichst prägnanten Impuls zu erstellen, wird der Schockwellenklang kurz nach dem ersten Amplitudenmaximum des DI 2 platziert, so dass er seine komplette Schwingung im Bereich der Nulllinie der gesamten Wellenform vollzieht. Diese Position stellt sich im Klangbild als am verzerrungsfreisten heraus und stört den Klang des Detonationsimpulses nicht hörbar. Eine Verzögerung von lediglich 0.4 Millisekunden wird hierfür als Standard festgelegt.

Die Standardkalibergröße beträgt 9 mm. Wie bereits erwähnt, wird die Umrechnung der Kalibergröße in die Zeitspanne zwischen beiden Maxima der N-Welle so durchgeführt, dass diese für das Standardkaliber 5 ms beträgt.

Mündungssignatur

Der Klang der Mündungssignatur hat im Standard eine Releasezeit von 20 ms, wird nur leicht angezerrt und durchläuft keine Waffenkörperresonanzfilter. Er wird auf den Zeitpunkt des letzten Amplitudenabschwungs des DI 2 verzögert (9 ms) und seinerseits nach einer Millisekunde bereits durch das Hinzukommen des Waffenkörpervibrationsklangs eingefärbt.

⁹¹ siehe Abschnitt 13

⁹² Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Releasezeit nicht der tatsächlich wahrnehmbaren Länge des Klangs entspricht. Hörbar ist immer nur ein Bruchteil dieser Zeitdauer.

Waffenkörpervibrationsklang:

Der WKVK prägt den Klangcharakter besonders und setzt sich aus dem primären Vibrationsklang, einer nachgeschalteten Betonung der Resonanz und dem Rauschnachhall zusammen.

Das allgemeine Klangbild des WKVK wird maßgeblich durch die Bandpassmittenfrequenz, den Multiplikator und den Zahlenwert gesteuert. Diese formen das initiale Rauschen. Im Standard sind die Einstellungen so gewählt, dass eine ausgeglichene Mischung zwischen Rauschähnlichkeit und zentraler Frequenz des Zahlenwerts entsteht.⁹³ Das Standard-Delay beläuft sich auf ca. 10 ms und fällt somit größtenteils mit der Mündungssignatur zusammen. Die Decayzeit des Klanges beträgt 140 ms, von denen bei moderater Lautstärke aufgrund der Quadrierung der Amplitudenhüllkurve nur 60 ms im wahrnehmbaren Bereich liegen. Je höher die Decayzeit eingestellt ist, desto lauter und rauer wirkt der Klang. Die Lautstärke ist im Standard so gewählt, dass sich der Vibrationsklang nicht zu sehr von den anderen Klangelementen abhebt.

Waffenkörpervibrationsresonanz

Die Bandpassfilterreihe, welche die Körperresonanzen der Bauteile erzeugt, wird je nach Waffentyp in den Mittenfrequenzen der 8 Filter variiert, sodass ein Eindruck von unterschiedlichen Materialien, Größen und Beschaffenheiten entsteht. Der DI 1 und der WKVK durchlaufen eine gemeinsame Version dieses Filters.

Beim WKVK und der Mechanik lohnt sich jedoch eine dedizierte Kopie des Filtersystems, das individuell auf die entsprechenden Klangelemente eingestellt werden kann. Der WKVK durchläuft somit zusätzlich eine Version der Bandpassfilterreihe mit sehr hoher Güte, die je nach Typ erhöht oder gesenkt wird. Auch die Lautstärke dieser so zugefahrenen „reinen“ Resonanz ist prozedural variabel angesteuert und ist mit einem Pegelwert von 2 nur sehr leise beigemischt, da eine deutlich hörbare Resonanz dem Klang besondere Typcharakteristik verleihen würde.

Rauschhall

Der Startwert der gleitenden Mittenfrequenz des Bandpassfilters wird im Patch „linepitch“ genannt und beträgt im Standard 1100 Hz. Dieser Wert wird für die anderen Typen so gewählt, dass er die beabsichtigte Wirkung des Gesamtklangs unterstützt. Ein höherer Wert unterstreicht dank statistischer, aber auch semantischer Kreuzmodalität⁹⁴ einen spitzeren, kantigeren Typklang.

Mechanik

Die Mechanik-Bandpassfilterreihe wird lediglich mit sehr geringen Güten (0,1) zugefahren, um den Mechanikklang nur leicht mit den resonierenden Frequenzen zu akzentuieren. Die entscheidende Beeinflussung entsteht in der Variation der Tonhöhe der einzelnen Klicks sowie dem

⁹³ Ein höherer Zahlenwert führt zu einer höheren Grundvibrationsfrequenz des gesamten Körpervibrationsklangs, welche einen entsprechend kleineren Waffenkorpus verklanglicht. Wie dominant diese im Gesamtklang wirkt, wird durch den Multiplikationsfaktor bestimmt. Je höher dieser gewählt ist, desto mehr nähert sich das Ausgangssignal einem weißen Rauschen an und die Zahlenwertfrequenz wird schwerer hörbar.

⁹⁴ siehe Abschnitt 14

Beschleunigen/Verlangsamen des Zeitwertes der Delayketten. Im Standard sind diese Werte 1 und verändern den initialen Klang somit nicht. Das erste Klicken der Mechanik erklingt nach 51 ms, sodass es noch zur Hälfte vom ausklingenden WKVK verdeckt wird, während Hülsenklang und zweites Klicken gut gesondert und unaufdringlich hörbar sind.

Hülsenklang

Im Standard dominiert der tiefere Hülsenklangteil (im Patch: pd huelsenlow) mit einer Basisfrequenz von 10900 Hz⁹⁵ und einem Intensitätsfaktor von 30 und moderater Decayzeit. Der höhere Hülsenklangteil ist mit einer Intensität von 1,2 zwar deutlich leiser, hält jedoch dafür mit 200 ms länger an.

Typgain

Durch Festlegen eines „Typgain“-Wertes, kann der Lautstärkepegel des Gesamtklangs für jeden Waffentyp hervorgehoben oder dem Rest angeglichen werden.

Die Hörbeispiele dieses Abschnitts veranschaulichen den Aufbau der einzelnen Typ-Klänge indem die einzelnen Klangelemente nacheinander dem Gesamtklang hinzugefügt werden. Die Reihenfolge ist hierbei stets:

DI 1 – DI 2 – Mündungssig. – SchockW – WKVK – Resonanzen – Mechanik – Hülsenklang – RauschNH

7.8.1 AK 47

Attribute für den gewünschten Klang dieses Modells sind *klappernd*, *rau* und *mechanisch*. Insbesondere in analysierten Spieletiteln ist die Mechanik bei diesem Typ hervorgehoben und auch ein prominenter Hülsenklang ist ein vielbenutztes Mittel den Charakter dieses Modells einzufangen. Insgesamt sind die einzelnen Klangelemente durch höhere Verzögerungen stärker voneinander getrennt wahrnehmbar. Die dadurch verstärkten Amplitudenschwankungen erzeugen ein raues Klangbild.⁹⁶ Das Hörbeispiel 015 demonstriert den Aufbau des Schussklangs in



Ein besonders lauter **Detonationsimpuls** 1 klingt in Kombination mit einem etwas gedämpften DI 2 weniger nach präziser Energiebündelung als bei anderen Typen und rückt auch die darauffolgenden Klangelemente in ähnliches Licht. Der **Waffenkörpervibrationsklang** ist von gleicher Lautheit und durch eine Mittenfrequenz von 4000 Hz hochfrequenter als der Standard, jedoch noch nicht hell. Ein leicht abgesenkter Multiplikator (4750) betont die Mittenfrequenz und die moderat niedrige Zahlenwertfrequenz von 250 Hz. Der Klang wirkt dadurch hart, aber nicht kreischend. Durch eine längere Decayzeit spiegelt er deutlicheres Durchrütteln der Bauteile wider. Die Bandpassfiltermittenfrequenzen der **Waffenkörperresonanz** sind mit einer vergleichsweise niedrigen Güte (55) so gewählt, dass ein stark metallischer, leicht angezerrter, aber noch nicht kreischender Klang ohne eine hervorstechende zentrale Frequenz entsteht. Durch die niedrigere Güte wird der Resonanzklang lauter und muss nur leicht beigemischt werden. Die Klangfarbe bewirkt im Sinne des

⁹⁵ Die im Vordergrund hörbare Frequenz des tieferen Hülsenklangteils ist immer die Hälfte der Basisfrequenz.

⁹⁶ Vgl Görne (2017): S. 112

kreuzmodal korrespondierenden Reizes der Ortsfrequenz (Oberflächenstruktur eines Objektes) das Bild einer nicht zu rauhen, aber kantigen Form.

Mit einem Delayzeitverhältnis von 1,2 werden die einzelnen Klicks der **Mechanik** in größeren Zeitabständen nacheinander abgespielt. Es resultiert ein klapprigerer, besser verfolgbare Mechanikklang. Dessen zweite Klickgruppe ertönt erst mit Vollendung der Feuerrate von 100 ms, sodass im Dauerfeuer nur die erste Klickgruppe und die ersten 10 ms des spät erklingenden, hochfrequenten **Hülsenklangs** wahrnehmbar sind. So tritt der nächste Schuss direkt an die Stelle der zweiten Klickgruppe und erhält durch den Anfang des Hülsenklangs eine spitze, metallische Note. Beim letzten Schuss des Dauerfeuers sowie beim Einzelschuss sind diese beiden Elemente sauber getrennt vom Rest des Klanges hörbar.

Schalldämpfer

Für dieses Modell wurde zusätzlich eine schallgedämpfte Version in das Demonstrationslevel eingefügt. Um einen deutlich weicheren Detonationsimpuls zu erzeugen, wird die Releasezeit des ersten Detonationsimpulses um ein Vielfaches erhöht (290 ms). Dies sorgt für einen längeren, leicht tonalen und sanft klingenden Downsweep.



Der Waffenkörpervibrationsklang wird stark im Pegel reduziert, um dem Gesamtklang Schärfe und Rauheit zu nehmen. Trotzdem soll die Resonanz der vibrierenden Bauteile hörbar bleiben, die im Gegenzug durch eine besonders hohe Bandpassfiltergüte und entsprechende Verstärkung herausgearbeitet werden, sodass sie gerade wahrnehmbar bleiben. Die Hervorhebung der eigentlich leiseren Mechanik sowie des Hülsenklangs vermittelt zusätzlich den Eindruck eines insgesamt sanfteren Schussgeräuschs, dessen tatsächliche Lautstärke jedoch nicht viel leiser als die der restlichen Schussklänge wahrgenommen wird. Dieses Vorgehen ist für alle Waffentypen ebenso einfach durchführbar.

7.8.2 M4

Die zu verklänglichenden Attribute dieses Typs sind *effizient*, *fest* und *präzise*. Das Schussgeräusch zeichnet sich durch einen verschmolzenen, kurzen Stoß aus, in dem die einzelnen Elemente besonders als Einheit wirken und kein Element herausragt. Die vollständige Wiedergabe aller Elemente sollte deshalb innerhalb der Feuerrate erfolgt sein. Diese ist mit 85 ms relativ schnell, weshalb die Delay- und Releasezeiten der einzelnen Elemente besonders kurz gewählt sind.



Da hierdurch selbst Mechanik und Hülsenklang bereits nach 27 bzw. 30 ms erklingen, bekräftigt der generalisierte Präzedenzeffekt die Wahrnehmung des gesamten Schussklangs als ein verbundenes, in sich geschlossenes Ereignis, das besonders in Kontrast zu den anderen, aufgeteilt wahrnehmbaren Typklängen steht.

Die M4 hat mit einer Releasezeit von 40 ms den kürzesten **Detonationsimpuls** 1. Das hörbare Klicken ist besonders spitz, um im Zusammenspiel mit dem Vibrationsklang dessen tiefer und dumpfer gehaltenen Klang mit etwas Schärfe⁹⁷ zu versehen. Er ist daher mit einem Lautstärkefaktor von 2,1 leiser beigemischt, sodass er mit dem Rest der „Knall“-Elemente⁹⁸ verschmilzt. Auch der DI 2 klingt mit

⁹⁷ Vgl. Görne (2017): S. 115

⁹⁸ Mit „Knall“-Elementen sind hier DI 1 & 2, Mündungssignatur, Projektilschockwelle und WKVK gemeint.

einem Pegel von 1,13 nicht übertrieben kraftvoll, da er sonst den präzisen Klang der M4 verwaschen würde.

Die **Mündungssignatur** fällt mit dem **WKVK** zusammen, der das wichtigste Element im Klang dieses Typs ist und aus einem klaren, nicht kratzigen Stoß besteht (Decayzeit nur 112 ms). Durch eine hohe Mittenfrequenz ist der Klang des Rauschens höher angesiedelt, gleichzeitig wird die Mittenfrequenz durch einen sehr geringen Multiplikator betont, welcher auch dafür sorgt, dass die besonders hohe Zahlenwertfrequenz von 540 Hz sehr gut zu hören ist. Im Gesamtbild ergibt sich so ein dumpfer, weicher Rauschstoß, der sanfte, unverzerrt klingende Höhenanteile aufweist. Dieser Frequenzbereich wird durch leises Beimischen von glatten, relativ tonalen Resonanzen mit einer heraushörbaren, *fundamental wirkenden*⁹⁹ 560 Hz-Resonanz untermauert. Die **Vibrationsresonanz** klingt wie ein dumpfes, glattes Klopfen und ist nur leicht beigemischt, um sich so gut in den sehr kurzen Stoß einzufügen.

Um die Impulshaftigkeit des Vibrationsklangs nicht aufzureiben, wird der hochfrequent beginnende Rauschhall (1500 Hz) fast zeitgleich mit dem WKVK abgespielt und klingt nach kürzester Zeit, fast wie abgehackt, aus.

Der **Mechanikklang** ist bei diesem Modell sehr nützlich, um die schnelle und präzise Funktionsweise des Geräts klanglich darzustellen. Die Zeitspannen zwischen den einzelnen Klicks werden durch besonders niedrige Multiplikationsfaktoren von 0,6 für die erste Klickgruppe und 0,4 für die zweite enorm verkürzt, was zu einem schnellen, spitzen Mechanikklang führt. Dieser wird zusätzlich mit einer moderat eingestellten Bandpassfiltergüte (0,3) von Resonanzen eingehüllt und durch die Pitchsteuerung um 20 % in der Tonhöhe angehoben und klingt somit feiner. Mit einem kurzen Delay von 27 ms erklingt der Mechanikklang fast zeitgleich mit der Waffenkörpervibration, was zu einem kurzen und effizient klingenden Schussgeräusch führt. Die Lautstärke der Mechanik ist so niedrig gewählt, dass sie nur leicht wahrnehmbar ist und den Fokus nicht von den Impulsen wegzieht.

Auch der **Hülsenklang** ist kurz, schnell (Delay 30 ms), hochfrequent und leise. Im Gegensatz zu den anderen Waffentypen ist er fest mit dem Schussklang verwoben und verleiht ihm eine kantige Note. Durch die Überlagerung mit dem vergleichsweise dumpfen und tiefen WKVK wirkt die hoch und spitz gewählte Klangfarbe des tieferen Hülsenklangteils ausgleichend im Frequenzspektrum des Gesamtklangs.

7.8.3 Sniper

Dieser Typ ist nicht vollautomatisch und bedarf keiner Rücksicht auf Dauerfeuer. Der zu erzielende Charakter ist *wichtig*, fast schon *lärmend* und *druckvoll*.

Beide DIs weisen eine verlängerte Releasezeit auf, was zu einem tieferen, mächtiger klingenden Gesamtimpulsklang führt¹⁰⁰. Um die größere Lauflänge darzustellen, sind **Mündungssignatur** und WKVK um ein paar Millisekunden verzögert. Der **WKVK** steht bei diesem Typ besonders im

⁹⁹ Die Waffenkörpervibrationsresonanzen werden mithilfe einer achtfachen Bandpassfilterreihe erzeugt. Für die Resonanzzeugung der verschiedenen Waffentypen wurden meist Frequenzeinstellungen ausgewählt, die eine oder mehrere gut heraushörbare Frequenzbereiche beinhalten. Sind diese im Vergleich zu den anderen Mittenfrequenzen besonders tief, werden diese ggf. als Fundamentale wahrgenommen. Da dem nicht so ist, wird hier der Ausdruck „*fundamental wirkend*“ verwendet.

¹⁰⁰ Vgl. Görne (2017): S. 111 (Basskräftige Klänge vermitteln Kraft und Stärke des klingenden Objekts.)

Vordergrund, hält mit einer Decayzeit von 1200 ms länger als alle anderen Klangelemente an und ist somit fast eine Sekunde hörbar. Durch einen hohen Multiplikator ist das Signal rauschähnlicher. Um die dadurch entstehenden Höhen abzumildern, wird die Mittenfrequenz auf niedrige 1900 Hz festgelegt. Eine hohe fundamental wirkende **Resonanz**frequenz von 1216 Hz fällt am Anfang des langgezogenen WKVK nur scheinbar nach unten (ist jedoch statisch). Dieser Eindruck wird durch eine Startfrequenz des gleitenden **Rauschalls** von 1200 Hz zusätzlich verstärkt. Die Filterfahrt dauert fast 3 Sekunden an, ist aber nur ca. eine Sekunde deutlich hörbar.

Insgesamt klingt der WKVK durch diese Überzeichnung nicht mehr so realistisch wie in den anderen Typen, zeigt jedoch die Flexibilität des Synthesystems auf. Es handelt sich bei keinem der Patch-Elemente um zufällige „Klanginseln“, da selbst starke Werteveränderungen zu vorhersehbaren, den darzustellenden Vorgängen entsprechenden Klanganpassungen führen.

Die **Mechanik** wird besonders verlangsamt und nach unten gepitcht, was in Kombination mit einem tiefen, langen **Hülsenklang** den schwerfälligeren, nicht automatischen Charakter unterstreicht.

7.8.4 Leichtes MG

Dieser Typ zeichnet sich durch eine besonders schnelle Feuerrate von 75 ms und die seitlich gut sichtbare Patronennachfüllmechanik aus. Das Modell soll der Schnelligkeit dementsprechend *heller* und *präzise*, jedoch *mechanischer* als die M4 klingen.

Neben kurzen Verzögerungszeiten zwischen den Klangelementen schafft der **WKVK** mit einer Mittenfrequenz von 5000 Hz und einem sehr hohen Multiplikator von 6500 einen hellen, beinahe schon luftigen Stoß. Eine längere Decayzeit von 170 ms gibt dem hellen Klang etwas mehr Wucht zurück.

Kurz und unverzerrt wirkende, durch hohe Güte betonte **Resonanzen** werden moderat beigemischt, um die durch den großen Korpus wandernde Schockwelle widerzuspiegeln.

Die Delayzeitverhältnisse sind für die erste Klickgruppe der **Mechanik** extrem kurz gewählt. Wie bei der AK wird die zweite Klickgruppe im Dauerfeuer durch den nächsten Schuss ersetzt und ist nur am Ende des Dauerfeuers bzw. beim Einzelschuss hörbar und kann deswegen mit moderaten Delayzeitverhältnissen wiedergegeben werden. Der **Hülsenklang** ist von kurzer Dauer und etwas tiefer als der der AK 47.

7.8.5 Schweres MG

Das M2 Kaliber 50 dient hier als Beispiel für ein stationäres Maschinengewehr mit großem Kaliber und *wuchtigem, brachialem* Klang und langsamerer Feuerrate (130 ms). Die einzelnen Klangelemente sind hier am längsten voneinander entfernt, was den *klappernden, rauhen* Charakter unterstreicht.

Eine besonders druckvolle Einstellung der **Detonationsimpulse** verklanglicht die Explosion der 50 mm Patronen. Eine stärker verzögerte **Mündungssignatur** bereitet den Weg für den späten, rauhen und besonders langen **WKVK**. Dieser klingt mit der extrem tiefen Mittenfrequenz von 1500 Hz besonders kräftig, jedoch etwas zu weich. Dies gleichen **Resonanzen** aus, die sehr verzerrt klingen, mit einem breiteren Kreischen um 2700 Hz sowie einem gesondert wahrnehmbaren Klopfen um 900 Hz. Dies



verleiht dem dunkleren, langen WKVK durch laute Beimischung hochfrequente Fixpunkte, welche die Wucht der schweren, aneinanderreihenden Metallbauteile verklanglichen.

Auch der tieffrequent gestaltete **Rauschhall** spielt hier eine wichtige Rolle. Mit einer Decayzeit von 1900 ms ragt er kurz über den WKVK hinaus und verleiht dem Gesamtklang ein etwas weiches, natürlicheres Ausklingen.

Besonders betont sind bei diesem Modell auch **Mechanik** und **Hülsenklang**. Durch die Manipulation der Delayzeitverhältnisse klingt die erste Mechanikklickgruppe ruckelig und schwerfällig, während die zweite deutlich schneller und härter erfolgt, was den Mechanikklang energetischer wirken lässt. Der Mechanikklang wird zwar anfangs vom langen WKVK teilweise überdeckt, sticht mit der zweiten Klickgruppe zusammen mit dem erst nach 118 ms eintretenden, tieffrequenten **Hülsenklang** hervor, was das langsame, schwergängige Klangbild verstärkt.

7.8.6 Minigun

Durch die extrem hohe Feuerrate von 25 ms bis 28 ms muss der Klang eines einzelnen Schusses so eingestellt sein, dass die Hauptmerkmale innerhalb von 28 Millisekunden hörbar sind, andernfalls klingt das Dauerfeuer chaotisch und zu abgehakt. Im Zentrum stehen die **Detonationsimpulse** mit einem besonders kräftigen DI 2, der den brachialen Charakter des Geräts verklanglicht. Dessen Releasezeit ist auf 35 ms verkürzt, was zu einer höheren Initialfrequenz führt und den Frequenzbereich des Sweeps schmälert. So klingen die Impulse auch in Abständen von 25 ms noch klar.

Der **WKVK** ist tief und von moderater Länge. Er wird nur leise beigemischt, da er den Klang sonst zu sehr stören und die Detonationsimpulse aus dem Fokus rücken würde. Aufgrund der schnellen Feuerrate hat er keine Zeit sich zu entfalten und klingt daher im Dauerfeuer eher wie ein Dirac¹⁰¹-Stoß, bis das Dauerfeuer unterbrochen und er einmal vollständig hörbar wird.

Da die Minigun über ein Motorgeräusch verfügt, wird auf den **Mechanikklang** verzichtet. Die **Hülsen** haben ähnliche Klangeinstellungen wie beim schweren MG und sind durch einen Delaywert von 25 ms in Abhängigkeit von der Feuerrate (25 ms bis 28 ms) unterschiedlich gut hörbar.



¹⁰¹ Ein Dirac-Impuls, benannt nach dem Physiker Paul Dirac, bezeichnet einen kurzen Rechteckimpuls, der im Spektrum einen besonders breiten Frequenzbereich abdeckt. Da ein solches Spektrum gleichmäßig auf den Frequenzbereich verteilt ist, ist hier, ähnlich wie beim weißen Rauschen, oft von einem „weißen Spektrum“ die Rede. (Vgl. Dickreiter (2009): S. 606).

8. Analyse und Aufbau der Voltgunelemente (Modell)

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wurde das Konzept der Voltgun entworfen, um die Praktikabilität des prozeduralen Vertonungsansatzes unter Idealbedingungen zu überprüfen, d. h. ohne Realismusmaßstäbe alltäglicher Objekte und mit einem Klangerzeugungsprozess, der hervorragend für die Steuerung durch Parameter geeignet ist. In diesem Abschnitt werden die Funktionsweise des Geräts und dessen Aufbau erläutert. Dies bezieht die Erklärung physikalischer Klangerzeugungsprozesse manch nachgeahmter Klänge, sowie der als Inspiration dienenden Sounddesignvorbilder mit ein.

8.1 Analyse physikalischer Klangerzeugungsprozesse

Vor der Erstellung der Klänge, die mit Elektrizität assoziiert werden, gilt es, zunächst deren physikalische Entstehungsprozesse zu erläutern.

Wie Wasser hat auch Elektrizität selbst keinen Klang, sondern wird erst durch Bewegung und Interaktion hörbar. Der Klang, den wir mit EL assoziieren, rührt von der Wechselspannung von 230 V/50 Hz (bzw. 110 V/60 Hz in den USA) her, die an jeder haushaltsüblichen Steckdose anliegt. Daher lässt bereits eine obertonhaltige Schwingung von 50 Hz viele Menschen an Elektrizität denken.

Das Fließen elektrischer Ladung von einem höheren Potenzial zu einem niedrigeren wird als Strom bezeichnet und erzeugt ein magnetisches Feld, das ferromagnetische Stoffe in seiner Umgebung beeinflusst. Elektrizität, Magnetismus und Bewegung sind verknüpft. Die Theorie dieser elektromagnetischen Dynamik ermöglichte die Herstellung von Mikrofonen, Lautsprechern, E-Gitarren, Generatoren, Motoren usw. Außerdem lassen sich dadurch die Geräusche erklären, die wir mit Elektrizität verbinden. Ein Beispiel dafür wäre das Brummen von Metallobjekten, die sich in der Nähe von Magnetfeldern befinden.

Ein weites, für die Klanganalyse wichtiges Phänomen, ist die Erwärmung des Leiters, durch den ein Strom fließt. Durch Elektrizität erzeugte Hitze kann durch Ausdehnung der umgebenden Luft Geräusche verursachen. Im Normalfall stellt Luft zwar einen Nichtleiter ohne freie Elektronen dar, jedoch kann sie durch hohe Spannung ionisieren und damit leitfähig gemacht werden. Dieser Zustand hält jedoch nur kurz an, da sich dieser Leitweg schnell auflöst und kühlende, nichtleitende Luft nachströmt und der Funke stoppt. Wie in einem Kreislauf baut sich indessen erneut Ladung auf, und der Vorgang wiederholt sich in regelmäßigen Abständen. Die dabei entstehenden Geräusche reichen von leisem Knacksen sich entladender statischer Elektrizität bis zu lautem Knallen bzw. gewaltigem Donnern bei Blitzeinschlägen.¹⁰² Im Folgenden werden zwei weitere, den Klang beeinflussende Phänomene besprochen.

Phasenverschiebung: Werden zwei gleiche oder sehr ähnliche Signale individuell verzögert, entsteht eine Phasenverschiebung. Da ein Elektrizitätsfunke mit extrem hoher Geschwindigkeit propagiert, kommt die Ausstrahlungscharakteristik der Schallwellen eher einer Zylinderform als einer Kugelform gleich. Abhängig von der Funkenlänge und der Hörposition erreichen Teile des so entstehenden Signals bestimmte Punkte zu unterschiedlichen Zeiten, was dazu führt, dass viele, marginal unterschiedliche Kopien des Schallsignals im Zeitverlauf wahrgenommen werden. Dies führt zu einer langsamen Umverteilung des Spektrums, da die verschiedenen Signalteile zueinander zwischen Phasengleichheit

¹⁰² Vgl. Farnell (2010): S. 451 ff.

und Phasenverschiebung hin und herwechseln (Phasing). Die dadurch entstehenden Kammfiltereffekte prägen den Klang und verleihen ihm den charakteristischen Sound.

Resonanz: Der Klang eines Funkens in einem schalltoten Raum gleicht einem nahezu idealen Impuls. Ein Funkenklang ist daher in bedeutendem Maße von den Umgebungsmaterialien beeinflusst. Analysen zeigen daher meistens mindestens deutlich hörbare, echo- oder hallähnliche Resonanz.¹⁰³

8.2 Funktionsweise der Voltgun

Die Voltgun ist ein fiktives Gerät im Demonstrationslevel, das „Elektrizität“ in plasmaartiger Kugelform generieren, aufladen und verschießen kann. Durch Klicken der Maustaste wird der Ladevorgang initiiert, der den Elektrizitätsball (EB) für maximal drei Sekunden aufbaut, bis er abgeschossen wird. Dieser Vorgang kann zu beliebigem Zeitpunkt frühzeitig beendet werden, sodass der Ball mit der derzeitigen Ladung davonfliegt. Nach dem Abschuss muss das Gerät für eine gewisse Zeitdauer abkühlen, die davon abhängt, wie lange der Schuss geladen wurde. Alle Klangelemente sind so umfassend wie möglich vom Ladungszustand abhängig, der als Basisparameter für die Synthese dient. Die Parameter des Klangsynthesystems sind hier größtenteils gleichzeitig die Parameter, die das Klangobjekt auch auf der physischen bzw. grafischen Ebene des Programms steuern. Dies bietet auch den Vorteil einer geringeren Anzahl nötiger Rechenprozesse. Welchen Einfluss dieser Parameter auf die einzelnen Klangelemente hat, wird nach deren Vorstellung aufgezeigt.

8.3 Aufbau der Voltgun: Klangelemente und deren Vorbilder

Der Gesamtklang der Voltgun wird in neun eigenständige Klangelemente unterteilt, die sich an verschiedenen Designbeispielen oder auch teilweise an physikalischen Prozessen orientieren und in einer für die Erklärung sinnvollen Reihenfolge erläutert werden.

8.3.1 Brummen

Der Klangcharakter der Voltgun soll in erster Linie mit Elektrizität assoziiert werden. Unter anderem bewirkt dies ein elektrisch klingendes Brummen, das zufälligen Amplitudenschwankungen unterliegt. Wechselstrom in Europa von 50 Hz erzeugt wie bereits erwähnt ein Magnetfeld, das ferromagnetische Materialien in seiner Umgebung anziehen kann, zum Beispiel ein Netztransformator in einem Metallgehäuse. Die magnetische Kraft wirkt hierbei stets in dieselbe Richtung ohne abzustoßen, nämlich immer anziehend, was so zu einer Vibrationsfrequenz von 100 Hz führt. Das Brummen soll demnach eine Grundfrequenz von 100 Hz aufweisen.

8.3.2 Elektrizitätsball (EB)

Dieses Element verklanglicht in erster Linie das Geschoss aus Elektrizität, das während des Aufladevorgangs immer schneller seine Farbe wechselt (Blitzen), jedoch auch die bereits im Standbymodus vorhandene Grundspannung in der Erzeugungseinheit. Der Klang soll ebenfalls sehr „elektrisch“ klingen und sich im Hinblick auf seine Spektralverteilung in einem höherfrequenten Bereich bewegen als das Brummen. Der Klang soll in regelmäßigen Abständen pulsieren, wobei sich das Signal mit steigender Aufladung in Pitch und Wiederholfrequenz erhöht.

¹⁰³ Vgl. Farnell (2010): S. 453

8.3.3 Drehelement

Ein Bauteil, das sich ähnlich wie bei einem Induktionsmotor um seine eigene Achse dreht, soll sich, durch einen Motor betrieben, mit steigender Aufladung immer schneller um die Ladungsenergie bewegen, um diese so zu verstärken und den EB zu formen. Hörbar ist es auch im Standbymodus bei niedriger Drehzahl, da es die Grundspannung für die Elektrizitätsladung aufrechterhält. Ein rauher, kratziger Klang wird durch Frequenzmodulation in seiner Amplitude moduliert, um die Drehgeschwindigkeit darzustellen.

8.3.4 Antriebsklang

Der Antriebsklang soll als basskräftige Basis des Gesamtklangs dienen und stellt den Antrieb des Drehelements dar. Im Standbymodus soll das Klangbild an die Lichtschwerter aus den Star Wars-Filmen erinnern, deren Klang auf dem elektrischen Brummen von Filmprojektoren in Kombination mit dem Surren eines TV-Kabels basiert.¹⁰⁴ Die Fundamentalfrequenz des Antriebsklangs schwebt im Standbymodus bei ca. 100 Hz und steigt während des Ladungsvorgangs um bis zu 4 Oktaven an.

8.3.5 Peakverstärker

Wird die Voltgun länger als zwei Sekunden aufgeladen, wird der hohe Ladezustand durch ein hinzukommendes scharfes, aufsteigendes Geräusch verklanglicht, welches das Frequenzspektrum im Bereich des EB-Klangs breit ausfüllt und verstärkt.

8.3.6 Schussimpuls

Der Schussimpuls verklanglicht das Auslösen und anschließende Ausschwingen des *Plasma-Schussantriebs*.

8.3.7 Funkenknall

Im Moment des Abschusses ist des Weiteren ein elektrisch klingender Funkenknall zu hören, der durch die rasante Beschleunigung des Elektrizitätsballes verursacht wird.

8.3.8 Mechanik

Wie die anderen Waffentypen verfügt auch die Voltgun über einen Abzugmechanismus, der beim Starten des Ladevorgangs einrastet und nach Beendigung des Abkühlvorgangs wieder entriegelt wird.

8.3.9 Signale

Je nach Bereitschaftszustand sendet das Gerät zwei verschiedene Piepsignale. Versucht der Spieler während der Abkühlzeit einen Schuss aufzuladen, meldet das Gerät ein Fehlersignal (*Denied-Signal*), bzw. ein Bereitschaftssignal, sobald dies wieder möglich ist.

8.3.10 Abkühlklang

Um das durch den Aufladevorgang heiß gelaufene Gerät abzukühlen, treibt eine Düse kalte Luft durch den Korpus, was sich durch ein zischelndes Geräusch bemerkbar macht. Je heißer das Gerät ist, desto höher ist die Startfrequenz der Luftstöße, die während des Kühlvorgangs langsam sinkt.

¹⁰⁴ Vgl. Burt (2006): k. S.

8.4 Berechnung des Ladungsparameters

Wie der Antrieb der Minigun wird auch die Ladung der Voltgun mit dem Gedrückthalten der Maustaste aufgeladen bzw. entladen, sobald die Maustaste losgelassen wurde oder ein Schuss erfolgt ist. Da sich der Wert des Ladungsparameters direkt im Klang widerspiegeln soll, müssen Anstieg und Verringerung des Wertes besonders schnell aktualisiert werden, um einen fließenden Klang zu erzeugen. Diese Aktualisierung muss also schneller erfolgen, als es die von der Framerate abhängige Updatefunktion in Unity leisten kann. Deshalb wird diese Aufgabe direkt von Pure Data übernommen, sodass Unity lediglich einen Zahlenwert liefern muss, wenn die Maustaste gedrückt wird und wenn sie wieder losgelassen wird.

Der hierfür angelegte Pure Data-Patch (pd riseandfall) arbeitet also mit zwei Inputwerten: 1 (Maustaste gedrückt) und 0 (Maustaste losgelassen). Der fließende Werteanstieg erfolgt mithilfe mehrerer *Line*-Zählfunktionen. Vereinfachend ausgedrückt startet die Initialzählung beim ersten 1-Input und wird beim nächsten wieder gestoppt. Gleichzeitig gibt sie den aktuellen Ladungswert an die ablösende Zählfunktion weiter. Der Ladungswert ist so definiert, dass er stets auch als Millisekundenwert gelesen werden kann. Somit gibt er der ablösenden Zählfunktion sowohl Auskunft über den aktuellen Ladungszustand als auch über die bereits vergangene Ladedauer. Ausgehend von diesem Wert werden die Parameter der neuen Zählfunktion festgelegt, die angeben, in welchem Zeitraum die Zählung von welchem Startwert aus auf Null fallen soll. So wird ein gleichmäßiger An- und Abstieg des Ladungsparameters abhängig von seinem aktuellen Stand erzeugt, der sich bei beliebigem Abschusszeitpunkt korrekt verhält, d. h. einen stetigen Verlauf ohne Sprünge gewährleistet. Die so berechneten Werte von 0 bis 3000 werden durch den Parameter *Ladungvalue* angegeben.

9. Design der Voltgun (Methode & Implementierung)

Die Beschreibung des Designprozesses konzentriert sich besonders auf jene Klangelemente, die auf Elektrizitätsgeräuschen basieren, während das Design der rein fiktiven Elemente sich auf deren Verhalten abhängig vom Ladungvalue fokussiert.

Bevor die einzelnen Schritte der Klangsynthese beschrieben werden, gilt es jedoch zunächst, die zentralen Steuergrößen zu benennen, die jede weitere Klangerzeugung beeinflussen.

9.1 Vom Ladungvalue abgeleitete Steuergrößen

Vom Ladungvalue ausgehend werden in Abhängigkeit bestimmter Werte und Zustände folgende Parameter und Trigger berechnet bzw. aktiviert:¹⁰⁵

Parameter

Ladungpara: durch Exponentialfunktion umgewandelter Ladungvalue, der sich durch dynamischeres Verhalten besser zur Klangsteuerung eignet.

¹⁰⁵ Die genaue Funktionsweise des Systems ist zwar etwas umfassender als hier dargestellt, jedoch für den Fokus dieser Arbeit unwesentlich. Der komplette Patch kann im Anhang eingesehen werden.

Volumerise: Auch die Pegelverhältnisse sind abhängig vom LV. Dieser wird daher zur besseren Handhabung in einen neuen Parameter überführt, der für Ladungswerte von 0 bis 3000 entsprechend von 0.1 bis 1.1 ansteigt bzw. fällt. Diese Steuergröße wird als Volumerise-Parameter bezeichnet.

Trigger:

Loadtrigger: triggert Funktionen, die mit Beginn der Zählung ausgeführt werden sollen

Falltrigger: triggert Funktionen, die mit dem Abschuss des Elektrizitätsballes initiiert oder getriggert werden sollen

Cooldownintervall: markiert Anfang und Ende des Abkühlvorgangs

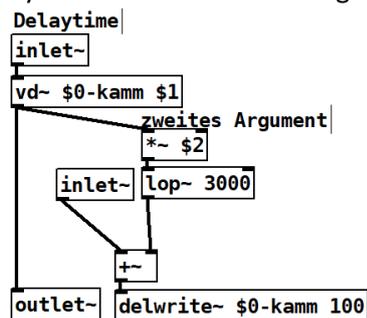
Inittrigger: markiert den Abschluss des Abkühlvorgangs und die Wiedereinsatzbereitschaft der Voltgun¹⁰⁶

9.2 Elektrizität

Als Vorlage für die Elektrizität verkörpernden Klangelemente dient Farnells „Electricity-Patch“¹⁰⁷, dessen Syntheseprozesse zur Erzeugung eines spieltauglichen Klangbildes verändert, erweitert und prozedural steuerbar gemacht wurde.

9.2.1 Kammfilter

Die in Abschnitt 8.1 beschriebenen Aspekte von Phasenverschiebung und Resonanz finden in einigen Syntheseketten Anwendung und werden deshalb durch einen dedizierten Subpatch berechnet, den



Kammfilter. Dieser Patch wird zur Verschiebung von Signalkopien benutzt und wirkt wegen der enthaltenen Feedbackschleife wie ein Resonator. Durch das linke Inlet bzw. das erste Argument des Objekts (\$1), wird die Delayzeit festgelegt. Das zweite Argument (\$2) legt die Skalierung fest, wie stark das Signal des zweiten Inlets als Feedback in das Delay geleitet werden soll. Wichtig ist, hierbei zu beachten, dass dieser Wert nicht größer als 1 sein sollte, um eine endlose Verstärkung des resultierenden Signals zu vermeiden.

Abb. 24: Kammfilter

¹⁰⁶ Auch wenn der Abschusszeitpunkt von mehreren Triggern markiert wird, ist eine Trennung im Interesse von besserer Steuerung und übersichtlicherer Programmierung.

¹⁰⁷ Vgl. Farnell (2010): S. 454 bis 457, Teile der hier verfassten Erklärungen, die hauptsächlich auf Farnells Text beruhen, sind daher trotzdem durch Fußnoten gekennzeichnet.

9.2.2 Brummen

Um das zufällig wabernde, surrende Brummgeräusch zu synthetisieren, werden zwei Phasor-Objekte mit annähernd gleicher Frequenz (99,8 & 100,2 Hz) addiert. Dies verursacht eine Schwebung, deren Frequenz durch die Differenz der Phasor-Frequenzen bestimmt wird und somit 0,4 Hz beträgt.

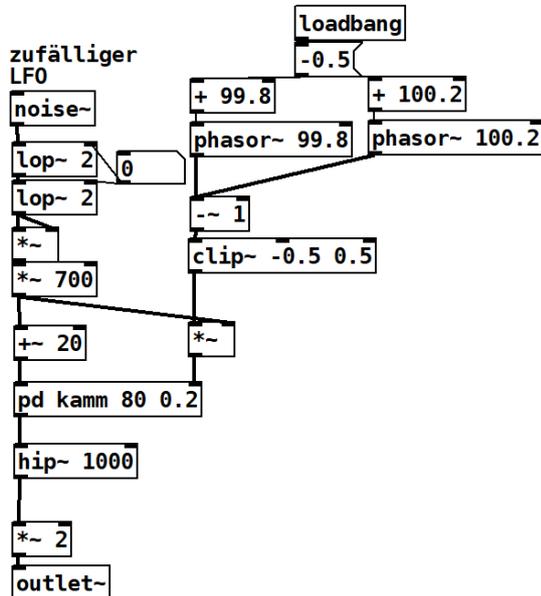


Abb. 25: Subpatch Brummen

Durch die Klangeigenschaften der Sägezahnwelle weist das Spektrum zwar bereits eine geeignete Frequenzverteilung mit dichter, zu den hohen Frequenzen hin abnehmender Obertonverteilung auf. Jedoch klingt dies noch zu statisch und synthetisch. Daher wird es zur Obertonanreicherung geclippt und die Amplitude wird durch einen randomisierten LFO moduliert. Der LFO wird durch ein Rauschsignal gespeist, dessen Frequenzanteile oberhalb von 2 Hz durch Tiefpassfilterung abgeschnitten werden.

Anschließend wird das modulierte, Schwebung aufweisende Signal in das rechte Inlet des Kammfilter-Objekts geleitet, während der Modulations-LFO in dessen linkes Inlet geleitet wird, um den zuvor erklärten Resonator-Effekt des Kammfilter-Subpatches zu nutzen.¹⁰⁸

Da auch der Antriebsklang und der Elektrizitätsballklang einen Großteil ihrer Spektralverteilungen um 100 Hz herum haben, wird das leise beigemischte Brummen durch ein Hochpassfilter mit der Grenzfrequenz von 1000 Hz auf seine höheren Frequenzanteile begrenzt, um den Gesamtmix klarer zu gestalten.

9.3 Elektrizitätsball

Der Elektrizitätsball (EB) ist das eigentliche Geschoss der Voltgun. Wie beim Brummen und dem Antriebsklang bilden 2 Phasor-Objekte (Phasor 1 und Phasor 2) mit Initialfrequenzen 99,8 Hz und 100,2 Hz die Grundlage für die Klangerzeugung des EB, um so ein harmonisches Klangbild zwischen Brummen und Antriebsklang zu gewährleisten.

Im Standbymodus erzeugt die 0,4 Hz-Schwebung den Eindruck von „Elektrizitätsschüben“. Bevor darauf eingegangen wird, wie sich diese abhängig vom Ladungswert verändern, wird zunächst erläutert, wie der gesamte Klang des EB erzeugt wird.

Der wichtigste Unterschied zum Brummen besteht in der aufwändigen Manipulation des Phasor 1-Signals, bevor es mit dem Signal des Phasor 2 gemischt wird. Im Rahmen dieser Manipulation entsteht ein Signal, das als *Zwitscherimpuls* bezeichnet und wie folgt erzeugt wird.

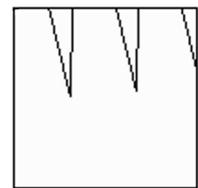
¹⁰⁸ Vgl. Farnell (2010): S.454

9.3.1 Zwitscherimpuls

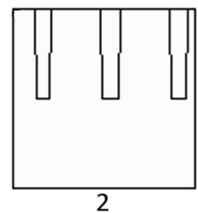
Ausgangspunkt der Erstellung des Zwitscherimpulses ist der Phasor 1, dessen Initialfrequenz sich auf ca. (-)99.8 Hz beläuft. Der Sägezahnverlauf des Signals wird durch eine negative Frequenzeingabe im Phasor-Objekt invertiert.

Das Signal wird zunächst mit einem LFO-Signal moduliert. Dieser *Modulator* wird durch weißes Rauschen erzeugt, das auf Frequenzbereiche von unter 1 Hz reduziert wird und durch eine Maximalfunktion stets eine Amplitude größer 0 aufweist. Auf weitere Eigenschaften des Modulators wird im Abschnitt *Steuergrößen des Modulators* eingegangen. Das modulierte Signal ist nun eine amplifizierte Version des Phasorsignals, dessen Amplitude in geringem Maße in geringem Maße zufällig schwankt.

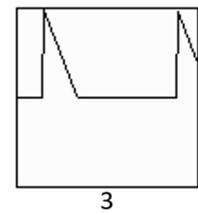
Dieses Signal wird nun dupliziert. Die *erste Version* wird durch eine Minimalfunktion für alle den Wert 1 übersteigenden Werte auf 1 begrenzt und liegt somit immer zwischen 0 und 1 (1).



Die *zweite Version* wird durch Multiplikation mit einem extrem hohen Wert und Kappung der Spitzen einer Rechteckwelle angenähert (2).

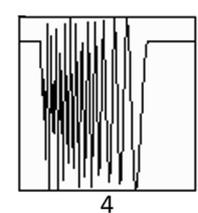


Diese Rechteckwelle wird nun von der *ersten Version* subtrahiert. Das Resultat ist eine Sägezahnwelle, die je nach Modulatoreinstellungen in ihrer Länge und Wiederholfrequenz variiert werden kann (3). (siehe Hörbeispiel 024)



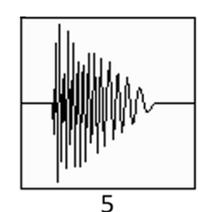
024
EB
01

Um die Spektralverteilung des Impulses steuerbar zu machen, wird das Signal erneut gesplittet. Einem Teil wird zunächst eine Konstante addiert, sodass er um diesen *Versatz* in Y-Richtung verschoben wird. Das Ergebnis wird quadriert und mit einem *Skalierungsfaktor* multipliziert, um anschließend eine Cosinusfunktion zu durchlaufen, die dem Signal einen sinusartigen Verlauf verleiht (4). (siehe Hörbeispiel 025)



025
EB
02

Als letzter Schritt wird dieses Signal mit der unveränderten Version der Sägezahnwelle multipliziert, die den Amplitudenverlauf ähnlich wie eine Attack-Release-Hüllkurve beeinflusst (5). (siehe Hörbeispiel 026)



026
EB
03

Steuerung der Spektralverteilung

Durch Variieren von *Versatzwert* und *Skalierungsfaktor* kann der Schwerpunkt der Spektralverteilung beeinflusst werden – ähnlich wie der *Multiplikator* und *Exponent* bei der Generierung des DI 1. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Frequenzanstieg des Impulses exponentiell verläuft. Folglich haben die höheren Frequenzanteile eines Impulses weniger Wellenzyklen als tiefe, ähnlich wie beim DI 1. Die Einstellungen entsprechen jenen aus Farnells Beispiel, da sie eine realistisch nach Elektrizität klingende Klangfarbe erzeugen.

Steuergrößen des Modulators:

Zur Verstärkung und für eine feinere Steuerung der Modulation wird das Modulationssignal zusätzlich mit einem *Modulationsfaktor* multipliziert und durch eine Konstante in Y-Richtung verschoben. Dieser Parameter wird hier als „Impulstonhöhe“ bezeichnet. Ein höherer Impulstonhöhenwert verkürzt die

Dauer eines Impulses und verschiebt gleichzeitig dessen Spektralverteilung signifikant in einen höherfrequenten Bereich. Dies wird noch eine wichtige Rolle bei der Klanggestaltung spielen. Ein höherer Modulationsfaktor verstärkt den Grad der Amplitudenmodulation des initialen Phasorsignals und somit die Frequenzmodulation des Zwitscherimpulses.

Auch wenn es sich um einzelne Zwitscherimpulse handelt, so ist das wahrgenommene Klangbild doch ein durchgängiges Geräusch. Um diesem Geräusch etwas mehr Wechselhaftigkeit zu verleihen, wird das Signal zusätzlich durch eine Rechteckwelle in seiner Amplitude moduliert, deren Amplitude nach dem Zufallsprinzip zwischen 0,9 und 1 hin und her springt. Dies erzeugt ein durchgängiges Signal mit zufällig auftretenden, leichten Amplitudenschwankungen.

Die Umwandlung des Phasor 1-Signals in den Zwitscherimpuls für den besonderen Klangcharakter des EB ist, wie bereits erwähnt, der wichtigste Unterschied zum Syntheseprozess des Brummens. Nach diesem zusätzlichen Schritt werden beide Phasor-Signale ebenfalls addiert. Allerdings wird das Zwitscherimpulssignal separat davon ein weiteres Mal mit einem Sinusoszillator frequenzmoduliert, der mit 598,3 Hz im Zusammenspiel mit der Obertonschwingung von 600 Hz eine Schwebung erzeugt, die vom 0,4 Hz-Schwebezyklus des Hauptsignals leicht abweicht. Dieses zusätzliche Signal füllt durch leise Beimischung die stillen Momente des Hauptsignals und macht es somit lebendiger.

Das Ergebnis ist ein elektrisch klingendes „Pulsieren“, das seinen Charakter hauptsächlich dem Klang des Zwitscherimpulses und den Schwebungen verdankt. Die prozedurale Steuerung eben jener Schwebungen in Abhängigkeit des Ladungswertes wird im Folgenden erläutert.



9.3.2 Steuerung des EB durch den Ladungswert

Mit steigendem Ladungszustand der Voltgun bildet sich ein immer größer und stärker werdender Elektrizitätsball an der Mündung. Die klangliche Darstellung dessen steigender Energieladung erfolgt durch eine ansteigende Frequenz der Schwebungen. Dies erfolgt nicht unmittelbar durch den Ladungswert, sondern durch daraus abgeleitete Bang-Signale.

9.3.2.1 Steuerung der Zyklen

Ziel des Synthesystems ist es, den visuellen Teil des Demolevels klanglich passend darzustellen. Die Erzeugung des sichtbaren Elektrizitätsballes wird ebenfalls durch den Ladungswert gesteuert und determiniert dessen Wachstum und Blitzfrequenz. Deshalb steuern die vom LV abgeleiteten Bangsignale sowohl die Blitzfrequenz des EB-Objektes im Spiel als auch die Initiierung eines neuen Schwebungszyklus des EB-Klanges. Ein Subpatch (pd voltballbang) wandelt hierfür den LV in exponentiell schneller auftretende Bangsignale um. Jeder Bang triggert die Änderung der Farbe des EB-Objektes in Unity, das dadurch zwischen Grau und Weiß hin und her wechselt. Dieser Wechselzyklus simuliert ein Blitzen. Auf den Klang übertragen bedeutet dies: Jeder zweite Bang triggert einen neuen Schwebungszyklus des EB-Klanges, der mit steigendem LV immer schneller und kürzer erfolgt. Gleichzeitig wird der Frequenzwert des Phasor 2 mit jedem neuen Zyklus um 0.5 Hz erhöht, was entsprechend höhere Schwebungsfrequenzen erzeugt und den Pitch erhöht. So passt sich der Klangcharakter eines Zyklus an dessen kürzer werdende Wiederholungszeit an.



9.3.2.2 Hochfahren der Grundspannung (pd EB_startup)

Sobald die Voltgun abgekühlt ist und wieder in den Standbymodus wechselt, wird ein kurzes Hochfahren der Grundspannung des Elektrizitätsspeichers hörbar, der EB-Startup.

Synthetisiert wird dies durch den Anstieg der Phasor-Frequenzen innerhalb von 500 ms von 0 Hz auf ihre entsprechenden Initialfrequenzen. Dies führt zu einem zunächst stockend wahrgenommenen, niederfrequenten, sägezahnartigen Signal bis hin zu einem durchgängigen Spannungsgeräusch. Um dabei gleichzeitig den Eindruck von ansteigender Energiedichte zu erwecken, soll der Klang schwach und fein beginnen und intensiver/kräftiger enden. Hierzu wird die Spektralverteilung des Klangs durch den Parameter *Impulstonhöhe* gesteuert, der ebenfalls innerhalb von 500 ms von 13 (sehr hochfrequenten Spektrum) nach unten auf den Initialwert von 3 fällt. Dies erzeugt den Eindruck, der Elektrizitätsklang würde mit wenig Energie (kreuzmodale Metapher: sehr hochfrequent) entstehen und innerhalb dieser 500 ms durch eine Basskräftigung des Spektrums immer stärker und voller werden. Besonders wichtig ist hierbei auch die Kontrolle der Phase beider Phasor-Signale. Sie wird mit Beginn dieses Prozesses auf 0,6 (0,5 würde 180 Grad entsprechen) festgelegt, was zu einem auffälligen Initialknacken führt, das sich gegen die anderen Klangelemente gut durchsetzt.

9.3.2.3 Pegeldynamik

Wie jedes andere Element des Voltgunklangs variiert auch der Lautstärkepegel des EBs abhängig vom Ladungswert. Wie die meisten Klangelemente ist dieser Pegel im Standbymodus zunächst leise und wird im Ladungsprozess exponentiell lauter. Trotzdem ist der EB immer gut hörbar und von den anderen Elementen getrennt wahrnehmbar, während die anderen Elemente jeweils zustandsabhängig wechselnd im Fokus der Wahrnehmung stehen. Die Elektrizitätsladung stellt ein in sich eigenständiges Klangerzeugungsobjekt dar, welches das Gerät beim Ladungsvorgang verlässt und durch den Abschuss letztendlich außer Hörweite befördert wird. Mit dem Abschuss reduziert eine Line-Zählfunktion den Pegel exponentiell innerhalb von einer Sekunde auf 0¹⁰⁹ und der restliche Abkühlvorgang enthält keine EB-Klänge, bis das Eintreten des Standbymodus das Hochfahren der Grundspannung initiiert.

9.4 Drehelement

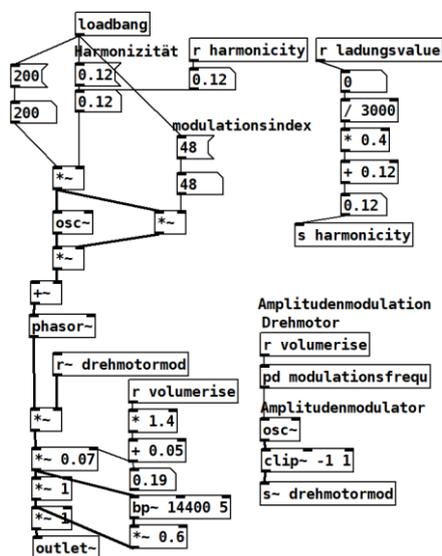


Abb. 26: Subpatch Drehelement

Der Drehelementklang soll den Eindruck eines sich um die eigene Achse drehenden Bauteils erwecken, das ähnlich wie ein Induktionsmotor agiert und auch im Standbymodus durch niedrige Drehzahl die Grundspannung für die Elektrizitätsladung erhält. Akkuschauber und ähnliche, Drehbewegung erzeugende Elektrogeräte, wurden beim Entwerfen des Drehelementklangs auf ihr Klangverhalten analysiert, das mithilfe von vielstufiger Frequenzmodulation¹¹⁰ nachgeahmt wird.

Ausgangspunkt ist der Wert 200¹¹¹, der zunächst mit einem Multiplikationswert (*Harmonizitätswert*) multipliziert und in ein Signal umgewandelt wird, damit es später als Frequenzmodulator verwendet werden kann. Dieses „Produkt-Signal“ wird einmal in das linke Inlet eines Sinusoszillators

¹⁰⁹ Bei einer Implementierung, die über reine Demonstrationszwecke hinausginge, würden mehrere Kopien des Patches jeweils einem neu generierten ELB-Geschoss zugeordnet werden, sodass der Klang nicht einfach ausfaden, sondern sich mit dem entsprechenden ELB-Objekt durch die Spielwelt bewegen würde.

¹¹⁰ Siehe Abschnitt 14

¹¹¹ Der Wert 200 wurde ausgewählt, um in einem harmonischen Verhältnis zu den Initialfrequenzen der Phasor-Signale zu stehen.

geleitet und einmal mit einem weiteren Wert, dem *Modulationsindex*, multipliziert. Anschließend wird es mit dem Oszillatorsignal multipliziert, um es in seiner Frequenz zu modulieren.¹¹² Diese beiden Steuergrößen werden in Kürze wieder aufgegriffen.

Das Ergebnis wird anschließend durch ein Phasor-Objekt geleitet, um einen rauen und obertonreichen Klang zu erzeugen. Diese Methode ist in Abschnitt 7.3 am Beispiel der WKVK-Synthese ausführlich erläutert.¹¹³ Um die Drehzahl des Motors klanglich darzustellen, wird die Amplitude des Ergebnisses erneut frequenzmoduliert. Ein Sinusoszillator hüllt den rauen Klang hierbei in weiche Pegelzyklen ein, die in Abhängigkeit vom Ladungswert in ihrer Wiederholfrequenz beschleunigt/verlangsamt werden. Diese Steuerung erfolgt durch den *Volumerise*-Parameter, der seinerseits durch eine Exponentialfunktion Werte erzeugt, die einen passend klingenden Drehzahlanstieg/-abfall bewirken. Der Lautstärkepegel des finalen Klangs wird im letzten Schritt mit dem *Volumerise*-Parameter multipliziert, sodass eine steigende Drehzahl mit einem höheren Pegel einhergeht.

Auch wenn die durch Harmonizitätswert und Modulationsindex entstehenden Synthesebeeinflussungen von komplexerer Natur sind, wird an dieser Stelle nur auf deren in diesem Aufbau beobachtbare Wirkung eingegangen.

Harmonizität: dieser Parameter bestimmt, welche Frequenzen im modulierten Klang präsent sind und ob sie in einem harmonischen Verhältnis zueinander stehen. Für den Wert 0.12 ergibt sich ein geeignetes Spektrum, das eine relativ ausgeglichene Spektralverteilung aufweist und das, obwohl es inharmonisch klingt, sich gut mit den anderen Klangelementen kombinieren lässt. Dieser Wert beträgt im Standbymodus besagte 0,12 und steigt beim Aufladevorgang, gesteuert durch den LV, linear auf maximal 0,5 an, was zu einer Verschiebung der Spektralverteilung in hochfrequente Bereiche führt, die die Klangfarbe jedoch nicht zu sehr verändern.

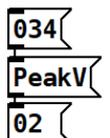
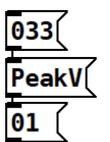
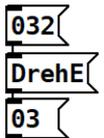
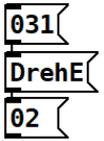
Der *Modulationsindex* ist besonders für die Klangfarbe des modulierten Signals verantwortlich, da er die relative Gewichtung der Frequenzbereiche beeinflusst. Mit einem Modulationsindex von 48 belegt der Klang im Mix den Frequenzbereich zwischen dem hochfrequenten EB und dem tieffrequenten Antriebsklang, der in Abschnitt 9.6 beschrieben wird.

9.5 Peakverstärker

Der Syntheseprozess des Peakverstärkers ähnelt dem des Drehelements, da es sich bei ihm um eine abgewandelte Vorstufe dessen handelt. Die rasante Änderung der Spektralverteilung von tieffrequent und dumpf bis hochfrequent und sehr obertonreich gelingt mit der Erhöhung des Modulationsindex' mit steigendem LV. Um das Klangbild auch bei hohem Modulationsindex nicht zu scharf zu gestalten, wird das Ergebnis anstatt durch ein Phasor-Objekt durch ein Sinusoszillator-Objekt geleitet (siehe Hörbeispiel 033). Die Amplitudensteuerung erfolgt durch den *Volumerise*-Parameter, der durch eine Exponentialfunktion manipuliert wird. So ist der Peakverstärker für niedrigere Ladewerte kaum wahrnehmbar und tritt erst kurz vor Erreichen des Maximums in den Vordergrund. Besonders im

¹¹² Vgl. Puckette (2007): S. 144 f.

¹¹³ Wird ein Signal in ein Phasor-Objekt geleitet, so wird die Wellenform des finalen Signals selbst verändert. Nimmt das Eingangssignal Werte größer als 1 an, lässt der Phasor das Signal nicht mehr unverändert passieren, sondern verwirft dessen ganzzahligen Anteil und gibt nur den Nachkommaanteil als Amplitudenwert aus. Analog zum Sprung von 1 auf 0, springt das Ausgangssignal entsprechend von 0 auf 1, wenn das Inputsignal eine negative Steigung aufweist.



Abkühlvorgang verleiht er dem Gesamtklang eine interessante, an Science-Fiction-Apparate erinnernde Note.

9.6 Antriebsklang

Für die Synthese des Antriebsklangs dient erneut der Patch des Brummens als Grundlage. Als wesentlicher Unterschied wird für das Basissignal des LFOs anstelle eines Rauschens ein Sinusoszillator eingesetzt, durch den der Gesamtklang durchgängig hörbar ist und die Schwebung der Phasor-Signale hervorgehoben wird. Diese sind zusätzlich durch einen unaufdringlich eingestellten Phaser moduliert, um den Tonhöhenverlauf dynamischer zu gestalten. Mit einer Eigenfrequenz von 17 Hz erzeugt der LFO in Kombination mit den Phasor-Signalen ein nicht zu raues Brummen, das durch das Kammfilter-Objekt, wie das Brummen, nach Wechselfrequenz klingt.

035
Antrieb
01

Um den Antriebsklang harmonisch in den Gesamtklang der Voltgun einzufügen, wird das Resultat separat durch Bandpassfilter geleitet, die diejenigen Mittenfrequenzen hervorheben, welche mit dem Brummen und dem Drehelementklang harmonisieren.

036
Antrieb
02

Die Oktave wird in allen Kulturen als Intervall verwendet, in dessen Abstand sich harmonische Strukturen wiederholen.¹¹⁴ Um das Erreichen der Maximalladung zu verklanglichen, bewirkt die Aufladung einen Pitch-Anstieg des Antriebsklangs auf der Basis von Oktaven. Dies verleiht der Sequenz einen „richtigen“ Abschluss und damit Stabilität und Geschlossenheit. Da der Antriebsklang einen geräuschhaften Charakter hat, empfiehlt sich statt einer bloßen Änderung der Phasor-Frequenzen die Verwendung eines Pitch-Shifter-Patches, der das gesamte Spektrum in der Tonhöhe verschiebt.¹¹⁵ Um diese zustandsabhängige Pitch-Steuerung zu verfeinern, wird der Klang von zwei eigenständigen Patch-Elementen erzeugt, dem Antriebsklang 1 und 2.

Der Antriebsklang 1 ist im Standbymodus prominent zu hören und steigt während des Ladungsverlaufs im Pitch um bis zu 2 Oktaven an, wobei er mit höherem LV immer leiser wird. Nach ca. einer Sekunde Ladezeit, wird er so von dem deutlicher hörbar werdenden Antriebsklang 2 abgelöst, der bei maximalem LV bis zu 4 Oktaven nach oben gepitcht wird. Die Pitch-Steuerung des zweiten Antriebsklangs verläuft nicht linear, sondern anhand einer manuell definierten Verlaufskurve, die in ein als Graph dargestelltes Array eingezeichnet wurde. Um die beiden Antriebsklänge kohärenter klingen zu lassen und die Komplexität des Antriebsaufladens zu erhöhen, wird auch ein gefilterter Teil des Antriebsklang 1 in die Pitch-Shift-Funktion des Antriebsklang 2 gesendet. Der Verlauf ähnelt einer Differentialgleichung beschränkten Wachstums und bewirkt zunächst einen rasanten Frequenzanstieg, der dem Hörer schnell signalisiert, dass die Elektrizitätsladung bereits abfeuerbar ist. Nach ca. zwei Sekunden Ladedauer ist bereits die dritte Oktave erreicht, sodass das letzte Drittel des Aufladevorgangs einen sanfteren Anstieg der Tonhöhe aufweist. Dies soll das Klangverhalten eines Motors nachahmen, der nahe am Drehzahlmaximum langsamer beschleunigt. Nach dem Abfeuern reduziert sich dessen Tonhöhe schlagartig um ca. 2 Oktaven. Dies verklanglicht die durch den Abschussimpuls abgegebene Energie und das Auskuppeln des Drehelements vom Antrieb. Der Klang des Drehelements erfährt aufgrund dieser Trennung keine solchen Frequenzeinbußen.

037
Antrieb
03

¹¹⁴ Vgl. Görne (2017): S. 71

¹¹⁵ Vgl. Görne (2017): S. 115

9.7 Schussimpuls

Der Schussimpuls wird mithilfe des Detonationsimpuls-Patches der realen Waffen generativ synthetisiert. Neben einem tiefen Bassimpuls besteht er aus insgesamt drei eigenständigen Impulsen, die jeweils unterschiedliche Dauer und Klangcharakteristika aufweisen. Der nun erläuterte Alias-Effekt spielt bei deren Erzeugung eine bedeutende Rolle.

Der Alias-Effekt tritt auf, wenn das verarbeitete Signal Anteile aufweist, die höherfrequent sind als die Hälfte der Abtastrate, in diesem Fall die Hälfte der Samplerate. Durch die resultierenden Lesefehler ergeben sich neue, niedrigerfrequente Signale, die auch als Spiegelfrequenzen bezeichnet werden und keine Harmonischen zum ursprünglichen Signal darstellen.¹¹⁶

Releasezeit, Exponent und Multiplikator stehen in einem solchen Verhältnis, dass die Exponentialkurve zu Beginn des Abtastvorgangs eine Steigung aufweist, die so hoch ist, dass die Warp-Funktion einzelne Ganzzahlintervalle überspringt und dann einen „falschen“ Dezimalwert ausliest. Durch die resultierenden Lesefehler ergeben sich neue, niedrigerfrequente Signale, die besonders beim zweiten Impuls ein „Hin-und-Herschwingen“ des Klangs verursachen. Dies stellt das Ausschwingen und zur Ruhe kommen des Plasma-Schussantriebs dar. Hörbeispiel 038 demonstriert die drei Impulse je drei Mal einzeln und anschließend zusammen.

Um den Klang interessanter und insbesondere den dritten Impuls rauer zu gestalten, werden die Impulse unterschiedlich stark durch Phasor-Objekte frequenzmoduliert. Der erste Phasor erzeugt mit 7200 Hz ein raueres Klangbild und verleiht dem Gesamtklang durch den langanhaltenden dritten Impuls einen aufsteigenden *Schweif* am Ende.

Der zweite, nachgeschaltete Phasor bewirkt letztendlich die Steuerung durch den LV. Die (negative) Frequenz des invertierten Phasor-Signals steigt durch den *Phasorspeed-Parameter* exponentiell mit einem höherem LV an. Fällt der LV nach dem Abschuss langsam auf 0, schwingt der gesamte Schussimpuls analog zum fallenden LV langsam aus, was sich besonders im *Schweif* bemerkbar macht. Wird der Abschuss nach kurzer Ladungsdauer initiiert, ist weniger Energie im Geschoss gebunden, was sich so in einer bereits langsam beginnenden Ausschwingfrequenz des Plasma-Schussantriebs äußert (niedrigste Frequenz = 8 Hz; maximale F. = 40 Hz). Hörbeispiel 039 demonstriert den Gesamten Schussimpuls bei verschiedenen Ladezuständen (0 %, 50 %, 100 %).

9.8 Funkenknall

Der Funkenknall setzt sich aus einem sehr kurzen (10 ms) abwärts gleitenden Sinussignal und einem Rauschstoß zusammen und erhält seinen elektrischen Klangcharakter, indem er durch eine Bandpassfilterbank geleitet wird, deren Mittenfrequenzwerte auf den Analyseergebnissen eines echten elektronischen Funkenschlags in einer Metallschachtel basieren.¹¹⁷

¹¹⁶ vgl. Steppat (2014), S. 23

¹¹⁷ Vgl. Farnell (2010): S. 456



9.9 Mechanik

Die Geräusche der Abzugmechanik werden mit einer abgewandelten Version des Mechanik-Patches der realen Waffen erzeugt. Dies ist ein gutes Beispiel für die Wiederverwertbarkeit bereits erstellter Synthesysteme.

Die Mittelfrequenzen der Bandpassfilterreihe stehen in einem annähernd harmonischen Verhältnis zur 100 Hz-Basisfrequenz der Elektrizitätsklänge. Für das Einrasten bzw. das Entriegeln wurden jeweils passende Klickabfolgen erstellt, die jeweils durch Loadtrigger und Initttrigger aktiviert werden. Zusätzlich wurden die Releasezeiten der Klickhüllkurven für schärfere, schnellere Klicks leicht reduziert, und der Gesamtklang durchläuft einen Hochpassfilter mit Grenzfrequenz von 3000 Hz sowie einen Bandpassfilter bei 14400 Hz mit niedriger Güte, um den Klang aufzuhellen.

041
Mechanik
01

9.10 Signale

Die Generierung der Signalklänge erfolgt durch eine Abwandlung von Farnells Alarm-Generator-Patch¹¹⁸, der mithilfe mehrerer in Reihe geschalteter Sinusoszillatoren, die durch andere osc~-Objekte moduliert und an- und ausgeschaltet werden, piepsende Frequenzabfolgen erzeugt.

Bereitschaftssignal: Dieses Signal gibt dem Spieler Rückmeldung über das Ende des Abkühlvorgangs und die damit einhergehende Schussbereitschaft des Geräts. Um nicht direkt mit dem Mechanikklang zusammenzufallen, wird das Signal um 125 ms verzögert. Das Ende des Kühlvorgangs ist demnach durch eine Abfolge der hintereinander wiedergegebenen Klänge von Entriegelung der Abzugmechanik, Bereitschaftssignal und dem Hochfahren der Grundspannung für den Elektrizitätsspeicher erkennbar.

Denied-Signal: Versucht der Spieler während des Abkühlvorgangs durch Klicken der Maustaste einen neuen Elektrizitätsball zu generieren, gibt dieses Signal stattdessen die Rückmeldung, dass dies noch nicht möglich ist. Während das Bereitschaftssignal drei Wellen harmonischer Piepsignale aussendet, entsteht der Charakter des Denied-Signals aus der schnellen Abfolge dreier Töne, die in ihren Frequenzwerten weit auseinander liegen. Es handelt sich um einen absteigenden Mollakkord, dessen Terz um eine Oktave nach oben verschoben ist.

042
Signale
01

9.11 Abkühlklang

Um die Luftstöße der Kühldüse zu verklängen, wird weißes Rauschen durch ein Bandpassfilter geleitet, dessen Mittenfrequenz und Güte einem jeweils manuell in ein Array eingezeichneten Verlauf folgt (von 280 Hz bis 9220 Hz bei Beendigung des Abkühlvorgangs; Güte: von 6 schneller werdend auf 9). Ein Phasor-Objekt steuert die Stoßschnelle der Luftstöße und wird in seiner Frequenz vom *Phasorspeed-Parameter* kontrolliert, der bereits die Modulation des Schussimpulses abgeleitet vom LV beeinflusst.

043
AbkühlK
01

In Hörbeispiel 044 werden die einzelnen Klangelemente nacheinander dem Gesamtklang hinzugefügt. Die Reihenfolge ist hierbei:

EB – Drehelement – Antriebsklang 1 & 2 – Brummen – Peakverstärker – „Schussbedingte“ Klänge

044
Vltgun
01

¹¹⁸ Vgl. Farnell (2010): S. 347 ff.

10. Implementierung der Synthesysteme

Da der Fokus dieser Arbeit auf den prozeduralen Klangsystemen und deren Steuerung durch die Spiele-Engine liegt, konzentriert sich dieser Abschnitt besonders auf den Datenaustausch zwischen Pure Data und Unity. Die Erstellung des Demolevels wird im Folgenden daher nur kurz umrissen.

Die Umgebung in der Spielszene besteht aus einer einfachen, texturlosen Fläche und einigen geometrischen Objekten, die eine Orientierung ermöglichen. Im Zentrum des Geschehens steht die Spielfigur, mit der der Spieler die Umgebung aus der Ich-Perspektive sehen kann und sich durch die Spielwelt bewegt. Die Klangsynthesysteme vertonen die acht realen Waffentypen und die Voltgun, welche vom Spieler individuell ausgewählt und abgefeuert werden können.

Fundamental für die Erstellung des Demonstrationslevels mit der 3D-Engine Unity ist das Scripting in der Programmiersprache C#. Skripte steuern die situationsbedingt korrekte Ausführung von Ereignissen der Spielmechanik, die Reaktion der Anwendungen auf Eingaben durch den Spieler sowie die Darstellung grafischer Effekte oder das physikalische Verhalten von Objekten.¹¹⁹ So ermöglichen einzelne Skripte im Demolevel bspw. den Wechsel des Waffentyps, die Bewegung des Spielers, die Schussmechanik und das physikalische Verhalten der „Elektrizitätsgeschosse“.

Die Steuerung der Synthesysteme durch Unity erfolgt mithilfe des Open Sound Control-Protokolls, dessen Funktion nun erläutert wird.

10.1 Steuerung der Patch Parameter durch OSC

Open Sound Control (OSC) ist ein frei verfügbares Skript, das die Kommunikation zwischen verschiedenen Geräten, als auch zwischen verschiedenen Programmen auf demselben Computer mithilfe sogenannter OSC-Nachrichten ermöglicht.¹²⁰ Ein OSC-kompatibles Programm wandelt zu kommunizierende Daten in OSC-Nachrichten um und sendet diese an einen *Port*,¹²¹ von dem aus andere Programme die gesendete Nachricht empfangen können, um sie anschließend von einer OSC-Nachricht in das jeweilig eigene Format umzuwandeln. Im Falle dieser Arbeit werden ausschließlich *Floats* (Dezimalwerte) verschickt.

Um das OSC-Protokoll zu verwenden wird in der Szene ein *leeres* Objekt erstellt, dem das OSC-Skript hinzugefügt wird. Von diesem Skript aus kann bestimmt werden, auf welchem Port Nachrichten jeweils empfangen bzw. verschickt werden sollen. Wichtig ist hierbei, dass die Ports für das Senden und Empfangen unterschiedliche Adressen aufweisen müssen.

Normalerweise reicht das Festlegen eines Ports aus, um Floats für verschiedene Funktionsbereiche der Patches zu kommunizieren. Dabei werden die jeweiligen Werte mit einem dedizierten „Befehl“, z. B. *Waffentyp*, an die bestimmte Portnummer gesendet. Das empfangende Programm leitet die Information ausgehend von der „Befehl“-Bezeichnung dann an die zugehörige Funktion, z. B. an den

¹¹⁹ Vgl. Unity Technologies (2020): *Schlagwort* Scripting. <https://docs.unity3d.com/Manual/ScriptingSection.html>

¹²⁰ Download und Dokumentation für die Verwendung in Unity unter: <https://thomasfredericks.github.io/UnityOSC/>

¹²¹ Ein Port ist eine Netzwerkadresse bzw. eine Verbindungsstelle, die bei der Übertragung von Daten adressiert wird. (Vgl. Rouse (2005): k. S.)

Waffentyp-Preset-Patch in Pure Data, weiter. Da diese Vorgehensweise jedoch zu Problemen führte, wurde für jeden anzusteuernenden Funktionsbereich ein eigener Port geöffnet.

Die für die Klangsystemsteuerung relevanten Objekte und Skripte werden nachfolgend erläutert.

10.2 Implementierung der realen Waffen

Weaponholder-Objekt und Weapon-Switching-Skript

Das Weaponholder-Objekt ist der Main-Camera, also den „Augen“ des Spielers, untergeordnet und beinhaltet alle Waffenobjekte. So ist gewährleistet, dass sich die Waffen mit der Spielfigur durch die Umgebung bewegen.

Damit gewünschte Modelltypen ausgewählt werden können, beinhaltet das Weaponholder-Objekt das Skript „Weapon Switching“. Drückt der Spieler eine Zahlentaste von 1 bis 8, setzt das Weapon-Switching-Skript diese Information in die Auswahl des entsprechend hinterlegten Waffentyps um. Die Kommunikation der Typ-Wahl an Pure Data erfolgt mithilfe eines weiteren Objekts: dem „Waffentyp“-Objekt. Erhält es durch das Weapon-Switching-Skript einen Zahlenwert, sendet es diesen als OSC-Nachricht an einen Port, der für die Auswahl des Waffentyp-Presets in Pure Data angelegt ist. Sobald eine OSC-Nachricht an diesem Port eintrifft, wandelt Pure Data diese wieder in den Zahlenwert um und triggert dadurch den dem Zahlenwert zugeordneten Preset-Patch und die gewünschten Steuerwerte werden in das Synthesystem geladen.

Durch die Auswahl eines bestimmten Modelltyp-Objektes wie „AK 47“ oder „Voltgun“ (nicht zu verwechseln mit *dem* Waffentyp-Objekt), werden die dem Objekt zugeordneten Skripte und deren Funktionen aktiv. Fast alle Waffenobjekte enthalten das „Schusstrigger-Skript“, welches nun vorgestellt wird.

Das **Schusstrigger**-Skript hat zwei wichtige Funktionen:

Wird die linke oder rechte Maustaste gedrückt, so wird entsprechend eine 1 bzw. eine 2 über den „Schusstrigger-Port“ an Pure Data gesendet. Diese Zahlenwerte werden im Patch zum Triggern eines Einzelschusses (1) oder zum Starten/Beenden von Dauerfeuer (2) umgewandelt.

Die zweite Funktion des Skriptes ist das Empfangen des Zahlenwertes 1, den Pure Data via OSC für jeden abgefeuerten Schuss an Unity schickt. Dieser wird vom Schusstrigger-Skript in die Aktivierung des Schussfeuerpartikelsystems umgewandelt. Wird durch Klicken der Maustaste ein Schussvorgang initiiert, aktiviert dies ein Partikelsystem,¹²² das ein Mündungsfeuer erzeugt. Dies schafft zusätzlich zum Klang ein visuelles Feedback.

Sowohl Minigun als auch die Voltgun stellen einen Sonderfall dar und beinhalten kein Schusstrigger-Skript, da deren Schüsse nicht sofort mit dem Klicken der Maustaste erfolgen, sondern erst, wenn die steuernden Parameter einen bestimmten Wert erreichen. Das „Umdrehungswert-Skript“ aktiviert bei Klicken der Maustaste einen Drehzahlanstieg des Minigunmotors bzw. veranlasst ein Absinken bei erneutem Klicken. Die eigentliche Generierung des Wertes wird durch einen Pure Data-Patch

¹²² Mithilfe eines Partikelsystems kann eine Vielzahl kleiner Objekte – ähnlich wie Schneeflocken – generiert werden, die in Form, Farbe, Bewegungsrichtung und Existenzdauer steuerbar sind. Vgl. Seifert (2015): S. 289

übernommen, da Unity einen entsprechend flüssigen Werteverlauf nur unzureichend gewährleisten kann. Dies liegt in der Funktionsweise der *Updatemethoden* von Unity begründet:

Wann oder wie oft bestimmte Ereignisse ausgelöst und Prozesse aufgerufen werden, wird in der Unity-Engine in der Regel durch zwei Methoden festgelegt. Die Methode *Update* ist am geläufigsten und wird vor dem Rendern jedes einzelnen Frames aufgerufen, d. h. vor jedem neuen Bild, das auf den Monitor gezeichnet wird. Die Bildwiederholrate (Framerate) unterliegt je nach Systemleistung Schwankungen. Sollen bestimmte Prozesse in einer zeitabhängigen Rate erfolgen, empfiehlt sich die Methode *FixedUpdate*. Diese wird in definierten Zeitintervallen ausgeführt, die in den Projekteinstellungen festgelegt werden können.¹²³ Je kürzer die Zeitintervalle gewählt sind, desto mehr Rechenleistung wird vom Endsystem gefordert. Da die schnellstmögliche Aktualisierungsrate beider Updatemethoden für die gewünschten Audioanforderungen nicht ausreicht, wird die Berechnung des hier benötigten flüssigen Werteverlaufs für die Drehzahl der Minigun und den Ladungswert der Voltgun von Pure Data übernommen.¹²⁴ Ob ein Schuss fällt, wird für Minigun und Voltgun folglich auch durch Pure Data festgelegt und in Form von Zahlenwerten an Unity gemeldet, sodass eine entsprechende Animation ausgeführt werden kann.

10.3 Implementierung der Voltgun

Zentral für die Steuerung der Voltgun ist der „Riseandfall“-Patch, der den Ladungswert berechnet und somit die Bestimmung aller anderen Steuergrößen ermöglicht. Initiiert wird die Berechnung durch Zahlenwerte, die Unity mithilfe des *Voltball*-Skripts bei Klicken der rechten bzw. linken Maustaste an den Riseandfall-Patch sendet. Bei einem Rechtsklick beträgt dieser Zahlenwert 1 und startet den Anstieg des Ladungswertes ab dem Wert 0. Wird die linke Maustaste gedrückt, bewirkt die gesendete 0 ein Absinken des Ladungswertes zurück auf 0 und initiiert via OSC gleichzeitig den Abschuss des Elektrizitätsball-Objekts in Unity. Erreicht der Ladungswert das Maximum von 3000, bevor ein Linksklick empfangen wird, kommt es ebenfalls zum Abschuss des EB-Objekts und der LV sinkt gleichermaßen auf 0.

Je länger der Ladungszustand andauert, desto größer wird das EB-Objekt. Anhand des Ladungswertes berechnet Pure Data jedoch auch die Blitzfrequenz des sichtbaren EB-Objektes in Unity. Wie in Abschnitt 9.3.2.1 besprochen, wird der Ladungswert in exponentiell schneller auftretende Bangsignale umgewandelt, die die Blitzfrequenz des Ball-Objektes steuern. Pure Data sendet für jedes Bangsignal im Wechsel eine 0 bzw. eine 1 an Unity, was eine Farbänderung des Balles in Grau bzw. Weiß bewirkt.

Um dem Spieler Rückmeldung über den Bereitschaftszustand des Gerätes zu geben, unterscheidet ein Skript in Unity zwei Zustände:

Cooldowntime false: Die Voltgun ist einsatzbereit; ein Rechtsklick sendet einen Wert an den Port, der den Riseandfall-Patch initiiert.

Cooldowntime true: Die Voltgun muss noch abkühlen; ein Rechtsklick sendet den Wert über den Port, der das Denied-Signal triggert.

¹²³ Vgl. Seifert (2015): S. 78 f.

¹²⁴ Im Normalfall würde für solche Anforderungen eine eigene Engine entwickelt, im Rahmen dieser Arbeit ist der Workaround über Pure Data jedoch effizienter.

So wird gewährleistet, dass der Abkühlvorgang nicht unterbrochen wird und der Spieler ein Feedback erhält.

Weitere Klangbeeinflussungsmöglichkeiten wie Distanzdämpfung, Reduktion des LOAD, Anlegen der Waffe oder Projektil- und Schussdelay, wurden nicht in das Demolevel implementiert, sind jedoch im Videocapture anhand manueller Steuerung des Patches demonstriert.

11. Bewertung und Erkenntnisse

Die Klangsysteme von realen Waffen (RW) und Voltgun veranschaulichen jeweils verschiedene Dimensionen des prozeduralen Vertonungsansatzes. Mit dem Konzept der RW wurde geprüft, was ein prozedurales Synthesesystem bei der Vertonung von im Mittelpunkt stehenden, realen Objekten leisten kann und wie vielfältig die Klänge eines einzelnen Systems durch Parameteränderungen sein können. Das Beispiel der Voltgun zeigte, wie effektiv und vielschichtig das Verhalten eines bestimmten Klangbildes von einem Parameter aus gesteuert werden kann. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse werden im Folgenden unter verschiedenen Gesichtspunkten bewertet.

11.1 Beurteilung der Klänge:

11.1.1 Detailstufe

Die Erzeugung vielfältiger Schussklänge durch *einen* Patch kann als erfolgreich angesehen werden, da die einzelnen Modelltypen hinsichtlich ihres Klangcharakters gut voneinander abgrenzbar sind. Jedoch schränkt die Herangehensweise, einen einzigen Patch für alle Modelle zu verwenden, die detaillierte Herausarbeitung typspezifischer Charakteristika ein. Im Hinblick auf die Detailstufe kann das erstellte Modell jedenfalls modernen Standards (noch) nicht gerecht werden, sofern die Klangelemente im Zentrum der Spielerwahrnehmung stehen sollen.

Hierzu ist allerdings zu erwähnen, dass die Synthese mit Pure Data erst im Rahmen dieser Arbeit vom Autor erlernt wurde und das Design der Voltgun daher mit mehr Erfahrung angegangen werden konnte als jenes der realen Waffen. Dieses fiktive Modell schneidet bezüglich der Detailstufe deutlich besser ab. Der Klang muss den Realismusansprüchen realer Klänge nicht gerecht werden. So konnte beim Designvorgang deutlich freier gearbeitet bzw. konnten Elemente eingebaut werden, die gut synthetisch erzeugbar sind. Das Klangmodell der Voltgun trägt somit keine der Einschränkungen des Reale-W.-Patches und kann dementsprechend ein detailreicheres Klangbild liefern, das mit etwas Verfeinerung modernen Standards gerecht werden könnte.

Dies gilt vor allem auch vor dem Hintergrund, dass die hier bewerteten Resultate noch nicht durch DSP-Effekte von Middleware aufbereitet wurden. Schließlich war es Ziel der praktischen Untersuchung, zu prüfen, wie gut das Ergebnis ohne DSP-Effekte wie Dynamikbearbeitung, umfassendes Equalizing oder Versehen mit Hall etc. wirken kann. Die Ergebnisse sind daher als Äquivalent zu einer rohen, unbearbeiteten Aufnahme zu betrachten. Außerdem wurden die Klangsysteme ohne jegliche Verwendung von Samples erstellt, um bewerten zu können, wie realistisch eine rein synthetische Erzeugung klingen kann. Bei zusätzlicher Verwendung von Samplematerial im Syntheseprozess könnten sicherlich noch deutlich realistischere Detailstufen erreicht werden.

Insbesondere durch die eher umständlichen Panning-Möglichkeiten in Pure Data und ohne die Verwendung von Hall zur räumlichen Darstellung¹²⁵ wirken die Klangbilder beider Klangsysteme zu monophon. Dies kann für eine korrekte Darstellung in der Spielwelt von Vorteil sein, jedoch nicht für derart im Fokus stehende Objekte. Für das Sounddesign von Spielen für Mobilgeräte (mit mono Output), das darauf ausgelegt sein sollte ohne Kopfhörer gespielt zu werden, bringt dies selbstverständlich keine Nachteile mit sich.

Die schwierige Erzeugung hoher Detailstufen gehört zu den Nachteilen des prozeduralen Ansatzes. Eine einzigartige Stärke dieses Verfahrens liegt jedoch in der Abbildung des Klangverhaltens.

11.1.2 Klangverhalten

Der Klang der Voltgun zeigt ein realistisches, gut beobachtbares Verhalten. Je nach Ladezustand passen sich sämtliche Klangbestandteile dem Zustand des Geräts an. Der Klang der einzelnen Elemente ist nicht einfach für jeden möglichen Ladungswert vordefiniert, sondern auch vom aktuellen Zustand der Schwebungen und Modulationen abhängig. Die Schwebungen und (teils durch Rauschen als Modulator zufälligen) Modulationen erzeugen einen lebhaften Puls der einzelnen Klangelemente. Dieser Eigenpuls ist nicht direkt vom Ladungswert abhängig und verschiebt sich durch jeden Aufladezyklus für jedes Element individuell – insbesondere bei frühzeitigem Abschuss mit geringem LV. Hier sind die Schwebzyklen/Modulationszyklen länger und werden so hörbarer durch die Frequenzänderungen beeinflusst. So entsteht ständig ein neues Zusammenspiel der einzelnen Elemente, was sich in einem anderen Gesamtklangbild ausdrückt, das jedoch immer als das gleiche Klangobjekt wahrgenommen wird. So klingt auch der Standbymodus immer unterschiedlich, da z. B. Drehelement und Elektrizitätsball eine ähnliche Schwebefrequenz aufweisen. Liegen die Schwebungen beider Elemente nahe beieinander, wirken beide Klänge als Einheit. Verlaufen sie jedoch gegenphasig, steht jedes Element für sich. Wie die Schwebungen zueinander stehen ist nach jedem Aufladezyklus anders. Besonders bei den gut verfolgbaren Zyklen des Drehelements entsteht je nach Zykluszustand bei Initiieren einer Aufladung ein realistisches „Einschwingen“ von diesem Zustand aus, bzw. ein individuelles „Ausschwingen“, je nach Abschusszeitpunkt. Übertragen auf die Wahrnehmung des Gehörten kann der Spieler so den „physikalischen“ Zustand der Bauteile/Ladung nachverfolgen. Ein solches Verhalten ist selbstverständlich auch für die prozedurale Vertonung realer Geräte und Objekte entwickelbar. Diese Art vielschichtigen Klangverhaltens ist mit samplebasierter Vertonung praktisch nicht erreichbar.

Auch das Modell der realen Waffen kann in Bezug auf Klangverhalten bewertet werden. Da der Klang der einzelnen Elemente nicht auf zufällig passenden „Klanginseln“ beruht, sondern das Ergebnis logischen Vorgängen folgender Klangsynthese ist, kann die Veränderung des Klangbilds bei möglichen Parameteränderungen gut vorausgesagt werden. Beispiele hierfür wären der Hülsenklang oder die Mechanikgeräusche. Als eine dies ausnutzende weiterführende Verwendung des Patches wäre somit auch eine Anpassung der Parametereinstellungen auf im Spiel stattfindende Bauteilmodifikationen denkbar.

¹²⁵ Zur Dekorrelation der Signale wurde zwar bei beiden Klangsynthesystemen das Hall-Plugin Freeverb verwendet, jedoch erfolgte die Beimischung in so geringem Maße, dass keine virtuelle Räumlichkeit erzeugt wird, sondern lediglich ein weniger eindimensionales Empfinden bei Kopfhörerwiedergabe entsteht.

11.1.3 Implementierung der Parametersteuerung

Die in Abschnitt 10 beschriebene Implementierung in das Demonstrationslevel diene ausschließlich der Demonstration der Parameterbedeutungen und ist nicht als eine ideale Lösung anzusehen. Insgesamt stellte sich die Implementierung prozeduraler Klänge im Vergleich zu Samples als deutlich aufwändiger und umständlicher heraus. Zweifelsohne ist die Verwendung von Middleware zur korrekten Einbindung der Klänge unabdingbar, jedoch nicht Teil der Arbeit.

Hinsichtlich der Parametersteuerung zeigte das Generieren mancher Steuerparameter durch Pure Data selbst, dass eine Steuerung der Spielmechanik durch die Audio-Engine sinnvoll sein kann, sofern Parameter von hoher Aktualisierungsrate erstellt werden müssen (fließende Werte für Audio, Framerate-basierte Variante für visuelle Darstellung). Eine solchermaßen tiefer reichende Implementierung von Funktionen der Audio-Engine in die Spielmechanik würde die Einbindung prozeduraler Vertonungen deutlich erleichtern. Außerdem entstünde durch die gleichwertige Integrierung der Audio-Engine ein ineinandergreifendes Zusammenspiel der verschiedenen Engines, was eine systemische Gestaltung der Spielmechanik erleichtern würde.

11.1.4 Ressourcenschonung

Der Speicherplatzbedarf fällt im Vergleich zu dem von Sampledateien sehr gering aus. Für den Patch der realen Waffen werden lediglich 191 KB benötigt, während der Voltgun-Patch 90 KB bedarf. Um dies in Relation zu setzen wurden nach Art des samplebasierten Ansatzes jeweils fünf Samplevarianten jedes Schussgeräuschs angefertigt (Samplerate: 48 kHz, Wortbreite: 16 bit). Zusammen benötigen diese Dateien 14,8 MB, also fast 80-mal so viel Speicherplatz.

Durch Programme wie Pure Data oder Max/MSP sind der Nachbildung komplexer Klangstrukturen abgesehen von der CPU-Belastung keine Grenzen gesetzt, da der gewünschte Klang auf so viele Teilprozesse heruntergebrochen werden kann wie nötig. Während der Ausführung des Demolevels macht die Berechnung der prozeduralen Klänge 0,8 % der CPU-Belastung aus (Modell: Intel i7-8700K). Dieser Wert ist natürlich ohne detaillierte Analyse des Systemaufbaus und der Testsituation nicht besonders aussagekräftig, jedoch ermöglicht er eine grobe Einordnung des Ressourcenbedarfs (die Ausführung der Unity-Engine verbraucht ca. 20 %). Für einzelne prozedural implementierte Elemente könnte dies also ohne Probleme funktionieren. Die zusätzliche CPU-Belastung, die bei einer Vielzahl nötiger PA-Klangelemente, bspw. bei besonders umfangreichen Spielen entsteht, sollte indessen nicht unterschätzt werden.

11.1.5 Wiederverwertbarkeit erstellter Patches

Die Aufteilung der Gesamtklänge in einzelne Elemente, deren Syntheseprozesse unabhängig von denen der anderen Elemente manipuliert und ersetzt werden können, ist zentrale Funktion des modularen Ansatzes und auch für die Variation des Level of Audio Detail von Vorteil. Sind verschiedene Patches erst einmal erstellt, können lediglich durch Veränderung ihrer Steuergrößen eine Vielzahl andersartiger Klänge erzeugt werden – insbesondere, wenn sehr viele Steuergrößen enthalten sind. Das Klangsystem der realen Waffen veranschaulicht, wie mit wenig bis keiner zusätzlichen Rechenlast durch bloße Werteveränderungen unterschiedliche Klänge erzeugt werden können. Dies ist jedoch nicht auf die Erstellung von Klängen ähnlichen Typs begrenzt. So wird bspw. der Detonationsimpuls zu einem sehr tonalen und stark modulierenden Schussimpuls der Voltgun umfunktioniert. Das Beispiel der Voltgun zeigte die Einfachheit dieser Neuverwendung auch im Hinblick auf die Wiederverwertung als ähnliche Klänge. So wurde der Mechanik-Patch der realen Waffen leicht verändert als Voltgun-

Abzug verwendet. Auch die für die Voltgun neu erstellten Synthesysteme demonstrierten die Vielfältigkeit solcher Abwandlungen. So diene z. B. das Wechselstrom-Brummen als Grundlage für Elektrizitätsball und Antriebsklang 1 & 2 oder das Drehelement in vereinfachter Form als Peakverstärker mit völlig anderem Klangcharakter.

Hinsichtlich der Neuverwertung von Inhalten hält die prozedurale Vertonung im Vergleich zu samplebasiertem Sounddesign neben der Generierung ähnlicher oder andersartiger Klänge einen weiteren Vorteil bereit: Die Bereiche für Wiederverwendbarkeit von ganzen oder Teil-Patches ist nicht auf deren ursprüngliche Funktion beschränkt. Da alle Steuerungen auf mathematischen Berechnungen basieren, können einmal entwickelte Verfahrensweisen zur Werteverlaufsteuerung jeder denkbaren Signal- oder Zustandsbeeinflussung verwendet werden, in welche sie implementiert werden. Im Hinblick auf die Forschungsfrage kann also argumentiert werden, dass die Praktikabilität des prozeduralen Ansatzes mit jedem erstellten bzw. verfügbaren Patch zunimmt. Trotz großen potenziellen Nutzens gibt es für PA noch kein Äquivalent zu den umfang- und zahlreichen Sample-Libraries der samplebasierten Vertonung. Dies mag in erster Linie in der seltenen Verwendung dieser Methode begründet liegen. Mit zunehmender praktischer Nutzung könnte sich das ändern.

Die Anwendung des LOAD-Verfahrens oder des „Waffe angelegt“-Schalters wären für die Voltgun ebenso gut eingliederbar. Hierzu müsste für die einzelnen Elemente lediglich der LOADgain-Faktor in Abhängigkeit von der Bedeutung im psychoakustischen Klanggerüst festgelegt bzw. ein realistischer Abfall-Faktor definiert werden. Das Brummen hätte hierbei den niedrigsten LOADgain-Faktor, während der Schussimpuls und der Funkenknall den höchsten hätten, da deren tatsächliche Lautstärke durch das Mixing im Interesse eines angenehmen Klangverhältnisses zu den anderen Klangelementen verringert ist. Bei großer Distanz zum Schützen müsste dies wie bei den realen Waffen berücksichtigt und ausgeglichen werden.

12. Fazit

Der prozedurale Vertonungsansatz bedeutet im Vergleich zu samplebasiertem Sounddesign nicht nur die Verwendung anderer Techniken, sondern beleuchtet den Designprozess aus einer gänzlich neuen Perspektive. Er repräsentiert den Wechsel von einem starren, eindimensionalen Realismus hin zu einem dynamischen Realismus, bei dem nicht ausschließlich die Ästhetik des betreffenden Sinneseindrucks im Vordergrund steht, sondern das Vermitteln der richtigen Wahrnehmung des Spielgeschehens. Die Nachbildung des richtigen Klangverhaltens ist hierbei von zentraler Bedeutung und lässt Bild und Ton als audiovisuelles Gesamtmodell in kohärente Beziehung treten. Dies bringt neue Möglichkeiten für das Sounddesign mit sich, die so nicht mit samplebasierter Vertonung erreicht werden können.

Mithilfe der Spielsituationsabhängigen Steuerung prozeduraler Klangsynthesysteme eröffnet sich aufgrund der mannigfaltigen Kombinationsmöglichkeiten der Parametereinstellungen eine Klangvielfalt, die weit über die eines Samplesystems hinausreicht. Dies liegt besonders im Interesse einer tiefgehenden Immersion in das Spielgeschehen, da die Klänge je nach Potenzial des Synthesystems sehr vielschichtige Ereignisse nachbilden können.

Im Gegensatz zu Samples sind prozedural erzeugte Klänge dank des modularen Ansatzes zu jedem Zeitpunkt der Spielproduktion flexibel veränderbar. Außerdem können anhand bereits erstellter Klangsynthesysteme mit wenig bis keinem zusätzlichen Aufwand weitere ähnliche bis überraschend andersartige Klänge und Verhaltensweisen erzeugt werden.

Ein weiterer einzigartiger Aspekt des prozeduralen Ansatzes besteht in der möglichen Reduktion eines Klanges auf sein psychoakustisches Grundgerüst. So kann der LOAD („level of audio detail“) je nach Bedeutungsgrad bzw. Entfernung des Klangobjekts durch Reduktion der Synthesekomplexität angepasst werden, was die realitätsnahe Wahrnehmung der Klänge weiter erhöht. Ob bzw. wann eine prozedurale Vertonung jedoch praktikabel ist, hängt von verschiedenen Kriterien ab.

In erster Linie gilt es abzuwägen, ob realistisches Klangverhalten höher bewertet wird als eine Hollywood-reife Detailstufe, die synthetisierte Klänge nur in gewissem Maße erreichen können.

Wie die Ergebnisse der praktischen Untersuchung zeigen, sind fiktive Objekte leichter prozedural zu vertonen als reale, da sie nicht den Realismusanforderungen aus dem Alltag bekannter Klänge gerecht werden müssen. Auch der Komplexitätsgrad und die Synthetisierbarkeit der zu erzeugenden Klänge sind hierbei entscheidend, da bspw. Atmo-Geräusche, Fußschritte oder Stimmen einen Syntheseaufwand erfordern würden, der im Vergleich zu einer Aufnahme unverhältnismäßig groß wäre.

Der Aufbau der Spielmechanik ist ebenfalls von Bedeutung, da Procedural Audio von einer Aufteilung des Spielgeschehens in verschiedene Zustände profitiert, von denen Regeln und Steuerparameter für die Beeinflussung der Klangsynthesysteme abgeleitet werden können. Je prozeduraler das gesamte Spiel aufgebaut ist (Physik, Grafik, Inhalt), desto geeigneter und attraktiver wird die Verwendung von Procedural Audio. Die Physik-Engine hat in diesem Fall einen besonders weitreichenden Einfluss auf die Möglichkeiten eines prozeduralen Systems, da die Klangsysteme in der Abbildung von Klangereignissen nur so weit reichen können wie das Physiksystem, an das sie durch die Parametersteuerung gekoppelt sind.

Hinsichtlich der Ressourcennutzung kann der Speicherplatzbedarf durch die Echtzeitgenerierung der Klänge signifikant gesenkt werden, was beispielsweise für Konsolenspiele, die auf einen Datenträger passen müssen bzw. für mobile Spiele attraktiv sein kann. Jedoch verlagert sich der Ressourcenbedarf auf die CPU-Belastung, was besonders bei Titeln mit sehr umfangreichen Spielumgebungen zum Problem werden kann. Somit muss ein prozedurales System neben der Bewertung der Klangqualität auch auf Basis der technischen Umsetzung beurteilt werden. Ein fantastischer Klang ist nicht brauchbar, wenn er zu viel CPU-Leistung verbraucht, so wie ein besonders sparsamer Prozess ggf. wegen seiner mangelhaften Klangqualität ausscheidet.

Eine der bedeutendsten Ursachen für die seltene Verwendung der prozeduralen Vertonung besteht jedoch in der Knappheit von Informationen zur Durchführung des Ansatzes. Andy Farnells Buch „Designing Sound“ (2010) ist das einzige umfangreiche Werk, das eine konkrete Anleitung für die Erstellung prozeduraler Systeme bietet. Dieses Feld ist weitgehend unerforscht. Hinzu kommt, dass die meisten Audibearbeitungsprogramme nur ein von der Zeitachse abhängiges Sounddesign ermöglichen. Die Verfügbarkeit adäquater Werkzeuge ist zumindest derzeit nicht ausreichend, um das Konzept für kommerzielle Nutzung attraktiv wirken zu lassen. Programme wie Pure Data, Max/MSP oder die Programmiersprache SuperCollider ermöglichen zwar die Erstellung prozeduraler Klangsysteme, jedoch unterstützen die populären Spiele-Engines deren Einbindung noch unzureichend. Die Verwendung von in Echtzeit generierten Klänge in Spielen wie GTV V, No Man’s Sky oder Fract, sowie die 2017 erfolgte Integration einer Synthesefunktion in die Unreal-Engine zeigen jedoch den Beginn eines Trends in Richtung hybrider Vertonungsansätze. Diese Vorgehensweisen sind nahe an einer prozeduralen Umsetzung, bedeuten einen wichtigen Schritt in Richtung einer solchen und sind auf dem Weltmarkt getestet. Die Einbeziehung prozeduraler Inhalte in ein samplebasiertes Konzept bietet das Potenzial, durch Kombination beider Varianten deren jeweilige Vorteile zu verbinden. Letztendlich sind die Grundvoraussetzungen für die Steuerung prozeduraler Klänge aufgrund der in der Physik-Engine vorhandenen Parameter meist gegeben. Vice versa könnte jeder Zahlenwert der Synthesysteme in Pure Data bzw. Max/MSP als Parameter mit der Engine verknüpft werden.

Der Fortschritt in diesem Bereich schreitet langsam voran und kann sich nur beschleunigen, wenn mehr Informationen und Anwendungsbeispiele vorliegen. Es ist ein selbstverstärkender Prozess, zu dem diese Arbeit einen Beitrag leisten soll. Auch wenn Procedural Audio zu diesem Zeitpunkt noch nicht als Hauptpfeiler eines AAA-Game-Soundkonzepts funktioniert, so hält der Ansatz doch Chancen bereit, die Immersion und den Realismus auf neue Ebenen zu heben. Ablösen wird Procedural Audio die samplebasierte Vertonung in absehbarer Zukunft wohl nicht, aber sicherlich erweitern.

13. Literaturverzeichnis

Anwander, Florian (2017): *Synthesizer*. 9. Auflage, Bergkirchen: PPVMEDIEN

Bregman, Albert S. (1994): *Auditory Scene Analysis: The Perceptual Organization of Sound*. Massachusetts: MIT Press

Dickreiter, Michael (2009): *Handbuch der Tonstudioteknik. Band 1, 7. Auflage*. München: K G Saur Verlag

Farnell, Andy (2010): *Designing Sound*. Massachusetts: USA: MIT Press.

Farnell, Andy (2011): *Behaviour, Structure and Causality in Procedural Audio*, in: **Grimshaw, Mark (Hrsg.):** *Game Sound Technology and Player Interaction: Concepts and Developments*. Hershey: Information Science Reference

Görne, Thomas (2017): *Sounddesign. Klang, Wahrnehmung, Emotion*. München: Hanser Verlag

Leenders, Matts Johann (2012): *Sound für Videospiele. Besondere Kriterien und Techniken bei der Ton- und Musikproduktion für Computer- und Videospiele*. Marburg: Schüren

Pejrolo, Andrea; DeRosa Richard (2007): *Acoustic and MIDI Orchestration for the Contemporary Composer*. Burlington: Focal Press

Puckette, Miller (2007): *The Theory and Technique of Electronic Music*. New Jersey: World Scientific Publishing

Spitzer, Manfred (2002): *Musik im Kopf: Hören, Musizieren, Verstehen und Erleben im neuronalen Netzwerk*. Stuttgart: Schattauer

Seifert, Carsten (2015): *Spiele entwickeln mit Unity 5*. 2. Auflage München: Carl Hanser Verlag

Steppat, Michael (2014): *Audioprogrammierung. Klangsynthese, Bearbeitung, Sounddesign*. München: Hanser Fachbuchverlag

Stevens, R; Raybould, Dave (2015): *Game Audio Implementation: A Practical Guide Using the Unreal Engine*. New York: Taylor and Francis Group.

Vicario, Giovanni Bruno (2003): *Prolegomena to the perceptual study of sounds*. in: **Rocchesso, Davide (Hrsg.):** *The sounding object*. Firenze: Mondo estremo, S. 17 – 32

Völz, Horst (1999): *Das Mensch-Technik-System*. Renningen-Malmsheim: Expert Verlag

Online-Quellen (Vorträge, Interviews, Beiträge, Videos)

Angermeier, Georg (2017): *Reverse Engineering*. [Online-Lexikon] abgerufen von: <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/reverse-engineering> (zuletzt abgerufen am 11.02.2020)

Heaven, Douglas (2016): *When infinity gets boring: What went wrong with No Man's Sky*. [Online-Beitrag] abgerufen von: <https://www.newscientist.com/article/2104873-when-infinity-gets-boring-what-went-wrong-with-no-mans-sky/> (zuletzt abgerufen am 30.01.2020)

Hirandand, R. (2015): *18 quintillion planets: The video game that imagines an entire galaxy*. [Online-Beitrag] abgerufen von: <https://edition.cnn.com/2015/06/18/tech/no-mans-sky-sean-murray/> (zuletzt abgerufen am 27.11.2019)

IMDb (Internet Movie Database) (2012): Battlefield 3. Awards. [Online-Beitrag] abgerufen von: <https://www.imdb.com/title/tt1954263/awards>. (zuletzt abgerufen am 12.02.2020)

Logan, Beth (2000): *Mel Frequency Cepstral Coefficients for Music Modeling*. [Online-Dokument] abgerufen von http://ismir2000.ismir.net/papers/logan_paper.pdf (zuletzt abgerufen am 13.02.2020)

Maher, Robert C. (2006): *Summary of Gun Shot Acoustics*. Montana State University: [Online-Dokument] abgerufen von: http://www.montana.edu/rmaher/publications/maher_aac_0406.pdf (zuletzt abgerufen am 29.02.2020)

Maynes, Charles (2007): *Weapons Sound Effects Recording and Design for the Next Generation*. [Online-Beitrag] abgerufen von https://gamasutra.com/view/feature/1746/weapons_sound_effects_recording_.php (zuletzt abgerufen am: 20.02.2020)

News Bites Finance (2019): *Enel Green Power inaugurates the new interactive exhibition in the Acquoria hydro power plant*. [Online-Dokument] abgerufen von: https://www.wiso-net.de/document/NBPC_4e326a9c132077e3253cfc0a4a3d4e4f6a1f7527 (zuletzt abgerufen am 15.01.2020)

Raison Varner; Mark Petty (2012): *The Sound Design of Borderlands 2*. Interview durch Game Informer. [YouTube-Video] abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?v=464zED72KYY> (zuletzt abgerufen am 12.02.2020)

Reynolds, Dan (2019): *Data-Driven Sound Design | Unreal Fest Europe 2019 | Unreal Engine*. [Vortrag im Rahmen des Unreal Fest Europe 2019] abgerufen von: https://www.youtube.com/watch?v=5RFoz_YVt7s (zuletzt abgerufen am 23.03.2020)

Robinson, A. (2009): *Gearbox interview: Randy Pitchford on Borderlands' 17 million guns*. [online] abgerufen von: <https://web.archive.org/web/20090803170231/http://www.computerandvideogames.com/article.php?id=220328> (zuletzt abgerufen am 28.11.2019)

Roth, Martin (2014): *What's The Deal With Procedural Game Audio?*. [Online-Beitrag] abgerufen von: <http://designingsound.org/2014/10/31/whats-the-deal-with-procedural-game-audio/> (zuletzt abgerufen am 19.02.2020)

Rouse, Margaret (2005): *Port – Definition*. [Online-Lexikon] abgerufen von <https://www.computerweekly.com/de/definition/Port> (zuletzt abgerufen am 22.02.2020)

Smith, G. (2015): *An Analog History of Procedural Content Generation*. Pacific Grove, California: Foundations of Digital Games. [Online-Dokument] Abgerufen von: http://www.fdg2015.org/papers/fdg2015_paper_19.pdf

Strandberg, Stefan (2011): The Secrets Behind Battlefield 3's Sound Design. Interview durch Game Informer. [YouTube-Video] abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=Vc8WQsIxxhro> (zuletzt abgerufen am 12.02.2020)

Burt, Ben (2019): *Star Wars: Episode IV sound design explained by Ben Burt*. Interviewmaterial aus der DVD von Star Wars: Episode IV – Eine neue Hoffnung. [YouTube-Video] abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?v=So0nmciiFJg> (zuletzt abgerufen am 02.03.2020)

Unity Technologies (2020): *Unity User Manual (2019.3)* [Online-Dokumentation] abgerufen von: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (zuletzt abgerufen am 25.03.2020)

Vernon, Frank; Webb, Spahr (2000): *Field measurements of sonic boom penetration into the ocean*. The Journal of the Acoustical Society of America. 107(6):3073-83 [Online-Dokument] abgerufen von: https://www.researchgate.net/publication/12444309_Field_measurements_of_sonic_boom_penetration_into_the_ocean (zuletzt abgerufen am 12.02.2020)

Weir, Paul (2016): *Encouraging Chaos, the Use of Generative Sound in No Man's Sky*. [Vortrag im Rahmen des Sónar+D-Kongresses 2016.] abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?v=nUWFTLhZ1ro> (zuletzt abgerufen am 13.02.2020)

Wright, Tom (2017): *How To Make Awesome Gunshot Sounds for Games - Fully Automatics (feat. Islands of Nyne: BR)* [YouTube-Video] abgerufen von: <https://www.youtube.com/watch?v=-Cw36ilGfns> (zuletzt abgerufen am 18.02.2020)

Yee-King, Matthew; Roth, Martin (2008): *SynthBot: An unsupervised software synthesizer programmer*. [Online-Dokument] bgerufen von http://yeeking.net/pdf/roth_yee-king_ICMC2008.pdf (zuletzt abgerufen am 13.02.2020)

14. Grundlegende Terminologie

In dieser Arbeit finden zahlreiche englische Begriffe aus der Tontechnik und dem Programm Pure Data Anwendung. Dieser Abschnitt dient daher als alphabetisch geordnetes Nachschlagewerk für Begriffe und Phänomene, auf das im Verlauf des Fließtexts verwiesen wird.

Im Interesse der besseren Verständlichkeit wird vor allem bei den Funktions- und Objektbezeichnungen aus Pure Data auf eine Übersetzung ins Deutsche verzichtet. Die wichtigsten Befehle werden in Abschnitt 15 erläutert.

ADSR-Hüllkurve

Mit Hüllkurven können verschiedenste Eigenschaften von Signalen wie Amplitude, Filterung oder Pitch im Zeitverlauf beeinflusst werden. Der Amplitudenverlauf eines Schallereignisses ist maßgeblich für die Wirkung des Klangs verantwortlich und dient im Folgenden als Signaleigenschaft, anhand derer das Konzept einer Hüllkurve beschrieben werden kann. In den meisten Fällen wird eine Hüllkurve, die den Amplitudenverlauf des Signals steuert, auch als ADSR-Hüllkurve bezeichnet, deren Verlauf in vier Phasen unterteilt wird:

- Attack** (*Anstieg*): Diese Einschwingphase umfasst den Anstieg der Amplitude vom Anfangswert bis zum Erreichen des Maximums.
- Decay** (*Abfall*): In der Decayphase fällt die Amplitude vom Maximum auf das Level der Sustainphase. Allerdings enden die Klänge vieler Instrumente, die nicht wie Blas- oder Streichinstrumente in permanenter Schwingung gehalten werden, bereits nach dieser Phase. Perkussive Klänge haben in diesem Sinne nur eine zweistufige Hüllkurve aus Attack und Decay.
- Sustain** (*Halten*): In dem als Aushaltphase oder stationäre Phase bekannten Bereich weist die von einer ADSR-Hüllkurve gesteuerte Signalamplitude einen konstanten Wert auf. Dieser wird in diesem Zusammenhang auch Sustain-Level genannt.
- Release** (*Freigabe*): Die Ausklingphase des Schallsignals wird mit der Release-Zeit beschrieben. Sie setzt sich hauptsächlich aus dem allmählichen Verklingen des Signals, jedoch ggf. auch aus einer entsprechenden Nachhallzeit zusammen.¹²⁶

¹²⁶ vgl. Raffaseder (2002): S. 41 f. sowie vgl. Steppat (2014): S. 123 ff.

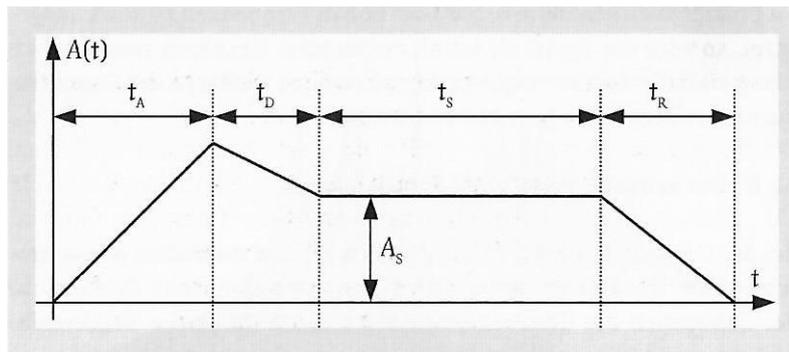


Abb. 27: ADSR-Hüllkurve¹²⁷

Dominanz der ersten Wellenfront

Das Gehirn identifiziert das früheste am Ohr eintreffende Signal als den originalen Direktschall einer Quelle. Ein Hörereignis setzt sich aus dem Primärschall und den frühesten Reflexionen zusammen, die in einem Zeitintervall von ca. 40 Millisekunden auf das Ohr treffen. Diese werden zu einem in sich geschlossenen Klangobjekt als Einheit wahrgenommen (**generalisierter Präzedenzeffekt**).¹²⁸ Alle später eintreffenden Versionen mit derselben Klanginformation werden als Reflexionen identifiziert und als Nachhall wahrgenommen. Sie stellen somit die Raumempfindung und mithin kein eigenständiges Hörereignis dar. Diese Komplexitätsreduktion, die das menschliche Gehirn hiermit vornimmt, ist sinnvoll, da so eine korrekte Ortung von Klangquellen und generelle Orientierung möglich ist.¹²⁹

Echogedächtnis

Das Echogedächtnis ist ein Teil des sensorischen Gedächtnisses, das auditive Reize speichert. Das Erinnerungsvermögen dieses Speichers reicht im Normalfall von mehreren hundert Millisekunden bis zu wenigen Sekunden. Der gehörte Klang ist in der Wahrnehmung noch so vorhanden, wie er tatsächlich erlebt wurde. Mithilfe des Echogedächtnisses segmentiert das Gehirn einen ununterbrochenen Strom akustischer Reize in abgegrenzte Einheiten wie Geräusche oder Töne. Durch Zusammenfassung gemeinsam erscheinender und sich verändernder Frequenzen zu *einem* Ereignis, werden sie von anderen Frequenzen in der Wahrnehmung getrennt. Interessant ist hierbei, dass selbst Klänge mit hohen spektralen Gemeinsamkeiten wie Instrumente, die den gleichen Ton spielen, unterschieden werden können. Das Gehirn ist in der Lage, ein Geräusch mithilfe von Teilen des Spektrums als Ganzes zu erkennen und zu isolieren.¹³⁰ Wird dasselbe Sample zweimal innerhalb dieses Zeitrahmens gehört, identifiziert das Gehirn den Klang als zweimal abgespielte Aufnahme. Im Kontext von Videospiele gibt es allerdings nur sehr wenige Szenarien, in denen dieser Effekt einer gelingenden Immersion nicht schaden würde.

¹²⁷ Raffaseder (2002): S. 42

¹²⁸ vgl. Görne (2017) S. 39 mit weiteren Nachweisen

¹²⁹ vgl. ebd. S. 38 f.

¹³⁰ Vgl. Spitzer (2002): S. 119, 122, 136 f.

Frequenzmodulation

Bei der Frequenzmodulation (FM) wird die Frequenz eines Oszillators durch die Frequenz eines anderen Oszillators gesteuert, bzw. moduliert. Hierbei wird der steuernde Oszillator als *Modulator* bezeichnet, während der gesteuerte Oszillator *Carrier* (engl.: Träger) genannt wird.¹³¹

Ist die Frequenz des Modulators im positiven Spannungsbereich, so wird die Frequenz des modulierten Signals angehoben, bzw. abgesenkt, wenn die Spannung des Modulators negativ ist. Die dadurch resultierende Anhebung oder Senkung der Carrier-Tonhöhe kann bis zu einer Modulationsfrequenz von ca. 10 Hz problemlos als Tonhöhwenschwankungen identifiziert werden. Mithilfe höherer Modulationsfrequenzen werden neue Obertöne im Spektrum erzeugt.¹³² Die FM-Synthese ist eine vergleichsweise komplexe Methode, auf deren tiefergehende Beschreibung im Hinblick auf den Fokus dieser Arbeit verzichtet wird.

Kreuzmodale Korrespondenzen

Als Kreuzmodale Korrespondenzen der Wahrnehmung wird die Kopplung von Sinnesmodalitäten bezeichnet, bei der bspw. auditive Empfindungen mit visuellen Dimensionen wie Helligkeit, Größe, Form oder räumlicher Höhe verknüpft werden.¹³³ Nach dem Psychologen Charles Spence können drei Arten unterschieden werden.

Die **strukturelle Kreuzmodalität** ist angeboren oder durch neuronale Stimulation erzeugt. Ein Beispiel wäre die sinnesmodale Kopplung von Lautstärke und Helligkeit.

Statistische Kreuzmodalität wird auf Basis von Erfahrung mit der Umwelt und wahrscheinlicher akustisch-mechanischer Zusammenhänge erlernt. So wird bspw. ein hochfrequenter Ton mit einem kleineren Objekt in Verbindung gebracht oder dessen Position im Raum als hoch empfunden.

Die **semantische Kreuzmodalität** wird durch den sprachabhängigen Gebrauch von bestimmten Begriffen für unterschiedliche Sinneserfahrungen erlernt. Insbesondere auditive Reize werden mit Bezeichnungen aus anderen Sinnesbereichen wie „hell“, „rau“ oder „scharf“ beschrieben. Zum Beispiel wird ein hoher Ton mit einer feiner strukturierten, raueren Ortsfrequenz (Oberflächenstruktur eines Objektes) verbunden.¹³⁴

Einige im Experiment nachgewiesene kreuzmodale Korrespondenzen sind in Abb. 25 aufgelistet. Die Tonhöhe bezieht sich hier auf eine spektrale Gewichtung, d. h. sowohl auf tonale als auch auf geräuschhafte Reize.

¹³¹ Vgl. Raffaseder (2002): S. 236 f.; ebenso: Anwander (2017): S. 71

¹³² Vgl. Anwander (2017): S. 71

¹³³ Vgl. Görne (2017): S. 51

¹³⁴ Vgl. Görne (2017): S. 52

auditiver Reiz	korrespondierender Reiz	Korrespondenz
Tonhöhe	räumliche Höhe	höherer Ton = höhere Position
Tonhöhe	Helligkeit	höherer Ton = hellerer Reiz
Tonhöhe	Form	höherer Ton = kantigere Form
Tonhöhe	Größe	höherer Ton = kleineres Objekt
Tonhöhe	Ortsfrequenz	höherer Ton = feinere visuelle Struktur
Tonhöhe	Bewegungsrichtung	steigender Ton = Bewegung aufwärts
Lautstärke	Helligkeit	größere Lautstärke = hellerer Reiz
Tonhöhe	Geschmack	höherer Ton = süßeres Aroma
harmon. Konsonanz	Geschmack	größere Konsonanz = süßer

Abb. 28: Nachgewiesene kreuzmodale Korrespondenzen¹³⁵

Große Teile der erfahrbaren Kopplungen von Sinnesmodalitäten basieren auf sprachlichen Konzepten und werden im Rahmen dieser Arbeit als kreuzmodale Metaphern bezeichnet. Sie kreieren durch Assoziation Bedeutung, und sind deshalb für das Sounddesign besonders nützlich, da mit Klängen so Assoziationen hervorgerufen werden können, die weit über die absoluten Eigenschaften wie Tonhöhe oder Lautstärke hinausreichen.¹³⁶

Trigger/triggern

Englischer Begriff für *auslösen*, *anstoßen* oder *starten*. Wird aufgrund der Orientierung an Funktionsbezeichnungen der Software Pure Data in dieser Arbeit häufiger verwendet und beschreibt meist die Aktivierung eines Syntheseprozesses.

¹³⁵ Görne (2017): S. 53

¹³⁶ Vgl. Görne (2017): S. 110

15. Pure Data: Funktionen und Objekte

*It's not about being lead by the sound crafting tool, but the other way round. Having a concrete idea about what to do and using the tool to create it systematically.*¹³⁷

– Andy Farnell

In diesem Abschnitt werden das grundlegende Prinzip des Programms Pure Data – der kostenlosen Alternative zu Max/MSP – sowie alle zum Verständnis der vorgestellten Klangsynthesysteme erforderlichen Funktionen und Objekte erläutert. Dieses Nachschlagewerk basiert auf der *Bedienungsanleitung des Programms* (<https://puredata.info/docs/manuals/pd/>) Andy Farnells Erklärungen in *Designing Sound* (2010) und eigenen Beschreibungen.

Wichtig: Diese Erklärungen umfassen in manchen Fällen nicht alle Funktionen und Eigenschaften der behandelten Objekte oder sind zum Teil vereinfacht dargestellt.

Nach dem Motto „*the diagram is the program*“ (- Miller Puckette) kann der Signal- und Informationsfluss programmierter Patches direkt durch Anschauen und Nachverfolgen abgelesen werden. Daten fließen entlang der Verbindungslinien durch die Objekte, von denen sie verarbeitet werden. Letztendlich fließt der *Output* eines Objektes durch ein *Outlet* als Input in das *Inlet* eines nachgeschalteten Objekts.¹³⁸ Ein Objekt hat meist ein oder mehrere Inlets und Outlets, die als kleine, horizontale Rechtecke auf der oberen bzw. unteren Kante des Objekts erkennbar sind.

Objektklassen

In dieser Arbeit kommen drei verschiedene Objektklassen zum Einsatz, die jeweils durch ihre Form erkennbar sind.

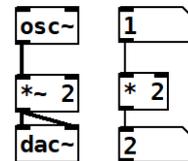
- **Standardobjekt:**  hat die Form eines Rechtecks; hat jeweils die Funktion, die als erste Ziffernfolge ohne Leerzeichen lesbar ist
- **Messageboxen:**  erkennbar an der Einbuchtung der rechten Kante; kann bestimmte Befehle, Zahlenwerte oder *Bangsignale* senden
- **Numberbox:**  erhalten Zahlenwerte und geben diese weiter; trifft eine so gesendete Zahl auf ein Inlet, dass nur Bangsignale verarbeitet, zählt der gesendete Zahlenwert als Bangsignal

¹³⁷ „Es geht nicht darum, vom Sounddesignwerkzeug geführt zu werden, sondern umgekehrt. [Es geht darum] eine konkrete Vorstellung davon zu haben, was man erschaffen will und dies mithilfe des Werkzeugs systematisch zu kreieren.“ Farnell (2010): S. 147

¹³⁸ Vgl. ebd. S. 147; 151

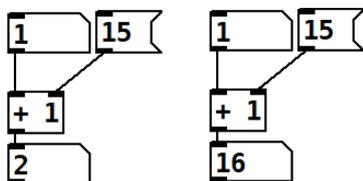
Viele Funktionen der Standardobjekte können sowohl Zahlenwerte als auch Signale verarbeiten. Die Signalverarbeitung muss jedoch durch ein ~ (*tilda*) nach der Objektbezeichnung festgelegt werden.

Verbindungslinien, die Signalinformation leiten, sind dicker (links) als Zahlenwert-/Bangverbindungen.



Inlets (für diese Arbeit vereinfacht)

Die Funktionen der verschiedenen Inlets sind von zentraler Bedeutung, auch wenn diese gleich aussehen. Viele Standardobjekte verfügen über zwei oder mehrere Inlets. Unterschieden wird in erster Linie zwischen *rechtem (cold)* und *linkem (hot)* Inlet. Das linke Inlet verarbeitet die von dem Objekt zu verarbeitende Information und verursacht somit Berechnungen. Das rechte Inlet hingegen aktualisiert interne Werte des Objekts, ohne eine Berechnung zu initiieren. Dies ist besonders wichtig für das Verständnis einiger Patches dieser Arbeit:



Die nebenstehende Abbildung zeigt zwei Versionen desselben Patches. In der linken wurde die Messagebox noch nicht „gebangt“, d. h. ihre Information wurde nicht an das Additionsobjekt weitergegeben. In der rechten Version ersetzte ein Bangen der Messagebox den internen Wert des Additionsobjektes und das Ergebnis wird 16. Diese trügerische Darstellung sollte stets beim Betrachten der Patches beachtet werden.

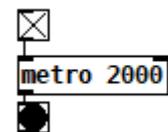
Bang-Objekte

Bang: Die fundamentalste aller Informationsarten ist die Bang-Message, die Berechnungsvorgänge initiiert. Werden beispielweise Zahlenwerte an ein „Hot“-Inlet gesendet, wirkt die Zahleninformation gleichzeitig auch als Bang.

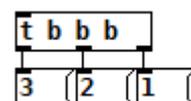
Eine **Bang Box** ist ein Objekt, das Bangsignale über sein Inlet oder via Mausklick empfangen und weiterleiten kann. Durch das Blinken in schwarz bei Senden einer Bang-Message wird dieses Objekt im Rahmen dieser Arbeit auch als Indikator für die Funktionalität der Patches verwendet.



Schalter: Ein Schalter versendet ebenfalls Bangsignale, kann jedoch präziser für die Ein- und Ausschaltung von Vorgängen wie die des **Metronom-Objekts** verwendet werden. Letzteres versendet in festlegbaren Zeitintervallen (hier 2000 ms) eine Bang-Message wie nebenstehend abgebildet.



Das **Trigger-Objekt** ermöglicht die Aufteilung von Bang-Message, um sie in einer spezifischen Reihenfolge an nachgeschaltete Objekte zu senden. Wie für einige andere Objekt-Funktionen genügt bereits der Anfangsbuchstabe der Objektbezeichnung (trigger bzw. t). Durch Aufzählung von „b“-Zeichen wird festgelegt, wie viele Outlets das Trigger-Objekt aufweist, aus dem es Bangsignale *von rechts nach links* sendet.



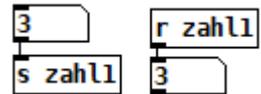
Funktionen für Übersichtlichkeit und erleichterte Steuerung

Subpatches

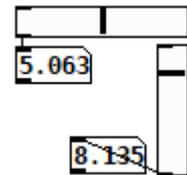
Im Interesse besserer Übersichtlichkeit und Bedienbarkeit werden in sich geschlossene Syntheseprozesse in *Subpatches* angelegt. Diese sind als System im System zu betrachten und sind durch die Kennzeichnung „pd“ am Anfang der Objektbezeichnung zu erkennen. Jedes Klang-Element der in dieser Arbeit vorgestellten Synthesysteme weist mindestens eine Subpatch-Ebene auf.



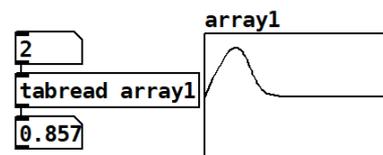
Send & Receive-Objekte: Diese Objekte ersetzen die Verbindungslinie zweier Objekte und erleichtern somit die Erstellung übersichtlicherer Patches, bzw. die Kommunikation zwischen verschiedenen Patch-Ebenen. Die erste Symbol-/Ziffernfolge nach der Objektbezeichnung bestimmt die „Adresse“ und muss für Sender und Empfänger gleich lauten. Durch Hinzufügen eines Tilda, können Send-Objekte auch Signale weiterleiten.



Slider: Durch horizontale bzw. vertikale Steller (eng.: Slider) können Zahlenwerte in festlegbaren Wertebereichen durch Verschieben mit der Maus eingestellt werden. Gleichzeitig kann die Steller-Marke zur besseren Einschätzung von Werteverläufen mit dem Auge verfolgt werden. Im Beispiel rechts liegen die Wertebereiche zwischen 0 und 10.

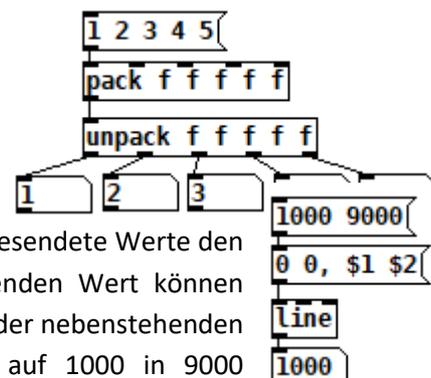


Array: Zweidimensionale Datenstruktur, ähnlich wie bei einem Koordinatensystem: einem Wert ist ein anderer zugeordnet. In dieser Arbeit finden Arrays nur in graphischer Darstellung Anwendung. Die Abbildung zeigt das Auslesen des Maximums bei X = 2 in einem Array-Graphen, der von X = 0 bis 10; und Y = -1 bis 1 reicht.



Zahlenwertverarbeitung

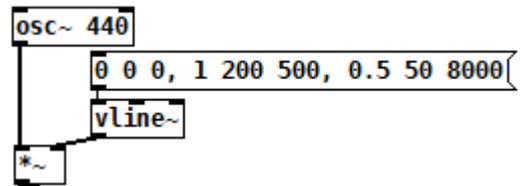
Listen: Mithilfe von Listen können viele Werte über einen Kanal gesendet werden. Hierfür wandelt ein Pack-Objekt die Werte in eine Liste um, bis sie von einem Unpack-Objekt über die entsprechenden Outlets an ihre Ziel-Objekte geleitet werden. Dies ist in dieser Arbeit insbesondere für das Laden umfassender Parametersteuerung notwendig.



Zählfunktionen: Mit einem Line-Objekt können flüssige Werteverläufe erzeugt werden. Hierbei legen in das linke Inlet gesendete Werte den Werteverlauf fest. Mit einem \$-Zeichen vor dem entsprechenden Wert können hierbei Parameter anstelle starrer Werte verwendet werden. In der nebenstehenden Abbildung steigt der Output-Wert der Zählfunktion von 0 auf 1000 in 9000 Millisekunden.

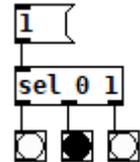
Ähnlich funktioniert die vline~-Funktion, die meist als Hüllkurve für Audiosignalbeeinflussung verwendet wird. Eine Verlaufsphase besteht aus je drei Werten: Zu erreichender Amplitudenwert; Dauer des Werteverlaufs bis zum Erreichen dieses Wertes; Verzögerung dieser Phase.

Bspw. wird der Amplitudenverlauf eines Signals mit einer nebenstehend abgebildeten Hüllkurve gesteuert, so steigt die Amplitude nach 500 ms innerhalb von 200 ms von 0 auf 1 und fällt nach insgesamt 8 Sekunden in 50 ms auf 0,5.



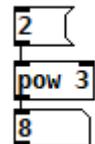
Beide Zählerfunktionen erfordern deutlich mehr CPU-Leistung als andere Objekte und sollten in einem prozeduralen Klangsystem daher so effizient wie möglich eingesetzt werden.

Select-Objekt: Mithilfe der Select-Funktion können ausgehend von einem Parameterwert verschiedene Patch-Bereiche gebangt werden. Hierzu wertet die Funktion einen eingehenden Zahlenwert aus und sendet ein Bangsignal an das entsprechende Outlet (im Beispiel: linkes Outlet für 0; mittleres Outlet für 1; rechtes Outlet für alle anderen Werte).



Power-Objekt: Die Powerfunktion exponiert einen Wert mit dem eingehenden Zahlenwert.

Wrap-Objekt: Die Wrapfunktion gibt stets die Nachkommastellen eines empfangenen Zahlenwertes aus. (siehe Abschnitt 7.1.1)



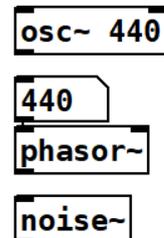
Sig~-Objekt: Die Signal-Funktion wandelt einen Zahlenwert in einen Gleichanteil um.

Signalverarbeitung

Signalquellen

Objekte, die Signale verarbeiten, sind an einem ~ (*Tilda*) nach der Objektbezeichnung erkennbar. Es gibt jedoch nur drei Objekte, die als *Signalquellen* fungieren:

Das **Osc**-Objekt generiert eine Sinusschwingung mit einer Amplitude von -1 bis 1 . Das nebenstehend abgebildete Objekt erzeugt einen Sinus von 440 Hz. Die Festlegung der Frequenz kann auch über das linke Inlet erfolgen. Das Rechte Inlet legt die Phase der Schwingung fest.



Das **Phasor**-Objekt generiert eine Sägezahnschwingung, die eine Amplitude von 0 bis 1 aufweist. Zur Erzeugung weißen Rauschens dient das **Noise**-Objekt.

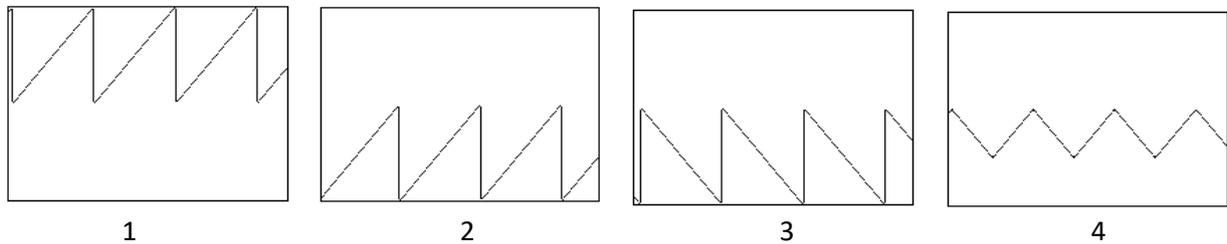
Von diesen Grundformen aus können durch Signalbearbeitung weitere Schwingungsarten generiert werden. Ein Beispiel wäre hier die Erzeugung einer Dreieckswelle mithilfe der Maximalfunktion:

Maximalfunktion `max~` und **Minimalfunktion** `min~`

Die Maximalfunktion gibt stets nur den derzeit Höheren von zwei Werten aus, die in das jeweils linke oder rechte Inlet gesendet werden. Im Fall von `max~ 0` würden bspw. jegliche negativen Amplitudenwerte eines Standardsinussignals auf der Nulllinie abgeschnitten, bis die Amplitude wieder einen positiven Wert erreicht, der die 0 als derzeit maximaler Wert ablösen würde. Bei der Minimalfunktion wird entsprechend stets der kleinere Inputwert ausgegeben.¹³⁹

¹³⁹ Vgl. Farnell (2010): S. 207

Da in Pure Data kein eigenes Objekt für die Generierung einer Dreieckswelle existiert, kann eine solche mithilfe der Maximalfunktion aus einer Dreieckswelle erzeugt werden. Hierbei wird eine stets positive, sägezahnartige Phasorwelle (1) um -1 in Y-Richtung verschoben (2), dieses Signal wird anschließend zusammen mit einer invertierten Version des Phasorsignals (3) jeweils in das rechte und linke Inlet der Maximalfunktion gesendet. Das Ergebnis ist eine Dreieckswelle (4).



Clipping~-Objekt: Schneidet die Amplitude jenseits der festgelegten Minimal- und Maximalwerte ab.

```
clip~ -0.5 0.5
```

Filter:

Hip~-Objekt: einfaches Hochpassfilter. Das Argument (Zahlenwert im Objekt-Feld) legt die Cutoff-Frequenz fest.

```
hip~ 50
```

Lop~-Objekt: einfaches Tiefpassfilter. Das Argument (Zahlenwert im Objekt-Feld) legt die Cutoff-Frequenz fest.

```
lop~ 2000
```

```
bp~ 440 2
```

Bp~-Objekt: Bandpassfilter. Das erste Argument legt die Mittenfrequenz fest, das zweite die Filtergüte.

Weiterführende Funktionalität

Fenster Clip

Die prinzipielle Signalverarbeitung in Pure Data kann dank der 32-bit-Floating-Point-Struktur einen extrem großen Wertebereich abbilden. Für die Ausgabe als hörbares Audiosignal steht in Pure Data allerdings nur ein Fenster zur Verfügung, das den Wertebereich -1 bis $+1$ umfasst. Dadurch ist es möglich, das Signal durch Multiplikation zu vergrößern und durch Addition so zu verschieben, dass nur jene Signalanteile hörbar wiedergegeben werden, die in diesen lesbaren Bereich von -1 bis $+1$ fallen.

Wichtig ist hierbei zu beachten, dass ein solches Vorgehen nur dann zum gewünschten Ergebnis führt, wenn vor dem Signalausleseprozess kein Hochpassfilter geschaltet ist, da dieses jeglichen Gleichanteil¹⁴⁰ ausfiltern würde.

¹⁴⁰ Der Gleichanteil beschreibt hier die Verschiebung des Signals aus der Amplituden-Nulllinie, sozusagen in Y-Richtung. (Vgl. Dickreiter (2009): S. 604) Eine solche Verschiebung des Signals wird auch als DC-Offset bezeichnet.

16. Weitere Inspirationen für die Voltgun

Titel: Destiny 2 **Typ:** Sleeper Simulant; **Zeitpunkt:** 0:00

Videolink: <https://www.youtube.com/watch?v=LDeYGoE58K8>

Titel: Destiny 2, **Typ:** *Merciless*; **Zeitpunkt:** 3:51 **Typ 2:** *Queensbraker*; **Zeitpunkt:** 5:55

Videolink: <https://www.youtube.com/watch?v=yYWjxdtaL1M>

Titel: Doom 3; **Typ:** BFG 9000; **Zeitpunkt:** 3:11

Videolink: <https://www.youtube.com/watch?v=0b68TgGLMWo>

17. Anlagenverzeichnis

Die Anlagen sind in den beigefügten verlinkten Ordnern aufrufbar.

Video Captures

DemolevelVideoCapture:

In diesem Video wird das vollständige Demonstrationslevel mit allen Waffentyp-Klängen vorgestellt.

Patch-Demonstration

Hier werden alle Patch-Funktionen demonstriert, die nicht in das Demolevel integriert sind.

- „Waffe angelegt“-Schalter
- Bassdekorrelation für Kopfhörer
- LOAD (level of audio detail)
- Distanzbedingte Verzögerung des Schussklangs mit Rücksicht auf die Projektilgeschwindigkeit

Syntheseschritte

In Abschnitt 7 und 8 wird im rechten Bildrand auf beigefügte Audiodateien verwiesen, die den Klangsyntheseprozess der besprochenen Schritte auditiv widerspiegeln. Sie sind im Ordner „Syntheseschritte“ zu finden. (Kontinuierliche Klänge werden jeweils ca. 4 Sekunden wiedergegeben; bei kurz andauernden Klängen je zwei Wiederholungen). Die Benennung folgt dieser Struktur:

totale Nr._Klangelement_Nummer

Beispiel: 001_Deto. 1_01



Patch-Abbildungen

In diesem Ordner sind Abbildungen aller Pure Data-Patches zu finden.

Sowohl der Patch der realen Waffen als auch der Voltgun-Patch verfügen über eine Benutzeroberfläche (RW_InterfaceOberflaeche; Voltgun_InterfaceOberflaeche), die als oberste Ebene fungiert, alle Subpatches miteinander verknüpft und die wichtigsten Steuergrößen abbildet.

Pure Data Patches

In diesem Ordner sind die Originaldateien der Patches abgelegt.

Unity_Demolevel

Enthält das Unity-Demolevel-Projekt.
