

Systeme generativer Musik im Bereich modularer Synthese

Techniken und Wirkungsweisen

Bachelorthesis im Studiengang Audiovisuelle Medien (B.Eng.) an der Hochschule der Medien in Stuttgart zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering.

Vorgelegt von:	Benedikt Ludwig
Matrikelnummer:	35000
e-mail:	benediktludwig@live.de
Betreuer:	Prof. Oliver Curdt (Erstprüfer) Heiko Schulz (Dipl.-Ing. FH) (Zweitprüfer)
vorgelegt am:	28.01.2022

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit versichere ich, Benedikt Ludwig, ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel: *Systeme generativer Musik im Bereich modularer Synthese - Techniken und Wirkungsweisen* selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen wurden, sind in jedem Fall unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit ist noch nicht veröffentlicht oder in anderer Form als Prüfungsleistung vorgelegt worden.

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

Stuttgart, 28.01.2022

Benedikt Ludwig

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht Techniken und Zusammenhänge generativer Musik in Systemen modularer Synthese. Hierbei wird erklärt was unter generativer Musik verstanden wird und wie diese in einem Modularen Synthesizer generiert werden kann. Der Hauptfokus der Arbeit liegt auf der Funktionsweise und den möglichen Anwendungsbereichen verschiedener Module zum Steuern eines generativen Patches. Um das Verständnis für generative Patches zu vertiefen, werden abschließend einige Techniken in VCV Rack implementiert.

Abstract

This thesis investigates techniques and contexts of generative music in modular synthesis systems. It explains what is meant by generative music and how it can be generated in a modular synthesizer. The main focus of the thesis is on the functionality and possible applications of different modules for controlling a generative patch. To deepen the understanding of generative patches, finally some techniques are implemented in VCV Rack.

Genderhinweis

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten sind dabei ausdrücklich stets eingeschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung.....	2
Kurzfassung.....	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung.....	7
2 Systeme generativer Musik.....	8
2.1 Was ist 'generative Musik'?	8
2.2 Was ist ein System?.....	9
2.3 Eigenschaften generativer Systeme.....	9
2.4 Geschichte und Beispiele generativer Musiksysteme	10
2.5 Tonale Struktur.....	12
2.6 Zeitliche Struktur	13
3 Generative Systeme innerhalb modularer Synthese.....	14
3.1 Modulare Synthese	14
3.2 Grundkonzepte Modularer Synthese.....	16
3.2.1 Steuerspannungen (engl.: Control Voltage).....	16
3.2.2 Gates und Trigger.....	17
3.2.3 Tonhöhe	18
3.2.4 Timbre	18
3.3 Eigenschaften modularer Synthese für generative Musik	19
3.4 Audio Sources und Modifiers	20
3.5 Clock, Gates und Trigger	20
3.5.1 Clockgenerators.....	21
3.5.2 Clockdivider und -multiplier.....	21
3.5.3 Rhythmusgeneratoren	23
3.6 CV Sources	24
3.6.1 LFOs.....	24
3.6.2 Hüllkurven.....	24

3.6.3	Sequenzer	27
3.6.4	CV Rekorder	28
3.6.5	Envelope Follower	29
3.6.6	Pitch Follower	29
3.6.7	Sample & Hold.....	29
3.6.8	Shift Register	30
3.6.9	Turing machine	31
3.7	CV Modifikatoren.....	32
3.7.1	Attenuators	32
3.7.2	Offsets	32
3.7.3	VCA	33
3.7.4	Inverter	33
3.7.5	Attenuverters	33
3.7.6	Quantisierer	34
3.7.7	Schalter	34
3.7.8	Komparatoren.....	35
3.7.9	Logische Module.....	36
3.7.10	Minimum Maximum	37
3.7.11	Slew Limiter.....	38
4	Generative Techniken.....	38
4.1	Struktur generativer Patches.....	39
4.2	Deterministische Module	39
4.2.1	Komplexe LFO Netzwerke	40
4.2.2	Komplexe Netzwerke mit Hüllkurven	44
4.2.3	Komplexe Netzwerke mit Shift Registern.....	45
4.2.4	Komplexe Netzwerke mit sequenziellen Schaltern	45
4.2.5	Komplexe Netzwerk CV Recorder	46
4.3	Zufalls- und wahrscheinlichkeitsbasierte Module	46

4.3.1	Rauschen	46
4.3.2	Sample & Hold.....	47
4.3.3	Shift Register	47
4.3.4	Turing Machine	48
4.3.5	Chaos Modul	48
4.3.6	Rhythmusgeneratoren	49
4.3.7	Bernoulli Gates	50
4.3.8	Wahrscheinlichkeiten und Zufälle in verschiedenen Modulen	50
4.4	Zusammenspiel von Chaos und Ordnung.....	51
4.5	Mixing, Abhängigkeiten und dynamische Trigger.....	51
4.5.1	Mixing generativer Patches	51
4.5.2	Abhängigkeiten.....	52
4.5.3	Dynamische Trigger.....	52
5	Implementierung generativer Patches in VCV Rack	54
5.1	Patch 1 – Generative Trigger und Rhythmen	54
5.2	Patch 2 – generative Melodien.....	56
5.3	Patch 3 – generative CV	57
5.4	Patch 4 – Ambienter Patch.....	58
6	Fazit.....	60
	Literaturverzeichnis	61
	Abbildungsverzeichnis.....	64

1 Einleitung

Generative Musik ist die Idee eines Systems, das seine Musik über die Zeit von selbst komponiert. Dafür wird dem System ein bestimmtes Set an musikalischen Konditionen vorgegeben, anhand dessen das System seine musikalische Komposition generiert.¹

Es gibt unbegrenzt viele Arten von Systemen, welche generativ eine Komposition erzeugen. Ein Beispiel ist das Album *Ambient 1: Music for Airports* von Brian Eno, bei welchem Eno mehrere unterschiedlich lange Tonbänder übereinander gemischt hat.² Mit dem Auseinanderdriften der Abspielpositionen der unterschiedlichen Tonbänder entstanden hierbei kontinuierlich neue komplexe Klangmuster. Auch wenn in dieser Arbeit anfangs auf einige dieser Systeme eingegangen wird, liegt der Fokus dieser Arbeit auf Systemen generativer Musik im Bereich der modularen Synthese.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, dem Leser ein umfassendes Verständnis zu solchen Systemen vermitteln und ihm die Möglichkeit geben, selbst Systeme dieser Art zu designen und seinen eigenen Wünschen entsprechend anzupassen.

Im ersten Kapitel der Arbeit werden Begriffe etabliert, welche essenziell für das Designen solcher Systeme sind. So wird definiert, was unter generativ sowie generativer Musik zu verstehen ist und erklärt, was ein System ist. Darauf aufbauend werden die Kriterien eines Systems generativer Musik etabliert und einige Beispiele solcher Systeme beschrieben.

Um zu verstehen welche Bedingungen und Parameter in einem System generativer Musik von Bedeutung sind, wird anschließend auf die Struktur von Klängen, Geräuschen und Kompositionen eingegangen. Genauer wird hierbei die tonale und zeitliche Struktur behandelt. So wird aufgezeigt, welche Parameter in einer Komposition generativ gesteuert und manipuliert werden können. Es gibt jedoch weder spezifische Analysen bestimmter Musikgenres, noch behandelt diese Arbeit Techniken zum Sounddesign selbst.

Der Hauptteil der Arbeit fokussiert sich auf Module und Techniken innerhalb der modularen Synthese, welche generativ die vorher etablierten tonalen und zeitlichen Bedingungen steuern.

¹ Jauhiainen (2019), S. 14.

² Bainter (26.01.2019).

Anfangs wird erklärt, was genau unter einem modularen Synthesizer zu verstehen ist und inwiefern sich dieser von nicht modularen Synthesizern unterscheidet. Die Arbeit etabliert hierbei, wieso modulare Synthesizer eine gute Umgebung sind, um generative Systeme zu designen. Weiter werden wichtige Grundkonzepte zur Steuerung und zum Aufbau eines modularen Synthesizers vermittelt.

Anschließend werden nützliche Module für die Steuerung eines Patches vorgestellt. Hierbei gibt es zu den einzelnen Modulen zuerst eine generelle Einführung der technischen Hintergründe und Gegebenheiten, bevor mithilfe diverser Beispiele das generative Potenzial der Module gezeigt wird.

Schlussendlich werden verschiedene Beispiele generativer Systeme in VCV Rack präsentiert, bei welchen vermittelt wird, wie die unterschiedlichen Module kombiniert in einem System miteinander arbeiten können.

2 Systeme generativer Musik

Nachfolgend werden einige Begriffe definiert und aufbauend auf diesen Begriffen formuliert, was in dieser Arbeit unter einem 'System generativer Musik' zu verstehen ist. Weiter werden die Ziele und Bedingungen eines solchen Systems erläutert, sowie auf die Struktur eingegangen, unter welcher ein solches System arbeiten kann.

2.1 Was ist 'generative Musik'?

Generativ stammt von dem lateinischen Wort 'generare' ab und bedeutet etwas 'zeugen, erschaffen, hervorbringen'. Es hat zwei ursprüngliche Bedeutungen: Im biologischen Sinn ist generativ auf die geschlechtliche Fortpflanzung bezogen. In der Sprachwissenschaft entspricht generativ der Erzeugung von Sätzen.³ Kombiniert man den Begriff mit Musik kommt man zu dem Schluss, dass generative Musik sich selbst neu zeugt, bzw. erschafft.

Für Philip Galanter entsteht generative Kunst dann, wenn der Künstler einen Teil der Kontrolle über sein Werk an ein externes System abgibt.⁴ Das System generiert dann

³ Duden (30.11.2021).

⁴ Galanter (2006), S. 1.

etwas außerhalb der intuitiven Entscheidungen des Künstlers und schafft so etwas unerwartetes Neues. Auch für Brian Eno bedeutet generative Musik, dass anders als bei klassischer Komposition keine detaillierte Reihe von Instruktionen gegeben wird, wie genau sich die Komposition an jeder Stelle verhalten soll. Stattdessen gibt der Komponist dem erzeugenden System eine Reihe von musikalischen Bedingungen vor und anhand dieser Bedingungen entsteht etwas Neues innerhalb des Systems.⁵

Im Bereich der generativen Musik ist Brian Eno einer der Vordenker und die Person, die dem Begriff die meiste öffentliche Aufmerksamkeit gebracht hat.⁶

Auch wenn keine festgeschriebene wissenschaftliche Definition von generativer Musik existiert, so gibt es doch Definitionen von Künstlern, welche in diesem Feld spezialisiert sind. In David Toop's *Haunted Weather* definiert Richard Ross generative Musik als Musik, die im Moment von einem regel-basierten System erzeugt wird.⁷

2.2 Was ist ein System?

Unter einem 'System' versteht man einen beliebigen Prozess, der zur Transformation von Signalen führt.⁸ In dem Fall von einem System generativer Musik, kann diese Transformation auf die Veränderung und Generierung der Steuerdaten bezogen sein.

2.3 Eigenschaften generativer Systeme

Anders als bei klassischen Kompositionen entscheidet sich der Komponist von generativer Musik nicht für endgültig feste musikalische Phrasen und Abschnitte. Vielmehr gibt er einem System vor, wie es sich musikalisch verhalten soll. Priestley beschreibt dieses Verhalten des musikalischen Systems als eine Blackbox für den Performer.⁹ Es gibt eben nicht nur Parameter, welche einmal eingestellt werden und danach das zu erwartende Klangbild entsteht. Vielmehr interagieren die Parameter miteinander und verändern sich konstant zueinander. So ist das unterliegende System meist nur ein tonaler bzw. rhythmischer Rahmen in welchem sich die Musik auslebt.

⁵ Toop (2005), S. 184.

⁶ Priestley (2014), S. 1.

⁷ Toop (2005), S. 182.

⁸ Beucher (2011), S. 23.

⁹ Priestley (2014), S. 28.

Die entstehende Komposition wird somit zu einer Erkundung dessen, was sie in dem Moment selbst produziert. Dies ist ein grundlegender Unterschied zu einer klassischen Komposition. Bei klassischen Kompositionen sind die musikalischen Entscheidungen fest mit der exakten Vorstellung des Komponisten verbunden. Daraus stellt sich die Frage, wieso ein Komponist diese Kontrolle des Konkreten abgeben sollte und inwiefern er schöpferischen Anspruch auf die generierte Musik haben kann, nachdem diese ja erzeugt wurde und nicht wie bei klassischer Komposition nach den Vorstellungen des Schöpfer Note für Note und Klang für Klang komponiert wurde.

Brian Eno beschreibt diesen Unterschied mit einer Analogie zwischen einem Architekten und einem Gärtner: Während der Architekt ein detailliertes Bild von dem Werk in seinem Kopf hat und dort möglichst viele Parameter diesem Bild entsprechend anpasst, pflanzt ein Gärtner eine Handvoll ausgewählter Samen und verfolgt den Wachstumsprozess der Pflanzen.¹⁰ Der Gärtner ist hierbei zwar da, um die Pflanzen möglicherweise zu stützen und deren Äste zurechtzubiegen, die genaue Art des Wachstums ist aber außerhalb seiner Kontrolle.

In einem generativen Musiksystem ist es ähnlich. Die Analogie zu den ausgewählten Samen sind musikalische Ideen des Systemdesigners. Nun „pflanzt“ der Komponist seine musikalischen Ideen innerhalb des Systems und gibt diesen Bedingungen und Regeln, wie sich diese entwickeln sollen. Der Komponist nimmt also Einfluss auf die Entwicklung der Idee, sowie der Gärtner Einfluss auf seine Pflanzen nimmt. Wie der Gärtner kann der Artist jedoch nie kontrollieren, was genau im nächsten Moment mit seinen Ideen passieren wird und wie sich das gesamte System im Detail entwickelt.

2.4 Geschichte und Beispiele generativer Musiksysteme

Systeme generativer Musik gibt es in den unterschiedlichsten Formen.¹¹ Nachfolgend wird auf die Geschichte generativer Musiksysteme eingegangen und im Zuge dessen einige Beispiele dieser Systeme präsentiert.

Schon lange vor der Popularisierung des Begriffes ´generative Musik` durch Brian Eno, gab es Systeme, welche die Eigenschaften generativer Musiksysteme teilen.

¹⁰ Eno (11.10.2011).

¹¹ Bahr Martha (25.09.2018).

Zum Beispiel gab es schon im antiken Griechenland Windspiele.¹² Die äolische Harfe war eines dieser Windspiele. Die äolische Harfe erzeugt ihre Klänge durch die Interaktion des Windes mit den Saiten. Sobald die Saiten durch den Wind angeregt werden, resonieren diese und erzeugen unheimliche Klänge.¹³ Moderne Windspiele unterscheiden sich nicht von diesem grundsätzlichen Verhalten. Sie bestehen in der Regel aus unterschiedlich gestimmten Klangstäben, welche von einem Auslöser angeregt werden. Der Wind agiert hierbei als der zufällige Faktor, welcher den Ton bestimmt, der als nächstes gespielt wird. Ein Windspiel generiert also neue Melodien und Akkorde auf der Basis des Zufalls. Gleichzeitig sind die Melodien und Töne, die gespielt werden können, auf die Anzahl und Stimmungen der Klangstäbe beschränkt. Ein Windspiel generiert also konstant ein neues Resultat, während dieses Resultat vom Designer des Systems mit bestimmten Bedingungen eingeschränkt ist.

Ein weiteres Beispiel eines generativen Systems sind musikalische Würfelspiele. Diese erlangten in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts Popularität. Das erste bekannte Würfelspiel stammt von Johann Philipp Kirnberger.¹⁴ In einem Würfelspiel werden vorkomponierte Stücke anhand der Augenzahlen von Würfeln neu arrangiert.¹⁵ Hierbei sind die Würfel der zufällige generative Faktor, während der beschränkende Faktor der neu arrangierten Komposition, das vorhandene Notenmaterial ist. So entsteht aus Mozarts Würfelspiel für Walzer nun mal kein anderes Genre als Walzer, egal wie oft man würfelt. Die Ergebnisse sind also wieder zufällig innerhalb bestimmter definierter Grenzen.

Die Technik des Phasings, also das Auseinanderdriften verschiedener Signale, wurde 1965 von Steve Reich in seiner Komposition 'It's Gonna Rain' popularisiert.¹⁶ In dem Stück wurden zwei gleiche Aufnahmen von zwei Bandmaschinen wiedergegeben, welche auf zwei leicht unterschiedliche Abspielgeschwindigkeiten eingestellt waren.¹⁷ Durch die unterschiedliche Wiedergabegeschwindigkeiten drifteten die Aufnahmen über die Zeit immer weiter auseinander und bildeten so neu entstehende Klangmuster.

¹² Wilson (20.03.2021).

¹³ Jauhiainen (2020).

¹⁴ Jena (15.05.2006).

¹⁵ Maurer (1999).

¹⁶ Scherzinger (2005), S. 210.

¹⁷ Bahr Martha (25.09.2018).

Von den Arbeiten von Steve Reich beeinflusst, veröffentlichte Brian Eno 1978 das Album 'Ambient 1: Music for Airports'. Dieses Album war wegweisend für das Genre Ambienter Musik.¹⁸ Das Album wurde wie Steve Reich sein 'It's Gonna Rain' mit auseinanderdriftenden Tapeloops arrangiert. Jedoch war hier nicht die Wiedergabegeschwindigkeit der Bandmaschinen der Faktor für das Auseinanderdriften der Tonbänder. Stattdessen hatten die Tonbänder alle eine unterschiedliche Länge und drifteten somit nach jedem Durchgang auseinander. Weiter hat Eno mehr als 2 Tapeloops für die Tracks des Albums benutzt. Dies führte zu mehr Variationen und Klangkombinationen.

1995 arbeitete Eno mit einem Softwareprogramm namens KOAN der Firma SSEYO.¹⁹ Diese Software hatte verschiedene Tools, mit welchen generative Musik programmiert werden konnte. Unter dem 1996 von Eno veröffentlichten Titel 'Generative Musik 1 mit SSEYO Koan Software' wurde erstmals der Begriff generative Musik ins Leben gerufen.

Seit diesem Album gibt es viele verschiedene Bereiche der generativen Musik: Von ambienter Hintergrundbeschallung über generative Rhythmen und Melodien bis hin zu düsteren sich immer weiterentwickelnden Dronen.

2.5 Tonale Struktur

In der westlichen Wahrnehmung sind musikalische Klänge von drei wesentlichen Parametern bestimmt: der Lautheit, der Tonhöhe sowie der Klangfarbe.²⁰ Die Lautheit entspricht hierbei der subjektiven Intensität von den gehörten Schallen.²¹ Die Tonhöhe entspricht wiederum der Empfindung von 'Tiefe' und 'Höhe' der wahrgenommenen Ereignisse.²² Die Klangfarbe bezieht sich im Wesentlichen auf die spektrale Zusammensetzung des Klangereignisses. Dabei ist zu beachten, dass der zeitliche Verlauf der spektralen Zusammensetzung eines Klanges einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung seiner Klangfarbe hat.²³ Besitzt ein Schallereignis nicht alle dieser drei oben genannten Eigenschaften, so wird das Ereignis nicht mehr als Klang bezeichnet

¹⁸ Schiffmann (25.11.2018).

¹⁹ Cole (14.01.2022).

²⁰ Schauer / Ackermann (1991), S. 7.

²¹ Weinzierl (2009), S. 59.

²² Schauer / Ackermann (1991), S. 7.

²³ Enders (1997), S. 142.

sondern als Geräusch. Dies ist der Fall, wenn ein Schallereignis nicht auf periodischen Schwingungen aufgebaut und dadurch im Klangspektrum durch einen unharmonischen Teiltonaufbau gekennzeichnet ist.²⁴ Dadurch lässt sich keine eindeutige Tonhöhe mehr erkennen.

In Bezug auf ein System generativer Musik heißt das, dass diese Parameter zumindest im Teil generativ gesteuert werden müssen, um so im Moment etwas Neues zu erschaffen.

2.6 Zeitliche Struktur

In der tonalen Struktur ging es im Wesentlichen darum, wie ein einzelner Klang aufgebaut ist. Eine Komposition besteht aber aus vielen verschiedenen dieser Klänge welche sich gegenseitig beeinflussen. Jeder dieser Klänge hat wiederum Eigenschaften aus Kapitel 2.5 und beeinflusst die Wirkung anderer Klänge, welche zeitlich nach, vor oder auf diesen platziert sind. In der westlichen Wahrnehmung von Musik entsprechen diese Eigenschaften der einzelnen Schallereignisse und deren Interaktion wiederum vier Dimensionen: der Dynamik, der Rhythmik, der Melodik sowie der Harmonik. Die Dynamik liefert das Grundgerüst, auf welchem sich die Musik aufbaut und orientiert. Sie beschreibt den Unterschied zwischen lauten und leisen Stellen und stellt so eine Verbindung zu der Intensität zwischen den einzelnen Klängen dar.²⁵ Rhythmik wird von Priestley als die Struktur von sich wiederholenden Klängen beschrieben und Melodien wiederum als die Struktur von sich wiederholenden Rhythmen in Kombination mit sich wiederholenden Tonhöhen.²⁶ Eine Melodie ohne Rhythmik ist also nicht möglich. Die Harmonik bezieht sich wiederum auf den Zusammenklang mehrerer Töne.²⁷ Diese verschiedenen Abschnitte werden schließlich in Motive, Phrasen und Themen aufgeteilt. Ein Motiv ist hierbei der kleinste melodische Teil eines Musikstücks. Mehrere Motive in einer aneinander gereihten abgeschlossenen Einheit bilden wiederum Phrasen und diese bilden dann wieder Themen.

²⁴ Enders (1997), S. 115.

²⁵ Sandmann (2019), S. 26.

²⁶ Priestley (2014), S. 41.

²⁷ Mcguire (05.06.2019).

Möchte man nun diese Dimensionen mit einem System generativ erzeugen, benötigt man Möglichkeiten und Werkzeuge, um diese über die Zeit zu steuern und zu manipulieren.

3 Generative Systeme innerhalb modularer Synthese

Im nachfolgenden Kapitel wird die Verknüpfung zwischen generativer Musik und modularer Synthese hergestellt. Dafür geht die Arbeit anfangs auf die Prinzipien Modularer Synthese ein. Danach werden diese Prinzipien mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2 verknüpft und so ein Verständnis dafür geschaffen, wie generative Musik auf einem modularen Synthesizer funktionieren kann. Hierfür werden einzelne Parameter und Schnittstellen innerhalb eines Modularen Systems vorgestellt, welche generativ über die Zeit gesteuert und moduliert werden können.

3.1 Modulare Synthese

Das Wort Synthesizer bezieht sich auf das Wort Synthese, welches aus dem griechischen kommt und für zusammensetzen, -fügen und -stellen steht.²⁸ Bernd Enders beschreibt einen musikalischen Synthesizer als ein Gerät, welches geschaffen wurde, um beliebige Klänge und Geräusche auf elektronischem Weg zusammensetzen.²⁹ Auch Raffaseder beschreibt das Ziel und die Aufgabe eines Synthesizers als „die Erzeugung komplexer Klangereignisse mit elektronischen Mitteln“.³⁰ Ein Synthesizer besteht aus verschiedenen Modulen, welche jeweils verschiedene Aufgaben in der Klangerzeugung und der Manipulation dieser Klänge erfüllen. Ein Modul ist also ein in sich abgeschlossener Baustein mit einer oder mehreren bestimmten Funktionen.³¹

Es gibt drei grundsätzlich verschiedene technische Ansätze, wie diese Module miteinander verbunden sind. Anhand dieser Ansätze wird in der Welt der Synthesizer zwischen modularen, nicht modularen und semimodularen Synthesizern unterschieden. Bei einem nicht modularen Synthesizer ist der Signalweg der einzelnen

²⁸ Duden (08.12.2021).

²⁹ Enders (1985), S. 8.

³⁰ Raffaseder (2010), S. 213.

³¹ Enders (1985), S. 151.

Module fest vorgegeben und somit nicht vom Nutzer manipulierbar.³² Bei einem semimodularen Synthesizer gibt es wie bei einem nicht modularen Synthesizer einen vorgegebenen Signalweg, mit welchem der Synthesizer bereits Klänge erzeugen kann. Dieser vorgegebene Signalweg kann jedoch manuell überbrückt und verändert werden.³³ Ein modularer Synthesizer hat im Gegensatz zu den beiden anderen Konzepten keinen vorgegebenen Signalweg. Stattdessen wird der Signalweg von dem Designer des Systems vorgegeben. Es werden also die einzelnen Module individuell miteinander verbunden und so ein neuer Signalfluss geschaffen, welcher sich an die Bedürfnisse des Designers anpassen kann.³⁴ Diese Art der Signalführung wird über sogenannte Patchingkabel realisiert. Daher kommt auch der gängige Begriff Patch als Synonym für ein Preset oder ein Snapshot. Die Kabel verbinden die Ein- und Ausgänge der einzelnen Module und transportieren dabei die Audiosignale, sowie die Signale zum Steuern der Module.³⁵ Ein Patch ist also ein vorgegebener Signalweg mitsamt den Einstellungen der verwendeten Module.³⁶

Aufgrund der offenen Umgebung modularer Synthesizer und der Tatsache, dass viele Systeme auf gewisse Standards wie zum Beispiel Eurorack genormt sind, gibt es unzählig viele Varianten von verschiedenen Modulen, welche innerhalb eines Systems variabel austauschbar sind.³⁷ Dies führt zu einer endlosen Anzahl an Möglichkeiten, wie ein System aufgebaut sein kann und was sich mit dem jeweiligen System erreichen lässt.

Diese Komplexität macht es unmöglich, auf jedes System einzeln einzugehen. Viele Module haben jedoch die gleichen Grundfunktionen und Ideen und unterscheiden sich nur in dessen Implementierung. So gibt es ein Modul für das Erzeugen einer Hüllkurve (engl. Envelope) in verschiedensten Varianten. Bei manchen Modulen sind die Parameter über einen externen Eingang am Modul steuerbar und ein anderes Mal lässt sich die Hüllkurve in einem Loop betreiben. Eine weitere Variation ist eine Hüllkurve, welche eine zusätzliche 'Hold' Phase hat, in der die erzeugte Spannung für einen gewissen Zeitraum gehalten wird. Neben den genannten gibt es noch viele weitere Ausführungen, die sich in der Art der Funktionen leicht unterscheiden. Die

³² Ruschkowski (2010), S. 181.

³³ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 362.

³⁴ Enders (1985), S. 151.

³⁵ Stange-Elbe (2015), S. 195.

³⁶ Enders (1997), S. 228.

³⁷ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 30.

Grundfunktion der Module, also die Erzeugung einer Hüllkurve bleibt jedoch gleich. Nach diesen Grundfunktionen lassen sich die Module einteilen. So gibt es für die verschiedenen Funktionen und Aufgaben innerhalb des Systems unterschiedliche Module wie Oszillatoren, Hüllkurvengeneratoren, Sequenzer, sowie viele weitere.

3.2 Grundkonzepte Modularer Synthese

In Kapitel 2.5 wird auf die Tonale Struktur einer Komposition eingegangen. In diesem Kapitel wird der Bezug zu modularen Synthesizern hergestellt, indem Grundkonzepte modularer Synthese vorgestellt werden. Diese sind wichtig, um die Möglichkeiten und Abläufe modularer Patches nachvollziehen zu können. Es gibt vier verschiedene Arten von Signalen in Systemen modularer Synthese. Drei Signalarten sind für die Kommunikation und Steuerung von Modulen gedacht. Die letzte Kategorie beinhaltet Audiosignale, welche hauptsächlich für die Erzeugung von Schallereignissen genutzt werden, in modularen Systemen jedoch auch als Modulationssignal genutzt werden können.

3.2.1 Steuerspannungen (engl.: Control Voltage)

Ein Grundkonzept modularer Synthesizer ist, dass man den Signalweg über Patchkabel individuell vorgibt. Die Audiosignale werden über Wechselspannungen von Modul zu Modul weitergegeben, bis Sie schließlich an dem gewünschten Ziel angekommen sind. Patchkabel werden jedoch nicht nur für die Audiosignalübertragung genutzt. Mit sogenannten Control Voltages (CV) können die unterschiedlichsten Parameter von Modulen gesteuert und moduliert werden.³⁸ In der Regel haben Module wie z.B. ein Filter extra CV Eingänge für Steuerspannungen, um ihre Parameter zu steuern und modulieren. Im Fall eines Filtermoduls sind seine Resonanz oder seine Grenzfrequenz gängige Modulationsziele.³⁹ In generativen Patches werden diese Spannungen genutzt, um den Patch konstant zu manipulieren. CV Sources und Modifiers mit generativem Potenzial werden in kommenden Kapiteln behandelt. Neben Möglichkeiten zur Steuerung von Audioquellen und -modifiers, haben auch CV Sources und Modifiers CV Eingänge für die Steuerung ihrer

³⁸ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 14.

³⁹ Anwander (2017), S. 64.

Parameter. Damit hat man die Möglichkeit, komplexe Netzwerke aus verschiedenen CV Sources und Modifiers zu bauen und so komplexe Spannungen zu generieren. In einem späteren Kapitel wird noch ausführlich erklärt, wie ein solches Netzwerk aufgebaut werden kann.

3.2.2 Gates und Trigger

Die Dauer und zeitliche Position von Ereignissen werden in der modularen Welt von so genannten Gate- und Triggersignalen bestimmt.⁴⁰ Sie sind somit spezielle Arten von Steuerspannungen, die Modulen die Möglichkeit geben, zeitliche Abläufe zu verstehen und dementsprechend zu starten, zu stoppen oder sich an ein bestimmtes Tempo anzupassen. Ein Gate Signal steigt normalerweise auf die maximale Spannung an, wenn eine Note oder ein Event startet und fällt wieder auf die minimale Spannung ab, sobald dieses endet. Das Signal entspricht also der Spannung, die den Zeitpunkt und die Dauer eines Ereignisses bestimmt.⁴¹ Bei einem Trigger wird im Gegensatz hierzu die Spannung nicht gehalten, sondern fällt nach einer sehr kurzen Zeitspanne wieder ab.⁴² Ein Trigger bestimmt also im Gegensatz zu einem Gate Signal nur den Zeitpunkt, an welchem ein Event startet.⁴³

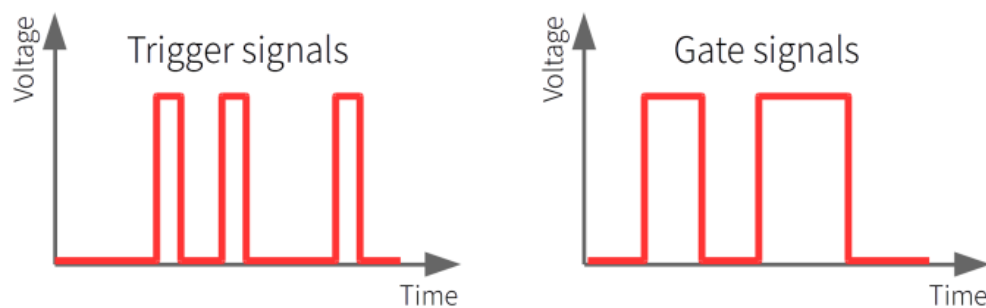


Abbildung 1: Trigger- und Gatesignale

Sowohl Triggersignale als auch Gatesignale können als Taktgeber (Clock) genutzt werden, um Module untereinander zu synchronisieren.⁴⁴ Ein weiterer Nutzen von

⁴⁰ Enders (1985), S. 146.

⁴¹ Anwander (2017), S. 192.

⁴² Ruschkowski (2010), S. 152.

⁴³ Anwander (2017), S. 200.

⁴⁴ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 15.

Triggersignalen ist es, verschiedenen Modulen mitzuteilen, wenn diese etwas Bestimmtes machen sollen. Ein Beispiel ist ein Switch, welcher ein Triggersignal bekommt und als Antwort zwischen zwei Signalen an seinem Ausgang umschaltet.

3.2.3 Tonhöhe

Auch die Tonhöhe der sounderzeugenden Module werden in der modularen Welt über Control Voltages gesteuert. Hierbei korrespondieren bestimmte Werte der Steuerspannung mit bestimmten Tonhöhen. Es gibt verschiedene Standards, welcher Spannungswert mit welcher Tonhöhe korrespondiert. Der am weitest verbreitete Standard ist der von Robert Moog erfundene 1V/oct Standard.⁴⁵ Dieser besagt, dass bei einer Änderung von einem 1V in der Steuerspannung die Veränderung in der Tonhöhe eine Oktave ist.⁴⁶ Oft werden die Eingänge von Parametern für die Steuerung der Tonhöhe mit `CV IN` oder `V/OCT` beschriftet.

3.2.4 Timbre

Bei einem modularen Patch hängt die Klangfarbe von einer Vielzahl an Parametereinstellungen, dem gesteckten Signalfuss sowie von den gewählten Modulen ab. Das Timbre entspricht den einzigartigen tonalen Eigenschaften eines Klanges außerhalb seiner Tonhöhe und seiner Lautheit.⁴⁷ In anderen Worten ändert sich das Timbre jedes Mal, sobald außerhalb der Tonhöhe und der Lautheit sounddesigntechnisch etwas am vorherigen Klang geändert wurde.

Wie man genau ein bestimmtes Klangbild designt wird und was die Überlegungen hinter verschiedenen Sounddesignentscheidungen sind, geht weit über das Thema der Arbeit hinaus. Es ist jedoch von zentraler Bedeutung zu verstehen, wie generative Patches die Klangfarbe von Sounds verändern können. So kann ein Patch generativ sein, welcher aus einer Drone besteht, solange sich das Timbre der Drone konstant verändert und so zu jedem Zeitpunkt ein neues Klangbild entsteht. Diese konstante Veränderung liegt hierbei in der Steuerung der klangformenden Parameter.

⁴⁵ Anwander (2017), S. 33.

⁴⁶ Enders (1997), S. 304.

⁴⁷ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 363.

3.3 Eigenschaften modularer Synthese für generative Musik

Wie zuvor erwähnt ist einer der großen Vorteile modularer Synthesizer ihre Flexibilität und Anpassbarkeit an die Wünsche des Systemdesigners. Für Designer von generativen Patches ist diese Offenheit und Flexibilität von immensem Vorteil. Ein Beispiel ist, dass der Ausgang eines LFOs als Modulationsquelle für nahezu beliebig viele Parameter innerhalb des Systems genutzt werden kann. Bei einem Synthesizer mit vorgegebenen Signalweg ist der Systemoperator dagegen oft auf vorbestimmte Modulationsziele beschränkt, wie zum Beispiel die Tonhöhe oder die Grenzfrequenz eines Filters. Dies hat Vorteile für die schnelle und gezielte Bearbeitung eines Patches, schränkt jedoch die Möglichkeiten im Sounddesign sowie der Steuerung des Patches massiv ein.

Ein weiterer Aspekt sind die Möglichkeiten in der Klangsteuerung: Fast jeder Parameter innerhalb eines Patches kann die Klangfarbe beeinflussen. Entweder kann dies über den direkten Zugriff auf den Parameter geschehen oder über einen CV Eingang für die externe Steuerung über eine Spannung. Aus diesem Grund sind die Einstellungen der klangerzeugenden und klangformenden Module eng mit den Einstellungen der steuernden Module verbunden.

Der generative Aspekt eines Patches liegt in der Regel in dem Bereich der Steuerung des Patches. Also in der Auswahl der Modulationsquellen und -ziele, sowie der Tonhöhensteuerung und der allgemeinen Steuerung des Patches. An dieser Stelle muss man erwähnen, dass die klanglichen Eigenschaften sehr eng mit den Gefühlen verbunden sind, welche in dem schlussendlichen Ergebnis des Patches transportiert werden. Da die Übertragung zum Hörer auditiv stattfindet, hat das Sounddesign des Patches großen Einfluss auf das Ergebnis. So ist ein gewisses Grundverständnis für Sounddesigntechniken eine Voraussetzung für das erfolgreiche Designen eines generativen Patches.

Neben der generativen Steuerung von einzelnen Soundquellen und Modulen, ist es nötig, ein generatives und zu einem gewissen Grad automatisiertes System zum Mischen der Soundquellen zu haben.

3.4 Audio Sources und Modifiers

In den nachfolgenden Kapiteln werden Module in ihrer technischen Funktionsweise vorgestellt. Die Arbeit fokussiert sich hierbei auf Module, welche die Erzeugung und Veränderung von Steuerspannungen als Ziel haben. Dennoch wird in diesem Kapitel kurz auf die Eigenschaften von klangerzeugenden und klangformenden Modulen eingegangen. Diese sind auch als Audio Sources und Audio Modifiers bekannt.

Audioquellen sind alle Module, die Wechselspannungen im hörbaren Frequenzspektrum erzeugen.⁴⁸ Audio Modifiers sind alle Module, welche die Wechselspannungen nachträglich bearbeiten und dadurch das entstehende Schallereignis klanglich formen und verändern.⁴⁹ Das gängigste Beispiel einer Audioquelle ist ein Oszillator. Dieser gibt komplexe Wellenformen im hörbaren Frequenzspektrum aus.⁵⁰ Andere Beispiele sind Module für das Wiedergeben von Samples, sowie eine Quelle zum Generieren von Rauschsignalen. Beispiele für Audio Modifiers sind Filtermodule, Verzerrermodule, Effektmodule, Waveshaper Module und viele mehr.

Jedes der oben genannten Module beeinflusst das Hörerlebnis des Patches maßgeblich. So entspricht die Auswahl der Audioquellen und den nachfolgenden klangformenden Modulen inklusive aller Einstellungen ihrer Parameter dem ausgegebenen Schallereignis. Der Vorteil der modularen Bauweise ist nun, dass nahezu jeder dieser Parameter gesteuert werden kann.

In anderen Worten kann jeder Parameter dynamisch über die Zeit verändert werden und so in verschiedenen Kontexten in der Komposition eingebracht werden. Hierfür kann man sich den Mix Parameter eines Halls vorstellen. Öffnet man diesen mithilfe einer erzeugten Steuerspannung jeden zweiten Takt, so wird der Hall rhythmisch mit dem Rest des Patches verknüpft.

3.5 Clock, Gates und Trigger

Wie bereits beschrieben werden sogenannte Trigger und Gate Signale genutzt, um Events mitzuteilen, wann diese starten und wie lange diese aktiv sind. So kann ein

⁴⁸ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 16.

⁴⁹ Ebenda, S. 18.

⁵⁰ Wilson (2013), S. 41.

Trigger zum Beispiel genutzt werden, um dem System mitzuteilen, wann ein Wert in einem Sample & Hold gespeichert werden soll. Neben vielen weiteren Signalen zur Steuerung einzelner Events und Modulatoren, werden Gate und Trigger als Clocksignale genutzt, um verschiedene Module miteinander zu synchronisieren. Hierfür haben Module, die schrittweise Spannungen ausgeben einen Clockinput, welcher ein Gate oder Triggersignal erwartet.

In diesem Kapitel werden Module in ihrer Funktionsweise beschrieben, welche Clocksignale, Gates und Trigger generieren.

3.5.1 Clockgenerators

Ein Clockgenerator generiert ein Clocksignal, zu welchem sich andere Module synchronisieren können. Ein Clocksignal ist ein reguläres Pulssignal.⁵¹ Eine Rechteckspannung ist ein Beispiel für ein solches Pulssignal. Dabei indiziert der erste Sprung von dem Minimum auf das Maximum des Signals den Beginn eines Pulses. Aufgrund dieser Tatsache ist die Breite des Pulses für das Clocksignal nicht von Bedeutung. Das heißt es können weitere Spannungen mit einer horizontal ansteigenden Spannungsänderung als Clocksignal genutzt werden.⁵² Daraus folgt, dass Module wie ein LFO, welcher eine Sägezahn- oder Rechteckspannung ausgibt, für die Generierung dieser Signale genutzt werden können.

Dedizierte Module zum Generieren einer Clock haben oft zusätzliche Features verbaut, wie zum Beispiel die Möglichkeit ihr eingestelltes Tempo über ein Display zu sehen und über einen CV Eingang steuern zu können.⁵³

3.5.2 Clockdivider und -multiplier

Clockdivider oder Clockmultiplier werden auch als sogenannte Clock Modulatoren bezeichnet. In ihrer einfachsten Form geben diese Module eine Clock aus, zu welcher sich andere Module synchronisieren können. Neben dieser klassischen Funktion, die auch viele andere Module wie Sequenzer oder LFOs übernehmen können, nimmt ein

⁵¹ Gale (10.11.2016).

⁵² Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 288.

⁵³ Ebenda, S. 289.

Clock Modulator das Clocksignal und teilt oder multipliziert dieses mit einem bestimmten Wert und gibt das neue Signal über einen extra Ausgang aus.⁵⁴ Ist das ursprüngliche Clocksignal auf 1/16tel getaktet und wird von dem Clock Modulator durch Mehrfache von 2 geteilt wie zum Beispiel /2, /4, /8 oder /16, so korrespondiert das ausgegebene Pulsesignal an den jeweiligen Ausgängen mit 1/8tel, 1/4tel, 1/2 und bei einer Division durch 16 zu einer ganzen Note. Diese ausgegebenen Signale können nun als Modulations-, Trigger- und Gatesignale genutzt werden, um bestimmte Events zu triggern und steuern. Ein einfaches Beispiel ist hierfür das Triggern von Noten in einem Bestimmten Takt: Möchte man zum Beispiel 8tel HiHats wiedergeben, so reicht es, das 8tel Pulse Signal von einem Clockdivider zu nehmen und dies in den Triggereingang für die Hihat zu patchen.

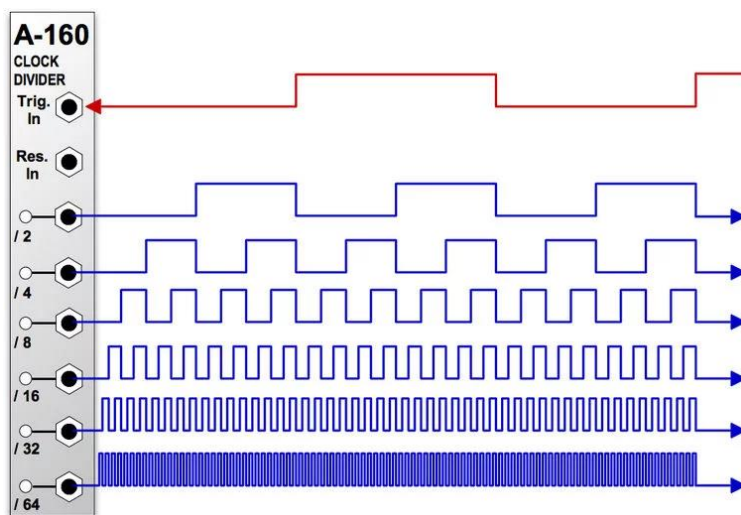


Abbildung 2: Clocksignale eines Doepfer A-160 Clock Divider Moduls

In Bezug auf generative Systeme sind Clock Modulatoren sehr nützlich, um bei bestimmten musikalischen Zeitpunkten, wie zum Beispiel nach 8 Takten ein Signal auszugeben um automatisiert bestimmte Events und Noten zu triggern. Möchte man alle 8 Takte zwischen zwei Instrumenten oder zwei Modulationsquellen umschalten, so lässt sich dies mit einem Clockdivider und einem Schalter einfach realisieren, indem

⁵⁴ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 290.

der Clockdivider ein Signal an den Schalter schickt und dieser dann zwischen den zwei Signalen umschaltet.

3.5.3 Rhythmusgeneratoren

Ein Clock Modulator kann genutzt werden, um Events zu bestimmten musikalischen Zeiten zu starten und zu steuern. Jedoch sind diese Module darauf beschränkt, ihre Signale in einem bestimmten repetitiven Takt auszugeben. Möchte man nun ein rhythmisch anspruchsvolleres Konstrukt zum Steuern und Triggern von Events erzeugen, so ist dies mit sogenannten Rhythmusgeneratoren möglich. Im Grundsatz folgt ein Rhythmusgenerator einer ihm gegebenen Masterclock und sendet wie ein Clock Modulator aufeinanderfolgende Gate- und Triggersignale aus. Im Unterschied zu einem Clockmodulator, gibt es bei einem Rhythmusgenerator die Möglichkeit, gezielte Pausen zwischen den ausgegebenen Triggersignalen einzufügen.⁵⁵ Dadurch lassen sich rhythmisch anspruchsvollere Patterns ausgeben. Die meisten Rhythmusgeneratoren haben die Möglichkeit, die Anzahl ihrer zu durchlaufenden Schritte festzulegen. Mit diesem Feature lassen sich einfach und schnell polymetrische Patterns innerhalb eines Patches implementieren.⁵⁶ Nimmt man zum Beispiel ein Rhythmusgenerator mit einer Länge von 7 Schritten für das Triggern einer Soundquelle und einen zweiten Rhythmusgenerator mit einer Länge von 5 für das Triggern einer zweiten Soundquelle, so dauert es gemäß dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen 35 Schritte, bevor die zwei Rhythmen wieder an einem gemeinsamen Punkt starten. Möchte man diesen gemeinsamen Neustart der zwei Rhythmen nun an einem bestimmten Zeitpunkt starten, so hat ein Rhythmusgenerator hierfür einen „Reset“ Input. Sobald ein Trigger an diesem Input anliegt, startet der Rhythmusgenerator das programmierte Pattern von vorne. Dies kann im oberen Beispiel genutzt werden, um die zwei Rhythmen zum Beispiel schon nach 16 Schritten neu zu starten.

Viele Rhythmusgeneratoren sind mit Wahrscheinlichkeiten ausgestattet, wobei ein Schritt nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit abgespielt wird. Dies ist für generative Patches von großem Vorteil. In Kapitel 4 wird darauf nochmals extra eingegangen.

⁵⁵ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 298.

⁵⁶ DeSantis (2015), S. 150.

3.6 CV Sources

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise und die technischen Eigenschaften von Modulen beschrieben, welche Spannungen zur Steuerung eines Patches erzeugen.

3.6.1 LFOs

Ein LFO steht für „low-frequency-oscillation“. Grundsätzlich funktioniert ein LFO wie ein klassischer Oszillator für die Tonerzeugung. Er generiert also eine oder mehrere komplexe Wellenformen, die periodisch durchlaufen werden.⁵⁷ Der entscheidende Unterschied zu einem VCO ist, dass ein LFO seine Wellenform mit sehr niedriger Frequenz abspielt. Damit bewegen sich LFOs im Vergleich zu klassischen Oszillatoren im nicht hörbaren Bereich des Frequenzspektrums.⁵⁸ In modularen Systemen werden LFOs verwendet, um Parameter zu steuern und über die Zeit zu modulieren. LFOs haben in der Regel typische Wellenformen wie eine Dreiecks-, Sägezahn-, Sinus- oder Rechteckspannung als Ausgänge. Die Hauptparameter eines LFOs sind seine Frequenz, seine Phasenlage sowie die Art seiner Wellenform. In Kombination mit einem Attenuator kann die Modulationstiefe gesteuert werden.⁵⁹ Die Frequenz entspricht hierbei der Anzahl der Durchläufe der Wellenform des LFOs pro Sekunde.⁶⁰ Die Wellenform ist wiederum ein Sammelbegriff für eine beliebige Schwingungsform, die der LFO periodisch ausgibt,⁶¹ während die Phasenlage beschreibt, wie die Schwingung auf der Zeitachse verschoben ist.⁶²

3.6.2 Hüllkurven

Hüllkurven sind in der Welt der Synthese Tools, um die Lautheit und weitere Qualitäten von getriggerten Noten und Soundevents zu beeinflussen. Um diese Qualitäten zu

⁵⁷ Ruschkowski (2010), S. 165.

⁵⁸ Stange-Elbe (2015), S. 194.

⁵⁹ Weinzierl (2009), S. 757.

⁶⁰ Anwander (2017), S. 192.

⁶¹ Ebenda, S. 201.

⁶² Görne (2011), S. 27.

beeinflussen, zeichnet die Hüllkurven einen Werteverlauf und anhand dieser Werte werden verschiedene Parameter innerhalb des Patches gesteuert.⁶³

Die Funktionsweise ist hierbei wie folgt: Der Hüllkurvengenerator bekommt ein Gatesignal, welches signalisiert, wann die Hüllkurve starten soll und wie lange der Sustainwert gehalten werden soll. Sobald dieses Gatesignal ankommt, gibt der Hüllkurvengenerator eine Spannung aus, welche in zeitlich verschiedene Abschnitte aufgeteilt ist.⁶⁴ In der sogenannten Attackphase steigt die Spannung von einem Minimalwert auf einen Maximalwert an. Nach Erreichen dieses Maximalwertes, beginnt die Decayphase. Diese Phase ist abhängig von einem Sustainlevel, welches den Wert bestimmt, auf den die Spannung in der Decay Phase abfallen soll. Ist das Ende des Gatesignals erreicht, hat die Hüllkurve eine Releasephase. Dies ist die Zeit, in welcher die ausgegebene Spannung vom Sustainlevel auf den Minimalwert abfällt.⁶⁵

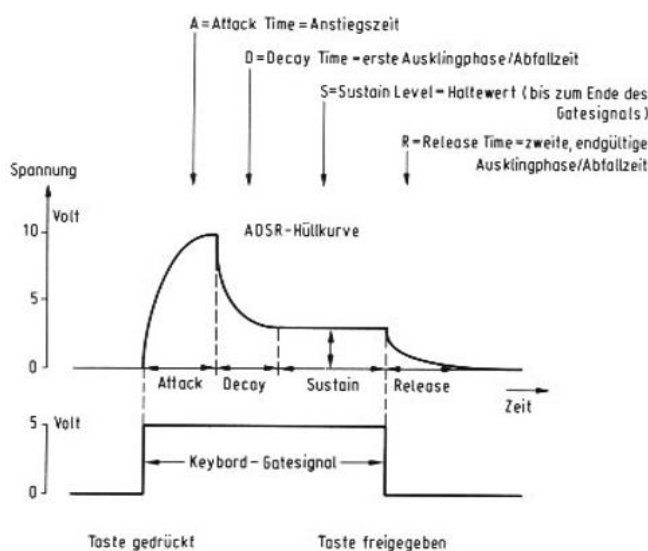


Abbildung 3: Hüllkurvenverlauf eines ADSR Moduls⁶⁶

Neben einer ADSR Hüllkurve, gibt es noch weitere Hüllkurvengeneratoren, welche sich in ihren Phasen unterscheiden. So gibt es AHDSR Hüllkurven, bei welchen es eine zusätzliche Holdphase gibt, in der die Maximalspannung der Hüllkurve für eine

⁶³ Kruse (2021), S. 573.

⁶⁴ Enders (1985), S. 148.

⁶⁵ Stange-Elbe (2015), S. 193.

⁶⁶ Enders (1985), S. 90.

bestimmte Zeit gehalten wird. Ein weiteres Beispiel wäre eine AR-Hüllkurve, bei welcher nur die Attack und Releasephase vorhanden ist. Mit dieser Hüllkurve lassen sich zum Beispiel Plucks bauen. Im Gegensatz zu einem ADSR Modul reagiert ein AR Modul auf Triggersignale und nicht auf Gatesignale. Erhält ein AR Modul ein Gatesignal, so wird dieses wie ein Trigger behandelt.⁶⁷ Das Modul startet dann die Hüllkurve und durchläuft seine einzelnen Phasen.

Wie oben beschrieben, werden Hüllkurvengeneratoren vor allem dafür genutzt, die Eigenschaften von getriggerten Klangereignissen zu steuern. In der Welt der generativen Patches kann dies genutzt werden um bestimmte klangliche Ereignisse generativ konstant zu Verändern. Viele Hüllkurvengeneratoren haben für ihre Parameter CV Eingänge. Über diese Eingänge können die verknüpften Parameter über die Zeit gesteuert und moduliert werden. Dies kann genutzt werden um das Timbre eines klanglichen Events bei jedem neuen Trigger generativ zu Verändern. Ein Beispiel wäre das langsamere oder schnellere Öffnen eines Filters basierend auf einem komplexen LFO Netzwerk, welches die Attack einer Hüllkurve moduliert.

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit sind Hüllkurven, welche in einer Schleife agieren. Hierfür muss das Modul mit einem sogenannten End-of-cycle Trigger ausgestattet sein. Dabei wird am Ende des Durchlaufes einer Hüllkurve ein Triggersignal ausgegeben. Mit diesem Trigger kann die Hüllkurve dann von vorne gestartet werden, um so eine sich ständig wiederholende Hüllkurve zu erschaffen. Mit dieser Funktion lässt sich ein Hüllkurvengenerator zu einem LFO umfunktionieren.

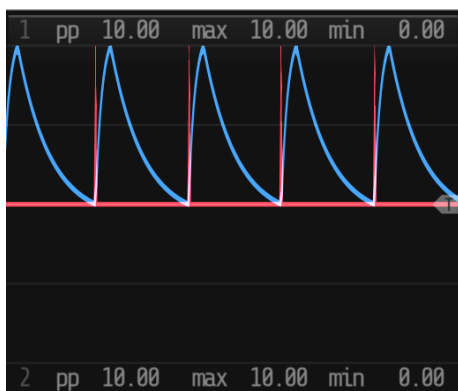


Abbildung 4: In einer Schleife betriebene Hüllkurve

⁶⁷ Wilson (2013), S. 49.

Der Entscheidende Unterschied zwischen einer Hüllkurve, welche in einer Schleife läuft und einem LFO ist, dass man bei der Hüllkurve andere komplexe Wellenformen bauen kann, bei welcher die einzelnen Abschnitte des Wellenformzyklus über Zeiten bestimmt werden. So ist auch die Dauer eines Zyklus von den einzelnen Parametereinstellungen abhängig. Sobald ein Parameter wie die Attack verändert wird, ändert sich mit der Wellenform auch die Frequenz der Schleife. Bei klassischen LFOs gibt es diese Abhängigkeit zwischen der Wellenform und der Frequenz nicht.

Ein weiterer Nutzen dieser „End of Cycle“ Ausgänge ist es, anderen Events innerhalb des Patches Startsignale zu geben, sobald ein wichtiges musikalisches Event abgeschlossen ist.⁶⁸

3.6.3 Sequenzer

Sequenzer sind Module, welche eine Serie von vorprogrammierten Spannungen wiedergeben.⁶⁹ Die Anzahl der programmierten Spannungen variiert hierbei von Sequenzer zu Sequenzer. Neben der Anzahl der programmierten Spannungen, hat der Nutzer in der Regel die Möglichkeit, das Tempo einzustellen, mit welchem der Sequenzer seinen Zyklus intern durchläuft. Eine weitere Möglichkeit ist es, das Tempo über einen CV Clock Eingang extern zu kontrollieren.

Durchläuft ein Sequenzer nun seine Spannungen und wiederholt den Durchlauf der Spannungen in der gleichen Art immer wieder, so ergibt sich an seinem Ausgang eine komplexe sich wiederholende Steuerspannung. Diese wird in der Regel zum Steuern von Tonhöhen genutzt. Aufgrund der offenen Umgebung bei Modularsystemen, kann diese Ausgangsspannung aber zum Steuern von beliebigen Parametern innerhalb des Patches genutzt werden.

Da in der Welt der modularen Synthese die Tonhöheninformation von der Triggerinformation, wann ein Sound abgespielt wird, getrennt ist, sind Sequenzer in der Regel mit zwei verschiedenen Ausgangssignalen ausgestattet.⁷⁰ Zum einen mit den zuvor genannten programmierbaren Spannungslevel, sowie mit Triggersignalen pro Schritt, um zum Beispiel einer Hüllkurve mitzuteilen, dass diese starten soll. Diese

⁶⁸ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 261.

⁶⁹ Enders (1985), S. 158.

⁷⁰ Wilson (2013), S. 56.

Aufteilung in zwei Bereiche macht die Steuerung einzelner Soundquellen zwar komplexer, bietet jedoch auch die Möglichkeit das ausgegebene Triggersignal zur Steuerung vieler anderer Parameter zu nutzen.

In einem generativen Patch können Sequenzer wie LFOs in einem komplexen Netzwerk zur Erzeugung von komplexen Wellenformen genutzt werden. In einem späteren Kapitel wird genauer auf das Designen solcher Netzwerke eingegangen. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Parameter wie zum Beispiel die Clock oder einzelne Spannungsschritte eines Sequenzers mit generativen Steuerspannungen zu modulieren und so am Ausgang des Sequenzers generative Spannungen zum Steuern der klanglichen Events zu erzeugen.

3.6.4 CV Rekorder

Sowohl bei LFOs als auch bei Hüllkurvengeneratoren sind die resultierenden Wellenformen beschränkt auf die Eigenheiten der Module. Auch bei Stepsequencern ist man bei der Art der Steuerspannung aufgrund der Eigenschaften eines Sequencers begrenzt in deren Form. So hat man nur eine bestimmte Anzahl an programmierbaren Werten. Weiter sind diese in der Regel schrittbasierend, das heißt sie springen von einem konstanten Level zu einem anderen konstanten Level. Möchte man nun aber eine komplexere eigen designte Wellenform zum Modulieren erschaffen, gibt es dafür eigene Module in der Welt der modularen Synthesizer. Diese Module sind sogenannte CV Recorder. Wie der Name bereits impliziert, ist die Grundaufgabe eines CV Recorders eine vom Nutzer eingegebene Information als Steuerspannung aufzunehmen.⁷¹ Diese aufgenommene Steuerspannung lässt sich danach wiedergeben und kann als Signal zum Modulieren und Steuern des Patches genutzt werden. Hierbei gibt es wie bei Hüllkurven zwei Modi. Entweder wird das aufgenommene Signal einmal wie eine klassische Hüllkurve durchlaufen oder das aufgenommene Signal wird wie ein LFO in einer Schleife betrieben und startet jedes Mal von vorne, sobald das Ende des Signals erreicht wurde.

⁷¹ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 240.

3.6.5 Envelope Follower

Ein Envelope Follower ist ein Modul das dynamisch Steuerspannungen erzeugt. Ein Envelope Follower hat hierfür einen Eingang, an dem ein Signal angeschlossen werden kann. Der Envelope Follower folgt nun der Amplitude des Signals an seinem Eingang und wandelt diese in eine Spannung um.⁷² Die resultierende Spannung entspricht also dem Lautstärkeverlauf des am Eingang anliegenden Signals.⁷³ Eine weitere Funktion von Envelope Followern ist das Generieren von Triggersignalen an einem zweiten Ausgang. Dort wird jedes Mal ein Trigger generiert, sobald am Input ein vom Patchdesigner bestimmter Threshold überschritten wird.⁷⁴ Dies kann genutzt werden, um weitere Events gemeinsam mit der erzeugten Hüllkurve zu starten.

3.6.6 Pitch Follower

Ein Pitch Follower ist wie ein Envelope Follower ein Modul, das dynamisch auf seinen Input reagiert. Im Gegensatz zu einem Envelope Follower wandelt ein Pitch Follower nicht die Amplitude des einkommenden Signals in eine Spannung um. Stattdessen wandelt das Modul die Tonhöhe des einkommenden Signals in eine Spannung um.⁷⁵ Er zählt also, wie oft das Signal am Eingang pro Sekunde seine Wellenform durchläuft und konvertiert diese Information in eine korrespondierende Spannung.⁷⁶ Aufgrund dieser Tatsache arbeiten Pitch Follower am besten, solange das einkommende Signal eine klar erkennbare Tonhöhe hat.

3.6.7 Sample & Hold

Ein Sample & Hold Modul kann als analoger Speicherbaustein bezeichnet werden.⁷⁷ Das Modul hat hierbei den Zweck, zu einem bestimmten Zeitpunkt Proben aus einem anliegenden Signal zu entnehmen und diesen entnommenen Wert bis zur nächsten Probe zu halten. Der Zeitpunkt der Probenentnahme wird hierbei von einem ankommenden Triggersignal bestimmt.⁷⁸

⁷² Enders (1985), S. 144.

⁷³ Ruschkowski (2010), S. 171.

⁷⁴ Enders (1997), S. 85.

⁷⁵ Ruschkowski (2010), S. 170.

⁷⁶ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 247.

⁷⁷ Anwander (2017), S. 198.

⁷⁸ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 252.

Das Signal, welches das Sample & Hold Modul ausgibt ist also sowohl von der Art des anliegenden Signals, als auch von dem Zeitpunkt, wann dem Signal die Probe entnommen wird abhängig. So gibt der LFO bei jedem Trigger zufällige Werte aus, wenn weises Rauschen an seinem Eingang anliegt. Liegt jedoch eine Sinusspannung an seinem Eingang und das Modul wird jeweils zum Zeitpunkt der Minima und Maxima der Sinusspannung getriggert, so konvertiert das Sample & Hold Modul die eingehende Sinusspannung zu einer Rechteckeckspannung.

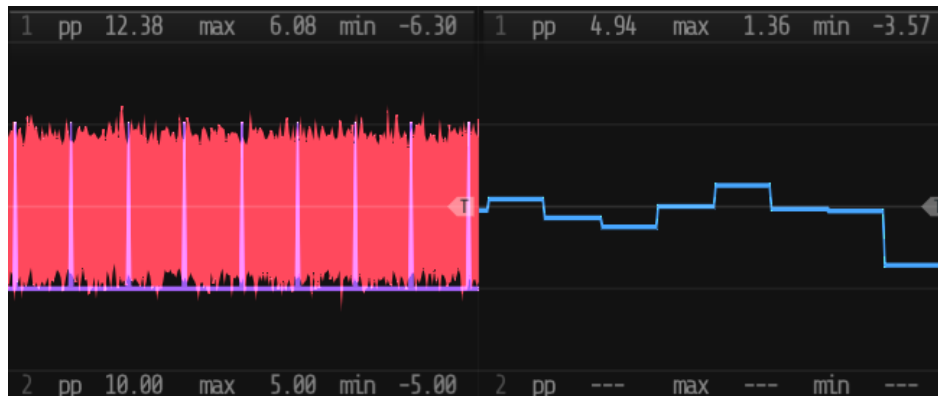


Abbildung 5: LFO Ausgang mit Rauschen am Eingang

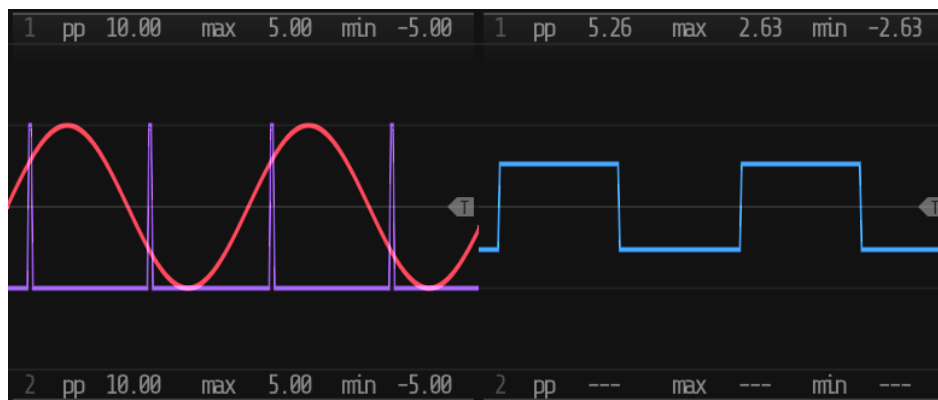


Abbildung 6: LFO Ausgang mit periodischer Spannung am Eingang

3.6.8 Shift Register

Ein Shift Register ist ein Modul, welches aus mehreren aneinandergereihten Sample & Hold Modulen besteht. Sobald das erste Sample & Hold Modul einen Wert entnommen hat und seinen zweiten Trigger zum Speichern eines neuen Wertes bekommt, gibt das Sample & Hold Modul seinen vorherigen Wert an das nächste Sample & Hold Modul in der Reihe weiter, anstatt diesen zu verwerfen. Dieser Vorgang

wird dann so lange weitergeführt, bis die Anzahl der S&H Module innerhalb des Shift Registers erreicht ist.⁷⁹

Ein Nutzen von Shift Registern, kann die zufällige Programmierung einer Sequenz sein, welche Steuerspannungen ausgibt. Im Grundsatz arbeitet ein Shift Register hier wie ein Sequenzer, welcher eine bestimmte Anzahl an Spannungen speichert. Der Unterschied zwischen den Modulen ist jedoch, dass ein Shiftregister im Gegensatz zu einem Sequenzer für jeden Schritt (also für jedes Sample & Hold Modul) einen Ausgang hat. Weiter ändern sich bei einem Shiftregister konstant die Werte die gespeichert sind, solange etwas Neues in dem Input des Shiftregisters gespeichert wird.

3.6.9 Turing machine

Die Idee einer Turing Machine ist es, eine vom Nutzer vorgegebene Anzahl an zufälligen Werten in dem Modul zu speichern, um dann diese Werte mit einem Shift Register sequenziell wiederzugeben. Ein bekanntes Modul, welches die Vorteile und Anwendungen eines solchen Moduls gut präsentiert, ist das *Turing Machine DIY Kit* von *Music Thing Modular*.⁸⁰ Bei diesem kann von dem Nutzer gesteuert werden, ob nur neue zufällige Noten und Trigger generiert werden oder ob eine Sequenz basierend auf der angegebenen Schrittlänge des Moduls in einer Schleife wiedergegeben wird. Eine Besonderheit ist, dass man zwischen einer gespeicherten Sequenz und nur zufälligen Noten graduell mit einem Potentiometer oder über CV umschalten kann. So kann man mit dem Modul automatisiert zwischen gelockten und zufälligen Sequenzen umschalten.

Eine weitere Eigenheit der Turing Machine ist, dass diese nicht zwingend bei jedem Schritt einen Trigger und eine neue Steuerspannung generiert. Stattdessen wird zufallsbasiert entschieden, ob der neue Schritt auch einen neuen Spannungswert generiert. Ist dies der Fall, so wird an dieser Stelle auch ein Trigger generiert.

⁷⁹ Meyer (21.11.2016).

⁸⁰ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 255.

3.7 CV Modifikatoren

In den vorangegangenen Kapiteln wurde vor allem auf die Erzeugung von Steuerspannungen eingegangen. Nachfolgend werden einige nützliche Module vorgestellt, welche das Ziel haben eingehende Spannungen zu modifizieren und anzupassen.

3.7.1 Attenuators

Ein Attenuator reduziert die Amplitude eines Signals.⁸¹ Dies kann in den verschiedensten Szenarien nützlich sein. Im Grundsatz kann man sagen, dass die Reichweite eines Signals auf den gewünschten Wert beschränkt ist. Ein Attenuator ist als extra Modul insofern sinnvoll, dass Module welche Steuerspannungen erzeugen, oft keine Möglichkeiten bieten, deren Amplitude zu verringern. Anstatt nun einen extra Mixerkanal für die Steuerung der Amplitude dieses Signals zu benutzen, werden Attenuators für diese Aufgabe genutzt.

3.7.2 Offsets

Ein Offset verschiebt eine anliegende Spannung um einen bestimmten Spannungswert. Dafür addiert oder subtrahiert das Offset Modul einen festen Spannungswert mit dem anliegenden Signal.⁸² Möchte man einen ein bipolares LFO Signal in ein unipolares Signal umwandeln, so lässt sich dies mit einem Offset gut erreichen: Angenommen die Reichweite des LFOs ist von -2,5 Volt bis +2,5 Volt. Addiert man nun mit einem Offset Modul 2,5 Volt zu dem Signal, so erhält man ein unipolares Signal mit der Reichweite von 0 Volt bis 5 Volt. Möchte man diese nun auf 2,5 Volt begrenzen, so kann man den Ausgang des Offset Moduls in den Eingang eines Attenuators schicken und mit diesem die Reichweite auf 2,5 Volt beschränken.

⁸¹ Meyer (18.05.2020).

⁸² Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 269.

3.7.3 VCA

Ein spannungsgesteuerter Verstärker kontrolliert die Amplitude eines anliegenden Eingangssignals entsprechend einer anliegenden Steuerspannung.⁸³ Ein Beispiel von diesem Prinzip ist die Steuerung des Lautstärkeverlaufs mithilfe einer Hüllkurve. In diesem Beispiel ist die generierte Hüllkurve die Steuerspannung, welche den Verlauf der Amplitude des einfallenden Signals vorgibt.

Einer der großen Vorteile von VCAs ist es, dass sich damit neben Audiosignalen auch Steuerspannungen kontrollieren lassen. Man könnte zum Beispiel einen LFO mit einer Hüllkurve modulieren und somit den LFO nur langsam in seiner Amplitude Steigen und Abfallen lassen.⁸⁴ Da Steuerspannungen Gleichspannungen sind, muss ein VCA für das Ausgeben von Gleichspannungen optimiert sein. Module die auf die Wiedergabe von Gleichspannungen optimiert sind, werden DC coupled genannt.⁸⁵

3.7.4 Inverter

Ein Inverter invertiert das einkommende Signal an seinem Input. In anderen Worten heißt das, dass der Inverter die Werte des Signals mit -1 multipliziert.⁸⁶ Als Ergebnis bekommt man ein gedrehtes Signal.

In generativen Patches kann dies genutzt werden, um Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Sounds zu erschaffen. Nimmt man zum Beispiel die invertierte Hüllkurve eines Sounds, so kann mit dieser konträr zur Lautstärkekurve andere Events moduliert werden. Weiter hat man mit der invertierten Welle die Möglichkeit Parameter umgekehrt zu modulieren. In anderen Worten invertiert man die Modulationstiefe.

3.7.5 Attenuverters

Ein Attenuverter ist eine Kombination aus einem Attenuator und einem Inverter. Ein Attenuverter kann je nach Einstellung das einfallende Signal abschwächen und

⁸³ Ruschkowski (2010), S. 161.

⁸⁴ Ebenda, S. 161.

⁸⁵ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 186.

⁸⁶ Friesecke (2007), S. 315.

schließlich invertieren. Der Vorteil ist hierbei, dass das invertierte Signal auch direkt in seiner Amplitude verändert werden kann.

3.7.6 Quantisierer

Quantisierer verschieben die einkommenden Spannungswerte auf Vielfache von $1/12$ tel.⁸⁷ Hierbei wählt der Spannungswert immer den Wert aus, der zu dem nächsten Vielfachen von $1/12$ tel Volt liegt. Der Wert von $1/12$ tel Volt resultiert aus der Tonhöhensteuerung von $1V/oct$. Da in einer Oktave zwölf Töne vorhanden sind und 1 Volt Spannungsunterschied einer Oktave zwischen der niedrigsten und höchsten Spannung entspricht, korrespondieren vielfach von 12 zu den jeweiligen Halbtonschritten.

Quantisierer können also genutzt werden, um einfallende Spannungen auf bestimmte musikalische Noten zu quantisieren. Hierbei gibt es Module mit voreingestellten Skalen, aber auch Module, bei denen der Designer selbst die Noten der Skala auswählen kann, zu welchen der Quantisierer das anliegende Signal quantisiert.

Es gibt nun Unterschiede in der Implementierung und in den Funktionen verschiedener Quantisierer Module. So schicken manche Quantisierer über einen Triggerausgang Triggersignale, sobald die einliegende Spannung auf einen neuen Wert quantisiert wird. Dies kann nützlich sein, um Hüllkurven zu triggern, sobald der Quantisierer eine neue Note ausgibt. Andere Quantisierer halten unabhängig von dem einfallenden Signal eine Note und springen erst zu der nächsten Note, sobald sie ein Triggersignal von einem anderen Modul bekommen. Diese Art der Quantisierer arbeiten hierbei wie Sample & Hold Module. Der entscheidende Unterschied zwischen einem Sample & Hold Modul und einem Quantisierer, welcher auf einen Trigger wartet ist, dass der Quantisierer die entnommene Probe auf einen bestimmten Notenwert quantisiert.

3.7.7 Schalter

Schalter (engl.: Switch) wählen entweder zwischen mehreren gegebenen Eingängen aus und schicken das ausgewählte Signal an einen Ausgang oder nehmen einen

⁸⁷ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 274.

gegebenen Eingang und schicken diesen an einen von mehreren Ausgängen.⁸⁸ Viele Schalter in der Welt der modularen Synthese, arbeiten bidirektional. Sie können also sowohl einen Eingang auf verschiedene Ausgang schicken und zwischen diesen hin und her schalten, als auch zwischen mehreren Eingängen wählen und den gewählten Eingang auf einen Ausgang schicken.

Der Schaltvorgang kann hierbei in Form eines klassischen physischen Schalters implementiert sein. Interessanter und mehr Möglichkeiten bekommt der Patchdesigner aber, sobald der Schalter über Triggersignale und Steuerspannungen umgeschaltet werden kann.

Diese Trigger und CV Eingänge geben unendliche Möglichkeiten, automatisierte Systeme innerhalb eines generativen Patches aufzubauen: Jedes Mal, wenn man automatisiert zu einem oder dem anderen Signal umschalten möchte, lässt sich das über Schalter realisieren. Ein Beispiel wäre es, in einen Break Part umzuschalten, sobald ein gewisser Zeitpunkt erreicht wurde. Auf das Umschalten zwischen Events und Parts wird später nochmal genauer eingegangen.

3.7.8 Komparatoren

Ein Komparator generiert dynamisch ein Gate Signal anhand eines einfallenden Signals. Dafür vergleicht der Komparator die ankommenden Spannungswerte mit einem Referenzwert.⁸⁹ Sind die ankommenden Werte nun über dem Referenzwert, so geht ein Gate Signal an seinem Ausgang auf high. Ist der ankommende Wert unterhalb des Referenzwertes, so geht das Gate auf low. Ein Komparator hat hierfür zwei Ausgänge. So kann man zum Beispiel ein verzögertes Gate Signal mit einer Hüllkurve und einem Komparator erzeugt werden. Schickt man die Hüllkurve in den Komparator, so startet das Gate Signal an dem Ausgang des Komparators erst, sobald der eingestellte Threshold überschritten wurde. Es wird also ein verzögertes Gate Signal erzeugt. Weiter ist ein Komparator nützlich, um dynamisch Events zu triggern.

⁸⁸ Malvino / Bates (2015), S. 225.

⁸⁹ Friesecke (2007), S. 270.

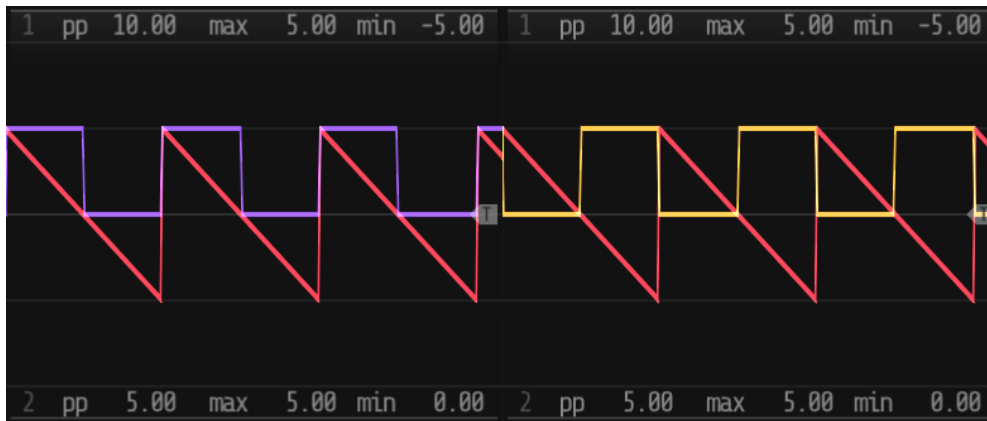


Abbildung 7: 'Over' und 'Under' Ausgang eines Komparators

3.7.9 Logische Module

In der modularen Synthese sind Steuerspannungen in der Regel kontinuierliche Signale. Besondere Eigenschaften haben hier jedoch Gate- und Triggersignale. Diese haben nur zwei Zustände: sie können eine hohe Spannung oder eine niedrige Spannung senden. Diese zwei Zustände werden 'High' und 'Low' genannt. Aufgrund dieser binären Arbeitsweise wurden Module entwickelt, die digitale logische Funktionen verarbeiten können. Die drei grundsätzlichen Funktionen der Module heißen OR (engl. für 'oder'), AND (engl. für 'und'), sowie XOR (engl. für 'exklusives oder').⁹⁰ Nachfolgend werden auf die Zustände dieser Funktionen eingegangen.

Eine sehr nützliche Funktion ist die OR Funktion. Diese gibt High als Zustand aus, wenn mindestens ein Signal an seinem Eingang ebenfalls auf High ist. Ist dies nicht der Fall und alle Signale am Eingang sind auf Low, ist das ausgegebene Signal ebenfalls Low.

Die AND Funktion geht nur dann auf High, wenn alle anliegenden Signale ebenfalls auf High sind. Bei zwei Signalen die Anliegen bedeutet das in anderen Worten: Nur wenn Signal 1 UND Signal 2 im Zustand High sind, liegt am Ausgang eine Spannung im Zustand High an.

Die letzte hier beschriebene Funktion ist die XOR Funktion. Diese Funktion ist sehr wählerisch in dem Sinn, dass sie nur High als Zustand ausgibt, wenn sich mindestens ein Zustand an den Eingängen zu den anderen unterscheidet. In anderen Worten

⁹⁰ Ebenda, S. 485.

bedeutet dies, dass bei zwei Signalen das Modul nur dann High am Ausgang ausgibt, wenn eines der beiden anliegenden Signale ebenfalls auf High ist, das andere aber nicht.

All diese Funktionen gibt es noch in einer Variante die mit einem großen 'N' vor den Funktionsbezeichnungen beschrieben wird. Das 'N' steht für 'NOT' und bedeutet, dass das ausgehende Signal invertiert ist.⁹¹ Ein NOR Modul hat demnach nur High als ausgehenden Zustand, wenn alle anliegenden Signale auf Low sind. Ein NAND Modul ist nur dann auf Low geschaltet, wenn alle anliegenden Signale auf High sind und ein XNOR Modul ist genau dann auf High, wenn alle ankommenden Signale im gleichen Zustand sind.

Logische Module sind sehr nützlich, um zeitliche Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Events innerhalb des Patches zu implementieren.

3.7.10 Minimum Maximum

Dieses Modul vergleicht zwei einkommende Signale und bestimmt bei jedem Zeitpunkt, welches der beiden Signale die höheren beziehungsweise niedrigeren Werte liefert. Die bestimmten höheren Werte werden dann an den MAX Ausgang des Moduls weitergeleitet, während die niedrigeren Werte an den MIN Ausgang weitergeleitet werden.⁹²

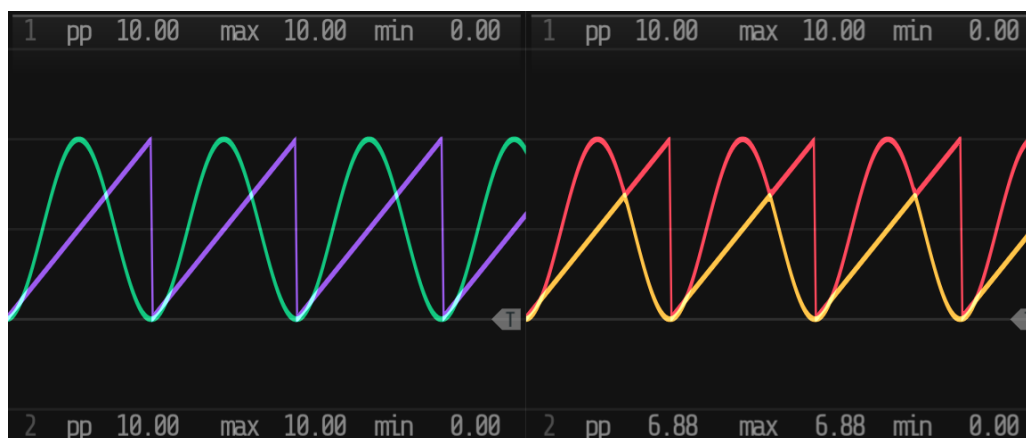


Abbildung 8: MIN (rotes Signal);MAX (gelbes Signal)

⁹¹ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 308.

⁹² Ebenda, S. 270.

3.7.11 Slew Limiter

Ein Slew Limiter ist ein Modul, das die Anstiegszeit eines Signals heruntersetzt. In anderen Worten werden sprunghafte Änderungen am Eingang abgerundet.⁹³ Ein Slew Limiter lässt also langsame Spannungsänderungen unverändert durch, während er schnelle Spannungsänderungen glättet. Man kann hierbei über die Attack einstellen, wie schnell die Signale ansteigen können und über die Releasezeit, wie lange das Signal abfällt, nachdem es eine schnelle Spannungsänderung am Eingang gab.

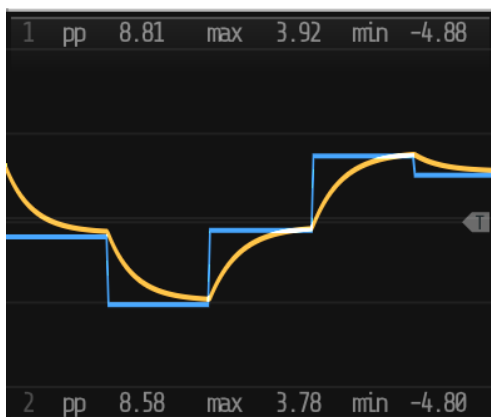


Abbildung 9: Stufenspannung (Blau) nach einem Slew Limiter (Gelb)

4 Generative Techniken

In diesem Kapitel werden Konzepte und Techniken vermittelt, wie aus den jeweiligen CV Sources und den CV Modifiers generative Signale zum Steuern eines Patches gewonnen werden können. Grundsätzlich können hier zwischen Modulen unterschieden werden, welche auf Zufällen basieren und somit bereits generatives Potenzial haben und Modulen, die deterministische Signale ausgeben. Anfangs wird erklärt, wie sich aus deterministischen Modulen komplexe Netzwerke bauen lassen, welche wiederum komplexe lange Wellenzyklen ausgeben, die zur Steuerung genutzt werden können.

⁹³ Enders (1997), S. 288.

4.1 Struktur generativer Patches

Ein generativer Patch kann unterschiedliche Stufen von Komplexität erreichen. Von einem einfachen Patch, der eine neue Melodie erzeugt, bis zu einem Patch welcher generativ ganze Lieder erzeugt, ist alles möglich. In dieser Komplexität macht es häufig Sinn, einzelne Modulgruppen nach ihrem Ziel aufzuteilen. So kann es eine Sektion geben, die nur für das Umschalten verschiedener Parts zuständig ist. Oder es gibt eine zweite Gruppe, welche die Attack- und Releasephasen verschiedener Hüllkurven moduliert. Während eine weitere Gruppe die Amplituden der verschiedenen Hüllkurven mithilfe von VCAs und LFOs moduliert. Die einzelnen Gruppen logisch aufzuteilen, hilft den Überblick über die Funktionsweise des Patches zu behalten. Da jede Gruppe die Möglichkeit besitzt sich untereinander zu modulieren, kann es schwierig sein, diese in logische Gruppen zu unterteilen. Dennoch macht es Sinn für sich ein System zu finden, dessen Funktionsweise man selbst gut nachvollziehen kann.

4.2 Deterministische Module

Um echte ständige Veränderung innerhalb eines Patches zu generieren, benötigt es Module, welche zufallsbasierte Signale ausgeben. Dennoch gibt es viele Module, die deterministisch arbeiten und sich nach einer gewissen Zeit wiederholen. Aus einer Hüllkurve, welche sich immer nach der gleichen Zeit gleich wiederholt, entsteht über die Zeit nichts neues. Ebenso wenig ist ein LFO allein komplex genug, um einen Patch generativ zu machen. Durch Netzwerke aus mehreren LFOs, mehreren Hüllkurven und anderen sich wiederholenden Steuerquellen (Sequencer etc.), lassen sich komplexe teils sehr lange Wellenformzyklen aufbauen, welche somit generatives Potential zur Steuerung von Parametern haben. Um dies zu verdeutlichen, kann das Beispiel von Brian Enos Tape Loops unterschiedlicher Länge hinzugezogen werden. Spielt man einen einzelnen Tapeloop mit der Länge von 22 Sekunden ab, so wiederholt sich das Gehörte alle 22 Sekunden. Mischt man nun aber einen Tapeloop hinzu, welcher 23 Sekunden lang ist, so versetzen sich die Abspielpositionen der zwei Tapeloops nach jedem Durchgang um 1 Sekunde. Es entsteht also konstant ein neues Klangbild, bis die zwei Abspielpositionen wieder gemeinsam starten. Dies ist bei dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Fall. Bei dem Beispiel mit 22 und 23 Sekunden wäre dies nach 506 Sekunden der Fall. Zieht man nun einen dritten Tapeloop mit beispielsweise

24 Sekunden Länge hinzu, so sind die drei Tapeloops erst nach 6072 Sekunden wieder in Sync. Bei einem vierten Tape Loop mit 25 Sekunden Länge beträgt die Dauer bis alle 4 Loops wieder von der gleichen Position starten 151 800 Sekunden. Dies bedeutet, dass in diesem Beispiel über 42 Stunden vergehen, bevor sich das Gehörte wiederholt. Lange genug, dass man nicht mehr zwischen Anfang und Ende des Zyklus unterscheiden kann und somit zumindest die Illusion von konstanter Veränderung gegeben ist.

4.2.1 Komplexe LFO Netzwerke

Es stellt sich nun die Frage, wie mit LFOs die Bedingungen eines generativen Patches erfüllt werden können. Schließlich soll sich der Patch konstant verändern, ohne sich zu wiederholen. Auch wenn ein LFO seinen Ausgang über die Zeit verändert, so wiederholt sich diese Veränderung auch mit jedem Durchlauf seines Wellenzyklus. An dieser Stelle gibt es mehrere Möglichkeiten diesen Zyklus in die Länge zu strecken, sowie die ausgegebene Wellenform zu verändern. Eine Möglichkeit, um diesem Phänomen des sich Wiederholens entgegenzuwirken, ist die Frequenz so niedrig einzustellen, dass der LFO mehrere Minuten benötigt, um einmal seinen Wellenformzyklus abzuschließen. Damit würde sich zumindest die Illusion von konstanter sich nicht wiederholender Veränderung erschaffen lassen. Die resultierende Modulation verändert den Sound jedoch sehr langsam und vorausschauend. Die Komplexität der Modulation lässt sich nun steigern, indem man über CV Eingänge Parameter wie die Frequenz oder Amplitude moduliert. Es gibt also die Möglichkeit, komplexe Netzwerke aus LFOs aufzubauen, bei welchen die Dauer, bis sich ein Modulationszyklus wiederholt, so lange ist, dass der Hörer nicht mehr erkennen kann, wann dieser Zyklus gestartet oder geendet ist. Innerhalb dieses Zyklus ist es möglich die Wellenform so komplex aufzubauen, dass diese nicht mehr vorauszuahnen ist. Auch wenn sich der Zyklus in einem solchen Netzwerk wiederholt und damit ein Kriterium von generativer Musik nicht erfüllt ist, so lassen sich mit diesen komplexen Netzwerken Veränderungen über eine Zeitspanne realisieren, welche so lange ist, dass sie für den Hörer als zufällig und somit generativ wahrgenommen werden.

Es gibt verschiedene Techniken, solche Netzwerke aus LFOs aufzubauen. Eine Grundüberlegung solcher Netzwerke ist, dass der Zyklus von verschiedenen LFOs

welche miteinander interagieren sich entsprechend des kleinsten gemeinsamen Vielfachen der LFO Frequenzen anpasst und somit einen langen und komplexen Wellenformzyklus bildet.

Eine Technik ist es, die LFOs in Serie zu schalten. Ein Beispiel hierfür ist ein LFO, der die Frequenz eines zweiten LFOs moduliert. Das Resultat der Steuerspannung des zweiten LFOs ist hierbei eine komplexere Steuerspannung, bei der sich dessen Frequenz analog zu der Amplitude des ersten LFOs verändert. Dennoch wiederholt sich das Pattern periodisch und der Hörer kann schnell die zu erwartende Änderung am Klang antizipieren.

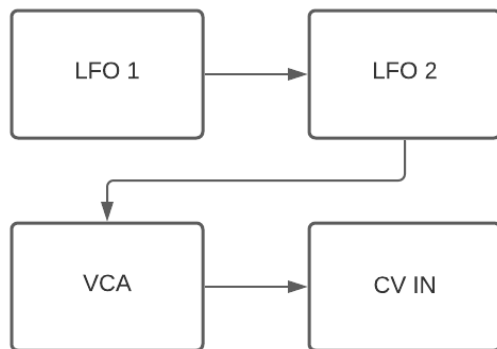


Abbildung 10: LFO 1 und 2 in Serie

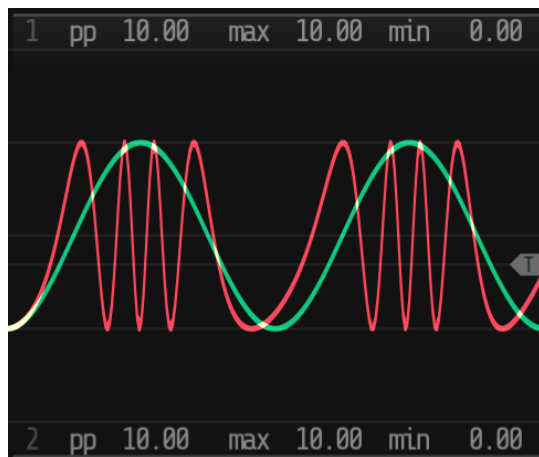


Abbildung 11: LFO 1 (Grün) moduliert die Frequenz von LFO 2 (Rot)

Eine weitere Technik ein komplexes Netzwerk aus LFOs aufzubauen, ist das Zusammenmischen verschiedener LFOs mit einem Mixer. Die verschiedenen Signale

werden additiv zusammengemischt und bilden so eine neue komplexe Wellenform, welche deutlich länger benötigt, um einen Zyklus zu durchlaufen.

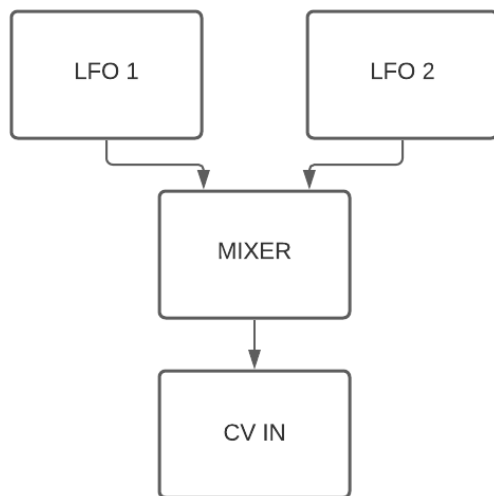


Abbildung 12: LFO 1 und LFO 2 additiv zusammengemischt

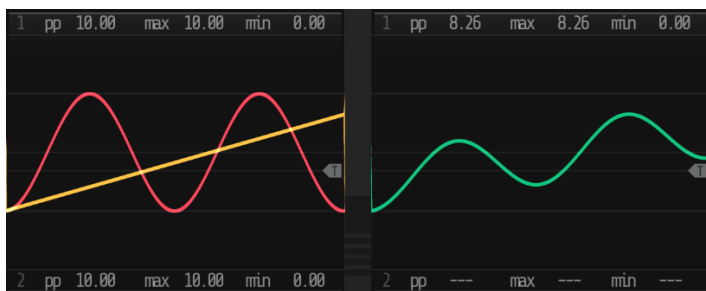


Abbildung 13: links: LFO 1 und LFO 2; rechts: Summe von LFO 1 und LFO 2

Eine dritte Möglichkeit, komplexe LFO Netzwerke aufzubauen, ist die Rückkopplung (Feedback) verschiedener LFOs untereinander. Wie oben erwähnt dauert es für einen Hörer nicht lange, das Modulationspattern zweier LFOs zu erraten, wenn diese in Serie geschaltet sind und ein LFO die Frequenz oder Amplitude des anderen steuert. Moduliert nun aber der zweite LFO wiederum die Parameter des ersten, während der erste LFO die Parameter des zweiten moduliert, entstehen am Ausgang komplexe Patterns welche in der Regel nicht vorauszuahnen sind. Die Interaktion zwischen den rückkoppelnden LFOs ist dabei zu komplex.⁹⁴

⁹⁴ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 262.

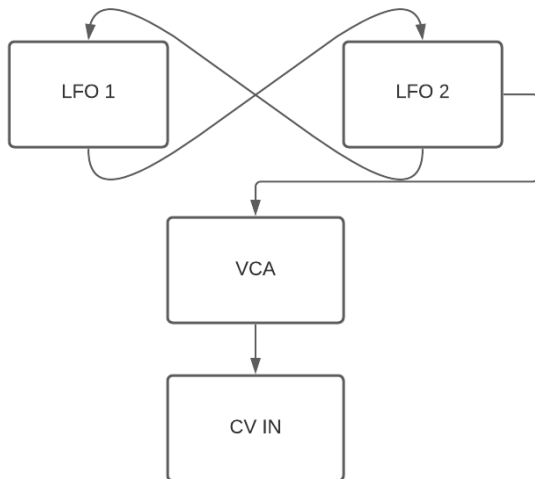


Abbildung 14: Feedback zwischen LFOs

Diese drei Möglichkeiten der verschiedenen Schaltungen lassen sich nun beliebig miteinander kombinieren, um so noch komplexere Wellenformzyklen zu erschaffen. So könnte man zwei sich rückkoppelnde LFOs nutzen, um die Parameter eines dritten LFO in Serie zu modulieren, während ein vierter LFO additiv mit einem Mixer hinzugemischt wird. Die am Ausgang des Mixers anliegende Kontrollspannung ist das Resultat der Interaktion zwischen den vier LFOs.

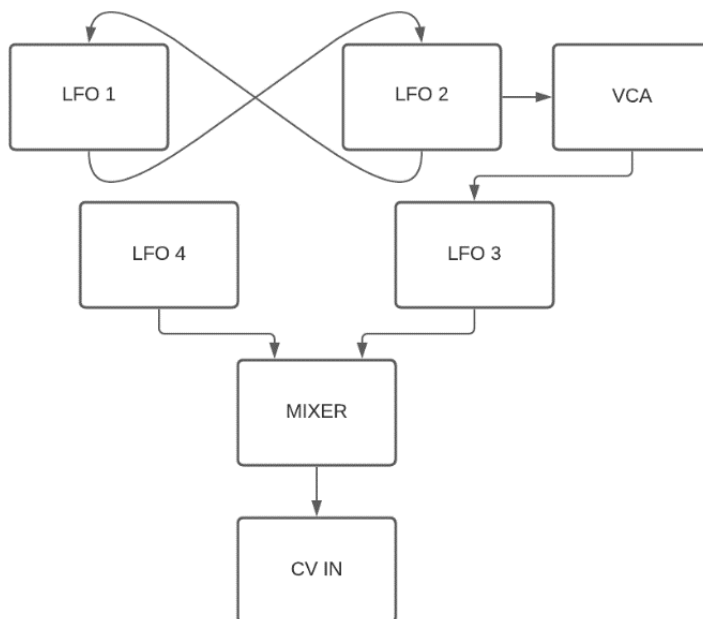


Abbildung 15: Komplexes LFO Netzwerk

Anhand dieses Beispiels lässt sich gut nachvollziehen, dass die Art und Weise, wie LFOs (und andere Module) mit den oben genannten Techniken miteinander kombiniert werden können, endlos sind und somit zu sehr komplexen Netzwerken ausgebaut werden können. Neben dem Signalfluss innerhalb eines solchen Netzwerkes, ist auch die Auswahl der LFO Parameter ausschlaggebend für die resultierende Steuerspannung. Als Beispiel können hier drei additiv zusammengemischte LFOs betrachtet werden: Sind alle drei LFOs mit einer Dreiecksspannung am Ausgang ausgestattet, so ändert sich die summierte Spannung kontinuierlich und ohne irgendwelche Sprünge. Würde man diese Spannung an den CV Eingang für die Tonhöhe eines Oszillators anlegen, so ändert sich auch dort die Tonhöhe kontinuierlich ohne Sprünge. Ändert man nun aber die Wellenform von einem der drei LFOs zu einer Rechteckspannung, so führt man Sprünge in der Modulation ein, welche jedes Mal stattfinden, sobald die Spannung am LFO von seinem hohen Wert auf seinen niedrigen Wert und umgekehrt springt.

Bisher wurde vor allem die Frequenz und die Amplitude eines LFOs als Beispiele für Parameter genannt, welche innerhalb eines komplexen LFO Netzwerkes moduliert werden können. Neben diesen zwei Parametern gibt es noch zwei weitere, welche innerhalb eines solchen Systems moduliert werden können: die Phasenlage eines LFOs sowie die Wellenform eines LFOs. Die Grundsätzlichen drei Schaltungen additiv, seriell oder rückkoppelnd gelten auch bei diesen zwei Parameter für das Bauen komplexer Netzwerke. Die Wellenform eines LFOs ist je nach Modul über einen CV Eingang steuerbar.

4.2.2 Komplexe Netzwerke mit Hüllkurven

Eine Hüllkurve kann über einen „End-of-state“ Trigger in einer Schleife betrieben werden und so eine komplexe sich wiederholende Steuerspannung ausgeben. Die Dauer eines einzelnen Durchlaufes hängt hierbei mit der Dauer der einzelnen Phasen zusammen. Viele Module die Hüllkurven erzeugen haben Eingänge für die Steuerung der Dauer der einzelnen Phasen. Nutzt man nun in einer Schleife betriebene Hüllkurven um mit LFO Modulen eine komplexe Wellenform zu bauen, so gelten die wieder die drei Möglichkeiten der seriellen, additiven und rückkoppelnden Bauweise. Besonderheiten gelten hier aber bei der rückkoppelnden Bauweise. Da alle Phasen eines Hüllkurvengenerators Einfluss auf die Dauer der ausgegebenen Wellenform

haben, kommt es zu sehr komplexen Änderungen in der Wellenform, sowie deren Frequenz, wenn diese Phasen rückkoppelnd moduliert werden.

4.2.3 Komplexe Netzwerke mit Shift Registern

Wie bereits beschrieben, speichern Shift Register Spannungen in aneinandergereihten Sample & Hold Modulen. Hierbei verwirft das Register immer den letzten gespeicherten Wert, sobald ein neuer Wert eingespeichert wird. Damit bekommt man eine sich konstant verändernde Sequenz an Werten. Um eine konstante, sich wiederholende Sequenz mit einem Shift Register wiederzugeben, muss dieses in einer Schleife betrieben werden. Konkret bedeutet das, dass die Spannung des letzten Sample & Hold Moduls das Shift Registers zurück in den Input des Registers gepatched werden muss. Dadurch schickt das Shift Register bei jedem neu erhaltenen Trigger, den letzten gespeicherten Spannungswert zurück in das erste Sample & Hold Modul des Registers. Kommt nun ein weiterer Trigger, so wird dieser Wert wieder an das nächste Sample & Hold Modul weitergegeben und wieder durch den Wert des letzten Sample & Hold Moduls ersetzt. Somit wiederholen sich die Spannungen periodisch.

Diese periodische komplexe Spannung kann wie LFOs und in Schleifen betriebene Hüllkurven innerhalb von komplexen Netzwerken mit weiteren Modulen verwendet werden, um eine lange komplexe Wellenform aufzubauen.

4.2.4 Komplexe Netzwerke mit sequenziellen Schaltern

Sequenzielle Schalter können genutzt werden, um die anliegenden Spannungen an ihren Eingängen zeitlich unterteilt an ihren Ausgang weiterzuleiten. Die resultierende Spannung an dem Ausgang des Moduls besteht aus den zeitlich unterteilten Abschnitten an ihren Einzeleingängen. Um dies zu verdeutlichen kann man sich einen sequenziellen Schalter mit drei Eingängen und einem Ausgang vorstellen. An jedem der drei Eingänge liegt eine unterschiedliche Steuerspannung an. Anfangs ist die Spannung am Ausgang gleich der Spannung des ersten Eingangs. Jedes Mal, wenn nun ein Trigger den Schalter erreicht, schaltet dieser einen Eingang weiter und leitet diese Spannung weiter. So baut der Schalter aus Abschnitten der anliegenden Spannungen eine neue komplexe Spannung.

4.2.5 Komplexe Netzwerk CV Recorder

Ein CV Recorder ist im Grunde ein LFO mit einer eigenkonfigurierbaren Wellenform. Dementsprechend lässt er sich wie LFOs mit anderen Modulen kombinieren, um komplexe sich wiederholende Wellenformen zu bauen.

4.3 Zufalls- und wahrscheinlichkeitsbasierte Module

Bisher sind Techniken vorgestellt worden, wie mit deterministischen Modulen komplexe Netzwerke gebildet werden können, die so lange und komplexe Wellenformen ausgeben, dass diese zufällig wirken. Echte konstante Veränderung lässt sich nun mit Modulen und Techniken erreichen, die ein zufallsbasiertes Signal ausgeben. Diese Module und Techniken werden nachfolgend beschrieben.

4.3.1 Rauschen

Rauschen ein sogenanntes stochastisches Signal.⁹⁵ Stochastische Signale zeichnen sich durch einen zeitlichen Verlauf aus, welcher durch Zufallsprozesse erzeugt wird. Der Verlauf der Signale kann also nicht mathematisch berechnet oder vorhergesehen werden. Beim Beispiel von Rauschen wird stattdessen die mittlere spektrale Energieverteilung angegeben. Das heißt, es wird angegeben, wie oft im Mittel eine bestimmte Frequenz im Signal vorkommt.

Je nach Gewichtung dieser Mittelung wird zwischen verschiedenen Rauschsignalen unterschieden. So hat Weises Rauschen eine konstante Signalleistung pro Bandbreite, Rosa Rauschen einen Abfall in der Signalleistung von 3 dB pro Oktave und Rotes (auch Braunes Rauschen genannt) einen Abfall von 6 dB pro Oktave.⁹⁶

Der zufällige Charakter dieser Signale eignet sich perfekt als Basis für weitere zufallsbasierte Module, welche zum Generieren von Steuerdaten innerhalb eines Patches genutzt werden können.

⁹⁵ Weinzierl (2009), S. 12.

⁹⁶ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 253.

4.3.2 Sample & Hold

Wie oben beschrieben entnimmt ein Sample & Hold Modul eine Probe aus einem Signal und hält diese Probe, bis eine neue entnommen wird. In Kombination mit den vorgestellten stochastischen Signalen, lassen sich bei jedem ankommenden Trigger neue zufällige Werte in dem Sample & Hold Modul speichern. Je nach Eingangssignal lässt sich ein Sample & Hold Modul also dafür verwenden, zufällige Werte zu speichern und diese zu halten. Diese zufällig gespeicherten Werte lassen sich nun verwenden, um alle möglichen Parameter innerhalb eines Patches Generativ zu steuern.

Ein klassisches Beispiel ist ein Sample & Hold Modul, das die Tonhöhe eines klangerzeugenden Moduls steuert. Jedes Mal, wenn das Sample & Hold Modul einen neuen zufälligen Wert speichert, schickt er diesen Wert als Tonhöhenmodulation an das klangerzeugende Modul. Durch die Offenheit modularer Systeme können die am Sample & Hold Modul ankommenden Trigger ebenfalls zum Starten einer AR Hüllkurve genutzt werden. Das Resultat dieses Patches ist ein sich bei jedem Trigger in der Tonhöhe verändernder Pluck. Da das Sample & Hold Modul in diesem Beispiel zufällige Spannungen produziert, macht es Sinn, einen Quantisierer zwischen dem Sample & Hold Modul und dem klangerzeugenden Modul einzufügen. Der Quantisierer verschiebt die Spannungen dann auf eine gewünschte Tonleiter und hilft so, melodischere Ergebnisse zu erzielen.

4.3.3 Shift Register

Ob ein Shift Register zufallsbasiert arbeitet hängt wie bei einem Sample & Hold Modul von dem anliegenden Eingangssignal ab. Ist dieses ein stochastisches Signal, so geben die Ausgänge des Shift Registers zufällige Werte aus. Diese zufälligen Werte können dann genutzt werden, um vorhandenen komplexen Netzwerken einen zufälligen Charakter weiterzugeben.

Wie bereits beschrieben lassen sich mit rückkoppelnden Shift Registern sich wiederholende Spannungssequenzen erzeugen. Diese sind somit als Sequencer zur Steuerung von Tonhöhen oder anderer Parameter nutzbar. In einem generativen Patch kann dies genutzt werden um am Eingang des Shift Registers automatisiert zwischen dem rückkoppelnden Signal und einem stochastischen Signal umzuschalten. Schaltet das Signal zum Beispiel alle vier Takte zwischen dem rückkoppelnden Signal und dann für die Anzahl der Schritte innerhalb des Registers zu einem Weisen Rauschen am Input, so generiert der Patch alle vier Takte eine komplett neue

Sequenz, welche zum Steuern innerhalb des Patches genutzt werden kann. Auf das automatisierte Umschalten zwischen Signalen, wird später noch genauer eingegangen. Eine Möglichkeit wurde aber mit Clockmodulatoren in Kombination mit einem Switch schon vorgestellt.

4.3.4 Turing Machine

Die Turing Machine ist ein sehr nützliches Modul in Systemen generativer Musik. Aufgrund seiner Balance zwischen zufälligen Spannungswerten und der Möglichkeit diese graduell zu speichern, bis eine Sequenz schließlich ganz gelockt ist, kann die Turing Machine vielseitig genutzt werden um Rhythmen, Steuerspannungen und Melodien zu erzeugen. In den Beispielen in Kapitel fünf wird dies demonstriert.

4.3.5 Chaos Modul

Ein Chaos Modul ist eine Modulationsquelle, die eine Mischung aus einer zufallsbasierten Quelle und einem LFO ist. Auch wenn der Name Chaos für Manche ausschließlich zufallsbasiertes Verhalten implizieren mag, so ist Chaos in der Physik anders definiert: Chaos beschreibt Systeme deren Abläufe zufallsbasiert sind, diese Zufälle jedoch durch Bedingungen begrenzt sind.⁹⁷ Meyer beschreibt dies mit einer Analogie: Fliegt eine Motte abends um eine Lichtquelle, so tendiert die Motte dazu, in einem bestimmten Abstand zur Lichtquelle zu fliegen, auch wenn ihre allgemeine Flugbahn nicht vorausschaubar ist.⁹⁸ Ein Chaos Modul macht sich dieses Verhalten zunutze, indem es Signale ausgibt, welche in der Regel vom Verhalten eines periodischen LFOs zu einem mehr und mehr zufallsbasierten Verhalten verändert werden können. Diese Transformation zwischen zufallsbasiertem und deterministischem Verhalten kann über einen Parameter am Modul oder einen CV Eingang gesteuert werden. Das gibt die Möglichkeit innerhalb des Patches eine gemeinsame Struktur zu bilden, indem mehrere Module an gewissen Punkten mehr oder weniger Zufälle zulassen.

Die Eigenschaften von Chaos Modulen machen sie sehr nützlich innerhalb generativer Patches. Auch das Verhalten generativer Musik kann als chaotisch beschrieben werden. Generative Musik entwickelt sich ebenso innerhalb bestimmter Grenzen und

⁹⁷ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 254.

⁹⁸ Meyer (07.12.2020).

anhand verschiedener gegebener Anhaltspunkte, die sich je nach System unterscheiden. Während man auf die Grenzen und den Grad an Zufällen Einfluss nehmen kann, ist der Weg und die Entwicklung der Musik doch zufällig und man kann nicht vorhersehen, welchen Weg die Musik innerhalb der gegebenen Grenzen nimmt.

Da Chaos Module diese Eigenschaften teilen, eignen sie sich sehr gut, um zufällige und doch ähnliche Signale für die Steuerung des Patches zu generieren. So könnte ein Filter von einem Chaos Modul moduliert werden und die resultierende Filtermodulation würde einem ähnlichen Verlauf folgen aber nie denselben Verlauf wiedergeben. Dies kann in einer guten Mischung zwischen vertrauten Bewegungen und Variation innerhalb dieser bekannten Bewegungen resultieren.

4.3.6 Rhythmusgeneratoren

An dieser Stelle wird nochmals auf unterschiedliche Arten und Funktionsweisen von Rhythmusgeneratoren eingegangen. Viele generative Patches benötigen nicht unbedingt Rhythmusgeneratoren, da sie zum Beispiel nur ambiente Klänge wiedergeben und diese modulieren. Möchte man aber ein generatives System mit rhythmischen Patterns und Elementen entwickeln, sind neben Clockmodulatoren Rhythmusgeneratoren eine gute Wahl, um diese Patterns zu erzeugen.

Bjørn und Meyer teilen die verschiedenen Ansätze von Generatoren für das Erstellen von Patterns in drei Gruppen auf. Es gibt Module, welche zwischen vorgespeicherten Patterns umschalten können. Die zweite Gruppe besteht aus Modulen, welche auf euklidischen Rhythmen basieren. Die letzte Kategorie enthält Module, welche basierend auf verschiedenen Algorithmen Wahrscheinlichkeiten und Zufälle einbauen, um so neue Pattern zu generieren.⁹⁹

Eine Gemeinsamkeit in der Anwendung der Rhythmusgeneratoren innerhalb eines generativen Patches, ist die Veränderung des wiedergegebenen Patterns über die Zeit. Damit soll nicht ausgedrückt werden, dass ein konstantes Pattern zwingend unpassend in einem generativen Patch ist. Es sollte jedoch gezielt eingesetzt werden, um nicht Langeweile beim Zuhörer der Musik auszulösen. Mit der Veränderung der wiedergegebenen Rhythmen kann über die Zeit etwas Neues geschaffen werden.

⁹⁹ Nagle / Bjørn / Meyer (2018), S. 300.

Diese Veränderung kann durch die externe Modulation verschiedener Parameter implementiert werden, sowie durch die internen Funktionen eines Moduls.

4.3.7 Bernoulli Gates

Ein Bernoulli Gate hat zwei Ausgänge und einen Eingang für Trigger- oder Gatesignale. Das Modul entscheidet nun per Zufall, an welchen Ausgang das Signal weitergeleitet wird. Zusätzlich kann über einen Parameter oder CV Eingang eingestellt werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass das Signal an den einen oder den anderen Ausgang geleitet wird. Ist der Parameter auf seinem niedrigsten Wert, so leitet er das Signal zu 100 % an den ersten Ausgang weiter und zu 0 % an den zweiten Ausgang. Dieses Verhältnis ändert sich je nach Einstellung des Parameters, bis er schließlich bei dem maximalen Wert des Parameters alle Signale an Ausgang 2 weiterleitet.¹⁰⁰

Bernoulli Gates sind sehr nützliche Module, um zufällig zwischen verschiedenen Parts, Events, Pattern und Melodien umzuschalten.

4.3.8 Wahrscheinlichkeiten und Zufälle in verschiedenen Modulen

Neben dem Bernoulli Gate verknüpfen viele weitere Module verschiedene Funktionen mit Wahrscheinlichkeiten. So gibt es in VCV Rack wahrscheinlichkeitsbasierte Schalter, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auf bestimmte Eingänge oder Ausgänge schalten. Ein weiteres Beispiel ist der stochastische Sequencer Vega von Pantala Labs. Bei diesem kann man für jeden der zwölf Noten einstellen, wie wahrscheinlich es ist, dass diese getriggert werden.

Module wie ein wahrscheinlichkeitsbasierter Schalter sind sehr nützlich innerhalb generativer Patches um unvorhersehbare Ergebnisse zu erzielen. So könnte man mithilfe des Schalters per Zufall zwischen vier verschiedenen Modulationsnetzwerken umschalten, ohne zu wissen welches Netzwerk gewählt wird.

¹⁰⁰ Mutable Instruments (2021).

4.4 Zusammenspiel von Chaos und Ordnung

Das Zusammenspiel von Ordnung und Chaos ist ein entscheidender Faktor generativer Systeme. So ist das Maß an Chaos und wiederkehrenden Elementen direkt abhängig von den Patchentscheidungen des Systemdesigners. Hierbei korrespondieren zufällige Steuersignale mit mehr Veränderung und weniger Vorausschaubarkeit des Patches, während deterministische Signale die Ordnung innerhalb des Patches erhöhen.

So hat man die Möglichkeit sowohl Momente zu erzeugen, die von Ordnung geprägt sind, als auch welche, bei denen etwas Neues Spannendes erzeugt wird. Die Momente der Ordnung können dem generativen Patch eine Struktur geben, zu der sich das Klangbild hinbewegen kann. Ein Beispiel für diese Struktur wäre ein konstanter Rhythmus, bei dem sich zwar der Sound über die Dauer ändert, aber der grundsätzliche Rhythmus gleichbleibt. Diese Momente der Ordnung sind jedoch keine Voraussetzung für generative Patches. Jedes System ist aufgrund seiner unterschiedlichen Grenzen und Voraussetzungen in einem unterschiedlichen Maß chaotisch oder weniger chaotisch. Solange sich das hörbare Ergebnis konstant in irgendeiner Form wandelt und nicht exakt wiederholt, gilt der Patch als generativ.

4.5 Mixing, Abhängigkeiten und dynamische Trigger

4.5.1 Mixing generativer Patches

Das Mixing verschiedener Elemente ist in jedem generativen Patch von Bedeutung und unterliegt erstmals den gleichen Bedingungen wie bei nicht generativen Patches. Der entscheidende Unterschied ist jedoch, dass man in generativen Patches nicht genau weiß, welches Element mit welcher Tonhöhe wann spielt. Das bedeutet es muss innerhalb des Patches eine Steuerung geben, welche die Elemente mischt. Da man nicht in Echtzeit auf die Elemente eingehen kann, muss die Mischung schon bei der Implementierung des Patches beachtet werden.

Hierbei gibt es einige Punkte, wodurch der Mix eines generativen Patches besser klingen kann. So macht es Sinn die Auswahl der Elemente aneinander abzustimmen. Wie bei klassischer Musikproduktion hat man eben nur ein begrenztes Frequenzband, welches mit Elementen gefüllt werden kann. Da zumindest ein Teil des generativen Patches auf Zufällen beruht, kann es schnell passieren, dass zwei Elemente eine

ähnliche Tonhöhe wiedergeben und dadurch im Mix miteinander kämpfen. Gerade im Bassbereich kann dies problematisch sein. Hier kann man sich folgende Eigenheit generativer Systeme zunutze machen: Generative Systeme beruhen zwar auf Zufällen, jedoch ist die Häufigkeit und Natur der Zufälle durch gesetzte Grenzen beschränkt.

Bezogen auf das Beispiel der zufälligen Tonhöhensteuerung eines Elementes würde dies bedeuten, dass die Modulationstiefe der Modulationsquelle mit einem Modul beschränkt werden müsste. Dadurch kann man verhindern, dass ein Element Noten im Bassbereich wiedergibt. Man könnte dies neben weiteren Modulen mit einem Attenuator oder einem VCA erreichen. Es ist also die Aufgabe des Patchdesigners, die Elemente so zu konfigurieren, dass diese gut im Mix sitzen.

4.5.2 Abhängigkeiten

Da generative Musik im Moment entsteht, ist es sinnvoll Abhängigkeiten zwischen Elementen aufzubauen. Damit ist gemeint, dass ein Element in irgendeiner Art mit anderen Elementen interagiert und auf diese reagiert. Ein Beispiel einer solchen Abhängigkeit wären zwei Basselemente, welche niemals zur gleichen Zeit getriggert werden, um den Mix nicht zu verwaschen. Dies könnte durch einen Switch erreicht werden, der die Triggersignale für die tieffrequenten Elemente entweder an das eine Basselement weiterleitet oder an das andere, jedoch nie an beide gleichzeitig. Ein weiteres Beispiel wäre eine CV Spannung, die einen Kanal am Mixer einblendet, während die invertierte CV Spannung einen zweiten Kanal ausblendet. Diese Abhängigkeit resultiert in einem Crossfade zwischen diesen zwei Kanälen. Denkt man dieses Beispiel weiter, so könnte dieser Crossfade ein Fade zwischen zwei hörbaren Elementen sein oder ein Fade zwischen zwei Steuerspannungen.

Diese Abhängigkeiten können alle möglichen Funktionen innerhalb eines Patches ausführen. Damit eignen sie sich perfekt, um dem Patch eine gemeinsame Struktur zu geben, Elemente aufeinander eingehen zu lassen und die Elemente automatisiert zu mischen.

4.5.3 Dynamische Trigger

Eine spezielle Art der Abhängigkeit innerhalb eines generativen Patches sind dynamische Trigger. Damit sind in dieser Arbeit Trigger gemeint, die in Abhängigkeit

von bestimmten Momenten weitere Elemente starten oder stoppen, um so dem Patch eine Entwicklung und Struktur zu geben. Die Momente, welche durch die Trigger ausgelöst werden, werden hierbei vom Patchdesigner bestimmt. So kann zum Beispiel alle sechzehn Takte ein Tiggersignal von einem Clockmodulator zu einem Bernoulligate geschickt werden. Das Bernoulligate entscheidet wiederum zufallsbasiert, an welchen der zwei Ausgänge das Signal weitergeleitet wird. Dies kann genutzt werden, um zwischen verschiedenen Events und Parts innerhalb eines Patches umzuschalten. So hat man einen Patch erzeugt, der alle 16 Takte zufällig entscheidet, welcher Part des Patches abgespielt wird. Moduliert man nun noch die Chance des Bernoulli Moduls so, dass nach jedem Durchlauf der 16 Takte zwischen verschiedenen Wahrscheinlichkeitsstufen umgeschaltet wird, so kann man entscheiden, wann der Ausgang des Gates per Zufall ausgewählt wird und wann jeweils ein bestimmter Ausgang ausgewählt wird.

Logische Module sind eine weitere Möglichkeit, um in bestimmten Momenten Trigger zu erzeugen. Ein Beispiel ist ein Element, das nur getriggert wird, wenn zwei andere Module ebenfalls zu diesem Zeitpunkt getriggert werden. Dies könnte man mit einem logischen AND Modul erreichen. Möchte man das Element nur dann triggern, wenn die beiden anderen Module nicht getriggert werden, kann das AND Modul durch ein invertiertes OR Modul ersetzt werden, also mit ein NOR Modul.

Ein weiteres Beispiel für dynamische Trigger sind End-of-Cycle Trigger. Diese werden von Modulen ausgegeben, die einmal ihren internen Zyklus durchlaufen haben. So gibt es Sequenzer, die jedes Mal dann ein Trigger ausgeben, wenn sie alle ihre Schritte durchlaufen haben. Dieser Trigger kann dann genutzt werden, um dynamisch am Ende der Sequenz etwas Neues zu starten. So kann am Ende der Sequenz zu einer neuen Sequenz gewechselt werden, der Part gewechselt werden und vieles mehr. Neben Sequenzern gibt es viele weitere Module wie z.B. Hüllkurvengeneratoren und Rhythmusgeneratoren, die am Ende ihres Zyklus einen End-of-Cycle Trigger generieren.

5 Implementierung generativer Patches in VCV Rack

In diesem Kapitel wird auf die Implementierung generativer Patches in VCV Rack eingegangen. Hierbei soll verdeutlicht werden, wie sich ein generativer Patch aufbauen und designen lässt. Hierbei wird in vier Beispielen jeweils unterschiedliche Möglichkeiten zum Steuern des Patches demonstriert. Die einzelnen Beispiele fokussieren sich hierbei auf die Grundkonzepte modularer Synthese: In dem ersten Beispiel werden vier unterschiedliche Wege implementiert, Trigger und Rhythmen generativ zu erzeugen. Das zweite Beispiel geht auf Möglichkeiten der Tonhöhensteuerung ein. Das dritte Beispiel präsentiert Möglichkeiten zur Erzeugung von Steuerspannungen.

So soll dem Leser ein Gefühl vermittelt werden, wie er in einem Patch Events generativ steuern kann. In dem letzten Patch werden ausgewählte Techniken der ersten drei Beispiele vereint und so demonstriert, wie ein größerer generativer Patch aufgebaut sein kann. Alle Patches sind sowohl in einem Video dokumentiert, als auch in VCV Rack 2 zugänglich.

5.1 Patch 1 – Generative Trigger und Rhythmen

In diesem Patch werden vier verschiedene Möglichkeiten präsentiert, wie man Rhythmen generieren kann. Zwischen den vier Möglichkeiten kann innerhalb des Patches mit einem Switch umgeschaltet werden.

Bei allen Möglichkeiten ist ein LFO im Vierteltakt als Masterclock aktiv. Für zusätzliche Clocksignale im Achteltakt und Sechzehnteltakt sind zwei Clock Modulatoren an den LFO angeschlossen.

Die erste präsentierte Möglichkeit basiert auf dem Einsatz von Bernoulli Modulen. Die drei vorhandenen Clocksignale werden jeweils an ein Bernoulli Modul weitergeleitet. Dieses entscheidet dann per Zufall, an welchen der zwei Ausgänge das Signal weitergeleitet wird. Dadurch ist es möglich, zwei unterschiedliche rhythmische Triggersignale an den Ausgängen zu erzeugen. Die zwei Triggersignale desselben Bernoulli Moduls sind invertiert zueinander und eignen sich so gut für Klänge, die nicht zur gleichen Zeit spielen sollen wie zum Beispiel eine Closed und Open Hihat.

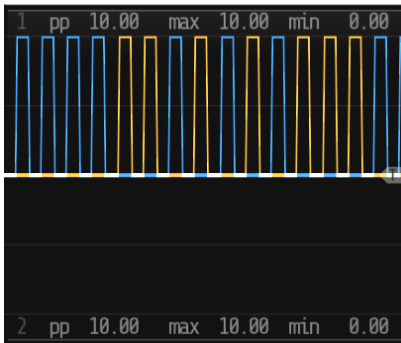


Abbildung 16: Ausgang 1 und Ausgang 2 eines Bernoulli Moduls

Man kann nun Abhängigkeiten schaffen, indem man ein weiteres Bernoulli Modul von einem der Ausgänge eines vorherigen Bernoulli Moduls triggern lässt. So könnte das Bernoulli Modul zum Beispiel eine Bassdrum triggern, während das zweite Bernoulli Modul den Trigger wiederum an einen seiner beiden Ausgänge weiterleitet. Dieser weitergeleitete Trigger kann nun genutzt werden um in Abhängigkeit der Kick zufallsbasiert weitere Events zu triggern.



Abbildung 17: Ausgangssignale eines in Serie geschalteten Bernoulli Moduls

Die zweite in dem Patch verwendete Möglichkeit ist es, die Triggerausgänge einer Turing Machine zu benutzen. Die Turing Machine ist hier bei sehr praktisch, da sie viele Triggerausgänge hat, welche gespeichert werden können, wenn diese gefallen. Möchte man nun wieder mehr Zufälle in den Rhythmus einstreuen, so kann man das leicht mit dem Verändern des Lock Parameters erreichen.

Die dritte implementierte Möglichkeit Rhythmen zu generieren, wird in diesem Patch über ein stochastischen Triggergenerator erzeugt. Bei diesem kann man mehrere Patterns programmieren und für jeden Trigger eine Wahrscheinlichkeit festlegen, mit der dieser Trigger wiedergegeben wird oder eben nicht.

Die letzte präsentierte Möglichkeit basiert auf der Modulation verschiedener Parameter von Rhythmusgeneratoren. In diesem Beispiel wird die Schrittlänge eines klassischen Rhythmusgenerators zufällig moduliert. Zusätzlich wird die Schrittlänge sowie die generierte Anzahl der Schritte eines Euklidischen Sequenzers per Zufall moduliert. Das resultierende Pattern ist ein sich ständig wechselnder Rhythmus an den Ausgängen der Sequenzer.

5.2 Patch 2 – generative Melodien

Nachdem im vorherigen Patch demonstriert wurde, wie Trigger generativ erzeugt werden können, soll in diesem Patch auf Möglichkeiten der generativen Tonhöhensteuerung eingegangen werden. Wie auch im ersten Beispiel dient ein LFO als Masterclock für das Synchronisieren der verwendeten Module. Wie in dem Patch zuvor, kann per Schalter zwischen den verschiedenen Ansätzen umgeschaltet werden. Alle drei Möglichkeiten des Patches werden nach der Erzeugung der Steuerspannung in ein Quantisierer geleitet, um die erzeugte Spannung auf musikalische Tonhöhen zu locken.

In der ersten präsentierten Möglichkeit werden die Melodien und Tonhöhen von der Turing Machine erzeugt. Diese ist sehr nützlich, um mit dem Drehen oder externen Steuern eines einzelnen Parameters eine neue Melodie zu erzeugen beziehungsweise eine Melodie für den Moment zu speichern.

Besitzt man keine Turing Machine, so präsentiert die zweite Möglichkeit, wie man eine Turing Machine mit anderen Modulen nachahmen kann. Hierfür benötigt man ein Shift Register, eine zufällige Spannung, ein Triggersignal und einen Schalter für das Umschalten zweier Inputs. Das Prinzip beruht hierbei auf einem rückkoppelnden Shift Register wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Im Grundsatz ist die Idee, dass man an dem Eingang des Shift Registers zwischen einem stochastischen Signal wie Rauschen und einem der Ausgänge des Shift Registers umschalten kann. Solange das Rauschen anliegt, werden in dem Register neue Werte gespeichert. Sobald man aber auf das rückkoppelnde Signal umschaltet, werden die bereits gespeicherten Werte zurück in den Eingang des Registers geleitet, wodurch eine sich wiederholende Melodie entsteht. Man kann also wie bei einer Turing Machine zwischen zufälligen und gespeicherten Melodien umschalten. Der Unterschied zu einer Turing Machine ist hierbei jedoch, dass bei der Turing Machine diese Zufälle auch nur graduell

zugelassen werden können. Bei der präsentierten Möglichkeit mit dem Shift Register werden die Werte entweder komplett zufällig bestimmt oder gespeichert wiedergegeben. Einen Mittelweg würde sich nur über komplexere Schaltungen mit Bernoulli Gates erreichen.

Die letzte präsentierte Möglichkeit besteht aus dem Summieren verschiedener Sequenzen. Im Grundsatz gibt es in diesem Beispiel drei vorprogrammierte Sequenzen, welche zusammen in einem Mixer summiert werden. Die erste Sequenz ist hierbei die Hauptsequenz, welche unverändert immer abgespielt wird. Die Überlegung ist nun, die zwei anderen Sequenzen pro Schritt zufallsbasiert mit der ersten Sequenz zu summieren. Dafür wird an den CV Eingängen des Mixers für die zwei zu summierenden Sequenzen ein Gate Signal pro Schritt angelegt. Ob dieses Gate Signal am Mixer High oder Low ist, wird dabei von Bernoulli Modulen zufällig bestimmt. Ist ein Schritt High, so wird dieser Schritt mit dem jeweiligen Schritt der Hauptsequenz addiert. So wird bei jedem Schritt zufallsbasiert entschieden, ob die Tonhöhe der ersten Sequenz, oder die Summe aus verschiedenen Sequenzen wiedergegeben wird.

5.3 Patch 3 – generative CV

In diesem Patch werden unterschiedliche Möglichkeiten für die Erzeugung von generativen Steuerspannungen präsentiert.

Die erste Möglichkeit basiert hierbei auf dem Prinzip des Phasings, wie es schon Brian Eno und Steve Reich verwendet haben. Hierfür wird in dem Beispiel das Modul Ocd des Herstellers Instruo verwendet. Dieses generiert acht LFO Signale. Das Besondere der generierten LFO Signale ist, dass diese nicht in Sync laufen. Um die Komplexität der Signale zu erhöhen, wird die Frequenz des Moduls über einen anderen LFO moduliert. Man kann diese acht Signale also für das Steuern verschiedenster Parameter innerhalb des Patches nehmen ohne je die gleichen Einstellungen und damit dasselbe Klangbild zu erhalten.

Die zweite präsentierte Möglichkeit ist ein komplexes LFO Netzwerk wie es in Kapitel 4 vorgestellt wird. Innerhalb dieses Netzwerkes modulieren die einzelnen LFOs sich gegenseitig und generieren so komplexe Steuerspannungen. Zusätzlich wird die Frequenz eines LFOs über eine Zufallsspannung moduliert. Für das Steuern der

klanglichen Eigenschaften werden an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Netzwerkes Spannungen abgegriffen. Mit diesen Spannungen werden schließlich verschiedene klangliche Parameter moduliert.

In der dritten Möglichkeit wird das Modul Rampage von Befaco genutzt, um zwei in einer Schleife betriebene Hüllkurven zu generieren. Die Attack und Release der Hüllkurven werden nach jedem Durchlauf der Hüllkurve zufallsbasiert über ein Sample & Hold Modul moduliert. Hierbei startet der End of Cycle Trigger nicht nur die Hüllkurve neu, sondern triggert auch ein Sample & Hold Modul, welches dann die Attack und Release bei jedem Durchlauf neu bestimmt. Damit generiert man ein Steuersignal, das sich nach jedem Durchlauf seines Zyklus neu formt. Das Rampage Modul bietet nun die Möglichkeit zwei solcher Hüllkurven zu erzeugen. Ein Vorteil des Moduls ist es, dass dieses gleich mehrere Ausgänge bietet, welche zum Beispiel das Maximum oder Minimum von beiden Hüllkurven ausgeben. Diese zusätzlichen Signale sind nützliche Steuerspannungen innerhalb des Patches.

In dem letzten Beispiel wird das Modul Marbles von Mutable Instruments als Generator für die Steuerspannungen benutzt. Dieses generiert unterschiedliche zufallsbasierte Steuerspannungen, welche innerhalb des Patches genutzt werden können. Mit diesem Beispiel soll demonstriert werden, dass oft bestimmte Module bereits eigene komplexe Spannungen generieren ohne dass diese in komplexen Schaltungen manipuliert werden müssen.

5.4 Patch 4 – Ambienter Patch

In diesem Patch wird ein ambientes Klangbild aus zwei Soundquellen erzeugt. Die eine Soundquelle ist eine sich ständig in der Tonhöhe ändernde Melodie, während die zweite Soundquelle ein perkussives Element ist. Die erste Soundquelle wird hierbei zusätzlich in ihrem Lautstärkeverlauf moduliert. Die Steuerungen der Audioquellen und ihrer Eigenschaften wird mit Techniken aus den Beispielen 1-3 realisiert.

Das perkussive Element wird über einen Triggerausgang einer Turing Machine zufallsbasiert getriggert. Zusätzlich werden die klanglichen Eigenschaften des perkussiven Elementes über ein komplexes LFO Netzwerk gesteuert.

Das melodische Element ist hierbei etwas komplexer. Der Lautstärkeverlauf dieses Elementes wird über eine Hüllkurve bestimmt, die in einer Schleife betrieben wird.

Hierbei wird nach jedem Durchlauf der Hüllkurve die Attack und Release zufällig neu bestimmt. Der End of Cycle Trigger wird zusätzlich genutzt, um die Tonhöhe aus einer zufallsbasierten Sequenz zu sampeln. Diese Tonhöhe wird dann jedes Mal einem neuen Hüllkurvendurchlauf zugewiesen. Dadurch entsteht eine sich ständig neu entwickelnde Melodie mit unterschiedlichen Lautstärkeverläufen der einzelnen Schläge. Die zufallsbasierte Sequenz aus welcher die Tonhöhe gewonnen wird, ist wie im Patch 2 über das zufällige Summieren verschiedener Sequenzen realisiert. Der einzige Unterschied ist hierbei, dass zusätzlich zu den drei vorprogrammierten Sequenzen aus dem Patch 2 eine vierte zufällige Sequenz aus der Turing Machine summiert wird.

Die Töne werden schließlich summiert in einen Hall geschickt, um eine Kohärenz zwischen beiden Elementen zu schaffen.

6 Fazit

Diese Arbeit hatte das Ziel, Module und Techniken von Systemen generativer Musik in modularer Synthese vorzustellen, um damit ein Verständnis für das Designen solcher Systeme zu schaffen. Hierfür wurde anfangs erklärt, was unter generativer Musik zu verstehen ist. Um dieses Verständnis zu vertiefen auf den geschichtlichen Hintergrund generativer Musik eingegangen, sowie Beispiele für generative Systeme genannt. Weiter erläuterte die Arbeit die tonalen und zeitlichen Eigenschaften von Klängen und Geräuschen, um so aufzuzeigen, welche Dimensionen generativ gesteuert werden können.

Nachfolgend wurde die Verknüpfung zwischen modularer Synthese und generativer Musik hergestellt. Hierbei handelte die Arbeit anfangs von den Merkmalen modularer Synthese und einigen Grundkonzepten, dieser Systeme. Aufbauend auf diesen Konzepten behandelte die Arbeit die Vorteile und Eigenheiten modularer Systeme für generative Musik.

Im Hauptteil der Arbeit wurden zuerst verschiedene Module in ihrer technischen Funktionsweise vorgestellt, die in generativen Patches nützlich sein können. Der Fokus war hierbei auf Modulen für die Steuerung eines modularen Systems. Im Kapitel generative Techniken behandelte die Arbeit Möglichkeiten, mit deterministischen Modulen komplexe Steuerspannungen zu erzeugen. Neben diesen deterministischen Modulen wurden schließlich zufallsbasierte Quellen vorgestellt. Anschließend wurden Gedanken zu Abhängigkeiten und zum Mixing innerhalb eines generativen Patches präsentiert.

Abschließend wurden unterschiedliche Techniken in VCV Rack implementiert, um so ein tieferes Verständnis für das Designen generativer Patches zu vermitteln.

Literaturverzeichnis

Anwander, Florian (2017): Synthesizer. So funktioniert elektronische Klangerzeugung. 9. Aufl., Bergkirchen.

Bahr Martha (25.09.2018): Kolumne: Generative Musik | KEYBOARDS. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://www.keyboards.de/stories/kolumne-generative-musik/>, 27.11.2021.

Bainter, Alex (26.01.2019): Introduction to Generative Music. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://medium.com/@alexbainter/introduction-to-generative-music-91e00e4dba11>, 12.11.2021.

Beucher, Ottmar (2011): Signale und Systeme: Theorie, Simulation, Anwendung. Eine beispielorientierte Einführung mit MATLAB, Berlin, Heidelberg.

Cole, Tim (14.01.2022): SSEYO Koan. Brian Eno used it. Where is it now? elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://intermorphic.com/archive/sseyo/koan/>, 26.01.2022.

DeSantis, Dennis (2015): Making Music. 74 creative strategies for electronic music producers, Berlin.

Duden (30.11.2021): generativ. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/generativ>, 30.11.2021.

Duden (08.12.2021): Synthese. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Synthese>, 08.12.2021.

Enders, Bernd (1985): Die Klangwelt des Musiksynthesizers: die Einführung in die Funktions- und Wirkungsweise eines Modulsynthesizers.

Enders, Bernd (1997): Lexikon Musikelektronik. 3. Aufl., Zürich.

Eno, Brian (11.10.2011): Composers as Gardeners. elektronisch veröffentlicht unter der URL: https://www.edge.org/conversation/brian_eno-composers-as-gardeners, 24.11.2021.

Friesecke, Andreas (2007): Die Audio-Enzyklopädie. Ein Nachschlagewerk für Tontechniker, Berlin.

Galanter, Philip (2006): Introduction – Generative Art and Rules-Based Art.

Gale, Dave (10.11.2016): Modular Synth Tutorial: Working With Clocks, in: MusicTech.

Görne, Thomas (2011): Tontechnik. 3. Aufl., München.

Jauhainen, Ilpo (2019): Future Forest Space. The Philosophy of becoming in site-specific generative sound installation.

Jauhainen, Ilpo (2020): Generative Music. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://ilpojauhainen.com/writings/generative-music/>, 22.11.2022.

Jena, Stefan (15.05.2006): Würfelmusik. elektronisch veröffentlicht unter der URL: https://www.musiklexikon.ac.at/ml/musik_W/Wuerfelmusik.xml, 22.12.2022.

Kruse, Heiner (2021): Logic Pro. Das umfassende Handbuch. 3. Aufl., Bonn.

Malvino, Albert Paul / Bates, David J. (2015): Electronic principles, New York.

Maurer, John A. (1999): A Brief History of Algorithmic Composition. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://ccrma.stanford.edu/~blackrse/algorithm.html>, 22.11.2021.

Mcguire, Patrick (05.06.2019): Was ist Harmonik? So setzt du sie in deinem Songwriting ein, in: LANDR.

Meyer, Chris (21.11.2016): Analog Shift Register. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://learningmodular.com/glossary/asr/>, 27.11.2021.

Meyer, Chris (18.05.2020): Attenuator. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://learningmodular.com/glossary/attenuator-2/>, 27.11.2021.

Meyer, Chris (07.12.2020): Chaos Generators. elektronisch veröffentlicht unter der URL: <https://www.elby-designs.com/webtek/panther/if108-chaquo/chaos-generators/chaos-generators.htm>, 17.11.2021.

(2021): Mutable Instruments | Branches.

Nagle, Paul / Bjørn, Kim / Meyer, Chris (Hrsg.) (2018): Patch & tweak. Exploring modular synthesis. 3. Aufl., Fredriksberg.

Priestley, John (2014): Poiesthetic play in generative music.

Raffaseder, Hannes (2010): Audiodesign. Akustische Kommunikation, akustische Signale und Systeme, psychoakustische Grundlagen, Klangsynthese, Audioediting und Effektbearbeitung, Sounddesign, Bild-Ton-Beziehungen. 2. Aufl., München.

Ruschkowski, André (2010): Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen. 2. Aufl., Stuttgart.

Sandmann, Thomas (2019): Effekte & dynamics. Professionelles Know-How für Mix und Mastering : die Referenz für Einsteiger und Profis. 9. Aufl., Bergkirchen.

Schauer, Helmut / Ackermann, Philipp (1991): Computer und Musik. Eine Einführung in die digitale Klang- und Musikverarbeitung, Vienna.

Scherzinger, Martin (2005): Curious Intersections, Uncommon Magic: Steve Reich's It's Gonna Rain.

Schiffmann, Andreas (25.11.2018): Brian Eno: Music For Airports (Review/Kritik) - Album-Rezension (Ambient). elektronisch veröffentlicht unter der URL: <http://www.musikreviews.de/reviews/2018/Brian-Eno/Music-For-Airports/>, 26.11.2021.

Stange-Elbe, Joachim (2015): Computer und Musik. Grundlagen, Technologien und Produktionsumgebungen der digitalen Musik, Berlin, Boston.

Toop, David (2005): Haunted weather. Music, silence and memory. 5. Aufl., London.

Weinzierl, Stefan (Hrsg.) (2009): Handbuch der Audiotechnik, Berlin, Heidelberg.

Wilson, Michael (20.03.2021): What is special about Aeolian harp? elektronisch veröffentlicht unter der URL: https://www.restaurantnorman.com/what-is-special-about-aeolian-harp/#What_is_special_about_Aeolian_harp, 26.11.2021.

Wilson, Ray (2013): Make: analog synthesizers, Sebastopol, CA.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Trigger- und Gatesignale	17
Abbildung 2: Clocksignale eines Doepfer A-160 Clock Divider Moduls	22
Abbildung 3: Hüllkurvenverlauf eines ADSR Moduls	25
Abbildung 4: In einer Schleife betriebene Hüllkurve	26
Abbildung 5: LFO Ausgang mit Rauschen am Eingang.....	30
Abbildung 6: LFO Ausgang mit periodischer Spannung am Eingang	30
Abbildung 7: 'Over` und 'Under` Ausgang eines Komparators	36
Abbildung 8: MIN (rotes Signal);MAX (gelbes Signal)	37
Abbildung 9: Stufenspannung (Blau) nach einem Slew Limiter (Gelb)	38
Abbildung 10: LFO 1 und 2 in Serie.....	41
Abbildung 11: LFO 1 (Grün) moduliert die Frequenz von LFO 2 (Rot)	41
Abbildung 12: LFO 1 und LFO 2 additiv zusammengemischt.....	42
Abbildung 13: links: LFO 1 und LFO 2; rechts: Summe von LFO 1 und LFO 2	42
Abbildung 14: Feedback zwischen LFOs.....	43
Abbildung 15: Komplexes LFO Netzwerk	43
Abbildung 16: Ausgang 1 und Ausgang 2 eines Bernoulli Moduls.....	55
Abbildung 17: Ausgangssignale eines in Serie geschalteten Bernoulli Moduls	55