

Diplomarbeit

Eurorack Synthesizer

Modularer Synthesizer mit Eurorack Kompatibilität

Eingereicht von

**Felix Perktold
Matteo Kastler**

Eingereicht bei

**Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
Anichstraße**

Abteilung für Wirtschaftsingenieure/Betriebsinformatik

Betreuerin

Dr. Cornelia Falch

Innsbruck, April 2023

Abgabevermerk:

Betreuerin:

Datum:

Kurzfassung / Abstract

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit subtraktiver Klangsynthese mittels elektronischer Hardware am Beispiel eines selbstgebauten modularen Synthesizers.

Der dokumentierte Synthesizer stellt ein in sich geschlossenes System dar, welches jedoch bei Bedarf mit externen Komponenten erweitert werden kann. Zu diesem Zweck streben wir Kompatibilität mit dem Eurorack-Format an, welches einen De-facto-Standard für modulare elektronische Synthesizer darstellt.

This thesis deals with analog sound synthesis through electronic hardware using the example of a home-made modular synthesizer system.

The documented Synthesizer is a self-contained system, which can be extended by external components. To this end, we strive for compatibility with the eurorack format, which represents a de-facto standard for modular electronic synthesizer systems.

Projektergebnis Alle nötigen Module für eine klassische Signalverarbeitungskette zur subtraktiven Klangsynthese wurden recherchiert, entworfen und gefertigt. Das System entspricht wie geplant den Standards des Eurorack-Formates und ist somit mit einer Vielzahl von kommerziell erhältlichen Komponenten erweiterbar. Genauere Ausführungen zu den erreichten Zielen befinden sich im Schlussteil (siehe Abschnitt [A.1](#)).

Result All necessary Modules to make up a standard signal processing chain for subtractive sound synthesis have been researched, designed and manufactured. As planned, the system conforms to the standards of the eurorack-formats and can therefore be expanded with a wide range of commercially available components. More detailed explanations of the achieved goals can be found in the final section (see chapter [A.1](#))



Abbildung 1.: Der fertiggestellte Synthesizer mit allen Modulen, Spannungsquelle und Gehäuse

Erklärung der Eigenständigkeit der Arbeit

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe. Meine Arbeit darf öffentlich zugänglich gemacht werden, wenn kein Sperrvermerk vorliegt.

Ort, Datum

Verfasser 1

Ort, Datum

Verfasser 1

Inhaltsverzeichnis

Abstract	iii
1. Einleitung	2
1.1. Vertiefende Aufgabenstellung	3
1.1.1. Felix Perktold	3
1.1.2. Matteo Kastler	3
2. Theoretische Grundlagen	4
2.1. Klangsynthese	4
2.1.1. Klangwellen	4
2.1.2. Klangerzeugung	7
2.1.3. Subtraktive Klangsynthese	8
2.1.4. Additive Klangsynthese	8
2.1.5. Vocoder	9
2.2. Geschichte	9
2.3. Das Eurorack-Format	11
2.3.1. Kontrollspannung	12
2.3.2. Gehäuse	15
3. Praktische Umsetzung	16
3.1. Spannungsquelle	16
3.2. Spannungsverteilung	16
3.3. Gehäuse	16
3.4. Transistoren abgleichen	17
3.5. Vactrols	18
3.6. Module	18
3.6.1. Oszillator x2	20
3.6.2. White Noise	23
3.6.3. Mixer	25

3.6.4. Spannungskontrollierter Verstärker	27
3.6.5. Low Frequency Oscillator	30
3.6.6. Attack-Release Hüllkurvengenerator	33
A. Schlussfolgerung/Projekterfahrung	38
A.1. Erreichte Ziele	38
A.2. Erlangte Erkenntnisse	39
A.2.1. Material für Deckplatten	39
A.2.2. Material für Platinen	39
A.2.3. Verwendung von simpleren Schaltkreisen	39
A.2.4. Reihenfolge der konstruierten Module	40
A.2.5. Weiteres	40
Abkürzungsverzeichnis	42
Abbildungsverzeichnis	44
Literaturverzeichnis	46

1. Einleitung

Die meisten Aufgaben bei der Produktion moderner Musik werden heutzutage am Computer erledigt. Doch während digitale Werkzeuge viele dieser Aufgaben zufriedenstellend erledigen können, liegt für viele Musiker ein besonderer Reiz in der Soundproduktion mit analoger Hardware. Diese Einstellung könnte daran liegen, dass analoge Instrumente einen eigenen Charakter mit sich bringen und für viele auch intuitiver zu handhaben sind. Besonders modulare Synthesizer bieten hier eine Plattform, welche die Welt der Klangsintese greifbar und zugänglich macht.

Die größte Stärke modularer Synthesizer ist ihre unermessliche Flexibilität. Während bei herkömmlichen Synthesizern viele oder sogar alle Signalwege fest verkabelt sind und im Inneren des Instrumentes versteckt werden, kann bei modularen Synthesizern frei entschieden werden, welche Teile des Synthesizers sich auf welche Art und Weise gegenseitig beeinflussen. So kann man den Aufbau und die Struktur seines Instrumentes beliebig und flexibel verändern, sogar während man es benutzt, beispielsweise während eines Auftritts. Module aus verschiedensten Quellen können miteinander verwendet werden, solange sie den selben Standards folgen. Modulare Synthesizer sind ein ideales Werkzeug für Klangtechnische Experimente, welche nur von der vorhandenen Hardware und von der eigenen Fantasie beschränkt sind.

Da Module von etablierten Herstellern meist mit einem beträchtlichen finanziellen Aufwand verbunden sind, wollen wir die benötigten Module mit herkömmlichen Bauteilen selbst fertigen. Dabei stützen wir uns auf Öffentliche Anleitungen, Schaltkreise und auf die Dokumentation des A-100 von Doepfer [12].

Der resultierende Synthesizer soll in der Lage sein, eine simple klassische Signalverarbeitungskette für subtraktive Klangsynthese (beschrieben in Abschnitt 2.1.3) bereitzustellen. Zu diesem Zweck werden Oszillatoren oder ähnliche Klangquellen, ein spannungskontrollierter Verstärker, englisch: Voltage Controlled Amplifier (**VCA**), ein Hüllkurvengenerator, und eine Kontrollspannungsquelle für diesen Hüllkurvengenerator (Im Idealfall ein Sequencer) benötigt. Auch sollen alle Bestandteile dieses Synthesizers den Standards des Eurorack-Formates entsprechen, um mit Eurorack-Modulen kompatibel sein.

1.1. Vertiefende Aufgabenstellung

1.1.1. Felix Perktold

- 20% Recherche
- 60% Dokumentation der Theoretischen Grundlagen, geschichtliche Hintergründe
- 20% Konstruktion der Module

1.1.2. Matteo Kastler

- 20% Recherche praktische elektronische Umsetzung
- 20% Dokumentation
- 60% Konstruktion der Module

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Klangsynthese

Das Wort **Synthese** bedeutet in etwa zusammensetzen oder zusammenfügen [13], beschreibt also das Erschaffen von etwas Neuem durch die Vereinigung von kleineren Teilen. Klangsynthese bedeutet also, aus grundlegenden Klangwellen komplexere Klänge zu erzeugen.

Ein **Synthesizer** ist ein (meist elektronisches) Instrument, welches zur Klangsynthese fähig ist. Während die meisten herkömmlichen analogen Instrumente nur eine oder wenige unterschiedliche Klangfarben erzeugen können, ist eine der Kernaufgaben eines Synthesizers das Erzeugen von Klängen mit beliebig änderbarer Klangfarbe. Zwar können Synthesizer auch herkömmliche Instrumente imitieren, vor allem sind sie jedoch das Mittel der Wahl, wenn unnatürliche und untypische Klangfarben erzeugt werden sollen oder wenn sich die Klangfarbe eines Tones ändern soll, während er gespielt wird.

2.1.1. Klangwellen

Klangwellen sind die Grundbausteine der Klangsynthese. Sie können in verschiedenen Medien vorkommen, beispielsweise als Spannungsänderungen, welche wir mit Elektronik manipulieren können oder als Schallwellen in der Luft. Weitere Formen von Klangwellen sind die Schwingungen einer Gitarrensaite oder einer Lautsprechermembran, welche ihre Umgebungsluft in Schwingung versetzen und dadurch Schallwellen erzeugen oder auch elektromagnetische Wellen beim Funk.

Frequenz

Die Tonhöhe einer Klangwelle hängt von ihrer **Frequenz** ab, also von der Geschwindigkeit, in welcher sie schwingt. Dabei nimmt das menschliche Gehirn Töne auf eine logarithmische Art und Weise wahr, um eine große Bandbreite an Tonhöhen differenzieren zu können. Aus diesem Grund entspricht ein Ton mit der doppelten Frequenz dem selben Ton eine Oktave höher. Die Einheit für Frequenzen ist Hz und entspricht $\frac{1}{s}$, drückt also aus, wie oft eine Welle in einer Sekunde schwingt.

Amplitude

Die Lautstärke einer Klangwelle korrespondiert mit ihrer **Amplitude** und wird in der Regel in Bel bzw. üblicherweise ein Zehntel Bel, also Dezibel (dB) angegeben. Bel ist eine relative Einheit, welche genutzt wird, um das Energieverhältnis zweier Signale zu vergleichen.

Bei Schallwellen wird üblicherweise die Amplitude mit der kleinsten hörbaren Luftdruckänderung (20 μPa) verglichen. Dadurch wird aus der relativen Einheit (dezi)Bel die absolute Einheit dB_{SPL} (SPL steht für Sound Pressure Level), welche umgangssprachlich oft fälschlicherweise als dB bezeichnet wird.

Da das menschliche Gehör Lautstärke auf eine logarithmische Art und Weise wahrnimmt, ist auch die Bel-Skala eine logarithmische. So bedeutet eine Steigerung der Lautstärke um 20 dB eine Verzehnfachung der Amplitude, also des Energieniveaus der Welle (siehe Abbildung 2.1).

Auch nimmt der Mensch gewisse Frequenzen lauter wahr als andere, Frequenzen außerhalb des hörbaren Bereichs können beispielsweise gar nicht wahrgenommen werden. Deshalb kann eine Gewichtungsfunktion, genannt A-weighting, auf den Lautstärkewert angewendet werden. Dieser **bewertete Schalldruckpegel** wird als dB_A bezeichnet und dient zum Ausdrücken der subjektiv empfundenen Lautstärke (siehe Abbildung 2.2).

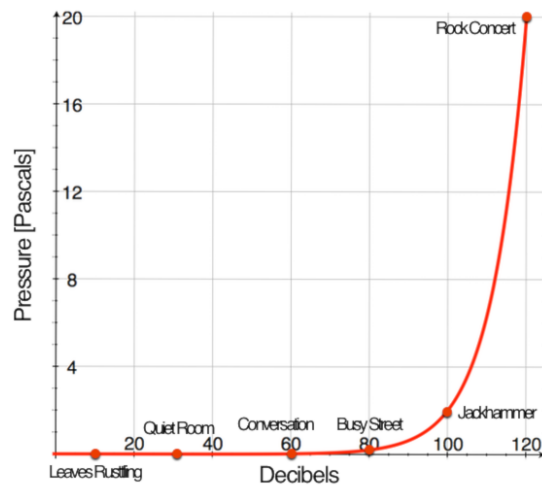


Abbildung 2.1.: Dezibelskala mit häufigen Lautstärken als Referenzpunkte und zugehörigen Luftdrucksänderungen in Pascal [4]

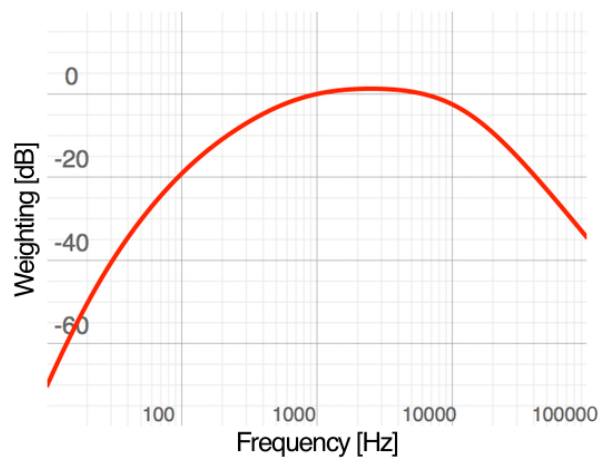


Abbildung 2.2.: Gewichtungsfunktion; Hörbare Frequenzen auf der Abszisse, Hörbarkeit durch das menschliche Gehör auf der Ordinate [4]

Wellenform

Klangwellen können verschiedene Formen besitzen, die grundlegende Form ist dabei eine **Sinuswelle**. Das menschliche Ohr empfindet eine sinusförmige Schallwelle als „rein“, da sie eine einzelne Frequenz ohne **Obertöne** repräsentiert. Weitere einfache Formen sind Rechteckwellen, Sägezahnwellen und Dreieckwellen. Im Gegensatz zum Sinus besitzen diese Wellenformen viele Obertöne, welche dem Klang Farbe verleihen. Teilt die Frequenz eines solchen Obertons die Frequenz des Grundtones ganzzahlig, wird er als **harmonisch**, also wohlklingend empfunden [23].

Da Wellenformen wie Dreieck-, Rechteck- oder Sägezahnwellen viele Obertöne besitzen [27], eignen sie sich besonders gut als Grundtöne für die subtraktive Klangsynthese.

2.1.2. Klangerzeugung

Die für die Klangsynthese benötigten grundlegenden Klangwellen können aus verschiedensten Quellen stammen. Die häufigste davon ist wohl ein **Oszillator**, welcher durchgehende Klangwellen mit einer einfachen Wellenform, wie zum Beispiel einem Sinus oder einer Rechteckwelle generiert. In Abschnitt 3.6.1 werden Aufbau und Design eines solchen Oszillators beschrieben.

Des weiteren kann ein breites Spektrum von elektronischen Musikinstrumenten und Klangquellen wie E-Gitarren, Thereminen, Radios und Kassettenspielern die zu modifizierenden Klangwellen für einen Synthesizer bereitstellen.

2.1.3. Subtraktive Klangsintese

Das Prinzip der subtraktiven Klangsintese besteht darin, Grundtöne mit vielen Obertönen zu filtern, um Töne mit einer gewünschten Klangfarbe zu erzeugen. Durch einen **Filter** wird die Amplitude von Teilwellen unter einer bestimmten Frequenz (=> high-pass Filter) oder über einer bestimmten Frequenz (=> low-pass Filter) verringert, wodurch zum Beispiel unangenehme hohe Obertöne gefiltert werden können.

Nach einem solchen Filter wird oft ein **VCA** (siehe Abschnitt 3.6.4) geschaltet, welcher die Amplitude des Eingangssignals proportional zur angelegten Kontrollspannung (siehe Abschnitt 2.3.1) skaliert. Diese Kontrollspannung kann beispielsweise durch einen Oszillator mit niedriger Frequenz, englisch: Low Frequency Oscillator (**LFO**) (siehe Abschnitt 3.6.5) oder Hüllkurvengenerator (siehe Abschnitt 3.6.6) bereitgestellt werden. Durch einen **VCA** kann einem durchgehend gleich lauten Klang Dynamik und Rhythmus verliehen werden, indem seine Lautstärke mit dem Verlauf der Zeit geändert wird.

Die meisten analogen Synthesizer basieren auf subtraktiver Klangsintese. Üblicherweise wird dabei ein Grundton, meist aus einem Oszillator, über einen **VCA** geschaltet, welcher durch einen Hüllkurvengenerator angesteuert wird. Dieser Hüllkurvengenerator wird üblicherweise durch einen Sequenzer oder eine Tastatur angesteuert. Eine Abwandlung dieser grundlegenden **Signalverarbeitungskette** ist in den meisten kommerziell erhältlichen Synthesizersystemen fest verkabelt.

2.1.4. Additive Klangsintese

Nach Fourier kann jegliche Art von Wellenform durch eine Serie von Sinuswellen ausgedrückt werden. Das Prinzip der additiven Klangsintese besteht somit darin, eine Vielzahl von Sinuswellen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen zu kombinieren [3] (beispielsweise durch einen Mixer, siehe Abschnitt 3.6.3), um Klänge mit jeder erdenklichen Klangfarbe zu erzeugen.

Idealerweise wird jede grundlegende Sinuswelle durch eine separate Hüllkurve moduliert, um einen Klang mit sich laufend verändernder Klangfarbe zu erzeugen [21]. Da dies mit einer steigenden Anzahl an grundlegenden Sinuswellen eine technische Herausforderung darstellt, sind additive Synthesizer meist digital ausgeführt, ein analoges Beispiel für einen additiven Synthesizer wäre eine **Hammond-Orgel** [5].

2.1.5. Vocoder

Ein Vocoder basiert auf dem Prinzip, ein Signal (meist eine Stimme) mittels mehrerer Band-Pass Filter in seine Frequenzbestandteile aufzuteilen. Anschließend wird dieses Frequenzspektrum auf der Basis von weißem Rauschen (siehe Abschnitt 3.6.2) wieder aufgebaut, um einen als gesprochenes Wort zu erkennenden Klang zu erzeugen. Ein Vocoder arbeitet somit sowohl mit subtraktiver Soundsynthese bei der Analyse des Frequenzspektrums als auch mit additiver Soundsynthese beim Wiederaussetzen des analysierten Klangs.

2.2. Geschichte

Bereits im frühen 20. Jahrhundert wurden elektronische Schaltkreise benutzt, um Klänge zu erzeugen. Damals noch mit Vakuumröhren statt Transistoren hergestellt, stellt das **Theremin** eines der ältesten heute noch verwendeten elektronischen Musikinstrumente dar [14].

Der erste vollwertige elektronische Synthesizer, welcher auch als solcher bezeichnet wurde, war der **RCA Music Synthesizer**, eine raumhohe Maschine, welche als Gemeinschaftsprojekt zwischen den amerikanischen Universitäten von Princeton und Columbia entstanden war. Statt mit einer Klaviertastatur spielte beziehungsweise programmierte man diesen Synthesizer erst mittels Lochkarten und konnte dann gewisse Aspekte des Klangs dynamisch - also während das Stück spielte - ändern [2].

Das Konzept eines modularen Synthesizers und damit auch das Konzept der Kontrollspannung wurde erstmals von Robert Moog in seiner Arbeit mit dem Titel „VOLTAGE-CONTROLLED ELECTRONIC MUSIC MODULES“ dokumentiert [20]. Der auf diesen Prinzipien basierende **Moog Modular Synthesizer** führte viele heute noch aktuelle Standards ein, wie zum Beispiel die Kontrollspannungsarten Trigger und 1 V pro Oktave, auf welche in Abschnitt 2.3.1 näher eingegangen wird. Spätestens mit dem 1968 erschienenen Album „Switched-On Bach“ von Wendy Carlos wurde der Synthesizer als vollwertiges Instrument im Mainstream akzeptiert [18] [11].

Während die Synthesizer von Moog mit dem Prinzip der subtraktiven Klangsynthese arbeiteten, wurden zur gleichen Zeit - auf der anderen Seite Amerikas - erste Synthesizer mit additiver Klangsynthese hergestellt. Die von **Donald Buchla** hergestellten Synthesizer boten dem Benutzer beinahe grenzenlose Freiheit über die Farbe der erzeugten Klänge. Dennoch blieb die subtraktive Klangsynthese wohl aufgrund größerer Intuitivität und besserer technischer Umsetzbarkeit das vorherrschende Prinzip [10].

Obwohl Moog als Vater der modularen Klangsynthese gilt, ist eines der bekanntesten und beliebtesten Produkte der Firma Moog der fix verkabelte **Minimoog**. Dieser als Live-Instrument gedachte Synthesizer führte ein Lautstärkerad und ein Tonhöhenveränderungsrads ein, mit welchem Töne ähnlich wie beim Saitenziehen bei einer Gitarre verändert werden können [11].

Die 1970er und 1980er Jahre waren vor allem von digitalen Synthesizern geprägt. Das von der Firma „New England Digital“ hergestellte Synclavier I war der erste Synthesizer, welcher Frequenzmodulation, eine Form der additiven Klangsynthese anbot. Der von Yamaha hergestellte **DX7** brachte dieses Konzept in den Mainstream. Die glockenartigen Klänge, die charakteristisch für diese Art der Klangsynthese sind, prägten den Großteil der 80er Jahre und sind auch heute noch häufig in Pop und Schlager zu finden [18].

Das Konzept der modularen Synthesizer schien beinahe vergessen, bis im Jahre 1996 Dieter Döpfer das modulare Synthesizersystem **A-100** entwarf. Die quelloffene Natur dieses Systems ermöglichte es anderen Herstellern wie auch den Firmen Moog, Roland und Behringer, kompatible Module herzustellen, wodurch ein De-facto-Standard, heute bekannt als Eurorack, entstand. Dieser Standard führte zu einer Renaissance der modularen Synthesizer, heutzutage basieren fast alle modularen Synthesizer auf dem Eurorack-Format.

Die Dokumentation für diesen Synthesizer, den A-100, stellt auf direkte oder indirekte Weise die Grundlage für die meisten Aspekte des in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Systems dar.

2.3. Das Eurorack-Format

Der 1996 von der Doepfer Musikelektronik GmbH veröffentlichte A-100 Synthesizer benutzte für viele Zwecke bereits etablierte Maße und Werte. Beispielsweise werden die durch den Moog Modular Synthesizer popularisierten Kontrollspannungsarten benutzt. Auch die physischen Dimensionen der Module basierten auf einem bereits vorhandenen Standard, dem Eurocard-Standard (IEEE 1101.1). Der Begriff Eurorack stammt wohl vom Namen dieses Standards ab. Bald nach der Veröffentlichung des A-100 wurden kompatible Module von anderen Herstellern veröffentlicht, wodurch das Eurorack-Format zum De-facto-Standard für modulare Synthesizer wurde. Heute gibt es tausende von Eurorack-Modulen, hergestellt von bekannten Firmen wie Moog, Roland, Behringer und auf Eurorack spezialisierten Herstellern wie Make Noise und Intellijel. Des Weiteren gibt es eine lebendige DIY-Szene mit vielen öffentlichen und quelloffenen Designs, Anleitungen, Schematics und vorgefertigten Kits zum Zusammenbauen.

2.3.1. Kontrollspannung

Kontrollspannung, im englischen als Control Voltage oder **CV** bezeichnet, wird benutzt, wenn bestimmte Parameter eines Moduls nicht nur vom Benutzer (etwa durch Knöpfe, Potentiometer, etc.), sondern auch durch andere Module ansteuerbar sein sollen. So kann beispielsweise die Frequenz eines **VCO**, der Cutoff eines spannungskontrollierten Filters, im englischen Voltage Controlled Filter (**VCF**), oder Attack- und Releaselänge einer Hüllkurve mithilfe von Kontrollspannung festgelegt werden. Kontrollspannungen können aus verschiedensten Quellen stammen, dabei gibt es viele Module, welche auf das Generieren von Kontrollspannungen spezialisiert sind, beispielsweise Hüllkurvengeneratoren und **LFOs**. Doch auch klassische Audiosignale können als Kontrollspannung benutzt werden.

Besonders für modulare Synthesizer, wie es ein Eurorack-System ist, hat dieses Konzept einen hohen Stellenwert, da bei solchen Systemen Audiosignale und Kontrollspannungen nicht fix verkabelt sind, sondern vom Benutzer flexibel mit 3.5 mm mono Klinkensteckern, sogenannten **Patchkabeln**, geschaltet werden können. Der Unterschied zwischen Audiosignalen und Kontrollspannung liegt rein im Verwendungszweck, oft können auch Audiosignale als Kontrollspannung dienen. Es gibt verschiedene Arten von Kontrollspannungen, welche sich ebenfalls primär durch ihren Verwendungszweck unterscheiden:

Trigger

Triggersignale sind steigende Flanken, meist direkt gefolgt von einer fallenden Flanke, zwischen 0 V und 5 V. Ihr Zweck ist es, Prozesse, wie etwa das Fortschreiten eines Sequencers, auszulösen.

Gate

Ähnlich wie ein Triggersignal ist ein Gate eine steigende Flanke gefolgt von einer fallenden Flanke zwischen 0 V und 5 V. Im Unterschied zum Trigger ist jedoch der zeitliche Abstand zwischen steigender und fallender Flanke oft beträchtlich länger und spielt eine wichtige Rolle. Gate-Signale werden oft verwendet, um den Zustand einer Keyboardtaste zu beschreiben.

Hüllkurve

Eine Hüllkurve ist eine Art von Kontrollspannung bei welcher die genauen Spannungswerte im Verlauf der Zeit eine wichtige Rolle spielen. Oft werden Hüllkurven zum Ansteuern von [VCAs](#) oder spannungskontrollierter Filter, englisch: Voltage Controlled Filters ([VCFs](#)) benutzt. Eine beliebte Form einer Hüllkurve ist Attack, Decay, Sustain, Release ([ADSR](#)) (siehe Abbildung [2.3](#)), diese beschreibt den Verlauf der Lautstärke eines Tones beim Drücken einer Taste [\[26\]](#).

1. **Attack:** Der “Attack“ Wert gibt an, wie lange der Ton nach dem Drücken der Taste braucht, um auf seine maximale Lautstärke anzuschwellen.
2. **Decay:** Nachdem der Ton seine maximale Lautstärke erreicht hat, schwillt er auf eine niedrigere Lautstärke ab. Der Decay-Wert, gibt an, wie lange der Ton benötigt, um diese niedrigere Lautstärke zu erreichen.
3. **Sustain:** Im Unterschied zu den anderen Parametern ist der Sustain-Wert eine Amplitude anstatt einer Zeit. Der eingestellte Wert gibt an, auf welche Lautstärke das Signal nach dem Ablauf der Decay-Zeit abschwilt. Die eingestellte Lautstärke ist konstant, solange die Taste gedrückt bleibt.
4. **Release:** Nach dem Loslassen der Taste benötigt der Ton eine gewisse Zeit, um vollständig abzuschwellen. Diese Zeit wird über den Release-Parameter eingestellt.

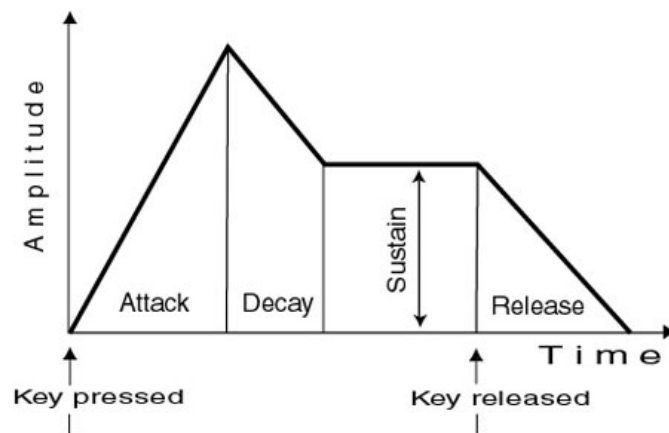


Abbildung 2.3.: Der zeitliche Verlauf einer ADSR Hüllkurve; die Amplitudenwerte auf der Ordinate entsprechen bei einem Hüllkurvengenerator den ausgegebenen Kontrollspannungswerten [26]

Volt per Octave

Die meisten VCOs folgen der 1964 von Moog eingeführten Konvention, dass ihre Frequenz auf eine logarithmische Art und Weise von der Kontrollspannung abhängt [20]. Dabei resultiert die Zunahme der Kontrollspannung um 1 V in der Verdoppelung der Frequenz des generierten Signals (1 Oktave).

Audio

Audiosignale sind Spannungen, die meist zwischen -0.5 V und 0.5 V schwingen. Sie können an einen Verstärker oder Lautsprecher angelegt werden, um Schall zu erzeugen oder zur Weiterverarbeitung von einem Modul zum anderen geschickt und sogar als Kontrollspannung verwendet werden.

2.3.2. Gehäuse

Das Gehäuse muss so dimensioniert sein, dass es Eurorack-Module beherbergen kann. Diese basieren, wie bereits erwähnt, auf dem Eurocard Standard. Wichtig ist dabei vor allem der vertikale Abstand der Schienen, auf welchen die Module befestigt werden. Dieser misst laut der System A100 Anleitung von Doepfer 3 Höheneinheiten (HE) [12]. 1 HE beträgt dabei 44.45 mm oder $1\frac{3}{4}$ Zoll. Die Breite der Module beträgt ein Vielfaches von 5.08 mm, beziehungsweise 0.2 Zoll. Manche Gehäuse, wie beispielsweise die von der Firma Intellijel können auch Module beherbergen, die nur eine Höheneinheit hoch sind.

3. Praktische Umsetzung

3.1. Spannungsquelle

Eurorack-Synthesizer arbeiten mit Spannungen von 24 V peak to peak, benötigen also eine Spannungsquelle, welche -12 V bis 12 V bereitstellen kann. Manche Module benötigen außerdem eine separate 5 V Leitung, um zum Beispiel Microcontroller zu betreiben. Eine beliebte Wahl in der DIY-Szene ist die Mean Well RT65B PSU, da sie sowohl $\pm 12\text{ V}$ als auch 5 V mit einer Stromstärke/Leistung bereitstellt, welche ausreicht um ein Anfängersystem zu versorgen und verhältnismäßig günstig ist [1].

3.2. Spannungsverteilung

Die Module werden über ein 10 Pin IDC-Flachbandkabel mit Strom versorgt. Dabei sind die mittleren 6 Pins durchverbunden und geerdet. Die äußeren vier Pins sind paarweise verbunden und liefern jeweils 12 V und -12 V . Der PIN, welcher auf -12 V liegt, ist üblicherweise rot gekennzeichnet.

3.3. Gehäuse

Das Gehäuse ist aus Holz gefertigt, die Module werden auf Aluminiumschienen befestigt.

3.4. Transistoren abgleichen

Manchmal werden Transistoren benötigt, welche einen möglichst gleichen internen Verstärkungsfaktor besitzen. Bereits aufeinander abgestimmte Transistorpaare sind zwar im Handel erhältlich, jedoch sind diese oft kostspielig. Deshalb ist es üblich, das Abgleichen von Transistoren selbst vorzunehmen. Baut man den zu messenden Transistor in Schaltkreis 3.1 ein, und legt bei V_{CC} eine Spannung an, kann man seinen internen Verstärkungsfaktor herausfinden, indem man das Potential zwischen Punkt A (beim Kollektor des Transistors) und der Masse misst [19]:

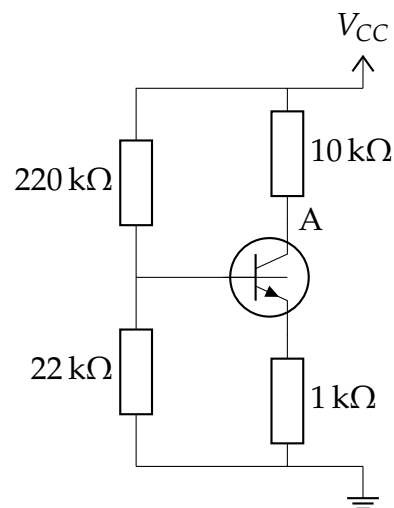


Abbildung 3.1.: Schaltkreis zum Abgleichen des internen Verstärkungsfaktors von Transistoren

Diese Transistorenpaare sollten auf der Platine in unmittelbarer Nähe zueinander sein, da auch die Temperatur einen Einfluss auf die Eigenschaften eines Transistors hat.

3.5. Vactrols

Ein Vactrol, auf Deutsch oft Optokoppler, ist ein simpler, jedoch etwas ungenauer, spannungskontrollierbarer Widerstand, welcher aus einer Leuchtdiode und einem lichtabhängigen Widerstand (**LDR**) besteht [24]. Er kann benutzt werden, um als variable Widerstände geschaltene Potentiometer zu ersetzen und somit den zugehörigen Parameter spannungskontrollierbar zu machen. Der am Vactrol entstehende Widerstand ist näherungsweise invers proportional zur angelegten Spannung.

Während bereits gefertigte Vactrols im Handel erhältlich sind, ist es vor allem in DIY Kreisen üblich, sie selbst herzustellen. Dabei wird eine Leuchtdiode, englisch: Light Emitting Diode (**LED**), gemeinsam mit einem **LDR** auf eine Art und Weise in ein lichtundurchlässiges Gehäuse (beispielsweise ein Schrumpfschlauch) gebaut, dass der **LDR** von der **LED** beleuchtet wird.

3.6. Module

Im Folgenden werden die Module, welche den Synthesizer ausmachen, beschrieben. Jedes dieser Module besteht aus einem Panel, das als User Interface dient, und einer Platine, welche mit den elektronischen Komponenten bestückt ist. Panels besitzen mindestens eine Audiobuchse um Kontrollspannung (**CV**), Audio, Triggersignale und andere Arten von Spannungssignalen auszugeben, eine beliebige Anzahl an Audioeingängen für Kontrollspannungen, Audio-Inputs und ähnlichem und weitere Interfacekomponenten wie beispielsweise Potentiometer, Schalter, Knöpfe und **LEDs**.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die elektronischen Komponenten zu verlöten. Beispiele dafür sind:

- Breadboards: vor allem geeignet zum Erstellen von Prototypen
- Through Hole Technology (THT) Platinen: eine schnelle Methode, um eine einzelne Platine zu fertigen
- Selbst geätzte oder vorgefertigte Platinen: eine Methode mit relativ geringem Fehlerpotential; ideal wenn eine größere Anzahl gleichartiger Platinen gefertigt werden soll, beispielsweise für DIY-Kits
- „Deadbug“ Methode: Elektronische Komponenten werden ohne Platine „point to point“ miteinander verlötet; resultiert meist in Spaghetti-ähnlichen Strukturen, bei gekonnter Ausführung können jedoch sehr ästhetische Schaltkreise entstehen.

Die elektronischen Komponenten unserer Module sind auf THT Platinen gelötet. Diese Platine wird im rechten Winkel in der Mitte des Panels befestigt (siehe Abbildung 3.2). Interface-Komponenten, welche vom Benutzerpanel aus zugänglich sein sollen, werden über längere Kabel und Schraubklemmen auf der Platine verbunden.

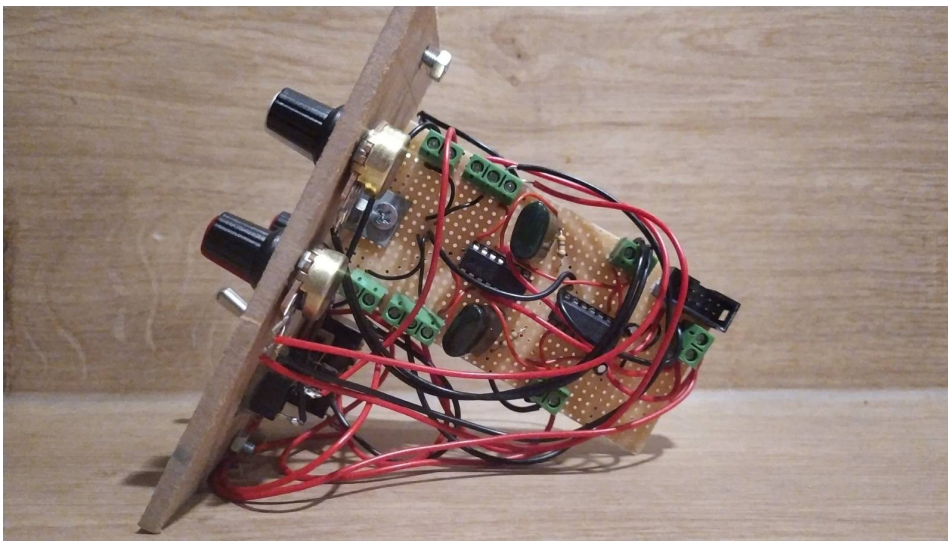


Abbildung 3.2.: Seitenansicht eines Moduls

Als Material für Panels sind Bleche, dünne Holz- oder Plastikplatten oder ähnliches geeignet. Zu bedenken ist dabei:

- Dicke des Materials: Zum Bestücken sollte eine bestimmte Dicke nicht überschritten werden (abhängig von den gewählten Potentiometern, Audiobuchsen, Schaltern und Knöpfen)
- Bearbeitbarkeit: Es müssen Löcher für Interfacekomponenten gebohrt oder gestanzt werden, und das Material muss zugeschnitten werden
- Beschriftbarkeit: Für einfachere Zugänglichkeit und für bessere Ästhetik sollten die Panels bemalt und beschriftet werden

Wir benutzen eine dünne, schwarz lackierte Holzplatte als Material für unsere Panels. Diese werden mit transparenter Folie beklebt, welche mit weißem Permanentmarker beschriftet werden kann.

3.6.1. Oszillator x2

Dieses Modul ist ein simples signalerzeugendes Modul, welches zwei voneinander unabhängige Rechteckswellen (siehe Abbildung 3.3) im hörbaren Bereich generiert.

Spezifikationen

Oszillator 1:

- Spannungsbereich: -10 V bis 10 V
- Frequenzbereich: 40 Hz bis 2000 Hz

Oszillator 2:

- Spannungsbereich: -10 V bis 10 V
- Frequenzbereich: 25 Hz bis 2000 Hz

Elektronik

Als Grundlage dient ein einfacher „Resistor-Capacitor“ Schwingkreis, welcher einen Schmitt-Trigger nutzt. Das resultierende Signal wird durch einen Spannungsfolger gepuffert, da sonst die Oszillation zusammenbricht. Danach wird das Signal AC gekoppelt, um das positive Offset der Oszillation zu entfernen und ein weiteres Mal gepuffert. Darauf folgt ein einfacher variabler Spannungsteiler als Dämpfungsglied, um die Amplitude regulieren zu können (siehe Abbildung 3.5) [16].

Benutzung

Wie auf Abbildung 3.4 zu erkennen ist, ist das Panel in einen linken und rechten Oszillator aufgeteilt. Alle Elemente auf einer Seite gehören zu jeweils einem Oszillator. Die oberen beiden Potentiometer dienen zur Steuerung der Frequenz (siehe Abschnitt 2.1.1), die unteren beiden dienen zur Steuerung der Amplitude (siehe Abschnitt 2.1.1) des Signals. Die Audiobuchsen dienen als Output. Der Schalter links oben aktiviert das Modul, die Oszillatoren sind nicht separat voneinander an- und ausschaltbar.

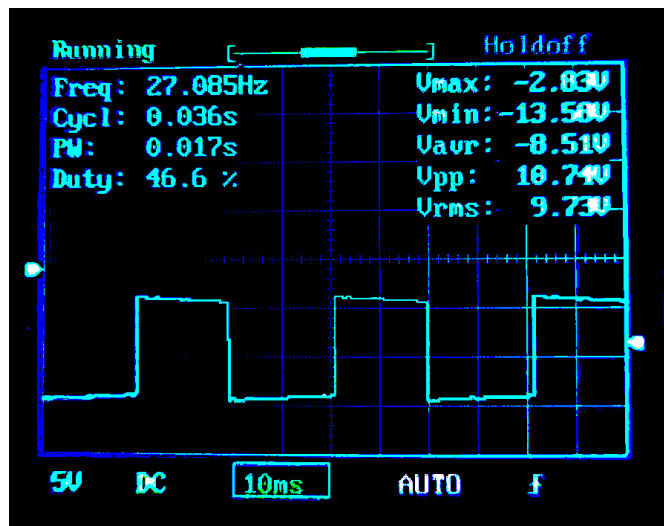


Abbildung 3.3.: Spannungsverlauf eines Oszillators



Abbildung 3.4.: Deckplatte unseres Oszillator-Moduls

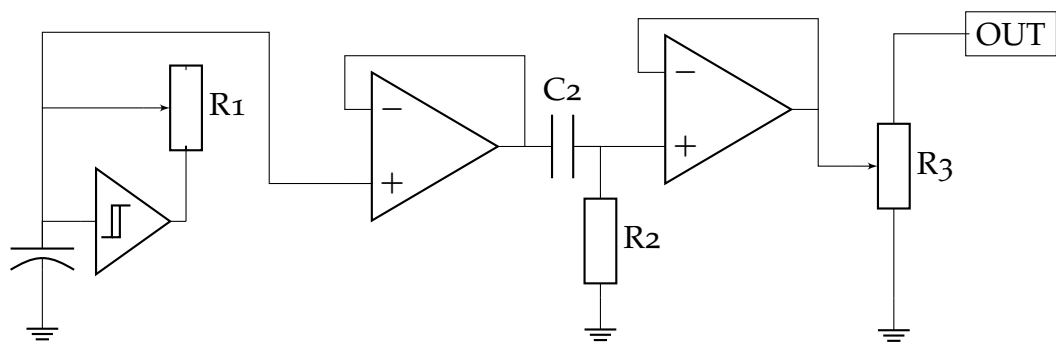


Abbildung 3.5.: Schaltkreis von einem einzelnen Oszillator

3.6.2. White Noise

Noise beziehungsweise Rauschen ist eine Art von Spannungssignal, das auf eine nicht oder schwer vorherzusehende Art und Weise schwingt. Dabei entsteht ein Klang mit einer Vielzahl an Teilfrequenzen. Eine häufige Art von Rauschen ist weißes Rauschen, bei welchem in einem kleinen Zeitraum alle Frequenzen in einem gegebenen Frequenzspektrum mit annähernd gleicher Amplitude vorhanden sind. Der Name entspringt einer Analogie zu sichtbarem Licht, beispielsweise deckt weißes Licht alle Frequenzen des sichtbaren Lichtspektrums in gleicher Intensität ab. Eine weitere häufige Art von Rauschen ist rosa Rauschen, bei welchem alle Frequenzen des hörbaren Spektrums abgedeckt werden, jedoch niedrigere Frequenzen in höherer Amplitude vorhanden sind [25].

Spezifikationen

Das Noise-Modul stellt weißes Rauschen in einem Bereich von -3 V bis 3 V bereit.

Elektronik

Als Vorlage für das Noise-Modul dient das „Super simple White Noise Module“ von Kristian Blåsol [8]. Dieser Schaltkreis basiert darauf, den Kollektor eines Transistors nicht zu verbinden (siehe Abbildung 3.7 => [n.c]). Dadurch entsteht ein sogenannter Lawineneffekt, welcher üblicherweise ungewünscht ist, in diesem Fall jedoch die Grundlage für unser Rausch-Signal bildet.

Benutzung

Weißes Rauschen kann für eine große Anzahl von Zwecken verwendet werden, beispielsweise als Kontrollspannung für einen **VCA** oder als Audiosignal. Weißes Rauschen kann dafür benutzt werden, Rauschen anderer „Farben“ zu erzeugen. Beispielsweise kann rosa Rauschen erzeugt werden, indem dem White Noise Modul ein Tiefpassfilter nachgeschaltet wird.



Abbildung 3.6.: Deckplatte unseres Noise-Moduls

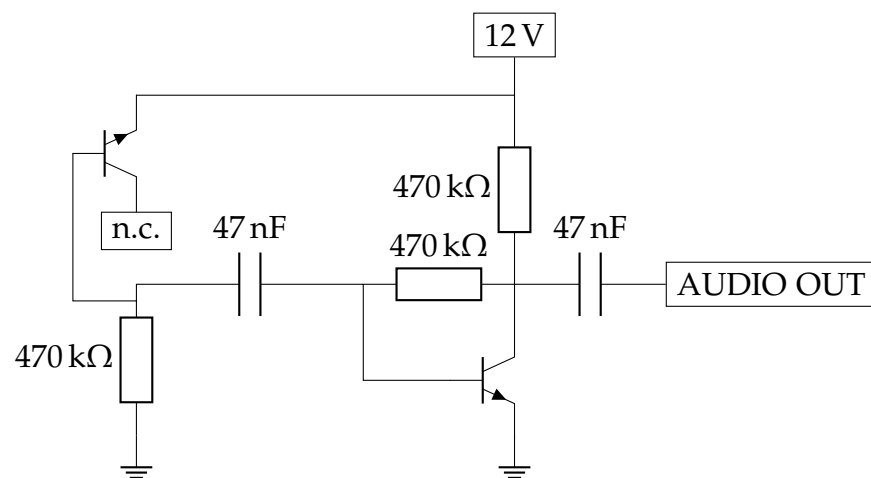


Abbildung 3.7.: Schaltkreis zum Generieren eines Rausch-Signals.

3.6.3. Mixer

Das Mixer Modul dient dazu, Signale aus mehreren Quellen zu einem einzigen zusammenzuführen. Hierbei kann von jedem Eingang die Lautstärke reguliert werden. Es wird zwischen aktiven und passiven Mixern unterschieden, wobei ein aktiver Mixer die Amplitude der Eingänge nicht nur verkleinern, sondern auch vergrößern kann. Für unseren Synthesizer haben wir uns für eine passive Variante mit drei Eingängen, einem Ausgang und einem invertierenden Ausgang entschieden.

Spezifikationen

Sowohl beim Output als auch bei den Inputs ist der volle Spannungsbereich von -12 V bis 12 V möglich.

Elektronik

Als Vorlage dient der "Simple Mixer" von Kristian Blåsol [7] (siehe Abbildung 3.8). Bei diesem Design führt jeder Eingang durch ein Potentiometer, welches als Spannungsteiler geschaltet ist. Dadurch kann die Lautstärke der Kanäle unabhängig voneinander reguliert werden. Die danach zusammengeführten Signale werden zunächst mithilfe eines Operationsverstärker invertiert und gepuffert, an den invertierenden Ausgang geführt und ein weiteres mal invertiert um einen nicht invertierenden, gepufferten Ausgang zu erhalten.

Benutzung

Es können bis zu drei zu mixende Signale an die oberen Audiobuchsen angeschlossen werden, die drei Potentiometer dienen zum Verringern der Lautstärke des jeweiligen Eingangs. Die unteren beiden Audiobuchsen liefern das Ausgangssignal, wobei der invertierende Ausgang rechts ist (siehe Abbildung 3.9). Als einfachen Patch könnte man die beiden Signale des Oszillator-Moduls (siehe Abschnitt 3.6.1) zusammenführen, um beide Oszillatoren auf einmal zu hören.

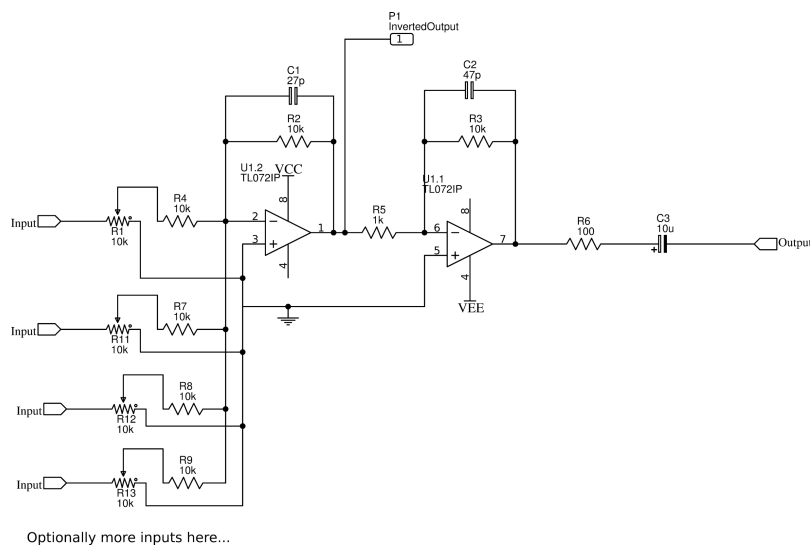


Abbildung 3.8.: Schaltkreis für einen passiven Mixer; Quelle: [7]



Abbildung 3.9.: Deckplatte unseres Mixer-Moduls

3.6.4. Spannungskontrollierter Verstärker

Ein spannungskontrollierter Verstärker, englisch: Voltage Controlled Amplifier (**VCA**) verstärkt ein angelegtes Signal um einen Faktor, welcher proportional zur angelegten Kontrollspannung ist. **VCAs** sind essentiell, um den erzeugten Klängen einen Rhythmus zu verleihen, da ohne **VCA** keine dynamische Lautstärkeänderung möglich ist.

Elektronik

Es gibt eine Vielzahl von möglichen Ansätzen für die technische Umsetzung eines **VCA**. Die simpelste Möglichkeit ist es wohl, eine Vactrol (siehe Abschnitt 3.5) zu benutzen, da diese mit nur minimaler Beschaltung zu einem **VCA** umgewandelt werden kann (siehe Abbildung 3.10) [9]. Jede Art von **VCA** hat einen gewissen Eigenklang, wobei ein Vactrol-VCA eine sehr „glatte“ Dynamik erzeugt: Abrupte Spannungsänderungen in der Kontrollspannung werden geglättet, wodurch das ausgehende Signal nur eine stetige Änderung in der Lautstärke erfährt.

Ein weiterer Ansatz nutzt den linearen Reaktionsbereich zweier NPN-Transistoren mit möglichst gleichem Verstärkungsfaktor (siehe Abschnitt 3.4), wobei diese so beschalten werden, dass auf einem der Transistoren genau das gegenteilige Signal, allerdings mit dem gleichen positiven Offset erzeugt wird. Diese zwei Signale werden dann von einem Operationsverstärker voneinander abgezogen, wodurch der positive Offset eliminiert wird und das modulierte Signal übrig bleibt. Eine Vielzahl von selbstregelnden Rückkopplungsschleifen trägt dazu bei, dass diese Art von **VCA** besonders stabil und schnell auf Änderungen in der angelegten Kontrollspannung reagieren kann. Ein Nachteil eines solchen Schaltkreises ist die verhältnismäßig hohe Komplexität und die Fehleranfälligkeit bei schlecht gewählten Bauteilen.

Es wurden zwei Versuche unternommen, diese Art von Transistor-basierten VCA [17] zu bauen, leider erzielte keine der beiden Versionen zufriedenstellende Ergebnisse. Dies könnte auf folgende Fehlerquellen zurückgeführt werden:

- Fehler beim Abgleichen der Transistoren (siehe Abschnitt 3.4):
 - Aufgrund von Ungenauigkeiten der Widerstände im Messschaltkreis
 - Unzureichend genaues Messgerät
- Zu hohe Toleranz der im Schaltkreis des Moduls verwendeten Widerstände
- Fragilität des Schaltkreises und der zugrundeliegenden Effekte

Letztendlich wurde sich für eine simple, jedoch robustere Schaltung entschieden. Die Basis für diese bildet ein JFET Transistor, welcher mit nur minimaler Beschaltung (siehe Abbildung 3.11) ein VCA-ähnliches Verhalten erzeugen kann [6].

Benutzung

VCAs können durch eine Vielzahl an Modulen angesteuert werden. Am häufigsten ist wohl eine Art von Hüllkurvengenerator, um die Lautstärkeänderung bei einem Tastenanschlag zu simulieren. Ein einfacheres Beispiel wäre eine Rechteckswelle von einem LFO, um eine Art Stakkato zu erzeugen, oder ein langsam schwingender Sinus für eine Art Wobbel-Effekt.

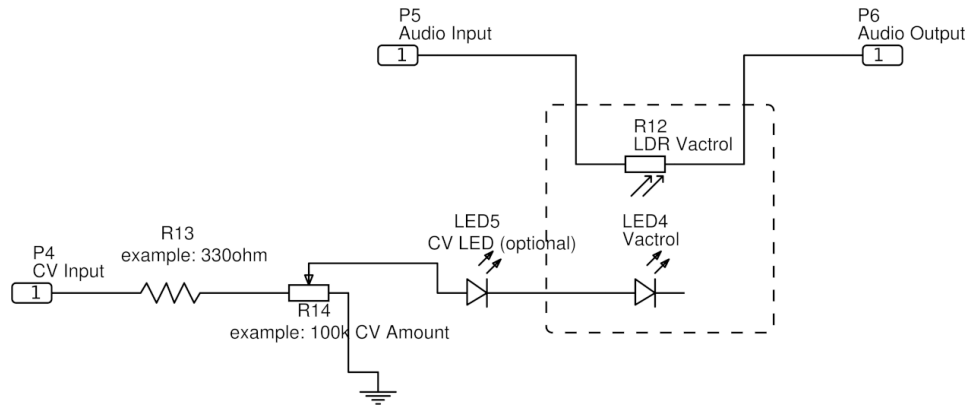


Abbildung 3.10.: Schaltkreis für einen Vactrol-VCA [9]

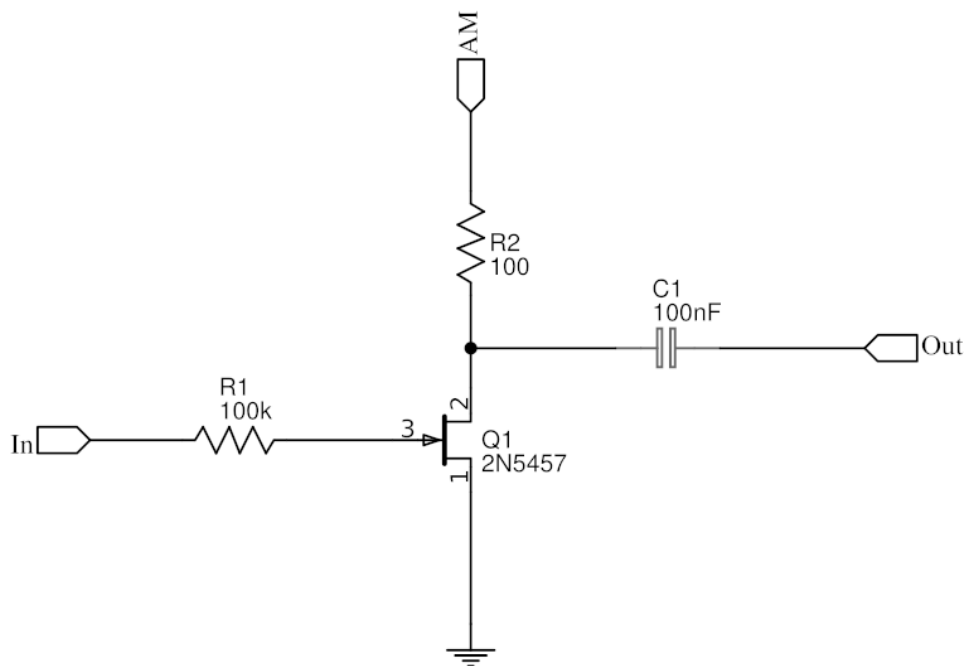


Abbildung 3.11.: Schaltkreis für eine JFET-VCA Annäherung

3.6.5. Low Frequency Oscillator

Ein **LFO** generiert ein Signal, welches in einem niedrigen Frequenzbereich oszilliert. Wir benutzen als Vorlage für unseren **LFO** den „Simple LFO V1.1“ von David Haillant [15]. Dieses Modul erzeugt langsam oszillierende Spannungen in Form einer Rechteckwelle und einer Dreieckwelle.

Spezifikationen

Der Oszillationsbereich des konstruierten **LFOs** liegt bei 0.1 Hz bis 10 Hz. Das gewählte Design erzeugt jeweils einen Rechteck- und Dreiecksausgang, die Spannungsbereiche liegen jeweils bei -10 V bis 10 V . Da beide Signale aus dem selben Schwingkreis stammen, kann die Frequenz nicht separat eingestellt werden, die Amplituden der beiden Signale sind jedoch individuell einstellbar. Die generierten Wellenformen und ihre Phasenverschiebung zueinander sind zu sehen auf Abbildung 3.13.

Elektronik

Wir verzichten bei unserer Ausführung des Moduls auf die vorgesehene Leuchtdiode, welche einen visuellen Indikator für die Frequenz des Ausgangssignals bieten würde. Dadurch wird am verwendeten TL074 ein Operationsverstärker frei. Dieser wird als zweiter Puffer (siehe Abbildung 3.15) benutzt, um beide Wellenformen parallel ausgeben zu können. Abbildung 3.14 zeigt den oszillierenden Kern der Schaltung. Die Punkte, an welchen ein gepufferter Ausgang geschaltet wird, sind mit den Bezeichnungen „LFO_Triangle“ und „LFO_Square“ gekennzeichnet.

Benutzung

LFOs können für viele verschiedene Zwecke genutzt werden, der simpelste davon ist, das erzeugte Signal direkt als Audio auszugeben. Häufiger wird die Spannung eines **LFOs** als Kontrollspannung genutzt, beispielsweise als Trigger für einen Hüllkurvengenerator oder zum Ansteuern eines **VCA**s, um eine Funktion ähnlich eines Arpeggiators zu erfüllen.

Der mittig oben platzierte Drehknopf steuert die Frequenz der beiden Signale, die zwei Drehknöpfe und Buchsen dienen zur Lautstärkeregelung und Signalausgabe.



Abbildung 3.12.: Deckplatte unseres LFO-Moduls

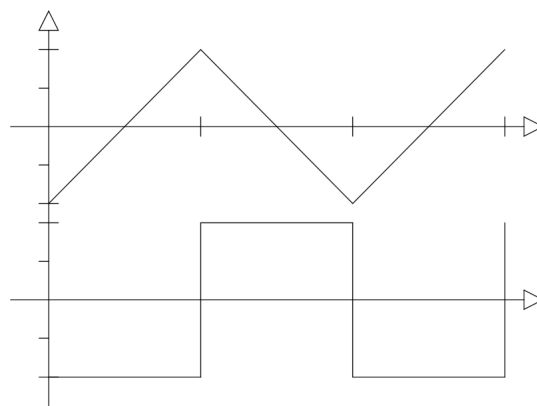


Abbildung 3.13.: Die beiden vom LFO generierten Wellen im Vergleich

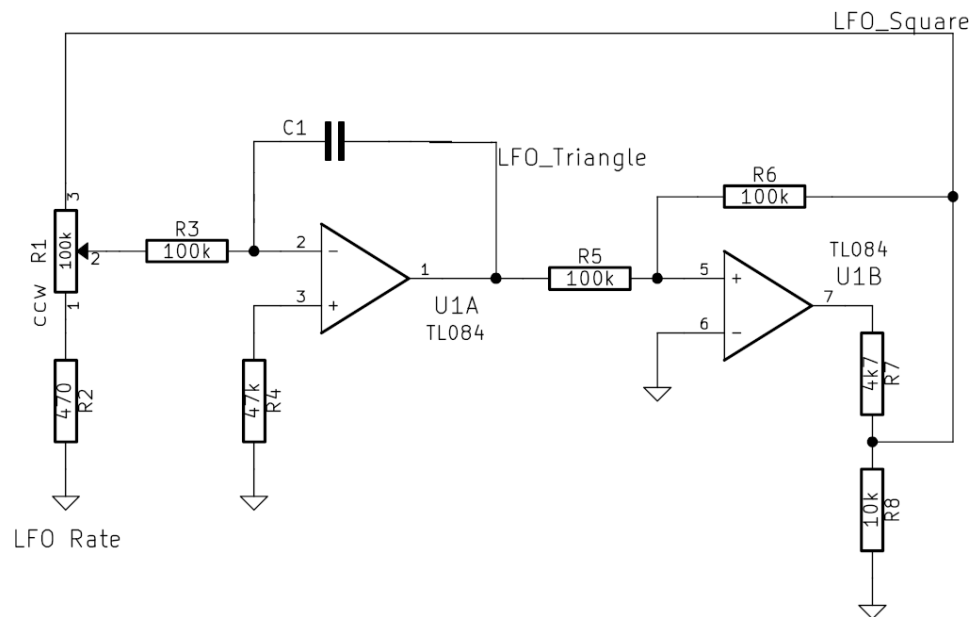


Abbildung 3.14.: Der Kern unseres LFOs

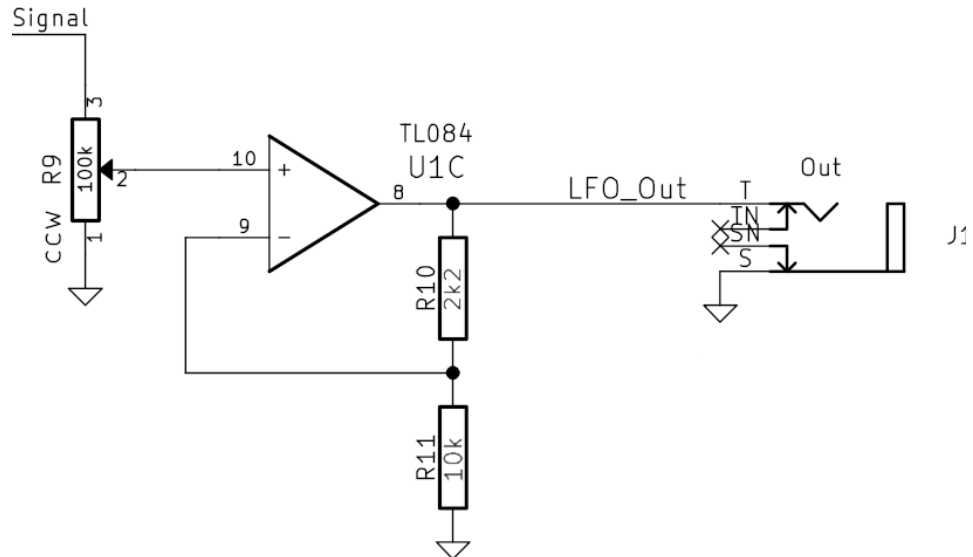


Abbildung 3.15.: Einfacher Puffer mit Potentiometer als Attenuator

3.6.6. Attack-Release Hüllkurvengenerator

Hüllkurvengeneratoren sind Module, welche bei Eingang eines Gate-Signals eine Hüllkurve (siehe Abbildung 3.3) generieren. Diese kann beispielsweise dazu genutzt werden, einen **VCA** anzusteuern, welcher einem Klang Rhythmus und Dynamik, also eine variable Lautstärke verleiht. Aufgrund der Komplexität eines vollständigen **ADSR** Hüllkurvengenerators haben wir uns dazu entschieden, einen simpleren Attack-Release (**AR**) Hüllkurvengenerator zu bauen. Attack stellt dabei die Zeit dar, die das Signal nach dem Drücken einer Taste beziehungsweise nach dem Anfang eines eingehenden Gate-Signals benötigt, um seinen Maximalwert zu erreichen. Release stellt die Zeit dar, die die Spannung der Hüllkurve nach dem Schließen des Gates benötigt, um wieder 0 V zu erreichen.

Spezifikationen

Spannungsbereich der ausgegebenen Kontrollspannung: 0 V bis 10 V

Elektronik

In unserer Umsetzung wird das Potential am Eingang für eine Kontrollspannung, an welchem ein Gate-Signal erwartet wird, von einem Operationsverstärker auf 12V verstärkt. Durch den oberen Signalpfad füllt sich ein großer Kondensator. Die Spannung, welche am Kondensator anliegt, wird gleichzeitig von einem Spannungsfolger gepuffert, da diese auch die Ausgangsspannung darstellt. Wird das Gate geschlossen, fällt die Spannung über den unteren Signalpfad wieder ab. Durch die Potentiometer kann man die Geschwindigkeit dieser beiden Prozesse kontrollieren.

Benutzung

Unser AR bietet einen Eingang für Kontrollspannung vom Typ Gate, welcher angibt, ob etwa eine Taste gedrückt ist, oder nicht. Außerdem ist ein Ausgang für die Hüllkurve vorhanden, welcher als Kontrollspannung für einen [VCA](#) vorhergesehen ist. Die Parameter Attack und Release können durch zwei Potentiometer am Panel eingestellt werden.



Abbildung 3.16.: Deckplatte unseres AR-Hüllkurvengenerator-Moduls



Appendix

Anhang A.

Schlussfolgerung/Projekterfahrung

A.1. Erreichte Ziele

Es war möglich, die Zielsetzung der vorliegenden Diplomarbeit zum Großteil zu erfüllen. Diese umfasst die Konstruktion eines Synthesizers im Eurorack-Format mit allen nötigen Modulen, um eine Signalverarbeitungskette, welche zur klassischen subtraktiven Klangsynthese fähig ist, zu bilden. Folgende Bestandteile dieses Synthesizers wurden recherchiert, geplant und als Modul fertiggestellt:

- Oszillator(-en) mit hörbarer Frequenz (siehe Abschnitt [3.6.1](#))
- Generator von (weißem) Rauschen (siehe Abschnitt [3.6.2](#))
- Mixer Modul (passiv) (siehe Abschnitt [3.6.3](#))
- Spannungskontrollierter Verstärker auf Basis eines JFETs (siehe Abschnitt [3.6.4](#))
- Oszillator(-en) mit niedriger Frequenz (siehe Abschnitt [3.6.5](#))
- Attack-Release-Hüllkurvengenerator (siehe Abschnitt [3.6.6](#))

Der geplante [VCA](#) auf Basis von zwei NPN-Transistoren wurde aufgrund technischer Schwierigkeiten mit einer robusteren Schaltung auf Basis eines JFETs ersetzt.

Vernachlässigt wurde, aufgrund des hohen Komplexitätsgrades und der eher nebensächlichen Relevanz, der Sequenzer. Dieser wird mit einem Knopf, welcher bei Betätigung den Kontrollspannungseingang des Hüllkurvengenerators auf 5 V legt, ersetzt.

A.2. Erlangte Erkenntnisse

Es wurden einige weitere Erkenntnisse bei der Durchführung des Projektes erlangt, nämlich:

A.2.1. Material für Deckplatten

Zwar ist Holz verhältnismäßig leicht zu bearbeiten, jedoch wird für die Deckplatte eines Eurorack-Modules ein relativ dünnes Material benötigt, damit Komponenten wie Audiobuchsen befestigt werden können. Außerdem entstehen beim Bohren von lackierten Holzplatten unschöne (ausgefranzte) Bohrstellen. Bei zukünftigen Modulen wäre also ein geeigneteres Material wie zum Beispiel ein Blech zu wählen.

A.2.2. Material für Platinen

THT-Platinen eignen sich sehr gut für simple Schaltkreise, jedoch werden sie schnell unübersichtlich, sobald ein komplexerer Schaltkreis gelötet werden soll. Das führt zu Problemen in der Fehlerfindung. Vorgeätzte Platinen, bei welchen nur noch Komponenten wie Widerstände, Transistoren und ähnliches festgelötet werden müssen sind hier weniger fehleranfällig.

A.2.3. Verwendung von simpleren Schaltkreisen

Da die Fehleranfälligkeit eines Schaltkreises bei höherer Komplexität exponentiell steigt und auch ein höherer Aufwand für die Konstruktion benötigt wird, sollten möglich simple Schaltkreise gewählt werden. Die Klangerzeugung ist keine exakte Wissenschaft, sondern eher eine Kunst, und so dürfen bestimmte Module durchaus eine etwas ungenaue Funktionsweise haben, oder einen eigenen Charakter aufweisen.

A.2.4. Reihenfolge der konstruierten Module

Die Module sollten, vor allem bei einem Projekt mit fixer Deadline wie es eine Diplomarbeit ist, in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit gebaut werden. So ist es beispielsweise nicht sinnvoll, einen Hüllkurvengenerator zu konstruieren, bevor ein anzusteuender [VCA](#) existiert.

A.2.5. Weiteres

Gelernt und vertieft wurden außerdem:

- Arbeiten mit \LaTeX
- Löten und Arbeiten mit elektronischen Bauteilen
- Bearbeitung von Holz
- Recherche, Planung und Durchführung eines facettenreichen Hardwareprojektes
- Sinnvolle Arbeitsteilung je nach Stärken der Teammitglieder

Abkürzungsverzeichnis

ADSR Attack, Decay, Sustain, Release	13
AR Attack-Release	33
CV Kontrollspannung	18
HE Höheneinheit	15
LDR Lichtabhängiger Widerstand, englisch: Light Dependent Resistor	
LED Leuchtdiode, englisch: Light Emitting Diode	18
LFO Oszillator mit niedriger Frequenz, englisch: Low Frequency Oscillator	8
THT Through Hole Technology	19
VCA spannungskontrollierter Verstärker, englisch: Voltage Controlled Amplifier	3
VCF spannungskontrollierter Filter, englisch: Voltage Controlled Filter	13
VCO spannungskontrollierter Oszillator, englisch: Voltage Controlled Oscillator	

Abbildungsverzeichnis

1.	Der fertiggestellte Synthesizer mit allen Modulen, Spannungsquelle und Gehäuse	V
2.1.	Dezibelskala mit häufigen Lautstärken als Referenzpunkte und zugehörigen Luftdrucksänderungen in Pascal [4]	6
2.2.	Gewichtungsfunktion; Hörbare Frequenzen auf der Abszisse, Hörbarkeit durch das menschliche Gehör auf der Ordinate [4]	6
2.3.	Der zeitliche Verlauf einer ADSR Hüllkurve; die Amplitudenwerte auf der Ordinate entsprechen bei einem Hüllkurvengenerator den ausgegebenen Kontrollspannungswerten [26]	14
3.1.	Schaltkreis zum Abgleichen des internen Verstärkungsfaktors von Transistoren	17
3.2.	Seitenansicht eines Moduls	19
3.3.	Spannungsverlauf eines Oszillators	21
3.4.	Deckplatte unseres Oszillator-Moduls	22
3.5.	Schaltkreis von einem einzelnen Oszillator	22
3.6.	Deckplatte unseres Noise-Moduls	24
3.7.	Schaltkreis zum Generieren eines Rausch-Signals.	24
3.8.	Schaltkreis für einen passiven Mixer; Quelle: [7]	26
3.9.	Deckplatte unseres Mixer-Moduls	26
3.10.	Schaltkreis für einen Vactrol-VCA [9]	29

3.11. Schaltkreis für eine JFET-VCA Annäherung	29
3.12. Deckplatte unseres LFO-Moduls	31
3.13. Die beiden vom LFO generierten Wellen im Vergleich	31
3.14. Der Kern unseres LFOs	32
3.15. Einfacher Puffer mit Potentiometer als Attenuator	32
3.16. Deckplatte unseres AR-Hüllkurvengenerator-Moduls	34
3.17. Schaltkreis für einen simplen Attack-Release Hüllkurvengenerator; Quelle: [22]	35
3.18. Spannungsverlauf (Hüllkurve) des Attack-Release Hüllkurvengenerators	35

Literaturverzeichnis

- [1] Eurorack Power Supply, Mean Well RT65B. <https://modularsynthlab.com/product/eurorack-power-supply-mean-well-rt65b/?v=fa868488740a>
- [2] 1955 RCA Electronic Music Synthesizer. (2014). <https://blog.adafruit.com/2014/10/06/1955-rca-electronic-music-synthesizer/>
- [3] Synthesis : A Basic Understanding. (2017). <https://soundtraining.com/synthesis-a-basic-understanding/>
- [4] ACOUSTIC TODAY: The World Through Sound: Decibels. (2023)
- [5] BAARSS, F. : Einstieg in die Klangsynthese: Syntheseformen. (2023). <https://www.delamar.de/faq/syntheseformen-klangsynthese-34050/>
- [6] BLÅSOL, K. : I AM O VCA/RingMod/Voltage Controlled Gate - DIY Modular in a Week 2.2. (2018). https://www.youtube.com/watch?v=m_zONfnLqRM
- [7] BLÅSOL, K. : Simple mixer - Modular in a Week 3.1. (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=VemUjRizC5U>
- [8] BLÅSOL, K. : Super simple White Noise Module. (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=cyQMa4U0Wfs>
- [9] BLÅSOL, K. : Vactrol VCAs and CV attenuators - DIY Modular in a Week 2.1. (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=ljJFSOW14Rc>
- [10] CRAB, S. : 'Buchla Synthesizers', Donald Buchla. USA, 1966. (2019). <https://120years.net/wordpress/buchla-synthesizersdonald-buchlausa1963/>

- [11] CRAB, S. : 'Moog Synthesizers' Robert Moog. USA, 1964. (2019). <https://120years.net/wordpress/moog-synthesizersrobert-moogusa1963-2/>
- [12] DOEPFER MUSIKELEKTRONIK GMBH: *SYSTEM A-100 Bedienungsanleitung*, 2001. https://doepfer.de/a100_man/A100_Anleitung_komplett.pdf
- [13] DUDEN: Rechtschreibung Synthese Duden. (2023). <https://www.duden.de/rechtschreibung/Synthese>
- [14] FRANZISKA @ T.BLOG: Das Theremin: 9 Fakten. (2019). <https://www.thomann.de/blog/de/9-fakten-ueber-das-theremin/>
- [15] HAILLANT, D. : Simple LFO V1.1 Documentation. (2016). <http://www.davidhailant.com>
- [16] KLEIN, M. : DIY VCO Part 1: The analog oscillator core anyone can build. (2020). <https://www.youtube.com/watch?v=QBatvo8bCa4>
- [17] KLEIN, M. : Designing a classic transistor-VCA from scratch. (2021). <https://www.youtube.com/watch?v=yMrCCx6uqcE>
- [18] KOVARSKY, J. : History of the Synthesizer, Part 1. (2022). <https://hub.yamaha.com/keyboards/synthesizers/history-of-the-synthesizer-part-1/>
- [19] LEARNELECTRONICS ON YOUTUBE.COM: How to match transistors. (2019). <https://www.youtube.com/watch?v=TvTSaTiToFs>
- [20] MOOG, R. A.: VOLTAGE-CONTROLLED ELECTRONIC MUSIC MODULES. Trumansburg, New York, Oktober 1964
- [21] RAFFASEDER, H. : Additive Klangsynthese. In: *Elektronische Klangsynthese* (2002). <http://www.raffaseder.com/sounddesign/klangsynthese/additiv.htm>
- [22] RAMSDEN, N. : Envelope Circuits: a simple AR design using op amps. (2016). <https://synthnerd.wordpress.com/2016/04/06/envelope-circuits-a-simple-ar-design-using-op-amps/>
- [23] SAUS, W. : Die Obertonreihe. https://www.oberton.org/obertongesang/die-obertonreihe/#obertonreihe_8211_frequenzverhaeltnisse

- [24] SWEETWATER @ SWEETWATER.COM: Vactrol. (2015). <https://www.sweetwater.com/insync/vactrol/>
- [25] THOMPSON, M. : colored noise. (1989)
- [26] WAUGH, I. : Quick Guide to Envelopes. (2023). <https://making-music.com/quick-guides/envelopes>
- [27] WOOD, S. : Standard waveforms. (2012). <https://swphonetics.com/praat/tutorials/understanding-waveforms/standard-waveforms/>