

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 im Eurorack-Format.

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 Allgemeine Beschreibung, was vom Projektziel umgesetzt wurde, in einigen kurzen Sätzen. Optional Hinweise auf Erweiterungen. Gut machen sich in diesem Kapitel auch Bilder vom Gerät (HW) bzw. Screenshots (SW). Liste aller im Pflichtenheft aufgeführten Anforderungen, die nur teilweise oder gar nicht umgesetzt wurden (mit Begründungen).

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	ii
1. Einleitung	1
1.1. Vertiefende Aufgabenstellung	2
1.1.1. Felix Perktold	2
1.1.2. Matteo Kastler	2
1.2. Dokumentation der Arbeit	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Klangsynthese	3
2.1.1. Klangwellen	3
2.1.2. Klangerzeugung	6
2.1.3. Subtraktive Klangsynthese	6
2.1.4. Additive Klangsynthese	7
2.1.5. Vocoder	8
2.2. Geschichte	8
2.3. Das Eurorack-Format	10
2.3.1. Kontrollspannung (CV)	10
3. Praktische Umsetzung	15
3.1. Gehäuse	15
3.2. Spannungsquelle	15
3.3. Spannungsverteilung	16
3.4. Transistoren abgleichen	16
3.5. Vactrols	17
3.6. Module	17
3.6.1. Oszillator x2	18
3.6.2. White Noise	20
3.6.3. Mixer	22

3.6.4.	Spannungskontrollierter Verstärker	24
3.6.5.	Low Frequency Oscillator	25
3.6.6.	Attack-Release Hüllkurvengenerator	27
4.	Schluss	31
4.1.	Erreichen der gesetzten Ziele	31
4.2.	Erlangte Erkenntnisse	31
4.2.1.	Material für Deckplatten	32
4.2.2.	Material für Platinen	32
4.2.3.	Verwendung von simpleren Schaltkreisen	32
4.2.4.	Reihenfolge der Konstruierten Module	32
4.2.5.	Weiteres	33
A.	Abkürzungsverzeichnis	37
	Literaturverzeichnis	41

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 Klangsynthese 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 man bei modularen Synthesizern frei entscheiden, welche Module 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 [9].

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

Recherche, Dokumentation der Theoretischen Grundlagen, geschichtliche Hintergründe

1.1.2. Matteo Kastler

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

1.2. Dokumentation der Arbeit

Es werden folgende Projektergebnisse dokumentiert:

- Theoretische Grundlagen
- Praktische Umsetzung
- Ergebnisse

Weitere Anregungen:

- Fertigungsunterlagen
- Testfälle (Messergebnisse...)
- Benutzerdokumentation
- Verwendete Technologien und Entwicklungswerkzeuge

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Klangsintese

Das Wort **Sintese** bedeutet in etwa zusammensetzen oder zusammenfügen [10], beschreibt also das Erschaffen von etwas Neuem durch die Vereinigung von kleineren Teilen. Klangsintese bedeutet also, aus grundlegenden Klangwellen komplexere Klänge zu erzeugen.

Ein **Sintesizer** ist ein (meist elektronisches) Instrument, welches zur Klangsintese fähig ist. Während die meisten herkömmlichen analogen Instrumente nur eine oder wenige unterschiedliche Klangfarben erzeugen können, ist eine der Kernaufgaben eines Sintesizers das Erzeugen von Klängen mit beliebig änderbarer Klangfarbe. Zwar können Sintesizer 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 Klangsintese. 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 gefühlten Lautstärke (siehe Abbildung 2.2).

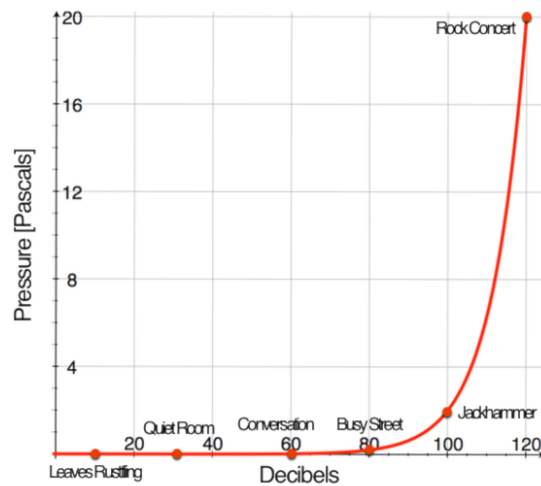


Abbildung 2.1.: Dezibelskala mit häufigen Lautstärken als Referenzpunkte und zugehörigen Luftdrucksänderungen in Pascal [3]

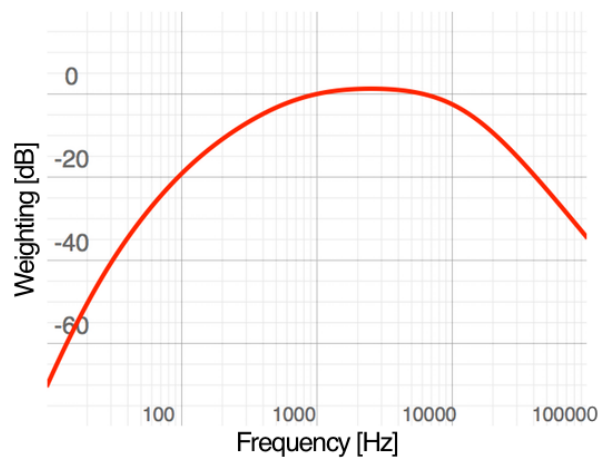


Abbildung 2.2.: Gewichtungsfunktion; Hörbare Frequenzen auf der Abszisse, Hörbarkeit durch das menschliche Gehör auf der Ordinate [3]

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 [18].

Da Wellenformen wie Dreieck-, Rechteck- oder Sägezahnwellen viele Obertöne besitzen [22], eignen sie sich besonders gut als Grundtöne für die subtraktive Klangsintese.

2.1.2. Klangerzeugung

Die für die Klangsintese 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 Klangsynthese. 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 Klangsynthese

Nach Fourier kann jegliche Art von Wellenform durch eine Serie von Sinuswellen ausgedrückt werden. Das Prinzip der additiven Klangsynthese besteht somit darin, eine Vielzahl von Sinuswellen mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen zu kombinieren [2] (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 [16]. 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** [4].

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 Wiederzusammensetzen 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 [11].

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.

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 [15]. 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 [13] [8].

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 [7].

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 [8].

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 [13].

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, Rohland 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 (CV)

Essentiell bei Eurorack-Modulen ist, dass viele Parameter nicht nur durch den Benutzer (durch Knöpfe, Potentiometer, etc.), sondern auch durch andere Module mithilfe von sogenannter Kontrollspannung ansteuerbar sind. So kann beispielsweise die Frequenz eines Oszillators, der Cutoff eines Filters, Attack- und Releaselänge einer Hüllkurve und ähnliches durch Kontrollspannung kontrolliert werden. Diese Kontrollspannung kann wiederum aus verschiedensten Modulen wie z.B. einem MIDI Interface, einem [LFO](#), einem Hüllkurvengenerator, welcher zum Beispiel Attack, Decay, Sustain, Release ([ADSR](#)) beherrscht, oder sogar einem anderen Audiosignal kommen. Dadurch entsteht ein Netzwerk an elektronischen Schaltungen, welche sich gegenseitig beeinflussen und hochschaukeln, was idealerweise zu wohlklingenden, jedoch in jedem Fall interessanten Effekten führt.

Besonders für Eurorack und für modulare Synthesizer im Generellen 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

Hüllkurven sind Kontrollspannungen, welche oberflächlich einem Gate-Signal ähneln, jedoch spielt der genaue Verlauf der Spannung einer Hüllkurve eine wichtige Rolle. Oft werden Hüllkurven zum Ansteuern von **VCAs** oder spannungskontrollierter Filter, englisch: Voltage Controlled Filters (**VCFs**) benutzt. Eine häufige Art von Hüllkurve ist **ADSR**, welche den Verlauf der Lautstärke eines Tones beim Drücken einer Taste beschreibt [21].

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 abzuschwollen. Diese Zeit wird über den Release-Parameter eingestellt.

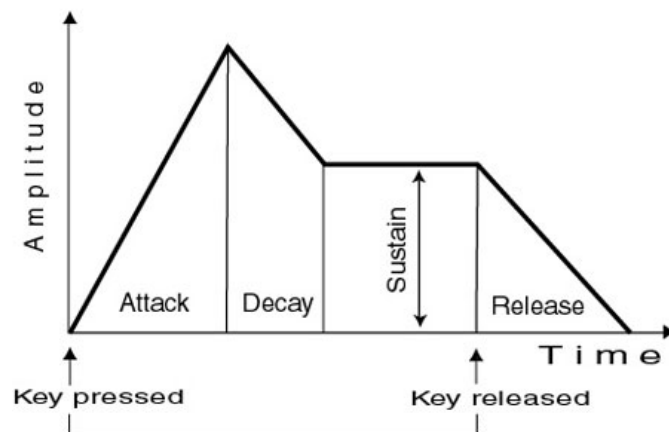


Abbildung 2.3.: Der zeitliche Verlauf einer ADSR Hüllkurve; die Amplitudenwerte auf der Ordinate entsprechen bei einem Hüllkurvengenerator den ausgegebenen Kontrollspannungswerten [21]

Volt per Octave

Die meisten **VCOs** folgen der von Moog eingeführten Konvention, dass ihre Frequenz auf eine logarithmische Art und Weise von der Kontrollspannung abhängt. 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.

3. Praktische Umsetzung

3.1. Gehäuse

Das Gehäuse muss so dimensioniert sein, dass es Eurorack-kompatible Module beherbergen kann. Wichtig ist dabei vor allem der vertikale Abstand der Schienen, auf welchen die Module befestigt werden. Dieser misst laut dem *Doepfer System A100 Handbuch* [9] 3 Höheneinheiten (HE). 1 HE beträgt dabei 44.45 mm. 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.

3.2. Spannungsquelle

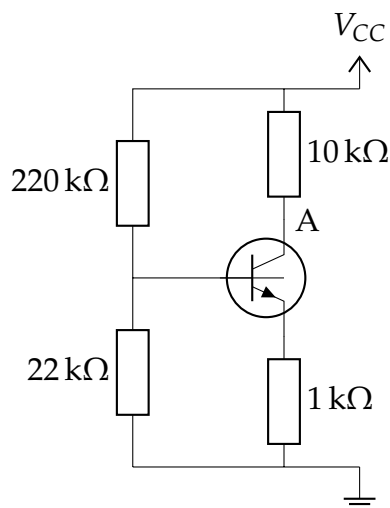
Eurorack-Synthesizer arbeiten mit Spannungen von 24 V peak to peak, benötigen also eine Spannungsquelle, welche -12 V bis 12 V bereitstellen kann. Manche Module benötigen außerdem eine separate 5 V Leitung, um zum Beispiel Microcontroller zu betreiben. Eine beliebte Wahl in der DIY-Szene ist die Mean 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].

3.3. 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.

3.4. Transistoren abgleichen

Manchmal werden Transistoren benötigt, welche einen möglichst gleichen internen Verstärkungsfaktor besitzen. Bereits aufeinander abgestimmte Transistorpaare sind zwar im Handel erhältlich, jedoch ist es einfach, das Abgleichen von Transistoren selbst vorzunehmen. Baut man den zu messenden Transistor in den folgenden Schaltkreis 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 [14]:



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 [19]. 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 **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. Interface-Komponenten, welche vom Benutzerpanel aus zugänglich sein sollen, werden über längere Kabel und Schraubklemmen auf der Platine verbunden.

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 im hörbaren Bereich generiert.

Spezifikationen

Oszillator 1:

- Spannung: bis zu $\pm 10\text{ V}$
- Frequenzbereich: 40 Hz bis $\approx 2000\text{ Hz}$



Abbildung 3.1.: Deckplatte unseres Oszillator-Moduls

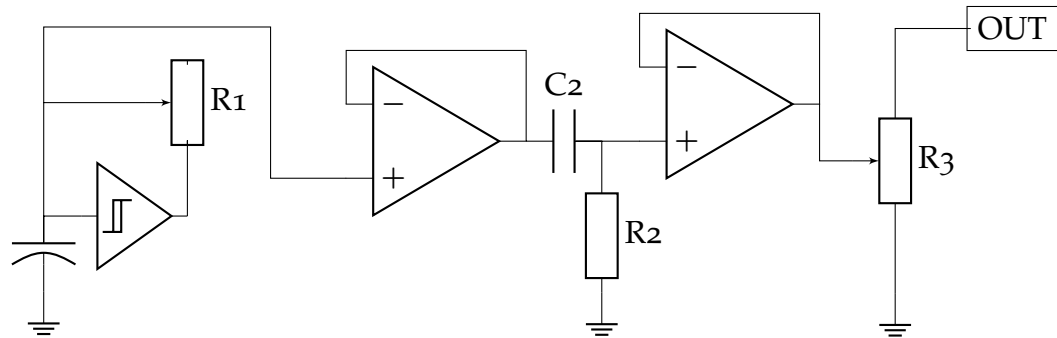
Oszillator 2:

- Spannung: bis zu ± 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.

Schematics



Benutzung

Das Panel ist aufgeteilt in einen linken und rechten Oszillator, 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.

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. White noise beziehungsweise weißes Rauschen ist eine Art von 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 [20].



Abbildung 3.2.: Deckplatte unseres Noise-Moduls

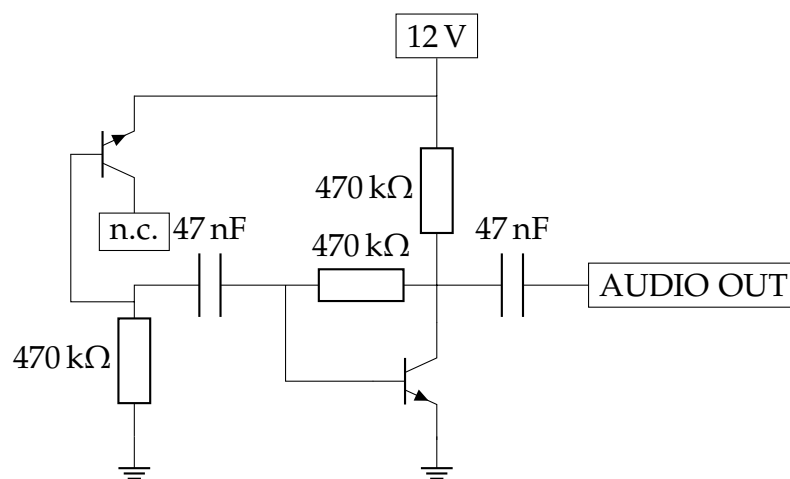
Spezifikationen

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

Elektronik

[6]

Schematics



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.

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.



Abbildung 3.3.: Deckplatte unseres Mixer-Moduls

Spezifikationen

Spannung: voller Spannungsbereich möglich (=> bis zu 24V_{pp})

Elektronik

[5]

Schematics

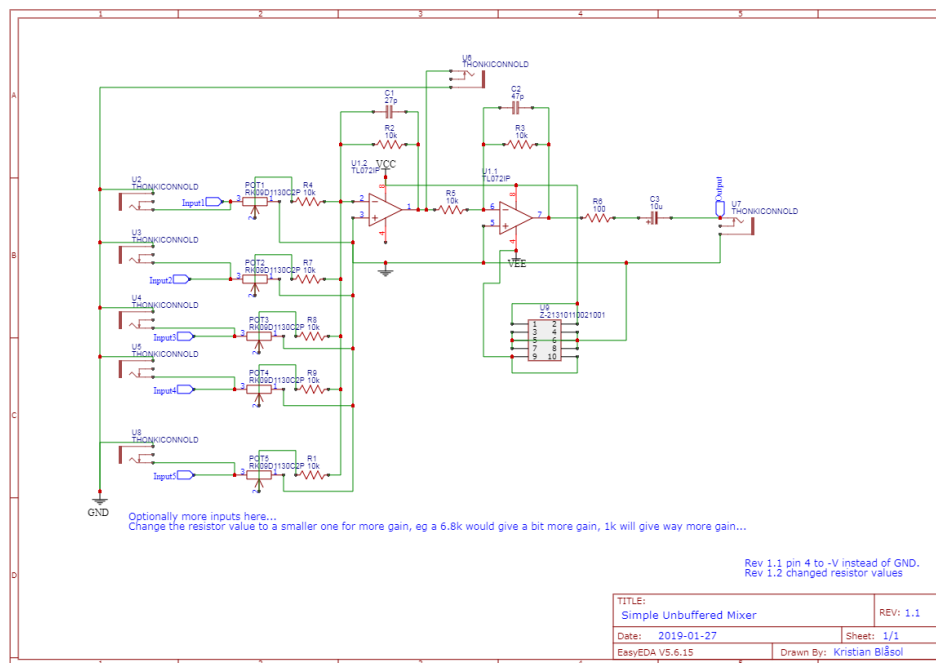


Abbildung 3.4.: Schaltkreis für einen passiven Mixer; Quelle: [5]

Benutzung

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

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.

Spezifikationen

Elektronik

Es gibt eine Vielzahl von möglichen Ansätzen für die technische Umsetzung eines **VCA**. Die simpelste Möglichkeit ist es wohl, eine Vactrol zu benutzen, da diese mit nur minimaler Beschaltung zu einem VCA umgewandelt werden kann todo: schematic einfügen:https://www.dropbox.com/s/o6oiyanco8lzmvt/Schematic_Vactrol.pdf?dl=0. 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 erfahren kann.

Ein weiterer Ansatz nutzt den linearen Reaktionsbereich zweier NPN-Transistoren, wobei durch die Beschaltung 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.

Schematics

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.

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“ von David Haillant [12]. Dieses Modul erzeugt langsam oszillierende Spannungen in Form einer Rechteckswelle und einer Dreieckswelle.

Spezifikationen

Typische Oszillationsbereiche für **LFOs** liegen bei 0.1 Hz bis 10 Hz. Das von uns gewählte Design erzeugt jeweils einen Rechteck- und Dreiecksausgang. Da beide Signale aus dem selben Schwingkreis stammen, kann die Frequenz nicht unabhängig geändert werden, die Amplituden der beiden Signale sind jedoch individuell einstellbar.



Abbildung 3.5.: Deckplatte unseres LFO-Moduls

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 benutzt, um beide Wellenformen parallel ausgeben zu können. Die Frequenz beider Wellenformen ist gekoppelt und wird über ein einzelnes Potentiometer gesteuert, die Amplituden sind separat anzusteuern.

Schematics

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.

3.6.6. Attack-Release Hüllkurvengenerator

Hüllkurvengeneratoren sind Module, welche bei Eingang eines Gate-Signals eine Hüllkurve generieren. Diese kann beispielsweise dazu genutzt werden, einen **VCA** anzusteuern, welcher einem Klang Rhythmus und Dynamik, also eine sich Ändernde Lautstärke verleiht. Aufgrund der Komplexität eines vollständigen **ADSR** Hüllkurvengenerators haben wir uns dazu entschieden, einen simpleren Attack-Release (**AR**) Hüllkurvengenerator zu bauen. Dieser besitzt einen Eingang für eine Kontrollspannung, an welchen ein Gate-Signal angelegt werden kann und zwei Drehpotentiometer, mit denen die Parameter Attack und Release eingestellt werden können. 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

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



Abbildung 3.6.: Deckplatte unseres AR-Hüllkurvengenerator-Moduls

über den unteren Signalpfad wieder ab. Durch die Potentiometer kann man die Geschwindigkeit dieser beiden Prozesse kontrollieren.

Schematics

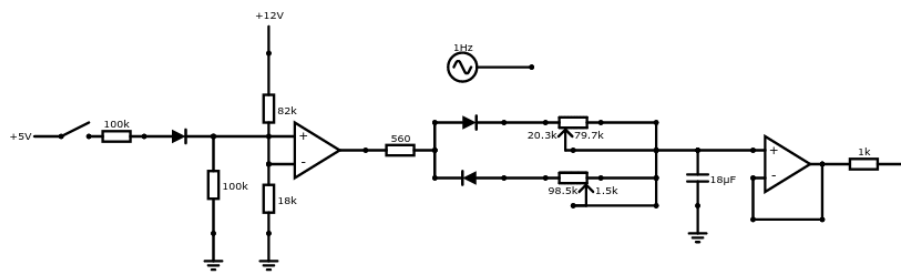


Abbildung 3.7.: Schaltkreis für einen simplen Attack Release Hüllkurvengenerator; Quelle: [17]

Benutzung

Unser AR bietet einen Eingang für Kontrollspannung vom Typ Gate, welcher angibt, ob etwa eine Taste gedrückt oder nicht. Außerdem ist ein Ausgang für die Hüllkurve vorhanden, welcher als Kontrollspannung für einen [VCA](#) vorhergesehen ist.

4. Schluss

4.1. Erreichen der gesetzten 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](#))
- Oszillator(-en) mit niedriger Frequenz (siehe Abschnitt [3.6.5](#))
- Attack-Release-Hüllkurvengenerator (siehe Abschnitt [3.6.6](#))

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.

4.2. Erlangte Erkenntnisse

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

4.2.1. 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 (ausgefranste) Bohrstellen. Bei zukünftigen Modulen wäre also ein geeigneteres Material wie zum Beispiel ein Blech zu wählen.

4.2.2. 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.

4.2.3. 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.

4.2.4. 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.

4.2.5. 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

Appendix

Anhang A.

Abkürzungsverzeichnis

ADSR Attack, Decay, Sustain, Release	10
AR Attack-Release	27
CV Kontrollspannung	vii
HE Höheneinheit	15
LDR Lichtabhängiger Widerstand, englisch: Light Dependent Resistor	
LED Leuchtdiode, englisch: Light Emitting Diode	17
LFO Oszillator mit niedriger Frequenz, englisch: Low Frequency Oscillator	7
THT Through Hole Technology	17
VCA spannungskontrollierter Verstärker, englisch: Voltage Controlled Amplifier	2
VCF spannungskontrollierter Filter, englisch: Voltage Controlled Filter	11
VCO spannungskontrollierter Oszillator, englisch: Voltage Controlled Oscillator	

Abbildungsverzeichnis

2.1. Dezibelskala mit häufigen Lautstärken als Referenzpunkte und zugehörigen Luftdrucksänderungen in Pascal [3]	5
2.2. Gewichtungsfunktion; Hörbare Frequenzen auf der Abszisse, Hörbarkeit durch das menschliche Gehör auf der Ordinate [3]	5
2.3. Der zeitliche Verlauf einer ADSR Hüllkurve; die Amplitudenwerte auf der Ordinate entsprechen bei einem Hüllkurvengenerator den ausgegebenen Kontrollspannungswerten [21]	12
3.1. Deckplatte unseres Oszillator-Moduls	19
3.2. Deckplatte unseres Noise-Moduls	21
3.3. Deckplatte unseres Mixer-Moduls	22
3.4. Schaltkreis für einen passiven Mixer; Quelle: [5]	23
3.5. Deckplatte unseres LFO-Moduls	26
3.6. Deckplatte unseres AR-Hüllkurvengenerator-Moduls	28
3.7. Schaltkreis für einen simplen Attack Release Hüllkurvengenerator; Quelle: [17]	29

Literaturverzeichnis

- [1] Eurorack Power Supply, Mean Well RT65B. <https://modularsynthlab.com/product/eurorack-power-supply-mean-well-rt65b/?v=fa868488740a>
- [2] Synthesis : A Basic Understanding. (2017). <https://soundtraining.com/synthesis-a-basic-understanding/>
- [3] ACOUSTIC TODAY: The World Through Sound: Decibels. (2023)
- [4] BAARSS, F. : Einstieg in die Klangsynthese: Syntheseformen. (2023). <https://www.delamar.de/faq/syntheseformen-klangsynthese-34050/>
- [5] BLÅSOL, K. : Simple mixer - Modular in a Week 3.1. (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=VemUjRizC5U>
- [6] BLÅSOL, K. : Super simple White Noise Module. (2018). <https://www.youtube.com/watch?v=cyQMa4U0Wfs>
- [7] CRAB, S. : 'Buchla Synthesizers', Donald Buchla. USA, 1966. (2019). <https://120years.net/wordpress/buchla-synthesizersdonald-buchlausa1963/>
- [8] CRAB, S. : 'Moog Synthesizers' Robert Moog. USA, 1964. (2019). <https://120years.net/wordpress/moog-synthesizersrobert-moogusa1963-2/>
- [9] DOEPFER MUSIK ELEKTRONIK GMBH: SYSTEM A-100 Bedienungsanleitung, 2001. https://doepfer.de/a100_man/A100_Anleitung_komplett.pdf
- [10] DUDEN: Rechtschreibung Synthese Duden. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Synthese>. Version: 2023

- [11] FRANZISKA @ T.BLOG: Das Theremin: 9 Fakten. (2019). <https://www.thomann.de/blog/de/9-fakten-ueber-das-theremin/>
- [12] HAILLANT, D. : *Simple LFO V1.1 Documentation*. <http://www.davidhaillant.com>. Version: 2016
- [13] KOVARSKY, J. : History of the Synthesizer, Part 1. (2022). <https://hub.yamaha.com/keyboards/synthesizers/history-of-the-synthesizer-part-1/>
- [14] LEARNELECTRONICS ON YOUTUBE.COM: *How to match transistors*. <https://www.youtube.com/watch?v=TvTSaTItFs>. Version: 2019
- [15] MOOG, R. A.: VOLTAGE-CONTROLLED ELECTRONIC MUSIC MODULES. Trumansburg, New York, Oktober 1964
- [16] RAFFASEDER, H. : *Additive Klangsynthese*. <http://www.raffaseder.com/sounddesign/klangsynthese/additiv.htm>. Version: 2002
- [17] 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/>
- [18] SAUS, W. : Die Obertonreihe. https://www.oberton.org/obertongesang/die-obertonreihe/#obertonreihe_8211_frequenzverhaeltnisse
- [19] SWEETWATER @ SWEETWATER.COM: Vactrol. (2015). <https://www.sweetwater.com/insync/vactrol/>
- [20] THOMPSON, M. : colored noise. (1989)
- [21] WAUGH, I. : Quick Guide to Envelopes. (2023). <https://making-music.com/quick-guides/envelopes>
- [22] WOOD, S. : Standard waveforms. (2012). <https://swphonetics.com/praat/tutorials/understanding-waveforms/standard-waveforms/>