

Diplomarbeit

Diplomarbeit Modularer Synthesizer

Modularer Synthesizer mit Eurorack Kompatibilität

Eingereicht von

**Felix Perktold
Matteo Kastler**

Eingereicht bei

**Höhere Technische Bundeslehr- und Versuchsanstalt
Anichstraße**

Abteilung für Wirtschaftsingenieure/Betriebsinformatik

Betreuer

Cornelia Falch

Innsbruck, April 2023

Abgabevermerk:

Betreuer/in:

Datum:

Kurzfassung / Abstract

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

Der resultierende Synthesizer

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.

Gliederung des Abstract in **Thema, Ausgangspunkt, Kurzbeschreibung, Zielsetzung**.

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	1
1.1.1 Schüler*innen Name 1	1
1.1.2 Schüler*innen Name 2	1
1.2 Dokumentation der Arbeit	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Klangsynthese	3
2.1.1 Klangwellen	3
2.1.2 Klangerzeugung	4
2.2 Das Eurorack Format	4
2.2.1 Jargon	5
3 Praktische Umsetzung	9
3.1 Gehäuse	9
3.2 Spannungsquelle	9
3.3 Spannungsverteilung	9
3.4 Module	9
3.4.1 Oszillator x2	11
3.4.2 Mixer	14
3.4.3 Low Frequency Oscillator	14
Literaturverzeichnis	25

1 Einleitung

In der Einleitung wird erklärt, wieso man sich für dieses Thema entschieden hat. (Zielsetzung und Aufgabenstellung des Gesamtprojekts, fachliches und wirtschaftliches Umfeld)

1.1 Vertiefende Aufgabenstellung

1.1.1 Schüler*innen Name 1

1.1.2 Schüler*innen Name 2

1.2 Dokumentation der Arbeit

Es werden die Projektergebnisse dokumentiert

- Grundkonzept
- Theoretische Grundlagen
- Praktische Umsetzung
- Lösungsweg
- Alternativer Lösungsweg
- Ergebnisse inkl. Interpretation

Weitere Anregungen:

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

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Klangsynthese

Das Wort Synthese bedeutet in etwa zusammensetzen oder zusammenfügen <https://www.duden.de/rechtschreibung/Synthese>, beschreibt also das Erschaffen von etwas neuem durch die Vereinigung von kleineren Teilen, Klangsynthese bedeutet also, aus grundlegenden Klangwellen komplexere Klänge zu erzeugen.

2.1.1 Klangwellen

Klangwellen sind die Grundbausteine der Klangsynthese. Sie können auf verschiedene Arten und Weisen ausgedrückt werden und in verschiedenen Medien vorkommen, wichtig sind für uns vor allem als Spannung ausgedrückte Klangwellen, welche wir mit Elektronik manipulieren können und Schallwellen in der Luft als Endprodukt. Weitere Formen von Klangwellen sind zB die Schwingungen einer Gitarrensaite oder Lautsprechermembran oder Elektromagnetische Wellen, zB beim Funk.

Die Tonhöhe einer Klangwelle hängt von ihrer Frequenz, also von der Geschwindigkeit ab, 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. Deshalb entspricht ein Ton mit der doppelten Frequenz dem selben Ton eine Oktave höher.

Die Lautstärke einer Klangwelle, also ihre Amplitude, wird ebenfalls auf eine logarithmische Art und Weise wahrgenommen. So bedeutet eine Steigerung der Lautstärke um 20 dB eine verzehnfachung der Amplitude, also des Energieniveaus der Welle.

Klangwellen können verschiedene Formen besitzen, die grundlegende Form ist eine Sinuswelle. Das menschliche Ohr empfindet eine sinusförmige Schallwelle als "rein", da sie eine einzelne Frequenz repräsentiert. Weitere einfache Formen sind Rechteckswellen, Sägezahnwellen und Dreieckswellen. Diese Wellenformen besitzen neben ihrer Grundfrequenz weitere Obertöne, welche dem Klang Farbe verleihen.

Mithilfe einer Fourier-Transformation <https://mathworld.wolfram.com/FourierTransform.html> können alle Arten von Wellen durch eine Serie von Sinuswellen ausgedrückt werden. Durch einen Filter kann die Amplitude von Teilwellen unter oder über einer bestimmten Frequenz verringert werden, wodurch zB unangenehm hohe Obertöne gefiltert werden können. Filter sind ein einfaches Beispiel für subtraktive Klangsintese.

2.1.2 Klangerzeugung

Die für die Klangsintese benötigten Grundtöne können aus verschiedensten Quellen stammen. Die häufigste davon ist wohl ein Oszillator, welcher durchgehende Klangwellen mit einer einfachen Wellenform wie zB einem Sinus oder einer Rechteckswelle generiert. In einem Späteren Teil dieser Dokumentation wird Aufbau und Design eines solchen Oszillators beschrieben.

Abgesehen davon können eine breite Spanne von elektronischen Musikinstrumenten / Klangquellen wie E-Gitarren, Thereminen oder Radios und Kassettenspielern die zu modifizierenden Klangwellen für einen Synthesizer bereitstellen.

2.2 Das Eurorack Format

1996 veröffentlichte Doepfer Musikelektronik GmbH eine Reihe an Synthesizermodulen. Schnell wurden kompatible Module von anderen Herstellern hergestellt, 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. Des weiteren gibt es eine lebendige DIY-szene mit vielen öffentlichen Designs, Anleitungen, Schematics, vorbereiteten Kits zum zusammenbauen und mehr.

Essentiell bei Eurorack Modulen ist, dass viele Funktionen nicht nur durch den Benutzer (durch Knöpfe, Potentiometer, etc) sondern auch durch andere Module mithilfe von sog. Kontrollspannung (CV) ansteuerbar sind. So kann z.B die Frequenz eines Oszillators, der Cutoff eines Filters, Attack und Releaselänge eines Envelopes usw. durch ein anderes Signal kontrolliert werden; Diese Kontrollspannung kann wiederum aus verschiedensten Modulen wie z.B. einem MIDI Interface, einem LFO, einem Envelope Generator wie zB ADSR oder sogar einem anderen Audiosignal kommen. Die Module sind nicht fest verkabelt, sondern werden vom Benutzer "on the fly" mit Patchkabeln (3.5 mm mono) verbunden. Dadurch entsteht ein Netzwerk an elektronischen Schaltungen welche sich gegenseitig beeinflussen und hochschaukeln, was zu idealerweise wohlklingenden, jedoch in jedem Fall interessanten Effekten führt.

2.2.1 Jargon

Frequenz

Die Frequenz einer Welle gibt an, wie schnell diese Welle schwingt, bzw wie oft in einem bestimmten Zeitraum sie ihren Kreislauf wiederholt. Die Einheit ist Hertz, 1 Hz entspricht $1/s$, das bedeutet die Hertz Anzahl einer Welle gibt an, wie oft das Signal pro Sekunde schwingt. Die Frequenz einer Klangwelle entspricht ihrer Tonhöhe.

Amplitude

Die Amplitude einer Welle gibt an, wie hoch die Differenz zwischen den Höhepunkten und den Tiefpunkten dieser Welle ist. Die Einheit der Amplitude hängt vom Medium ab, in welchem die Welle schwingt, bei einer Spannungswelle die von einem Oszillator generiert wird, wird die Amplitude beispielsweise in Volt angegeben (bzw in V_{pp}). Die Amplitude

einer Schallwelle entspricht ihrer Lautstärke, kann also in dB angegeben werden.

Oberwellen

Sind Klangwellen, welche einer gegebenen sinusförmigen Grundfrequenz Klangfarbe verleihen. Die Frequenzen dieser Oberwellen teilen die Grundfrequenz ganzzahlig, sind also Harmonisch mit dieser.

Vpp

Vpp steht für Voltage peak-to-peak, beschreibt also die Differenz zwischen Minimaler und Maximaler Spannung eines Signals. Wenn nicht anders angegeben, sind Spannungen/Spannungsbereiche, welche in Vpp ausgedrückt sind, symmetrisch um 0V. Beispielsweise besitzt eine Spannungswelle von 10Vpp einen Spannungsbereich -5V bis +5V.

Kontrollspannung, Control Voltage

Kontrollspannung (CV) ist die Quintessenz eines Modulare Synthesizers. Während normale Synthesizer wie der Minimoog intern mit Kontrollspannung arbeiten und oft auch Kontrollspannung ausgeben können (oder zumindest Audiospannung welche als Kontrollspannung misbraucht werden kann), sind die Leitungen für diese Kontrollspannungen fest verlötet. Das bedeutet dass der Benutzer nicht frei entscheiden kann, welcher Teil des Synthesizers welchen anderen Teil beeinflusst. Bei modularen Synthesizern liegen Audiobuchsen auf welchen Kontrollspannung anliegt / angelegt werden kann frei, diese Schnittstellen können vom Benutzer mehr oder weniger beliebig mit Patchkabeln zusammengeschlossen werden. Dadurch entsteht die Modularität des Eurorack Formats.

Kontrollspannungen sind im Regelfall entweder -2.5 V bis 2.5 V oder 0 V bis 8 V, können jedoch theoretisch den vollen möglichen Spannungsumfang von -12 V bis 12 V ausnutzen.

Audiosignale

Audiosignale sind Spannungen zwischen $-5V$ und $+5V$ welche an einen Verstärker oder Lautsprecher angelegt werden können um Schall zu erzeugen. Sie können auch zur Weiterverarbeitung von einem Modul zum anderen geschickt werden und sogar als Kontrollspannung verwendet werden. Man kann Audiosignale als Kontrollspannungen, welche zum Ansteuern von Lautsprechern geeignet sind, sehen.

Trigger

Auch bei einem analogen Synthesizer werden manchmal binäre Signale benötigt. Diese werden durch $5V$ (HIGH) bzw $0V$ (LOW) dargestellt. Aus diesem Grund (und für die Versorgung von zB Mikrocontrollern) wird eine eigene $5V$ Spannungsquelle vom Netzteil bereitgestellt.

Patchkabel

Patchkabel sind 3.5mm mono Klinkenstecker. Sie dienen dazu, Verbindungen zwischen verschiedenen Modulen herzustellen über welche Kontrollspannungen und Audiosignale übertragen werden können.

Voltage Controlled Modules

Module, welche durch Kontrollspannung angesteuert werden, haben oft das präfix VC (Voltage Controlled) im Namen. Beispiele dafür sind VCOs (Voltage Controlled Oscillator) und VCAs (Voltage Controlled Amplifier).

3 Praktische Umsetzung

3.1 Gehäuse

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 zB Microcontroller zu betreiben. Eine beliebte Wahl in der DIY-Szene ist die Mean Well RT65B PSU, da sie $\pm 12\text{ V}$ und 5 V mit einer genügenden maximalen Stromstärke/Leistung bereitstellt um ein Anfängersystem zu versorgen und verhältnismäßig günstig ist.

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 Module

Im Folgenden werden die Module, welche den Synthesizer ausmachen, beschrieben. Alle dieser Module bestehen aus einem Panel, welches 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 und oft eine beliebige Auswahl an Audioeingängen für Kontrollspannungen, Audio-Inputs und ähnlichem und andere Interfacekomponenten wie Potentiometern, Schaltern, Knöpfen, LEDs und weiterem.

Die elektronischen Komponenten können durch verschiedene Methoden zusammengeschaltet werden, Beispiele dafür sind:

- Breadboards: vor allem geeignet zum erstellen von Prototypen
- 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 sollen, beispielsweise für DIY-Kits
- "Deadbug" Methode: Elektronische Komponenten werden ohne Platine "point to point" miteinander verlötet. Resultiert meist in Spaghetti-ähnlichen Strukturen, kann bei gekonnter Ausführung jedoch in sehr ästhetischen Schaltkreisen resultieren.

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-/Plastikplatten oder ähnliches geeignet, zu bedenken ist dabei die

- 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
- Bemalbarkeit: Für einfachere Zugänglichkeit und für bessere Ästhetik sollten die Panels bemalt und/oder beschriftet werden

Wir benutzen eine dünne, schwarz lackierte Holzplatte als Material für unsere Panels, diese bekleben wir mit transparenter Folie welche mit weißem permanent Marker beschriftet werden kann.

3.4.1 Oszillator x2

Einleitende Beschreibung

Das 2xSqr Modul ist ein simples Signalerzeugendes Modul, welches zwei voneinander unabhängige Rechteckswellen generiert. Es besitzt zwei Audio-buchsen am Panel an welchen die Spannung der generierten Wellen anliegt und vier Potentiometer als verstellbare Widerstände, mit welchen jeweils Amplitude und Frequenz der beiden Oszillatoren angesteuert werden können. Diese Potentiometer können durch Vactrols ersetzt werden, um das Modul Spannungssteuerbar zu machen.



Spezifikationen

Oszillator 1:

- Spannung: bis zu 10V_{pp}
- Frequenzbereich:

Oszillator 2:

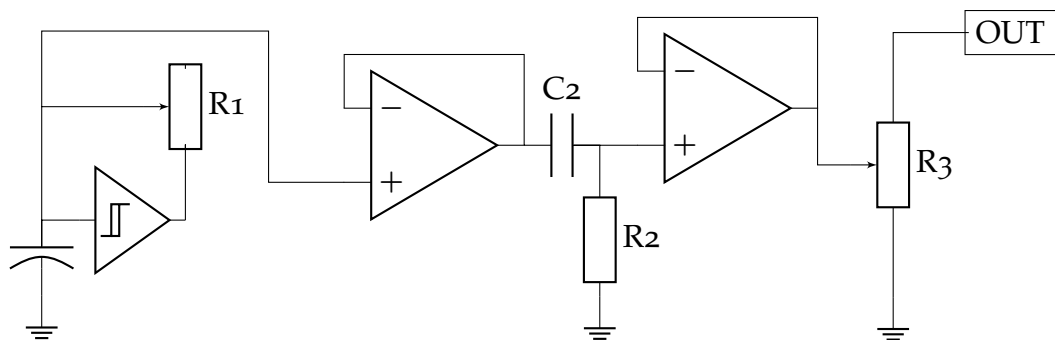
- Spannung: bis zu 10V_{pp}
- Frequenzbereich

Elektronik

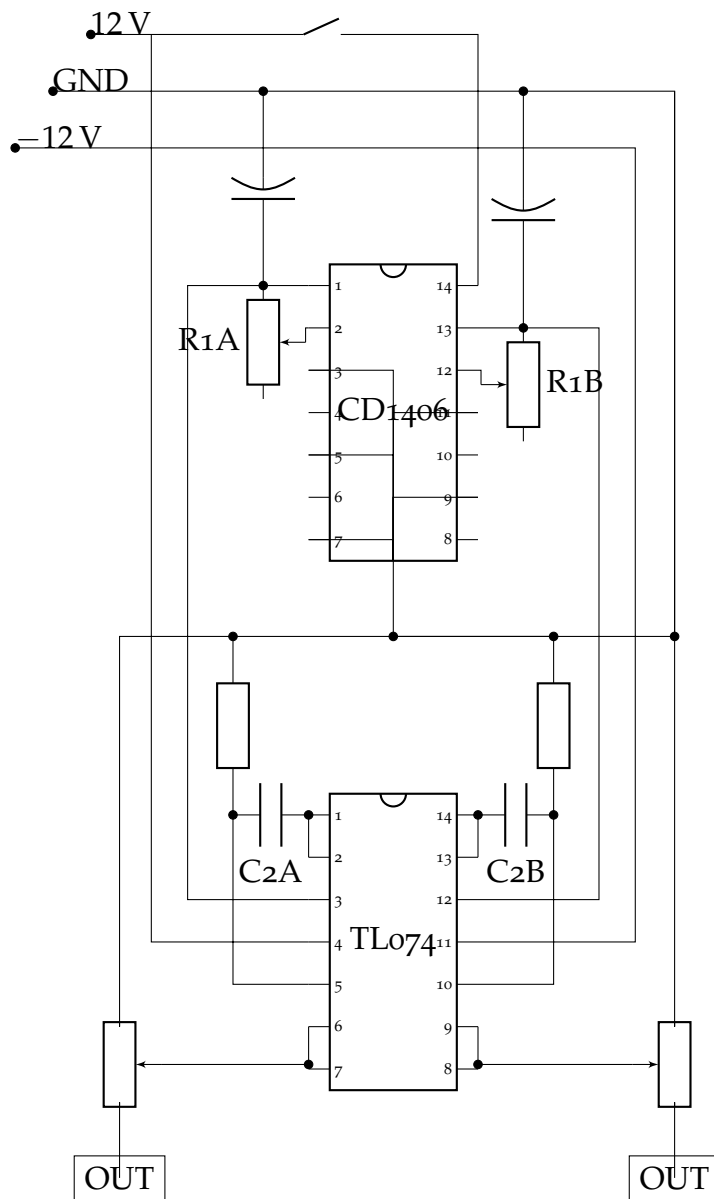
Resistor-Capacitor type Oszillator

Schematics

Oscillator logisch:



2x sqr Oszillator Modul:



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**, die unteren beiden dienen zur Steuerung der **Amplitude** des Signals. Die Audiobuchsen dienen als Output. Der Schalter links oben aktiviert das Modul, die Oszillatoren sind nicht separat voneinander an/ausschaltbar.

3.4.2 Mixer

Die Aufgabe eines Mixers ist die Zusammenführung (das "mischen") von mehreren (in diesem Fall bis zu drei) Signalen. Unser Mixer Modul besitzt neben dem regulären auch einen invertierenden Output, welcher positive Spannungen als negative Spannungen mit dem selben Betrag ausgibt und umgekehrt.

Spezifikationen

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

Elektronik

Schematics

Benutzung

Die zu mixenden Signale werden durch die oberen drei Audiobuchsen angeschlossen. Die unterste Audiobuchse liefert das Ausgangssignal. Als einfachen Patch könnte man die beiden Signale des **Oszillator x2** Moduls zusammenführen um beide Oszillatoren auf einmal zu hören.

3.4.3 Low Frequency Oscillator

Dieses Modul erzeugt oszillierende Spannungen im niedrigen Hertzbereich in Form einer Rechteckswelle und einer Dreieckswelle.

Spezifikationen

Elektronik

Wir verzichten bei unserer Ausführung des Moduls auf die vorhergesehenen 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 einen einzelnen Potentiometer gesteuert, die Amplituden sind separat anzusteuern.

Benutzung

LFOs können für eine große Anzahl an Zwecken genutzt werden, der wohl simpelste davon ist wohl, 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 VCAs um eine Funktion ähnlich eines Arpeggiators zu erfüllen.

Appendix

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Listings

Literaturverzeichnis

- Couper, M. P. (2001), 'Web Survey Research: Challenges and Opportunities', Proceedings of the Annual Meeting of the American Statistical Association.
- Diekmann, A. (1999), *Empirische Sozialforschung. Grundlagen, Methoden, Anwendungen*, fifth edn, Rowohlt's Enzyklopaedie, Reinbeck bei Hamburg.
- Dillman, D. A., Tortora, R. & Bowker, D. (1998), Principles for Constructing Web Surveys, Technical report, SESRC.
- Reips, U.-D. (2002), 'Standards for Internet-Based Experimenting', *Experimental Psychology* **49**(4), 243–256.