



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Entwicklung eines modularen Synthesizers: Voltage Controlled Oscillator

Studienarbeit im MSY

vorgelegt von

Dilman Viktor

Abgabe: 22.12.2022

Prüfer: M.Eng. Eduard Bluoss

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
2 Konzepte	2
2.1 Zielsetzung	2
2.2 Aufbau eines modularen Synthesizers	2
3 VCO	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 Schaltplan	6
3.3 Platine	10
3.4 Mechanischer Aufbau	12
Literaturverzeichnis	13

Abkürzungsverzeichnis

ADSR	<i>Attack Decay Sustain Release</i>
ERC	<i>Electrical Rule Check</i>
DRC	<i>Design Rule Check</i>
LFO	<i>Low Frequency Oscillator</i>
VCA	<i>Voltage Controlled Amplifier</i>
VCF	<i>Voltage Controlled Filter</i>
VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>

Abbildungsverzeichnis

2.1	Architektur eines modularen Synthesizers	3
3.1	Typische Signale bei analogen Synthesizern [3]	4
3.2	Oszillatorschaltung	5
3.3	Oszillator Signalverlauf	6
3.4	Schaltplan VCO	9
3.5	VCO Layout in Fusion 360	10
3.6	Erstellung der Einbauklindenbuchse in Fusion 360	11
3.7	VCO Leiterplatte	11
3.8	VCO Frontplatte	12

Tabellenverzeichnis

3.1 Zusammenfassung der Ein- und Ausgabeelemente des VCOs	8
---	---

Kapitel 1

Einleitung

Die Welt der Elektrotechnik ist mehr denn je im Umbruch und Wandel. Um für diese Herausforderungen gerüstet zu sein, ist es fundamental mit den Grundlagen dieses breitgefächerten Themengebietes bestens vertraut zu sein. Besonders im Bereich der analogen Schaltungstechnik ist es jedoch oft schwierig ein tieferes Verständnis für Vorgänge in komplexen Aufbauten zu erlangen. Die Mathematik bietet zwar meist sehr akkurate Mittel, um eine Schaltung ausreichend zu beschreiben, oft reicht dies jedoch für Anfänger nicht aus, um das Verhalten greifbar zu machen. Abhilfe kann hier die Visualisierung oder Simulation der entsprechenden Spannungsverläufe schaffen. Neben der visuellen Analyse kann jedoch auch der Klang von Signalverläufen tieferes Verständnis aufbauen. Durch die Durchführung dieser Projektarbeit soll besonders dieser Aspekt vertieft werden und somit der Wissensstand bezüglich analoger Schaltungstechnik im Allgemeinen ausgebaut werden. Darüber hinaus soll Elektrotechnik durch die elektronische Klangerzeugung für Außenstehende besser erfahrbar gemacht werden.

Kapitel 2

Konzepte

2.1 Zielsetzung

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, dient diese Projektarbeit zur Wissenserweiterung im Bereich der analogen Schaltungstechnik. Darüber hinaus soll im Zuge dieser Arbeit ein einsetzbarer modularer Synthesizer gebaut werden, der zu elektronischen Klangerzeugung genutzt werden kann. Der Synthesizer soll aus verschiedenen Modulen bestehen, welche unabhängig von einander genutzt werden können. Der weitere Aufbau wird in Abschnitt 2.2 genauer beschrieben.

2.2 Aufbau eines modularen Synthesizers

Wie bereits in Abschnitt 2.1 erläutert, besteht ein modularer Synthesizer aus mehreren vereinzelt Modulen. Diese Module können mit Kabeln verbunden und somit in Interaktion miteinander gebracht werden.

Um eine grundlegende Funktion zu ermöglichen, ist ein Basisumfang an Modulen nötig. Die hierfür nötigen Komponenten oder Module werden im Folgenden aufgelistet und kurz erläutert.

- **Netzteil:**
Das Netzteil ist elementarer Bestandteil des Synthesizers und stellt die benötigten Spannungslevel zur Versorgung der einzelnen Module bereit. Insbesondere für den Einsatz von Operationsverstärkern sind symmetrische Spannungsversorgungen erforderlich.
- **VCO:**
Der VCO (Voltage Controlled Oscillator) ist ein spannungsgesteuerter Oszillator und stellt die Basis bei analogen Synthesizern dar. Über eine Steuerspannung kann die Frequenz des erzeugten Signals und somit die Tonhöhe verändert werden.
- **VCA:**
Der VCA (Voltage Controlled Amplifier) stellt einen spannungsgesteuerten Verstärker da. Dieser ermöglicht durch Veränderung der Steuerspannung die Beeinflussung der Lautstärke des Signals.
- **ADSR:**
ADSR steht für die vier Phasen einer Hüllkurve: Attack, Decay, Sustain und Release. Eingesetzt werden ADSR-Hüllkurven, um den Verlauf von Lautstärke von Tönen zu steuern. Üblicherweise legt man die Hüllkurve an den Steuereingang eines spannungsgesteuerten Verstärkers (VCA).

- VCF:

Der VCF (Voltage Controlled Filter) ermöglicht durch Veränderung der Steuerspannung die Steuerung des Filterverhaltens. Durch Variieren der Eingangsspannung erfolgt die Veränderung der Filtereckfrequenz. Die Filterung verschiedener Frequenzanteile beeinflusst den Klang des Signals.

- Audio Mixer:

Der Audio Mixer verknüpft verschiedene Signale miteinander, wodurch neue Signalformen und Klänge generiert werden können.

- Sequenzer:

Der Sequenzer erzeugt seriell alternierende Spannungsfolgen, die durch verschiedene Kipp-schalter und Potentiometer sowohl die einzelnen Spannungspegel als auch die gesamte Geschwindigkeit des Signals variieren. In der Regel werden die Ausgangssignale des Sequenzers zur Ansteuerung weiterer Module – den sogenannten spannungsgesteuerten-Modulen – hergenommen. Neben den Oszillatoren bildet der Sequenzer somit die Basis der Synthesizer-Module.

- LFO:

Ein LFO (Low Frequency Oscillator) wird genutzt, um niederfrequente Signale zu erzeugen. Typischerweise wird er LFO genutzt, um andere Module anzusteuern.

Um den groben Aufbau und die dahinter liegende Struktur zu verdeutlichen, ist in Abbildung 2.1 die Architektur eines modularen Synthesizers aufgezeigt.

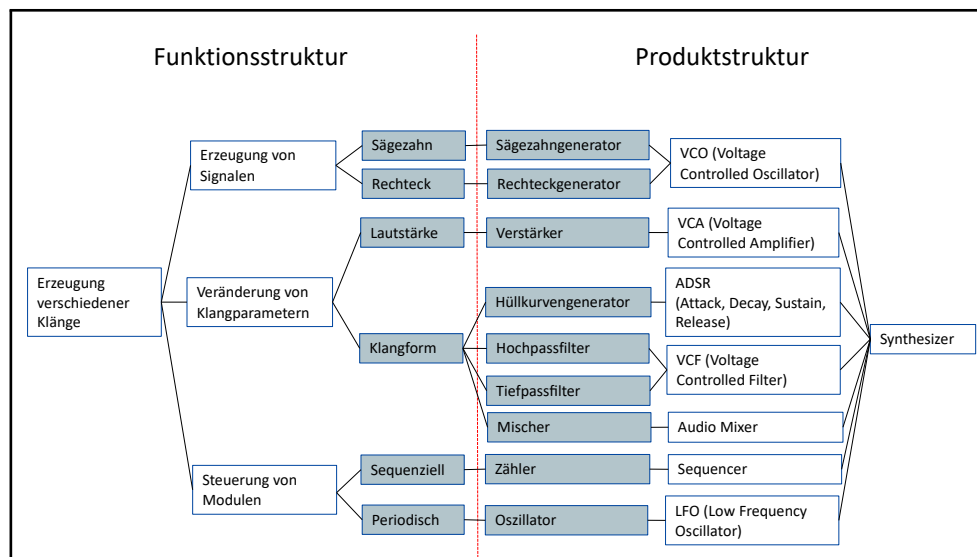


Abbildung 2.1: Architektur eines modularen Synthesizers

Kapitel 3

VCO

3.1 Allgemeines

Der VCO stellt die Basis aller analogen Synthesizers da. Mit einem spannungsgesteuerten Oszillator lassen sich verschiedene Signale generieren, deren Frequenz sich mit der angelegten Steuerspannung verändert. Analoge Synthesizer orientieren sich oft am 1V/Oktave-Standard. Dieser besagt, dass sich die Frequenz des Signals mit jedem Volt verdoppelt. Dies ist von Vorteil, da das Verhältnis zwischen Musiknoten und deren zugeordneten Frequenzen ebenfalls exponentiell ist. Die tiefste C-Note entspricht beispielsweise einer Frequenz von 16,35 Hz. Wenn man eine Oktave nach oben geht, verdoppelt sich die Frequenz beim nächsten C auf etwa 32 Hz. Typische Signale bei analogen Synthesizern können der Abbildung 3.1 entnommen werden. [3]







Waveform Name	Wave Shape
Sawtooth	
Ramp	
Rectangle/Pulse	
Square	
Sine	
Triangle	

Abbildung 3.1: Typische Signale bei analogen Synthesizern [3]

Bei dieser Umsetzung des VCOs wurde sich auf die Realisierung eines Sägezahn- und eines Rechtecksignals konzentriert, da diese aufgrund ihrem hohen Oberwellenanteil markant-hörbare Geräusche erzeugen. Ein Sinussignal hingegen stellt einen harmonischen Verlauf dar, der sich ebenfalls im Klang äußert. Hörbare Schwingungen werden mithilfe einer Oszillatorschaltung realisiert, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

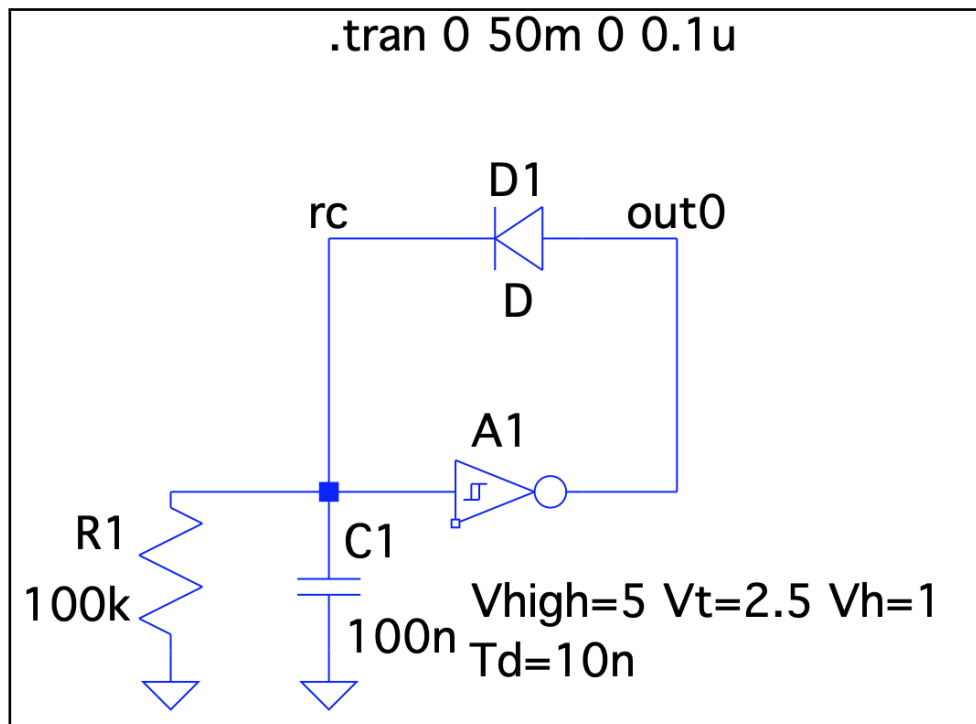


Abbildung 3.2: Oszillatorschaltung

Um die Oszillatorschaltung (vgl. Abbildung 3.2), die den Kern des VCOs darstellt, zu verstehen, erfolgt die Betrachtung des Punktes *rc*. Zu Beginn liegt keine Spannung an, weil der Kondensator leer ist und noch kein Strom durch die Diode fließt. Das bedeutet, dass am Ausgang des Schmitt-Trigger-Inverters eine Spannung anliegt, da der Eingang unter dem unteren Eingangsschwellenwert liegt. Dadurch erfolgt ein Stromfluss vom Ausgang des Schmitt-Triggers über die Diode zu dem Punkt *rc*. Da der Kondensator zunächst leer ist, fließt der ganze Strom in diesen hinein. Während sich der Kondensator auflädt, steigt die Spannung an dem Punkt *rc* rapide an. Dieser Spannungsanstieg wird vom Schmitt-Trigger-Eingang registriert. Als Reaktion darauf fällt der Ausgang auf 0 V ab, sobald der Kondensator aufgeladen ist und die Spannung die obere Eingangsschwelle überschreitet. Das bedeutet, dass kein zusätzlicher Strom durch die Diode fließt und sich der Kondensator wieder entlädt. Da der Widerstand die Strommenge begrenzt, die durchfließen kann, wird der Kondensator nicht sofort entladen. Auf dem Spannungsdiagramm entsteht also ein langsamer Abfall. Das geht so lange, bis der untere Schwellenwert des Schmitt-Trigger-Inverters erreicht wird. Sobald diese Schwelle auf dem Weg nach unten unterschritten ist, beginnt der Zyklus von neuem. Die Simulation der Schaltung ergibt den Spannungsverlauf am Punkt *rc* in Abbildung 3.3.

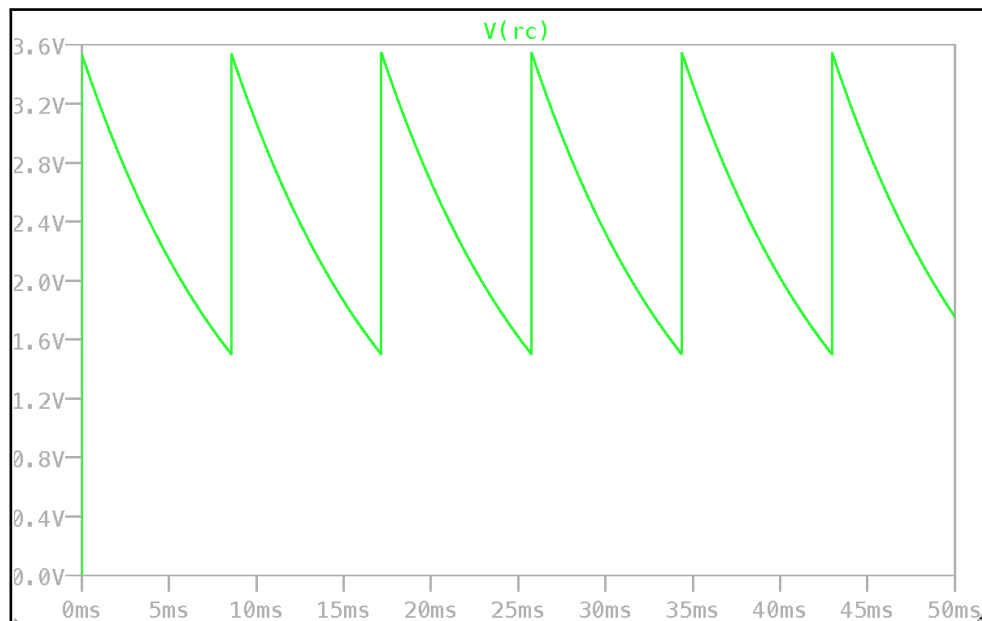


Abbildung 3.3: Oszillator Signalverlauf

Die Frequenz des entstandenen Sägezahnsignals hängt maßgeblich von dem Entladungsvorgang des Kondensators ab. Die Geschwindigkeit dieses Entladungsvorganges wird wiederum durch genau zwei Faktoren bestimmt: die Kapazität des Kondensators und der Wert des Widerstands. Um den VCO an die Volt/Oktave-Norm anzupassen, muss die Beziehung zwischen Spannungseingang und Frequenzgang ebenfalls exponentiell sein, da im Grunde genommen Spannungen auf Musiknoten abgebildet werden. Transistoren sind hier besonders geeignet, da das Verhältnis zwischen der an ihrer Basis angelegten Spannung und dem Strom, den sie zwischen Kollektor und Emitter fließen lassen, exponentiell ist. Die Basisspannung kann mithilfe eines Potentiometers eingestellt werden. Zu beachten ist allerdings, dass bei einem üblichen NPN-Transistor die Kollektor-Emitter Strecke ab etwa einer Basis-Spannung von 600 – 700 mV niederohmig wird und der Oszillator bei Anliegen dieser Schwellspannung nicht mehr schwingt. Liegt keine Spannung an, ist die Kollektor-Emitter Strecke hochohmig und der Oszillator kann ebenfalls nicht mehr schwingen. Der durch Ausprobieren ermittelte nutzbare Spannungsbereich beträgt etwa 350 – 550 mV. Dies wird mithilfe eines einstellbaren Spannungsteilers realisiert.

Die verwendete Schaltung in Abbildung 3.4 ist zu großen Teilen an ein *DIY VCO Kit* von Moritz Klein und Erica Synths angelehnt und wird im Folgenden näher erklärt. [1]

3.2 Schaltplan

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, erfolgt die Veränderung der Frequenz der Sägezahnschwingung (vgl. Abbildung 3.3) mithilfe eines NPN-Transistors, welcher im ersten Bereich des Schaltplans zu sehen ist. Der davor geschaltene PNP-Transistor dient zur Temperaturkompensation und fungiert als Emitterfolger, indem die an seiner Basis anliegende Spannung an den Emitter kopiert wird. Allerdings ist die am Emitter des PNP-Transistors anliegende Spannung um der Schwellspannung des Transistors höher. Bei Versuchen an der realen Schaltung betrug diese etwa 500 mV. Um den gewünschten Spannungsbereich an der Basis des NPN-Transistors von etwa

350 – 550 mV zu erreichen, muss das Potentiometer für die Einstellung der Basisspannung der Transistoren auch negative Spannungswerte liefern.

Aus diesem Grund wird im zweiten Bereich des Schaltplans das Potentiometer VR1 für die grobe Einstellung der Frequenz zwischen der negativen und positiven Versorgungsspannung angeschlossen. Da die Versorgungsspannung ± 12 V beträgt, wird diese mithilfe entsprechender Spannungsteiler (R1, R2, R3, R7, R8) um etwa das 50-fache auf ca. -130 – 20 mV verringert. Für die Feineinstellung der Frequenz (VR2) wird durch einen größeren Widerstand (R4) ein Teilerfaktor von etwa 500 realisiert, der eine Spannung im Bereich von -10 – 0 mV liefert. Mithilfe dem Eingang *CV_IN* (*Control Voltage In*) kann ein Sequencer mit einem Klinkenkabel angeschlossen werden, der eine Eingangsspannung von 0 – 5 V liefert. Um die Volt/Oktave-Norm anzuwenden wird aufgrund von Bauteiltoleranzen zusätzlich ein Präzisionsdrehpotentiometer (R8) verwendet, damit das Verhältnis des Spannungsteilers justiert werden kann. Die Klinkenbuchse *FM_IN* (*Frequency Modulation In*) stellt im Prinzip einen weiteren *Control Voltage*-Eingang dar, dessen Intensität zusätzlich durch ein Potentiometer eingestellt werden kann. An diesen kann beispielsweise ein LFO (*Low Frequency Oscillator*) angeschlossen werden. Um die Temperaturabhängigkeit der Schaltung zu verbessern, wird weiterhin an allen Eingängen ein NTC-Widerstand angebracht.

Um die resultierende Sägezahnschwingung nach außen führen zu können, wird ein entsprechender Buffer benötigt, der durch einen Operationsverstärker realisiert wird. Dies ist zwingend notwendig, da ansonsten in die Funktionsweise der Oszillatorschaltung eingegriffen wird. Dieser Buffer befindet sich im dritten Bereich des Schaltplans. Weiterhin wird eine AC-Kopplung mithilfe des Kondensators C2 und dem Widerstand R10 realisiert. Diese wird benötigt um eine eventuelle Offset-Spannung der Sägezahnschwingung zu entfernen, damit das Signal um den definierten Pegel von 0 V schwingt.

Im vierten Bereich des Schaltplans wird das Rechtecksignal generiert. Dies erfolgt durch eine Komparatorschaltung. An den invertierenden Eingang des Operationsverstärker wird die zu vergleichende Schwellspannung angelegt. Wird diese überschritten, liefert der Operationsverstärker 12 V. Bei Unterschreitung der Schwellspannung liefert dieser -12 V. Wird die zu vergleichende Spannung variiert, ändert sich das Pulsbreitenverhältnis. Zu beachten ist, dass die einstellbare Schwellspannung nicht höher als die Spannung des Signals selber sein darf, da dadurch der Ausgang einen festen Pegel erhält und kein oszillierendes Signal mehr darstellt. Die Spannung des Sägezahnsignals beträgt an diesem Punkt etwa $\pm 1,5$ V. Durch das Potentiometer VR4 kann die Pulsbreite des Rechtecksignals eingestellt werden. Mithilfe dem Spannungsteiler (R14, R17) wird die einstellbare Schwellspannung von ± 12 V auf etwa $\pm 1,5$ V begrenzt, damit sichergestellt wird, dass die Schwellspannung nicht höher als das Signal ist. Mithilfe dem Eingang *PWM_In* kann die Pulsbreite durch ein anderes Signal wie beispielsweise eines LFOs extern moduliert werden.

Im fünften Bereich des Schaltplans erfolgt die Anpassung auf einen definierten Pegel von 10 V peak-to-peak. Da die Sägezahnschwingung eine geringe Spannung aufweist, wird diese mithilfe einer nicht invertierenden Verstärkerschaltung vergrößert und an den Klinkenbuchsenausgang *SAW_OUT* geführt. Da der Spannungspegel des Rechtecksignals durch die Komparatorschaltung verstärkt wurde, muss dieser mithilfe eines Spannungsteilers (R15, R18) entsprechend re-

duziert werden. Schließlich wird das Ausgangssignal durch einen Buffer an den Ausgang *PULSE_OUT* geführt.

Der nicht eingerahmte Bereich im Schaltplan umfasst die Spannungsversorgung. Mithilfe von Schottky-Dioden (D2, D3) wird der Verpolungsschutz der Eingangsspannung von $\pm 12\text{ V}$ gewährleistet. Durch die Stützkondensatoren (C3 – C7) wird die Versorgungsspannung sowohl am Eingang der Spannungsversorgung am Wannenstecker als auch an den IC-Pins stabilisiert. Weiterhin werden nicht verwendete Eingänge des Schmitt-Triggers mit Masse verbunden.

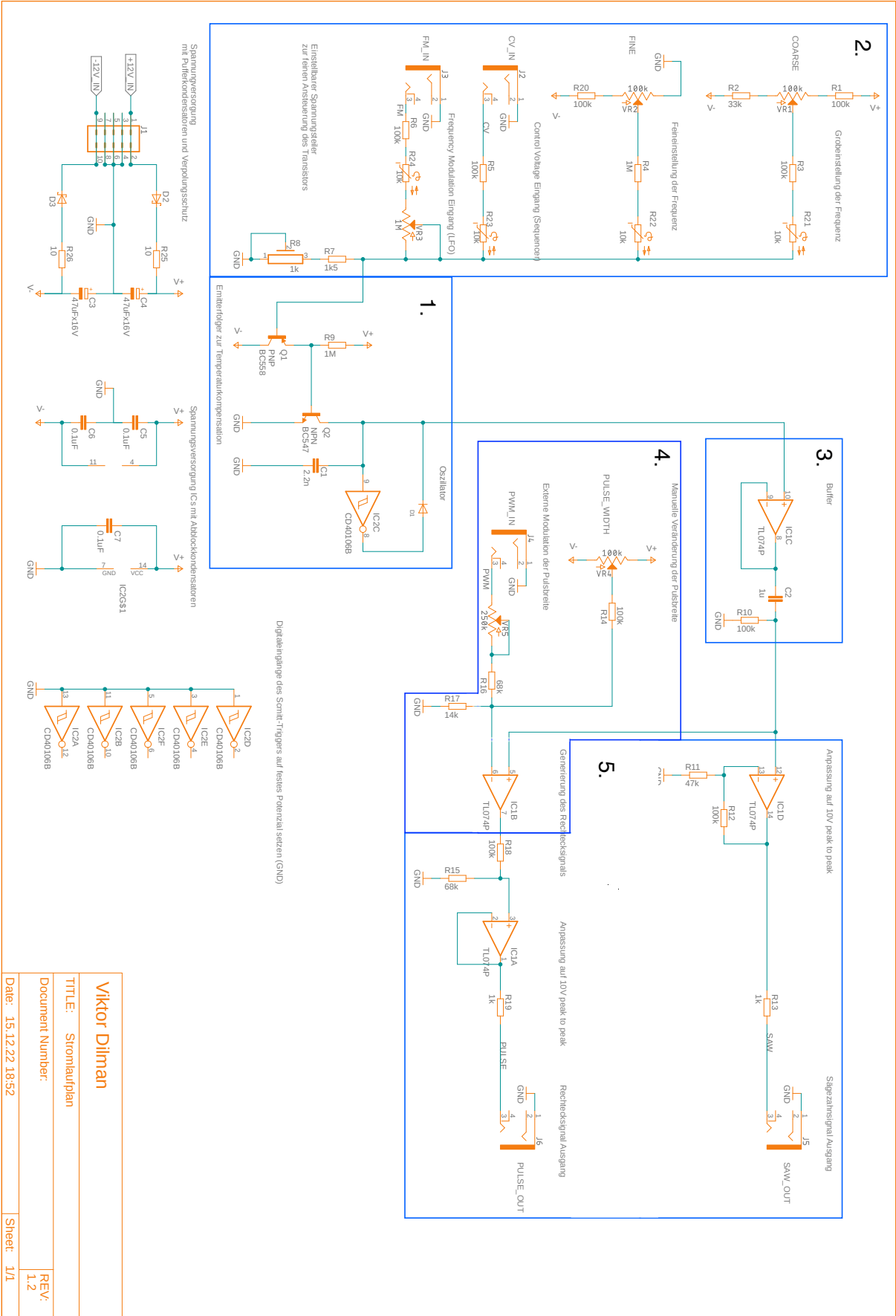
In der folgenden Tabelle werden die Ein- und Ausgabeelemente des VCOs zusammengefasst:

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Ein- und Ausgabeelemente des VCOs

Bauteilbezeichnung	Kurzbeschreibung	Funktion
VR1	<i>Coarse</i>	Grobeinstellung der Frequenz
VR2	<i>Fine</i>	Feineinstellung der Frequenz
VR3	<i>FM LVL</i>	Einstellung der Intensität des FM-Eingangs
VR4	<i>PWM</i>	Einstellung der Pulsweite
VR5	<i>PWM LVL</i>	Einstellung der Intensität des externen Signals zur Pulsweitenmodulation
J2	<i>CV IN</i>	Eingang der Steuerspannung
J3	<i>FM IN</i>	Eingang der Steuerspannung zusätzliche Einstellmöglichkeit der Intensität durch VR3
J4	<i>PWM IN</i>	Eingang des externen Signals zur Pulsweitenmodulation
J5	<i>Saw Out</i>	Ausgang des generierten Sägezahnsignals
J5	<i>Pulse Out</i>	Ausgang des generierten Rechtecksignals

Nachdem die Funktionsweise der Schaltung auf einem Breadboard verifiziert wurde, wird ein Platinenlayout erstellt. Auf die Vorgehensweise bei der Layouterstellung wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Abbildung 3.4: Schaltplan VCO



3.3 Platine

Nachdem der Schaltplan in Fusion 360 erstellt wurde und mit dem ERC (Electrical Rule Check)-Tool validiert wurde, erfolgt die Erstellung des Platinenlayouts (siehe Abbildung 3.5). Die äußeren Abmaße der Platine sind in Bezug auf die Höhe eines *Euro Racks* von 128,5 mm beschränkt. Gewählt wurde eine Platinenhöhe von 100 mm, damit ausreichend Platz zur Befestigung der Leiterplatte gewährleistet ist.

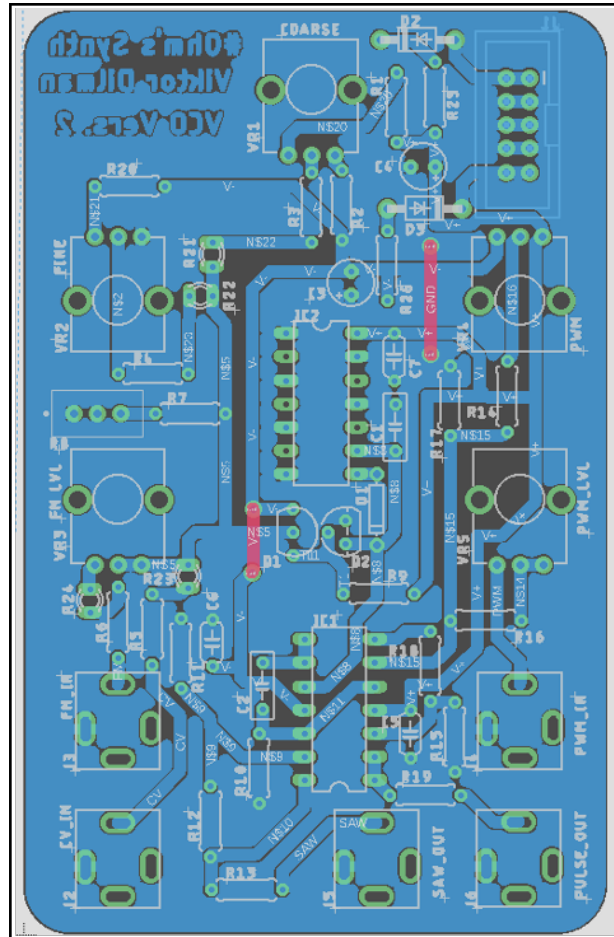


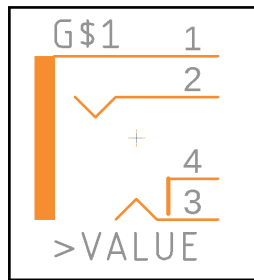
Abbildung 3.5: VCO Layout in Fusion 360

Die Bauteile wurden einerseits so positioniert, dass die Leiterbahnen möglichst kurz und überschneidungsfrei verlegt werden können. Andererseits wurden die Potentiometer und Klinkenbuchsen logisch so angeordnet dass die zu einer Einbauklinkenbuchse gehörenden Potentiometer übereinander liegen. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die Transistoren für die Temperaturkompensation möglichst nah aneinander positioniert werden. Zudem sind die Stützkondensatoren der ICs möglichst nah an den Versorgungspins der Bauteile zu positionieren.

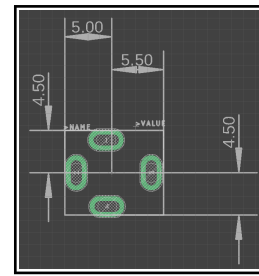
Bei der Erstellung der Platine wurde darauf geachtet möglichst eine Layer zu verwenden, um die Platine mit einer Platinenfräse herstellen zu können. Dies ist von Vorteil, da bei der professionellen Anfertigung von Platinen von der Bestellung bis zur Lieferung einige Wochen vergehen können. Ist der Zugang zu einer Fräse gegeben, kann die erstellte Platine sofort getestet und eventuelle Fehler ausgebessert werden.

Damit die Leiterplatte mit einer Platinenfräse angefertigt werden kann, ist eine relativ dicke Leiterbahnbreite erforderlich. Gewählt wurde deshalb eine Leiterbahnbreite von 50 mil. An den Stellen, an denen die Leiterbahnen nicht überschneidungsfrei verlegt werden konnten, wurden *Vias* hinzugefügt und die Leiterbahn auf der anderen Seite fortgeführt. Auf der gefrästen Platinen können diese *Vias* mit Brücken verbunden werden.

Da für die verwendeten Einbauklinkenbuchsen keine passende Bibliothek existiert, musste diese manuell angelegt werden. Dafür wurde ein Symbol einer ähnlichen Klinkenbuchse verwendet und das Footprint nach dem Datenblatt des Herstellers erstellt wie in Abbildung 3.6 zu sehen. [2]



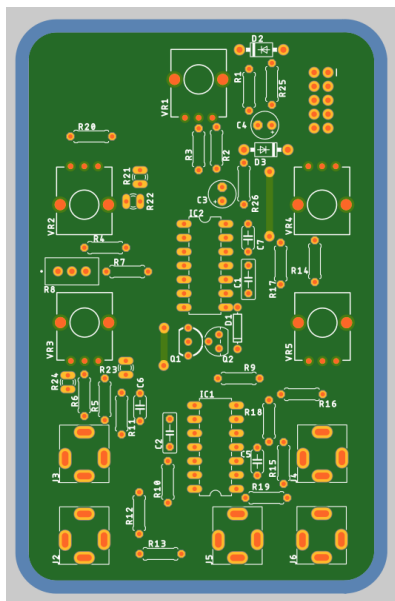
(a) Verwendetes Symbol



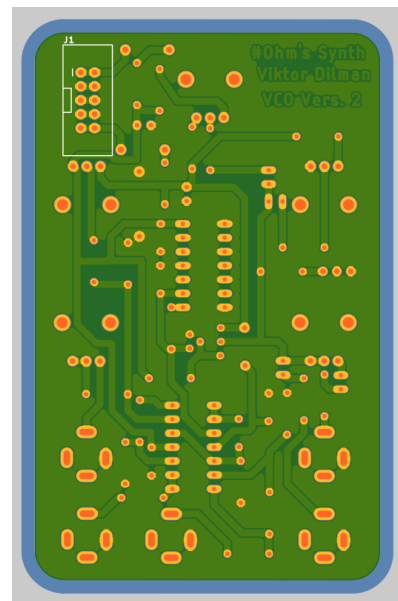
(b) Erstelltes Footprint

Abbildung 3.6: Erstellung der Einbauklinkenbuchse in Fusion 360

Nachdem die erstellte Leiterplatte mit dem DRC (*Design Rule Check*)-Tool in *Fusion 360* auf Fehlerfreiheit geprüft wurde, erfolgt der Export der *Gerber-Files*. Die Leiterplatte wurde dabei mit einer Platinenfräse von *Bantam Tools* hergestellt. Anschließend erfolgt die Bestückung der Leiterplatte mit den im Stromlaufplan verwendeten Komponenten und das Testen der Platine. Ist die Funktion der gefrästen Leiterplatte geprüft, erfolgt die Bestellung bei dem Platinenhersteller *Aisler*. In Abbildung 3.7a ist die Vorderseite der Platine zu sehen. Die Abbildung 3.7b zeigt hingegen die Rückseite der VCO-Leiterplatte.



(a) Vorderseite



(b) Rückseite

Abbildung 3.7: VCO Leiterplatte

3.4 Mechanischer Aufbau

Mithilfe der *Fusion 360*-Funktionalität der Übertragung einer 2D- auf eine 3D-Leiterplatte wurde eine Abdeckung konstruiert (siehe Abbildung 3.8). Dies hat den Vorteil, dass für die Potentiometer und Klinkenbuchsen die Aussparungen an der Frontplatte exakt positioniert werden können. Die Abdeckplatte wird mithilfe von Gewindeschrauben der Einbauklinkenbuchsen an die Platine befestigt. Weiterhin werden auf die Potentiometer Abdeckkappen angebracht, die zusätzlichen Halt bieten. An den Ecken der Frontplatte werden Aussparungen vorhergesehen, um das Modul in einem Eurorack-Gehäuse befestigen zu können. Schließlich wird die Frontplatte aus Plexiglas mit einem *Laser-Cutter* gefertigt.

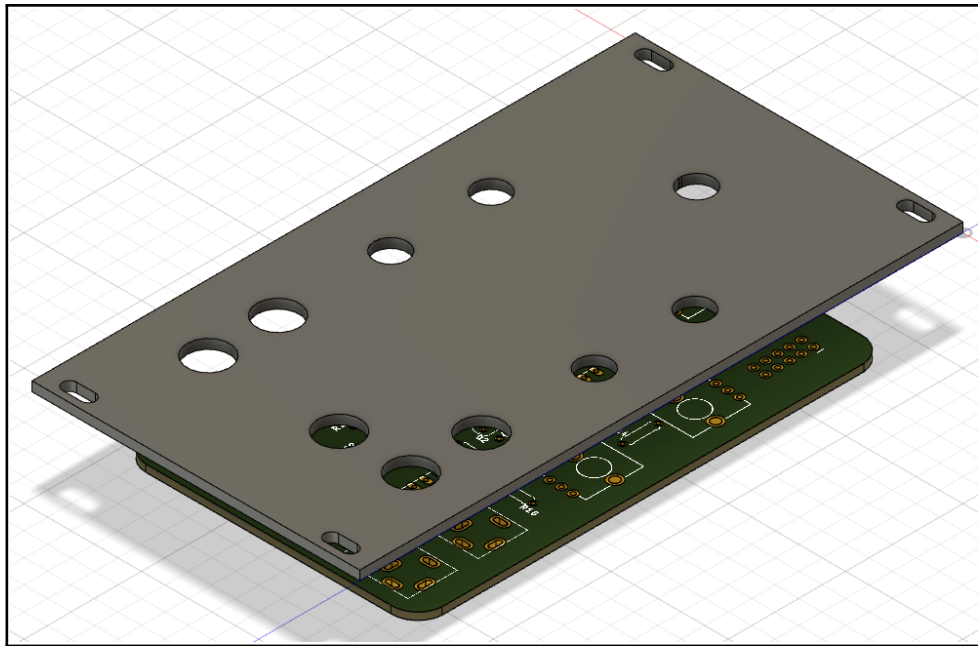


Abbildung 3.8: VCO Frontplatte

Literaturverzeichnis

- [1] Erica Synths Moritz Klein. *VCO MANUAL v2*. URL: https://www.ericasynts.lv/media/VCO_MANUAL_v2.pdf (besucht am 21.12.2022).
- [2] Reichelt. *Datenblatt Einbau-Klinkenbuchse CLIFF FC681374V*. URL: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/C160/CLIFFFC681374V.pdf> (besucht am 21.12.2022).
- [3] Ray Wilson. *Make: Analog Synthesizers*. 2013.