



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Entwicklung eines modularen Synthesizers

Projektarbeit im MSY

vorgelegt von

Altaher Ahmad, Balbach Thomas, Dilman Viktor, Kirschner Christoph,
Sedlmeier Toni

Ausgabe: 18.10.2022

Abgabe: –

Prüfer: Prof. Dr.Alexander von Hoffmann

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 Netzteil	4
3.1 Allgemeines	4
3.2 Schaltplan	4
3.3 Umsetzung	4
4 LFO	5
4.1 Allgemeines	5
4.2 Schaltplan	5
4.3 Platine	7
4.4 Mechanischer Aufbau	9
5 VCO	11
5.1 Allgemeines	11
5.2 Schaltplan	13
5.3 Platine	17
5.4 Mechanischer Aufbau	19
6 Sequenzer	20
6.1 Allgemeines	20
6.2 Schaltplan	20
6.3 Platine	23
6.4 Mechanischer Aufbau	24
7 Filter	25
7.1 Allgemeines	25
7.2 Schaltplan	26
7.3 Platine	27
7.4 Mechanischer Aufbau	27

8	Mischer	29
8.1	Allgemeines	29
8.2	Schaltplan	29
8.3	Platine	31
9	Fazit	32

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>
VCR	<i>Voltage Controlled Resistor</i>

Abbildungsverzeichnis

2.1 Architektur eines modularen Synthesizers	3
4.1 Fusion360 Schaltplan des LFO	6
4.2 Ausschnitt des LFO-Platinen-Layouts aus Fusion360 (Unterseite)	7
4.3 3D-Ansicht der LFO-Platine in Bantam-Tools-Software (Platinen-Fräße) [bantam]	8
4.4 3D-Darstellung der LFO-Platine mit Frontplatte	9
4.5 Ausschnitt aus “Prusa Slicer“ beim Vorbereiten des 3D-Drucks für die LFO-Platine [prusa]	10
5.1 Typische Signale bei analogen Synthesizern [MakeSynth]	11
5.2 Oszillatorschaltung	12
5.3 Oszillator Signalverlauf	13
5.4 Schaltplan VCO	16
5.5 VCO Layout in Fusion 360	17
5.6 Erstellung der Einbauclinkenbuchse in Fusion 360	18
5.7 VCO Leiterplatte	19
5.8 VCO Frontplatte	19
6.1 Schaltplan der Sequenzer-Platine	21
6.2 Ausschnitt des SEQ-Platinen-Layouts aus Fusion360	23
6.3 3D-Darstellung der SEQ-Platine mit Frontplatte	24
7.1 Frequenzgang eines digitalen Filters	25
7.2 Frequenzgang des Filters bei CV-Sweep CV1 -4V bis +4V	26
7.3 Frequenzgang des Filters bei Potentiometer-Sweep VR1 0 bis 100k Ω	27
7.4 Platinen-Layout des VCF	27
7.5 3D-Darstellung der VCF-Frontplatte	28
8.1 Ausschnitt des Mischer-Schaltplanes aus Fusion360 [mixer__manual]	30
8.2 Ausschnitt des Mischer-Platinen-Layouts aus Fusion360 (Unterseite)	31

Tabellenverzeichnis

5.1 Zusammenfassung der Ein- und Ausgabeelemente des VCOs	15
---	----

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.

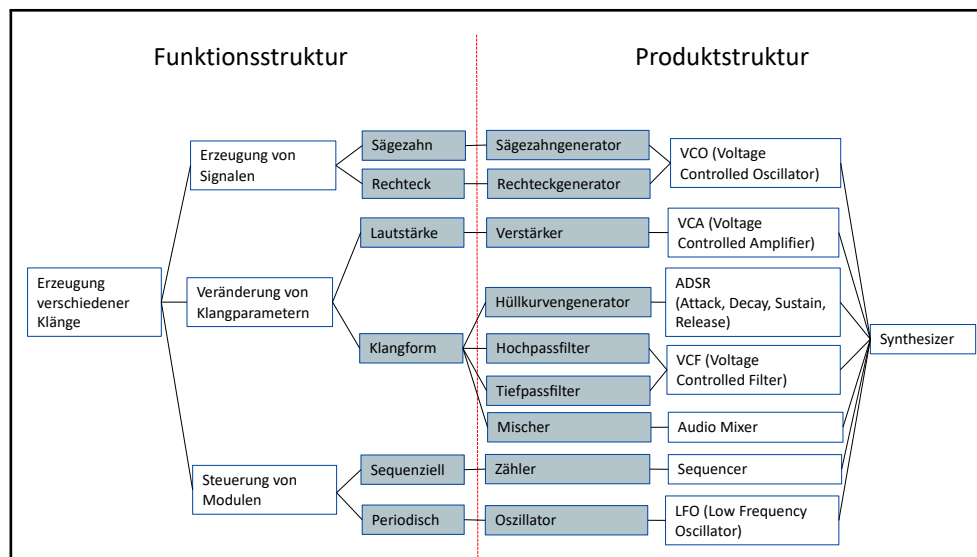


Abbildung 2.1: Architektur eines modularen Synthesizers

Kapitel 3

Netzteil

3.1 Allgemeines

Um eine fehlerfreie Funktion aller weiteren Module zu gewährleisten, ist es wichtig, dass eine geeignete Spannungsversorgung bereitgestellt wird. Insbesondere für die Opamp-Schaltungen ist es wichtig, dass eine störfreie symmetrische Spannung bereitgestellt wird. Im Bereich der modularen Synthesizer wird hier typischerweise eine Spannung von $\pm 12\text{ V}$ benötigt. Diese Spannungspegel werden durch eine geeignete Beschaltung von Dioden und Kondensatoren generiert, welche in Abschnitt 3.2 bzw. 3.3 genauer erläutert wird. Hierbei wird die für modulare Synthesizer typischerweise eingesetzte Wannenstecker-Belegung verwendet. Diese wird entsprechend in allen Modulen eingesetzt!

3.2 Schaltplan

bla bla bla

3.3 Umsetzung

bla bla bla

Kapitel 4

LFO

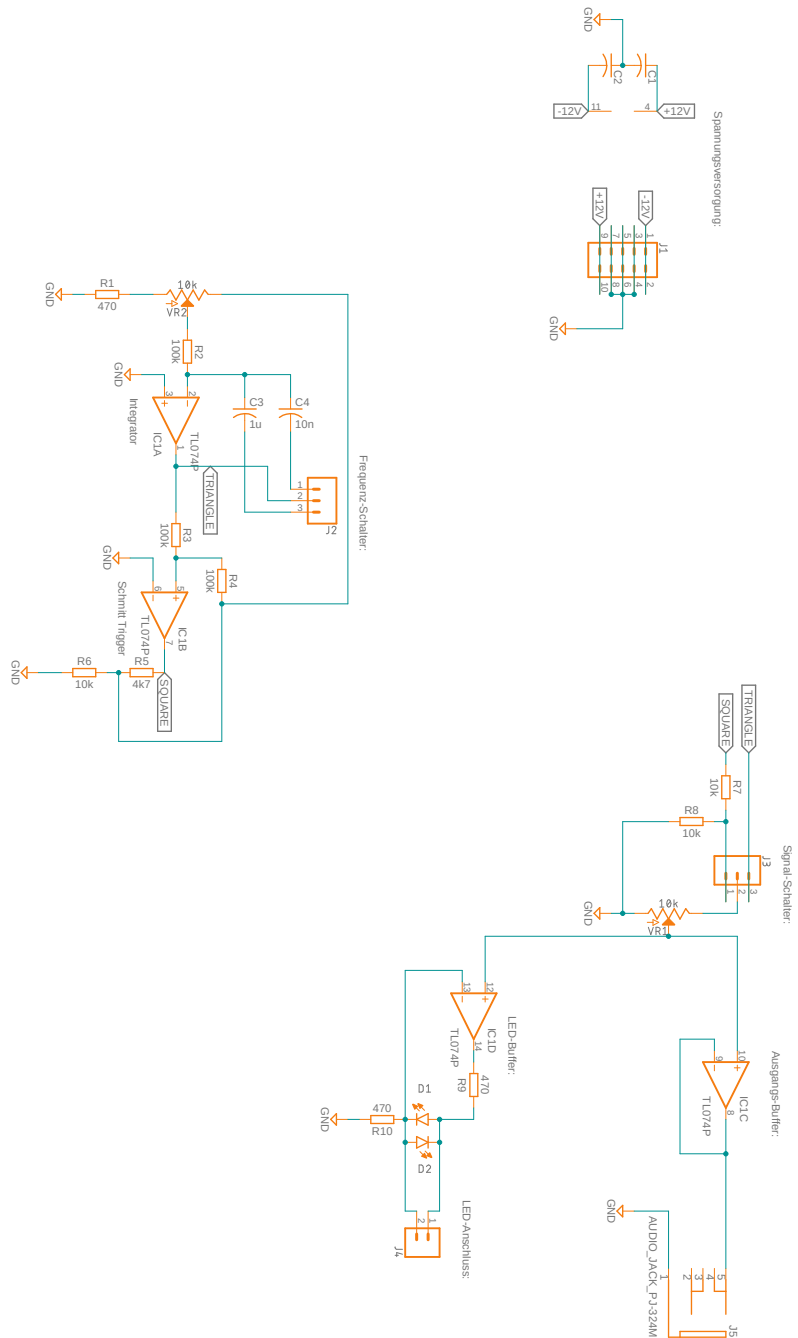
4.1 Allgemeines

Wie bereits in Kapitel beschrieben, wird der LFO genutzt, um niederfrequente Signale zu erzeugen. Diese Signale werden typischerweise zur Steuerung von nachgelagerten Modulen, wie etwa dem LFO (siehe Kapitel 5), verwendet. Hierdurch kann beispielsweise die Frequenz des VCO angepasst werden. Neben der Frequenz, die der LFO ausgibt, ist auch die entsprechende Signalform für den Klang entscheidend. Hier sind beispielsweise Signalformen, wie Dreieck oder Rechteck möglich.

4.2 Schaltplan

Im Folgenden wird näher auf den Schaltplan des LFO eingegangen, welcher in Abbildung 4.1 zu sehen ist [lfo_manual]. Ein Bauteil von zentraler Bedeutung ist hierbei der Vierfach-Operationsverstärker TL074P. In der gezeigten Schaltung wird dieser als Integrator, Schmitt Trigger, Buffer und LED-Treiber verwendet. Die grundlegende Funktionsweise dieser Funktionsgruppen wird in Abschnitt 5 erläutert. Aus diesem Grund wird nicht weiter auf die Funktionsweise eines Oszillators eingegangen.

Abbildung 4.1: Fusion360 Schaltplan des LFO



Christoph Kirschner

TITLE: LFO_Vers_1

Document Number:

REV:

Date: 08.12.2022 10:44

Sheet: 1/1

4.3 Platine

In Abbildung 4.2 ist die untere Lage der Leiterplatte in blau dargestellt. Beim Erstellen der Platine wurde der Fokus auf die Produzierbarkeit mittels CNC-Fräße gelegt. Hierbei ist die Lagenzahl der Platine auf maximal zwei Lagen begrenzt, wobei nur einlagiges Platinenrohmaterial zur Verfügung stand. Um diese Limitation zu umgehen wurde versucht alle Leiterbahnen auf eine Platinen-Lage zu entflechten. Da manche Leiterbahnen nicht auf der Unterseite platziert werden konnten, wurden für die restlichen Bahnen auf der Oberseite Verbindungsdrähte verwendet. Hierfür wurden jeweils Via-Verbindungen mit größerem Bohrungsdurchmesser vorgesehen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Platine ohne Mehraufwand auch professionell produziert werden kann. Die beschriebene Vorgehensweise wurde auch bei den übrigen Platinen dieser Projektarbeit angewendet.

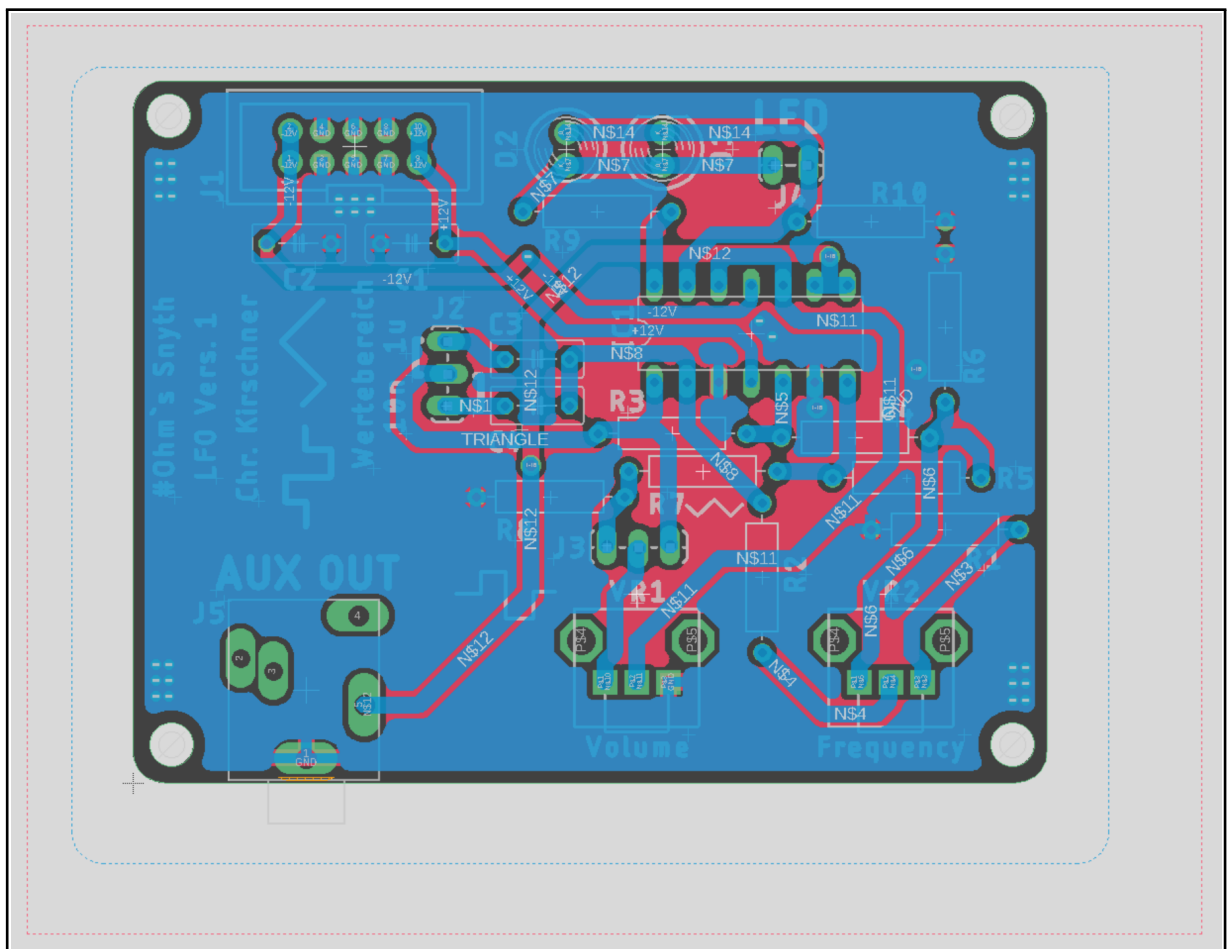


Abbildung 4.2: Ausschnitt des LFO-Platinen-Layouts aus Fusion360 (Unterseite)

Wie bereits beschrieben, wurde die Platine mit einer Platinenfräße angefertigt. Hierbei wurde die CNC-Fräße “Othermachine“ von “Bantam Tools“ verwendet. In Abbildung 4.3 ist ein Ausschnitt aus der Steuer-Software von “Bantam Tools“ gezeigt. Mit Hilfe dieser Software können Gerber-Dateien oder brd-Dateien (Eagle) importiert werden und Fräßabläufe erzeugt werden.

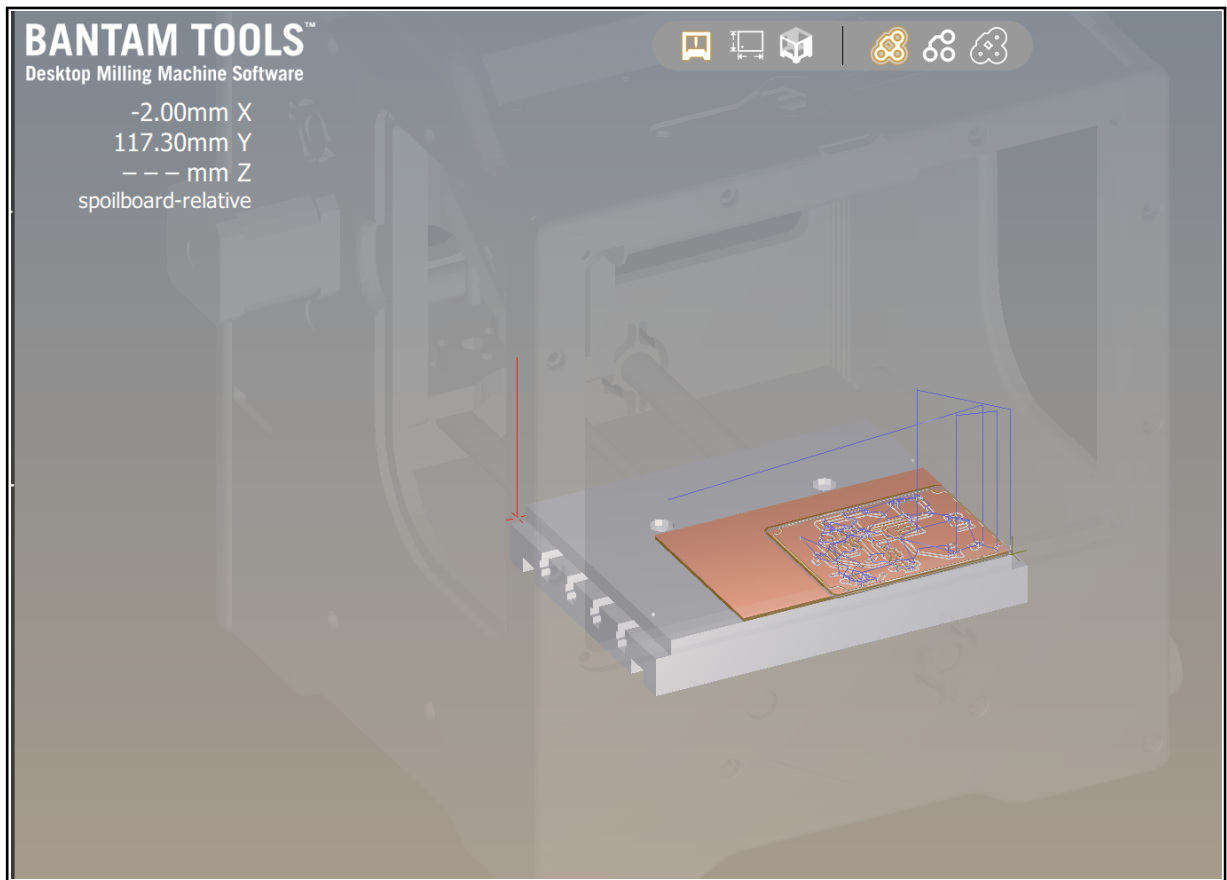


Abbildung 4.3: 3D-Ansicht der LFO-Platine in Bantam-Tools-Software (Platinen-Fräße)
[bantam]

4.4 Mechanischer Aufbau

Um die LFO-Platine in einem Rack-System befestigen zu können, ist es nötig eine entsprechende Abdeckplatte mit Montagelöchern an der Platine anzubringen. Die Befestigung der Frontplatte an der LFO-Platine wird über das Gewinde an der AUX-Buchse realisiert. Dies hat sich bei lediglich einer Buchse als nicht ausreichend herausgestellt. Aus diesem Grund wurde die Platine zusätzlich mit Epoxid-Kleber an der Abdeckplatte fixiert.

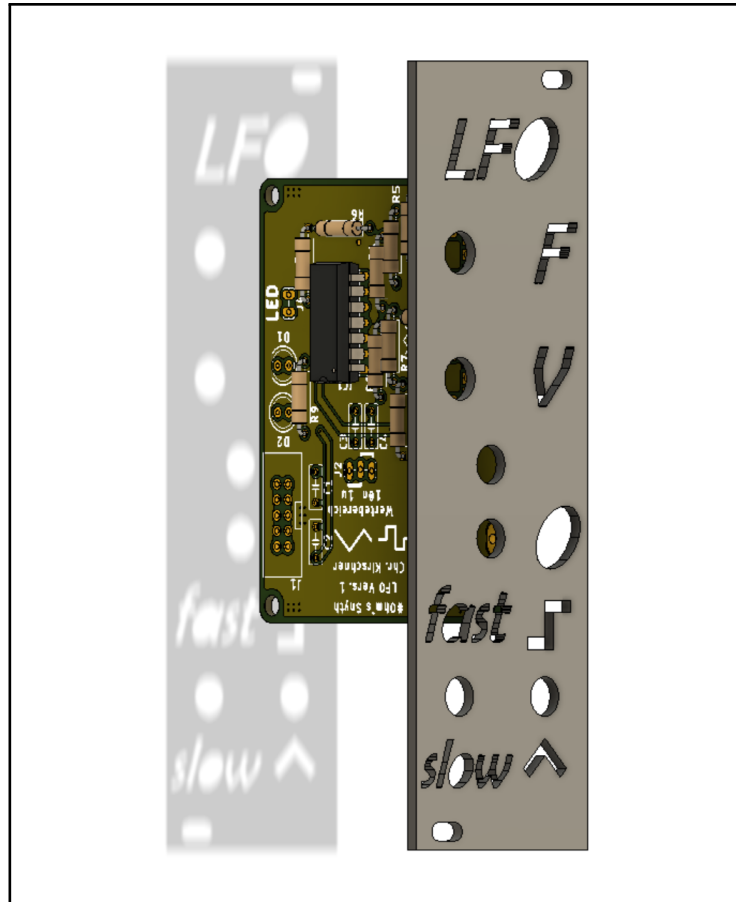


Abbildung 4.4: 3D-Darstellung der LFO-Platine mit Frontplatte

Wie in 4.4 abgebildet, wurden die Beschriftungen als Ausschnitte in der Frontplatte angebracht. Hierdurch kann die Frontplatte mit einem Lasercutter kostengünstig produziert werden und es ist somit keine weitere Nachbearbeitung der Frontplatte nötig.

Um bereits vor dem Lasercutten der Frontplatte die grundsätzliche Tauglichkeit der Konstruktion erproben zu können, wurde mittels eines 3D-Drucker die Frontplatte gedruckt. Hierbei wurde ein “Prusa Mini“ und die dazugehörige “Prusa Sliver“-Software verwendet. Ein Ausschnitt dieser Software ist in Abbildung 4.5 zusehen.

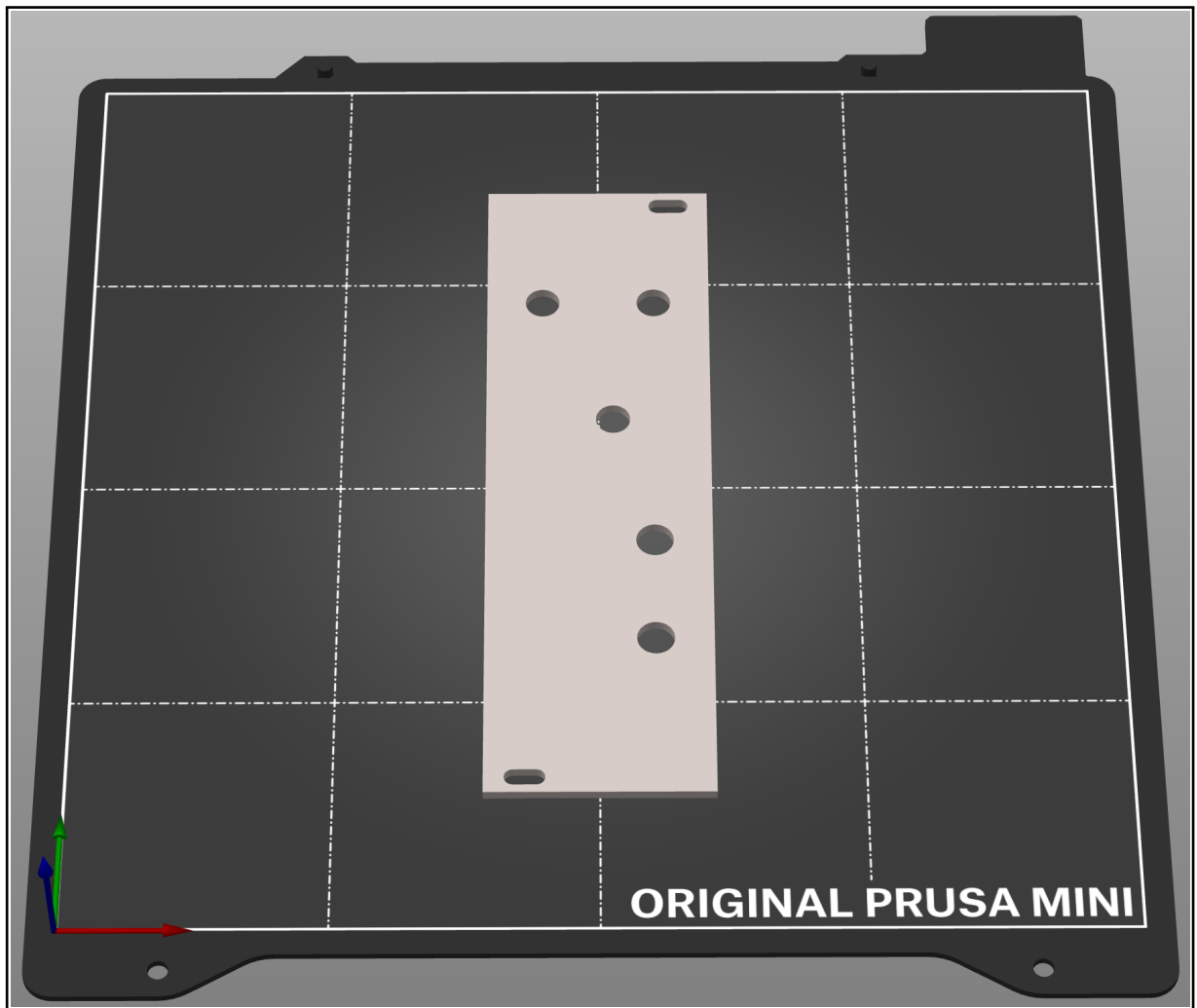


Abbildung 4.5: Ausschnitt aus “Prusa Slicer“ beim Vorbereiten des 3D-Drucks für die LFO-Platine [prusa]

Die in diesem Abschnitt aufgezeigte Vorgehensweise beim Prototypen der Abdeckplatte ist exemplarisch für alle Module dieser Projektarbeit. Aus diesem Grund wird in den folgenden Kapiteln nicht näher darauf eingegangen.

Kapitel 5

VCO

5.1 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 5.1 entnommen werden. [MakeSynth]







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

Abbildung 5.1: Typische Signale bei analogen Synthesizern [MakeSynth]

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.

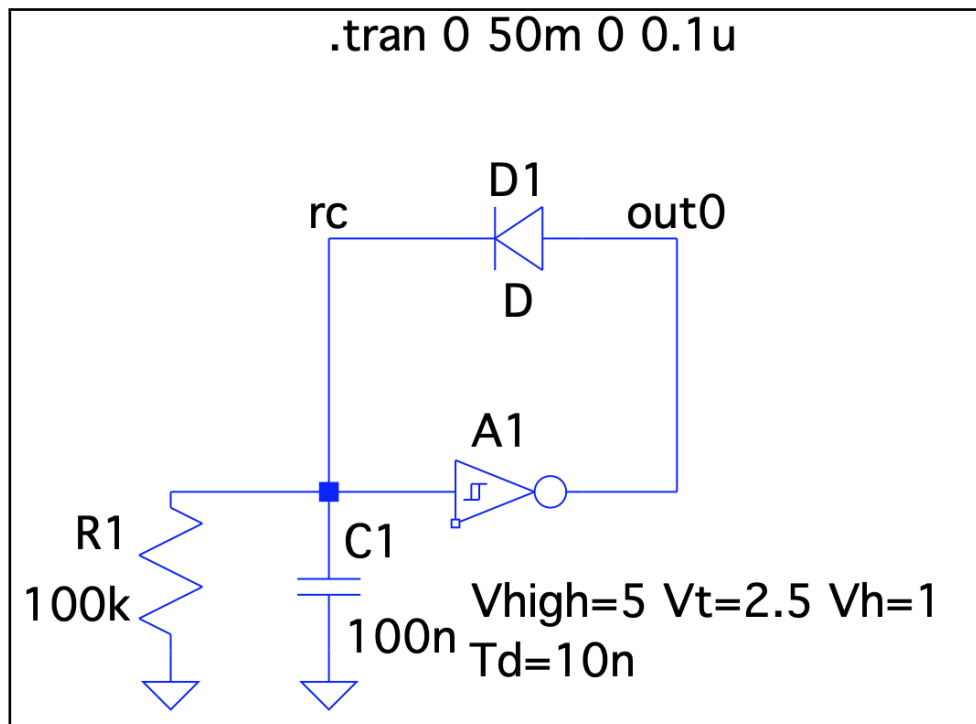


Abbildung 5.2: Oszillatorschaltung

Um die Oszillatorschaltung (vgl. [Abbildung 5.2](#)), 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 5.3](#).

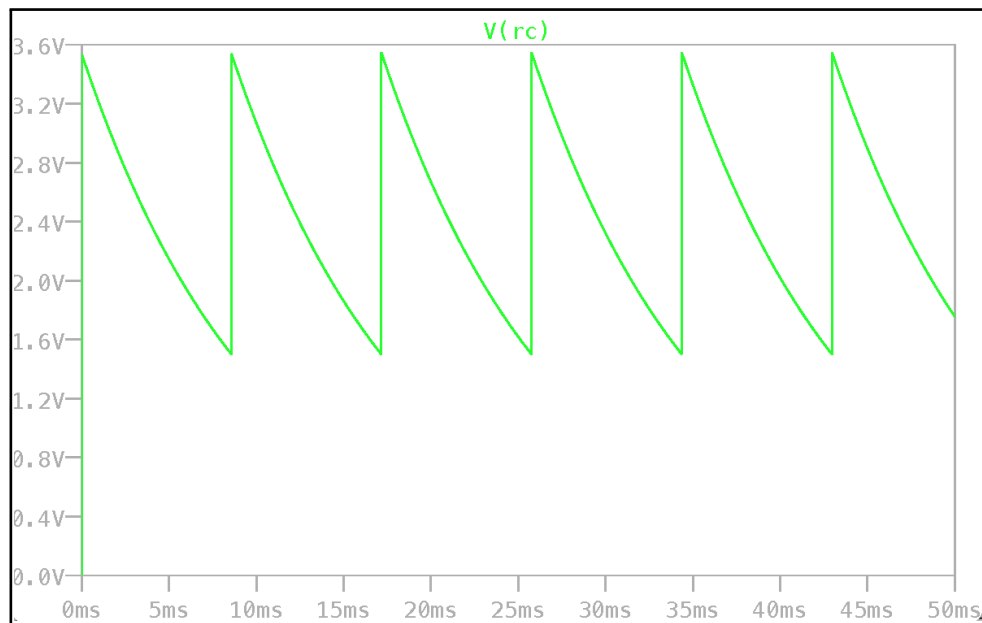


Abbildung 5.3: Oszillator Signalverlauf

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 5.4 ist zu großen Teilen an ein *DIY VCO Kit* von Moritz Klein und Erica Synths angelehnt und wird im Folgenden näher erklärt. [[vco_manual](#)]

5.2 Schaltplan

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, erfolgt die Veränderung der Frequenz der Sägezahnschwingung (vgl. Abbildung 5.3) 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.

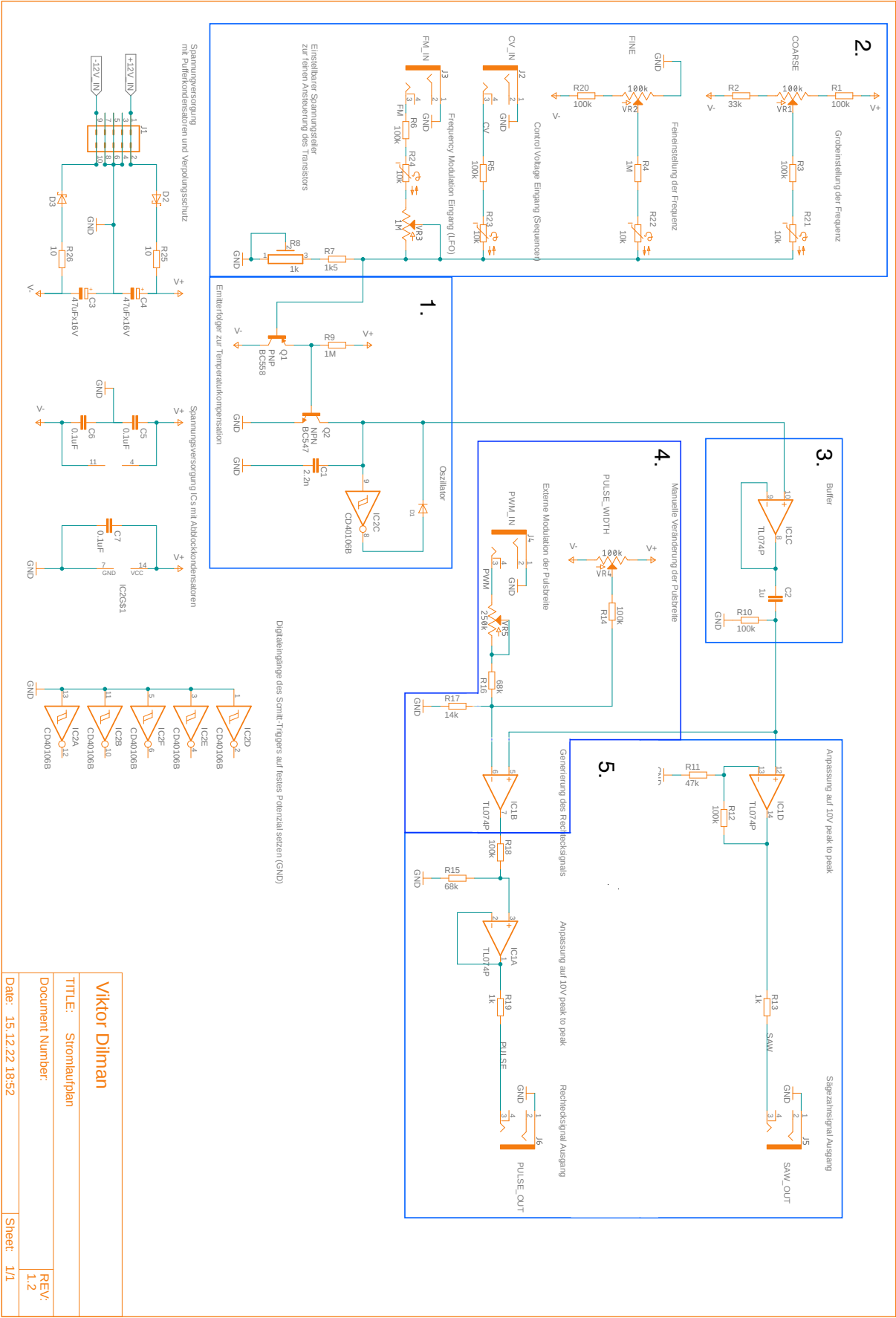
In der folgenden Tabelle werden die Ein- und Ausgabeelemente des VCOs zusammengefasst:

Tabelle 5.1: 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 5.4: Schaltplan VCO



5.3 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 5.5). 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.

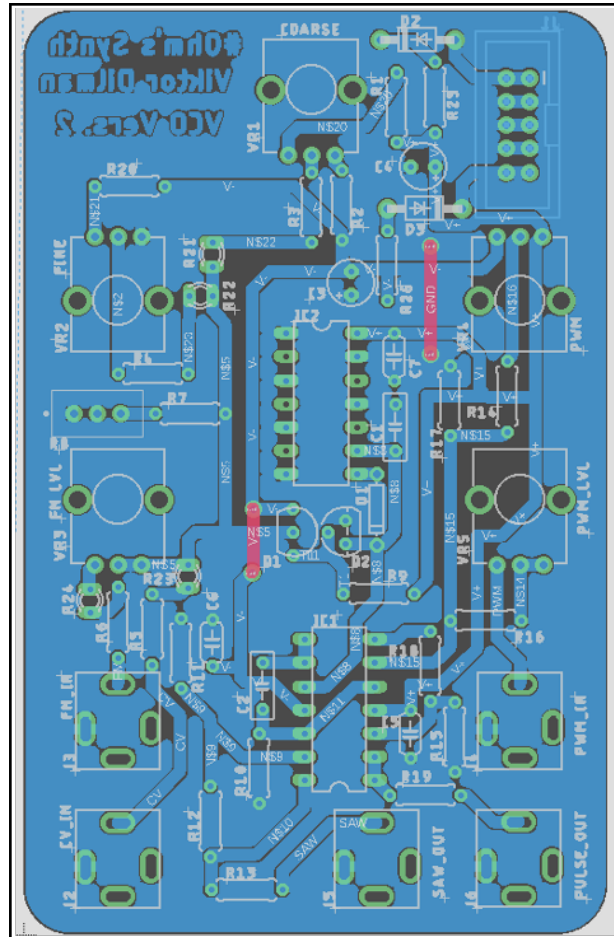


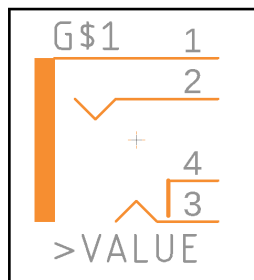
Abbildung 5.5: VCO Layout in Fusion 360

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.

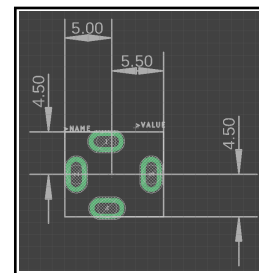
Bei der Erstellung der Platine wurde darauf geachtet, möglichst eine Layer zu verwenden, um die Platine mit einer Platinenfräse herstellen zu können. Dies ist von Vorteil, da bei der professionellen Anfertigung von Platinen von der Bestellung bis zur Lieferung einige Wochen vergehen können. Ist der Zugang 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 Platine 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 5.6 zu sehen. [cliff]



(a) Verwendetes Symbol



(b) Erstelltes Footprint

Abbildung 5.6: 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 5.7a ist die Vorderseite der Platine zu sehen. Die Abbildung 5.7b zeigt hingegen die Rückseite der VCO-Leiterplatte.

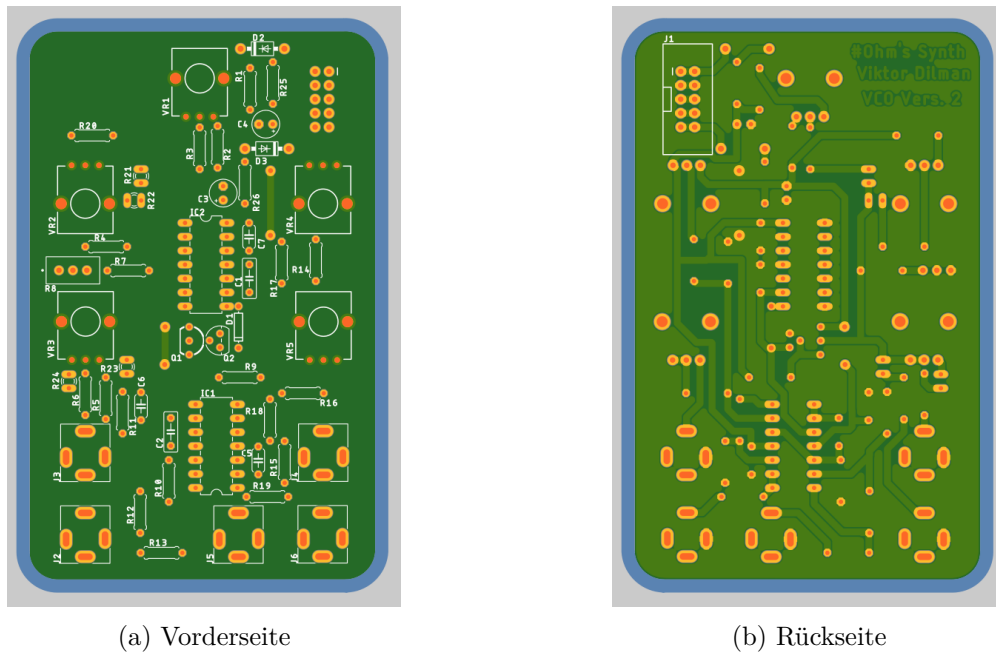


Abbildung 5.7: VCO Leiterplatte

5.4 Mechanischer Aufbau

Mithilfe der *Fusion 360*-Funktionalität der Übertragung einer 2D- auf eine 3D-Leiterplatte wurde eine Abdeckung konstruiert (siehe Abbildung 5.8). 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.

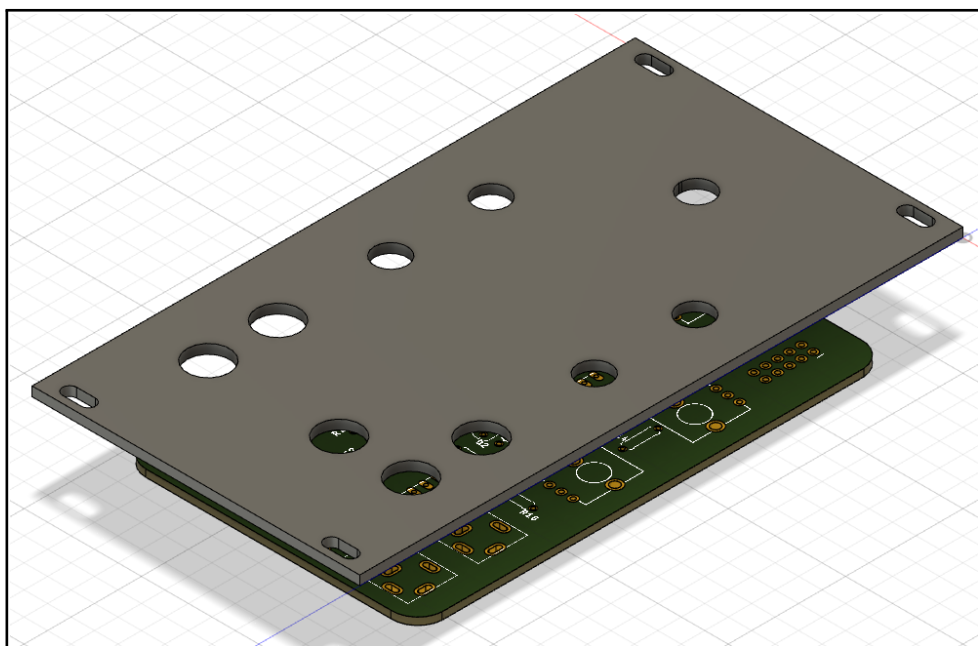


Abbildung 5.8: VCO Frontplatte

Kapitel 6

Sequenzner

6.1 Allgemeines

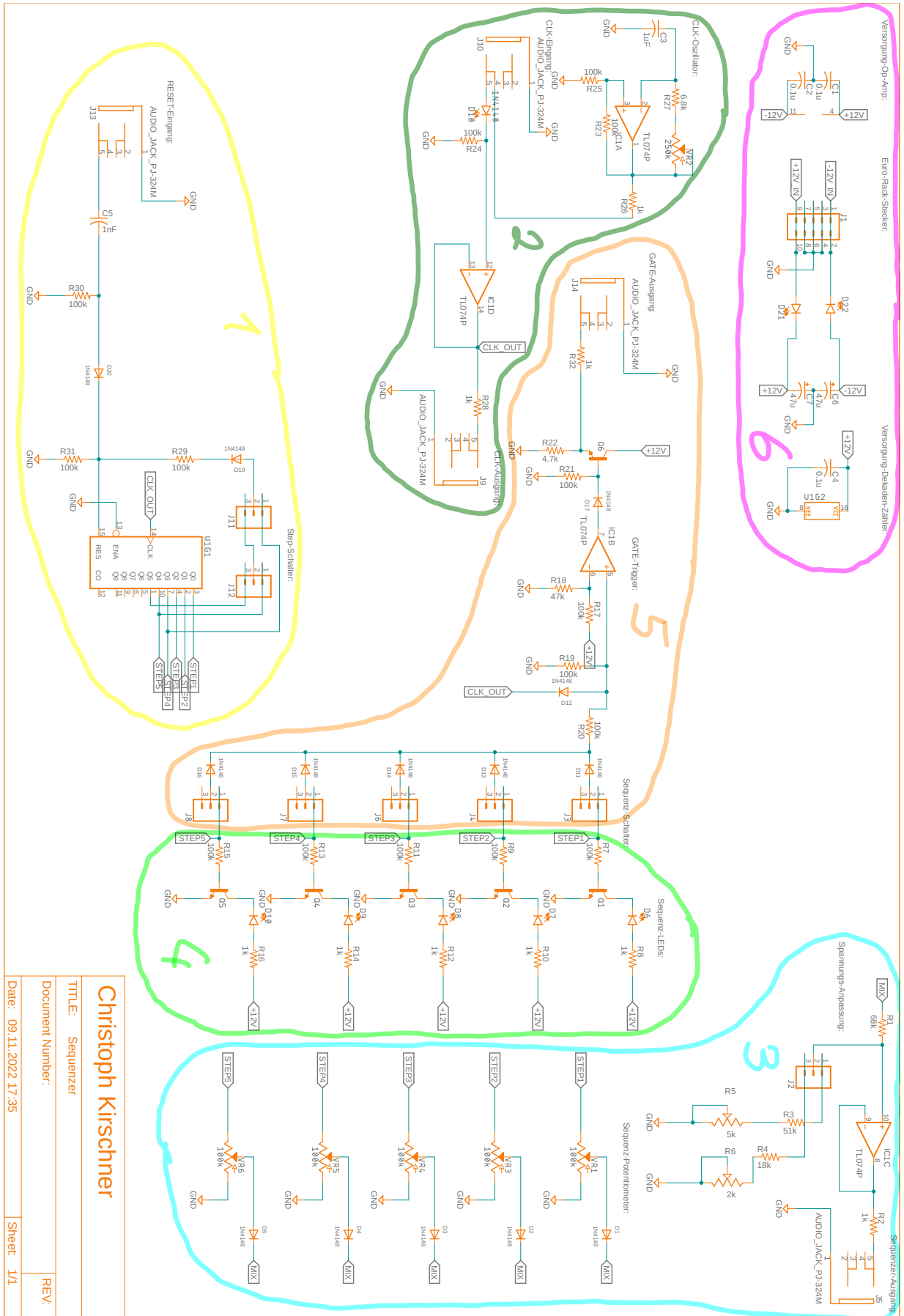
Bei dieser Umsetzung eines Sequenzers wurde sich für maximal fünf alternierende Spannungspegel entschieden. In der Literatur ist diese Unterart als 5-Step-Sequencer bekannt, welche wegen ihrer markanten Charakteristik zum Beispiel im bekannten »Hier Name des Syntis im Labor einsetzen« Synthesizer eingesetzt wird. »Als Quelle Manual von genanntem Synti nennen«. Über zwei in der Handebene verbaute Kippschalter kann alternativ zwischen 3- bzw. 4-Stufen-Betrieb gewählt werden. Welcher Schritt aktuell aktiv ist wird durch Status-LEDs in der Frontplatte angezeigt.

Als Spannungsversorgung erhält der Sequenzer ± 12 Volt durch das verbaute Netzteil. Optional kann ein externes Clock-Signal, beispielsweise von einem LFO (vgl. Kapitel 4), angeschlossen werden. Der eigene Takt wird dadurch überbrückt, wodurch das Modul flexibel eingesetzt werden kann. Des Weiteren kann die Sequenz durch ein externes Signal zurückgesetzt werden. Dadurch wird automatisch wieder bei der ersten Stufe der Sequenz begonnen, wodurch dem Nutzer weiterer musikalischer Freiraum freigeräumt wird.

Das Sequenzer-Modul verfügt über drei abgreifbare Ausgangssignale. Ein Clock-Signal, welches über ein Potentiometer in der Handebene parametrisiert werden kann, gibt den internen Takt des Moduls vor, und kann von außerhalb abgegriffen werden. Dessen Spannung toggelt dabei zwischen -12 und +12 Volt. Die Control Voltage (CV) wird zumeist dem VCO (vgl. Kapitel 5) zur weiteren Verarbeitung überreicht. Dabei handelt es sich um eine alternierende Spannungsfolge, welche zwischen 0 und 5 Volt schwanken kann. Die einzelnen Spannungspegel der bis zu fünf Stufen werden durch ein jeweiliges Potentiometer in der Handebene eingestellt. Das dritte Ausgangssignal des Sequenzers bildet der Gate. Ähnlich dem CV wird eine alternierende Spannungsfolge von bis zu fünf Stufen ausgegeben, wobei eine Stufe in zwei Abschnitte geteilt wird. Der erste Abschnitt beträgt, abhängig dem jeweiligen Kippschalter in der Handebene, entweder +12 oder 0 Volt. Der zweite Abschnitt führt immer 0 Volt. Der Gate verhält sich somit ähnlich dem Clock-Signal. Er führt jedoch niemals eine Negative Spannung und seine Stufen sind manuell zuschaltbar. In der Regel wird der Gate als Eingangssignal für den ADSR hergenommen.

6.2 Schaltplan

Abbildung 6.1: Schaltplan der Sequenzer-Platine



Der Schaltplan des Sequenzers lässt sich, wie in Abbildung 6.1 gezeigt, in sechs Bereiche unterteilen. Der Bereich eins ist zuständig für das Durchschalten der Zustände. Die wesentliche Komponente ist dabei das Bauteil U1G1. Es handelt sich dabei um einen CD4017 Dekadenzähler, der durch das Toggeln des Clock-Signals die verschiedenen Zustände durchschaltet. Der Sequenzer ist für eine Sequenz von maximal 5 Stufen ausgelegt. Durch die beiden Schalter J11 und J12 kann diese jedoch auf 4 bzw. 3 Stufen reduziert werden, was sich an der Rückführung der jeweiligen Stufen auf den RESET-Pin erkennen lässt. Durch den RESET-Eingang J13 lässt sich zusätzlich ein externes Signal einbinden, was einen Fremd-RESET ermöglicht.

Der zweite Bereich des Schaltplans kümmert sich um das Clock-Signal. Dafür wird der Operationsverstärker (OPV) IC1A sowohl über eine Mitkopplung durch R23, als auch über eine Gegenkopplung durch R27 und VR2 betrieben. Der dadurch realisierte Negativ-Impedanz-Konverter lädt bzw. entlädt den Kondensator C3 in Abhängigkeit des Potentiometers VR2. Das daraus entstehende Clock-Signal wird über einen Buffer (IC1D) geführt und unter anderem über den Klinkenausgang J9 nach außen zur Verfügung gestellt. Der Klinkeneingang J10 ist zusätzlich in der Lage das interne Clock-Signal durch ein extern angelegtes zu übersteuern.

Im dritten Abschnitt werden den verschiedenen Zuständen ihre jeweiligen Spannungen zugewiesen. Um das zu erreichen wird jedes Zustandssignal über ein separates Potentiometer gegen Masse geführt. Der Abgriff wird anschließend durch jeweilige Dioden vor rückfließenden Strömen geschützt und zusammengeführt. Um das Spannungssignal nun zu limitieren, wurden zwei Spannungsteiler R1 und R3 für 0 - 5 Volt sowie R1 und R4 für 0 - 2.5 Volt eingesetzt. Um Bauteiltoleranzen kompensieren zu können wurden zusätzlich zwei Trimmer R5 und R6 verbaut. Zwischen den Spannungsbereichen kann über den Schalter J2 gewechselt werden (default: 0 - 5 Volt). Danach kommt wieder ein Buffer (IC1C) und in Reihe dazu der Widerstand R2. Dieser Widerstand sorgt dafür, dass im Falle eines Kurzschlusses der Fehlerstrom begrenzt und dadurch kein Schaden in der Schaltung entsteht. Der so entstandene CV kann über den Klinkenausgang J5 abgegriffen werden.

Der vierte Bereich des Schaltplans (vgl. Abbildung 6.1) ermöglicht das Ablesen des aktiven Zustandes über die Frontplatte. Dafür wird für jeden möglichen Zustand eine LED (D6 - D10) angeschaltet, welche nach außen geführt ist. Die LEDs werden durch eine Emitterschaltung eines 2N3904 NPN Transistor angesteuert. Somit werden die Spannungssignale entlastet und möglichem Schaden vorgebeugt.

Die Funktionalität des Gate-Ausgangs wird in Bereich fünf umgesetzt. Die verschiedenen Stufenspannungen des Dekadenzählers aus Bereich eins werden jeweils über einen Kippschalter sowie eine Diode geführt und danach vereint. Die Schalter ermöglichen ein manuelles Zu- bzw. Wegschalten der einzelnen Stufe im resultierenden Gate-Signal. Die Dioden verhindern, wie auch bei der Umsetzung des CV, ein rückfließen der Ströme in die anderen Stufensignale. Nach der Zusammenführung der Signale folgt der Widerstand R20, sowie das über eine Diode begrenzte Clock-Signal. Das Clock-Signal sorgt dafür das der Gate in jedem Zyklus für die halbe Zeit auf 0 Volt gesetzt wird. Durch den Widerstand R20 wird einem Kurzschluss in diesem Pfad vorgebeugt. Der Widerstand R19 verhindert einen undefinierten Zustand sobald ein Stufe durch einen Kippschalter weggeschaltet wird. Allerdings bilden R19 und R20 einen ungewollten Spannungsteiler, der aus den gewünschten +12 Volt +6 Volt macht. Aus diesem Grund wurde ein weiterer OPV als einfacher Komparator verbaut. Die Widerstände R17 und R18 sorgen für eine Vergleichsspannung von 3.8 Volt am nicht-invertierenden Eingang, weshalb bei den anliegenden

+6 Volt problemlos durchgeschaltet wird. Der negative Teil der Spannung wird anschließend durch die Diode D17 sowie den Pulldown-Widerstand R21 unterbunden. Um der resultierenden hohen Impedanz sowie der begrenzt möglichen Stromentnahme der aktuellen Schaltung entgegenzuwirken, wurde der Ausgang mit einem BC547 NPN Transistor versehen. Dieser wurde als Kollektorschaltung implementiert sowie, um Kurzschlüsse zu vermeiden, mit einem weiteren Widerstand R32 verbaut. Der Gate kann somit über den Klinkenausgang J14 von außen abgegriffen werden.

Der letzte Bereich ist zuständig für die Spannungsversorgung des gesamten Moduls. Das Netzteil (vgl. Kapitel 3) versorgt den Sequenzer mit ± 12 Volt durch den Euro-Rack-Stecker. Um Verpolarung vorzubeugen, wurden zwei Dioden D21 und D22 verbaut. Anschließend werden die beiden Spannungen mit den Kondensatoren C6 und C7 gegen Masse gepuffert. Weitere Pufferkondensatoren wurden in der Versorgung der OPV als auch in der Versorgung des Dekadenzählers vorgesehen [seq_manual].

6.3 Platine

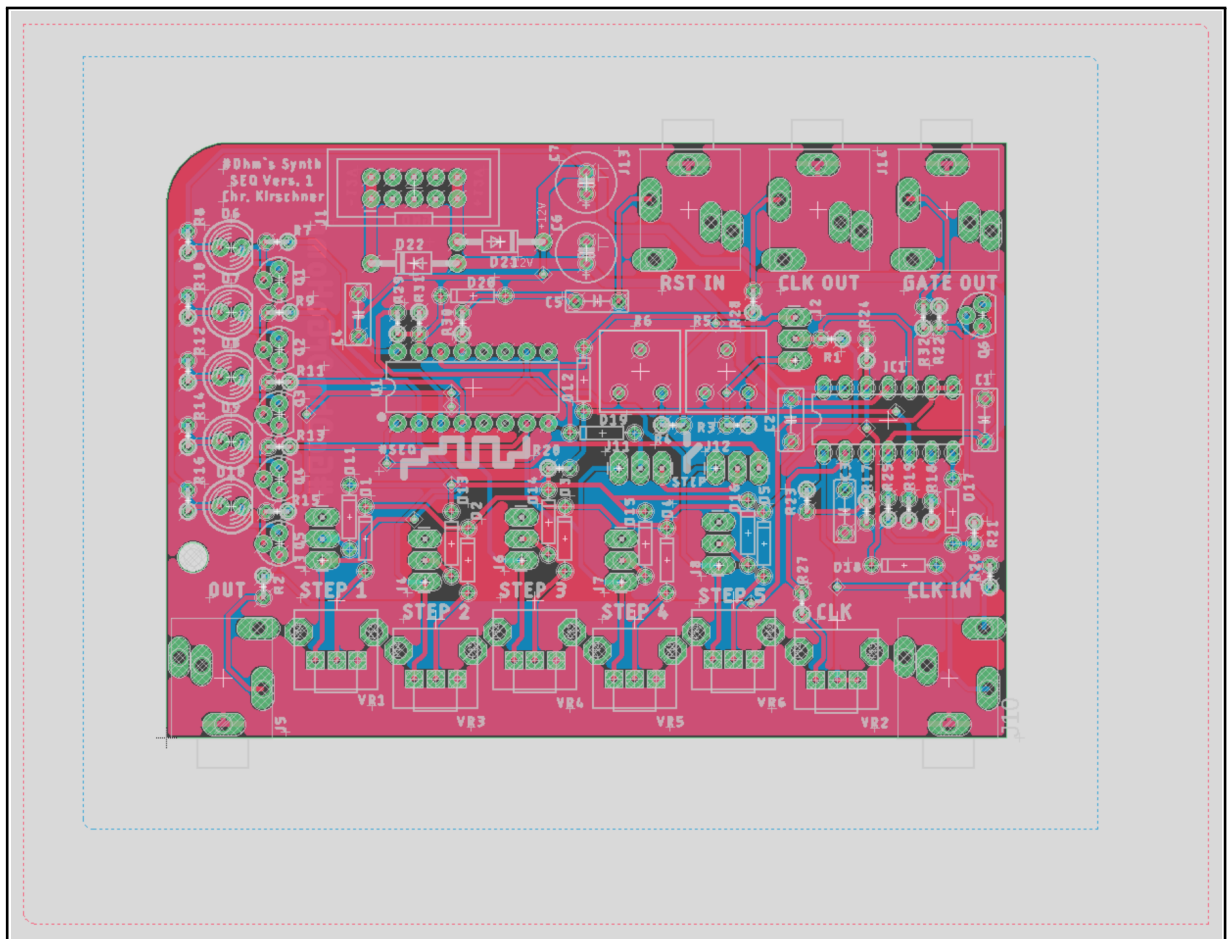


Abbildung 6.2: Ausschnitt des SEQ-Platinen-Layouts aus Fusion360

6.4 Mechanischer Aufbau

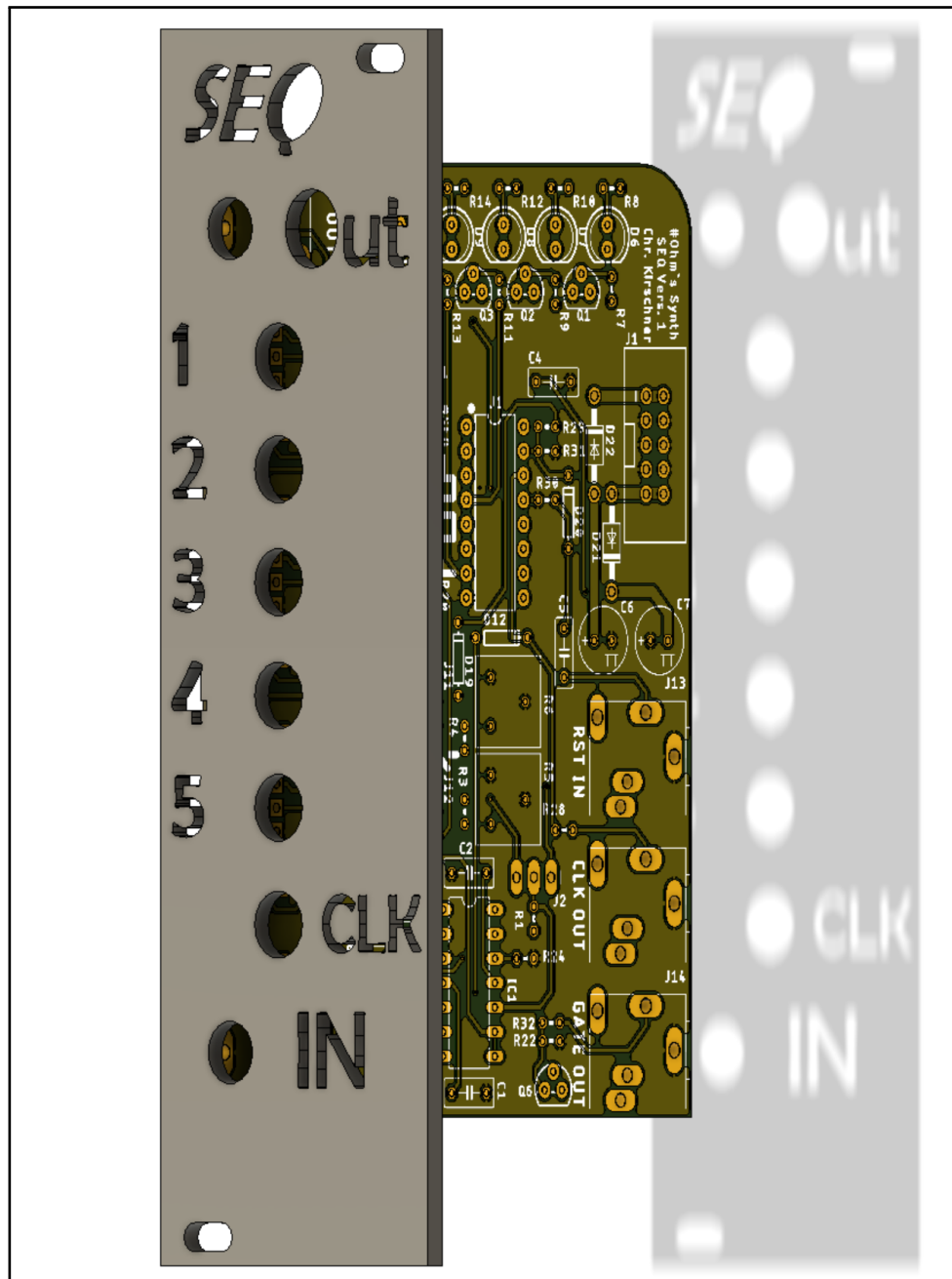


Abbildung 6.3: 3D-Darstellung der SEQ-Platine mit Frontplatte

Kapitel 7

Filter

7.1 Allgemeines

Neben Oszillatoren wie VCO und LFO stellen der Filter ein wichtiges Element der Klangsynthese dar. In diesem Kapitel wird eine Realisierungsform eines spannungsgesteuerten Filters VCF vorgestellt. Grundsätzlich kann ein Filter bestimmte Frequenzanteile eines Signals ungehindert passieren lassen, während andere Anteile abgeschwächt werden. Man unterscheidet zwischen dem sogenannten Durchlassbereich, Übergangsbereich und Sperrbereich.

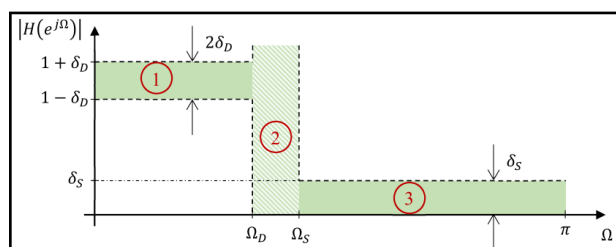


Abbildung 7.1: Frequenzgang eines digitalen Filters

Abbildung 7.5 zeigt ein schematisches Schaubild für einen digitalen Filterentwurf, der hier analog adaptiert werden kann.

Durchlassbereich:

Der Durchlassbereich wird bis zur Grenzfrequenz f_{3dB} (engl. Cut-Off Frequency) definiert. Beim VCF kann diese Grenzfrequenz mit einer Steuerspannung und einem Potentiometer verändert werden.

Übergangsbereich:

Im Übergangsbereich will man grundsätzlich meist eine steile Flanke realisieren. Die Flankensteilheit wird normalerweise in dB/Dec bzw. dB/Oct angegeben. Steile Flanken können ohne weitere tiefergehende Entwurfsmethoden (z.B. Cauer, Tschebychef o.Ä.) nur mit einer höheren Filterordnung realisiert werden. Im Übergangsbereich ist außer der Flankensteilheit noch das Resonanzverhalten interessant. Um die Resonanzfrequenz f_r werden Frequenzanteile um einen Faktor Q (Güte) erhöht. Es gilt:

$$|H(f_r)| = H_0 \cdot Q \quad (7.1)$$

Für Audiofilter hat das Resonanzverhalten eine große Bedeutung, da dieser Fall besonders voll und interessant klingt.

Sperrbereich:

Frequenzanteile, die sich im Sperrbereich befinden werden dann je nach Frequenzwert mit der entsprechenden Flankensteilheit abgeschwächt.

7.2 Schaltplan

Das Eingangssignal geht über die Audiobuchse J3 über einen Eingangskondensator C2, der den DC-Offset des Signals herausfiltert in den Eingang des OPVs. Der OPV hat eine Leerlaufverstärkung im Durchlassbereich von $-\frac{R2}{R1+R7} = 0.3 = 20\log_{10}(0.3) = -10.456\text{dB}$. Dieser Wert wurde so gewählt, um bei starker Resonanz keine Eingänge von nachfolgenden Modulen zu zerstören. Das eigentliche Tiefpass-Verhalten wird durch die Kondensatoren C3 und C4, sowie die Widerstände R3 und R4 realisiert. Die Grenzfrequenz kann über den einen JFET justiert werden. Dieser fungiert als spannungsgesteuerter Widerstand. Der Drain des JFET liegt Potenzialmäßig zwischen C3 und C4 bzw. R3 und R4 und Ground. Somit kann das Potenzial dieses Knotens Nieder- bis Hochohmig Richtung Ground gezogen werden. Bei einer Niederohmigen Verbindung (JFET durchgeschaltet mit $R_{on} = 100\Omega$) ist die Grenzfrequenz maximal.

Mit dem Potentiometer VR2 kann zusätzlich das Resonanzverhalten eingestellt werden. Je niederohmiger der Widerstandswert, desto höher die Resonanzüberhöhung. Somit muss der JFET in einem sinnvollen Bereich angesteuert werden, indem er auch als Widerstand fungiert. Laut Datenblatt fängt der J113 ab $-3\text{V } U_{GS}$ langsam das Leiten an und ist bei -0.5V voll durchgeschaltet. Tests mit dem Steckbrett haben gezeigt, dass der JFET erst bei -1.3V das Leiten anfängt. Es muss also eine Steuerspannung in einem Bereich von $\pm 4\text{V}$ auf einen Spannungsbereich von -0.5V bis -1.3V abgebildet werden. Das geschieht mit der Verstärkerschaltung um den 2. OPV. Da das genaue Dimensionieren hier Formelmäßig viel zu komplex wäre, wurde ein Trimpotentiometer R10 eingesetzt, um den Verstärkungsfaktor des OPVs einzustellen und somit die Steuerspannung CV auf den Spannungsbereich des JFETs abzustimmen. Zusätzlich werden die Steuerspannungen CV1 und CV2 noch über R15 über R16 mit einem Offset VR1 gemischt. Ist keine Steuerspannung angeschlossen kann über VR1 über den oben genannten Mechanismus die Grenzfrequenz des Filters eingestellt werden.

Insgesamt ergibt sich mit der Bauteildimensionierung ein Tiefpassfilter 2. Ordnung mit einer Flankensteilheit von -20dB/Dec im Sperrbereich. Die Grenzfrequenz kann über das Potentiometer VR1 oder den CV-Eingang in einem Bereich von 100Hz - 6kHz eingestellt werden.

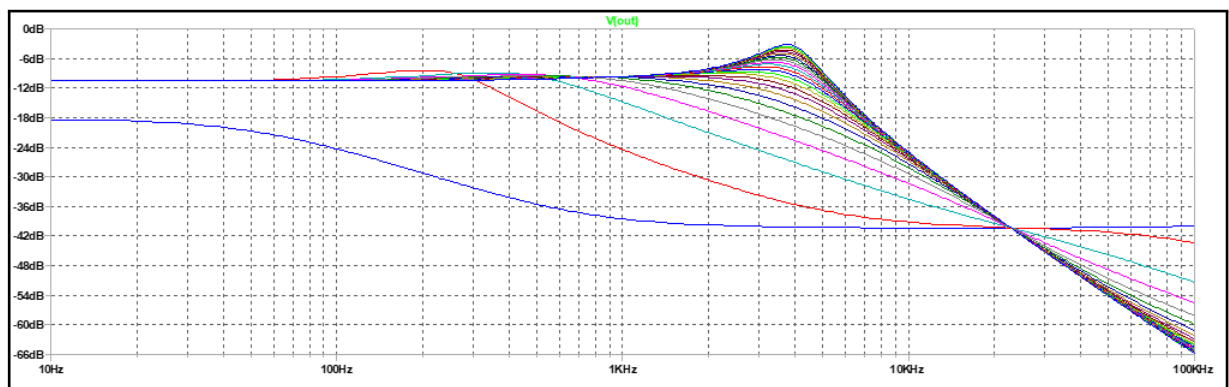


Abbildung 7.2: Frequenzgang des Filters bei CV-Sweep CV1 -4V bis +4V

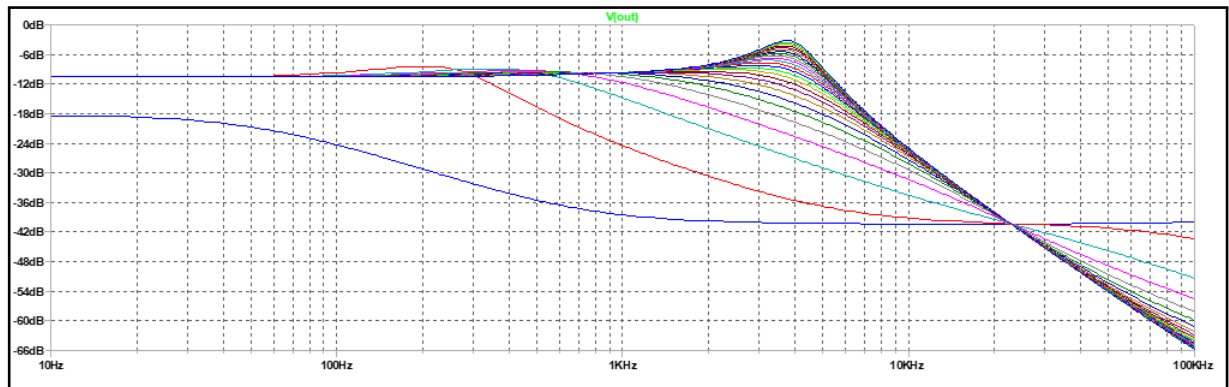


Abbildung 7.3: Frequenzgang des Filters bei Potentiometer-Sweep VR1 0 bis 100k Ω

Hier ist auch gleich eine Schwäche des Filters sichtbar. Trotz des Maximalen Potentiometer-Werts von VR2 ("Resonanz-Poti") geht der Frequenzgang zwischen 3kHz und 4kHz in eine Resonanz (ca. 6dB Überhöhung $\rightarrow Q = 2$). Die Einstellungen Resonanz und Grenzfrequenz können also nicht komplett unabhängig von einander eingestellt werden.

7.3 Platine

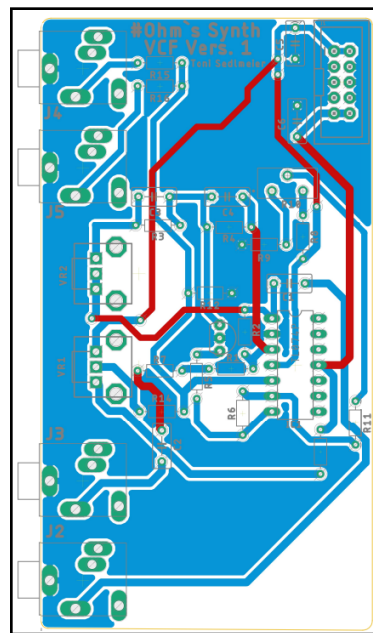


Abbildung 7.4: Platinen-Layout des VCF

7.4 Mechanischer Aufbau

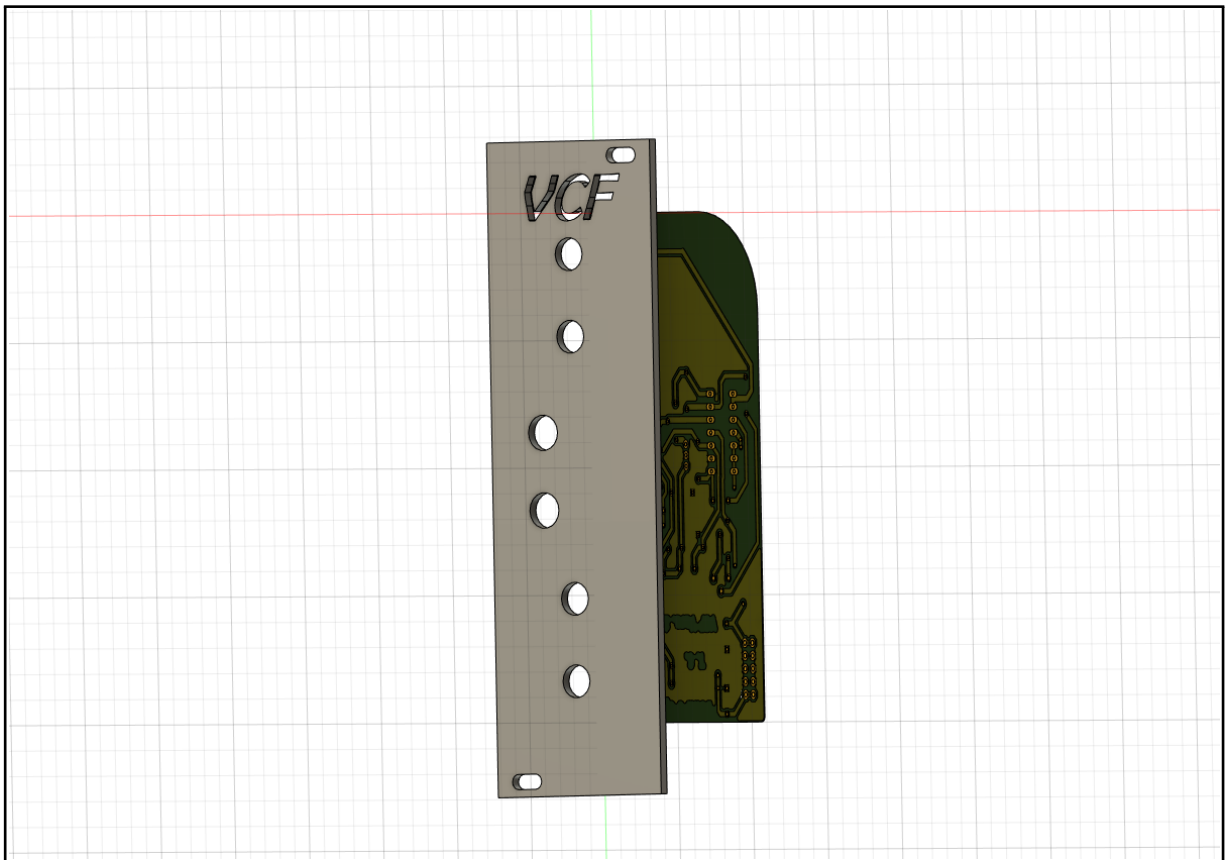


Abbildung 7.5: 3D-Darstellung der VCF-Frontplatte

Kapitel 8

Mischer

8.1 Allgemeines

Der Audio Mixer verknüpft verschiedene, von den anderen Bauteilen des modularen Synthesizers erzeugte Eingangssignale (Klangquellen) miteinander. Das heißt er mischt, kombiniert und gleicht verschiedene Klänge und Audiosignale aus, wodurch neue Signalformen und Klänge generiert werden können. Die entstehenden kombinierten Signale werden an den Filter weitergeleitet.

8.2 Schaltplan

Dieser Abschnitt beschreibt den Schaltplan des Mixers in Abbildung 8.1. Dazu werden die einzelnen Teilbereiche des Schaltplans vorgestellt.

IN1-IN3 sind die Audioeingangsbuchsen, INV OUT-CLIP OUT sind die Audio-Ausgangsbuchsen.

Der Teilbereich 1 des Schaltplans ermöglicht die Anpassung der Lautstärke der Signale in jedem Bereich zwischen 0% und 100%. Ein zentrales Bauteil ist der Vierfach-Operationsverstärker TL074P. Die drei verbauten Potentiometer regeln die Levels der Eingangssignale.

Der zweite Teilbereich lässt eine Modulation des Ausgangssignals (hinsichtlich Verzerrung und Wärme des Klangs) zu. Der Strom fließt durch die Diode nur in eine Richtung. Der 100k-Widerstand wird benötigt, um die Gefahr eines Kurzschlusses zu beheben. Denn ohne diesen Widerstand würde der Strom exponentiell steigen, da sich die Diode unbegrenzt öffnet, wenn die Spannung ansteigt. Die Spannung über der Diode bleibt konstant, wenn der Operationsverstärker einen bestimmten Threshold übersteigt. Dieser Effekt nennt sich Soft Clipping. Die zweite verbaute Diode erfüllt einen entsprechenden Zweck für negative Spannung. In Teilbereich 3 ist XP1 ein Standard-Eurorack-Stromanschluss. Es handelt sich um eine 2x5-Stiftleiste mit einem Schlüssel, die eine versehentliche Stromversorgung mit umgekehrter Polarität verhindern soll, denn ein falscher Anschluss der Stromversorgung würde zu dauerhaften Schäden am Modul führen. D3 und D4 sind Schottky-Dioden, die die Stromversorgung mit umgekehrter Polarität doppelt sichern. Auf den + und -12-V-Schienen wurden zwei 10-Ohm-Widerstände (R15 und R16) mit Entkopplung verwendet und Kondensatoren C1 - C4. In Kombination mit R15 und R16 kompensiert C1 und C2 Niederfrequenzschwankungen, während C3 und C4 Funkfrequenzen, Hochfrequenzspitzen von Schaltnetzteilen und schnelle, von anderen Modulen erstellte Spitzen herausfiltern. Die Kondensatoren C5 - C8 sind zusätzliche Entkopplungskondensatoren.

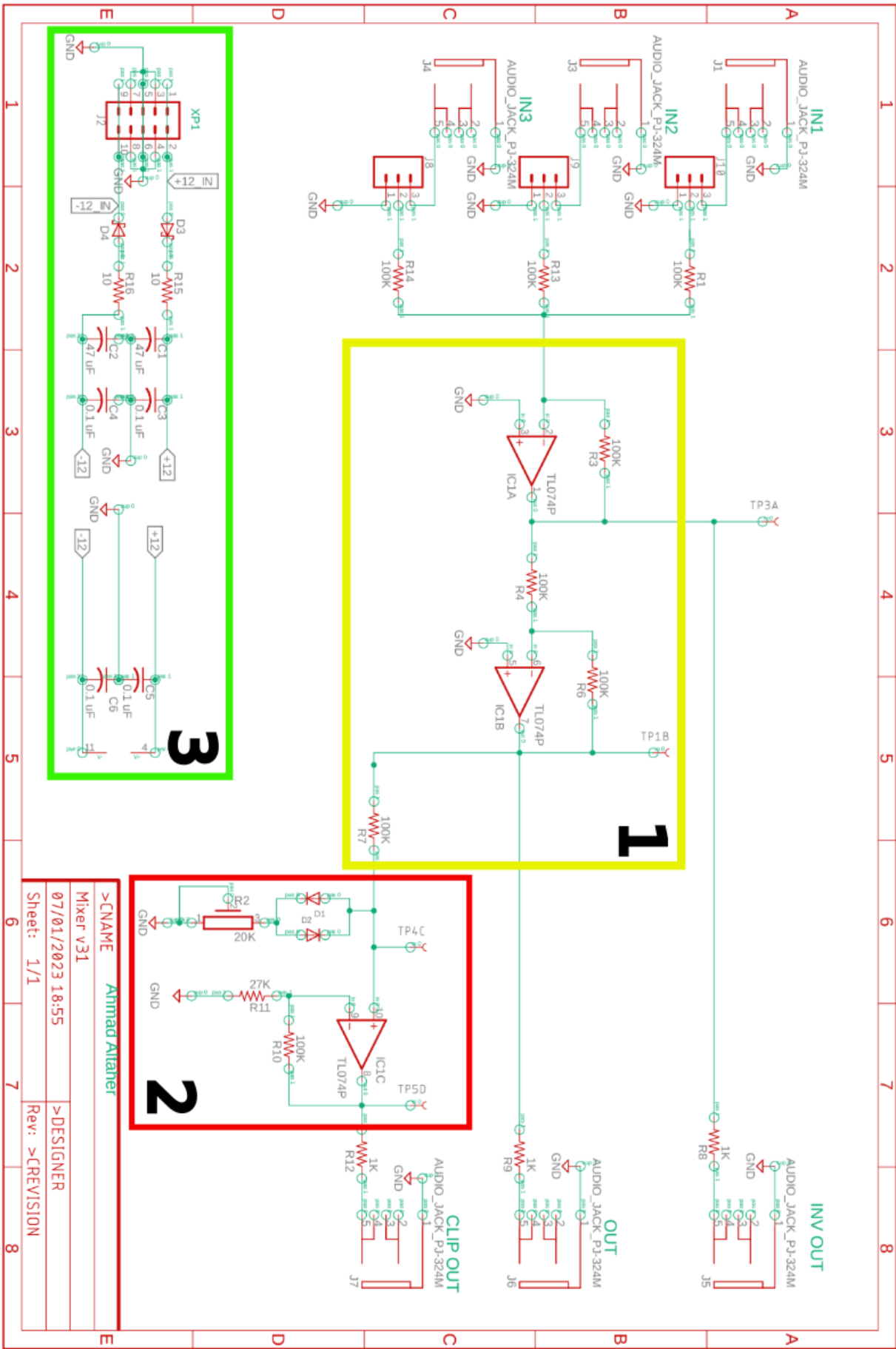


Abbildung 8.1: Ausschnitt des Mischer-Schaltplanes aus Fusion360 [mixer_manual]

8.3 Platine

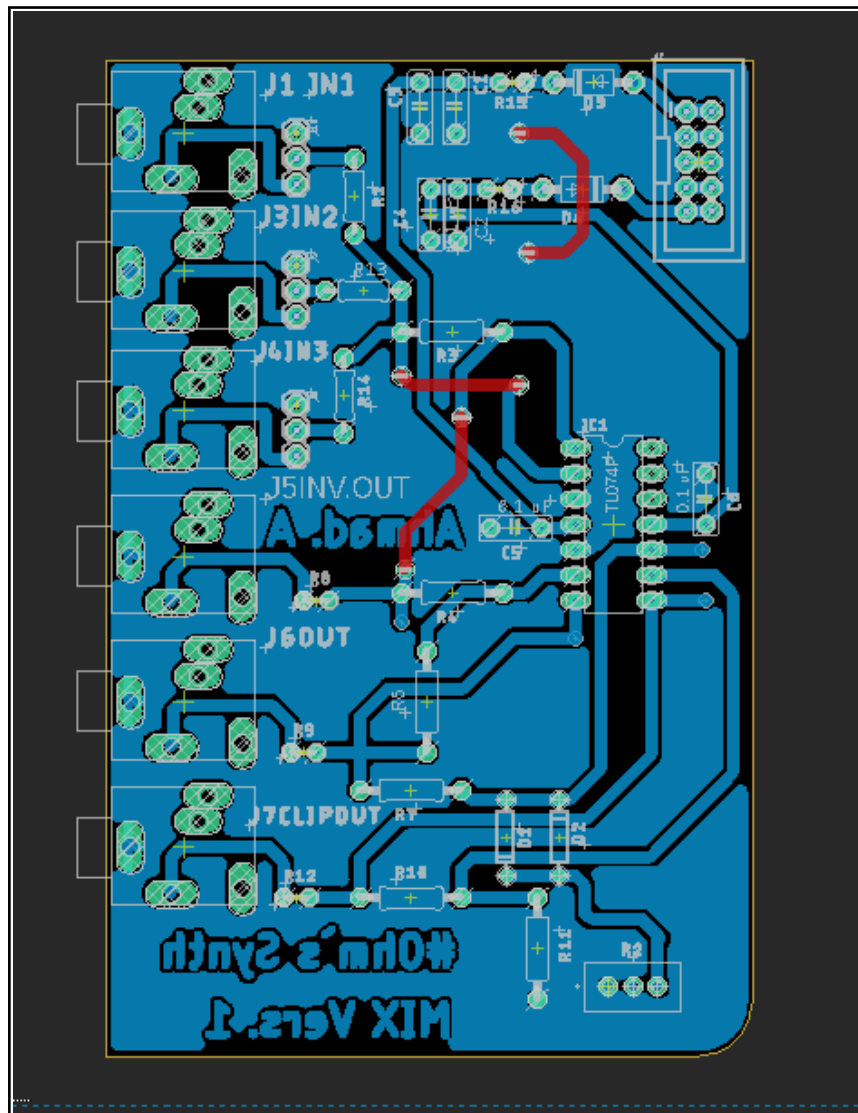


Abbildung 8.2: Ausschnitt des Mischer-Platinen-Layouts aus Fusion360 (Unterseite)

Kapitel 9

Fazit

bla bla bla