

Qualifikationsbereich IPA «Individuelle praktische Arbeit»

Deckblatt

Lernender
Vladetic
Luka

Titel der Aufgabe: Aufbau eines Burst-Generators für EMV-Prüfungen

Handlungskompetenz:

Beruf: Automatiker:in EFZ IPA (PK 13)

Lernender:	Name Vladetic	Vorname Luka
	Adresse Vega-Strasse 3	PLZ, Ort 8152 Opfikon
	Tel. G 058255402030	Mobile 0041786066244
	E-Mail luka.vladetic@stud.bzu.ch	

Verantwortliche Fachkraft:	Name Schnellmann	Vorname Michael
	Tel. G 044 318 33 33	Mobile 079 546 1334
	E-Mail michael.schnellmann@alstomgroup.com	

Experte 1:	Name Binder	Vorname Helmut
	Tel. G 052 224 16 09	Mobile 0797578336
	E-Mail helmut.binder@swissonline.ch	

Experte 2:	Name	Vorname
	Tel. G	Mobile
	E-Mail	

Bestätigungen:

Der Kandidat/die Kandidatin bestätigt, dass er/sie die vorliegende Dokumentation selbstständig und ohne fremde Hilfe erstellt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet hat. Insbesondere sind alle Übernahmen von Texten und Bildern aus anderen Quellen als solche gekennzeichnet.	Kandidat / Kandidatin Vladetic Luka
Der Kandidat/die Kandidatin bestätigt, dass er/sie das Arbeitsjournal wahrheitsgetreu sowie nachvollziehbar ausgefüllt hat.	Datum, Unterschrift
Mit seiner Unterschrift bestätigt die verantwortliche Fachkraft auch, dass keine Rechte Dritter verletzt werden. Weiter bestätigt sie, dass das Arbeitsjournal korrekt und vollständig ausgefüllt wurde.	Verantwortliche Fachkraft Schnellmann Michael
Mit seiner Unterschrift bestätigt der Hauptexperte, dass er Korrekturen und Hinweise der verantwortlichen Fachkraft in diesem Bericht zur Kenntnis genommen hat und dass er die Bewertung auf Plausibilität kontrolliert hat.	Datum, Unterschrift



VladeticLuka

Aufbau eines Burst-Generators



IPA Luka Vladetic
Automatiker EFZ
4. Lehrjahr
Alstom/Libs

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	6
Fachbegriffe.....	7
Der Zwischenkreis	7
Entladewiderstände	7
Kriechstrecken.....	7
Behlke Schalter.....	7
Koppelkondensator	7
Schmitt Trigger	7
Schema Symbol	7
Footprint.....	7
Routing	7
Einführung.....	8
Eine simple Erklärung des Problems	8
Terminplan	8
Arbeitsjournal.....	9
Teil 1	9
Woche 1	9
Woche 2	9
Woche 3	9
Teil 2	10
Woche 4	10
Woche 5	10
Auslegung der verschiedenen Komponenten	11
Prioritäten definieren.....	11
Ungewohnte Designkriterien	11
Auslegung der Zwischenkreis Kondensatoren	11
Auslegung der passiven Entladewiderstände für die Zwischenkreis Kondensatoren.....	11
Auslegung der Schnellentladevorrichtung	13
Auslegung der Koppelkondensatoren	14
Auslegung des Entladewiderstandes vom Koppelkondensator	15

Auslegung vom Balancewiderstand	15
Design der 5V Speisung	15
Design Schmitt Trigger	17
Funktionsbeschrieb Eingangsbeschaltung	18
Design des Prints	18
Erstellen des Schemas	18
Entwurf der speziellen Footprints und Symbole	19
Definieren der Komponenten	19
Grobes Layout	19
Berücksichtigung der Kriechstrecken	20
Layout der Speisung und Schutzbeschaltung	20
Finales Layout und Bestellung vom Print	21
Materialbestellungen	21
Digikey	21
Distrelec	21
Restliche Bestellungen	21
Mechanische Arbeiten	22
Löten vom Print	22
Montage der Schaltung	22
Fertigung der Front- und Rück-platte	23
Konstruktion und 3D-Druck	23
Letzte Elektromechanische Arbeiten	24
Test des Burstgenerators	24
Unterlagen	25
Aufbau des Versuchs	26
Während des Versuchs	26
Abbau des Versuchs	26
Messprotokoll: 1 Widerstandsüberprüfung Koppelkondensator	27
Messprotokoll: 2 Widerstandsüberprüfung Zwischenkreis	28
Messprotokoll: 3 Kurzschlusstest 5V Speisung	29
Messprotokoll: 4 Schnellentladewiderstand Überprüfung	30
Messprotokoll: 5 Thermische Lastprüfung Schnellentladewiderstand	31
Messprotokoll: 6 Zeitverzug Trigger Signal	32
Messprotokoll: 7 Leckstrom Prüfung	33
Messprotokoll: 8 Trigger Eingang Prüfung	34
Diverse Anhänge	35

Handschriftliche Notizen:.....	35
Bestelllisten	43
Digikey:.....	43
Distrelec:	44
Conrad:.....	44
Farnell:.....	44
Coax24.....	44

Aufgabenstellung

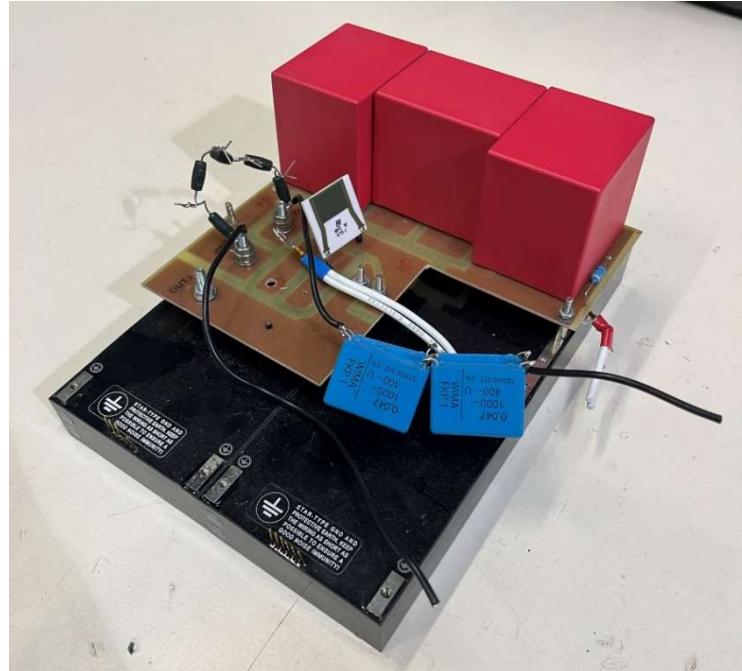
In Traktionsstromrichtern von Lokomotiven und Triebzügen werden Gate Drive Units (GDUs) verwendet, um Halbleiter präzise und zuverlässig ein und auszuschalten. Da aber hohe Spannungen, Ströme sowie Frequenzen im Traktionsstromrichter auftreten, befinden sich die Gate Drive Units in einer stark belasteten Umgebung. Damit die GDUs in der Erprobungs- und Entwicklungs-phase auf Zuverlässigkeit geprüft werden können, ist es wichtig, diese Störsignale nachbilden zu können.

Im Labor haben wir bereits bestehende Aufbauten, um ein solches Stör Feld gleichmäßig reproduzieren zu können. Allerdings sind die Einrichtungen, meist temporär und nicht robust aufgebaut.

Nun wurde als meine IPA ein solcher Aufbau mir zugewiesen. Ziel ist es einen solchen Burstgenerator, sauber und robust, mit einigen zusätzlichen Schutz Funktionen aufzubauen.

Als Grundlage erhielt ich die Box vom Fraunhoferinstitut, welche Manser Roland seit einiger Zeit für seine Versuche nutzt. Diese testet die GDUs nach di/dt . Das ist Stromänderung pro Zeitänderung. Der Burstgenerator funktioniert, er ist aber ein Gebastel ohne sauberen Aufbau. Da ständig etwas erweitert und angepasst wurde.

Dieser neue «Clean Sheet» Aufbau, soll zusätzlich mit gewissen Schutzfunktionen erweitert werden. Ziel dieser Schutzfunktionen ist es nur Bedienungsfehler zu decken.



Fachbegriffe

Der Zwischenkreis

Der Zwischenkreis bezeichnet die Komponenten, welche die nötige Energie speichern, um den Strom fliessen zu lassen. In diesem Aufbau bezieht sich das auf die zwei grössten Kondensatoren (C8/C9) welche die Energie speichern. Diese Kondensatoren sind nötig, da kurze Lastspitzen auftreten, die die HV-Speisung nicht aufbringen kann.

Entladewiderstände

Die Entladewiderstände haben die Funktion, im Fehlerfall, innerhalb einer gewissen Zeit, die Kondensatoren sicher zu entladen. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass dies nur als Absicherung dient, falls die Schnellentladung versagen würde.

Kriechstrecken

Eine Kriechstrecke ist die kürzeste Distanz, welche auf einem Isolator zwischen Punkt A und B vorkommt. Kriechstrecken sind vor allem bei grossen Spannungen zu beachten. Da bei Verschmutzung und Alterung des Isolierstoffes, die Spannungsfestigkeit sinkt.

Behlke Schalter

Der Behlke Schalter ist ein sehr schnell schaltender Halbleiter. Dieser ist das Herzstück des Aufbaus, da er ermöglicht, unter wiederholbaren Bedienungen den Strom sehr schnell ein und auszuschalten.

Koppelkondensator

Der Koppelkondensator verbindet den Behlke Schalter und die 1gang Spule. Dabei hat er die Funktion, bei einem Kurzschluss des Behlke Schalters, den Strom zu begrenzen. Er dient aber auch der Schwingung vom LC kreis(1gang Spule und Koppelkondensator).

Schmitt Trigger

Der Schmitt Trigger stellt sicher, dass das Eingangssignal sauber verarbeitet wird. Dabei schaltet er ein bei einer höheren Spannung als er abstellt. Dies dient dazu, dass kein undefinierter Zustand ausgelöst werden kann. Somit ist klares und sicheres Schalten möglich.

Schema Symbol

Das Schema Symbol kann in der jeweiligen EDA-Software beliebig für die eigenen Bedürfnisse erstellt werden. Zudem gibt es auch sehr viele Standard-Symbole wie zum Beispiel ein Kondensator oder Widerstand. Bei speziellen Komponenten muss man dann ein Eigenes Symbol erstellen, um die Elektrischen Verbindungen im Schema zur Komponente definieren zu können.

Footprint

Ein Footprint ist der «Abdruck» eines Bauteiles, das auf dem Print gelötet oder befestigt wird. Dieser Footprint steht in Verbindung zum jeweiligen Symbol, welches die vorgegebenen Verbindungen im Schema bereits hat. Anhand dieser Punkte verbindet man später mit dem Routing die einzelnen Komponenten auf dem Print, so wie es im Schema gegeben ist. Der Footprint ist in der Regel nur in der Layoutphase eines Prints relevant.

Routing

Routing bezieht sich auf die Leiterbahnen im Print. Diese werden im Programm vom Benutzer «geroutet». Dies bedeutet, dass die einzelnen Verbindungen vom Benutzer «gezogen» werden. Die Vorlage welche Komponenten wie verbunden werden hat man im Schema.

Einführung

Eine simple Erklärung des Problems

Um die GDUs nach di/dt testen zu können, muss man eine Schaltung haben, die dies erreichen kann.

Dabei ist wichtig, dass der Aufbau möglichst niederinduktiv ist. Dies bedeutet, dass die Schaltung eine möglichst kleine Induktivität (L) aufweisen soll. So kann der Strom über der Zeit schnell ansteigen.

Dieser schnelle Stromanstieg ist für die Funktion der Schaltung wichtig, denn Spannung in einer Wicklung/Leitung, ergibt sich durch den Wechsel der Flussdichte über der vergangenen Zeit. Das heißt, wenn wir in einer kurzen Zeit, ein möglichst grosses Magnetfeld mit möglichst grossem Strom erzeugen, produziert man den grössten Störimpuls/Störspannung in der Leiterbahn der GDU.

Die technische Umsetzung dieser Schaltung ergibt sich allerdings als schwer. Denn der Strompfad im Print des Burstgenerators muss möglichst kurz und eng sein, damit der Strom genug schnell ansteigen kann.

Hier ist auch wichtig zu verstehen, dass man einen Kompromiss zwischen Stromstärke und Stromanstieg pro Zeit eingeht. Denn eine tiefere Ladespannung der Zwischenkreiskondensatoren ermöglicht einen kompakteren Aufbau, limitiert aber den höchstmöglichen Strom. Umgekehrt hat man einen langsamen Stromanstieg aber einen hohen Spitzenstrom, da die Spannung höher ist. Der langsame Stromanstieg ergibt sich durch den weniger kompakten Aufbau, da Sachen wie Kriechstrecken bei hohen Spannungen berücksichtigt werden müssen.

Terminplan

Hier ist der Terminplan mit den entsprechenden Abweichungen.

IPA Luka Vladetic Ist/Soll																Abweichung:
Datum:	11.04.2023	11.04.2023	12.04.2023	12.04.2023	17.04.2023	17.04.2023	18.04.2023	18.04.2023	19.04.2023	19.04.2023	24.04.2023	24.04.2023	25.04.2023	25.04.2023	26.04.2023	26.04.2023
Tag:	Tag 1	Tag 1	Tag 2	Tag 2	Tag 3	Tag 3	Tag 4	Tag 4	Tag 5	Tag 5	Tag 6	Tag 6	Tag 7	Tag 7	Tag 8	Tag 8
Soll/Ist (h)	Soll	Ist														
Arbeiten Teil 1:																
Vorhandene Einrichtung untersuchen	1	1														0
Desingideen definieren/Designreview	3	3														0
Komponenten aussuchen	3	3	7	5.5												0
Schema/Layout Erstellen					7	6.75										-6.25
Gehäuse für Burstgenerator aussuchen						0.5										-1
Kontrolle Durchführen							1									3
Review Michael und Roland								1								3
Korrekturen									1							-3
Bestellung vorbereiten/Bestellen										1.5						1
Dokumentation	1	1	1	1	0.75		1	0.75	1	1.25	1	1.5	1	2	3	3.25
Summe Tag Ist	8	8	8	8	8		8	8	8	7.5	8	8	8	8	6.5	62
summe Tag Soll	8	8	8	8	8		8	8	8	8	8	8	8	6		62

IPA Luka Vladetic Ist/Soll												Abweichung:
Datum:	22.05.2023	22.05.2023	23.05.2023	23.05.2023	24.05.2023	24.05.2023	30.05.2023	30.05.2023	31.05.2023	31.05.2023		Abweichung:
Tag:	Tag 9	Tag 9	Tag 10	Tag 10	Tag 11	Tag 11	Tag 12	Tag 12	Tag 13	Tag 13		
Soll/Ist (h)	Soll	Ist										
Arbeiten Teil 2:												
Mechanische Arbeiten und 3d-Druck	7	2	7	4	7	2	3	4	4		-16	
Print Löten		5		1							1	
Elektromechanische arbeiten vollenden				1.5		1.5			6		0	
Testen				0.5		1.5			3		5	
Anleitung Powerlab												
Dokumentation	1	8	1	1.5	1	2.5	1	2.5	1	2	10	
	8	8	7.5	8	7.5	8	8.5	8.5	8	102		

Arbeitsjournal

Das Arbeitsjournal zeigt die einzelnen Arbeitsschritte, und wieviel Zeit benötigt wurde. Zu jedem Arbeitsjournal gibt es noch eine kurze Beschreibung, war gut ging und welche Hürden überwunden wurden.

Teil 1

Woche 1

In der ersten Woche habe ich mich hauptsächlich den wichtigen Grundbausteinen gewidmet. In dieser Zeit verschaffte ich mir den grössten Überblick über das Projekt und wo die Schwerpunkte lagen, wurde mir auch bewusst. Ich hatte jedoch schnell das Gefühl einen guten Ansatz gefunden zu haben, um das Problem zu lösen. Später bestätigte sich dies. Nachdem die Grundidee definiert war, suchte ich Komponenten, mit welchen ich meine Idee umsetzen konnte. Dabei habe ich mich oft in Details viel zu viel hineingesteigert und habe vergessen über das Gesamtbild zu schauen. Es war auch teilweise schwer den Überblick zu behalten, da man viel Auswahl hatte. Auch hatte ich für kurze Zeit das Gefühl komplett überwältigt zu sein. Doch in solchen Momenten habe ich immer rechtzeitig eine kleine Pause gemacht, oder nach einer zweiten Meinung gefragt. Grundsätzlich bin ich aber zufrieden, wie fliessend alles funktioniert hat.

Was ich noch erwähnenswert ist, ist das die tägliche Einplanung der Dokumentation nicht sehr viel genutzt hat. Ich war meistens bereits vom ganzen Planen/Arbeiten müde und nicht mehr sehr konzentriert. Dies merkte ich sehr, da ich fast nicht vorangekommen bin mit der Doku.

Woche 2

In der zweiten Woche fing ich an das Schema im Programm KiCad zu erfassen und das eigene Symbol für den Behlke Schalter zu zeichnen. Zu diesem Zeitpunkt fühlte ich mich sehr wohl und kam auch gut voran. Doch beim Erstellen der Footprints ging es nicht so fliessend, da ich sehr viel Angst hatte, etwas falsch zu machen, denn das würde bedeuten, dass zum Beispiel der Behlke Schalter nicht auf dem Print montiert werden kann. Ich habe dann ein letztes Mal die Footprints überprüft und fing dann mit dem eigentlichen Layout vom Print an.

Das Layout vom Print habe ich einiges von der Komplexität her unterschätzt. Es ist zwar nur ein zweilagiger Print, mit einem simplen Schema, doch was sich als grösste Herausforderung entpuppte, war das Berücksichtigen von den Kriechstrecken. Bewegte man eine Leiterbahn oder eine Komponente, um an Freiraum zu gewinnen, widersprach es wieder wo anders mit dem Mindestabstand. Hier war ich sehr gefordert, um ein Layout zu entwerfen, welches auch alle Mindestabstände für die Kriechstrecken einhielt.

Woche 3

In der dritten Woche hatte ich nochmals Zeit, alles zu kontrollieren und zu bestellen. Hier habe ich aber auch die meiste Zeit verschwendet. Denn die Bestellung vom Print, kostete mich mit Abstand die meiste Überwindung. Ich hatte Angst, ein Detail vergessen zu haben, oder ein mass falsch übernommen zu haben. Nachdem ich ein letztes Review mit Michal Sir gemacht habe, entschied ich mich die Platine mit dem erforderlichen Material, endlich zu bestellen. Nachdem fühlte ich mich nur super. Ich hatte mein Bestes gegeben, keine Fehler zu machen und nun konnte ich nichts mehr ändern.

Teil 2

Woche 4

Anfangs der 4ten Woche habe ich als aller erstes angefangen den Print zu löten. Dies Funktionierte erstaunlich gut. Vor allem die Idee mit dem Stencil die SMD-Komponenten zu löten war eine sehr gute Idee. Mit diesem Lösungsansatz habe ich einiges an Zeit gespart, da ich alle SMD-Komponenten aufs mal Löten konnte. Das hat mir auch die Möglichkeit gegeben, selbst auch noch etwas dabei zu lernen. Die restlichen Komponenten, wurden wie üblich gelötet. Dabei hatte ich am meisten Angst, ein Footprint falsch gewählt zu haben, oder irgendeinen dummen Fehler gemacht zu haben.

Nachdem der Print gelötet war, befestigte ich den Print mechanisch. Dabei hatte ich das erste Mal ein wahres Erfolgsgefühl, da die IPA langsam komplett wurde.

Danach habe ich mich auf die Mechanische Vollendung der IPA fokussiert. Dabei habe ich mich entschieden, auch noch Konstruktion und 3d-Druck zu integrieren. Die Möglichkeit hatte ich beim Ausführen der HV Out Anschlüsse. Dort war ich ebenso nervös, dass mir der Drucker die Komponenten nicht richtig druckt (meine Vermutung stellte sich als wahr heraus). So habe ich auch meinen Drucker zuhause auch parallel laufen lassen, um sicher zu sein, dass sich nichts verspätet. Am Mittwoch habe ich die 3d gedruckten Teile von zu Hause mitgenommen und in den Burstgenerator eingebaut. Dort war ich auch gespannt, ob ich alles genug robust, konstruiert habe. Doch ich war erleichtert, denn alles scheite perfekt aufgegangen zu sein.

Woche 5

In der 5ten Woche habe ich nochmals Zeit gehabt, um alle Messprotokolle und Tests durchzuführen. Da ich generell ein bisschen die Dokumentation im Verlaufe der IPA vernachlässigt habe, habe ich auch diese Zeit genutzt, um an der Dokumentation zu Arbeiten. Was mir aber am meisten gefallen hat, ist, dass der komplette Test, mit der Induktivität angeschlossen, problemlos und richtig funktioniert hat. Dort habe ich auch nochmals einen starken Motivationsschub gehabt, die Dokumentation so gut wie möglich zu machen.

Auslegung der verschiedenen Komponenten

Prioritäten definieren

Um möglichst effizient und übersichtlich den Burstgenerator entwerfen zu können, habe ich mich entschieden, alle «grossen» Komponenten, wie zum Beispiel die Zwischenkreiskondensatoren und den Behlke Schalter als erstes zu definieren. Aus diesem Grund, da später, Kleinigkeiten wie Entladewiderstandswerte schneller angepasst werden können.

Ungewohnte Designkriterien

Ich habe mich auch dazu entschieden, wie bei professionellen PCB's keine Bezeichner auf den Print zu drucken. Das scheint zwar als umständlich und unübersichtlich. Doch der Print ist nicht komplex und ist nicht kompakt gebaut. Zusätzlich habe ich die Konstruktionsdateien später in der Datenbank, welche mit der TN-Nummer verknüpft sind. Will man gewisse Komponenten sehen, leuchtet man sie im Schema an und gleichzeitig werden sie dann angeleuchtet im PCB-Editor gezeigt.

Was aber auf dem Print stehen wird, sind die wichtigsten Infos, wie zum Beispiel, die TN-Nummer, die Hochspannungseingänge und die maximale Entladezeit vom Zwischenkreis.

Auslegung der Zwischenkreis Kondensatoren

Für die Kondensatoren im Zwischenkreis wurde definiert, dass der Zwischenkreis mindestens die gleichen Anforderungen wie der alte besitzt. Die Spannungsgrenze wurde anhand vom Behlke Schalter definiert, da seine maximale Spannung 3600V beträgt.

Nach kurzer Recherche, war klar, dass eine elegante Lösung wie ich sie mir vorgestellt habe, nicht billig ist.

Außerdem habe ich definiert, dass die Kondensatoren mechanisch gestützt oder befestigt werden, um leichten Stößen standzuhalten und die Lötstellen nicht zu beanspruchen.

Mit der Idee, im Labor entsprechende Kondensatoren zu finden hatte ich Erfolg.

So fiel mir auf, dass die Snubbercaps die wir in unseren Stromrichtermodulen verwenden, eine ziemlich gute Wahl sind. Sie haben eine Spannungsfestigkeit von 1900VDC und eine Kapazität von 20uF. Wenn man 2 Snubbercaps in Serie schliesst, dann hat man einen Kondensator von 3800VDC und 10uF. Dies entspricht der alten Kondensatorbank, welche 3x 1300V 30uF Kondensatoren in Serie verbaut hatte. Ein weiterer Vorteil dieser Snubbercaps ist, dass sie sich für eine einfache Befestigung eignen, da Montage Löcher für die Mechanische Befestigung bereits vorgesehen sind. Somit erfüllten sie meine Kriterien und wurden für den Aufbau später verwendet.



Auslegung der passiven Entladewiderstände für die Zwischenkreis Kondensatoren

Die passiven Entladewiderstände sind aus diesem Grund notwendig, da bei einem möglichen Fehler, die Kondensatoren geladen bleiben können. Um einen solchen Fall abdecken zu können, habe ich mich von Stromrichtern, welche im Labor sind, inspirieren lassen. Diese haben parallel zu den Kondensatoren, Widerstände, welche als letzter Schutz, die Kondensatoren innerhalb definierter Zeit entladen.

Die entlade Zeit des Zwischenkreises habe ich von den Stromrichtern übernommen. Die maximale Entladzeit soll 30min betragen und die Totale Spannung im Zwischenkreis darf nicht höher als 50V nach der verstrichenen Zeit sein. Zuerst wurde der totale Widerstand mit folgender Formel berechnet:

$$U = U_0 * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Umgestellt, um den Widerstand auszurechnen direkt mit den Zahlen. 25V wurde als Wert genommen, da 2 Kondensatoren in Serie verbaut sind. Dadurch muss die end Spannung vom Vorgabewert halbiert werden.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{1800V}{25V} = 72$$

$$\ln(72) = 4.277$$

$$\frac{t}{\ln(72)} = \frac{1800s}{4.277} = 420s = \tau$$

$$\frac{\tau}{C} = \frac{420s}{20\mu F} = R = 21M\Omega$$

Somit muss der passive Entladewiderstand 21MΩ pro Kondensator betragen, um den Zwischenkreis unter 50V innerhalb von 30min zu Entladen. Auch sollten sie gleichzeitig eine «Balance» Funktion übernehmen. Der Sinn dahinter ist, wenn kleine Unterschiede in der Kapazität vorhanden sind, dass die kleinen Entladeströme durch die Widerstände die «Balance» von den Ladespannungen in den Kondensatoren über lange Zeit gleichhalten werden.

Bei der Auslegung der Einzelwiderstände muss auch die höchst Spannung der einzelnen Widerstände beachtet werden, sowie die grösste Verlust Leistung bei höchster Ladespannung im Zwischenkreis.

In Datenblättern von verschiedenen SMD-Widerständen, habe ich gesehen das der grösste Teil der Hersteller eine Spannungsfestigkeit von 150V in der Baugröße 0805 angibt. Ausserdem habe ich definiert, dass eine Reserve von 10% vorhanden sein soll, da die Widerstände sicherheitsrelevant sind. Dies ergibt dann eine maximale Spannung von 135V pro Widerstand. Das heisst, um einen Kondensator mit einer Ladespannung von 1800V sicher entladen zu können, braucht es mindestens 14 SMD-Widerstände damit die maximale Betriebsspannung nicht überschritten wird.

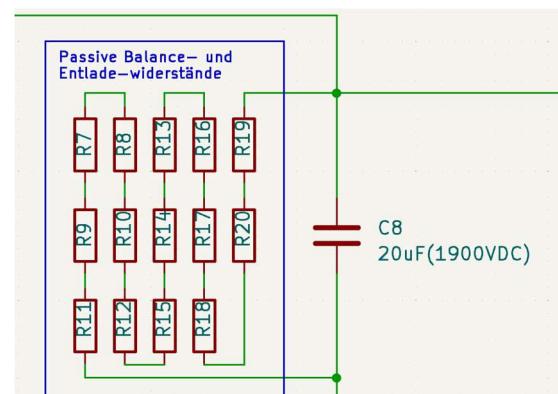


Nehmen wir den Totalwiderstand von 21MΩ und teilen ihn durch 14, erhält man den benötigten Widerstandswert, nämlich 1.5MΩ. Die maximale Verlust Leistung über allen Widerständen zusammen ergibt sich durch folgende Formel:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(1800V)^2}{21M\Omega} = 154mW$$

Die elektrische Energie, die in Wärme umgewandelt wird, ist klein und bedenkenlos, denn 14 Widerstände können eine Verlustleistung von 1.4W in Wärme umwandeln. (0805 Widerstände sind 1/10W)

Auf Digikey.com wurde anschliessend ein solcher Widerstand gesucht, welcher den design Kriterien entspricht und in den Warenkorb gelegt.



Auslegung der Schnellentladevorrichtung

Ziel der Schnellentladevorrichtung ist, den Zwischenkreis so schnell wie möglich komplett zu entladen. Das bedeutet, dass der Widerstand so gewählt werden muss, dass die Zeitkonstante möglichst klein ist. Zusätzlich muss er ebenso, ein Fehlbedienen abdecken können. Ein Beispiel dafür ist, die Schnellentladung auszulösen, obwohl die Speisung eingeschaltet ist. So könnten theoretisch die Widerstände überhitzen.

Diese Schnellentladevorrichtung wird durch ein NC Hochspannungs-Reedrelais geschaltet. Der normal geschlossene Kontakt, dient als Sicherheit, um den Zwischenkreis, bei Spannungs-Ausfall, direkt den Zwischenkreis zu entladen. Die Anforderungen an das Schnellentladerelais sind, eine minimale Schaltspannung von 3600VDC und einen Strom von mindestens 1A über die Kontakte führen zu können, damit sich der Zwischenkreis schnell genug entladen kann. Die Spule des Relais soll mit 5V versorgt werden, da sich dies als praktisch ergibt, da die Speisung des Behlke Schalters 5V ist. Relativ schnell wurde auch eines gefunden. Der Schaltstrom beträgt maximal 2A. Um den Kontakt aber zu schonen, wurde ein Entlade-Spitzenstrom von 1A gewählt. Daraus ergibt sich ein mindestwiderstand von 3600Ω bei einer maximalen Ladespannung von 3600V im Zwischenkreis.



Die Formel, welche verwendet wurde, ist folgende:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3600V}{1A} = 3600\Omega$$

Die entsprechende entlade Zeit ergibt sich durch folgende Rechnung:

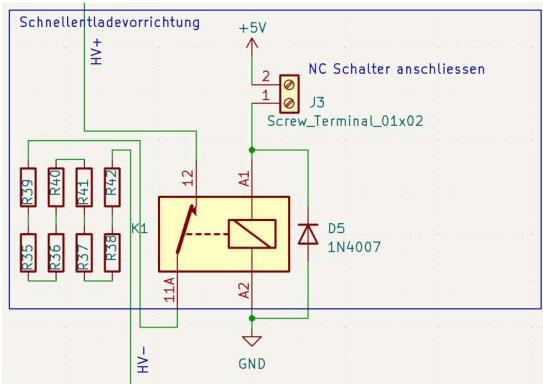
$$t_c = 5 * R * C$$
$$t_c = 5 * 3600\Omega * 10\mu F = 0.2s$$

Das heisst, der Zwischenkreis ist innerhalb von 0.2s fast vollständig entladen. Aus diesem Grund wurde der Gesamtwiderstand des Schnellentladewiderstandes bei 3600Ω Gesetz. Hier muss auch wieder mit der Höchstspannung pro widerstand gerechnet werden. Hier wurde aber der Entscheid getroffen, bedrathete Widerstände zu verwenden, da die Verlustleistung einiges höher ist als bei den SMD-Widerständen. Auch vertragen THT-Widerstände, vor allem Bedrathete, viel höhere Impulsenergien. Hier wurden mehrere Widerstände in Serie gewählt, um die Wärme und Spannung zu verteilen. Denn es muss eine Energie von 64.8Joule vernichtet werden.

Um die Energie im Zwischenkreis zu berechnen wurde folgende Formel verwendet:

$$E_C = \frac{1}{2} \times C \times U^2 = \frac{1}{2} \times 10\mu F \times (3600V)^2 = 64.8J$$

Nach kurzer Recherche, war klar, dass die meisten Widerstände in der Baugrösse 3W eine maximale Spannung von 500V aufweisen. Somit war klar, dass mindestens 8 solcher Widerstände in Serie geschlossen werden, um die nötige Spannungsfestigkeit aufweisen zu können. Die Energie die Absorbiert werden kann, ist ausreichend, da ein 3W widerstand 5s 2.5 Fach überlastet werden darf. Dies gibt eine



Aufgenommene Wärmeenergie von 37Joule pro Widerstand. Und es sind 8 Widerstände in Serie, was bedeutet, dass die Widerstände eine Energie total von knapp 300 Joule aufnehmen können, was mehr als ausreichend ist. Hier muss man aber anmerken, dass im Normalfall, diese Widerstände über diese 5 Sekunden Zeit haben, die Wärmeenergie vom Draht an den Kern abzugeben. In diesem Fall reicht es trotzdem aus, denn die Widerstände vertragen auch eine Impuls Energie von etwa 7 Joule pro Widerstand. Mit der reinen

Impulsenergie gerechnet, reicht es nicht ganz aus, die Zwischenkreiskondensatoren zu entladen. Jedoch bewegt man sich hier in einer «Grauzone» welche schlicht vom Hersteller nicht definiert ist da die Impuls Angaben im Mikrosekunden Bereich sind. Nach einer kurzen Rücksprache mit Roland Manser, bestätigte er meine Sichtweise und gab das Ok diese Widerstände für die Schnellentladegerät zu verwenden.

8 passende Widerstände mit einem Widerstandswert von 470Ω wurden gewählt. Um noch den oben erwähnten Schutz bei fehlbedienenen der Schnellentladung gewährleisten zu können, muss noch der maximale Strom ausgerechnet werden.

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{3W}{470\Omega}} = 79.9mA$$

Um aber auf der sicheren Seite sich zu bewegen da die Widerstände sicherheitsrelevant sind, habe ich entschieden die Strombegrenzung bei 50mA anzusetzen.

Es wurden entsprechende Widerstände bei Digikey.com ausgesucht und anschliessend in den Warenkorb gelegt.

Auslegung der Koppelkondensatoren

Die Koppelkondensatoren waren eigentlich von Anfang an gegeben. Es waren insgesamt 4x47nF1000V Folien-Kondensatoren in Serie/Parallel verbaut. Der Grund dahinter war nur, die Spannung des Kondensators zu erhöhen. Obwohl jeweils zwei Kondensatoren in Serie geschlossen wurden, war es noch immer nicht eine richtige Lösung. Denn die absolute Spannungsfestigkeit betrug nur 2000VDC.

Ich habe mich dazu entschieden, die Kapazität der neuen Koppelkondensatoren gleich zu behalten. Der Unterschied wird aber sein, dass die Spannungsfestigkeit entsprechend erhöht wird.

Relativ schnell, bin ich dann auf einen passenden Kondensator bei Digikey.com gestossen. Pro Kondensator habe ich eine Spannungsfestigkeit von 2000V mit einer Kapazität von 47nF. Das bedeutet, wenn ich 4 Kondensatoren identisch zur Vorlage verschalte, erhalte ich die gleiche Kapazität, allerdings mit einer erhöhten Spannungsfestigkeit von 4000VDC total.



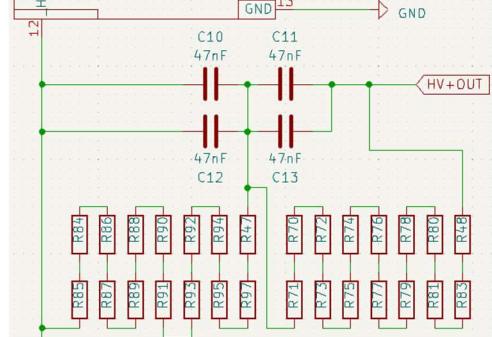
Was aber auch berücksichtigt werden muss, ist, dass es auch hier passive entladewiderstände braucht, welche im ursprünglichen Aufbau vom Fraunhoferinstitut fehlten. Die passiven Entladewiderstände haben fast keine Funktion, die Koppel Kondensatoren, zu entladen, jedoch sind sie sehr wichtig, um die Kondensatoren gleichmässig aufladen und entladen zu

lassen. Die Entladewiderstände haben somit hauptsächlich die Funktion, die Spannung in beiden Kondensatoren symmetrisch zu halten.

Auslegung des Entladewiderstandes vom Koppelkondensator

Nach einer kurzen Rücksprache mit Roland Manser, bestätigte er meinen Ansatz und als passiven Entladewiderstand haben wir 10Ω definiert.

Bei der Auswahl der Widerstände bin ich identisch wie zu den passiven Entladewiderständen vom Zwischenkreis vorgegangen. Der einzige Punkt, welcher noch erwähnenswert ist, ist das die Verlustleistung nicht zu hoch ist. Bei einer Annahme das ein Kondensator maximal 2000VDC hat, ergibt sich eine Verlust Leistung von knapp einem halben Watt, was im sicheren Bereich der Widerstände liegt, da hier auch Widerstände der Baugröße 0805 verwendet wurden. Die Entladezeit der Koppelkondensatoren, mit der Annahme das der «Balancewiderstand» ausfällt, ist bei knapp 3 Sekunden, somit muss nicht eine zusätzliche Warnung notiert werden, da sowieso die 30 Minuten vom Zwischenkreis berücksichtigt werden müssen.



Ich möchte allerdings noch hinzufügen, dass die Hauptfunktion dieser Widerstände eigentlich die Erhaltung der Symmetrie von den Spannungen in den Kondensatoren übernehmen. Denn das Entladen passiert viel schneller durch den Balancewiderstand.

Auslegung vom Balancewiderstand

Der Balancewiderstand übernimmt die Funktion, dass zwischen den Impulsen der Koppelkondensator entladen ist, bis der nächste Impuls ausgelöst wird. Aus diesem Grund muss er möglichst niederohmig sein, um die Entladezeit des Kondensators klein zu halten, damit immer wieder neuer Strom fliessen kann. Hier habe ich wie es in der Dokumentation steht einen Widerstand von $840\text{k}\Omega$ geplant. Bei der Auslegung der maximalen Spannung, bin ich eigentlich genau gleich vorgegangen wie bei der Auswahl von den Schnellentladungswiderständen (8 Widerstände in Serie). Nachdem ich mein Ergebnis Roland Manser zeigte, war er grundsätzlich zufrieden mit dem Plan. Er wollte jedoch einiges schnellere Taktsignale vorgeben können. Aus diesem Grund hat er mir einen totalen Widerstand von 800Ω als neuen Richtwert gegeben. Hier war es aber sehr wichtig, die Impulsfestigkeit dieser Widerstände für die Verwendung zu berücksichtigen.

Wieso das so wichtig ist, zeige ich an einem kleinen Beispiel. Mit der Annahme das der Widerstand 800Ω beträgt, hätte man eine Verlust Leistung von über 2kW pro Widerstand. Diese Verlust Leistung tritt nur für sehr kurze Zeit auf, doch die Wärme, die im Draht entsteht, muss vom Draht thermisch absorbiert werden können. Deshalb ist es so wichtig einen passenden Widerstand auszusuchen.

Hier hat Roland Manser mir auch geholfen, denn er weiss, wie oft und mit welchen einschalt Zeiten er seinen neuen Burstgenerator in Zukunft betreiben möchte. Somit hat er sich entschieden einen passenden Widerstand für die Schaltung auszusuchen.

Den entsprechenden widerstand, habe ich in mein Design integriert und in den Warenkorb gelegt.

Design der 5V Speisung

Die 5V Speisung ermöglicht es dem Benutzer des neuen Burstgenerators, ein minimalistisches Setup zu haben. Denn es wird keine externe Speisung benötigt, um den Burstgenerator mit Strom zu versorgen. Ich habe mich dazu entschieden, 230V als eingangs Spannung zu haben, aus denen später geregelte 5V und 800mA zur Verfügung stehen. Der Grund für die angesetzten 800mA bei 5V ist, dass der Behlke Schalter,

diese Spannung und einen Mindeststrom von 500mA als Speisung benötigt. Zudem habe ich noch 300mA als Reserve beigerechnet, um noch das Reedrelais sowie die Status-LED mit Strom versorgen zu können. In Wirklichkeit werde ich wohl kaum nahe an die Grenze der Speisung kommen, da der Behlke Schalter ca. 300mA braucht. Ich bin daher von einem maximalen Strom von 800mA ausgegangen, welche bei 5V zur Verfügung stehen müssen. Um stabile 5V zu erhalten, habe ich mich dazu entschieden einen Linearregler vom Typ: L7805CV zu verwenden. Dieser ist in einem TO-220 Gehäuse verbaut. Er eignet sich, da er einen Strom von bis zu 1A regeln kann. Darüber hinaus ist er ebenfalls Kurzschlussicher und hat einen eingebauten über Temperatur Schutz. Um einen stabilen Betrieb gewährleisten zu können, muss eine Eingangsspannung von mindestens 7V vorhanden sein. Rechnet man noch den Spannungsabfall von 1.4V vom Brückengleichrichter hinzu, erhält man eine Mindest-Wechselstromspannung von 8.4VAC. Aus diesem Grund habe ich mich dazu entschieden, einen 9VAC Trafo mit einer Leistung von 8VA zu verwenden. Geht man von einer Brummspannung von 1V aus. Braucht man einen Kondensator mit ca. 4mF. Diese Kapazität wurde mit folgender Formel ausgerechnet.

$$\hat{u}_p = \frac{0.75 * I_d}{f_p * C_G}$$

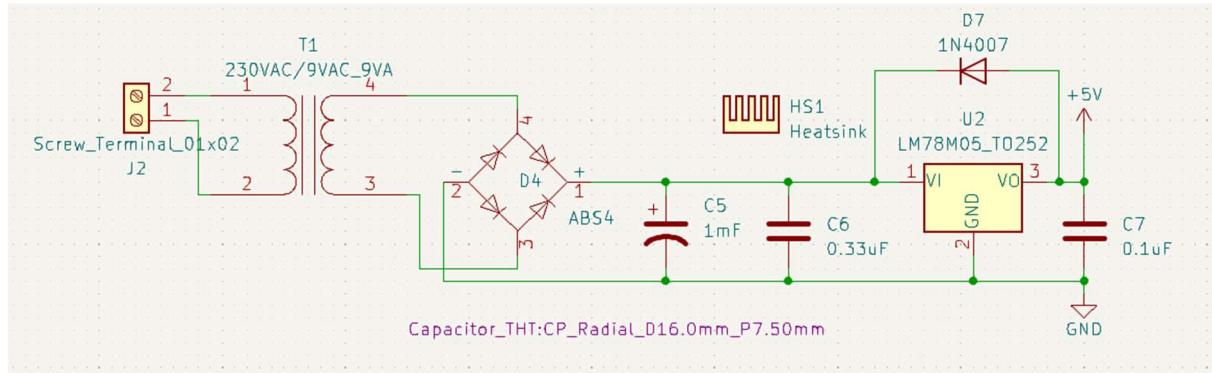
$$C_G = \frac{\frac{0.75 * I_d}{f_p}}{\hat{u}_p} = \frac{0.75 * 0.8A}{\frac{100Hz}{1V}} = 4mF$$

Hier muss aber auch klar definiert sein, die Brummspannung ist nur unter Voll-Last so hoch. Aus diesem Grund habe ich mich entschieden, einen 3.3mF Elektrolytkondensator aus der E12 Reihe zu wählen. Die Spannungsfestigkeit, habe ich auch ausgerechnet. Der Trafo, der im Design verwendet wird, besitzt eine Leerlaufspannung von 11.3V rechnet man den Spitzenwert aus, kommt man auf eine Spannung von 16V. Um aber den Elektrolytkondensator zu schonen, habe ich mich dazu entschieden, einen mit einer Spannungsfestigkeit von 25V zu wählen, da ansonsten die Leerlaufspannung den Kondensator beschädigen könnte. Um ebenfalls auf lange Sicht, sicher zu sein, habe ich ein 105°C Kondensator verwendet.

Gleichermassen habe ich einen SMD-Brückengleichrichter ausgewählt, welcher 1A Gleichrichten kann.

Um Stabilen betrieb des Linearreglers gewährleisten zu können, musste ich noch zwei kleine Kondensatoren, am Eingang 0.33uF und am Ausgang des Linearreglers 0.1uF anschliessen. diese Werte habe ich aus einem Anwendungsbeispiel vom Datenblatt für den Linearregler genommen.

Durch die Arbeitsweise des Linearreglers, wird er mit steigender Belastung immer wärmer. Somit muss ein Kühlkörper, welcher die entstandene Wärme an die Luft abgibt, an den Linearregler montiert werden. Das Datenblatt empfiehlt einen Kühler mit einem Wärmewiderstand von 10°C/W.

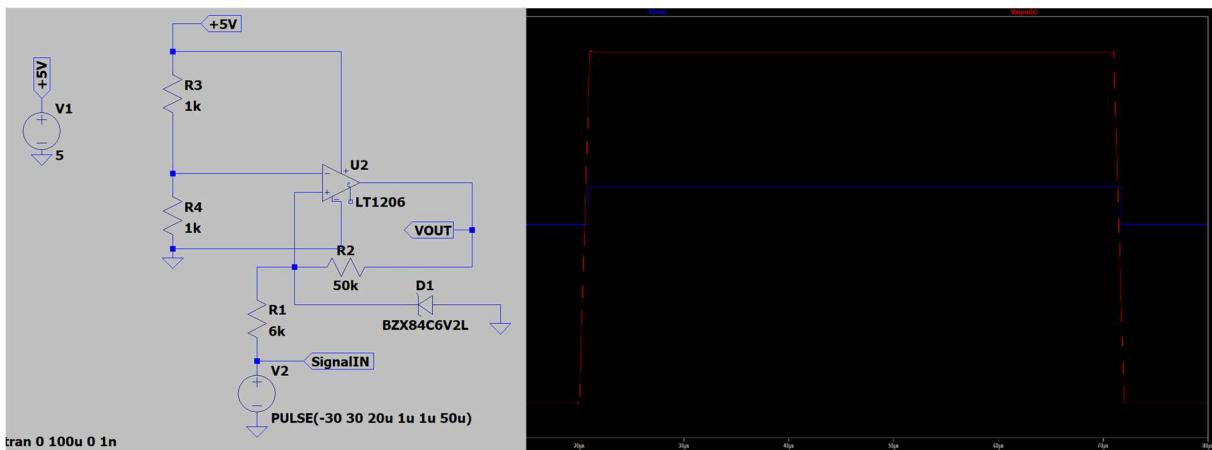


Mit meiner Auswahl, welche ich getroffen habe, liege ich sehr nah daran, denn der Verwendete Kühlkörper weist einen Thermischen widerstand von 11°C/W auf, zudem wird er mechanisch an den Print gelötet, um den Linearregler mechanisch zu Entlasten. Bei einer maximalen Verlust Leistung von 5W und

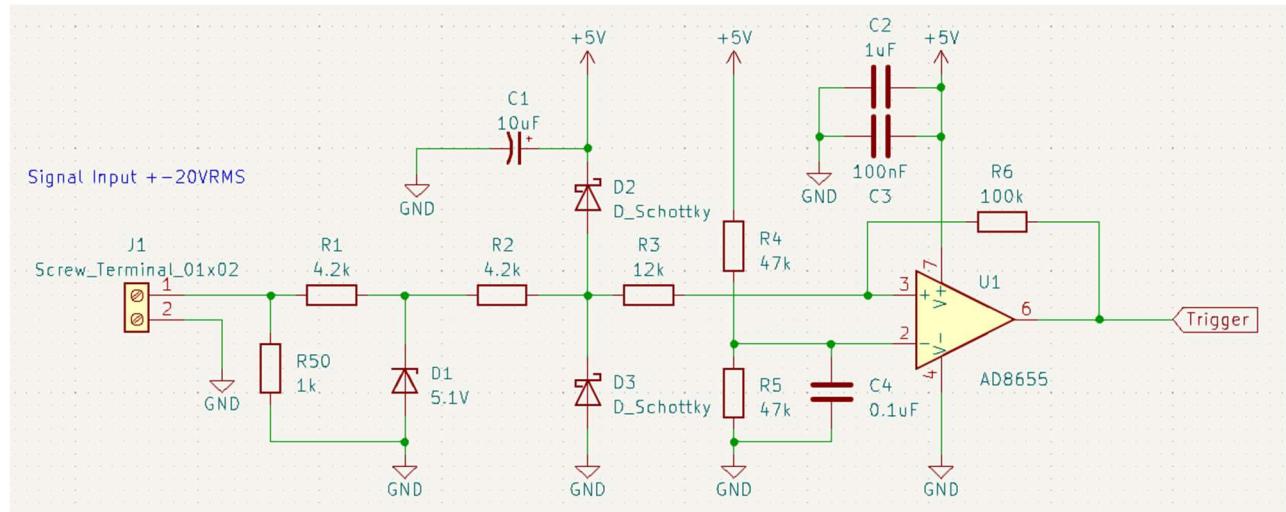
einem totalen Wärmewiderstand nach aussen von $13^{\circ}\text{C}/\text{W}$ steigt die Temperatur des Halbleiters im Gehäuse(Halbleitertemperatur) um 65°C über der Umgebungstemperatur. Mit einer Umgebungstemperatur von 40°C ist man noch immer von den maximalen 140°C weit entfernt, welche im Kern des Reglers auftreten dürfen.

Design Schmitt Trigger

Um den Schmitt Trigger zu realisieren, habe ich mich an eines meiner früheren Projekte welches ich gebaut habe gestützt. Dort hatte ich auch eine Hystereseschaltung, um einen Lüfter bei tiefer Batteriespannung abzuschalten und wenn die Batterie ausreichend geladen ist, einzuschalten. Dieses Schema das ich damals verwendete, passte ich für diesen Aufbau an. Um aber grundsätzlich sicher zu stellen, dass die Schaltung funktioniert, habe ich die Prototypschaltung im LT-Spice simuliert. Hier habe ich mir auch Unterstützung von Michael Schnellmann geholt, welcher sich mit dem Programm gut auskennt. Anschliessen habe ich die Schaltung im LT-Spice mit Erfolg testen können.



Als ich meine eigenen Anpassungen vorgenommen hatte, organisierte ich eine Rücksprache mit Michael Schnellmann, um die Schaltung noch zu verbessern. Nach diversen Punkten, welche angepasst wurden, habe ich schlussendlich dieses Schema erfasst:



Für die Komponenten habe ich mich schnell entscheiden können. Zudem habe ich ebenfalls Michael Schnellmann meine Auswahl überprüfen lassen, um sicher zu stellen, dass ein zuverlässiger betrieb möglich ist.

Funktionsbeschrieb Eingangsbeschaltung

Hier ist noch ein kurzer Funktionsbeschrieb, welcher die Schaltung im Detail erläutert. Die Widerstände R1, R2, R3 bilden einen Gesamtwiderstand von $20.4\text{k}\Omega$. Dieser Widerstand geht in den nicht invertierenden Eingang des Operationsverstärkers.

Hier ist jetzt der Knackpunkt, der Widerstand R6 ist anfänglich mit 0V verbunden da der OpAmp ein Rail to Rail treibvermögen besitzt. Steigt jetzt die Spannung am Eingang(J1), hat man einen Spannungsteiler. Jetzt muss die Spannung am Eingang so lange steigen, bis der Schwellwert von 2.5V zwischen dem Eingangswiderstand von $20.4\text{k}\Omega$ (R1, R2, R3) und $100\text{k}\Omega$ (R6) erreicht ist, dies passiert bei 3V. Da dann die Spannung höher als zum invertierenden Eingang ist, steigt die Spannung beim Ausgang des Operationsverstärkers auf 5V am Ausgang. Fängt man jetzt an, die Spannung am Eingang zu senken, hat man wieder einen Spannungsteiler von $20.4\text{k}\Omega$ und $100\text{k}\Omega$, jetzt aber umgekehrt. Da der Widerstand R6 mit +5V verbunden ist. Somit muss die Eingangsspannung unter 2V fallen, um den Ausgang des Operationsverstärkers abzustellen. Somit ist eine Hysterese vorhanden, welche sauberes Schalten gewährleistet. Diese verhindert ein Flackern des Steuersignals.

Die Zenerdiode, klemmt die Eingangsspannung auf +5.1V und -0.7V ab. Die beiden Shottkydioden, sind als zusätzlicher Schutz verbaut, um transiente Spannungsspitzen auffangen zu können. Der kleine Elektrolytkondensator C1, dient zum Auffangen dieser Stromstöße. Was noch wichtig zum Anmerken ist, ist das Shottkydioden verwendet wurden, da sie eine tiefere Vorwärtsspannung haben. Nicht 0.7V wie bei einer normalen Diode, sondern deutlich tiefer nämlich 0.4V. Bei kleinen Lastströmen kann diese Spannung noch geringer sein, zudem bieten sie eine schnellere Einschaltzeit.

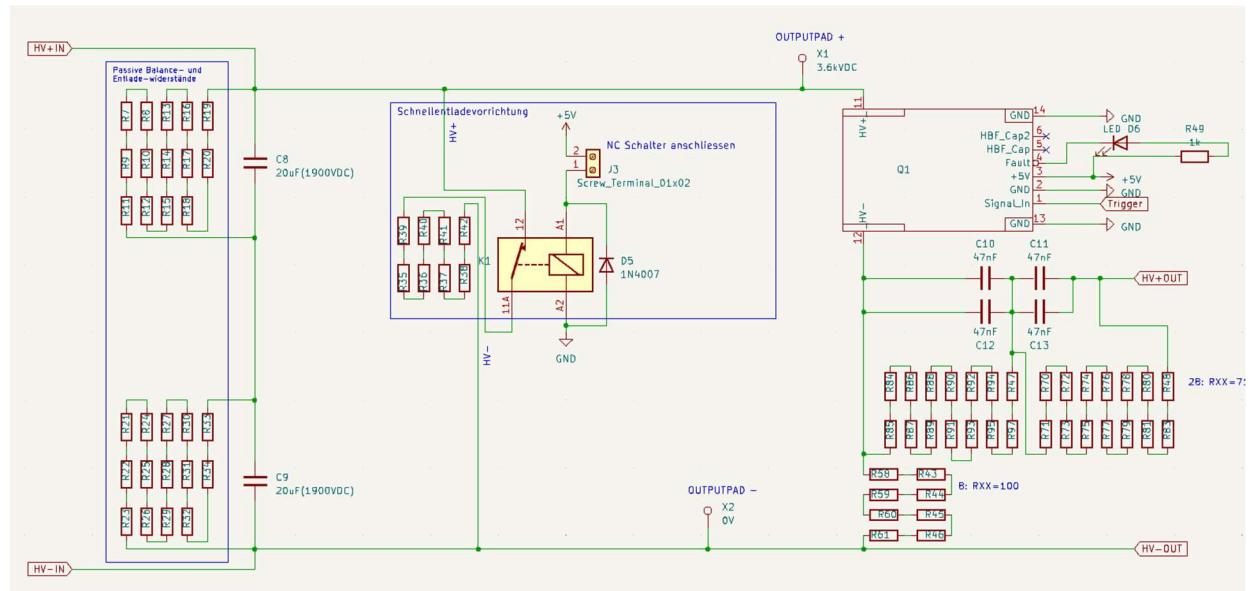
Die Funktion des Widerstandes R50 ist, bei einem entfernen des Trigger Signals, ein Abschalten sicher zu stellen, da er den Trigger Input mit 0V verbindet.

Alle Widerstände wurden so gewählt, dass die Verlustleistung nicht überschritten wird.

Design des Prints

Erstellen des Schemas

Bevor ich das Schema erfassen konnte, musste ich mich für ein Programm entscheiden, welches ich für den Entwurf der Leiterplatte nutzen wollte. Ich habe mich aber ziemlich schnell für KiCad gegenüber EasyEDA entschieden, da ich es für meine letzte Leiterplatte zum Konstruieren verwendet habe.



Ausserdem ist es Open Source, was zukünftige Personen die Anpassungen vornehmen möchten herzlich willkommen heissen werden. Das Schema habe ich von der bestehenden Dokumentation, in das Programm KiCad übertragen. Dies war ein kurzer Prozess, weil ich rein elektrotechnisch alle Komponenten eingefügt habe. Beim Steuerstrom habe ich ein bisschen länger gebraucht, dort habe ich aber bereits einen guten Lösungsansatz gehabt. Dieser basierte wie vorher erwähnt auf meinem vorhandenen Schema.

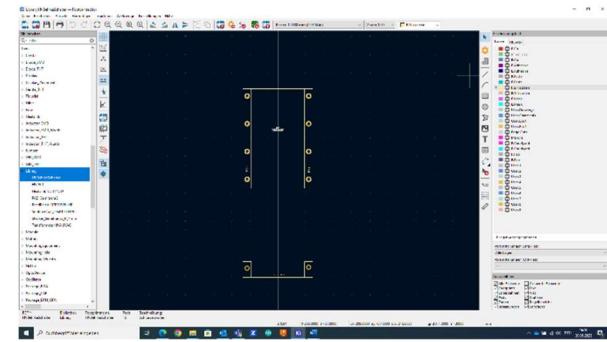
Ich habe das Schema in kleine verständliche Bruchteile unterteilt. Diese waren simpel und man konnte den Überblick bewahren. So habe ich alle «Kerngruppen» mit den Vorgaben aus dem Design im Schema erfasst. Dazu gehört jeweils die Anzahl der Komponenten und wie sie verbunden sind.

Vorhandene Footprints welche in der Standard-Library erhalten waren, habe ich den entsprechenden Symbolen zugeordnet.

Entwurf der speziellen Footprints und Symbole

Um das Schema allerdings vollständig erfassen zu können, benötigte ich ebenfalls eigene Symbole und Footprints. Ein Symbol, welches ich erstellen musste, war das vom Behlke Schalter. Denn solche speziellen Komponenten sind nicht gang und gebe. Aus diesem Grund waren sie nicht in der Library hinterlegt. Das Symbol habe ich ebenfalls realitätsgerecht gezeichnet, da es für mich hilfreich ist, gleich zu sehen, wie der Strom im Behlke Schalter fliesst. Später stellte sich heraus das dies sehr hilfreich war.

Für das Hochspannungs-Reedrelais, musste ich nur ein Footprint zeichnen, welches ich auf ein bestehendes Symbol von einem Öffner Relais nehmen konnte. Den gleichen Schritt, musste ich beim Snubbercap machen. Dies war aber ziemlich einfach, da die Komponenten nicht so komplex vom Aufbau wie der Behlke Schalter waren. Durch Sebastian Allenbach welcher Konstrukteur ist, erhielt ich ebenfalls ein 3D-Modell vom Snubbercap, welches ich beim Footprint hinterlegen konnte, so konnte ich überprüfen, den Footprint richtig gezeichnet zu haben.



Den Footprint für den Behlke Schalter, habe ich auch in KiCad gezeichnet. Gerne hätte ich auch ein 3d Modell, welches ich einsetzen konnte. Leider war dies in diesem Zeitrahmen nicht mehr möglich selbst eins zu erstellen, da Behlke keines zur Verfügung hatte.

Definieren der Komponenten

Nachdem das Schema in KiCad vollständig erfasst war, mussten noch die Footprints definiert werden. Die Footprints wurden den Symbolen jeweils zugeordnet. Nachdem alle Symbole mit ihren zugehörigen Footprints definiert waren, konnte der eigentliche Prozess des PCB-Layouts starten, weil erst ab diesem Zeitpunkt alle mechanischen Eigenschaften der Komponenten vorhanden sind und mit den Symbolen, welche im Schema vorkommen, verknüpft sind.

Grobes Layout

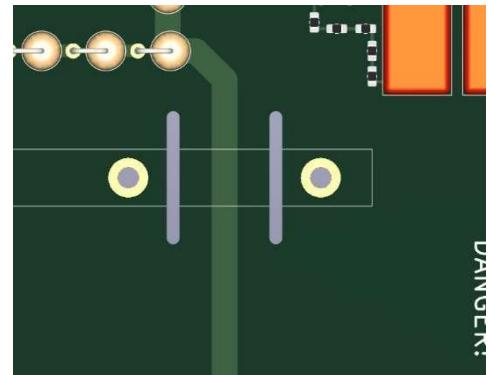
Das grobe Layout, konnte ich bereits von den ersten Ideen übernehmen. Dies scheint zwar nach wenig Arbeit, aber es ist das komplette Gegenteil. Das Berücksichtigen der Kriechstrecken und der dennoch kompakte Aufbau, war schlichtweg eine grosse Herausforderung für mich. Erste Lösungsansätze sind im Anhang vorhanden.

Berücksichtigung der Kriechstrecken

Ein sehr wichtiges und anspruchsvolles Design Kriterium ist, die Mindestkriechstrecke. Einen groben Ansatz hatte ich schon vom Auswerten der vorhandenen Einrichtung. Dort konnte ich feststellen, dass eine Kriechstrecke von ca. 5mm/kV genutzt wurde. Auf dieser Grundlage entwarf ich später alle Kriechstrecken. Auch Roland Manser war nach einer kurzen Rücksprache damit einverstanden. Auch konnte ich ein Dokument mit Richtlinien zu Kriechstrecken finden, wo in sauberen Umgebungen auch eine Kriechstrecke von ca. 5mm/kV erwähnt wird. Was auch wichtig zum Anmerken ist, ist das diese Kriechstrecken für unter Dauer stehende Spannungsführende teile ausgelegt sind. In dieser

Anwendung, wo der Burstgenerator, nicht über Jahre unter Spannung stehen wird, könnte man auch deutlich unter diese Mindestkriechstrecke, hier habe ich mich aber entschieden, dass ich überall die vorher erwähnte kriechstrecke einhalten werde.

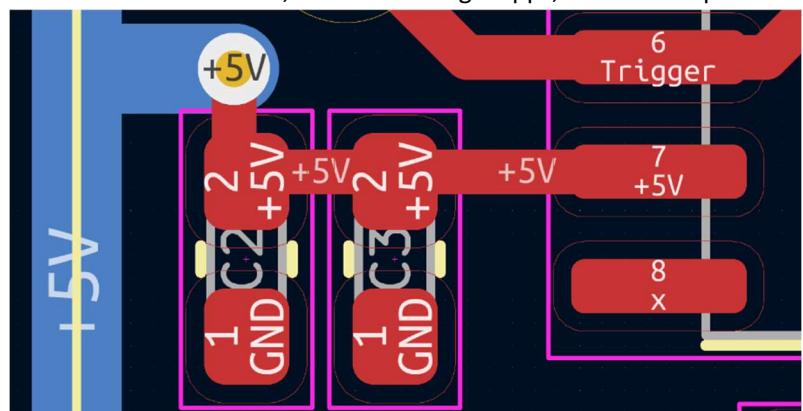
Was auch in diesem Printdesign genutzt wurde, sind Aussparungen im Printmaterial, um die Kriechstrecke zu verlängern, wo es deutlich an Platz mangelte. Inspiration dafür habe ich durch neue Driver-boards von Halbleitern bei uns im Labor erhalten, welche auch Isolationsschlitzte in ihrem Printdesign haben, um die Kriechstrecken welche erforderlich sind einhalten zu können.



Layout der Speisung und Schutzbeschaltung

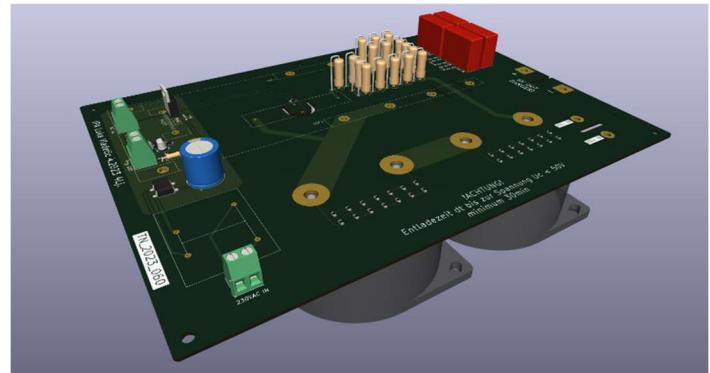
Was im Vergleich zum HV Teil relativ einfach erschien, war der Niederspannungsteil. Hier habe ich auch schnell meiner Meinung nach ein passendes Layout gefunden. Dies war elektrotechnisch auch in Ordnung, doch nach einem kleinen Gespräch mit Michael Schnellmann, erhielt ich einige Tipps, welche ich später umgesetzt habe. Die wichtigste Empfehlung, war eine kleine, aber wichtige Berücksichtigung, welche das Gerät störsunempfindlicher macht.

Dabei geht es um das Abfangen von Transienten. Hier ein Beispiel. Die 5V welche zum OpAmp führen, haben keine Möglichkeit, als durch die beiden Kondensatoren C2 und C3 zu passieren. Dabei werden alle Transienten bestmöglich abgefangen. Ein schlechtes Routing wäre eine «T-Stück» Verbindung, wo der Strom nicht direkt über die Kondensatoren fliesst. Somit wird theoretisch schlechter gefiltert.



Finales Layout und Bestellung vom Print

Das Finale Layout weicht einiges von der ersten Version ab, da sehr viele Sachen im Nachhinein während der Konstruktion angepasst wurden. Zum Beispiel wurden Isolations-Schlitzte hinzugefügt, welche ich anfangs gar nicht geplant hatte. Nachdem alles 3- und 4-Fach geprüft wurde, war ich endlich bereit den Print mit allen Komponenten zu bestellen. Auch die 3D-Ansicht im Programm schätzte ich sehr, da es mir eine gewisse Bestätigung gab, dass ich nichts übersehen habe. Das Finale Layout ist auch so kompakt wie möglich entworfen worden, ohne die Mindestkriechstrecken zu missachten. Bevor ich die Bestellung absendete, kontrollierte ich zusammen mit Michal Sir die Gerberfiles, welche ich mit KiCad erzeugt habe. Nachdem er ebenfalls keine Fehler mehr gesehen hatte, habe ich schliesslich die Prints bestellt.



Materialbestellungen

Bei der Bestellung der Komponenten, musste ich auf mehrere Lieferanten angewiesen sein. In die wichtigsten Kategorien gegliedert, habe ich alles bestellt.

Digikey

Bei Digikey habe ich den grössten Teil bestellt, welcher für den Print relevant ist. Dort habe ich hauptsächlich Elektronik Komponenten und sonstiges Zubehör für den Printdesign bestellt. Die Liste mit den bestellten Komponenten, sind im Anhang erhalten.

Distrelec

Bei Distrelec habe ich ein elegantes Gehäuse und den SHV-Einbaustecker gefunden. Hier ist ebenso die Liste im Anhang zu finden.

Restliche Bestellungen

Bei Conrad habe ich Mechanische kleinteile bestellt, sowie den Printtrafo welchen ich im Design verwendet habe.

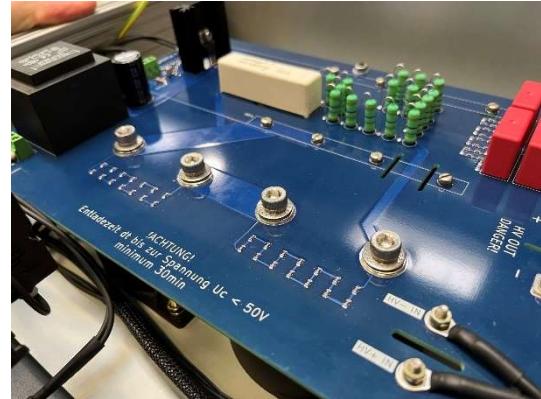
Bei Farnell.com habe ich noch die Einbauplatte für das Gehäuse, das ich bei Distrelec bestellt habe, ebenso bestellt. Ich wurde allerdings nur durch Wolfgang Mayer darauf aufmerksam, dass die Montageplatte nicht im Lieferumfang erhalten ist.

Zuletzt habe ich auch ein SHV-Koaxial Kabel, welches vorkonfektioniert ist bei Koax24.de bestellt. Dies war nötig, um die vorgesehene SHV-Buchse mit Strom versorgen zu können. Es soll auch in Zukunft als Standard dienen, verschiedene Geräte welche Hochspannung brauchen mit Strom sicher zu versorgen. Es war, aber nicht Umfang der IPA, ein solches Kabel zu bestellen, da es allgemeiner Laborbedarf ist.

Mechanische Arbeiten

Löten vom Print

Da der Print recht viele SMD-Komponenten beinhaltet, habe ich mich dazu entschieden, die SMD-Komponenten mit Lötpaste und einem Stencil zu löten. Das Prinzip dabei ist, das alle freien SMD-Lötspuren durch eine Schablone erreichbar sind. Diese Schablone hat eine gewisse dicke (0.12mm). Streicht man jetzt die Lötpaste mit einem Spachtel über die Aussparungen, hat man überall die perfekte Menge an Lötpaste verteilt. Danach kann man alle Komponenten auf den Print legen und anschliessend mit Heissluft und einer Heizplatte festlöten. Dies wird so bei kleinen Serien in der Industrie verwendet, um SMD-Komponenten zu löten.



Dies hat bei mir erstaunlich gut funktioniert, für das erste Mal, das ich sowas gemacht habe. So konnte ich den grössten Teil der Steuer-Elektronik und der Passiven entladewiderstände relativ schnell und ohne Komplikationen löten.

THT-Komponenten habe ich klassisch mit einem Lötkolben gelötet. Dazu zählen die bedrahteten Widerstände, die verschiedenen Kondensatoren und der Printtrafo mit dem Linearregler.

Gereinigt wurde der Print mit Iso-Propanol, um Flussmittelreste zu entfernen, welche später die Ursache für Korrosion sein können.

Abschliessend, habe ich alle noch dazugehörigen mechanischen Komponenten auf den Print montiert. Dazu gehören die beiden Zwischenkreiskondensatoren, der Behlke Schalter und der Kühlkörper. Alle elektrischen Verbindungen, wurden mit U-Scheiben und Ferderringen ausgeführt, um möglichst sicheren Kontakt und Vibrations-Festigkeit gewährleisten zu können.

Zu diesem Zeitpunkt war ich besonders erleichtert und froh, dass der Print auch optisch schön war. Hier war auch meine grösste Sorge beruhigt, da alle Footprints, welche ich selber konstruiert habe, gepasst haben.

Die einzige Komponente, welche nicht perfekt draufpasste, war der Behlke Schalter. Bei diesem, habe ich den Abstand der kleinen Stifteleiste falsch gemessen. Da aber die Abweichung nur 1mm war, passte es trotzdem, da die Stifteleiste leicht verbogen werden konnte.

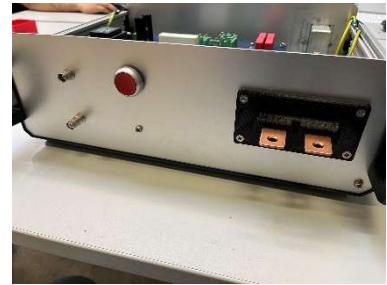
Montage der Schaltung

Der Print wurde an das Einbaublech vom Gehäuse montiert und gleichzeitig befestigt. Das Motageblech vom Gehäuse diente gleichzeitig zur mechanischen Befestigung der beiden Snubbers. Dadurch wird der Print, mechanisch kaum beansprucht und gewährleistet eine stabile Konstruktion. Dies zeigte sich als sehr robuste Lösung, welche mechanisch zerlegbar ist.

Fertigung der Front- und Rückplatte

Die beiden Frontplatten, haben sich nach dem Einbau des Prints mit der Montageplatte ins Gehäuse schnell ergeben. Viel Platz hatte ich nicht. Zudem gab es nicht viele Aussparungen/Löcher, welche gebohrt/gefeilt werden mussten. Somit habe ich mich dazu entschieden, die Rückplatte als erstes zu machen, da ein Fehler nicht so sichtbar wäre. Zudem war auch die Aussparung simpel. Nachdem ich das Gefühl für die härte, vom Blech bekam und ich wieder in Übung gekommen bin, habe ich mich der Frontplatte gewidmet. Ich habe mich dazu entschieden, mehr Platz als nötig zwischen den verschiedenen Anschlüssen und Aussparungen zu lassen, da es später für Erweiterungen hilfreich sein kann. Auch habe ich den Platz für entsprechende Beschriftungen übrig gelassen.

Beim Entwurf der Frontplatte habe ich mich für Symmetrie und simple Geometrien entschieden. Somit habe ich ein recht simples Design mit 4 Komponenten, welche sich auf der Frontplatte schön verteilt befinden. Gleichzeitig habe ich auch die Aussparung für den HV Out Anschluss angefertigt, um später das 3d-Gedruckte einzubauen zu können. Diesen habe ich aber von den Eingängen abgetrennt, da dies meiner Meinung nach abgetrennt werden muss, da alle anderen Anschlüsse und Bedienelemente Inputs für den Burstgenerator sind.



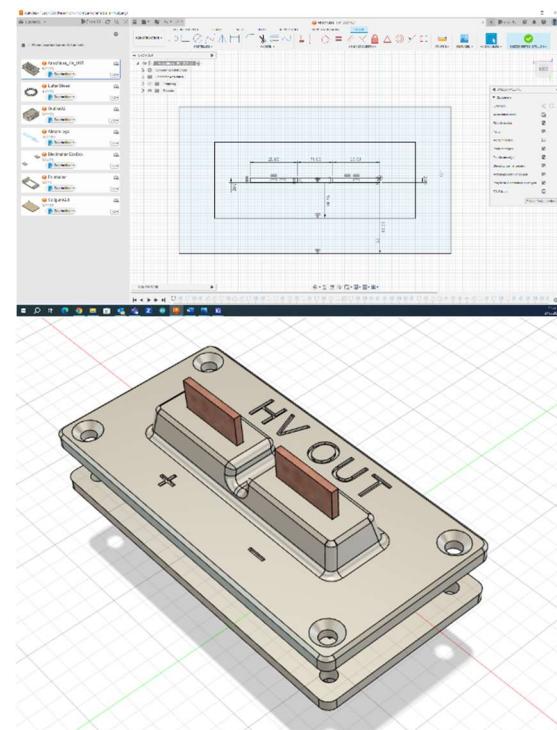
Konstruktion und 3D-Druck

Ich habe mich dazu entschieden, den Hochspannungsanschluss selbst zu entwerfen. Dabei berücksichtigte ich wie beim Print, die minimale Kriechstrecke. Wichtig war aber, dass ich mich an die mindestkriechstrecke halte, da die Induktivität möglichst tief sein muss. Relativ schnell war aber klar, dass ein simples Design die Anforderung am besten erfüllen würde. Michael Schnellmann gab mir noch während dem ersten Teil der IPA den Tipp, blanke Kupferschienen herauszuführen. Dies bietet nämlich einige Vorteile. Nichts kann brechen oder ähnlich, da alles Fix ist. Zudem ist es auch robust und die Elektrische Verbindung kann entsprechend angezogen werden, da man mit dem Werkzeug beim Anziehen der Schraubverbindung gehalten kann.

Klar war beim Design, das alle Regeln bezüglich der Hochspannung eingehalten werden müssen. Zudem habe ich selbst definiert, dass der Anschluss eine Prüfspannung von 6kVAC für 1min bestehen muss. Dies gilt sowohl für die Anschlüsse gegeneinander aber auch für beide Anschlüsse gegen die Frontplatte aus Aluminium, auf der sie montiert sind. Somit kann später ein Ausfall aufgrund der Anschlüsse ausgeschlossen werden. Die Plastikteile, welche ich 3d Drucken werde, führen grundsätzlich zwei Kupferschienen durch die Frontplatte, welche aus Aluminium ist.

Aus diesem Grund habe ich mich entschieden, ein «Sandwich» aus zwei Plastikteilen zu konstruieren, welche später die Kupferschienen halten. Ich musste auch darauf achten, überall, die minimale Kriechstrecke einzuhalten. Dies war aber kein Problem, da ich genügend Platz auf der Frontplatte hatte.

Nachdem ich mein Design im CAD fertiggestellt habe, habe ich im Slicer alles für den 3d-Drucker vorbereitet und den Druck gestartet.



Das Einzige, was ich im Nachhinein bemerkt habe, ist, das die +- Beschriftung nicht ideal platziert ist, da man mit einem flachen Winkel draufschauen muss, um die Beschriftung lesen zu können.

Letzte Elektromechanische Arbeiten

Alle elektrischen Verbindungen wurden mit verdrillten Paaren gemacht, um die Störeinflüsse zu minimieren. Auch wurden die Hochspannungsverbindungen mit 9GKW Kabeln gemacht, welche für 3.6kVAC ausgelegt sind. Alle übrigen wurden mit 3GKW Litze gemacht, welche 600VAC vertragen. Somit ist das Risiko bei einem Fehler das etwas überschlägt deutlich geringer.

Nachträglich wurde auch eine kleine Indikator-LED, für vorhandene Betriebsspannung hinzugefügt, um dem Benutzer ein Visuelles Feedback zu bieten.



Abschliessend wurden die Beschriftungen auf der Frontplatte aufgeklebt. Ziel ist es nach der IPA, die Frontplatte Gravieren zu lassen, damit es noch professioneller wirkt.

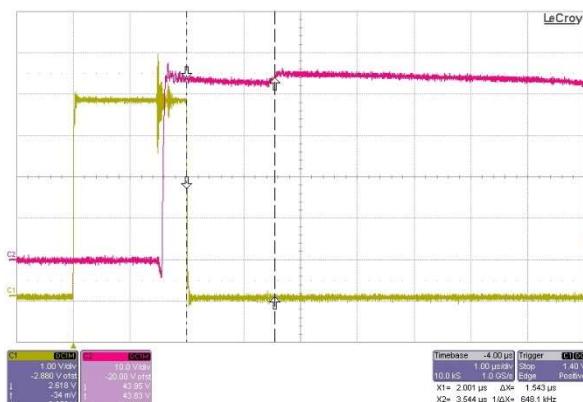
Test des Burstgenerators

Um den Burstgenerator zu testen, habe ich mich dazu entschieden, alle Hauptkomponenten einzeln zu testen. Dabei habe ich auch gewisse Widerstände bereits, nach dem Löten der SMD-Komponenten ausgemessen. Dazu zählen hauptsächlich die passiven Entladewiderstände.

Um alles korrekt festhalten zu können, habe ich auch Messprotokolle erstellt, welche meine Prüfbedienungen zeigen, und die Werte festhalten, welche ich gemessen/festgestellt habe. Auf diesen Messprotokollen, sind aber auch die optimalen Werte festgehalten, um in Zukunft, mögliche Erweiterungen/Reparaturarbeiten einfacher gestalten zu können.

Nachdem alle Komponenten selektiv geprüft wurden, habe ich auch den Burstgenerator mit Michael Schnellmann bei kleiner Spannung in Betrieb genommen. Vor allem mit dem bedienen vom Oszilloskop hat mir Michael geholfen, da ich an ein anderes gewöhnt war. Dabei habe ich alle Funktionen getestet und einwandfreien Betrieb feststellen können.

Danach habe ich eine vollumfängliche Funktionsprüfung mit Roland Manser und angeschlossener Drossel durchgeführt. Dabei haben wir feststellen können das alles wie erwartet funktioniert hat.



Was aber noch wichtig zum Anmerken ist, ist das der Burstgenerator in der Regel mit ca. 1kV betrieben wird. Was ich bei der Spannungsprüfung festgestellt habe, ist, dass ab 3kV der Leckstrom im Behlke Schalter recht schnell ansteigt. Bis zu 5mA bei 3.3kV. Nach Absprache mit Roland Manser, stufte er dies als unwichtig ein, da die eben genannte Arbeitsspannung von 1kV selten überschritten wird. Auch hat er darauf hingewiesen, dass die maximale Arbeits-Spannung eher bei 2kV liegt, da ansonsten der Strom zu gross wird. Eine klare Erklärung haben ich und Roland Manser nicht, es könnte jedoch sein, dass der Behlke Schalter vorgeschädigt ist, und dadurch bei hoher Spannung ein Leckstrom anfängt zu fliessen.

Unterlagen

Angehängt sind Unterlagen, welche zur Dokumentation relevant sind.

Bedienungsanleitung Burstgenerator V0

Aufbau des Versuchs

Damit der Burstgenerator in Betrieb genommen werden kann, muss erst alles angeschlossen werden.

1. Anschliessen des 230V Gerätesteckers
2. Anschliessen des SHV-Kabels, welches mit einer HV Speisung verbunden ist.
3. Anschliessen vom Trigger Eingang, dieser muss mit dem Frequenzgenerator sowie mit dem Oszilloskop verbunden werden.
4. Anschliessen der Induktivität mit verdrillter Litze, welche das DUT umschliesst.

Was bei der HV-Speisung beachtet werden muss:

1. Die Strombegrenzung darf maximal auf 50mA eingestellt sein.
2. Die eingestellte Spannung darf nicht höher als 3.00kV sein.

Was beim Funktionsgenerator beachtet werden muss:

1. Das Logiksignal beträgt idealerweise 0-5V. Nicht aber grösser als 20VAC
2. Kürzere Bursts als 2us sind nicht geeignet.
3. Der Auslastungsgrad vom Steuersignal darf nicht 15W bei betrieb überschreiten.

$$R=800\Omega; \quad U=0 - 3.00kV; \quad P<15W;$$

$$P = \frac{U^2}{R} \times A = \frac{(1000V)^2}{800\Omega} \times 0.001 = 1.25W$$

In diesem Fall ist es Ok den Burstgenerator so zu betreiben da 1.25W wärme entstehen.

DUT entsprechend dem Versuch auch ans Oszilloskop und den Frequenzgenerator anschliessen.

Während des Versuchs

Um den Burstgenerator in Betrieb nehmen zu können, muss er als erstes über den Gerätestecker mit 230V AC versorgt werden. Nach dem Einschalten muss die grüne LED auf der Frontplatte aufleuchten.

Leuchtet die LED nicht auf, ist die Sicherung, welche im Gerätestecker verbaut ist zu prüfen. Sie darf nur mit 40mAT ersetzt werden.

Nun lädt man den Burstgenerator auf 50V und testet, ob alle Signale vorhanden sind. Ist dies der Fall, darf die Spannung etappenweise erhöht werden. Dabei darauf Achten, dass der Auslastungsgrad nicht überschritten wird.

Hat man nicht alle Signale, ist eine Rogowski von Vorteil, um zu sehen, ob Strom fliesst. Triggern sollte man auf das Signal des Frequenzgenerators.

Abbau des Versuchs

Ist man mit dem Versuch fertig, schaltet man als erstes die HV-Speisung aus. Nachdem der Burstgenerator noch getaktet hat und man festgestellt hat, dass die Zwischenkreisspannung im Burstgenerator kleiner 50V ist, kann man nun auch den Burstgenerator ausschalten.

Danach muss nochmals die rote Schnellentladetaste für 3s betätigt werden. Danach kann alles nach einer weiteren Spannungsprüfung mit einem geeigneten Mittel, alles entfernt werden.

Die Anschlüsse müssen nicht geerdet werden, da intern automatisch die Schnellentladevorrichtung bei Verlust von 230V auslöst.

Messprotokoll: 1 Widerstandsüberprüfung Koppelkondensator

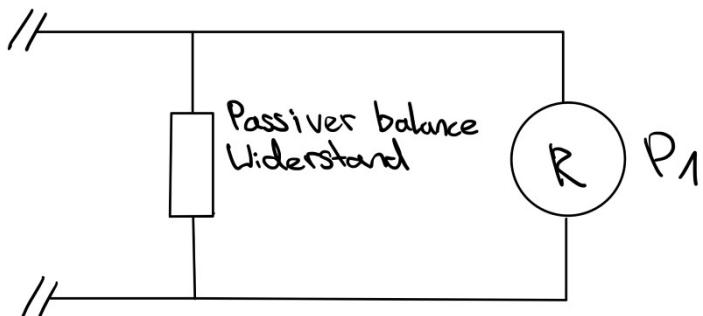
Messaufgabe:

Direkte Widerstandsmessung der passiven Balancewiderstände des Koppelkondensators.

Messobjekt

Bezeichnung: Widerstand
Typ: YAGEO RC0805FR-07715KL
Tech. Daten: 8x 715kΩ, 5%, 1/8W SMD
Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: digitales Multimeter
Typ: Fluke 87 III
Serie Nr.: 72090382
Weitere Angaben: P1

Messresultat

$$R = 1.5M\Omega$$

$$R_{tot} = 14 \times 715k\Omega = 10.0M\Omega$$

$$R_{\pm} = 10M\Omega \times 0.05 = 500k\Omega$$

Auswertung des Messresultats

$$R_{tot1}=10.0M\Omega \quad R_{tot2}=10.0M\Omega$$

Beide Widerstände liegen innerhalb der oben angegebenen Toleranz.

Name: Vladetic Vorname: Luka
Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon Unterschrift: *Luka Vladetic*

Messprotokoll: 2 Widerstandsüberprüfung Zwischenkreis

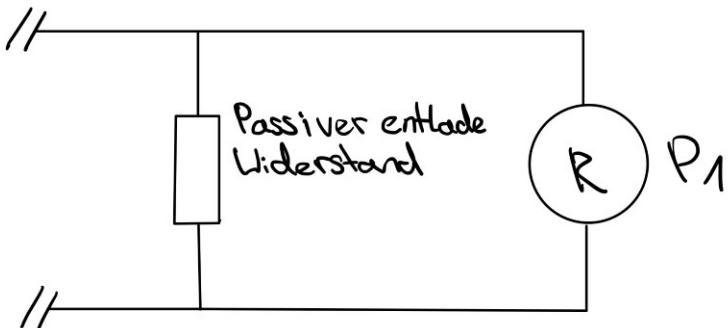
Messaufgabe:

Direkte Widerstandsmessung der passiven Entladewiderstände des Zwischenkreises.

Messobjekt

Bezeichnung: Widerstand
Typ: YAGEO RC0805JR-071M5L
Tech. Daten: 8x 1.5MΩ, 5%, 1/8W SMD
Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: digitales Multimeter
Typ: Fluke 87 III
Serie Nr.: 72090382
Weitere Angaben: P1

Messresultat

$$R = 1.5M\Omega$$

$$R_{tot} = 14 \times 1.5M\Omega = 21M\Omega$$

$$R_{\pm} = 21M\Omega \times 0.05 = 1.05M\Omega$$

Auswertung des Messresultats

$$R_{tot1} = 20.78M\Omega \quad R_{tot2} = 20.89M\Omega$$

Beide Widerstände liegen innerhalb der oben angegebenen Toleranz.

Name: Vladetic Vorname: Luka
Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon Unterschrift:

Messprotokoll: 3 Kurzschlusstest 5V Speisung

Messaufgabe:

Kurzschlusstest auf der 5V Speisung vom Burstgenerator(10s).

Messobjekt

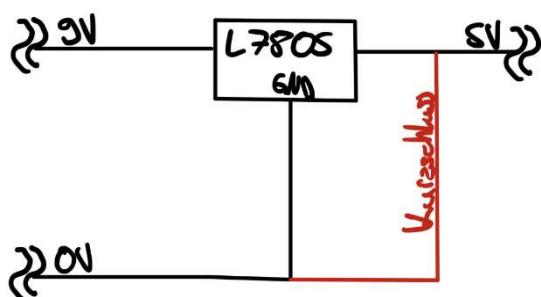
Bezeichnung: Burstgenerator

Typ: V0

Tech. Daten: 3.6kV, 50w

Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: Infrarot Wärmebildkamera

Typ: Fluke Ti25

Serie Nr.: SCS0040

Weitere Angaben: P1

Messresultat

$T_{max} = 47.7^\circ\text{C}$

Auswertung des Messresultats

Die Temperatur konnte gar nicht viel ansteigen, da die Sicherung ausgelöst hat.

Davor war die Speisung noch 10min eingeschaltet, dass sich alle Komponenten thermisch einpendeln können.

Somit ist die Temperatur nicht über 80°C gestiegen.

Name: Vladetic

Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon

Vorname:

Unterschrift:

Luka
Luka Vladetic

Messprotokoll: 4 Schnellentladewiderstand Überprüfung

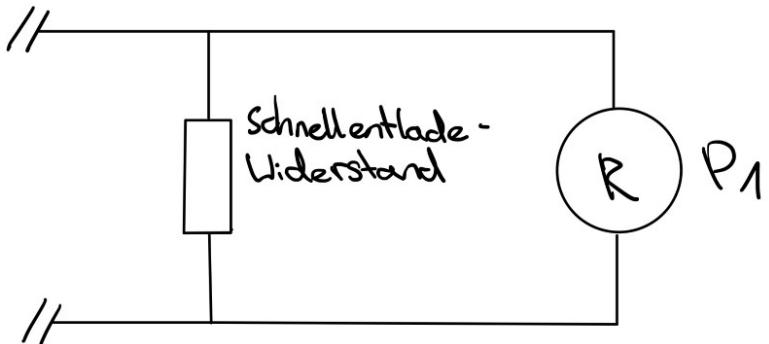
Messaufgabe:

Direkte Widerstandsmessung des schnell Entladewiderstandes.

Messobjekt

Bezeichnung: Widerstand
Typ: Te Connectivity EP3WS470RJ
Tech. Daten: 8x 470Ω, 5%, 3W Axial
Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: digitales Multimeter
Typ: Fluke 87 III
Serie Nr.: 72090382
Weitere Angaben: P1

Messresultat

$$R = 470\Omega$$

$$R_{tot} = 8 \times 470\Omega = 3760\Omega$$

$$R_{\pm} = 3760\Omega \times 0.05 = 188\Omega$$

Auswertung des Messresultats

$$R_{tot} = 3686\Omega$$

Der Widerstand liegt innerhalb der oben angegebenen Toleranz.

Name:	Vladetic	Vorname:	Luka
Ort, Datum:	30.5.23, Oerlikon	Unterschrift:	

Messprotokoll: 5 Thermische Lastprüfung Schnellentladewiderstand

Messaufgabe:

Der Funktionstest der Schnellentladevorrichtung bei voller Ladespannung und eingeschalteter Speisung ($U=3.3\text{kV}$, $I_{\text{lim}}=50\text{mA}$).

Messobjekt

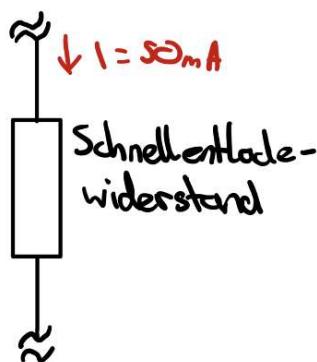
Bezeichnung: Burstgenerator

Typ: V0

Tech. Daten: 3.6kV, 50w

Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: Infrarot Wärmebildkamera

Typ: Fluke Ti25

Serie Nr.: SCS0040

Weitere Angaben: P1

Messresultat

$T_{\text{max}}=119.2^{\circ}\text{C}$

Auswertung des Messresultats

Die Temperatur konnte gar nicht viel ansteigen, da die HV-Speisung in die Strombegrenzung gegangen ist.
Der Test dauerte 60s.

Somit ist die Temperatur nicht über 150°C gestiegen.

Name: Vladetic

Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon

Vorname:

Luka
Luka Vladetic

Unterschrift:

Messprotokoll: 6 Zeitverzug Trigger Signal

Messaufgabe:

Zeitverzug vom Trigger Signal bis zum Ein- und Aus-schalten vom Behlke Schalter.

Messobjekt

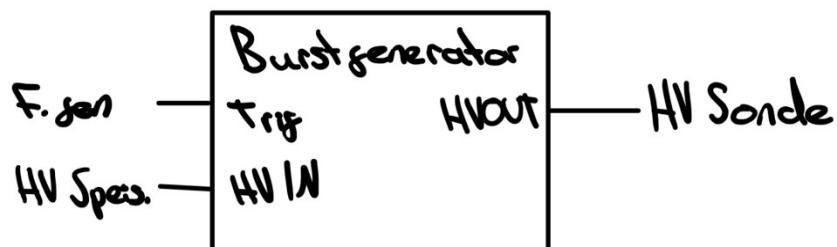
Bezeichnung: Burstgenerator

Typ: V0

Tech. Daten: 3.6kV, 50w

Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: digitales 4 Kanal Oszilloskop

Typ: LeCroy Wawesurfer 424

Serie Nr.: LCRY0301J18499

Weitere Angaben: -

Messresultat

$t_{on} = 1.57 \mu s @ 5V$ logik

$t_{off} = 1.54 \mu s @ 5V$ logik

Auswertung des Messresultats

$t_{on} = 1.57 \mu s @ 5V$

$t_{off} = 1.54 \mu s @ 5V$

Die Einschaltzeit sowie die Ausschaltzeit liegen unter 5 μs Zeitverzug.

Name: Vladetic

Vorname:

Luka

Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon

Unterschrift:

Luka Vladetic

Messprotokoll: 7 Leckstrom Prüfung

Messaufgabe:

Leckstrom bei voller Ladespannung vom Zwischenkreis.

Messobjekt

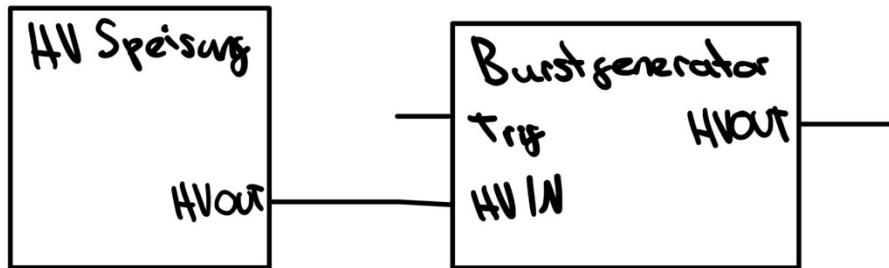
Bezeichnung: Burstgenerator

Typ: V0

Tech. Daten: 3.6kV; 50W

Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: HV Powersupply

Typ: Heinzinger LNC 10000-5 pos

Serie Nr.: 2850 04860

Weitere Angaben: T1

Messresultat

$I = <1\text{mA}$

$$I_{in} = 896\mu\text{A} @ 3.00\text{kV}$$

Auswertung des Messresultats

$$I_{in} = 896\mu\text{A}$$

Der Leckstrom befindet sich im normalen Rahmen bei einer Spannung von 3.00kV.

Name: Vladetic

Vorname:

Luka

Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon

Unterschrift:

Luka Vladetic

Messprotokoll: 8 Trigger Eingang Prüfung

Messaufgabe:

20VRms auf Trigger Eingang anlegen und richtiges Schaltverhalten überprüfen.

Messobjekt

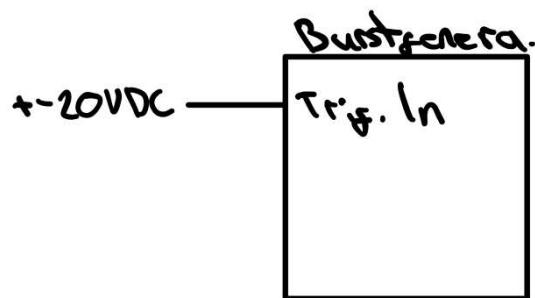
Bezeichnung: Burstgenerator

Typ: V0

Tech. Daten: 3.6kV; 50W

Weitere Angaben: -

Messschaltung



Messmittel

Bezeichnung: DC Speisung

Typ: Dr. K. Widmer E2C Twin

Serie Nr.: -

Weitere Angaben: -

Messresultat

I = <25mA

Auswertung des Messresultats

$$I_{trig} = 25mA$$

Der Eingangsstrom befindet sich im normalen Rahmen bei einer Spannung von 20VDC.

Name: Vladetic

Vorname: Luka

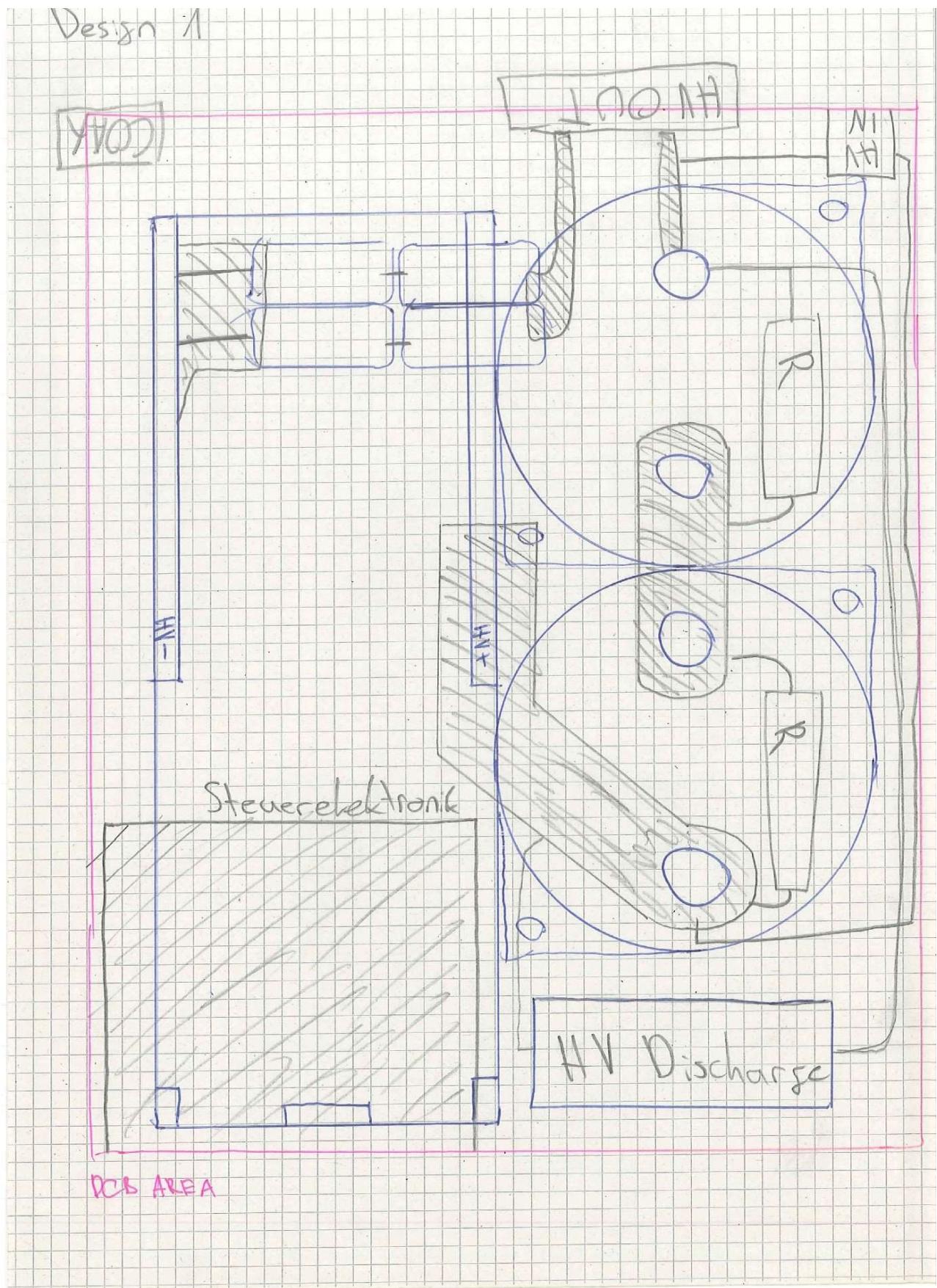
Ort, Datum: 30.5.23, Oerlikon

Unterschrift:

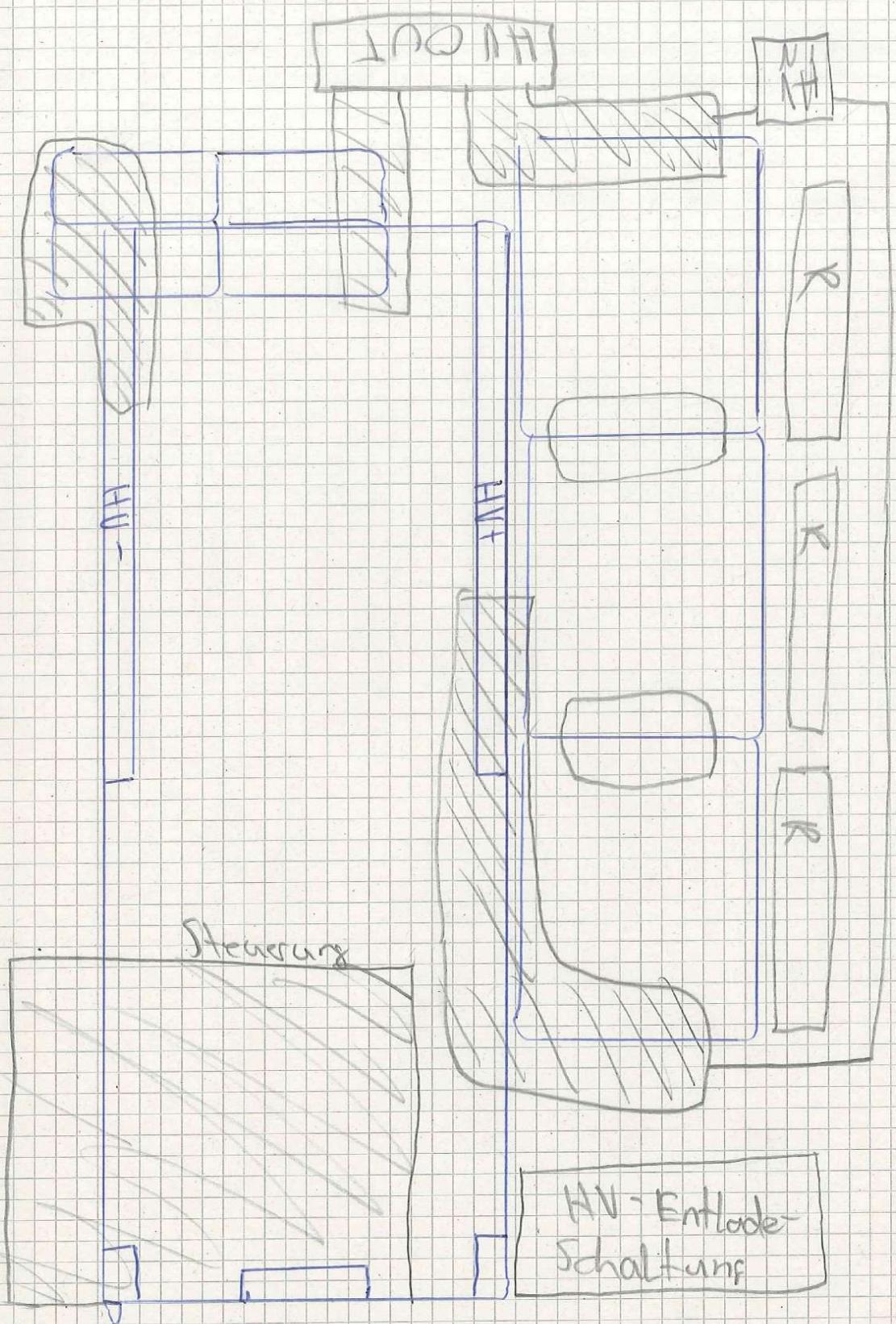
Luka Vladetic

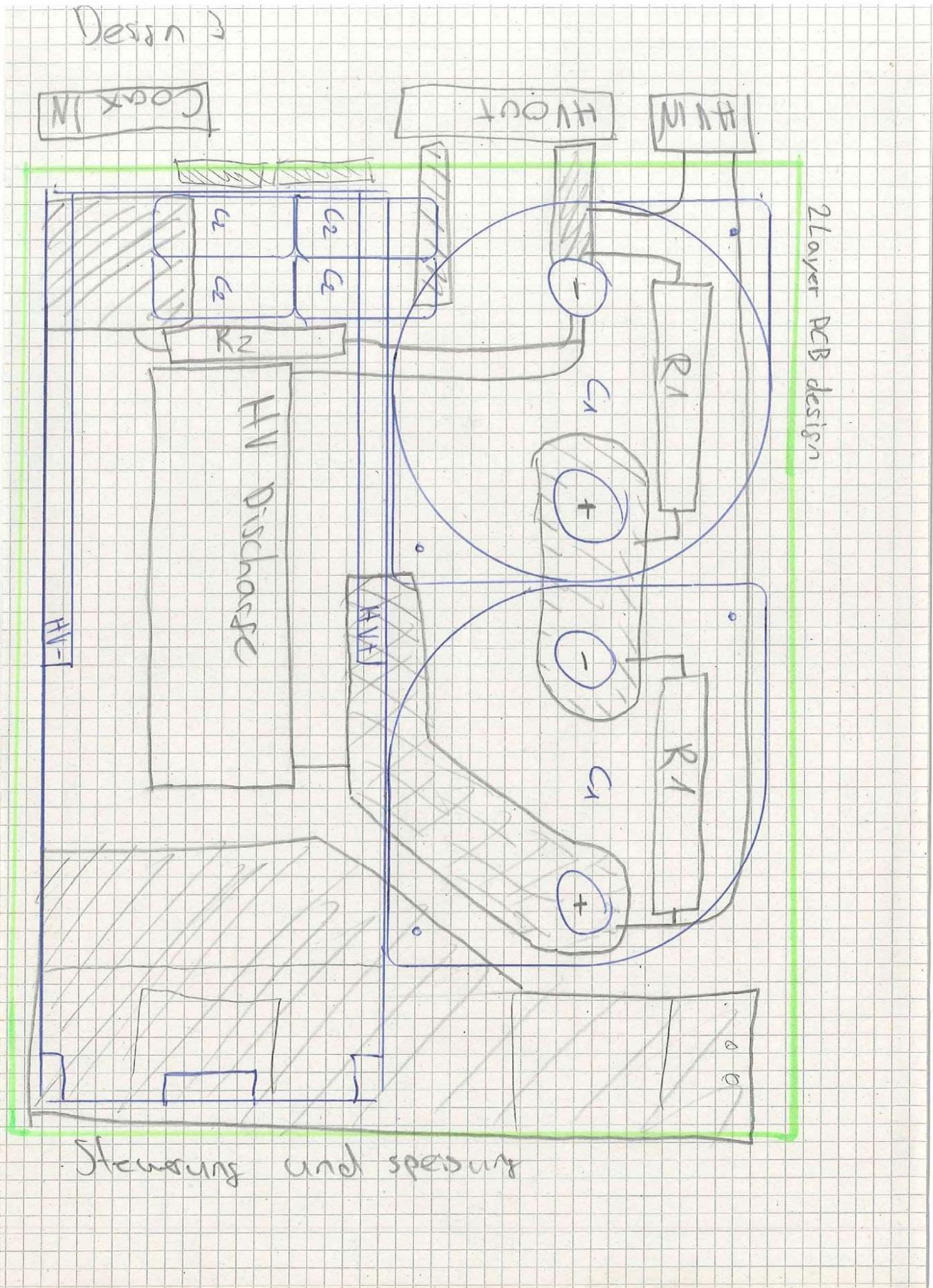
Diverse Anhänge

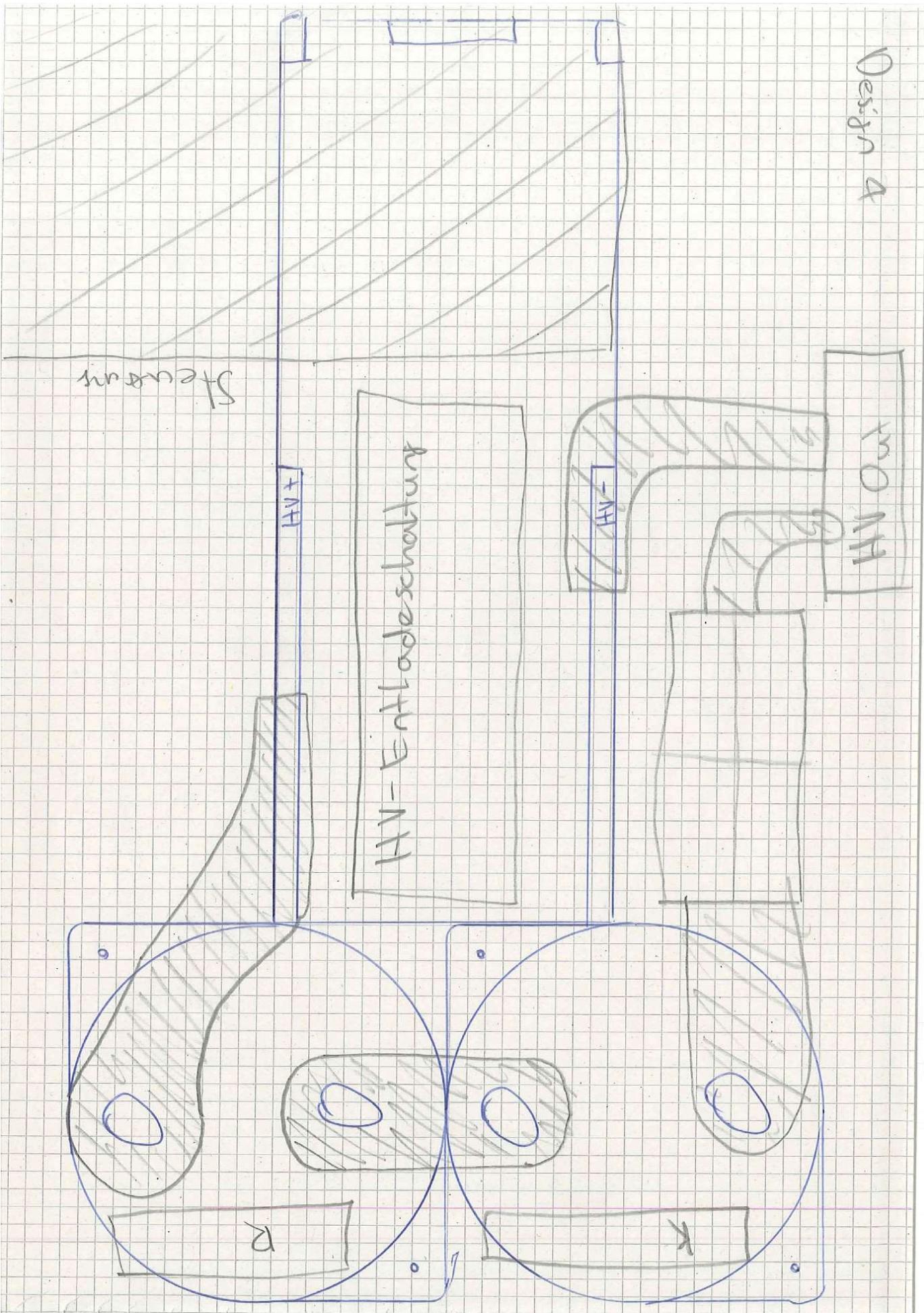
Handschriftliche Notizen:



Design 2







Widerstandauswahl:

- $R_{150} = 25\text{M}\Omega \Rightarrow 2\text{M}\Omega \cdot 12 \text{ serie (0805) } 2\text{W}$

$U_{max} = 150\text{V pro Widerstand } 1800\text{V}/12 = \underline{150\text{V}}$

- $R_{180} = 25\text{M}\Omega \Rightarrow 1.8\text{M}\Omega \cdot 14 \text{ serie (0805) } 2\text{W}$

$U_{max} = 150\text{V pro Widerstand } 1800\text{V}/14 = \underline{128\text{V}}$

Hst. YAEGO RC-L RC0805JR-071MPL ✓

$R_{2tot} = 880k \Rightarrow 33.3k \cdot 27 \text{ serie (0805)}$

$U_{max} = 150\text{V } 3600\text{V}/27 = \underline{133\text{V}} \text{ pro Widerstand}$

Hst. YAEGO RC-L RC0805JR-0731KL

HV Discharge Resistor

$3600\text{V} / 2\text{A} = 1.8k$

$3600\text{V} / 14 = 3600\Omega \Rightarrow 30 \cdot 120\Omega = 3600\Omega \text{ (0805) } 3.75\text{W}$

~~$0.725 = t_c$~~
 $\Rightarrow 30 \cdot 120\Omega = 3600\Omega \text{ (1206) } 7.5\text{W}$

$0.365 = t_c$

~~$\Rightarrow 30 \cdot 200\Omega = 7200\Omega \text{ (1206) } 2.5\text{W}$~~

~~$0.725 = t_c = 7.28\text{V } 1\text{V nach } 17\text{s}$~~

~~1206 $\Rightarrow (C1206)R-07240RL$~~

~~0805 $\Rightarrow RC0805FR-07240RL$~~

~~Spitzen-Pak an einem Widerstand 60W!~~

Rackrelais Auswahl:

NC min 5000VDC 5VDC Spulenspannung

- DST 70510U

- DST 70505-HR

SOA P switching SV Spule

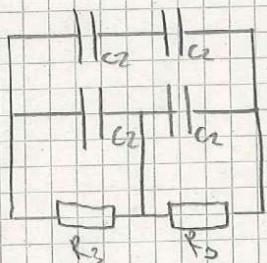
SV I 20A

Cr. I 30A

C₂ Auswahl

0.047μF 2kVDC

WIMA MKP1U029705G00KSSD



$R_3 \approx 10\text{M}\Omega$

15.600k 080S ✓

5V Sperrung: Printtrafo 6VA 6V

Gleichrichter 50V/1A

Kom

5V 500mA bedarf $T_d: \pm 2\%$

Auslegung 5V/1A / $\pm 2\%$

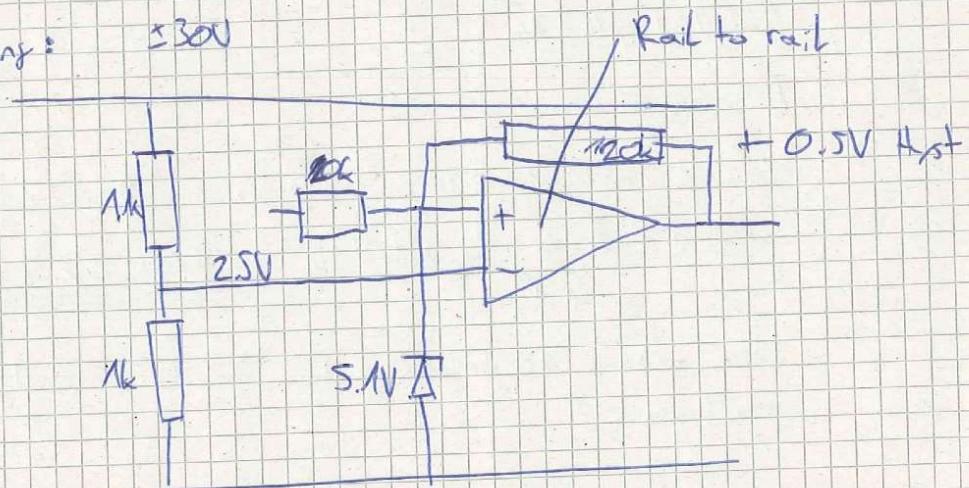
Gleichrichter 25V/1A (B2U)

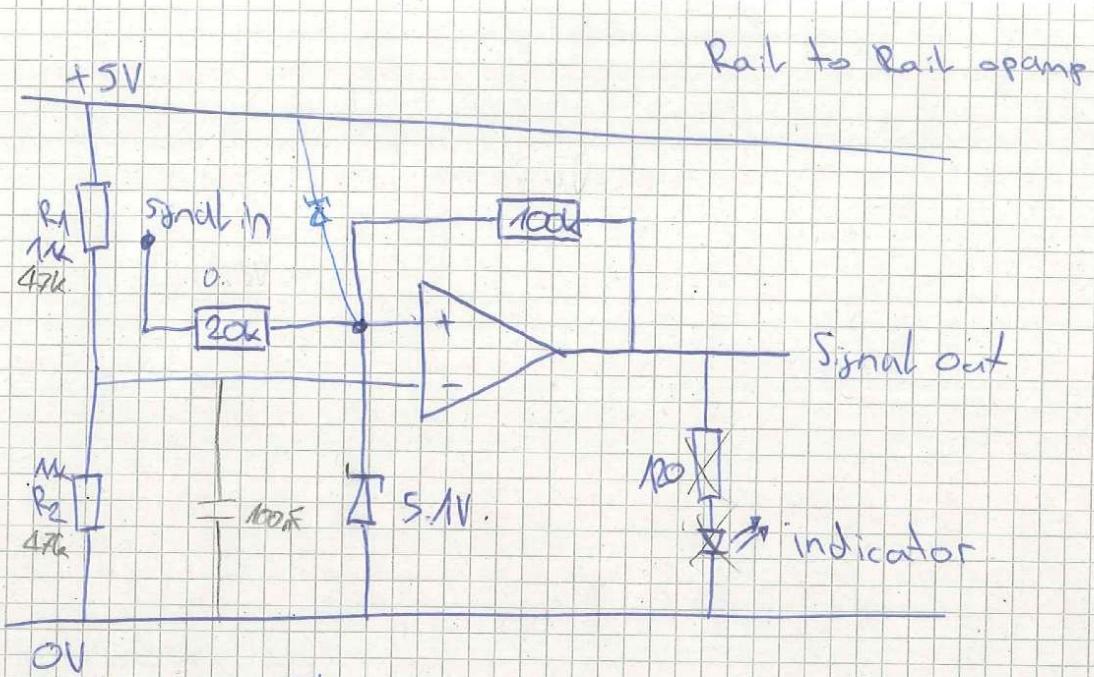
$$G_p \leq 0.2V \quad U_p = \frac{0.75 \cdot I_d}{100Hz \cdot C_S} \quad C_S = \underline{\underline{37mF}}$$
$$\underline{\underline{0.5V = 715mF}}$$

Linearregler: 5V 1A

TO 220 / TO 252-3

Schutzbeschaltung: $\pm 30V$

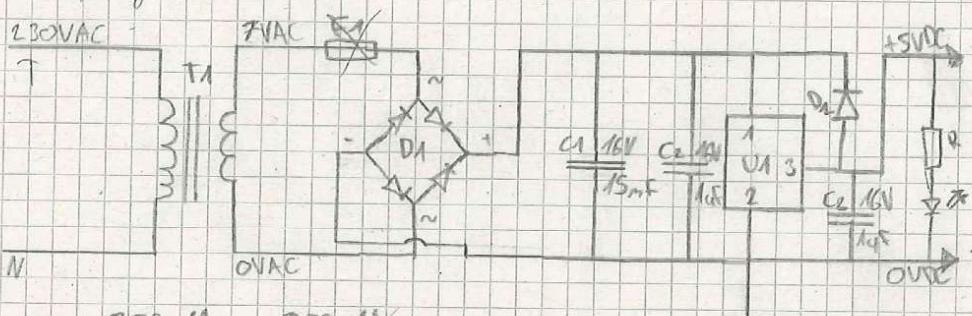




Hysteresis $\frac{1}{2} \text{ mV}$
 $ON \Rightarrow 3\text{V}$
 $OFF \Rightarrow 2\text{V}$

bandwidth $\geq 20\text{MHz}$

DC Supply 5V



$$C_8 = C_1 = \frac{0.75 \cdot 1\text{A}}{f_p \cdot U_p} = \frac{0.75 \cdot 1\text{A}}{100\text{Hz} \cdot 0.5\text{V}} = 15\text{nF}$$

D1 (BZU) 1A DL 1N4007

$$C_{2,3} 16\text{V } 1\mu\text{F} \Rightarrow C_2 16\text{V } 0.33\mu\text{F} \quad C_3 16\text{V } 0.1\mu\text{F} \quad C_4 16\text{V } 100\mu\text{F}$$

U₁ LM7805 (5VDC) f₁ 800mA FF

AD8061

LTC6228
MAX4012 } Rail to Rail

ADCM8600 / LTC1206

T₁ = Earth PTF42000X

Oder: Meanwell PRM-05-5 AC/DC

Bestelllisten

Digikey:

Index	Menge	Teilenummer	Hersteller-Teilenummer	Beschreibung
1	10	1928-1478-ND	MKP1U024705G00KSSD	CAP FILM 0.047UF 10% 2KVDC RAD
2	10	311-4.3KGRCT-ND	RC0603JR-074K3L	RES 4.3K OHM 5% 1/10W 0603
3	1	725-DBT70505-HR-ND	DBT70505-HR	RELAY REED 5KV 5V SPST-NC
4	10	DF01S-TDICT-ND	DF01S-T	BRIDGE RECT 1PHASE 100V 1A DF-S
5	10	BZT52C5V1-TPMSCT-ND	BZT52C5V1-TP	DIODE ZENER 5.1V 500MW SOD123
6	3	HS346-ND	513102B02500G	HEATSINK TO-220 W/PINS 1.5" TALL
7	10	3757-BAS100AS-AU_R1_000A1CT-ND	BAS100AS-AU_R1_000A1	DIODE SCHOTTKY 100V 500MA SOD123
8	5	493-1307-ND	UVZ1E332MHD	CAP ALUM 3300UF 20% 25V RADIAL
9	50	311-1.5MARCT-ND	RC0805JR-071M5L	RES 1.5M OHM 5% 1/8W 0805
10	50	311-715KCRCT-ND	RC0805FR-07715KL	RES 715K OHM 1% 1/8W 0805
11	50	13-RC0603JR-1347KLCT-ND	RC0603JR-1347KL	RES 47K OHM 5% 1/10W 0603
12	10	311-100KHRCT-ND	RC0603FR-07100KL	RES 100K OHM 1% 1/10W 0603
13	10	13-RC0603FR-1312KLCT-ND	RC0603FR-1312KL	RES 12K OHM 1% 1/10W 0603
14	10	1276-1935-1-ND	CL10B104KB8NNWC	CAP CER 0.1UF 50V X7R 0603
15	10	1276-1102-1-ND	CL10A105KA8NNNC	CAP CER 1UF 25V X5R 0603
16	10	1276-CL10B334KA8VPNCCT-ND	CL10B334KA8VPNC	CAP CER 0.33UF 25V X7R 0603
17	10	A129448CT-ND	EP3WS100RJ	RES 100 OHM 5% 3W AXIAL
18	10	2057-EBAA-02-C-ND	EBAA-02-C	EUROBLOCK 2POS
19	10	PCE3995CT-ND	EEE-FC1C100R	CAP ALUM 10UF 20% 16V SMD
20	2	AD8655ARZ-REEL7CT-ND	AD8655ARZ-REEL7	IC OPAMP GP 1 CIRCUIT 8SOIC
21	5	497-1443-5-ND	L7805CV	IC REG LINEAR 5V 1.5A TO220AB
22	3	160-1427-1-ND	LTST-C171KRKT	LED RED CLEAR SMD
23	10	A131358CT-ND	EP3WS470RJ	RES 470 OHM 5% 3W AXIAL
24	5	A98076-ND	282836-2	TERM BLK 2POS SIDE ENTRY 5MM PCB
25	2	486-1275-ND	DD11.0111.1110	PWR ENT MOD RCPT IEC320-C14 PNL
26	3	S1KHCT-ND	CFM12JT1K00	RES 1K OHM 5% 1/2W AXIAL
27	10	RNCP0603FTD1K00CT-ND	RNCP0603FTD1K00	RES 1K OHM 1% 1/8W 0603
28	1	501-1281-ND	6733-0	TEST LEAD 18AWG 10KV BLACK 50'

Distrelec:

Quantity	Article Number	Reference	Manufacturer	Manufacturer Article Number	Name	Availability	Stock
1	30129776		TE Connectivity - AMP	51494-2	HF-Steckverbinder, SHV, Messing, Buchse, Gerade		2
1	11044266		Camdenboss	CDIC00007	Messgerätegehäuse aus Aluminium, 428x351x130mm, Grau		1

Conrad:

 Unterlegscheiben 4.3 mm 9 mm Kunststoff 200 St. TOOLCRAFT TO-6853779 Bestell-Nr.: 2284593	 Gerth PTF420901 Printtransformator 1x 230 V 1x 9 V/AC 8 VA 888 mA Bestell-Nr.: 1092930
<input type="checkbox"/> 1  Entfernen	<input type="checkbox"/> 1  Entfernen CHF 8.45
 AB4X45IAK AB4X45IAK Abstandsbolzen ($\emptyset \times L$) 8 mm x 45 mm M4 M4 Polyamid 1 St. Bestell-Nr.: 2163314	
<input type="checkbox"/> 10 Einzelpreis CHF 0.91  Entfernen	CHF 9.10

Farnell:

Quantity	Reference	Manufacturer	Farnell NR.	Name	Availability	Stock
1		Camdenboss	2392767	Einbauplatte CDICMP007		2

Coax24

Konfiguriertes Koaxialkabel - passend für Sie gefertigt!

<input type="checkbox"/> 1.	 378378393926700300 ⓘ (A) SHV Stecker (f) Knickschutz: Tülle - rt (B) SHV Stecker (f) Knickschutz: Tülle - rt Kabeltyp: HV 9kV/0.6 mm (Lemo) Kabelzuschnitt: 3,00 m	 300 cm	 Mi, 10.05.2023
--------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------