

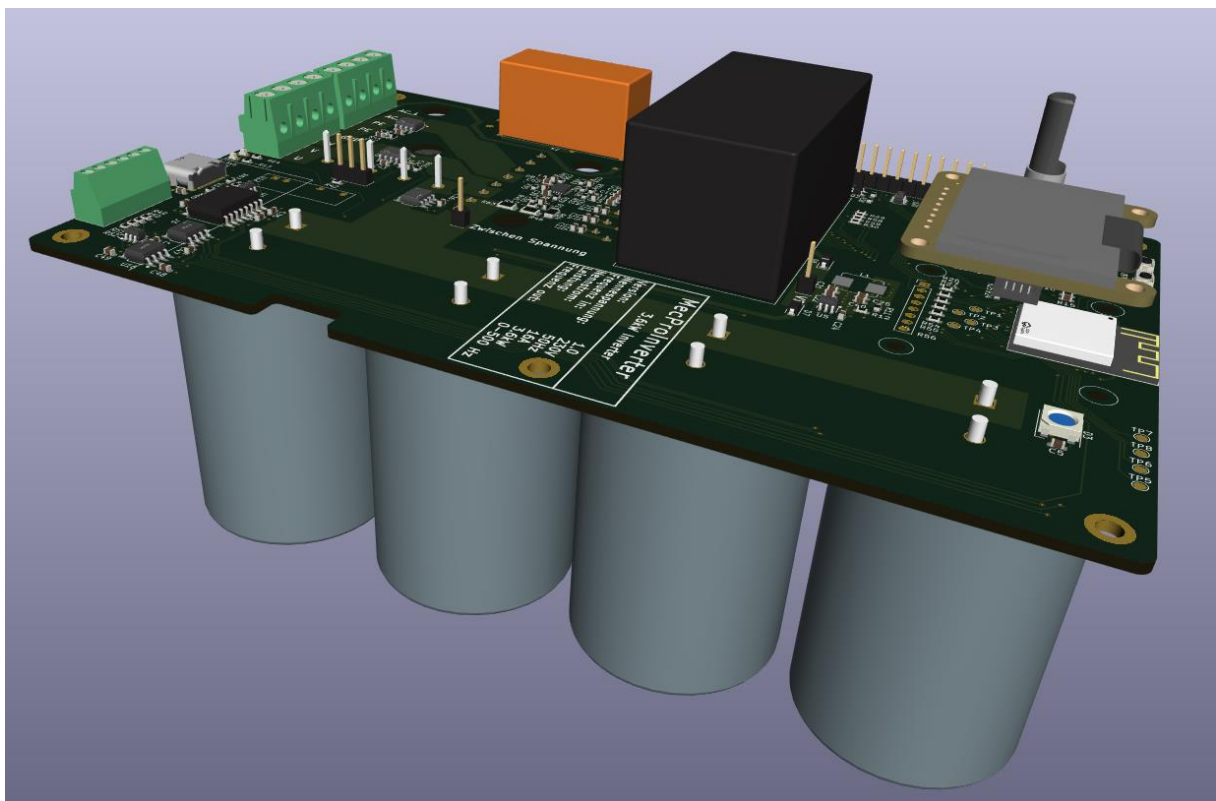


Hochschule
München
University of
Applied Sciences

Mechatronik Projekt- Entwicklung und Herstellung eines Umrichters für Drehstrommaschinen

Fabian Hofmann: Mechanik – Thermische Belastung und Gehäuse

Elektronik



Inhalt

1. Abbildungsverzeichnis.....	3
2. Einführung.....	4
Ziele.....	4
Lösungsansatz	4
3. Konzepte	5
GitHub Repository.....	5
Isolationskonzept	5
Stromversorgung.....	5
Auslegung Zwischen Kreis.....	5
4. Schaltplan	6
Controller.....	6
Steuerung	7
Anzeige.....	7
Kommunikation	8
Lüfter Steuerung	9
Pree-Charge	10
Messungen	11
Stromversorgung.....	12
IGBT.....	13
5. Layout	14
6. Inbetriebnahme	15
7. Tests.....	15
Versorgung über 230 Volt an einem Trenntransformator	15
Ansteuerung des IGBT bei 100 V mit PWM-Sinuskommütierung.....	16
8. Ausblick	18

1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Konzept Plan	4
Abbildung 2 Mikrocontroller-Schaltung	6
Abbildung 3 Steuerungs-Schaltung.....	7
Abbildung 4 Anzeige-Schaltung.....	7
Abbildung 5 USB-C-Schaltung	8
Abbildung 6 Isolierte GPIO Pin Schaltung	8
Abbildung 7 Lüftersteuerung-Schaltung.....	9
Abbildung 8 PreeCharge-Schaltung.....	10
Abbildung 9 ADC und Hallsensor-Schaltung	11
Abbildung 10 Parallelschaltung Stromquellen-Schaltung.....	12
Abbildung 11 3,3 Volt Regler-Schaltung	12
Abbildung 12 IGBT-Schaltung	13
Abbildung 13 Layout (Ohne Zwischen Lagen)	14
Abbildung 14 Testergebnis Einschaltdauer ca. 20	16
Abbildung 15 Testergebnis Einschaltdauer ca. 80	17
Abbildung 16 Testergebnis Duty Cycle sweep	17

2. Einführung

Ziele

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung und der Bau eines 3,6 kW Wechselrichters. Dieser sollte folgende Anforderungen erfüllen.

- Eingangsleistung von 3,6 kW (einphasig)
- Ausgang drei Phasen
- Ausgangs Frequenz variable von 10 bis 500 Hz
- Professionale Verarbeitung

Das gesamte Projekt wird Open Source sein, so dass Interessierte das Projekt replizieren können. Das Projekt ist in folgenden GitHub Repository vollständig einsehbar: <https://github.com/Eg0st/MecProInverter>

Da das Konzept einige Besonderheiten aufweist, sollte vor der Inbetriebnahme das Kapitel „Inbetriebnahme“ gelesen werden.

Lösungsansatz

Der Inverter basiert auf einer 3-Fach-Halbbrücke. Dabei wird die Wechsellspannung zunächst über einen Brückengleichrichter gleichgerichtet und in den Zwischenkreiskondensatoren, hier mit C1 bezeichnet, geglättet. Anschließend wird aus der Gleichspannung mit der 3-Fach-Halbbrücke ein sinuskommutiertes PWM-Signal erzeugt. Wird dieses Signal auf einen Drehstrommotor gegeben, so erzeugt die große Induktivität in dem Motor einen Sinus aus der PWM.

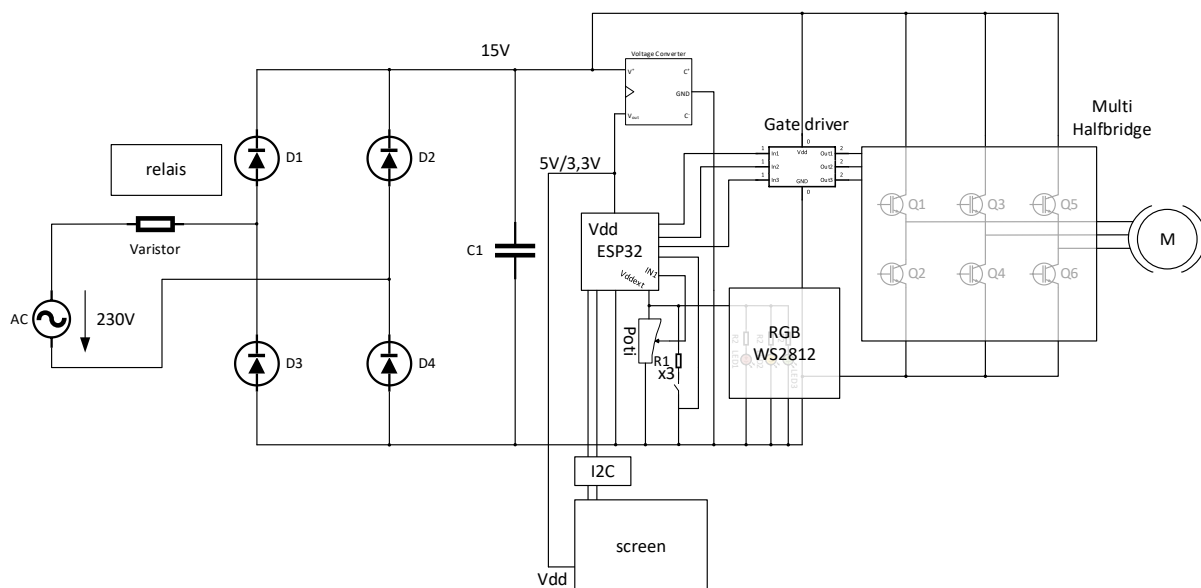


Abbildung 1 Konzept Plan

Für die Steuerung sind weitere Komponenten wie z.B. ein Mikrocontroller erforderlich.

3. Konzepte

GitHub Repository

Die kompletten Daten sind im GitHub Repository verfügbar. Hier befindet sich die komplette Elektronik in den Ordnern „MecProInverter\electronic“. Das KiCad Projekt befindet sich im Ordner „MecProInverter\electronic\MecProInverter“. Die verwendeten Bibliotheken befinden sich in den Ordnern own_library und JLC2KiCad_lib. Own_library enthält alle selbst erstellten Bibliotheken und JLC2KiCad enthält alle Bibliotheken, die über das Python Skript JLC2KiCad erstellt wurden. Dieses Skript ermöglicht es von Komponenten von JLCPCB eine Bibliothek für KiCad herunterzuladen.

Isolationskonzept

Um die Kosten niedrig zu halten, wurde beschlossen, die gesamte Elektronik bis auf wenige Ausnahmen nicht gegeneinander zu isolieren. Lediglich der USB-Anschluss und vier GPIO-Pins sind isoliert. Dies spart Kosten und Aufwand, ermöglicht aber trotzdem die Nutzung aller Funktionen. Daher muss das komplette Human-Interface gegen Berührung isoliert werden, um eine sichere Bedienung sicherzustellen. Das wird durch Plastik Verlängerungen der Taster etc. erreicht.

Stromversorgung

Während des normalen Betriebes wird das ganze System über die Netzspannung versorgt. Jedoch werden für die Steuerung zwei Hilfsspannungen benötigt.

- 15 Volt
- 3,3 Volt

Aus der Netzspannung von 230 Volt werden mit Hilfe eines Fertigmoduls 15 Volt mit bis zu 1,2 Ampere erzeugt. Aus den 15 Volt werden mit einem DC/DC-Wandler 3,3 Volt erzeugt. Zusätzlich kann der 3,3 Volt Regler über den VBus des USB-Anschlusses versorgt werden.

Auslegung Zwischen Kreis

Der Zwischenkreis wurde nachfolgender Formel ausgelegt. Es wurde mit einer Schaltfrequenz des IGBT von 10 kHz gerechnet.

$$C = \frac{1}{\Delta U} * I * t$$

Daraus ergibt sich eine erforderliche Gesamtkapazität von 3 mF. Um Kosten zu sparen und den Platz besser zu nutzen, wurden drei 1 mF 325 Volt Kondensatoren parallelgeschaltet. Zur Sicherheit wurde der Einbauplatz für einen vierten vorbereitet.

4. Schaltplan

Der Schaltplan ist in zwei Teile gegliedert. Ein Teil enthält die gesamte Leistungselektronik und der zweite Teil enthält die Steuerung und Kommunikation. Dazu wurden in KiCad 7.0 zwei Pages erstellt. Die Power Page enthält die Leistungselektronik und die Controller Page den Rest. Im folgenden Kapitel wird auf alle Schaltungskomponenten eingegangen wobei der Schalplan im GitHub Repository zu finden ist. Die Datenblätter zu allen verwendeten Komponenten befinden sich im GitHub Ordner „GitHub\MecProInverter\electronic\datasheet“.

Controller

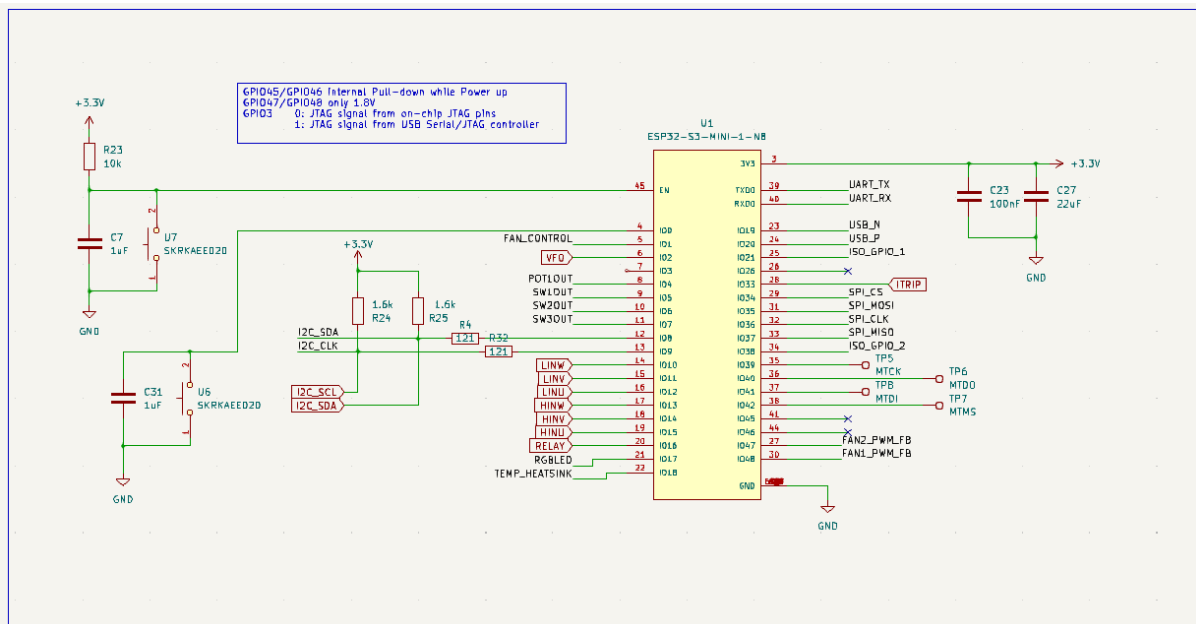


Abbildung 2 Mikrocontroller-Schaltung

Als Controller kommt der ESP-S3 Mini zum Einsatz. Dieser bietet neben dem notwendigen MPWM-Modul auch eine direkte USB-Schnittstelle. Dadurch kann auf einen Serial to USB-Konverter verzichtet werden. Am Enable Pin befindet sich ein Reset Taster, der über einen Pull Up Widerstand auf High gehalten wird. Dadurch kann der Controller bei Bedarf neu gestartet werden. Darunter befindet sich am GPIO-Pin 0 der Mood Taster. Solange dieser beim Start des Controllers gedrückt wird, startet dieser in den Bootmodus und kann programmiert werden.

Steuerung

Der Wechselrichter ist mit drei Tastern und einem Potentiometer zur Bedienung ausgestattet. Mit dem Potentiometer kann die Frequenz eingestellt werden. Die drei Taster sind für die restliche Steuerung und Navigation im internen Menü vorgesehen.

Im Zusammenspiel mit dem Display soll es möglich sein, auch detailliertere Einstellungen vorzunehmen. Die Taster sind so beschaltet, dass sie den Pin des Controllers auf 3,3 Volt ziehen. Zusätzlich werden sie über ein RC-Glied entprellt.

Dieses RC-Glied hat eine Einschaltverzögerung von 5 ms. Der Kondensator C50 sorgt dafür, dass die Spannung am Potentiometer geglättet wird.

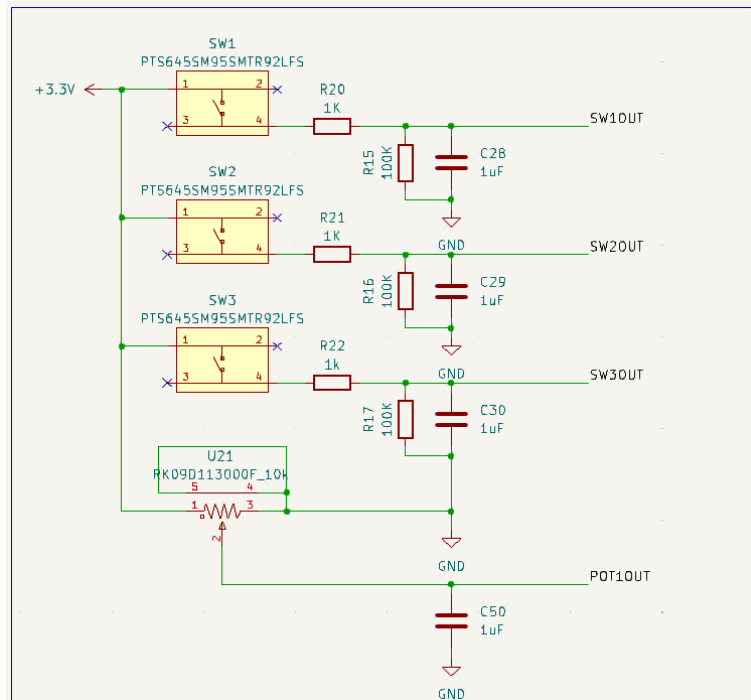


Abbildung 3 Steuerungsschaltung

Anzeige

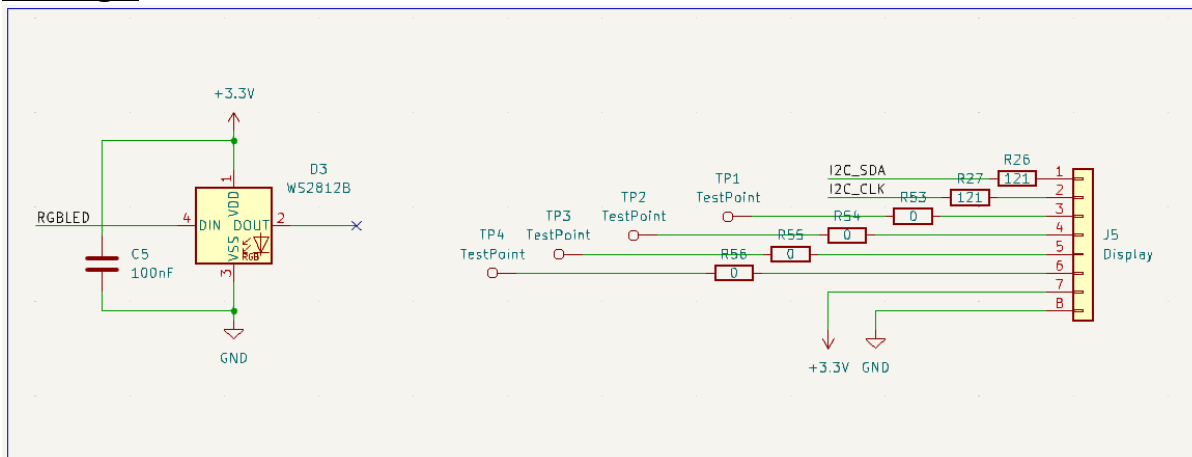


Abbildung 4 Anzeige-Schaltung

Der Inverter verfügt über ein Display und eine RGB-LED zur Statusanzeige etc. Die RGB-LED ist wie ein Schieberegister programmiert und kann über den DOUT mit weiteren LEDs verbunden werden. Zu beachten ist, dass der Betrieb der LED eine Versorgungsspannung von 3,5 Volt benötigt, es ist aber auch möglich, die LED mit 3,3 Volt zu betreiben. Für das Display wird ein I2C Display mit der Bezeichnung 938 der Firma Adafruit verwendet. Es handelt sich um ein 1"3 Zoll Oled Display.

Kommunikation

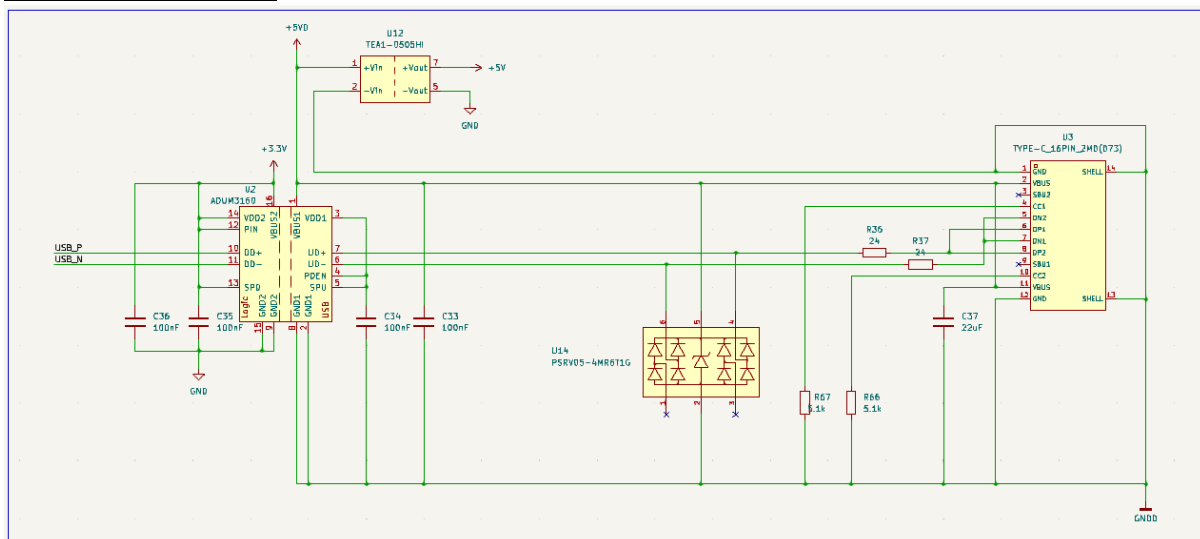


Abbildung 5 USB-C-Schaltung

Der Controller kann über eine isolierte USB-C-Buchse programmiert werden. Zusätzlich versorgt die USB-Schnittstelle über einen isolierten DC/DC-Wandler den 3,3 Volt Spannungswandler, so dass der Controller auch ohne zusätzliche Spannungsquelle betrieben und programmiert werden kann. Die isolierte USB-Schnittstelle bietet zudem den Vorteil, dass der Controller auch während des normalen Betriebs ausgelesen werden kann. Um einen Mindestschutz gegen ESD-Schäden zu gewährleisten, ist der USB-Eingang mit kurzangeschlossenen ESD-Dioden ausgestattet.

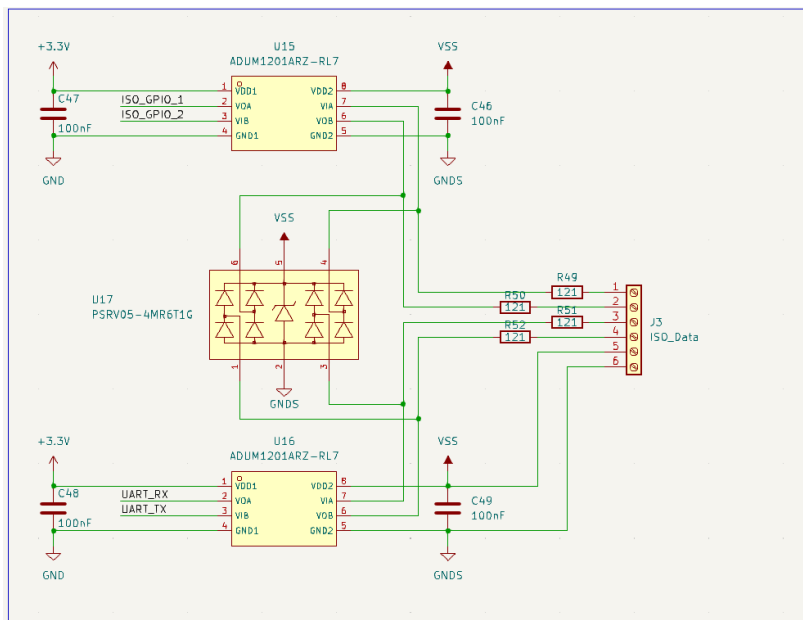


Abbildung 6 Isolierte GPIO Pin Schaltung

Neben der USB-Schnittstelle verfügt der Inverter über weitere isolierte Datenein- und -ausgänge. Darunter befinden sich eine UART-Schnittstelle sowie zwei freie GPIO-Pins. Da der ESP-32 eine freie Wahl der PINS für die Logikschnittstellen bietet, ist es somit möglich, an diesen beiden Pins eine isolierte I2C-Schnittstelle etc. zu realisieren. Diese Schnittstelle kann für

eine externe Steuerung oder für einen externen Sensor verwendet werden. Eine weitere Anwendung wäre ein Not-Aus-Schalter.

Lüfter Steuerung

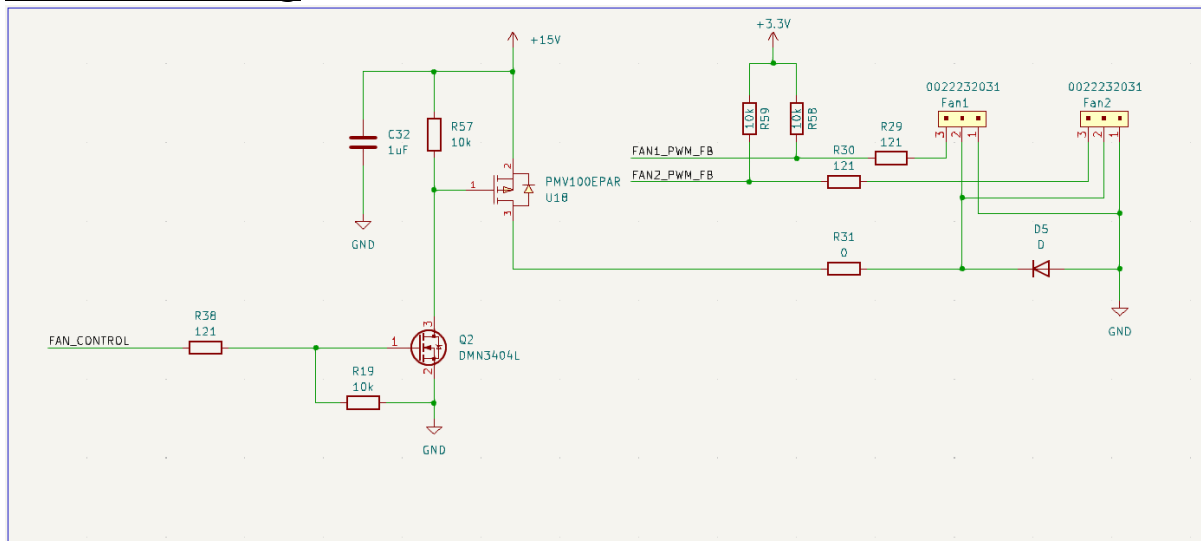


Abbildung 7 Lüftersteuerung-Schaltung

Die beiden Lüfter zur Kühlung des Kühlkörpers sind parallelgeschaltet und können daher nur synchron geschaltet werden. Jeder hat jedoch einen eigenen PWM-Rückmeldeausgang. Damit kann sichergestellt werden, dass kein Lüfterfehler vorliegt. Die Ansteuerung der Lüfter sollte zunächst über ein PWM-Signal erfolgen, jedoch ist eine normale PWM-Ansteuerung bei den verwendeten Lüftern nicht möglich, da diese eine reine Gleichspannung zum Betrieb benötigen. Zu beachten ist auch, dass die Lüfter Highside geschaltet werden müssen, da sonst der PWM-Regelkreis nicht funktioniert. R31 ist für den Fall vorgesehen, dass die Versorgung der Lüfter mit mehr als 15 Volt zu Störungen führt. Die Spannung kann durch einen Vorwiderstand auf 12 Volt reduziert werden.

Pre-Charge

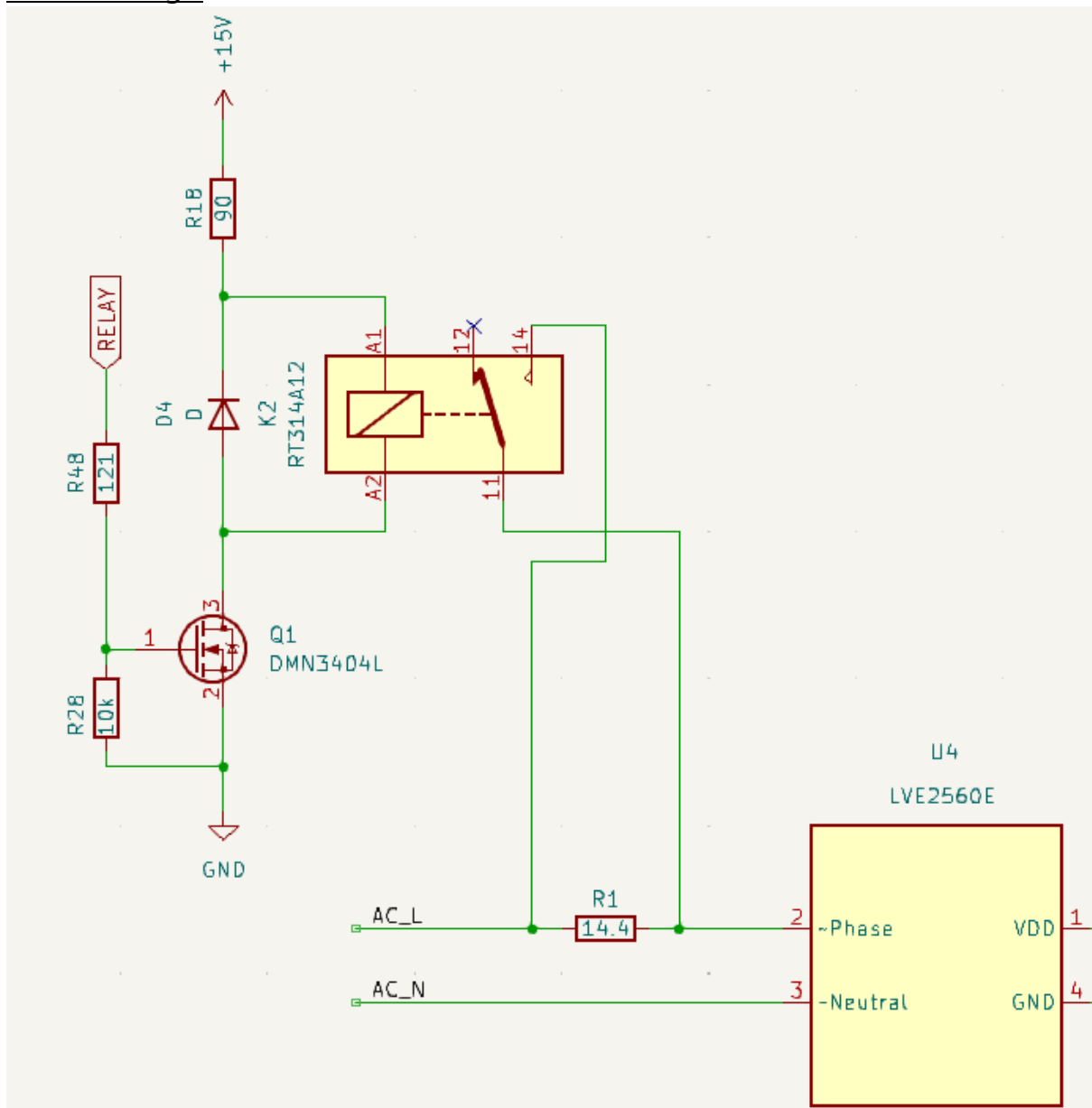


Abbildung 8 PreCharge-Schaltung

Die Vorladung dient zur Begrenzung des Einschaltstromes beim Einschalten des Gerätes. Ohne Pre-Charging werden die Zwischenkreiskondensatoren direkt an die Netzspannung angeschlossen, diese stellen im ersten Moment einen Kurzschluss dar, wodurch der maximal mögliche Strom abfällt. Im schlimmsten Fall kann der hohe Strom die interne Schaltung des Zwischenkreises beschädigen. Deshalb werden die Kondensatoren über einen Widerstand geladen. Sobald die Kondensatoren geladen sind, wird der Widerstand durch ein Relais überbrückt. Andernfalls würde unnötig Energie verschwendet. Das Relais ist normal offen und wird vom Mikrocontroller über einen Mosfet auf der Lowside geschaltet. Die Diode D4 wird benötigt, um mögliche Rückinduktionsströme, die beim Abschalten des Relais entstehen, kurzzuschließen. R18 wird als Vorwiderstand benötigt, da es sich bei dem Relais um ein handelsübliches und somit kostengünstiges 12-Volt-Relais handelt.

Messungen

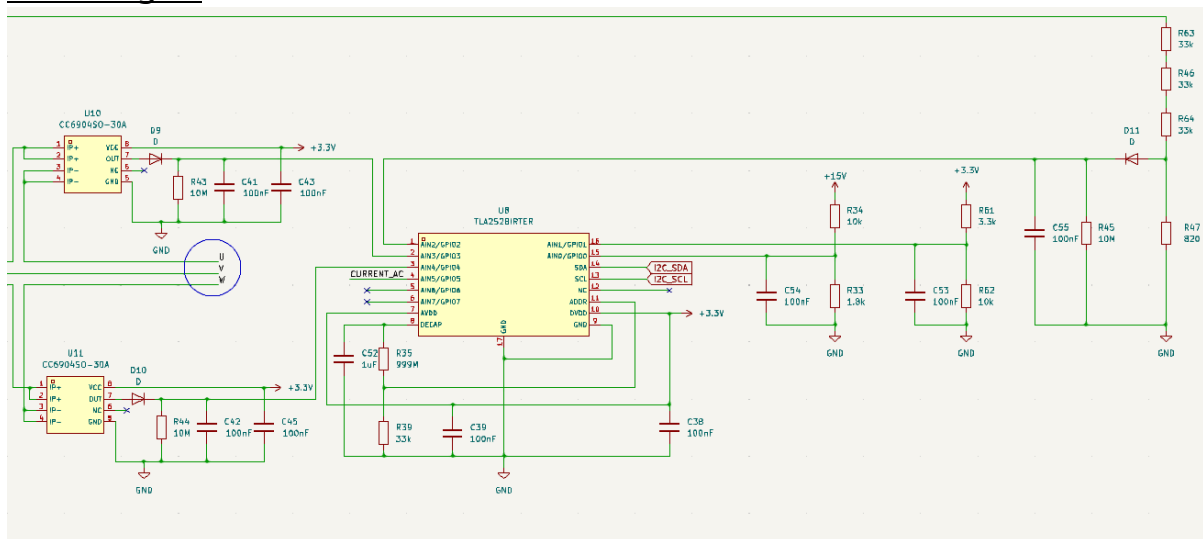


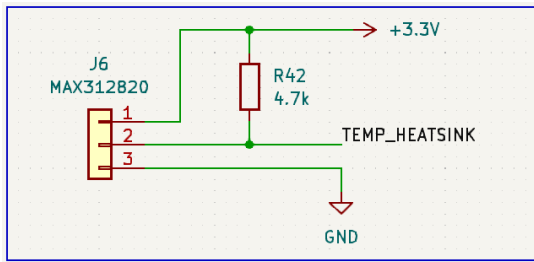
Abbildung 9 ADC und Hallsensor-Schaltung

Da der ESP32-S3 nur einen 12 Bit ADC mit großem Offset besitzt, wurde beschlossen, einen externen 8 Kanal ADC zu installieren. Dieser misst folgende Werte:

- Zwischenkreisspannung
- 3,3 Volt
- 15 Volt
- Eingangsstrom
- Ausgangstrom an der Phase U und W

Der ADC ist über I2C mit dem Mikrocontroller verbunden. Die Spannungsteiler für die Spannungsmessung sind so ausgelegt, dass sie bei Nennspannung eine Spannung von 2,5 Volt erzeugen. Außerdem besitzen sie alle einen Kondensator zur Spannungsglättung. Die Zwischenkreisspannung wird durch eine Diode und einen Kondensator gemessen. Der Widerstand R45 dient zur Entladung des Kondensators, um auch einen länger andauernden Spannungsabfall an der Zwischenkreisspannung messen zu können. Bei der Zwischenkreismessung wurden mehrere Widerstände in Reihe geschaltet, um die maximale Spannung der Widerstände nicht zu überschreiten.

Um den Strom auch auf der High Side messen zu können, werden Hallsensoren verwendet, die in Abhängigkeit vom Strom eine Spannung ausgeben. Da die verwendeten Sensoren einen Offset besitzen, kann mit ihnen auch ein negativer Strom gemessen werden. Diese Sensoren werden ebenfalls an den externen ADC angeschlossen. Mit dem Maschensatz kann der Strom der letzten Phase W genau berechnet werden.



Zur Messung der Kühlkörpertemperatur ist zusätzlich ein Steckplatz für einen One-Wire Temperatursensor vorbereitet. Dieser wird jedoch nicht benötigt, da das verwendete Powermodul über einen internen Temperatursensor verfügt.

Stromversorgung

Für den Betrieb der Schaltung sind zwei Hilfsspannungen erforderlich. Zum einen 15 Volt für den Betrieb des IGBT, des Lüfters und des Relais. Zusätzlich werden 3,3 Volt für den Betrieb des Mikrocontrollers und der Peripherie benötigt. Aus den 230 Volt Wechselspannung werden also mit einem fertigen Modul 15 Volt erzeugt. Aus diesen werden dann über einen DC/DC-Wandler 3,3 Volt erzeugt. Zusätzlich ist es möglich, den 3,3 Volt DC/DC Wandler über die 5 Volt des USB-Anschlusses zu versorgen. Dazu wurden Dioden so eingebaut, dass sich die beiden Spannungsquellen nicht gegenseitig beeinflussen. J9 ist ein Messpunkt für.

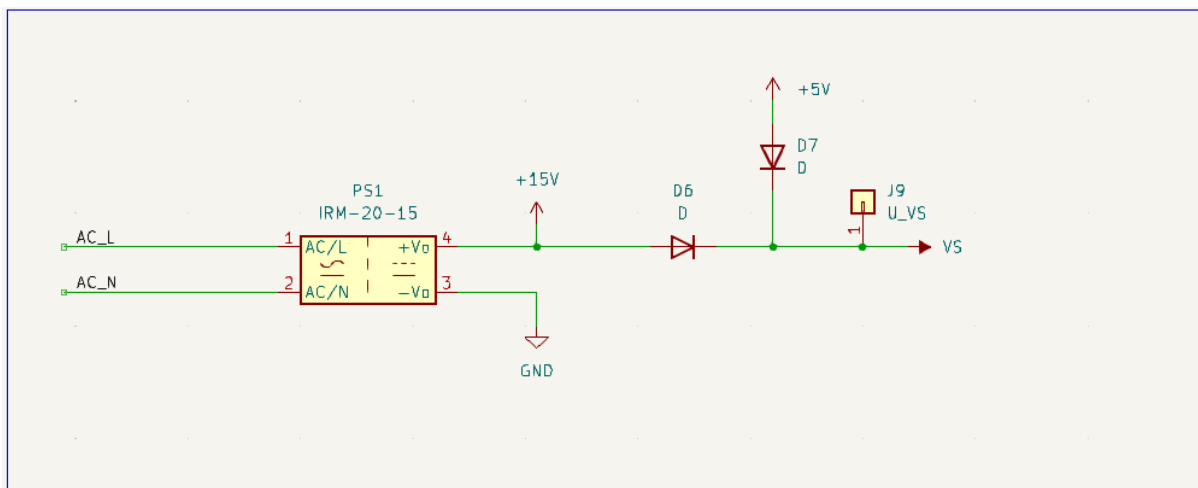


Abbildung 10 Parallelschaltung Stromquellen-Schaltung

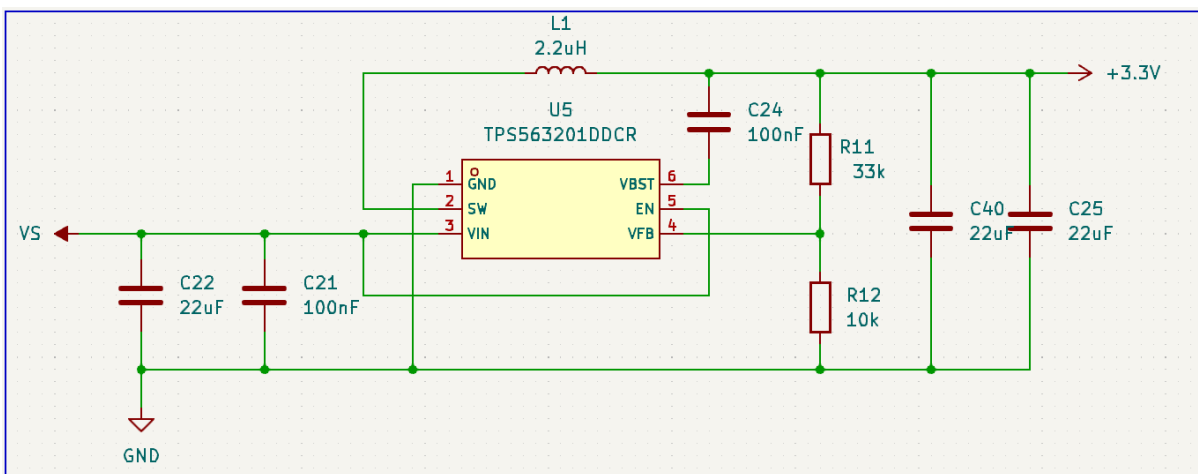


Abbildung 11 3,3 Volt Regler-Schaltung

Der Aufbau der 3,3 Volt DC/DC Wandler (TPS563201DDCR) ist dem Datenblatt entkommen. Die Spannung kann mithilfe der Widerstände R11 und R12 eingestellt werden.

IGBT

Als Leistungsmodul kommt der IKCM20L60GA der Firma Infineon zum Einsatz. Dabei handelt es sich um eine Triple-H-Brücke mit integriertem Treiber. Dies hat den Vorteil, dass für den Betrieb nur eine minimale Anzahl von Bauteilen benötigt wird. Zusätzlich bietet das Modul die Möglichkeit, den aktuellen Betriebszustand bzw. die Temperatur über einen analogen Pin auszulesen. Zusätzlich kann über den ITRIP-Pin eine Strombegrenzung realisiert werden. Im Projekt wird der Pin direkt vom Mikrocontroller angesteuert, um das Modul im Fehlerfall abzuschalten.

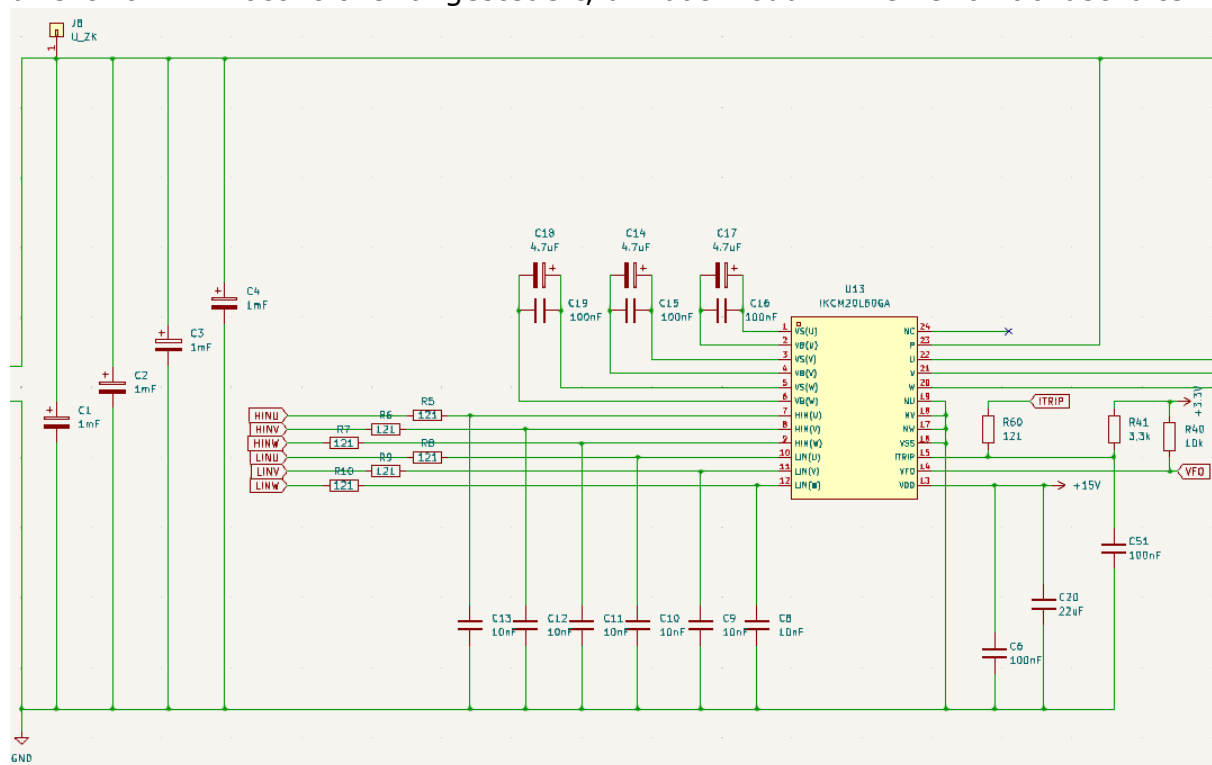


Abbildung 12 IGBT-Schaltung

C1 bis C4 sind die Zwischenkreiskondensatoren und werden über das Netz auf ca. 325 Volt geladen. Die einzelnen MosFets werden über HINU, HINV, ... angesteuert. Diese haben eine Strombegrenzung, die mit Widerständen realisiert ist, um den Mikrocontroller zu schonen. C14 bis C19 dienen als Kondensator zur Erzeugung der Spannung zum Schalten der Highside Kondensatoren. Diese werden aufgeladen, wenn die Low Side Gates durchgeschaltet werden. Daher ist es nicht möglich, die High Side Gates von Anfang an durchzuschalten. Die weitere Schaltung ist dem Datenblatt bzw. der Application Note zu entnehmen.

5. Layout

Das Layout wurde in KiCad erstellt. Das Layout besteht aus 4 Ebenen. In der Darstellung ist die Oberseite rot und die Unterseite blau dargestellt. Die Zwischenlängen wurden hauptsächlich als Grundriss und für die Spannungsversorgung verwendet. Die Spannungsversorgung ist hier jedoch je nach Bedarf in mehrere Bereiche unterteilt. Zusätzlich befindet sich in der rechten oberen Ecke ein Isolierbereich für isolierte Anschlüsse. Der Isolationsabstand zwischen den einzelnen Spannungsebenen beträgt 0,8 mm. Zu den isolierten Bereichen sind Abstände von 4 mm vorgesehen.

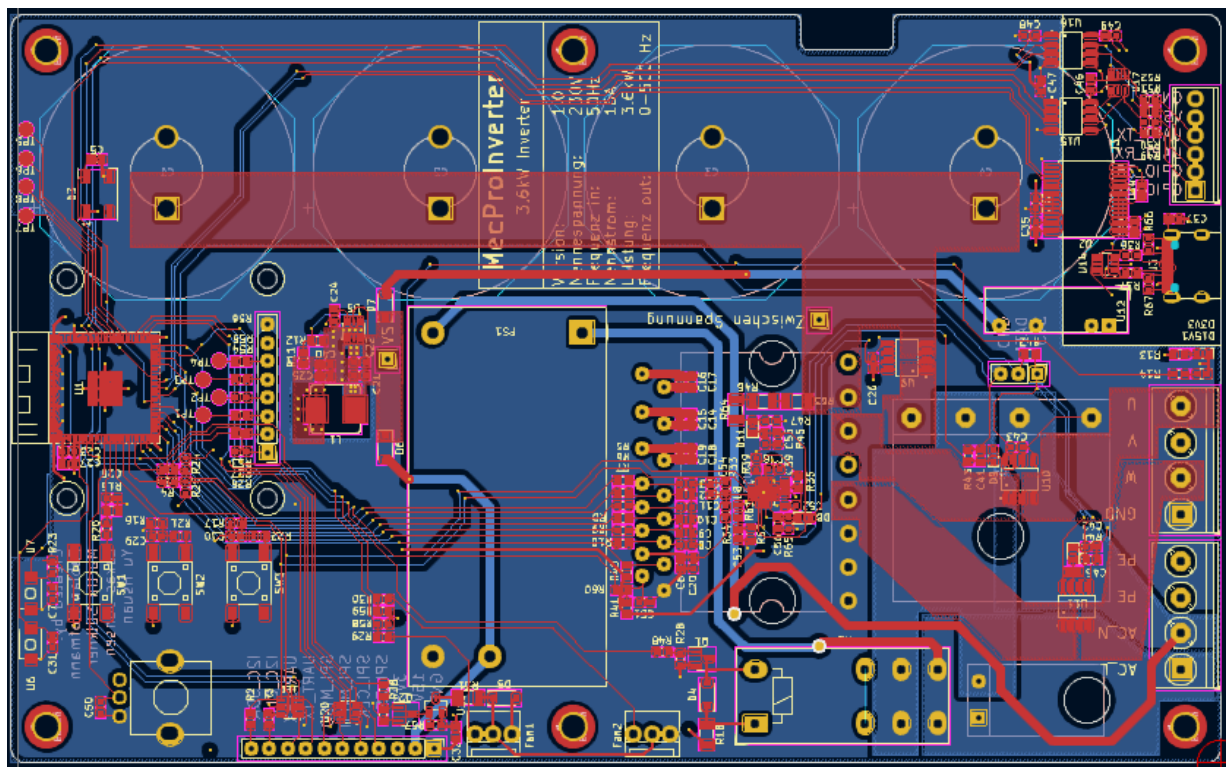


Abbildung 13 Layout (Ohne Zwischen Lagen)

Die Platine ist so aufgebaut, dass die einzelnen Komponenten wie Leistungselektronik, DC/DC-Wandler, Logikschaltungen möglichst getrennt sind.

Zu beachten ist auch, dass sich unterhalb der Antenne des ESP32-S3 keine Platine befinden darf, da dies die Performance des WLAN-Moduls beeinträchtigt. Für die mechanische Befestigung der Leistungsbauteile auf dem Kühlkörper sind zusätzliche Bohrungen vorgesehen. Die Aussparung auf der Oberseite dient als Kabeldurchführung für die Lüfter.

Es ist jedoch zu beachten, dass der Footprint des Brückengleichrichters nicht korrekt ist. Dieser ist seitenverkehrt und muss für eine V2 überarbeitet werden.

6. Inbetriebnahme

Die erste Inbetriebnahme ist durch Einstecken des USB-Steckers möglich. Dabei sollte bereits die 3,3 Volt LED aufleuchten. Außerdem sollte es möglich sein, den Micocontroller zu programmieren und die IOs anzusteuern.

Im nächsten Schritt kann über den 15 Volt Pin eine externe 15 Volt Spannungsquelle angeschlossen werden. Nun können die Lüfter, das Relais und der IGBT angesteuert werden und die 15 Volt LED sollte leuchten. Wird nun eine Spannung über den Zwischenkreis-Pin eingespeist, kann der IGBT am Ausgang getestet werden. Dabei ist zu beachten, dass zum Ansteuern der High-Treiber des IGBTs zunächst der Versorgungskondensator für die Treiber aufgeladen werden muss. Dies geschieht, sobald die Low-Treiber der einzelnen Phasen durchgeschaltet sind. Um den IGBT zu testen, ist es daher sinnvoll, ein PWM-Signal anzulegen. Um die Ausgänge des IGBT zu aktivieren, muss der ITRIP-Pin auf Low gesetzt werden.

Im letzten Schritt können 230 Volt angelegt werden. Dabei muss jedoch die 15 Volt Hilfsspannung abgeschaltet werden. Dabei ist zu beachten, dass der Vorladewiderstand ggf. über den Kühlkörper gekühlt oder anderweitig überbrückt werden muss. Alternativ kann die Spannung durch einen regelbaren Trenntransformator etc. langsam erhöht werden.

Da der USB-Anschluss isoliert ist kann bei jedem Schritt der Status des Inverters über den Micocontroller überwacht werden.

7. Tests

Alle Komponenten mit einer Versorgungsspannung von bis zu 15 Volt wurden auf Funktion getestet. Alles funktionierte wie erwartet und sind deshalb nicht interessant. Daher wird in diesem Kapitel nur Versuche dokumentiert, die bei höheren Spannungen durchgeführt wurden. Es wurden folgende zwei Versuche durchgeführt.

Versorgung über 230 Volt an einem Trenntransformator

Der Wechselrichter wurde an den Trenntransformator angeschlossen und die Spannung langsam erhöht. Damit sollte sichergestellt werden, dass die Spannungsversorgung funktioniert und kein Kurzschluss vorliegt. Dazu wurde die Zwischenkreisspannung extern mit einem Multimeter gemessen.

Es ist zu beobachten, dass die Spannung am Zwischenkreis mit steigender Eingangsspannung zunimmt. Wobei diese um einen Faktor von ca. 1,4 höher ist. Dies ist auf die Gleichrichtung der Wechselspannung zurückzuführen. Ab einer Spannung von ca. 100 Volt schaltet der 15 Volt und 3,3 Volt Spannungskreis. Eine weitere Erhöhung der Spannung führt nur zu einer Änderung der Zwischenkreisspannung.

Ansteuerung des IGBT bei 100 V mit PWM-Sinuskommutierung

In diesem Versuch soll die PWM-Sinuskommutierung am Ausgang des IGBT überprüft werden. Dazu wird der Wechselrichter über einen Trenntrafo mit Spannung versorgt. Die Spannung wird so gewählt, dass alle Komponenten funktionieren (15 Volt Regler). Nun wird mit Hilfe eines Oszilloskops der unbelastete Ausgang des Wechselrichters betrachtet. Dabei wurden die einzelnen Phasen es Ausganges gegen Masse dargestellt.

Die folgenden Spannungsverläufe wurden zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet. Am Zwischenkeil wurde eine Spannung von 100 Volt gemessen.

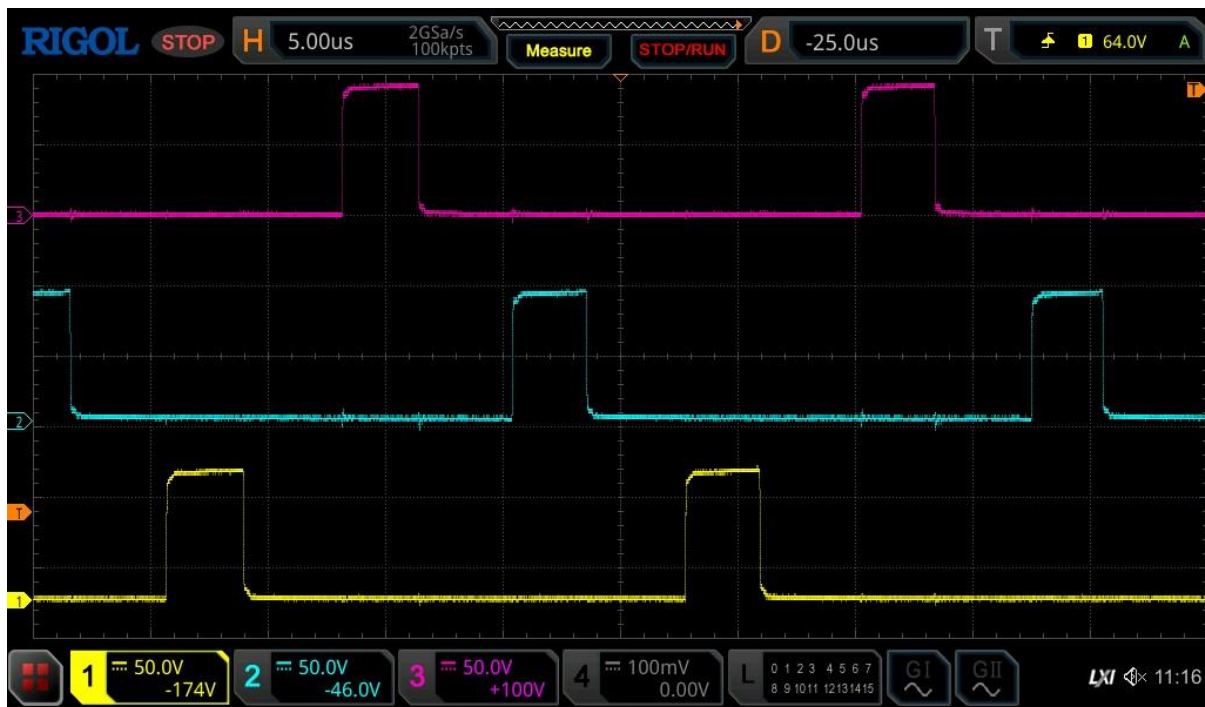


Abbildung 14 Testergebnis Einschaltdauer ca. 20

Es ist gut zu erkennen, dass der IGBT bis zu den 100 Volt des Zwischenkreises voll durchschaltet und auch gegen Masse schaltet.

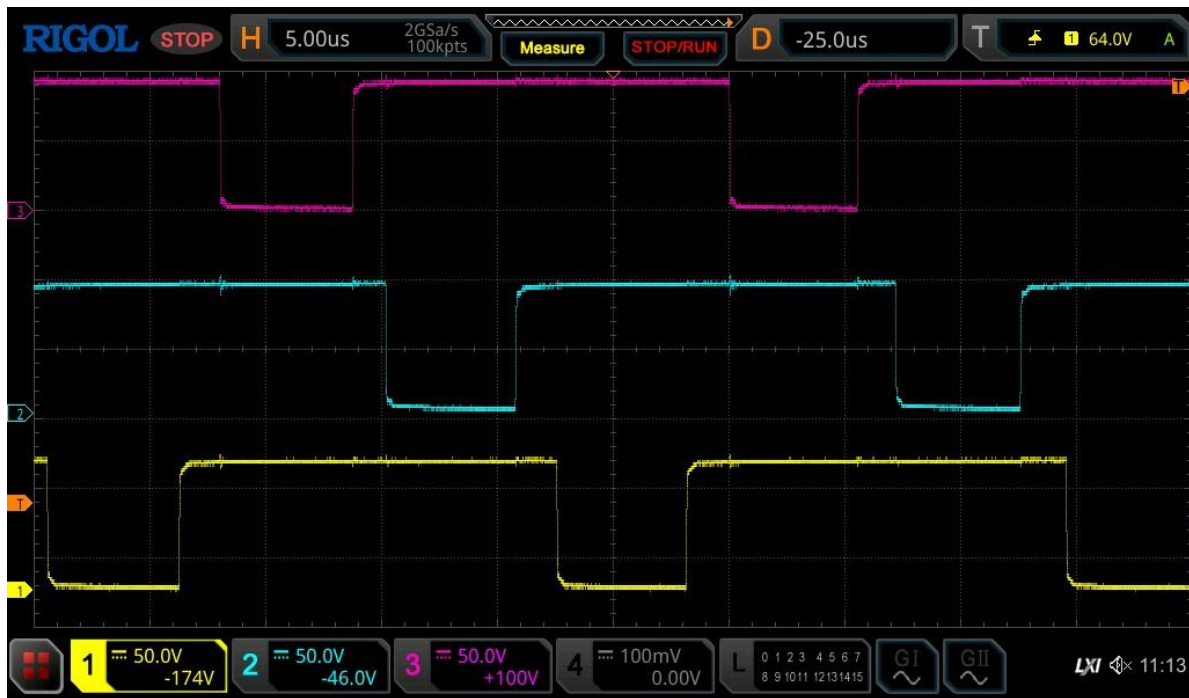


Abbildung 15 Testergebnis Einschaltdauer ca. 80

Dieser Abschnitt wurde zu einem späteren Zeitpunkt hinzugefügt. Durch die Änderung der Steuerzeiten ist anzunehmen, dass die PWM-Sinuskommutierung funktioniert.



Abbildung 16 Testergebnis Duty Cycle sweep

Diese Abbildung zeigt eine Überlagerung über einen längeren Zeitraum. Es ist gut zu erkennen, dass die PWM über den gesamten Zeitraum variiert.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb auf einem Motor sicher funktioniert. Aus Zeitgründen konnte dieser Versuch jedoch nicht durchgeführt werden.

8. Ausblick

Derzeit befindet sich der Wechselrichter in einem nicht vollständig getesteten Zustand. Außerdem enthält das Layout einen Fehler im Footprint des Brückengleichrichters (siehe Kapitel Schaltplan). Die Versuche lassen erwarten, dass der Betrieb des Motors keine Probleme bereitet.

Sollte das Projekt weiterentwickelt werden, wird empfohlen, eine zweite Version der Platine zu erstellen, die einen deutlich kompakteren 15-Volt Regler besitzt. Dies ermöglicht auch eine Vergrößerung der Isolationsabstände. Außerdem sollte eine automatische Entladung der Zwischenkreiskondensatoren realisiert werden, da dieser bis zu 5 Minuten zum Entladen benötigt, was ein gewisses Risiko darstellt. Auch eine Überarbeitung der Anschlussklemmen mit größeren Phasenabständen etc. kann zur Verbesserung der Sicherheit beitragen. Eine weitere Überlegung ist die Erhöhung der Leistung durch Umstellung der Stromversorgung auf Drehstrom.