
BACHELORARBEIT

Herr
Kevin Blümel

**Konzeption und Entwicklung einer
zentralen Systemelektronik für
beheizbare Außenbereichsplatten**

2019

Fakultät **Ingenieurwissenschaften**

BACHELORARBEIT

Konzeption und Entwicklung einer zentralen Systemelektronik für beheizbare Außenbereichsplatten

Autor:

Kevin Blümel

Studiengang:

Elektro- und Informationstechnik

Seminargruppe:

EI16WE-B

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhl

Zweitprüfer:

M.Sc. Christian Georgi

Mittweida, 01. August 2019

Faculty of **Engineering**

BACHELOR THESIS

Conception and development of a central system electronics for outside underfloor heating

Author:

Kevin Blümel

Study Programme:

Electro- and Informationstechnology

Seminar Group:

EI16WE-B

First Referee:

Prof. Dr.-Ing. Michael Kuhl

Second Referee:

M.Sc. Christian Georgi

Mittweida, August 1st, 2019

Bibliografische Angaben

Blümel, Kevin: Konzeption und Entwicklung einer zentralen Systemelektronik für beheizbare Außenbereichsplatten, 63 Seiten, 34 Abbildungen, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences, Fakultät Ingenieurwissenschaften

Bachelorarbeit, 2019

Referat

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Steuerelektronik für beheizbare Werksteinplatten. Es werden grundlegende Software- und Hardwarekomponenten des Systems vorgestellt und beschrieben.

Abstract

This thesis is about the development of a central system electronics for outside underfloor heating. Basic software and hardware components of the system are presented and described.

I. Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Präzisierung der Aufgabenstellung	3
3 Konzeption und Systementwurf	5
3.1 Anforderungen	5
3.2 Systemkonzept	7
3.3 Hardware	8
3.3.1 Hardwarekonzept	8
3.3.2 Auswahl der Hardwarekomponenten	9
3.3.2.1 Discovery-Board	9
3.3.2.2 MOSFET als Leistungsschalter	10
3.3.2.3 Optokoppler	13
3.3.2.4 RTC-Modul	14
3.3.2.5 Temperatursensoren	15
3.3.2.6 Spannungswandler	16
3.3.2.7 Kühlkörper	18
3.3.2.8 Konnektoren	19
3.3.3 Platinenlayout	21
3.3.3.1 Berechnung der Leiterbahnbreite (L11)	21
3.3.3.2 Anordnung der Bauelemente	22
3.4 Software	24
3.4.1 Softwarekonzept	24
3.4.2 Auswahl der Softwarekomponenten	25
3.4.2.1 Betriebssystem	25
3.4.2.2 Grafische Umgebung	25
3.4.2.3 Kommunikationsmodule	26
3.4.2.4 RTC	26
3.4.2.5 Timer für die PWM	27
3.4.3 Umsetzung des Softwarekonzepts	28
3.4.3.1 Grafische Umgebung	28
3.4.3.2 Programmablaufplan	32
4 Inbetriebnahme und Systemtest	35
5 Schlussfolgerung und Ausblick	41

A	Begriffsbestimmung	43
A.1	Mikrocontroller (B1)	43
A.2	Pulsweitenmodulation (L1)	43
A.3	Graphical User Interface - GUI (L2)	43
A.4	MOSFET (B2)	44
A.5	I ² C (L3)	45
A.6	OneWire (L4)	45
A.7	Betriebssystem	46
A.8	Schutzkleinspannung (L8)	46
A.9	Galvanische Trennung (L9)	46
B	Schaltplan	47
C	Bill of Materials - BOM	51
D	Gerberdaten	53
	Literaturverzeichnis	57

II. Abbildungsverzeichnis

3.1	Systemkonzept	7
3.2	Hardwarekonzept	8
3.3	Discovery-Kit Frontansicht	9
3.4	Gehäusearten	12
3.5	Messverlauf Reihenschaltung Testwiderstand mit Werksteinplatte, 50Hz	12
3.6	Optokoppler TLP185(BL-TPL,SE	13
3.7	Schaltung RTC-Modul (D6)	14
3.8	links: DS1307, rechts: DS18B20	15
3.9	Diagramm V_{GS} zu I_D (D15)	16
3.10	Beschaltung des Abwärtswandlers PYBE10-Q48-S12	17
3.11	Beschaltung des Linearreglers 621-ZXTR2112F-7	17
3.12	Kühlkörper	18
3.13	Discovery-Kit Stiftleisten CN4, CN5, CN6, CN7	19
3.14	links: Klemme 2604-1106, rechts: Klemme 2604-1502	20
3.15	Platine von oben	22
3.16	Platine von unten	22
3.17	3D-Ansicht Platinendraufsicht	23
3.18	Softwarekonzept	24
3.19	Menüführung der GUI	28
3.20	Menü der GUI	29
3.21	Menüpunkt Manuell der GUI	29
3.22	Menüpunkt 2-Punkt-Regler	30
3.23	Menüpunkt RTC	31
3.24	Menüpunkt Tmp Sensoren	31
3.25	Thread GUI	32
3.26	Thread Touchscreen	33
3.27	Thread Datenerfassung	34
4.1	Messung Gatesignal MOSFET	35

4.2	Schaltskasten	36
4.3	Wärmebild Werksteinplatte nach 600 s heizen	37
4.4	Temperaturverlauf - Heizvorgang Werksteinplatte	37
4.5	Beschaltung Temperatursensorkontroller	39
A.1	Schaltsymbole des Feldefekttransistors	44
A.2	Funktion des n-Kanal MOFSET	45

III. Tabellenverzeichnis

3.1 Auswahl an verfügbaren MOSFETs	10
3.2 Maximalfrequenzen der MOSFETs	11

IV. Abkürzungsverzeichnis

GUI	G raphical U ser I nterface
I ² C	I nter- I ntegrated C ircuit
IC	I ntegrated C ircuit
IDE	I ntegrated D evelopment E nvironment
IoT	I nternet o f T hings
MOSFET	M etal- O xide- S emiconductor F ield- E ffect T ransistor
PCB	P rinted C ircuit B oard
PWM	P uls W eiten M odulation
RTC	R eal T ime C lock
SMD	S urface- M ounted D evice
Tmp	T emperature
UID	U ser I dentification N umber

1 Einleitung

Moderne Wohnungen besitzen immer öfter eine Fußbodenheizung. Einmal eingebaut braucht man keine Platz in Anspruch nehmenden Heizkörper in seiner Wohnung unter den Fenstern anbringen. Weitere Vorteile sind die gleichmäßige Wärmeverteilung im Raum und ein angenehm warmer Boden. Jedoch ist es sehr preisintensiv, solch eine Fußbodenheizung, sei es ein Nasssystem oder ein Trockensystem, nachzurüsten.

Auch im Außenbereich wäre im Winter eine Fußbodenheizung von Vorteil. In Städten werden jährlich mehrere Tonnen Streusalz benötigt, um Wege und Straßen vom Eis zu befreien. In Buswartehäuschen und Bahnhöfen könnte eine Fußbodenheizung das Salz ablösen.

Aus diesen Gründen befasst sich das Application Center Microcontroller inklusive Projektpartner mit einem neuen Konzept der Fußbodenheizung: die beheizbare Werksteinplatte. Diese Platten sollen im Projekt im Außenbereich getestet werden und eine Alternative gegen aggressives Tausalz werden. Konzept der Werksteinplatte: An die Werksteinplatte wurde auf der Unterseite eine niederohmige Schicht aufgetragen, bestehend aus Graphit und anderen leitenden Materialien. An diese Schicht wurde in einem bestimmten Abstand Drähte angebracht, über welche sie mit Strom versorgt wird. Durch den Widerstand kommt eine hohe Verlustleistung in Form von Wärme zustande. In diesem Fall ist die Verlustleistung die Nutzleistung, da diese gewonnene Wärme als Fußbodenheizung verwendet werden kann. Das Ziel des Projekts ist die Inbetriebnahme verschiedener Werksteinplatten mit unterschiedlich leitenden Graphitschichten, das Messen der Wärmeverteilung in jeweils einer Werksteinplatte nach Anlegen einer Spannung und das Entwickeln verschiedener Ansteuerungselektroniken zur Temperaturregelung der Werksteinplatten.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer speziell an die Werksteinplatten angepasste Ansteuerungselektronik.

2 Präzisierung der Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer prototypischen Steuereinheit, welche die Inbetriebnahme, die Bedienung und die Temperaturregelung eines aus vier Werksteinplatten bestehenden Versuchsaufbaus ermöglicht.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden folgende Teilaufgaben festgelegt:

- Erarbeitung der grundlegenden Systemkonzeption der Steuereinheit (Module, Schnittstellen, Parameter)
- Auswahl und Vergleich geeigneter Systemkomponenten
- Entwicklung einer modularen Hardwarekomponente zur Anbindung von Heizplatten, Spannungsversorgung und Parametererfassung
- Entwicklung von Softwarekomponenten für Steuerung und Temperatúrauswertung
- Erarbeitung und Implementierung eines Bedienkonzeptes
- Aufbau und Inbetriebnahme eines Prototyps

3 Konzeption und Systementwurf

In diesem Kapitel werden zuerst die Anforderungen an das System vorgestellt. Folgend werden diese Anforderung in einem System-, Hardware- und Softwarekonzept weiter präzisiert und anschließend umgesetzt.

3.1 Anforderungen

Das System soll mit zwei Netzteilen, je 48 V; 20 A DC, vier Werksteinplattenstränge beheizen können. Dabei soll die Temperatur jedes Stranges gemessen werden und über das System regelbar sein.

Ein Strang besteht jeweils aus drei parallel geschalteten Werksteinplatten.

Daten zur Werksteinplatte:

- Länge x Breite: 40 cm x 40 cm
- Widerstand: 6 Ω

Daten zum Strang:

- Länge x Breite: 120 cm x 40 cm
- Widerstand: 2 Ω

Mit den vorgegebenen Netzteilen ergibt sich ein Strom von 24 A. Das entspricht einer maximalen Heizleistung von rund 1,1 kW pro Strang.

Die einzelnen Netzteile und die Leistungselektronik sollen von der Informationstechnik galvanisch getrennt sein.

Das System soll verschiedene Arten der Regelung zur Auswahl haben:

- Zweipunktregelung der Temperatur
- Vorgabe der zugeführten Energie in Prozent

Das System soll zwei ein- und ausschaltbare Sicherheitsfunktionen besitzen:

- das System beginnt zu heizen, wenn die Temperatur unter einen einstellbaren Wert fällt - Frostschutz
- das System schaltet sich aus, sobald die Temperatur über einen einstellbaren Wert steigt - Hitzeschutz

Die Bedienung des Systems erfolgt über ein Touchdisplay mit einfacher Menüführung für die einzelnen Regelarten und die Einstellungen.

Das System soll eine Uhrzeit- und Datumsanzeige, sowie eine Temperaturanzeige für die Heizplatten besitzen.

3.2 Systemkonzept

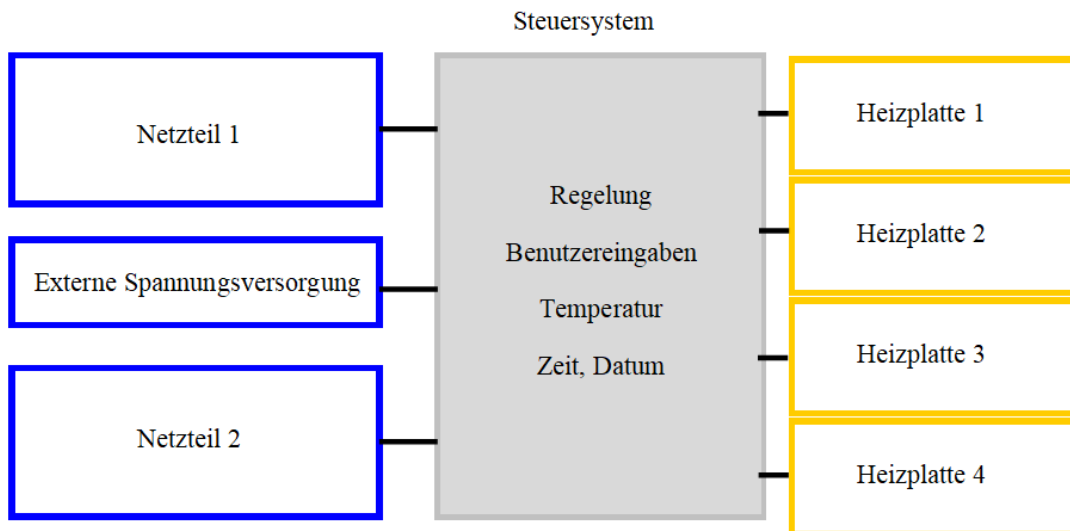


Abbildung 3.1: Systemkonzept

Das hier beschriebene Systemkonzept bezieht sich auf Abbildung 3.1.

Das zu entwickelnde Steuersystem soll mit Hilfe von zwei anschließbaren Netzteilen vier anschließbare Werksteinplatten beheizen können. Dabei soll der Bediener alle nötigen Informationen zur Temperatursteuerung über ein Display erhalten, über welches er gleichzeitig mit Hilfe von Touch-Funktionen Änderungen und Einstellungen an den Parametern der Regelung vornehmen kann.

Dazu soll Netzteil 1 das Steuersystem und die Werksteinplatten 1 und 2 mit Strom versorgen und Netzteil 2 die Werksteinplatten 3 und 4.

Netzteil 2 ist demzufolge nicht erforderlich, wenn nur die Werksteinplatten 1 und 2 beheizt werden sollen.

Netzteil 1 ist immer erforderlich, da darüber die Stromversorgung des Steuersystems erfolgen soll. Zusätzlich soll eine Anschlussmöglichkeit zur Anbindung einer externen Spannungsversorgung für die Steuerelektronik vorgesehen werden, auf welche manuell umgeschaltet werden kann, sollte Netzteil 1 ausfallen.

Das System wird laut der Systemanforderungen mit 48-V-Schutzkleinspannung betrieben. Die Spannung gering zu halten ist eine notwendige Schutzmaßnahme, hat aber gemäß dem Ohmschen Gesetz den Nachteil, dass die Werksteinplatten einen sehr geringen Widerstand haben müssen, damit genügend Strom fließen kann.

3.3 Hardware

3.3.1 Hardwarekonzept

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein „STM32F7 Discovery-Kit“ vorgegeben. Mit der Hilfe des auf dem Kit befindlichen Mikrocontrollers werden alle Steuerfunktionen verwaltet und umgesetzt. Zur Steuerung der Werksteinplatten werden MOSFETs verwendet. Da jede Werksteinplatte einzeln steuerbar sein soll, werden vier MOSFETs, pro Werksteinplatte einer, eingeplant. Aufgrund der galvanischen Trennung kann das Gatesignal der MOSFETs nicht direkt an den Mikrocontroller angeschlossen werden. Hierfür empfiehlt sich die Verwendung von Optokopplern mit jeweils einem Spannungswandler pro Netzteil. Über das Netzteil 1 soll das Discovery-Kit mit Strom versorgt werden, jedoch benötigt dieses eine Spannung zwischen 7 V und 12 V statt der 48 V, welche vom Netzteil geliefert werden (D1). Deshalb wird hier ein galvanisch getrennter Spannungswandler eingeplant. Zur problemfreien Temperaturüberwachung und zur Zeitspeicherung empfiehlt sich Hardware, welche sich über den I²C-Bus des Mikrocontrollers steuern lässt.

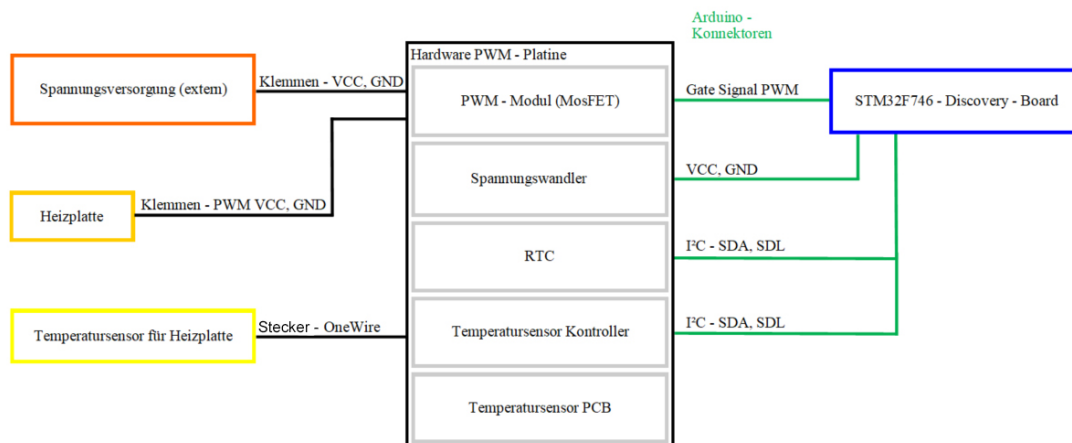


Abbildung 3.2: Hardwarekonzept

Die Netzteile und Werksteinplatten sollen über Klemmen angeschlossen werden, um eine einfache und schnelle Anschlussmöglichkeit zu bieten. Voraussetzung sind Klemmen, welche Litze und starren Draht über eine leicht bedienbare Mechanik halten und Stromspitzen von bis zu 30 A aushalten können. Das Discovery-Kit besitzt Buchsenleisten, über welche die externe Peripherie angeschlossen werden kann (D2). Hier bietet sich eine Aufsteckplatine an, auf welcher sich die Hardware befindet. Die externen Temperatursensoren können über Molex-Micro Fit Stecker angeschlossen werden. Diese Buchsen sind standardisiert und aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit in mehreren Verbaubarvarianten wirtschaftlich.

An den MOSFETs wird bei falscher Dimensionierung durch die Steuerung von 2 kW viel Wärme erzeugt, weshalb sich ein zusätzlicher Temperatursensor auf der Hardwareplatine anbietet. Abbildung 3.2 visualisiert das Hardwarekonzept.

Folgend wird das Hardwarekonzept umgesetzt. Dazu müssen geeignete Bauelemente ausgewählt werden. Diese Bauelemente müssen in einem Leiterplattenentwurf untergebracht werden.

3.3.2 Auswahl der Hardwarekomponenten

elektrisch:

3.3.2.1 Discovery-Board

Das zur Verfügung gestellte Discovery-Board, zu sehen in Abbildung 3.3, wurde getestet, um eine problemfreie Einbindung in das System sicherzustellen. Dieses Board besitzt ein Display mit Touchintegration. Durch Aufspielen einer Demosoftware, bereitgestellt von STM, konnte das Display und das Touchinterface auf Funktionstüchtigkeit geprüft werden. Die Touch-Funktionen und die Demosoftware funktionieren ohne Probleme. Eine Auswahl an Daten des Boards (D3):

- betrieben mit einer 32-bit Cortex-M7 CPU (Mikrocontroller)
- integriertes LCD-Touchdisplay mit einer Auflösung von 480 x 272 Pixel
- Auswahl an Peripherie: I²C, UART, USB 2.0, SPI, RTC, 18 Timer

Das Board wurde im Rahmen dieses Projektes zur Verfügung gestellt und wird verwendet.

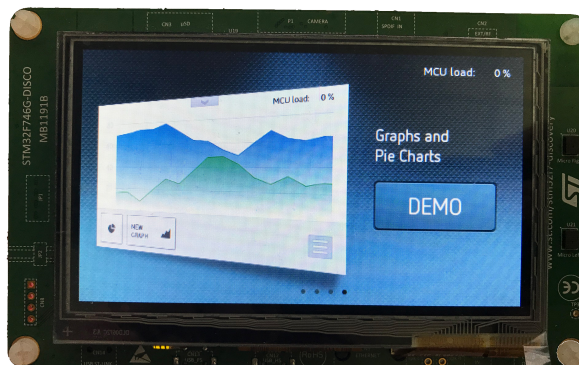


Abbildung 3.3: Discovery-Kit Frontansicht

3.3.2.2 MOSFET als Leistungsschalter

Bei der Auswahl der MOSFETs spielen die Leistungsdaten der Netzteile die entscheidende Rolle. Netzteil SDR-960-48 (D4):

- DC Voltage: 48 V
- Rated Current: 20 A
- Peak Current: 26 A

Bei der Auswahl des MOSFETs muss Rücksicht auf die Steuerkennlinien U_{GS} (Gate-Source) zu I_D (Drain) und U_{GS} (Gate-Source) zu U_{DS} (Drain-Source) genommen werden. Hier ist darauf zu achten, dass der MOSFET bei dem Anlegen des Gate-Signals mindestens 26 A plus 20 % Sicherheitszuschlag durchsteuert bei einer Drain-Source-Spannung von 48 V plus 20 % Sicherheitszuschlag. Es wurde also ein MOSFET mit folgenden Daten gesucht:

- $U_{DS} > 57,6 \text{ V}$
- $I_D > 31,2 \text{ A}$

Das Gate wird mit einem separaten Spannungswandler angesteuert, weshalb U_{GS} zwischen 48 V und 1 V liegen kann.

MOSFET	STD30NF06LT4 (D12)	STP55NF06LSTM (D13)	IRLB3036PBF (D14)
Strom I_D	35 A	55 A	195 A
Spannung U_{DS}	60 V	60 V	60 V
Bauform	DPAK	TO-220	TO-220
Verlustleistung P_{tot}	70 W	95 W	380 W
Widerstand r_{DS}	0,03 Ω	0,02 Ω	0,0028 Ω
Schaltzeit	105 ns	100 ns	330 ns

Tabelle 3.1: Auswahl an verfügbaren MOSFETs

In Tabelle 3.1 ist eine kleine Auswahl von MOSFETs aufgelistet, welche für den beabsichtigten Einsatzzweck geeignet erscheinen. Jeder dieser MOSFETs passt auf die oben genannten Anforderungen, jedoch muss noch Bezug auf die Verlustleistung genommen werden. Die Verlustleistung P_{tot} in einem MOSFET setzt sich aus statischen, dynamischen und Ansteuerungsverlusten zusammen (L10).

$$P_{tot} = P_{stat} + P_{dyn} + P_{steuer} \quad (3.1)$$

Die statische Verlustleistung kommt durch den Widerstand r_{DS} zustande und wird wie folgt berechnet (Beispielrechnung mit MOSFET IRLB3036PBF):

$$P_{\text{stat}} = I^2 * r_{DS} = (31,2 \text{ A})^2 * 0,0028 \Omega \approx 2,73 \text{ W} \quad (3.2)$$

Die dynamische Verlustleistung ist abhängig von der Schaltgeschwindigkeit des MOSFETs und hängt wiederum von der Anwendung ab. Grundlegend braucht eine Heizplatte nicht schnell geschaltet werden, weil sie sehr langsam reagiert, so dass P_{dyn} sehr gering ausfallen wird. Jedoch ist hier Rücksicht auf das zu verwendende Netzteil zu nehmen, da bei einer geringen Frequenz die PWM zu hören sein könnte, was vermieden werden soll. Die dynamische und Ansteuerleistung wird wie folgt berechnet:

$$P_{\text{dyn}} = P_{\text{Last}} * T_{\text{schalt}} * f \quad (3.3)$$

$$P_{\text{steuer}} = U_{GS} * Q_g * f \quad (3.4)$$

Mit dem MOSFET IRLB3036PBF kann theoretisch folgende Frequenz erreicht werden:

Um die folgende Rechnung zu vereinfachen, wird die Ansteuerleistung gemäß Formel 3.4 als 2 Watt angenommen. P_{steuer} würde erst bei über 1 MHz 2 Watt betragen.

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{stat}} + P_{\text{dyn}} + P_{\text{steuer}} = I^2 * r_{DS} + P_{\text{Last}} * T_{\text{schalt}} * f + 2 \text{ W} \quad (3.5)$$

$$f = \frac{P_{\text{tot}} - I^2 * r_{DS} - 2 \text{ W}}{P_{\text{Last}} * T_{\text{schalt}}} = \frac{380 \text{ W} - (31,2 \text{ A})^2 * 0,0028 \Omega - 2 \text{ W}}{31,2 \text{ A} * 48 \text{ V} * 330 \text{ ns}} \approx 759 \text{ kHz} \quad (3.6)$$

In der folgenden Tabelle 3.2 sind die maximalen Frequenzen aller drei einbezogenen MOSFETs aufgelistet.

MOSFET:	STD30NF06LT4	STP55NF06LSTM	IRLB3036PBF
erreichbare Frequenz:	$\approx 247 \text{ kHz}$	$\approx 490 \text{ kHz}$	$\approx 759 \text{ kHz}$

Tabelle 3.2: Maximalfrequenzen der MOSFETs

Über ein DPAK-Gehäuse lässt sich nur wenig Temperatur abführen, da diese Bauteilform direkt auf der Platine aufliegt und diese, auch durch die geringe Kupferschichtdicke, nicht viel Wärme abführen kann. Ein TO220-Gehäuse hingegen ist konstruiert, um es an einem Kühlkörper zu befestigen. Die Gehäuseformen sind rechts in der Abbildung 3.4 dargestellt.

Der MOSFET IRLB3036PBF wurde ausgewählt, um einen großen Frequenzbereich abdecken zu können.



Abbildung 3.4: Gehäusearten

Es muss zusätzlich noch geprüft werden, ob der MOSFET weitere Schutzbeschaltungen, wie z.B. eine Freilaufdiode, benötigt. Diese Schutzbeschaltungen sind notwendig, sobald man mit induktiven Lasten arbeitet, da sonst die Induktionsspannung den MOSFET zerstören kann.

Um festzustellen, ob die Heizplatten Induktivitäten aufweisen, wurde ein Testwiderstand in Reihe mit einer Werksteinplatte geschaltet. In der Abbildung 3.5 ist ein Messverlauf bei einer Frequenz von 50 Hz zu sehen. Bei mehreren Frequenzen (50 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 10 kHz, 100 kHz) konnte keine Phasenverschiebung zwischen Testwiderstand und Heizplatte am Oszilloskop festgestellt werden. Die Heizplatte besitzt somit annähernd keine Induktivität, weshalb keine weitere Schutzbeschaltung eingeplant wird.

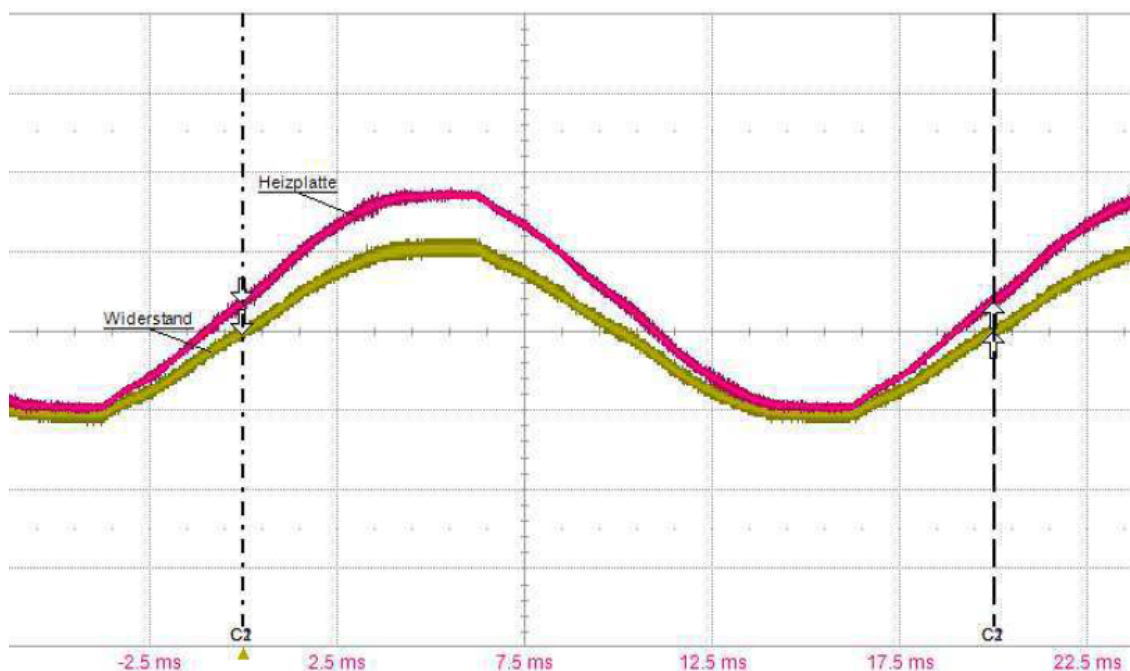


Abbildung 3.5: Messverlauf Reihenschaltung Testwiderstand mit Werksteinplatte, 50Hz

3.3.2.3 Optokoppler

Optokoppler trennen Signale galvanisch. Diese Eigenschaft ermöglicht es, die Pins vom Discovery-Chip (Mikrocontroller) zum MOSFET-Gate potentialfrei zu halten. Eine Vorgabe des Projekts war die Trennung der Informationstechnik von der Leistungselektronik, welche hiermit eingehalten werden kann.

Bei der Auswahl des Bauteils muss auf die Spannung und den Strom, der durch die Diode des Optokopplers fließt, geachtet werden. Ein Widerstand kann den Strom, der durch die Diode fließt und die Spannung, die über der Diode abfällt, begrenzen. Weiterhin muss ausgangsseitig auf die Spannung, die der Transistor aushält, geachtet werden. Diese muss groß genug sein, um das Gate des MOSFETs ansteuern zu können. Die Schaltfrequenz des Optokopplers ist entscheidend für die die PWM-Frequenz. Der ausgewählte MOSFET schaltet in 330 ns. Sollte die Schaltzeit des Optokopplers um ein Vielfaches größer sein, steigt die dynamische Verlustleistung des MOSFETs schnell an, weshalb Berechnungen zur Verlustleistung des MOSFETs nötig sind.

Im Projekt wurde der Optokoppler TLP185(BL-TPL,SE ausgewählt.
Daten des Optokopplers (D5):

- Schaltzeit: 5 μ s
- Collector-Emitter Voltage: 80 V
- LED-Current: 50 mA
- LED-Voltage: 1,25 V

Die Abbildung 3.6 zeigt das Schaltsymbol des Bauteils.

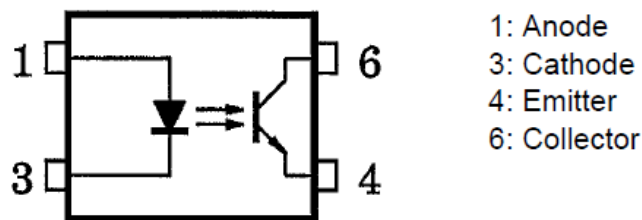


Abbildung 3.6: Optokoppler TLP185(BL-TPL,SE

3.3.2.4 RTC-Modul

Ein RTC-Modul lässt die Systemuhr auch ohne externe Stromzufuhr weiterlaufen. Ohne eine RTC müsste die Uhr nach jeder Stromunterbrechung neu eingestellt werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, ein RTC-Modul mit einzuplanen. Mit einem solchen RTC-Modul kann man die Uhrzeit speichern und abrufen.

Die RTC „DS1307“ wird aus einem Projekt übernommen, da diese RTC bereits getestet wurde und funktioniert (ACMC).

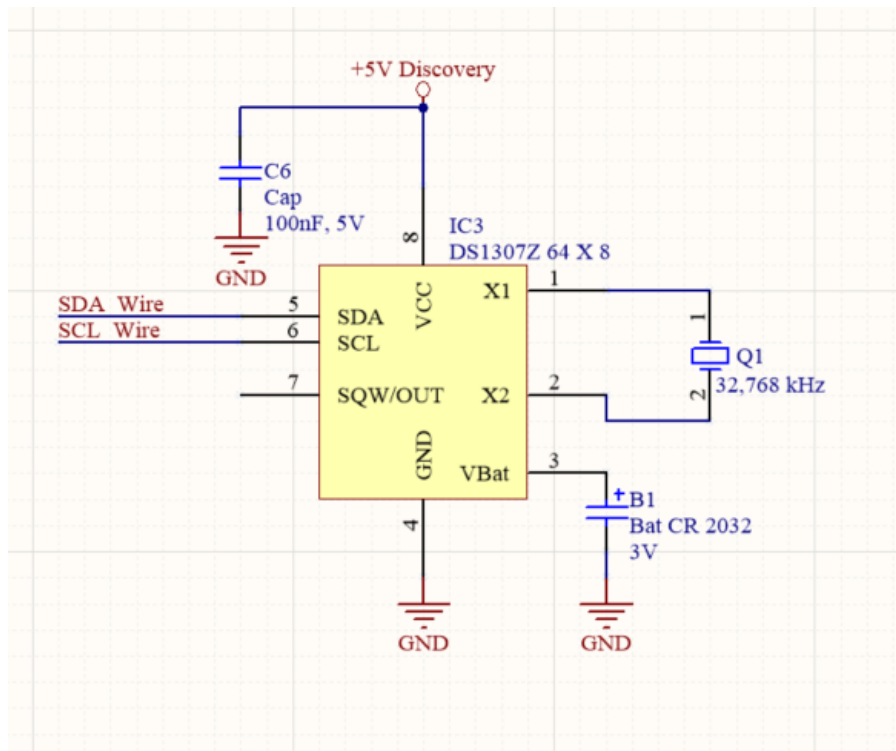


Abbildung 3.7: Schaltung RTC-Modul (D6)

Wie in der Abbildung 3.7 zu sehen, ist das Modul über I²C mit dem Mikrocontroller verbunden, um die Uhrzeit abzurufen und zu speichern. Eine Batterie versorgt das Modul über mehr als fünf Jahre mit Strom. Der angeschlossene Quarz an X1 und X2 sorgt für eine genaue Taktung der Uhr.

3.3.2.5 Temperatursensoren

Die Temperatursensoren sowie der Controller werden ebenfalls aus einem anderen Projekt übernommen (Yuang18). Die Sensoren DS18B20 benutzen das OneWire-Protokoll, benötigen also nur eine gemeinsame Leitung für den Datentransport und die Spannungsversorgung und eine zweite für GND (D7). Diese Sensoren werden über einen OneWire-I²C-Kontroller DS2482 mit dem Mikrocontroller verbunden (D8). In der Abbildung 3.8 ist die Beschaltung der beiden ICs zu sehen.

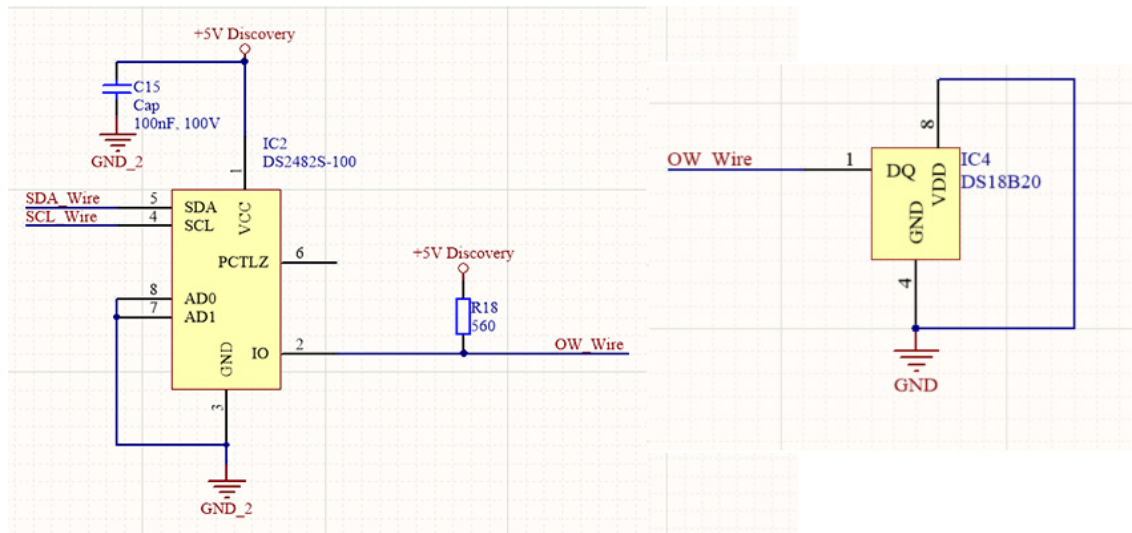


Abbildung 3.8: links: DS1307, rechts: DS18B20

Die Datenleitung benötigt einen Pullup-Widerstand, um einen definierten Pegel zu erhalten. Die Sensoren werden gleichzeitig über die Datenleitung mit Strom versorgt. Pro Sensor werden 1,5 mA benötigt. Da jeweils ein Sensor pro Werksteinplatte und ein Sensor für das Board angeschlossen werden sollen, werden insgesamt 7,5 mA benötigt. Um weiterhin dem Spannungsabfall der langen Leitungen entgegenzuwirken, wird hier ein Widerstand von 560 Ω ausgewählt. Über den Anschluss PCTLZ des Controllers könnte ein MOSFET angeschlossen werden, welcher kurzzeitig mehr Strom auf die Leitung gibt. Dieser wird hier aber nicht benötigt, da die Sensoren konstant den benötigten Strom erhalten sollen. Die Anschlüsse AD0 und AD1 des DS2482 dienen der Einstellung der I²C-Adresse. Diese Pins werden auf GND gelegt, damit eine im Datenblatt beschriebene I²C-Adresse zur Ansteuerung des ICs eingestellt werden kann (D9). Die Temperatursensoren DS18B20 sind für eine Temperaturspanne von -55 °C bis 125 °C mit einer Genauigkeit von 0,5 °C im Bereich zwischen -10 °C und 80 °C ausgelegt. Dieser Temperaturbereich und die Genauigkeit sind für dieses Projekt ausreichend. Als Bauform wurde für den On-Board-Temperatursensor die μ SOP-Variante gewählt. Für die vier Werksteinplatten ist diese Bauform aufgrund ihrer SMD-Pins zum Einsetzen in Fugen nicht geeignet, da diese zu breit sind, weshalb hier die Bauform TO92 gewählt wurde.

3.3.2.6 Spannungswandler

Eine Strommessung des Discovery-Boards ergab 0,4 A bei 12 V DC. Mit einem Linearregler würden bei Spannungswandlung von 48 V auf 12 V 75 % Verlust entstehen. Aus diesem Grund wird hier ein Abwärtswandler verwendet. Diese Wandler haben eine Effizienz von bis zu 99 %. In dem hier beschriebenen Projekt muss der Spannungswandler eine galvanische Trennung aufweisen, um die Leistungselektronik von Netzteil 1 von der Informationstechnik zu trennen. Um den Dimensionierungsaufwand gering zu halten, wurde ein Spannungswandler ausgewählt, welcher konstant 12 V ausgeben soll: PYBE10-Q48-S12 (D10). Dieser Spannungswandler besitzt eine Effizienz von 87 %.

Für das Ansteuern des MOSFET-Gates wird pro Netzteil ein Spannungswandler benötigt. Im Datenblatt des MOSFETs ist ablesbar, ab welchem Spannungswert der MOSFET durchschaltet, zu sehen in der Abbildung 3.9.

Ab 4 V Gatespannung kann mehr Strom geschaltet werden, als von den Netzteilen bereitstellbar ist. Weiterhin steht im Datenblatt, dass die Gatespannung 16 V nicht überschreiten darf. Wie in den Grundlagen nachzulesen, wird das Gate eines MOSFETs über Spannung gesteuert. Strom wird nur zum Umladen der Kapazitäten im MOSFET benötigt. Aus diesem Grund fließt nur ein

sehr geringer Gatestrom. Hier bietet sich nun ein Linearregler an, welcher die 48 V auf einen Wert zwischen 4 V und 16 V wandelt. Der Linearregler 621-ZXTR2112F-7 erfüllt diese Kriterien und wandelt die 48 V von den Netzteilen auf 12 V mit bis zu 50 mA (D11). Der Strom wird mit einem Widerstand pro MOSFET, demzufolge zwei pro Linearregler, auf rund 20 mA begrenzt.

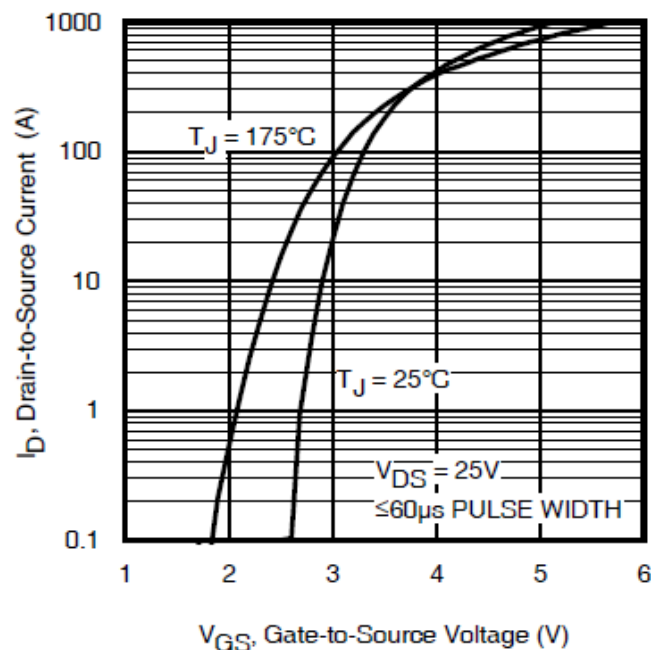


Abbildung 3.9: Diagramm V_{GS} zu I_D (D15)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12\text{ V}}{600\ \Omega} = 20\text{ mA} \quad (3.7)$$

Der Spannungswandler muss dementsprechend 40 mA liefern. Dieser Wert liegt im Arbeitsbereich des Reglers.

Die Abbildungen 3.10 und 3.11 zeigen die in diesem Kapitel beschriebenen Spannungswandler.

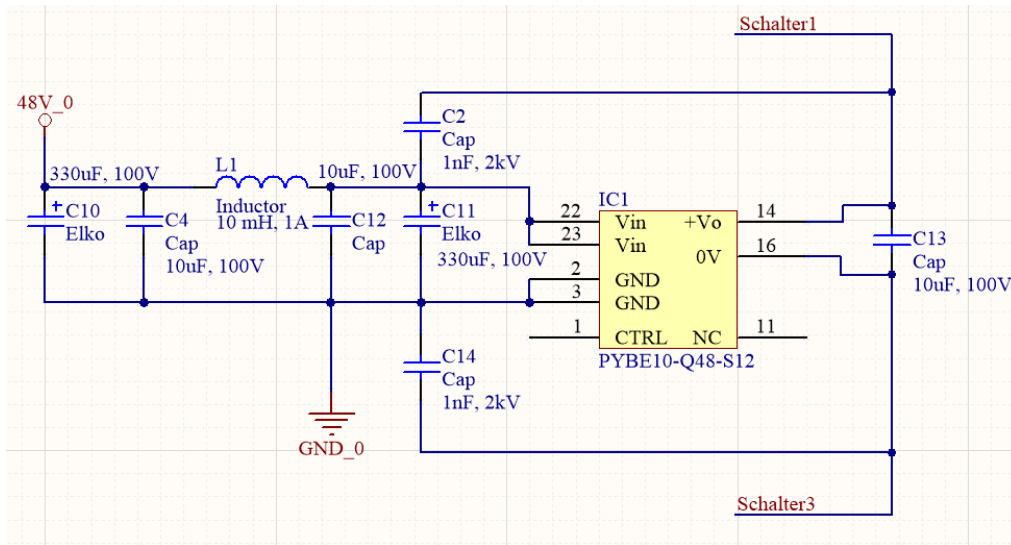


Abbildung 3.10: Beschaltung des Abwärtswandlers PYBE10-Q48-S12

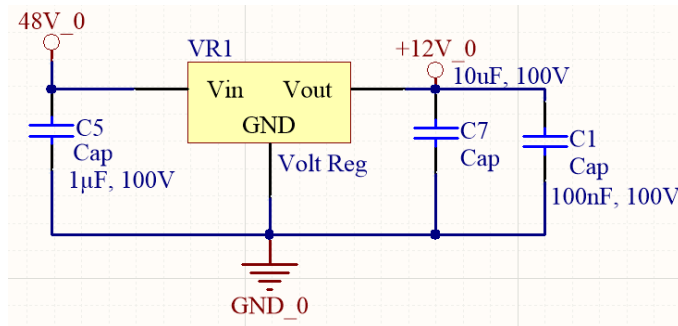


Abbildung 3.11: Beschaltung des Linearreglers 621-ZXTR2112F-7

mechanisch:

3.3.2.7 Kühlkörper

Der Kühlkörper dient zur Wärmeabfuhr für die vier MOSFETs, welche durch Schalten die Spannung an den Werksteinplatten begrenzen. Da die Frequenz für die PWM erst bei der Inbetriebnahme ausgewählt wird, ist aktuell noch nicht festzustellen, welche Leistung am MOSFETs zustandekommen wird. Aus diesem Grund wird der Kühlkörper überdimensioniert. Dieser Kühlkörper muss unter Umständen vier MOSFETs kühlen, welche mit einer hohen PWM-Frequenz laufen. Eine hohe PWM-Frequenz sorgt für eine hohe dynamische Verlustleistung. Zusätzlich muss die statische Verlustleistung, welche auch als Wärme abfällt, abgeführt werden. Hier wurde der Kühlkörper CR201-75VE vom Hersteller Ohmite ausgewählt (D16). Dieser bietet genügend Platz für alle vier MOSFETs nebeneinander und besitzt eine Kühlfläche von 711 cm^2 .

Weiterhin muss beachtet werden, dass der Kühlkörper alle 4 MOSFETs über die Gehäuseauflage verbindet. Laut dem Datenblatt ist das Gehäuse des MOSFETs mit dem Drainsignal verbunden. Die Drainsignale der einzelnen MOSFETs dürfen jedoch nicht verbunden werden, da sonst nicht jede Werksteinplatte einzeln angesteuert werden kann. Aus diesem Grund werden die MOSFET-Gehäuse mit einer Glimmerscheibe und Unterscheibe galvanisch von dem Kühlkörper getrennt. Die Wärmeabfuhr kann durch die Glimmerscheibe, auf welcher beidseitig Wärmeleitpaste aufgetragen wird, sichergestellt werden. Es wurden Gewinde in den Kühlkörper gebohrt, um die MOSFETs mit einer Schraube am Kühlkörper befestigen zu können.

Abbildung 3.12 zeigt den Kühlkörper CR201-75VE.

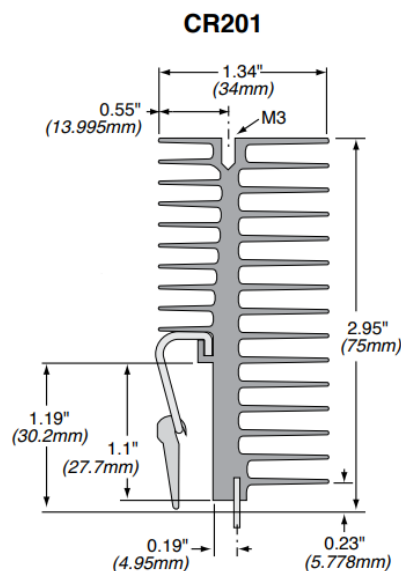


Abbildung 3.12: Kühlkörper

3.3.2.8 Konnektoren

Das Discovery-Kit besitzt vier separate Pinleisten, über welche die Peripherie an den Mikrocontroller angeschlossen werden soll: CN4, CN5, CN6 und CN7 (D2). Um von dem zu entwerfenden Hardwareboard aus die Buchsenleisten mit Stiftleisten verbinden zu können, muss der Abstand zwischen den zwei Platinen festgelegt werden. Das höchste Element auf der Rückseite des Discovery-Boards ist eine RJ45-Buchse. Diese ist 14 mm hoch. Die entsprechend nächst-größere verfügbare Pin-Länge ist 18 mm. In Abbildung 3.13 ist die Anordnung der Buchsenleisten auf dem Discovery-Board zu sehen.

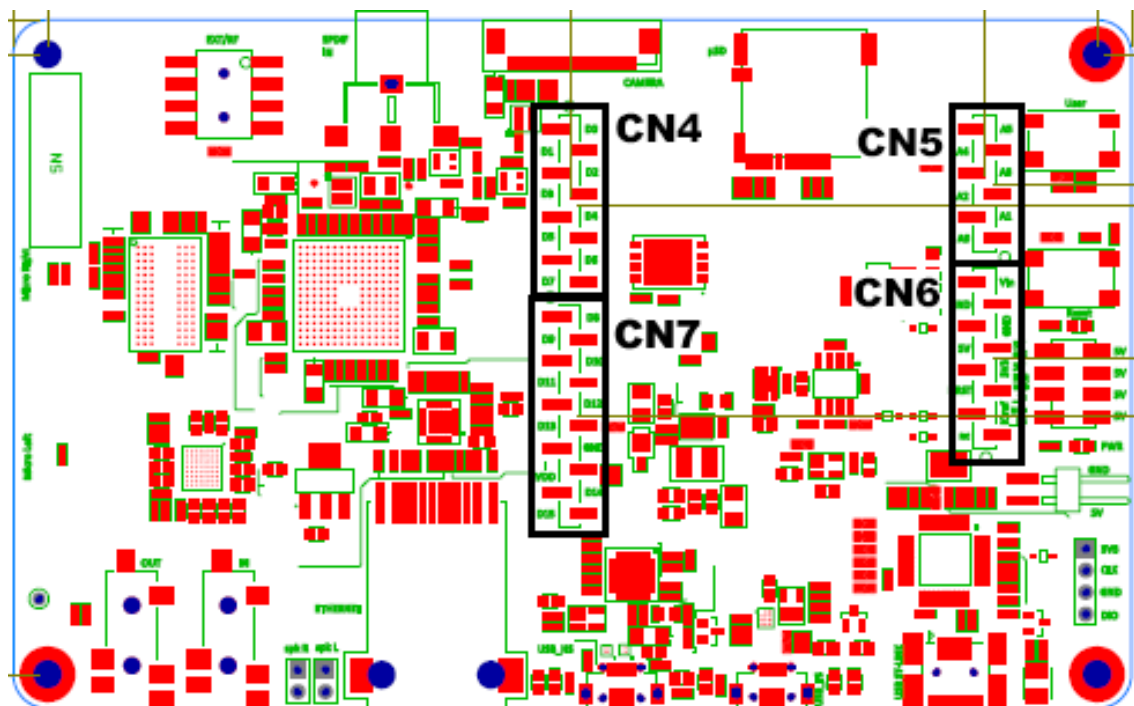


Abbildung 3.13: Discovery-Kit Stiftleisten CN4, CN5, CN6, CN7

Durch diese Pins wird das Hardwareboard mit dem Discovery-Board verbunden.

Für das Verbinden der Platine mit den Netzteilen und Werksteinplatten wurden strombelastbare Klemmen vom Hersteller WAGO bezogen. Eine Messung an den Netzteilen ergab, dass alle drei Klemmen pro Plus- und Groundsignal verbunden werden müssen. Diese Information ist ebenfalls im Datenblatt vermerkt. Aus diesem Grund wurden für das Anschließen der Netzteile Klemmen mit sechs Anschlüssen ausgewählt.

Die Werksteinplatten brauchen jeweils nur eine Anschlussmöglichkeit pro Plus und GND, hier wurden Klemmen mit zwei Anschlüssen ausgewählt.

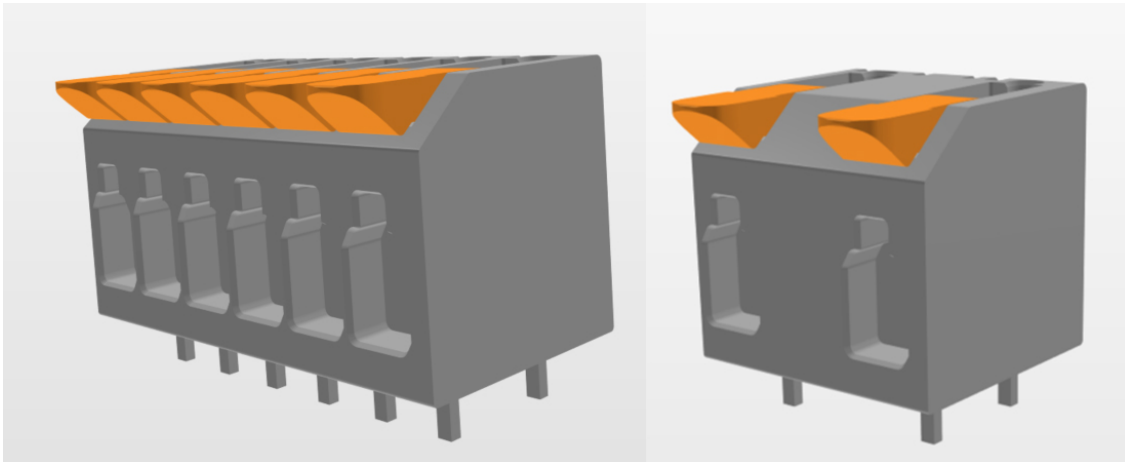


Abbildung 3.14: links: Klemme 2604-1106, rechts: Klemme 2604-1502

In Abbildung 3.14 sind diese Klemmen abgebildet. Zum Lösen und Festziehen dieser Klemmen ist kein Werkzeug notwendig, da der Mechanismus über einen Hebel funktioniert.

3.3.3 Platinenlayout

Da bei 48 V à 20 A eine hohe Leistung von 960 Watt zustande kommt, sind hier Berechnungen und Konstruktionen zur Wärmeabfuhr und zur richtigen Dimensionierung von Leitern anzustellen.

3.3.3.1 Berechnung der Leiterbahnbreite (L11)

Da normale Leiterbahnplatten eine Kupferdicke von 35 μm aufweisen, muss hier besonders auf die Wärmeentwicklung geachtet werden. Berechnung der Leiterbahnbreite b mit Hilfe einer Formel von Multi PCB (Leiterplattenhersteller):

$$b = \frac{I^{1,5625}}{K^{1,5626} * H^{0,78125} * T^{0,78125}} \quad (3.8)$$

Die Leiterbahnbreite ist proportional abhängig von dem fließenden Strom I , indirekt proportional abhängig von der Kupferdicke H , von der zulässigen Erwärmung T und K . K ist ein fester Faktor von 3,3 und ist abhängig von der Anzahl der Leiterplattenschichten, hier im Projekt sind dies zwei. Als zulässige Erwärmung ΔT wurden 40 [Kelvin] angenommen. Die Stromstärke beträgt 20 A + 20 Prozent Sicherheitsfaktor = 24 A.

$$b = \frac{24^{1,5625}}{3,3^{1,5626} * 0,035^{0,78125} * 40^{0,78125}} \approx 17 \text{ mm} \quad (3.9)$$

Mit einer Leiterbahnbreite von rund 17 mm würde die Platine wesentlich größer werden als das Discovery-Board. Deshalb wurde entschieden, einen Aufpreis zu zahlen und die Kupferdicke auf 70 μm zu erhöhen.

$$b = \frac{24^{1,5625}}{3,3^{1,5626} * 0,07^{0,78125} * 40^{0,78125}} \approx 10 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Mit 10 mm Leiterbahnbreite werden die stromführenden Leiterbahnen auf dem Platinenlayout umgesetzt. Die Leiterbahnen müssen weiterhin bei 48 V Schutzkleinspannung einen Mindestabstand von 0,063 mm aufweisen, damit ein Spannungsdurchschlag vermieden wird (L12).

3.3.3.2 Anordnung der Bauelemente

Das System soll zusammen mit den zwei Netzteilen in einen Schaltkasten eingebaut werden. In diesem Schaltkasten ist begrenzt Platz, weshalb die zu entwickelnde Hardwareplatine nicht wesentlich größer als das Discovery-Kit selbst werden soll.

Maße des Discovery-Kits: 130 mm x 80 mm

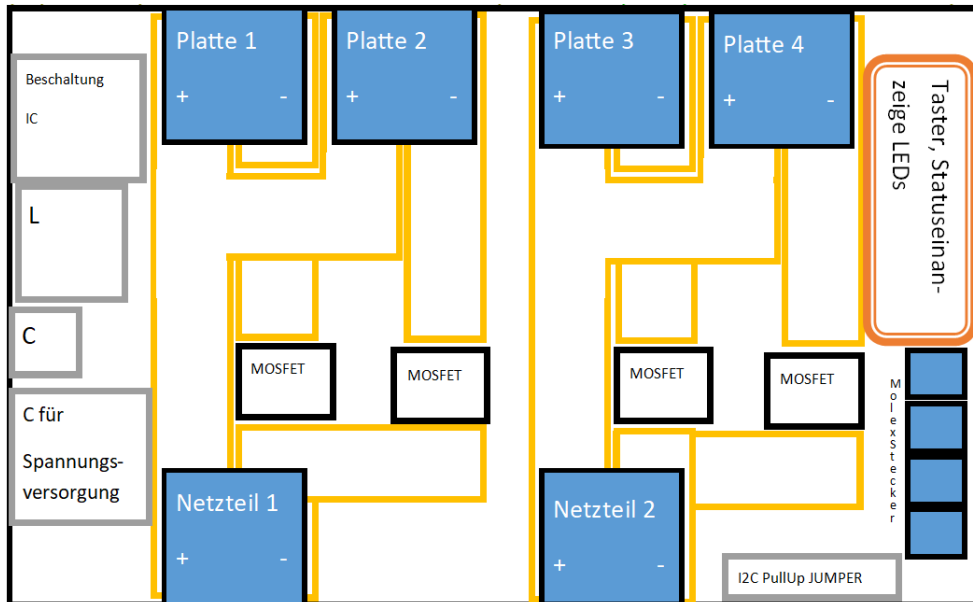


Abbildung 3.15: Platine von oben

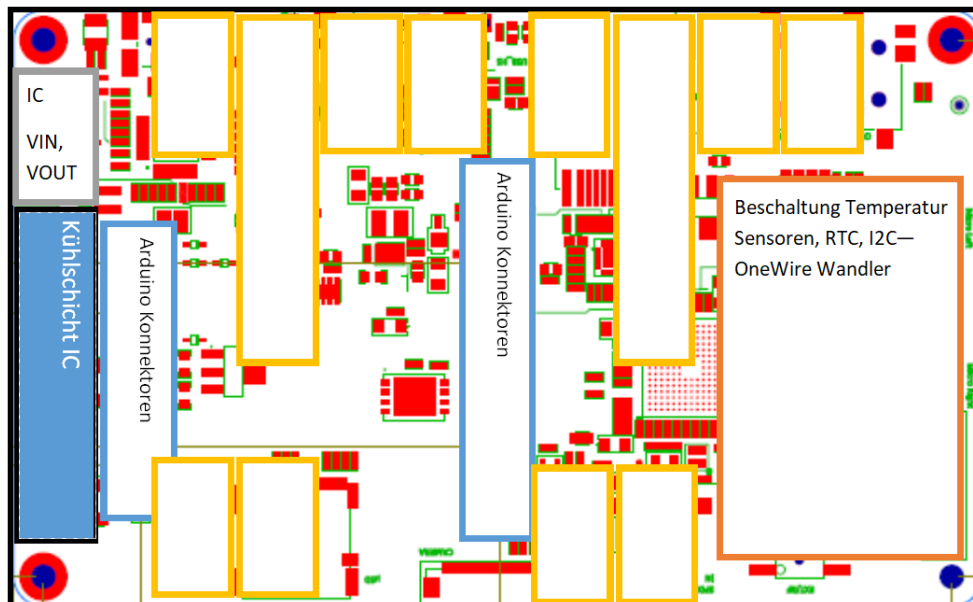


Abbildung 3.16: Platine von unten

In den Abbildungen 3.15 und 3.16 ist die vorläufige Anordnung der Bauelemente zu sehen. Die Größe der Platine beträgt 135 mm x 80 mm.

Die gelb markierten Bereiche sind die stromführenden Leiterbahnen für die Werksteinplatten. Die MOSFETs zur Steuerung der Werksteinplatten befinden sich jeweils an den Minusleitungen der einzelnen Werksteinplatten und Netzteile. Dabei sind die MOSFETs wie folgt beschalten:

- Gate: Steuerung über Discovery-Kit mit Optokoppler
- Drain: negatives Signal der Werksteinplatten
- Source: negatives Signal der Netzteile

Auf der Oberseite kommen vier Molex-Stecker (Microfit 3.0) zum Einsatz, über welche die Temperatursensoren angeschlossen werden können. Die RTC und der Temperatursensor-Kontroller wurden in der Nähe der Molex-Stecker angeordnet, da die Temperatursensoren mit diesen verbunden sind und beide ICs über I²C mit dem Discovery-Kit kommunizieren. Weitere Bauelemente, wie die Spannungswandler für die MOSFETs, Optokoppler und Schalter zum Umschalten zwischen interner und externer Spannungsversorgung, werden in den freien Bereichen eingeplant.

Abbildung 3.17 zeigt die entworfene Platine. Die dazugehörigen Files zur Platinenerstellung (Gerberfiles), sowie eine Liste aller verwendeten Bauteile (BOM) und der Schaltplan, befinden sich im Anhang.

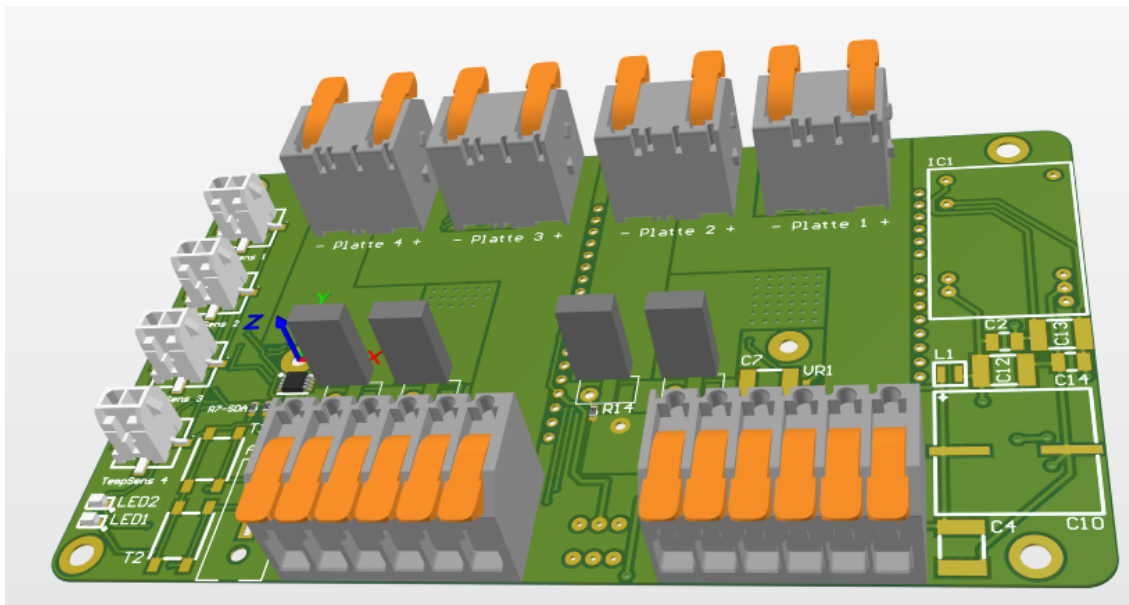


Abbildung 3.17: 3D-Ansicht Platinendraufsicht

3.4 Software

3.4.1 Softwarekonzept

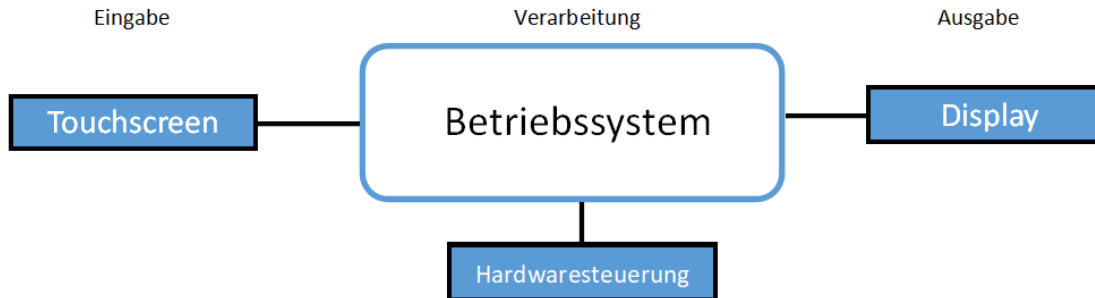


Abbildung 3.18: Softwarekonzept

Auf dem Mikrocontroller des Discovery-Boards soll eine Software implementiert werden, welche die Hardware steuert und damit die Temperatur der Heizplatten regelt. Diese Software muss gleichzeitig Befehle über die Touch-Funktion des Displays verarbeiten können, zu sehen in Abbildung 3.18. Zur Realisierung dieser Anforderungen soll ein Betriebssystem initialisiert und verwendet werden.

Es sind mehrere Threads von Nöten, da mehrere Aufgaben gleichzeitig ablaufen sollen:

- Touchscreen - Koordinaten einlesen
- GUI - Ausgabe von Daten über das Display
- Verarbeiten der Daten der I²C-Kommunikation
- PWM-Signal der MOSFETs ausgeben

3.4.2 Auswahl der Softwarekomponenten

3.4.2.1 Betriebssystem

Aufgrund der im Konzept genannten Aufgaben, die gleichzeitig ablaufen müssen, wird die Benutzung eines Betriebssystems empfohlen. Der Hersteller ST des verwendeten Mikrocontrollers bietet ein einfach zu implementierendes Betriebssystem namens FreeRTOS an. Mit Hilfe des Softwaretools „CubeMx“ kann die Initialisierung der Hardwareperipherie und des Betriebssystems grafisch vorgenommen werden. Anschließend wird daraus der Programmcode generiert.

FreeRTos wurde folgend getestet:

Dem Betriebssystem muss in CubeMx zuerst ein Timer zugewiesen werden. Dieser bildet den Systemtakt. Es wurden mehrere Threads erstellt, über welche mit der Erstellung von Mutexes die Freigabe und das Sperren von Tasks getestet wurde. Weiterhin wurden Queues getestet, um eine Kommunikation zwischen den Threads zu ermöglichen. Die Mittel von FreeRTOS funktionierten alle ohne Probleme, weshalb entschieden wurde, dieses Betriebssystem zu verwenden (L13).

3.4.2.2 Grafische Umgebung

Wie bei dem Betriebssystem bietet ST auch Middlewares für die GUI-Implementierung an. Es standen 2 GUIs zur Auswahl:

- TouchGFX
- STEMWin

TouchGFX ist die neuere GUI und wurde getestet, da die Implementierung über eine zusätzliche Software vorzunehmen war. In dieser Software konnte die grafische Umgebung mit Buttons virtuell erstellt werden. Jedoch stellte sich heraus, dass diese GUI nicht mit den kostenlosen IDEs kompatibel war. Der Code konnte aufgrund von Einbindungsfehlern nicht generiert werden. Versuche, diese Fehler zu korrigieren, führten zu unzähligen neuen Fehlermeldungen.

Letztendlich wurde STEMWin zum Programmieren einer grafischen Oberfläche verwendet (L14). Diese GUI wird auch teilweise mit einer zusätzlichen Software grafisch erstellt. Die Verknüpfungen vom Programmcode mit den Buttons mussten aber, anders als bei TouchGFX, im Programmcode selber vorgenommen werden.

3.4.2.3 Kommunikationsmodule

Das Display musste nicht selbstständig in den Programmcode eingebunden werden, da CubeMx dies nach dem Auswählen des Displays übernimmt.

Die Software zum Ansteuern der Touchhardware konnte manuell von einem Beispielprojekt übernommen und eingebunden werden. Damit Benutzeraktionen beim Steuern über die Touch-Funktionen keine Verzögerung verursachen, wird die Funktion, welche die Koordinaten vom Fingerdruck an die GUI weiterleitet, in einem separaten Thread abgehandelt.

Die GUI kann ausschließlich über das Touchdisplay gesteuert werden.

3.4.2.4 RTC

Zur Initialisierung des Temperatursensor-Kontrollers und der RTC wurden mit Hilfe der Datenblätter eigene Bibliotheken für die I²C-Kommunikation entworfen. Diese Bibliotheken werden verwendet, um die Temperaturen der Sensoren abzurufen und um die Zeit des RTC-Chips abzurufen bzw. einzustellen.

3.4.2.5 Timer für die PWM

Zur PWM-Generation für die Ansteuerung der MOSFETs, welche die Werksteinplatten steuern, müssen über CubeMx vier Timer ausgewählt werden. Diese Timer können direkt über Pins am Mikrocontroller ausgegeben werden. Folgende Einstellungen sind an den Timern vorzunehmen (L15):

- Clock Source: Internal Clock
- Channel 1: PWM Generation CH1

Über die Clock Source wird der Grundtakt des Timers festgelegt. Mit Channel1 wird der Modus festgelegt. Mit „PWM Generation CH1“ wird die PWM direkt über einen Pin ausgegeben. Dieses Signal wird dann über den Optokoppler an das Gate des MOSFETs weitergeleitet.

- Prescaler: 39.999

Über den Prescaler wird der Grundtakt des Timers runtergeregelt. Da die Werksteinplatten zuerst mit einer langsamen PWM angesteuert werden sollen, wird hier ein langsamer Takt eingestellt. Der Grundtakt ist 100 MHz, durch den Prescaler geteilt ergibt das 2500 Hz.

- Counter-Period: 99

Die Counter-Periode gibt an, nach wie vielen Schritten des Timers eine PWM-Periode beendet ist. 100 Schritte ergeben eine PWM-Periode von 25 Hz.

- PWM-Pulse: 0

Der PWM-Puls wird auf 0 gestellt. So ist der MOSFET nach Starten des Mikrocontrollers gesperrt. Je nach Tastverhältnis, welches über die GUI eingestellt wird, kann über die Software der PWM-Puls eingestellt werden.

3.4.3 Umsetzung des Softwarekonzepts

3.4.3.1 Grafische Umgebung

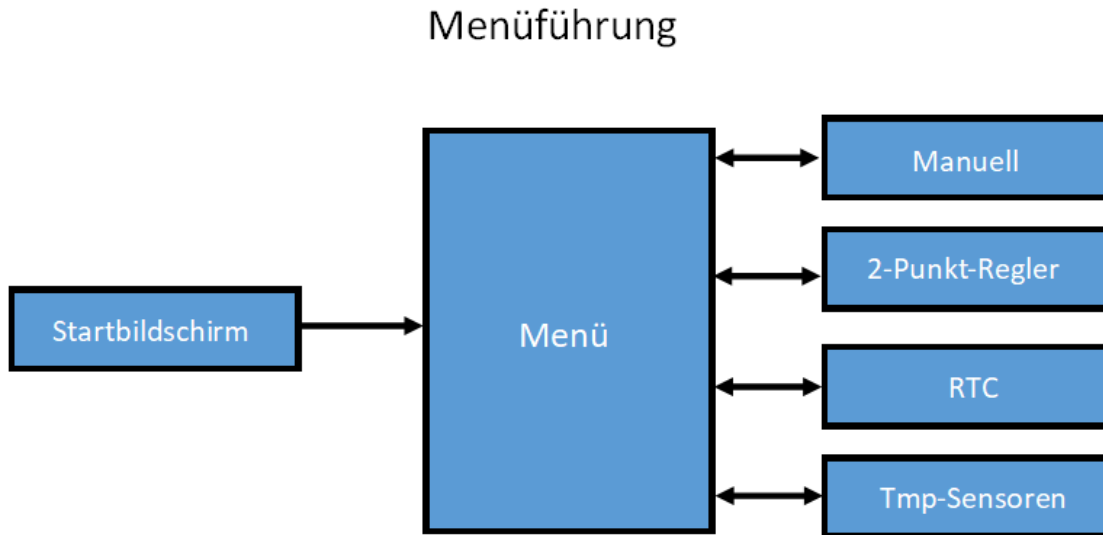


Abbildung 3.19: Menüführung der GUI

In diesem Kapitel wird die Menüführung vorgestellt. Eine Übersicht ist in Abbildung 3.19 zu sehen. Mit dem Softwaretool GUIBuilder wurden die grafischen Elemente der GUI STEMWin erstellt. Beim Starten des Kontrollers und nach der Initialisierung der Hardware wird die GUI gestartet. Es wird für 5 Sekunden ein Ladebildschirm angezeigt, welcher Projekt, Firmenname und Editor des Programms zeigt.

Nach dem Ladebildschirm erscheint eine Menüführung. Von hier aus kann man zu jedem Untermenü in der GUI navigieren. Zu den Auswahlpunkten gehören folgende Wahlmöglichkeiten:

- Manuell - zur manuellen Steuerung der Leistung der vier Werksteinplatten in Prozent
- 2-Punkt-Regler - zur Steuerung der Temperaturregelung der vier Werksteinplatten
- RTC - Setzen und Speichern des Datums und der Zeit auf dem RTC-Chip
- TMP-Sensoren - Zuweisung der bis zu 10 erkannten Sensoren zu den Werksteinplatten und zum Boardsensor

Weiterhin befindet sich am oberen Rand eines jeden Menüpunktes und im Menü selbst eine Statusleiste, welche Datum, Uhrzeit und die Temperatur der Platine anzeigt, sollte ein Sensor zugewiesen worden sein. Zu sehen ist das Menü in Abbildung 3.20.



Abbildung 3.20: Menü der GUI

Die folgende Abbildung (Abbildung 3.21) zeigt den Menüpunkt „Manuell“. Es kann hier die PWM jeder einzelnen Heizplatte zwischen 0 und 100 Prozent eingestellt werden. Es wird pro Werksteinplatte die eingestellte PWM in Form eines Balkens sowie die Temperatur der Werksteinplatte angezeigt. Über die drei Buttons rechts am Rand kann man auswählen, mit welcher Zahl die PWM der Heizplatten erhöht bzw. reduziert werden soll. Bei der Betätigung des Buttons Stop wird die PWM aller Werksteinplatten auf 0 gesetzt, dementsprechend alle MOSFETs gesperrt. Mit den zwei Checkboxes können Temperaturen ausgewählt werden, bei welchen das Tastverhältnis der PWM aller Werksteinplatten auf 0 und auf 100 Prozent gesetzt werden.



Abbildung 3.21: Menüpunkt Manuell der GUI

Der Menüpunkt „2-Punkt-Regler“, zu sehen in Abbildung 3.22, ist dem Menüpunkt „Manuell“ in Gestaltung und Anordnung der Bedienelemente sehr ähnlich, mit dem Unterschied, dass für die Werksteinplatten die Einschalt- und Ausschalttemperatur eingestellt werden kann. Mit dem Button Start wird die 2-Punkt-Regelung aller 4 Werksteinplatten gestartet.



Abbildung 3.22: Menüpunkt 2-Punkt-Regler

In den beiden Menüpunkten „RTC“ und „Tmp Sensoren“ sind Einstellungen vornehmbar. Den erkannten Temperatursensoren müssen UIDs zugewiesen werden, da sonst der 2-Punkt-Regler nicht funktioniert. Ebenfalls kann die Zeit der RTC neu gesetzt werden. Die Menüpunkte sind in Abbildungen 3.23 sowie 3.24 zu sehen.

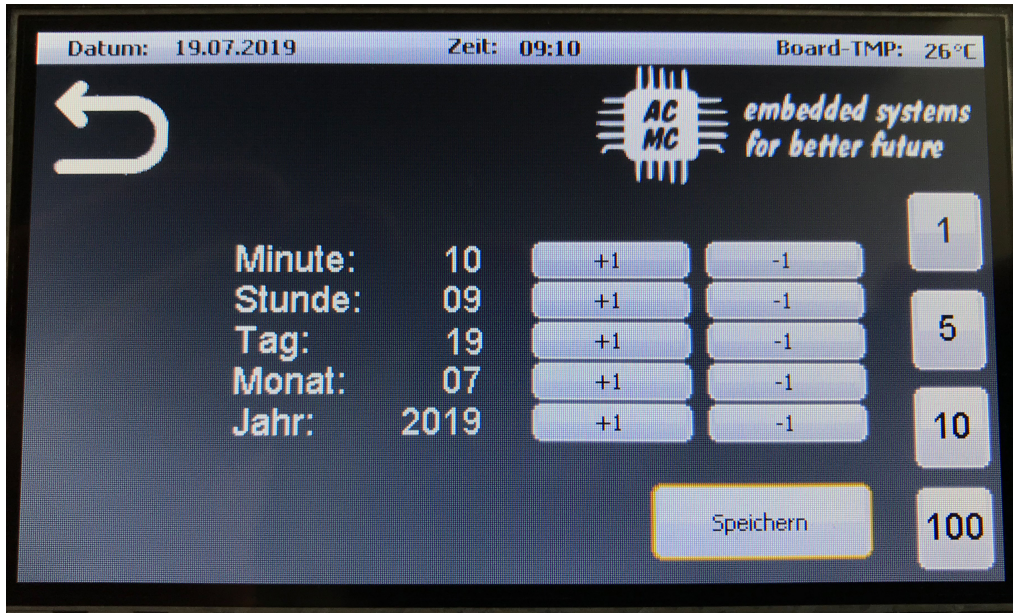


Abbildung 3.23: Menüpunkt RTC

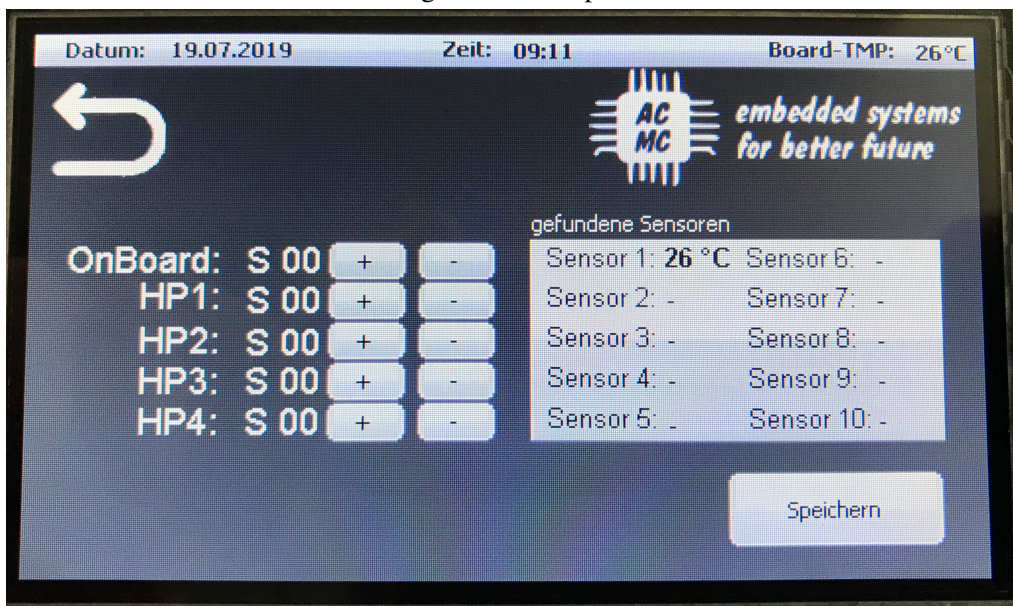


Abbildung 3.24: Menüpunkt Tmp Sensoren

3.4.3.2 Programmablaufplan

Nach dem Starten des Mikrocontrollers findet die Initialisierung der Hardware statt. Danach wird die GUI initialisiert und das Betriebssystem gestartet. Drei Threads werden ausgeführt, über welche die gesamte Steuerung des Programms stattfindet. Im Folgenden sind diese Threads dargestellt (Abbildungen 3.25, 3.26, 3.27). Zur vereinfachten Darstellung wurden teilweise Verzweigungen und Bedingungen sowie Schleifen nicht mit abgebildet.

Thread GUI steuert die Aktualisierung der GUI. Der Thread hat eine normale Priorität und ist damit der zweitwichtigste Thread.

Nach dem Anzeigen des Startbildschirms wird die aktuelle Zeit von der RTC des Mikrocontrollers abgerufen. Sollte die RTC gerade in Verwendung eines anderen Threads sein, wird gewartet, bis diese zur Verfügung steht. Dies wird mit einem Mutex erreicht, welcher von einem Thread gesperrt und freigegeben werden kann. Jedoch kann nur ein Thread gleichzeitig auf den Mutex zugreifen. Danach beginnt die Dauerschleife des Threads.

Es wird die GUI gezeichnet und einmal pro Durchlauf aktualisiert. Es muss keine zusätzliche Funktion aufgerufen werden, welche die Aktion beim Drücken der Buttons ausführt. Diese Aktionen werden über Softwareinterrupts der GUI automatisch ausgeführt.

Weiterhin wird die Unterfunktion Update GUI-Werte ausgeführt, welche Temperatur, Datum und Zeit in jedem Durchlauf in dem gerade angezeigten Menüpunkt aktualisiert. Die Zeit wird einmal pro Durchlauf der Schleife vom Mikrocontroller abgerufen, jedoch wird hier nicht auf den Mutex gewartet, sondern nur geprüft, ob dieser gerade zur Verfügung steht. Falls nicht, läuft das Programm weiter.

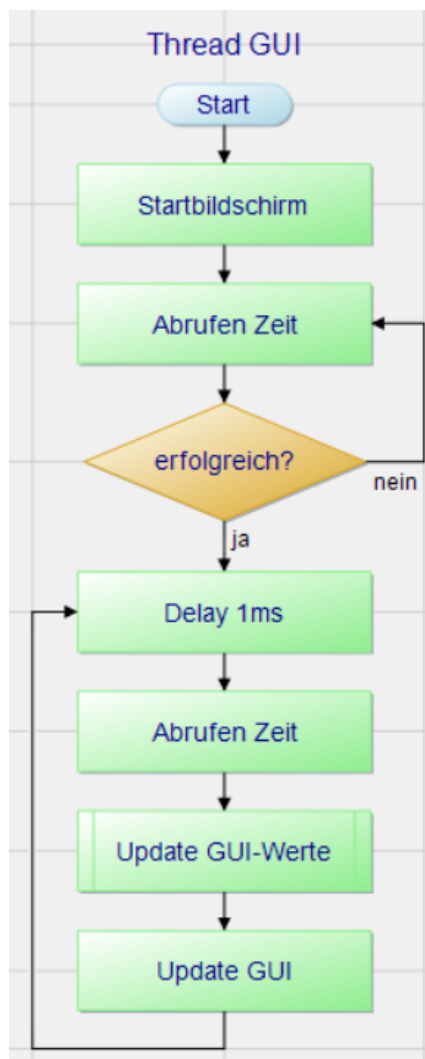


Abbildung 3.25: Thread GUI

Thread Touchscreen hat die höchste Priorität und ist für die Touch-Funktion zuständig.

Es wird jede Sekunde geprüft, ob ein Druck auf das Display ausgeübt wurde. Falls ja, werden diese Koordinaten an die GUI übermittelt. Von dort aus wird dann ein Softwareinterrupt ausgeführt. Es ist wichtig, dass dieser Thread die höchste Priorität aufweist, da es sonst zu Verzögerung zwischen Drücken des Buttons und Aktion kommen würde bzw. könnte sonst ein kurzer Tastendruck nicht erkannt werden.

Zusätzlich wird geprüft, ob der Druck länger anhält. Ist dem so, werden die Koordinaten nicht erneut an die GUI übermittelt, da das gedrückte Objekt sonst mehrmals hintereinander einen Softwareinterrupt ausführen würde.

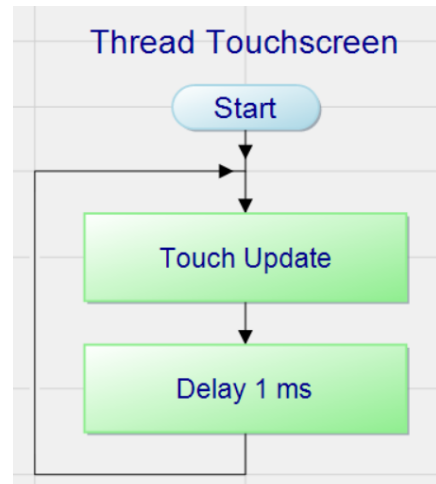


Abbildung 3.26: Thread Touchscreen

Thread Datenerfassung ist für den informationsverarbeitenden Teil verantwortlich und hat die niedrigste Priorität. Zuerst wird die Zeit vom externen RTC-Chip abgerufen und in die RTC des Mikrocontrollers geschrieben, sobald der Mutex zur Verfügung steht. Es ist wichtig, dass die Zeit zuerst abgerufen wird, da diese bereits nach der Anzeige des Startbildschirms auf dem Display angezeigt wird.

Anschließend wird nach Temperatursensoren gesucht. Es werden alle möglichen OneWire-Adressen angesprochen und geprüft, ob ein Sensor antwortet. Sollten Sensoren gefunden werden, werden diese initialisiert und die UID abgerufen. Es startet eine Dauerschleife, in welcher zuerst die Temperaturmessung gestartet wird. Nach etwa 700 ms ist die Messung fertig, und die Temperaturen der einzelnen Sensoren werden abgerufen und in einem Array gespeichert. Diese Temperaturen werden dann über Thread GUI im Display angezeigt. Damit es nicht zu Problemen beim Zugreifen beider Threads auf das Array kommt, wird hier ebenfalls ein Mutex verwendet.

Anschließend wird einmal alle 500 Durchläufe der Schleife die Zeit vom RTC-Chip geholt und auf die RTC des Mikrocontrollers geschrieben.

Weiterhin ist dieser Thread für das Schreiben einer neuen Zeit auf den RTC-Chip zuständig. Sollte ein Flag durch das Drücken des Speichern-Buttons im Menüpunkt „RTC“ gesetzt worden sein, wird die dort eingestellte Zeit über ein Unterprogramm im Thread Datenerfassung gespeichert. Dort wird die neue Zeit im RTC-Chip gespeichert, abgerufen, in die RTC vom Mikrocontroller geschrieben und anschließend in der Statusleiste angezeigt.

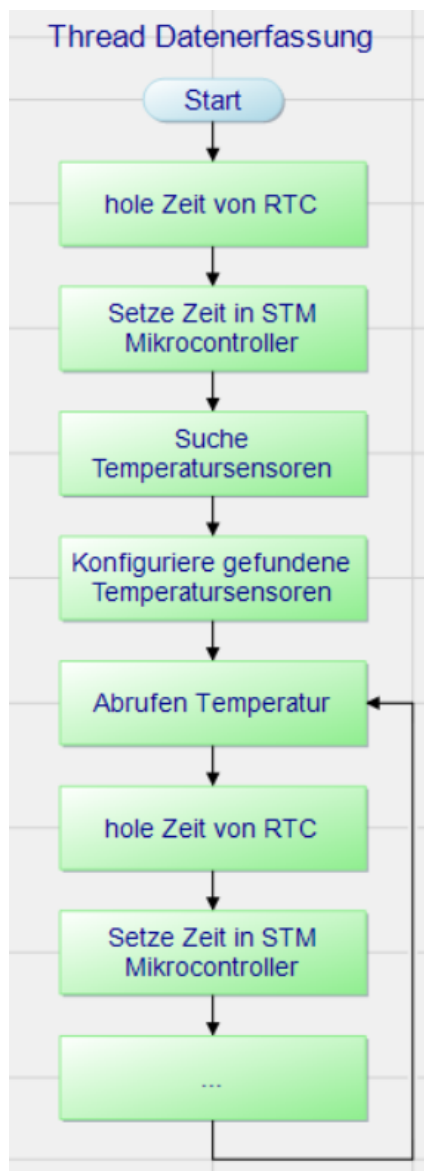


Abbildung 3.27: Thread Datenerfassung

4 Inbetriebnahme und Systemtest

Die Bauteile wurden auf die gefertigte Platine aufgebracht. Um Schäden an den Bauteilen zu vermeiden, wurden einzelne Baugruppen getestet, bevor die externe Leistungselektronik angeschlossen wurde. Zuerst wurde der Spannungswandler auf der entworfenen Platine und der externe Spannungswandler für die Informationstechnik auf Funktion geprüft sowie das Umschalten zwischen den beiden mit einem Schalter. Beide Spannungswandler stellen die benötigte Spannung und den benötigten Strom bereit. Zum weiteren Testen wurde die externe Spannungsversorgung gewählt. Die bereits implementierte GUI startete und zeigte ordnungsgemäß die erstellten Fenster an. Es wurden alle Sensoren erkannt und konnten in den Einstellungen zugewiesen werden. Weiterhin wurde der externe RTC-Chip erfolgreich angesteuert, so dass die Uhrzeit und das Datum in der GUI angezeigt werden konnten. Der informationsverarbeitende Teil funktioniert somit. Es ist notwendig, die Zeit der Flankenwechsel des Ansteuerungssignales der MOSFETs, welche über den Optokoppler galvanisch getrennt werden, zu messen, denn sollten diese sehr lang sein, entsteht am MOSFET eine zu hohe Verlustleistung beim Schalten und dieser überhitzt. Um ein erfolgreiches Schalten der MOSFETs zu gewährleisten, wurden Messungen an den Gatesignalen der MOSFETs bei einem Tastverhältnis von 50 % und einer Frequenz von 25 Hz durchgeführt. Abbildung 4.1 zeigt diese Messung.

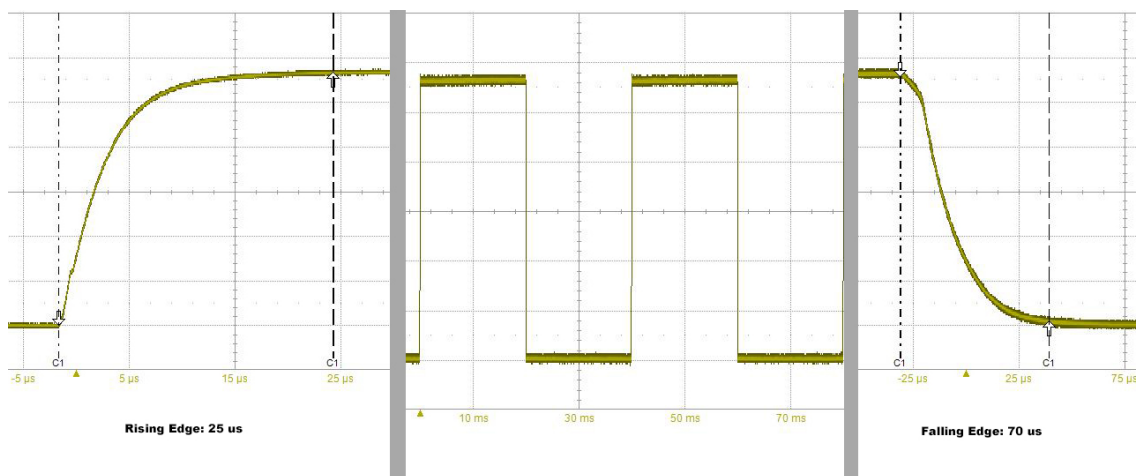


Abbildung 4.1: Messung Gatesignal MOSFET

Die Messung zeigt, dass die Steigzeit $25 \mu\text{s}$ und die Fallzeit $70 \mu\text{s}$ beträgt. Gemessen wurde die Zeit, in der die Flanke von 0 V auf 12 V ansteigt und wieder von 12 V auf 0 V abfällt.

$25 \mu\text{s}$ bis $70 \mu\text{s}$ wären für das Schalten des MOSFETs zu langsam, da die Umschaltverluste zu hoch wären. Jedoch geht aus Kapitel 4.3.2.6 Spannungswandler hervor, dass zum Durchschalten des MOSFETs mit genügend Strom nur 4 V benötigt werden. Diese 4 V sind bereits nach nur $3 \mu\text{s}$ erreicht. Die Fallzeit von 4 V auf 0 V beträgt etwa $25 \mu\text{s}$. Die Schaltzeit beträgt demzufolge rund $30 \mu\text{s}$. Mit der Formel zur Berechnung der dynamischen Verlustleistung aus Kapitel 4.3.2.2 MOSFET für die Pulsweitenmodulation kommt bei einer Frequenz von 25 Hz und 960 W maximale Dauerleistung der Netzteile ein P_{dyn} von $0,72 \text{ W}$ zustande. Diese Verlustleistung überschreitet die Grenzen des MOSFETs nicht.

Nun wurden die Netzteile mit den MOSFETs und den Heizplatten verbunden. Abbildung 4.2 zeigt den Schaltkasten. In diesem befinden sich die Netzteile, deren Sicherungen sowie das Discovery-Board.

Nach dem Einschalten der PWM mit den verbundenen Heizplatten wurde die Temperatur am Kühlkörper der MOSFETs gemessen, welche nicht höher als $20 \text{ }^\circ\text{C}$ über Umgebungstemperatur anstieg. Es wurden keine störenden Geräusche von den Netzteilen vernommen, weshalb die PWM bei 25 Hz belassen wird. Es wurde die PWM auf 100 Prozent gestellt und die Temperatur an den Werksteinplatten gemessen. Diese erwärmten sich langsam. Folgend wird ein Test mit nur einer Werksteinplatte vorgenommen, um den Temperaturanstieg aufzuzeichnen und eine Auswertung vornehmen zu können.



Abbildung 4.2: Schaltkasten

Abbildung 4.3 zeigt eine Heizplatte nach einem Heizvorgang von 600 Sekunden. Zu Beginn des Heizvorgangs betrug die Temperatur 26,8 °C, nach dem Heizvorgang 44,4 °C bei einer durchschnittlichen Heizleistung von 340 W. Es wurde ein ΔT von 17,6 Kelvin erzielt.

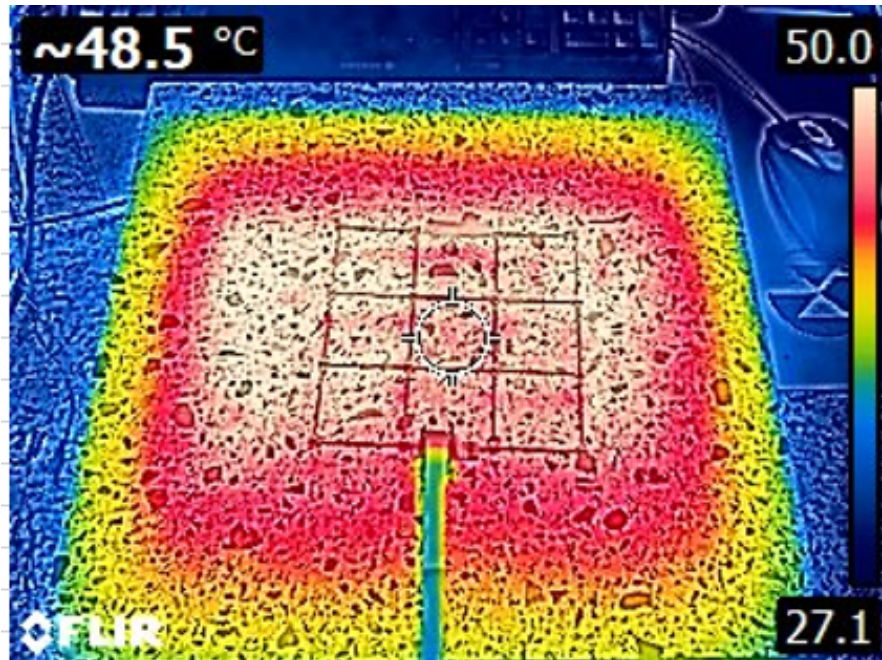


Abbildung 4.3: Wärmebild Werksteinplatte nach 600 s heizen

Abbildung 4.4 zeigt den Messverlauf der Temperatur über die Zeit. Dabei wurde die Temperatur einmal direkt an der Heizschicht (blau dargestellt) und mit mehreren Sensoren auf der Oberseite der Werksteinplatte gemessen (Durchschnittstemperatur orange, minimale Temperatur rot, maximale Temperatur grün dargestellt).

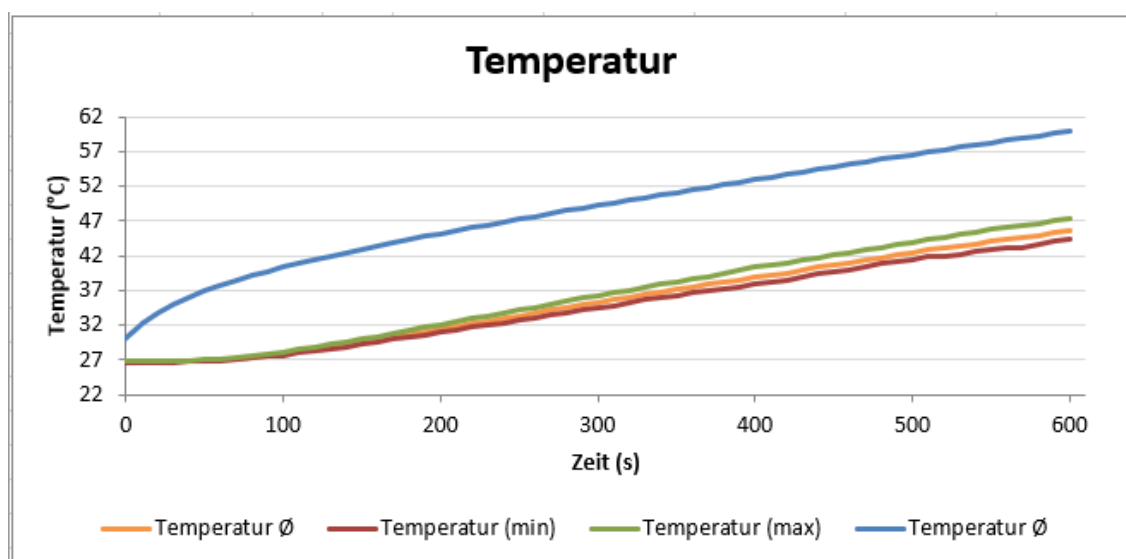


Abbildung 4.4: Temperaturverlauf - Heizvorgang Werksteinplatte

Redesign

Das in den letzten Kapiteln beschriebene System ist die aktuelle und funktionstüchtige Version. Folgende Designfehler wurden im Verlauf des Projekts behoben:

Das ursprüngliche Design war nicht galvanisch getrennt. Die Vorgabe der galvanischen Trennung kam erst später hinzu, wodurch eine Überarbeitung der Platine notwendig war. Die galvanische Trennung ist wichtig, denn sollte ein MOSFET durchbrennen, könnte der Pin des STM-Chips, der den MOSFET steuert, zerstört werden. Im Falle einer direkten Ansteuerung der MOSFETs durch die STM-Pins könnte zwar die Flankenzeit wesentlich kleiner gehalten werden als über Optokoppler, jedoch war die Spannung auf 3,3 V begrenzt. Die Spannung zur Ansteuerung der Gates der MOSFETs war also vor dem Redesign sehr knapp bemessen. Diese geringe Ansteuerspannung und die damals nicht erkannte Tatsache, dass die MOSFET-Drainsignale alle über den Kühlkörper verbunden waren, brachten die MOSFETs zum Durchbrennen.

Es gab im ersten Design keine zusätzliche externe Spannungsversorgung für das Discovery-Board. Bei einem ersten Test mit den Netzteilen wurde festgestellt, dass diese sich bei Überlast abschalten. Somit schaltete sich das Discovery-Board ab und die vorgenommenen Reglereinstellungen wurden zurückgesetzt. Eine externe Spannungsversorgung des Boards löste dieses Problem.

Weiterhin wurde die Beschaltung des Temperatursensorkontrollers überarbeitet. Die ursprüngliche Beschaltung, zu sehen in Abbildung 4.5, wurde dem Datenblatt und verwiesenen Application-Notes entnommen (D8). Mit dieser Beschaltung wurde über das softwareseitige Setzen eines Bits im Konfigurationsregister ein Pin umgeschaltet, wodurch über einen MOSFET mehr Strom auf die Datenleitung der Temperatursensoren gegeben wurde. Mit dieser Beschaltung wurden jedoch nur vier von fünf angeschlossenen Temperatursensoren erkannt. Durch eine Fehleranalyse wurde festgestellt, dass auch über den MOSFET zu wenig Strom fließt. Nun konnte entweder der Pullup-Widerstand des MOSFETs verkleinert werden oder gleich der MOSFET weggelassen und der zweite Pullup-Widerstand verkleinert werden. Da die Temperatursensoren konstant gleich viel Strom ziehen, ist es nicht notwendig, den Strom über einen zusätzlichen MOSFET zu steuern. Somit wurde der zweite Pullup-Widerstand im Redesign verkleinert.

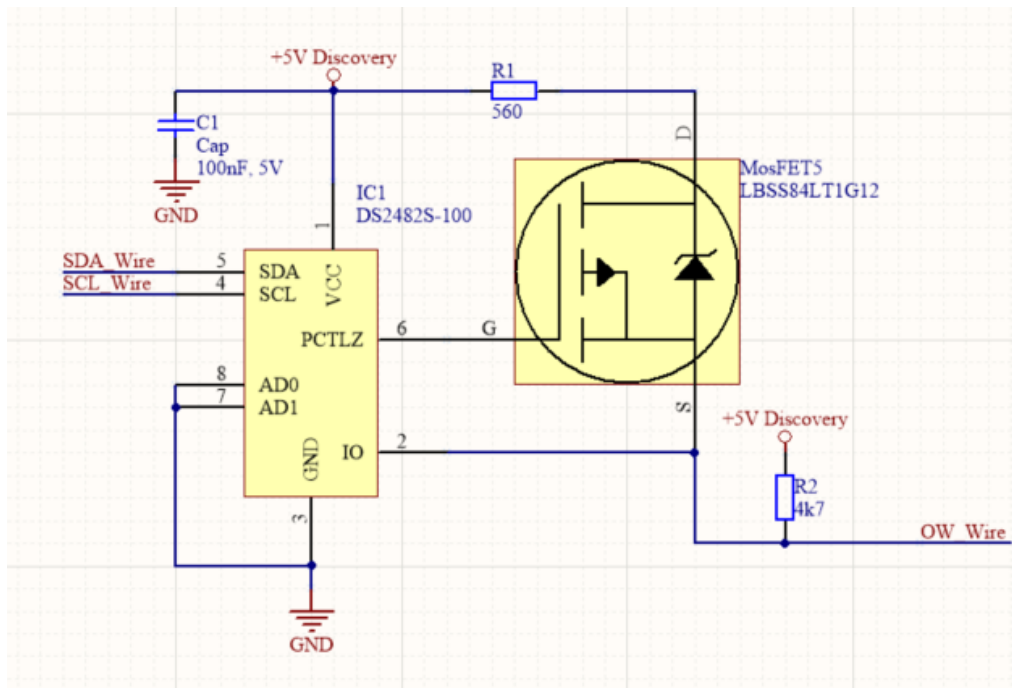


Abbildung 4.5: Beschaltung Temperatursensorkontroller

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Das in der Arbeit beschriebene System erfüllt alle im Kapitel 4.1 gestellten Anforderungen.

Das System kann mit zwei Netzteilen mit je 48 V und 20 A vier Werksteinplatten einzeln ansteuern. Die Leistungselektronik und die Informationstechnik wurden galvanisch getrennt. Die Zweipunktregelung sowie die Regelung der PWM in Prozent wurde grafisch umgesetzt.

Zusatzfunktionen wie selbstständiges Heizen bei Unterschreiten einer bestimmten Temperatur und selbstständiges Abschalten bei Überschreiten einer bestimmten Temperatur wurden erfolgreich realisiert.

Das System kann bei richtiger Dimensionierung eine große Fläche Werksteinplatten schnell erwärmen, jedoch nehmen die Netzteile und die Steuerelektronik mit einem Schaltkasten auch dementsprechend viel Platz ein. Größere Flächen benötigen bei hoher Leistungsaufnahme durch das Betreiben bei Schutzkleinspannung Zuleitungen mit entsprechend großem Querschnitt.

Das System funktioniert ohne Probleme und könnte anschließend unter wirtschaftlichen Aspekten überarbeitet werden, um es auf den Markt zu bringen.

Anhang A: Begriffsbestimmung

A.1 Mikrocontroller (B1)

Ein Mikrocontroller ist ein Halbleiterchip, welcher sowohl Prozessorkerne, Arbeits- und Programmspeicher als auch Peripheriefunktionen enthält. Er kann somit komplett ohne zusätzliche Hardwarekomponenten ein System steuern. Aus diesem Grund und auch durch die geringe Stromaufnahme sowie die komprimierte Bauform eignen sich diese Chips für eine Vielzahl von Anwendungen im IoT-Bereich und auch in nicht vernetzten Schaltungen bzw. Endgeräten.

A.2 Pulsweitenmodulation (L1)

Die Pulsweitenmodulation dient der Regelung einer technischen Größe wie Spannung. Dabei wird periodisch in einer bestimmten Zeit mit einem eingestellten Tastverhältnis die angelegte Größe in Impulse zwischen Ein und Aus zerteilt. Das Tastverhältnis legt den Mittelwert fest, welcher nach der Modulation vorhanden sein wird. Da das Ausgangssignal in Rechtecke zerlegt wird, muss hier Rücksicht auf die zeitliche Sensibilität bzw. Reaktionszeit des Anwendungsgebiets genommen werden, da die Frequenz die Auflösung bzw. Welligkeit der modellierten Größe definiert.

A.3 Graphical User Interface - GUI (L2)

Die Grafische Benutzeroberfläche ist eine virtuelle Bedienoberfläche, welche über ein Display angezeigt werden kann. Sie dient zur Dateneingabe und zur Anzeige von Informationen. Die Dateneingabe kann über ein Benutzereingabegerät, wie z.B. Maus, Tastatur oder auch Touchpad, erfolgen. Durch die Auswahl von Textfeldern und ähnlichen Bedienelementen der grafischen Oberfläche werden Funktionen im hinterlegten Programmcode ausgeführt, um damit unter anderem auch Hardware zu steuern.

A.4 MOSFET (B2)

Feldeffekttransistoren sind aktive diskrete Bauelemente und sind wegen der praktisch leistungslosen Ansteuerung und der damit verbundenen geringen Verlustleistung in fast allen modernen integrierten Schaltungen zu finden. Ist die Steuerelektrode ein Kondensator, wird das Bauteil Metal-Oxid-Silizium Field-Effect Transistor (MOSFET) genannt. Dieser Typ kommt bei integrierten Schaltungen am häufigsten zum Einsatz. MOSFETs besitzen bis zu vier Anschlüsse:

- Gate
- Drain
- Source
- Bulk

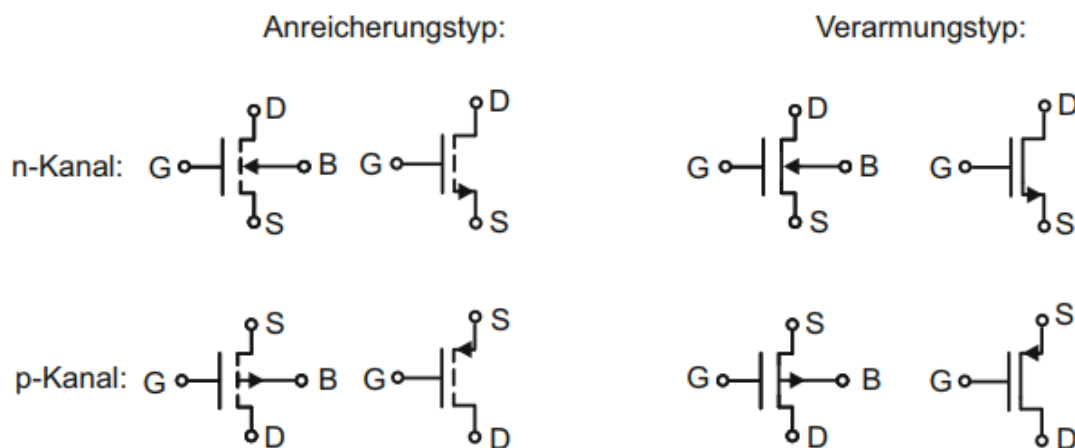


Abbildung A.1: Schaltsymbole des Feldefekttransistors

Abbildung A.1 zeigt die Schaltzeichen der MOSFET-Typen.

Das Signal Bulk könnte zur Arbeitspunkteinstellung verwendet werden, ist aber bei den meisten MOSFETs nur intern verschaltet. Von den vier Typen sind beide Varianten jeweils in der Abbildung A.1 zu sehen. Beim Anreicherungstyp, auch selbstsperrender Typ genannt, ist bei fehlender Spannung U_{GS} zwischen Gate und Source keine niederohmige Leitung zwischen Drain und Source möglich. Wird die Spannung U_{GS} angelegt, entsteht eine Verbindung zwischen Drain und Source. Der Verarmungstyp im Gegensatz ist bei fehlender Gate-Source-Spannung leitend und bei angelegter Spannung U_{GS} sperrend, die gegenteilige Funktion vom Anreicherungstyp.

Am häufigsten wird der Anreicherungstyp n-Kanal MOSFET verwendet. Im folgenden ist die Funktionsweise eines solchen Typs erläutert:

Ist keine Spannung U_{GS} angelegt, sind die beiden n-dotierten Gebiete Drain und Source nicht miteinander verbunden. Sollte U_{GS} angelegt werden, lädt sich die Gateelektrode positiv auf. Sobald U_{GS} größer als die Einsatzspannung U_{Th} wird, abhängig vom MOSFET, bildet sich unterhalb der Oxidschicht eine entsprechend negative Gegenladung. Diese Gegenladung verbindet Drain und Source, wodurch diese leitend miteinander verbunden werden. Dieser Vorgang ist in Abbildung A.2 zu sehen.

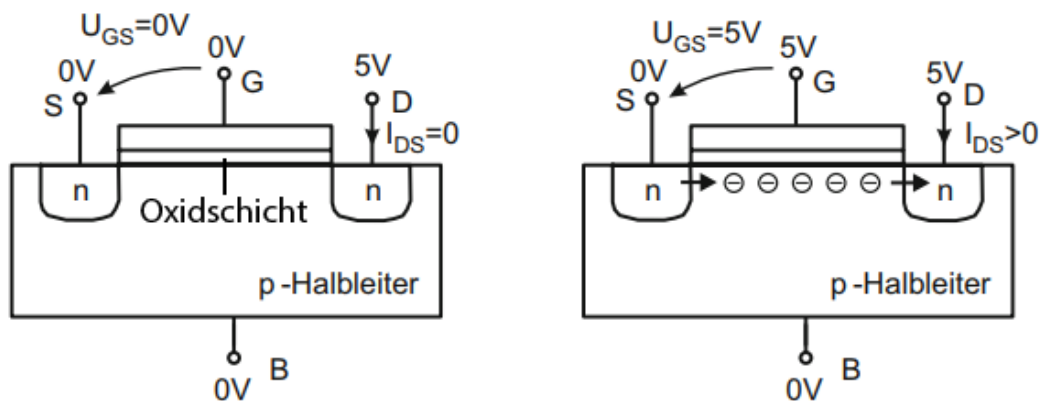


Abbildung A.2: Funktion des n-Kanal MOSFET

A.5 I²C (L3)

I²C - Inter-Integrated Circuit ist ein synchroner serieller Zweidraht-Bus, welcher bidirektionales Senden von Daten zulässt. Dieser ist für die Kommunikation zwischen ICs über kleine Distanzen geeignet. Mit einem I²C-Protokoll werden bestimmte Flankenzeiten, High- und Lowpegel über Hardwareperipherie gesendet und empfangen, um einzelne Bytes auszuwerten. Zur Kommunikation über diesen Bus wird eine Clockleitung SCL und eine Datenleitung SDA benötigt. Zusätzlich benötigen ICs, die über dieses Protokoll kommunizieren, noch eine Stromversorgung (Signale VCC und GND). Somit werden vier Leitungen für diese Kommunikationsart verwendet.

A.6 OneWire (L4)

Anders als beim I²C sind beim OneWire statt vier Leitungen nur zwei Leitungen für die Stromversorgung und die Datenübertragung notwendig. Der OneWire-Bus ist ebenfalls zur bidirektionalen Kommunikation geeignet. Beim OneWire-Protokoll ist präzise auf das Timing zu achten, da es keine gesonderte Taktleitung gibt. Das Datensignal ist gleichzeitig die Stromversorgung. Die ICs laden sich mit jedem Datensignal High auf. Beim Datensignal Low muss ein Speicher im IC die Stromversorgung übernehmen.

A.7 Betriebssystem

„Unter einem Betriebssystem versteht man nach DIN [44300] ‚diejenigen Programme eines digitalen Rechensystems, die zusammen mit den Eigenschaften der Rechenanlage die Basis der möglichen Betriebsarten des digitalen Rechensystems bilden und insbesondere die Abwicklung von Programmen steuern und überwachen‘. Infolgedessen umfasst das Betriebssystem nur die Basissoftware, die es einem Benutzer der Anlage erst ermöglicht, seine eigene (Anwendungs-)Software mehr oder weniger komfortabel ablaufen zu lassen.“(B3) Das Betriebssystem ermöglicht diese Funktionen mit Hilfe von Mitteln, welche folgend beschrieben sind (Auswahl):

- Thread - Ein Thread ist ein Prozess, welcher ausgeführt, gestoppt und pausiert werden kann. Es können mehrere Threads gleichzeitig stattfinden, und je nach vergebener Priorisierung vergibt das Betriebssystem Ressourcen zur Ausführung (L5).
- Mutexes - Durch Mutexes werden bestimmte Datenstrukturen oder auch Prozesse vor dem gleichzeitigen Zugriff durch Threads geschützt. Eine Prioritätsauswahl ermöglicht das Zugreifenlassen der Threads nacheinander, da es beim gleichzeitigen Zugriff zum Systemabsturz kommen kann (L6).
- Queues - deutsch: Warteschlangen, dienen der Kommunikation zwischen einzelnen Threads. Mit dem Prinzip FIFO (First In - First Out) werden Daten in Bytes von einem Thread zum anderen gesendet (L7).

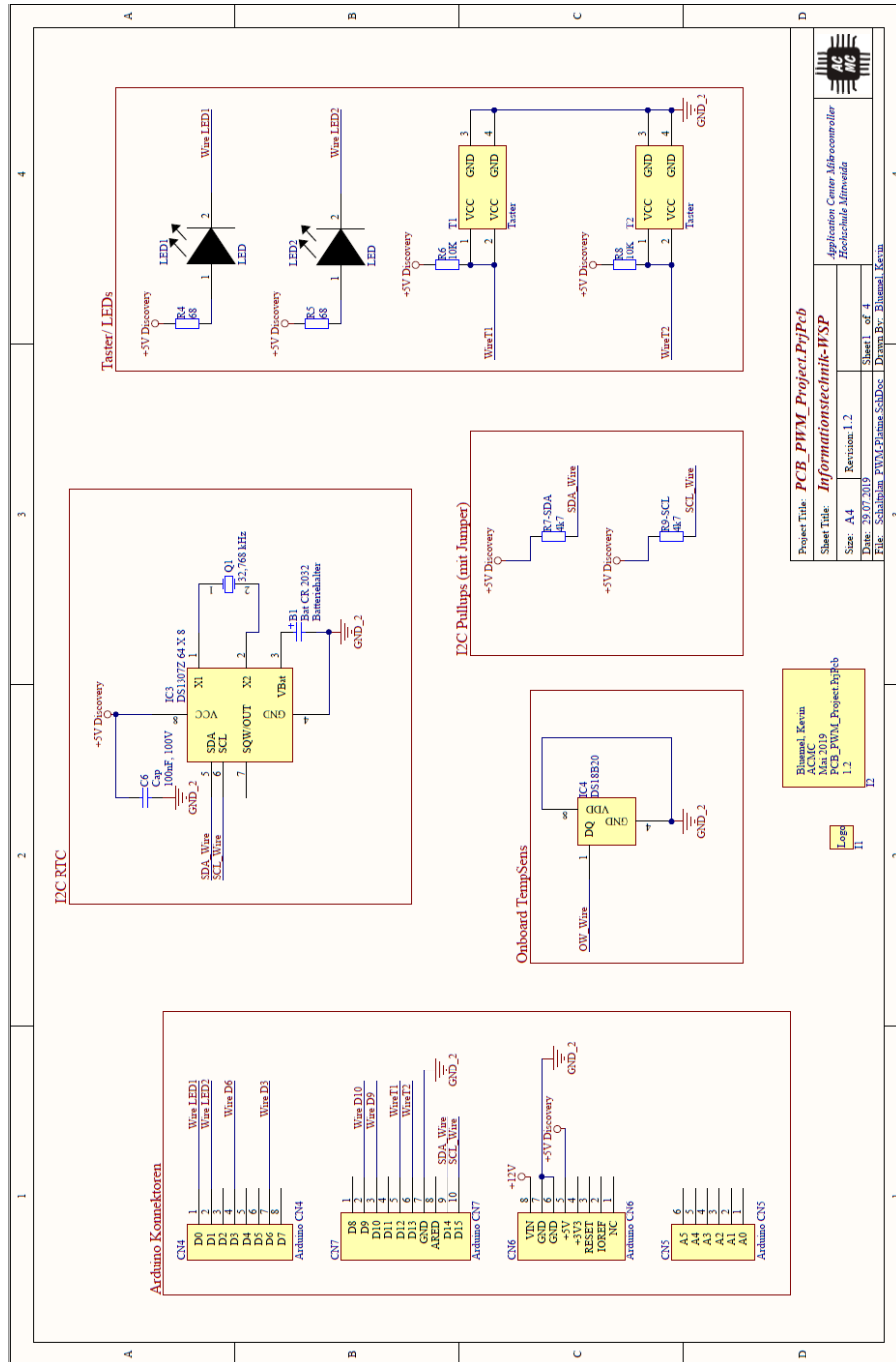
A.8 Schutzkleinspannung (L8)

Die Schutzkleinspannung ist in der Elektrotechnik eine Spannung, die die Grenzwerte für den Spannungsbereich I nach IEC 60449 nicht überschreitet und weiterhin aufgrund ihrer geringen Höhe auch ohne Isolation einen Schutz gegen einen elektrischen Schlag bietet. Diese Spannung ist kleiner 120 V DC und kleiner 50 V AC nach der DIN EN 61140.

A.9 Galvanische Trennung (L9)

Stromkreise sind galvanisch getrennt, wenn zwischen ihnen keine elektrische Leitung vorhanden ist und sie damit untereinander potentialfrei sind.

Anhang B: Schaltplan



Project Title: PCB_PHW_M_Protect_Protect
 Sheet Title: Informationstechnik-WSP

Author: Bismail Kevin
 Date: 2019/05/19
 File: Schaltung_PHW_Protect_Protect

Version: 1.2
 Sheet: 1 of 1

Rev: 1.2
 Date: 2019/05/19
 File: Schaltung_PHW_Protect_Protect

Author: Bismail Kevin

Date: 2019/05/19

File: Schaltung_PHW_Protect_Protect

Version: 1.2

Sheet: 1 of 1

Rev: 1.2

Date: 2019/05/19

File: Schaltung_PHW_Protect_Protect

Author: Bismail Kevin

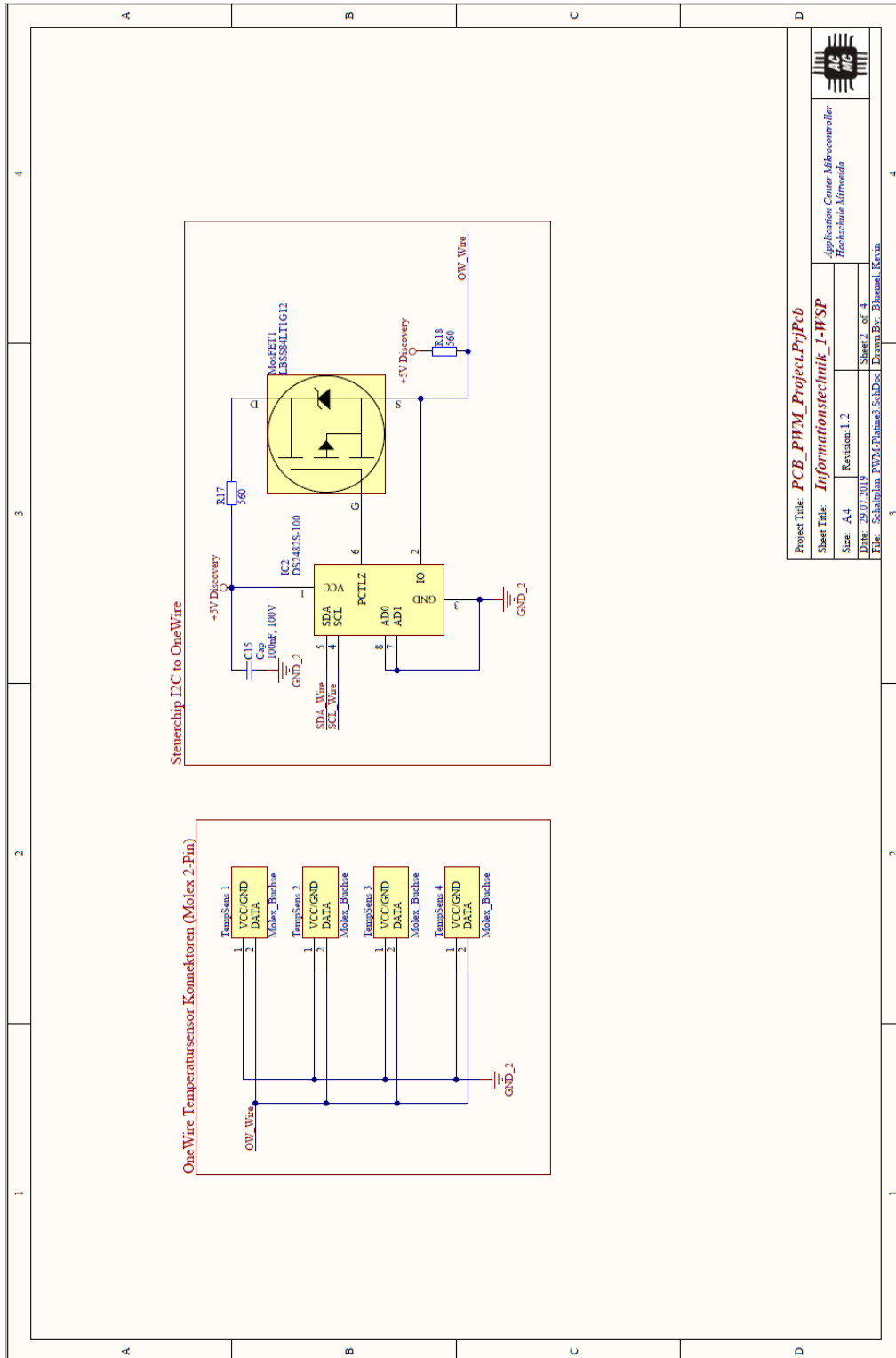
Date: 2019/05/19

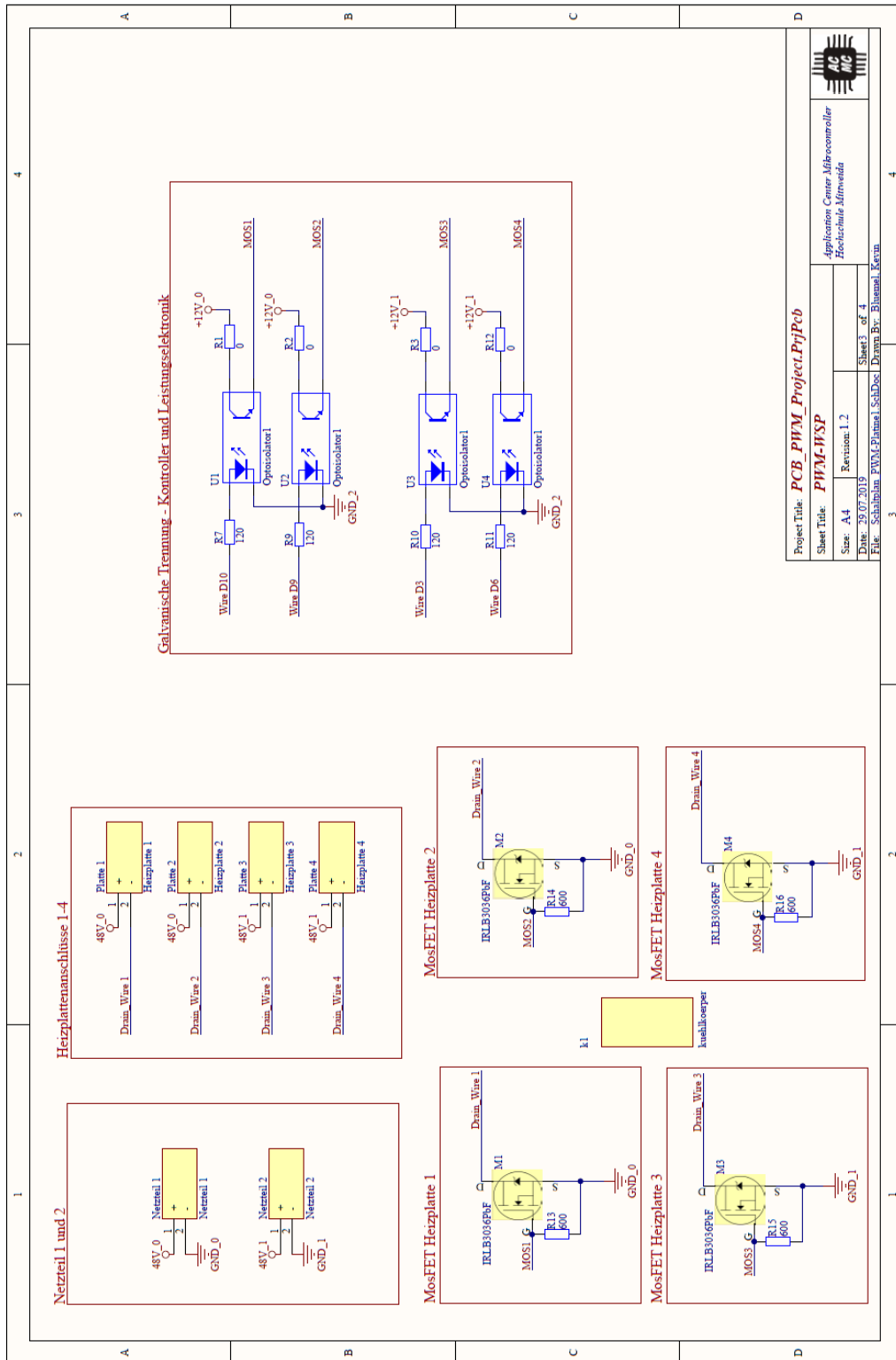
File: Schaltung_PHW_Protect_Protect

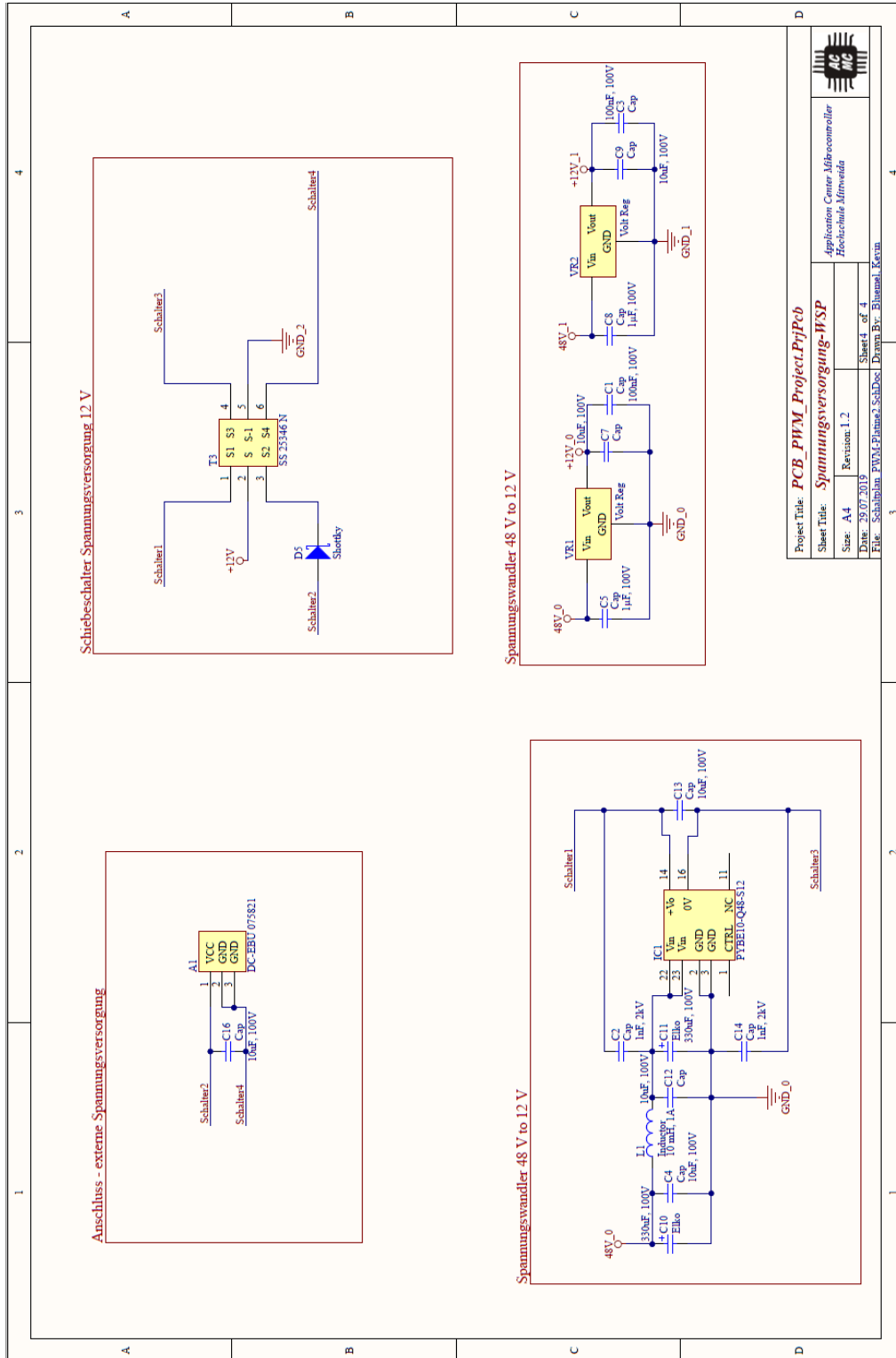
Version: 1.2

Sheet: 1 of 1

Rev: 1.2





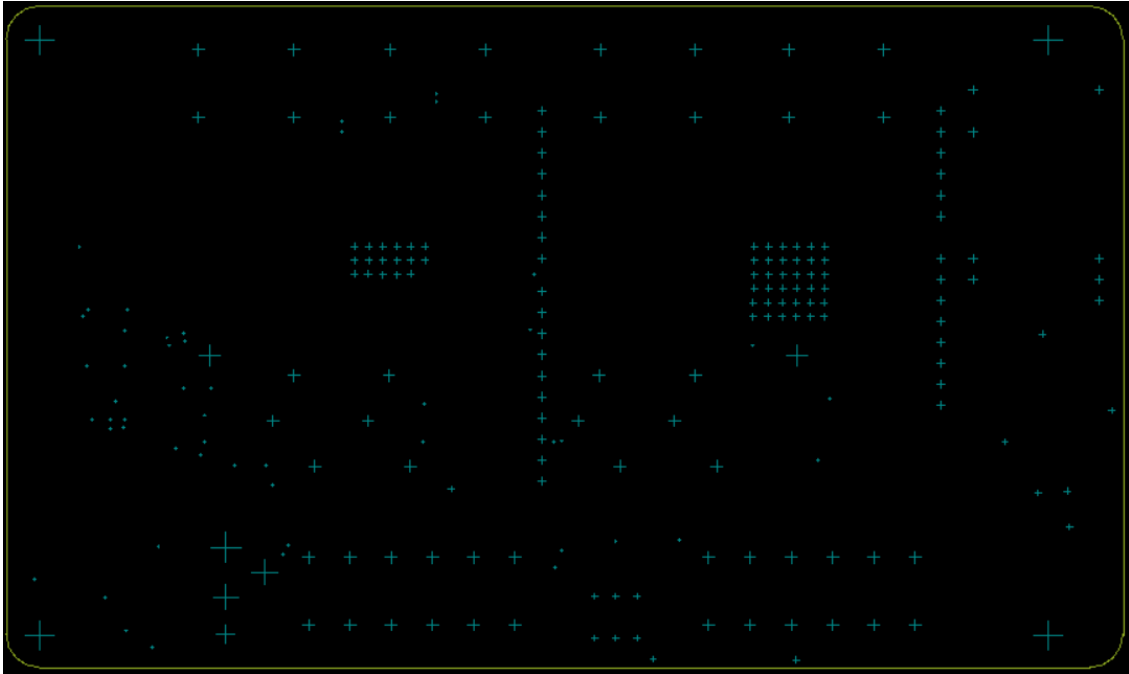


Anhang C: Bill of Materials - BOM

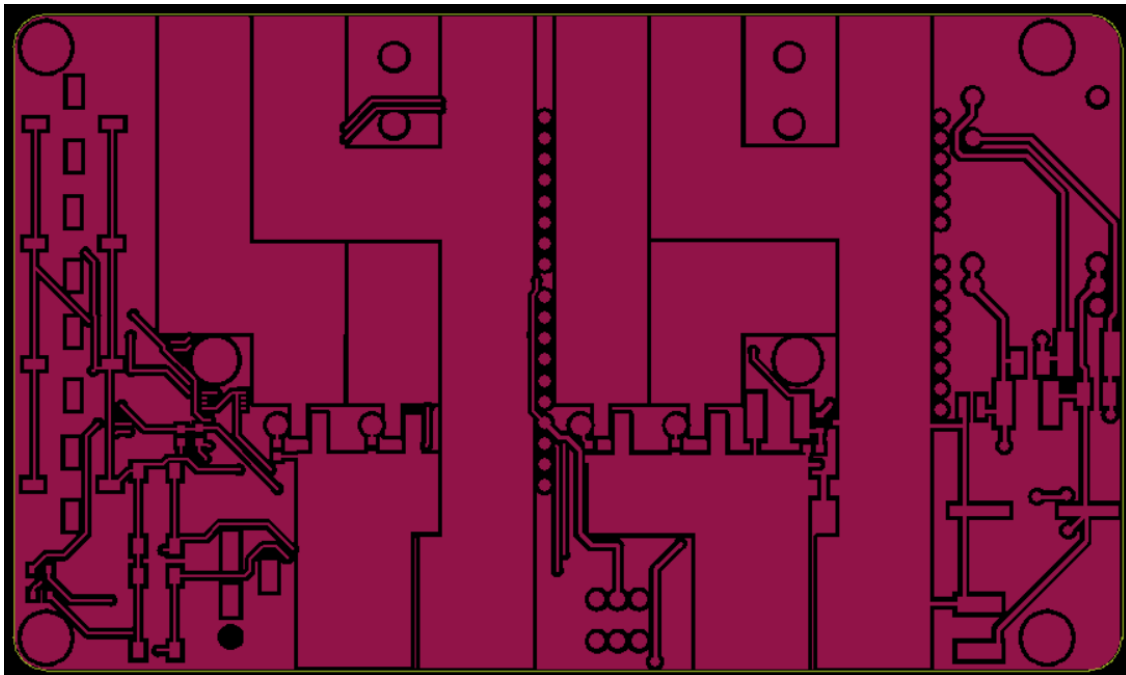
Designator	Description	Value	Manufacturer	Manufacturer Number
A1	DC-Einbaubuchse 2,0mm	DC Buchse	BKL Electronic	75821
B1	Batteryholder CR 2032	Batteriehalter	Technologies	BAT-HLD-001
C1, C3, C6, C15	Capacitor	100nF, 100V	TDK	CGA3E3X7S2A104K080AB
C2, C14	Polarized Capacitor	1nF, 2kV	KEMET	C1210X102KGRACAU0
C4, C7, C9, C12, C13, C16	Capacitor	10uF, 100V	AVX	22201C106MATZA
C5, C8	Capacitor	1uF, 100V	Taiyo Yuden	HMK316B7105KLHT
C10, C11	Polarized Capacitor	330uF, 100V	Panasonic	EEV-FK2A331M
CN4, CN5, CN6, CN7	Arduino Konnektor CN4, CN5, CN6, CN7	Stiftleisten	Samtec	HTSW-110-18-T-S
D5	Schottky Diode	100V, 2A	ROHM Semiconductor	RBR2MM608BTFTR
IC1	Spannungswandler auf 12V	DCDC Wandler 12V	CUI	PYBE10-Q48-S12
IC2	Kontroller I2C für Temperatursensoren	Temperatursensorkontroller	Maxim Integrated	DS2482S-100
IC3	Real Time Clock (RTC)	RTC	Maxim Integrated	DS1307Z-T&R
IC4	Temperatursensor OneWire	Temperatursensorkontroller	Maxim Integrated	DS18B20
k1	Kühlkörper	711 qm	Ohmite	CR401-75AE
L1	Inductor	10 mH, 1A	Bourns	SRN3015-100M
LED1, LED2	Lichtdioden	3,7V; 25mA	EVERLIGHT	65-21/GHC-YS2U1G/ZT
M1, M2, M3, M4	MosFET für PWM	60V, 270A	Infineon / IR	IRLB3036PBF
MosFET1	MosFET p-Kanal für DS2482	MosFet TempSens	Leshan Radio Company, ÖTD.	LBSS84L11
Netzteil 1, Netzteil 2	Klemmen zum Verbinden Heizplatte/ Netzteil	6-polig	WAGO	2604-1106
Platte 1, Platte 2, Platte 3, Platte 4	Klemmen zum Verbinden Heizplatte/ Netzteil	2-polig	WAGO	2604-1502
Q1	Crystal Oscillator	32,768 kHz; 12,5 pF	Citizen FineDevice	CMR200T32768DZFT
R1, R2, R3, R6, R8, R12, R13, R14, R15, R16	Resistor	0, 10K, 600	Vishay / Beyschlag	MCT06030C1002FP500
R4, R5	Resistor	68	ROHM Semiconductor	ESR03EZP1680
R7, R9, R10, R11	Resistor	120	ROHM Semiconductor	ESR03EZP1121
R7-SDA, R9-SCL, R18	Resistor	4k7, 560	ROHM Semiconductor	SFR03EZP4701
R17	Resistor	560	Vishay / Beyschlag	MCT06030C5600FP500
T1, T2	Taster	Taster	SWITCH	JTP 1138W
T3	Schiebeschalter Spannungsversorgung		APEM	SS25346N
TempSens 1 bis 4	Molex Buchse 2 Pins - OneWire	2-polig	MOLEX	43045-0218
U1, U2, U3, U4	4-Pin Phototransistor Optocoupler	Optokoppler, 3,75kV	Toshiba	TLP185(BL-TPL)SE
VR1, VR2	Voltage Regulator	DCDC Wandler 12V	Diodes Incorporated	ZXTR2112F-7

Anhang D: Gerberdaten

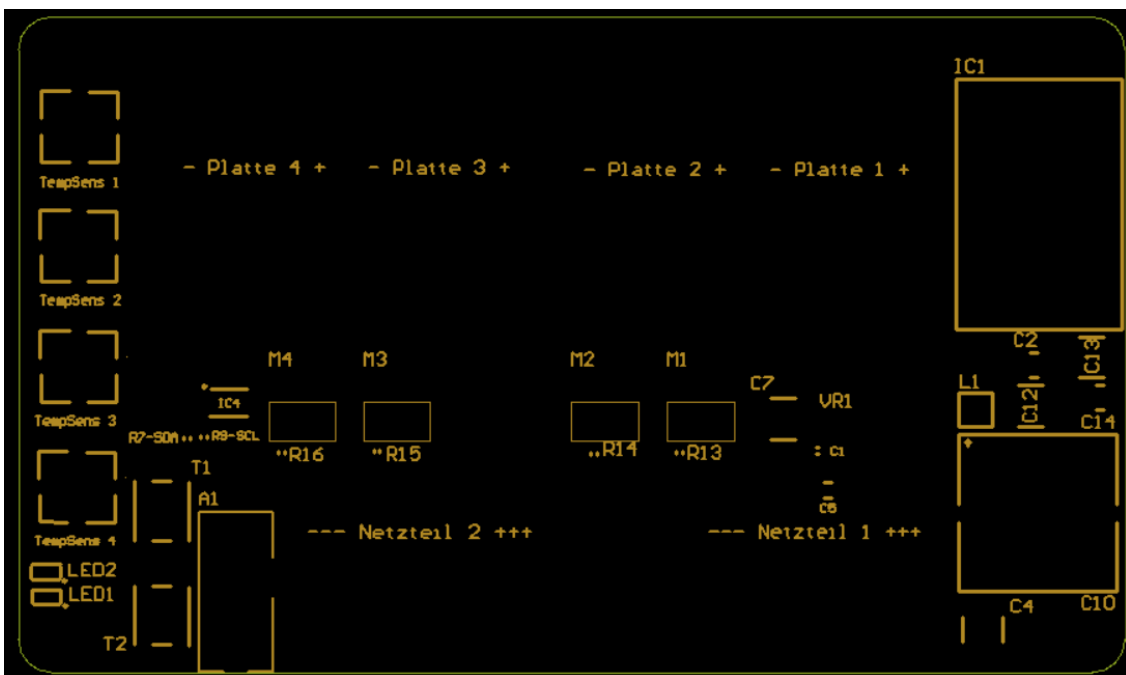
Drilldaten



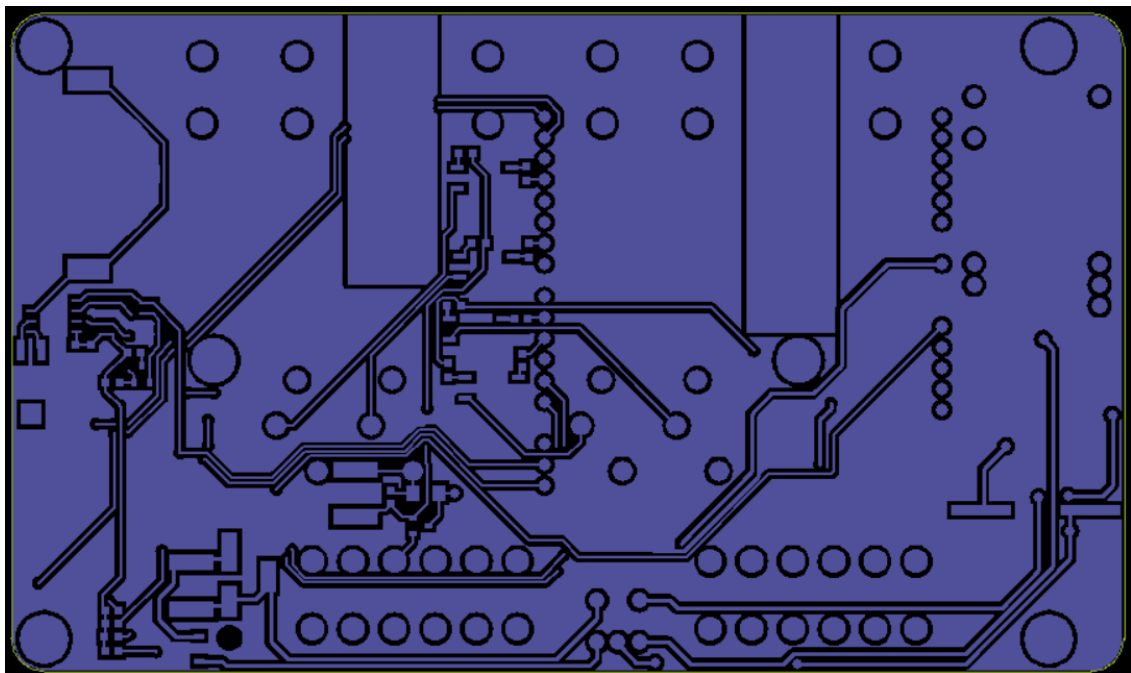
Top-Layerdaten



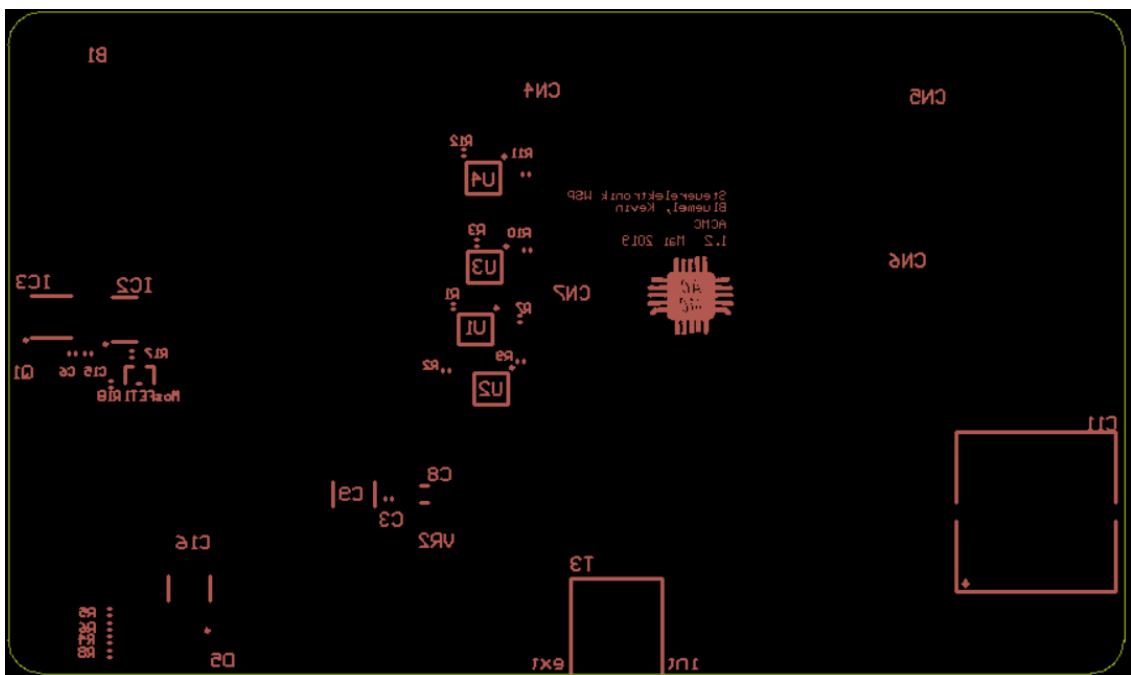
Top-Overlaydaten



Bot-Layerdaten



Bot-Overlaydaten



Literaturverzeichnis

Projekte

[ACMC] Projekt „Uhrmodul-ACMC“, ACMC

[Yuang18] Projekt „Sensorplat-ACMC“, Herr Yuang Xu, 2018

Bücher

[B1] Beierlein, Th., Hagenbruch, O.:“Microprozessortechnik“

Kapitel 1, S.19-20

3. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 2004

ISBN 3-446-22072-0

[B2] Göbel, H.:“Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik“

Kapitel 4, S.105-108

6. Auflage, Springer-Verlag, 2018

ISBN 978-3-662-56562-9

[B3] Küveler, G., Schwach, D.:“Informatik für Ingenieure und Naturwissenschaftler 1“

Kapitel 2, S.21

6. Auflage, Springer-Verlag, 2009

ISBN 978-3-8348-0460-0

Internetseiten

[L1] Patrick Schnabel:“Elektronik-Kompendium.de“

<https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0401111.htm>

Eingesehen am 07.05.2019

[L2] DATACOM Buchverlag GmbH:“ITwissen.info“

<https://www.itwissen.info/GUI-graphical-user-interface-Grafische-Benutzeroberflaeche.html>

Eingesehen am 07.05.2019

[L3] Andreas Schwarz:“mikrocontroller.net“

<https://www.mikrocontroller.net/articles/I%C2%B2C>

Eingesehen am 25.07.2019

[L4] Andreas Schwarz:“mikrocontroller.net“

https://www.mikrocontroller.net/articles/1-wire_als_Hausbus
Eingesehen am 25.07.2019

- [L5] Wikimedia Foundation Inc.:“de.wikipedia.org“
[https://de.wikipedia.org/wiki/Thread_\(Informatik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Thread_(Informatik))
Eingesehen am 25.07.2019
- [L6] Wikimedia Foundation Inc.:“de.wikipedia.org“
<https://de.wikipedia.org/wiki/Mutex>
Eingesehen am 25.07.2019
- [L7] Wikimedia Foundation Inc.:“de.wikipedia.org“
[https://de.wikipedia.org/wiki/Warteschlange_\(Datenstruktur\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Warteschlange_(Datenstruktur))
Eingesehen am 25.07.2019
- [L8] Schmidbauer Transformatoren und Gerätebau GmbH:“www.schmidbauer.net“
<https://www.schmidbauer.net/de/elektrische-schutzklassen/>
Eingesehen am 25.07.2019
- [L9] Wikimedia Foundation Inc.:“de.wikipedia.org/“
https://de.wikipedia.org/wiki/Galvanische_Trennung
Eingesehen am 25.07.2019
- [L10] Andreas Schwarz:“mikrocontroller.net“
<https://www.mikrocontroller.net/topic/175344>
Eingesehen am 07.05.2019
- [L11] Multi Leiterplatten GmbH:“Leiterbahn / Strombelastbarkeit“
<https://www.multi-circuit-boards.eu/leiterplatten-design-hilfe/oberflaeche/leiterbahn-strombelastbarkeit.html>
Eingesehen am 07.05.2019
- [L12] Andreas Schwarz:“Leiterbahnabstände“
<https://www.mikrocontroller.net/articles/Leiterbahnabst%C3%A4nde>
Eingesehen am 07.05.2019
- [L13] st.com:“FreeRTOS Kernel“
<https://www.st.com/en/embedded-software/freertos-kernel.html>
Eingesehen am 07.05.2019
- [L14] st.com:“STemWin“
<https://www.st.com/en/embedded-software/stemwin.html>
Eingesehen am 07.05.2019

- [L15] waveshare.com:“STM32CubeMX Tutorial Series: PWM“
https://www.waveshare.com/wiki/STM32CubeMX_Tutorial_Series:_PWM
Eingesehen am 07.05.2019

Datenblätter

- [D1] st.com:“UM1907 User manual“
S.14-16
https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/f0/14/c1/b9/95/6d/40/4d/DM00190424.pdf/files/DM00190424.pdf/jcr:content/translations/en.DM00190424.pdf
Eingesehen am 07.05.2019
- [D2] st.com:“UM1907 User manual“
S.22-23
https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/f0/14/c1/b9/95/6d/40/4d/DM00190424.pdf/files/DM00190424.pdf/jcr:content/translations/en.DM00190424.pdf
Eingesehen am 07.05.2019
- [D3] st.com:“STM32F745xx STM32F746xx“
S.1
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f745zg.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019
- [D4] Mean Well:“SDR-960series“
S.1
<https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=SDR-960>
Eingesehen am 07.05.2019
- [D5] Toshiba:“TLP185(SE“
S.1-4
[https://www.mouser.de/datasheet/2/408/TLP185\(SE_datasheet_en_20180105-1135118.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/408/TLP185(SE_datasheet_en_20180105-1135118.pdf)
Eingesehen am 07.05.2019
- [D6] maxim integrated tm:“DS1307 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock“
S.1
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019
- [D7] maxim integrated tm:“DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer“

<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D8] maxim integrated tm:“DS2482-100 Single-Channel 1-Wire Master“
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS2482-100.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D9] maxim integrated tm:“DS2482-100 Single-Channel 1-Wire Master“
S.15
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS2482-100.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D10] cui inc:“SERIES: PYBE10 DESCRIPTION: DC-DC CONVERTER“
S.1
<https://www.mouser.de/datasheet/2/670/pybe10-1525758.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D11] Zetex:“60V INPUT, 12V 15mA REGULATOR TRANSISTOR“
S.1
<https://www.mouser.de/datasheet/2/115/ZXTR2112F-756878.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D12] st.com:“N-CHANNEL 60V - 0.022 ohm - 35A DPAK/IPAKSTripFET POWER MOSFET“
<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ST%20Microelectronics%20PDFS/STD30NF06L.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D13] st.com:“N-channel 60 V, 0.015 ohm, 50 A STripFET II Power MOSFET in D2PAK, TO-220 and TO-220FP packages“
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp55nf06.pdf>
Eingesehen am 07.05.2019

[D14] international IOR rectifier:“HEXFET Power MOSFET“
<https://www.infineon.com/dgdl/irlb3036pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153566033ea2589>
Eingesehen am 07.05.2019

[D15] international IOR rectifier:“HEXFET Power MOSFET“
S.3
<https://www.infineon.com/dgdl/irlb3036pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153566033ea2589>
Eingesehen am 07.05.2019

[D16] Ohmite:“CR Series Heatsink with universal cam-clip“

https://www.ohmite.com/assets/docs/sink_cr.pdf?r=false

Eingesehen am 07.05.2019

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich meine Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Arbeit noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Mittweida, 01. August 2019

Kevin Blümel