



**Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg**

*University
of Applied Sciences*

Fachbereich Informatik
Department of Computer Sciences

Abschlussarbeit

Studiengang Bachelor Informatik

Entwicklung eines modularen Experimentierboards
als Prototyp-Plattform für Embedded Systems

von

Ivo Tofall

Erstprüfer
Zweitprüfer

Prof. Dr. Thomas Breuer
Prof. Dr. Michael Rademacher

eingereicht am 25.02.2024

Inhaltsverzeichnis

1. Anforderungen	3
1.1 Schnittstellen	3
1.2 Anforderungsliste	3
2. Tool- und Referenzliste	5
3. Arbeitsplan	6
4. Konzept	7
4.1 Hardware	7
4.2 Grobarchitektur	7
4.2.1 Komplettdesign	7
4.2.2 Spannungsversorgung	7
4.2.3 Sicherungskonzept	7
4.2.4 Debugger	7
4.2.5 USB Schnittstelle	8
4.2.6 Pin Konzept	8
4.2.7 Kühlungskonzept	8
5. Design	9
5.1 Hardwaredesign	9
5.1.1 Externe Spannungsversorgung zu 5V	9
5.1.2 5V zu 3.3V	13
5.1.3 USB Schnittstelle	14
5.1.4 Reset Knopf	15
5.1.5 Boot Modus	16
5.1.6 Debug Schnittstelle	16
5.1.7 Digitale Ein- und Ausgänge	17
5.1.8 PWM Ein- und Ausgänge	18
5.1.9 I2C Schnittstelle	18
5.1.10 SPI Schnittstelle	18
5.1.11 Digital Analog Wandler	18
5.1.12 Analog Digital Wandler	18
5.1.13 Spannungsverbinder	18
5.1.14 Schraubklemmenverbinder	18
5.1.15 BNC Verbinder	18
5.1.16 Mikrocontroller Spannungsversorgung	18
5.1.17 Mikrocontroller	18
5.1.18 Montageplatte	18
5.1.19 Kühlung	18
5.1.20 Montageplatte	18
5.2 Softwaredesign	18
6. Testspezifikation und -report	18

7. Evaluation	18
8. Anhänge	19
8.1 Schaltbild	19
8.2 Technische Zeichnung der Montageplatte	19

1. Anforderungen

Das Ziel dieses Projekts ist es ein Board zu entwickeln, welches es vereinfacht Schaltungen aufzubauen und zu testen. Dazu soll das Board Möglichkeiten haben SPI, I2C, PWM und GPIO extern auf einem Breadboard nutzen zu können. Auf diesem Breadboard kann man dann eine Schaltung aufbauen, welche mit dem PCB getestet werden kann. Das PCB, welches im Umfang dieser Bachelorarbeit entwickelt wird, soll dabei möglichst sicher gegen Fehlschaltungen abgesichert sein.

1.1 Schnittstellen

Anzahl	Beschreibung
1	Spannungsversorgung
1	SPI Schnittstellen
1	I2C
4	Digitale Eingänge, wobei 2 als Encoder verwendet werden können.
4	Digitale Ausgänge
4	Synchrone PWM Ausgänge
2	DAC Kanäle
4	Analoge Eingänge (Spannungsbereich 0V bis 5V)
1	Debugger Schnittstelle
4	BNC Verbinder
6	Klemmen zur zusätzlichen Übertragung von Strom und Signalen

1.2 Anforderungsliste

Daraus können wir folgende Anforderungen festsetzen:

1. Alle genannten Kommunikationsschnittstellen sollten verfügbar und nutzbar sein.
2. Das Board soll mit einem Netzteil von 7.5V bis 12V betrieben werden können oder mit einem USB-Kabel.
3. Da es ein Experimentierboard ist, sollen Kurzschlüsse auf einer aufgebauten Schaltung nicht zur Zerstörung des Boards führen.
4. Das Board soll einen USB-Anschluss zum flashen haben.
5. Bei einem Versuchsaufbau soll das Ergebnis möglichst sauber sein.
6. Die Platine darf nicht breiter als 163 mm sein.
7. Alle anwenderrelevanten Anschlüsse müssen dokumentiert und gut lesbar sein.

8. Es soll einen Knopf zum Zurücksetzen des Controllers geben.
9. Der Anwender soll Zugriff auf 3.3V, 5V und wenn ein Netzteil angeschlossen ist, Netzteilspannung haben.
10. Das Board soll LED Anzeigelampen für mindestens "3.3V", "5V" und "Spannungsversorgung vorhanden" haben.
11. Es soll einen An/Aus Hauptschalter für das ganze Board geben.
12. Das PCB soll mindestens 1A bereitstellen können. Dabei sollen sich die 1A beliebig auf die 5V und 3.3V Spannungsbereitstellung verteilen können. (Beispiel: 5V 1A oder 3.3V 1A oder 5V 0.5A und 3.3V 0.5A)
13. Das PCB darf nicht zu heiß werden können, sodass es zu Verbrennungen kommen kann. (Maximal: 45 °C)
14. Das PCB darf nicht dicker als 1.6mm sein.

2. Tool- und Referenzliste

- Aus dem Skript die tools
- pdftk_free-2.02-win-setup.exe
- pandoc-3.5-windows-x86_64.msi
- EasyEDA
- Datenblätter

3. Arbeitsplan

Der Arbeitsplan soll helfen Struktur und Ordnung in das Projekt zu bringen. Auf diesem soll außerdem der Fortschritt erkennbar sein.

- ☐ **1. Anforderungsanalyse**
 - ☒ 1.1 Besprechung der User-Needs
 - ☐ 1.2 Dokumentation der User-Needs
- ☐ **2. Architekturkonzept**
 - ☒ 2.1 Erstellung eines Hardwarekonzepts
 - ☒ 2.2 Evaluieren des Hardwarekonzepts
- ☒ **3. Entwicklung eines Blockschaltbilds**
 - ☒ 3.1 Entwicklung einer 5V Spannungsversorgung
 - ☒ 3.2 Entwicklung einer 3.3V Spannungsversorgung
 - ☒ 3.3 Entwicklung einer USB-C Schnittstelle
 - ☒ 3.4 Entwicklung eines Reset Schaltkreis
 - ☒ 3.5 Entwicklung der Klemmen
 - ☒ 3.6 Entwicklung einer SPI Schnittstelle
 - ☒ 3.7 Entwicklung einer Strom Schnittstelle
 - ☒ 3.8 Entwicklung der unteren Verbinder
 - ☒ 3.9 Entwickeln des Digital Analog Converter
 - ☒ 3.10 Entwickeln eines Debug Interfaces
 - ☒ 3.11 Entwicklung der BNC Verbinder
 - ☒ 3.12 Entwicklung des Boot Headers
 - ☒ 3.13 Entwicklung eines Analog Konverters
 - ☒ 3.14 Verbindung vom Controller zu den Headern
 - ☒ 3.15 Verbindung vom Controller mit der Spannungsversorgung
- ☐ **4. Entwicklung einer Software und einer Testliste**
- ☐ **5. Bestückung und Integration**
- ☐ **6. Testing**
- ☐ **7. Evaluation**

4. Konzept

4.1 Hardware

Das Ziel ist möglichst unkompliziert das Board bestellen zu können. Dafür

- Häufig benutzte Teile die weit verfügbar sind nutzen, damit man nach 20 Jahren noch Teile bekommen
- Teile nutzen, welche von JLCPCB auch platziert werden, damit man das Board auch fertig bestellen kann.

4.2 Grobarchitektur

4.2.1 Komplettdesign

Das finale Komplettsystem soll aus dem PCB-Board und ein bis zwei Breadboards bestehen, welche es ermöglichen, eine Schaltung aufzubauen. Beide sollen auf einer Montageplatte fest verbunden werden, um ein vollfunktionsfähiges Endprodukt zu erhalten.

4.2.2 Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung sowie die Sicherungen sind im linken Bereich des Boards vorgesehen, um eine klare Trennung der Stromversorgung von den übrigen Komponenten zu gewährleisten. Im rechten Bereich des Boards befinden sich hingegen die I/O-Schnittstellen und weitere Peripherie.

4.2.3 Sicherungskonzept

Um das Board möglichst zuverlässig vor zu hohen Stromstärken und Kurzschlüssen zu schützen, sollte man ein durchdachtes Sicherungskonzept erstellen. Die Sicherung sollten dementsprechend nahe der Spannungsversorgung positioniert werden, welche am linken Teil des Board entstehen soll. Für die Art der Sicherung sollte man Sicherungen nehmen, welche schon lange existieren, weit verbreitet sind und welche ebenfalls noch nach sehr langer Zeit problemlos beschaffbar werden kann. Aus diesem Grund fiel die Wahl auf Mini-Autosicherungen, die sich seit Jahren bewährt haben und auch in Zukunft leicht erhältlich sein werden.

Zusätzlich soll ein Überspannungsschutz existieren, der mithilfe einer TVS-Diode oder ähnlichen Bauteilen umgesetzt werden kann. Dieser soll das Board und die Schaltung vor Spannungsspitzen und Überspannung schützen, indem sie überschüssige Spannung ableitet.

4.2.4 Debugger

Für das Board ist kein On-Board-Debugging vorgesehen. Das Design soll möglichst schlank sein und sich auf die wesentlichen Funktionen fokussieren.

Zum Debuggen soll es jedoch die Möglichkeit geben, über einen Pin-Header einen externen Debugger anzuschließen.

4.2.5 USB Schnittstelle

Da USB-C seit Dezember 2024 als Standard-Ladekabel für elektronische Kleingeräte vorgeschrieben ist, wird das Board selbstverständlich zeitgemäß mit einer USB-C-Buchse ausgestattet. Diese versorgt das Board mit 5V bei bis zu 2A. Zusätzlich wird ein Spannungswandler integriert, um mit den 5V auch 3,3 V bereitzustellen. Der USB-C-Anschluss dient außerdem zum Flashen von Software auf den Mikrocontroller. Debugging über diesen Port ist jedoch nicht vorgesehen, da das Konzept kein On-Board-Debugging vorsieht.

4.2.6 Pin Konzept

Das Ziel des Boards ist es, Schaltungen auf einem Breadboard aufzubauen und testen zu können. Daher werden alle Schnittstellen am unteren Bereich des Boards angeordnet. Dies gewährleistet einen möglichst kurzen und sauberen Weg für die Verbindung zu den Schaltungen. Zusätzlich sollen an diesem Bereich sämtliche Spannungen zur Verfügung stehen, um komplexe Schaltungen realisieren zu können.

Die digitalen Ein- und Ausgänge sowie die PWM-Pins, der Digital-Analog-Wandler (DAC), die Analog-Digital Wandler (ADC) und die Schnittstellen für I2C und SPI sollen abgesichert werden, um den Mikrocontroller vor Schäden durch zu hohe Ströme zu schützen. Hierbei wird eine Strombegrenzung auf 20mA vorgesehen, um das Board selber und die angeschlossenen Peripheriegeräte nicht zu beschädigen.

4.2.7 Kühlungskonzept

Bei den Spannungswandlern, welche bis zu 2A ausgelegt sind, wird selbstverständlich eine Kühlung benötigt, um die erzeugte Wärme von der Komponente abzuleiten. Die Kühlung sollten nicht abhängig von externen Kühlkörpern sein, sondern das Board soll sich durch sein Design selbst kühlen. Dies kann man durch offen gelegte Kupferflächen und Durchkontaktierungen erreichen, welche unter den Wärme erzeugenden Komponente platziert werden, um die Wärme abzuleiten. Obwohl die Kühlfläche für die Komponenten ausgelegt sind, kann zusätzlich noch ein weiterer Kühlkörper benutzt werden, um eine noch bessere Kühlung zu erreichen.

5. Design

5.1 Hardware design

5.1.1 Externe Spannungsversorgung zu 5V

Das Board soll über eine externe Spannungsversorgung versorgt werden können. Dafür gibt es einen DC Stromstecker auf dem Board, welcher einen Außendurchmesser von 6mm hat und einen Innendurchmesser von 2mm (U11 im Blockschaltbild).

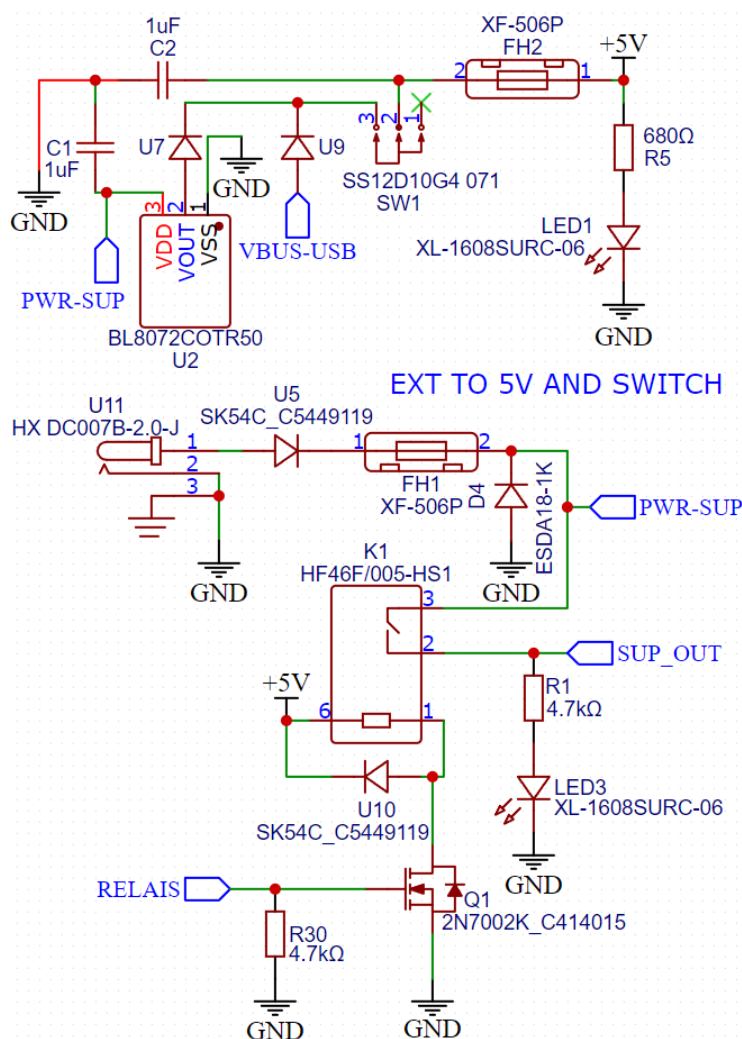


Figure 1: Blockschaltbild externe Spannungsversorgung zu 5V

Um gegen falsche Polarität zu schützen, ist hinter dem Stromanschluss direkt eine Diode verbaut, welche nur in die richtige Richtung Spannung durchlässt. Daher ist der Stromkreis nur bei richtiger Polarität geschlossen. Als zweiter Sicherheitsmechanismus wird gegen Überstrom eine Sicherung benutzt, welche auch aus dem Automobilbereich bekannt ist. Das Board ist auf maximal 2A ausgelegt, daher sollte auf dem Steckplatz F1 maximal eine Sicherung mit der Größe 2A verbaut werden. Als dritten und letzten Sicherheitsmechanismus in diesem Blockschaltbild ist ein Überspannungsschutz (D4) verbaut. Dieser öffnet, sobald die maximale Spannung von 18V überschritten wird, und leitet die Überspannung zu Ground ab, damit keine Komponenten beschädigt werden, falls eine zu hohe Spannung angelegt wird.

Eine weitere wichtige Komponente ist das Relais (K1), welches bei Unterbrechung der Spannungsversorgung zum Mikrocontroller – sei es durch Ausschalten des Schalters (SW1), Durchbrennen einer Sicherung (FH1 oder FH2) oder indem per Software der Relay-Pin auf Low gestellt wird – die externe Spannungsversorgung zum unteren Kontakt ausschaltet. Der Zweck des Schalters besteht darin, die komplette Spannungsversorgung zum Steckboard zu unterbrechen, sodass aufgebaute Schaltungen ohne Risiko, einen Kurzschluss zu erzeugen, aufgebaut oder abgeändert werden können.

Die Steuerung des Relais über den Relay-Pin erfolgt über einen MOSFET, der je nach Signal den Stromkreis schließen oder geöffnet lassen kann. Das Relais ist am Mikrocontroller an Port PD2 angeschlossen, und damit keine Fehlströme das Relais aus Versehen einschalten, ist auf der Leitung zum Mikrocontroller ein Pull-Down-Widerstand (R30) verbaut. Da das Relais über eine Spule verfügt, müssen mögliche Spannungsspitzen mit der Diode U10 abgeleitet werden, um andere Komponenten, wie zum Beispiel den Mikrocontroller, zu schützen.

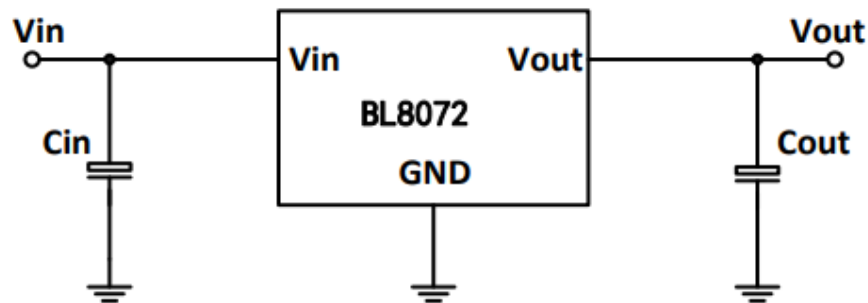


Figure 2: Typische Anwendung aus dem Datenblatt des BL8072COTR50

Aus dem Datenblatt können wir eine empfohlene Schaltung für den Spannungswandler entnehmen. Diese besteht aus zwei Keramikkondensatoren der Größe 1µF und kann im oberen Blockschaltbild mit den Kondensatoren C1

und C2 wiedergefunden werden. Der BL8072COTR50 kann unter bestimmten Voraussetzungen eine maximale Stromstärke von 2A bereitstellen, welche genau den benötigten Leistungsanforderungen für das Board entspricht. Des Weiteren wird nach der Spannungsumwandlung wieder eine Sicherung verbaut, welche im Blockschaltbild unter FH2 zu finden ist.

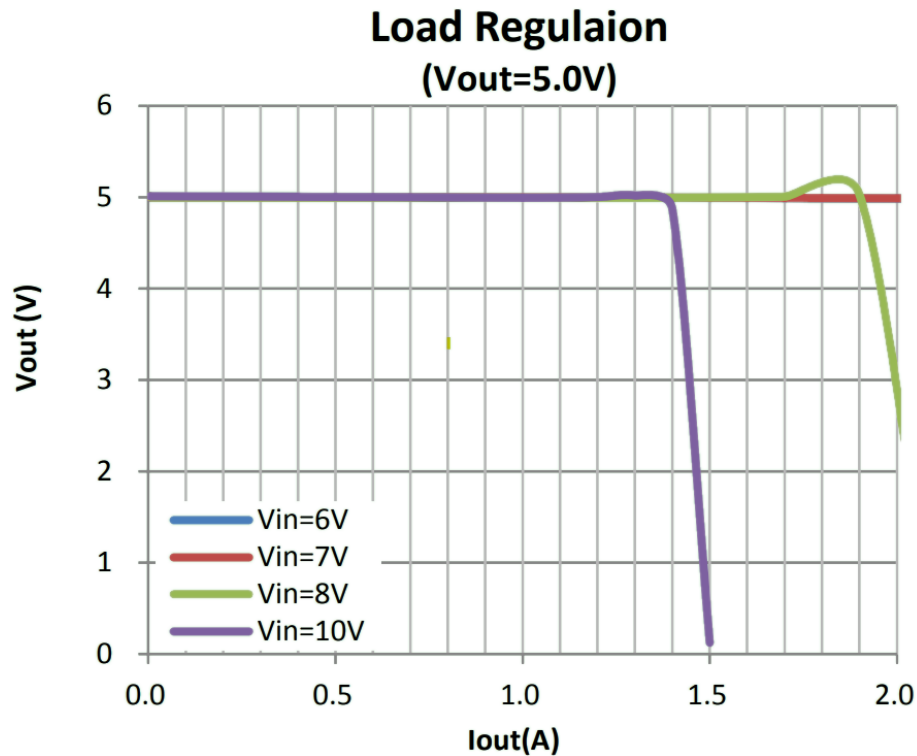


Figure 3: Lastregulierung des BL8072COTR50

Wie man aus dem Datenblatt erkennen kann, kann der Spannungswandler nur 2A liefern, solange V_{in} zwischen 6V und 7V liegt. Alle Spannungen über 7V führen zu einer geringeren Stromstärke, die bis auf 1.5A Ausgangsleistung abfällt. Um das komplette Potenzial zu nutzen, wird daher eine Spannung von 6V empfohlen.

Um auch Strom vom USB-Port erhalten zu können, speist die USB-Buchse über das Netz VBUS-USB Strom hinter den 5-V-Spannungswandler ein. Damit kein Strom zurück zum über USB angeschlossenen Gerät fließt, ist die Diode U9 verbaut. Gleiches gilt für den Spannungswandler, der nicht über den Output mit Strom versorgt werden soll, wenn nur ein USB-Gerät angeschlossen ist, ohne ein Netzteil. Daher ist die Diode U7 vorhanden.

Hinter dieser Sicherung befindet sich eine LED, welche leuchtet, solange 5V verfügbar sind. Die Größe des Vorwiderstands kann mithilfe des Ohm'schen

Gesetzes berechnet werden, wobei die LED laut Datenblatt eine Forward Voltage (VF) von 2.3V hat und mit 3–5mA Strom leuchten soll.

$$R = \frac{V_{in} - V_F}{I_{LED}} \text{ wobei } V_{in} = 5V, V_F = 2.3V \text{ und } I_{LED} = 3mA \text{ bis } 5mA$$

$$\text{Für } 3mA \text{ Strom: } R = \frac{5V - 2.3V}{3mA} = 900\Omega$$

$$\text{Für } 5mA \text{ Strom: } R = \frac{5V - 2.3V}{5mA} = 540\Omega$$

Daher wurde der Widerstand R5 mit der Größe 680Ω gewählt. Für das Netzteil, welches angeschlossen werden kann, ist ebenfalls eine LED (LED3) im Blockschaltbild erkennbar. Diese leuchtet ebenfalls, solange ein Netzteil mit 6–18V angeschlossen ist. Der Vorwiderstand R1 lässt sich ähnlich berechnen. Bei dieser Berechnung gehen wir von der Maximalspannung von 18V aus.

$$R = \frac{V_{in} - V_F}{I_{LED}} \text{ wobei } V_{in} = 18V, V_F = 2.3V \text{ und } I_{LED} = 5mA$$

$$\text{Für } 3mA \text{ Strom: } R = \frac{18V - 2.3V}{3mA} \approx 5233\Omega$$

$$\text{Für } 5mA \text{ Strom: } R = \frac{18V - 2.3V}{5mA} \approx 3130\Omega$$

Das heißt, es wird ein Vorwiderstand zwischen 3,1kΩ und 5,2kΩ benötigt. In diesem Bereich liegt die Standardgröße 4,7kΩ, weshalb diese dann bei R1 benutzt wurde.

5.1.2 5V zu 3.3V

Neben der 5V Spannungsversorgung wird ebenfalls für den Mikrocontroller und externe Bauteile auf dem Steckboard eine 3.3V Spannungsversorgung benötigt.

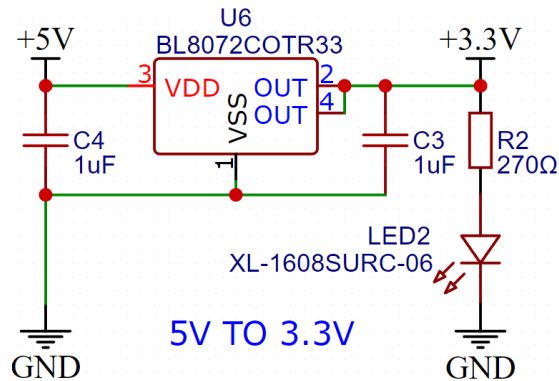


Figure 4: Blockschaltbild 5V zu 3.3V

Der BL8072COTR33 hat genauso wie der 5V-Spannungswandler eine maximale Stromstärke von 2A und kann, solange der erste Spannungswandler 2A liefern kann, diese ebenfalls liefern. Dazu bietet er dieselbe empfohlene Schaltung mit zwei Keramikkondensatoren (C3 und C4) der Größe 1μF wie beim BL8072COTR50.

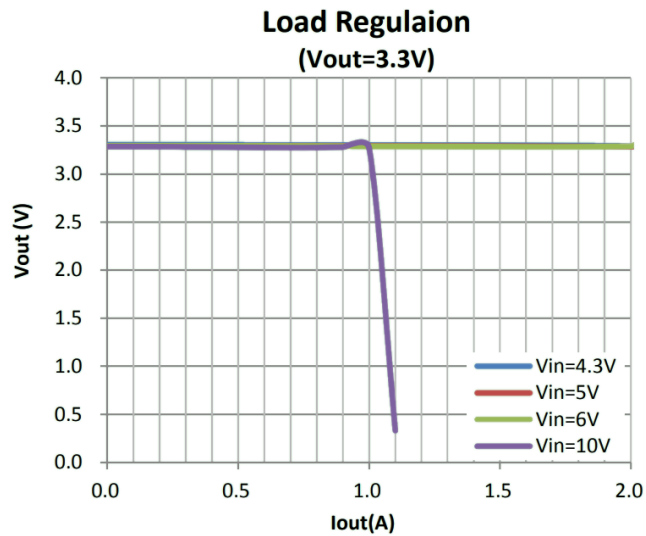


Figure 5: Lastregulierung des BL8072COTR33

Zusätzlich lässt sich wieder eine LED (LED2) finden, welche leuchtet solange eine 3.3V Spannung verfügbar ist. Die Wahl des Vorwiderstands entstand auf folgender Grundlage.

$$R = \frac{V_{in} - V_F}{I_{LED}} \text{ wobei } V_{in} = 3.3V, V_F = 2.3V \text{ und } I_{LED} = 3mA \text{ bis } 5mA$$

$$\text{Für } 3mA \text{ Strom: } R = \frac{3.3V - 2.3V}{3mA} = 333\Omega$$

$$\text{Für } 5mA \text{ Strom: } R = \frac{3.3V - 2.3V}{5mA} = 200\Omega$$

Somit wurde der ungefähre Mittelwert 270Ω genommen.

5.1.3 USB Schnittstelle

Die USB-Schnittstelle ist im Grundsatz nur eine Buchse, welche laut Datenblatt auf 3A ausgelegt ist. Diese Stromstärke können wir über USB-C erreichen, indem CC1 und CC2 mit einem $5,1k\Omega$ Pull-Down-Widerstand verbunden werden. Durch diese Umsetzung ist es möglich, das gesamte Potenzial des Boards ohne ein externes Netzteil zu verwenden. Wie schon vorher erwähnt, werden die 5V über das Netz VBUS-USB hinter dem 5V-Spannungswandler eingespeist.

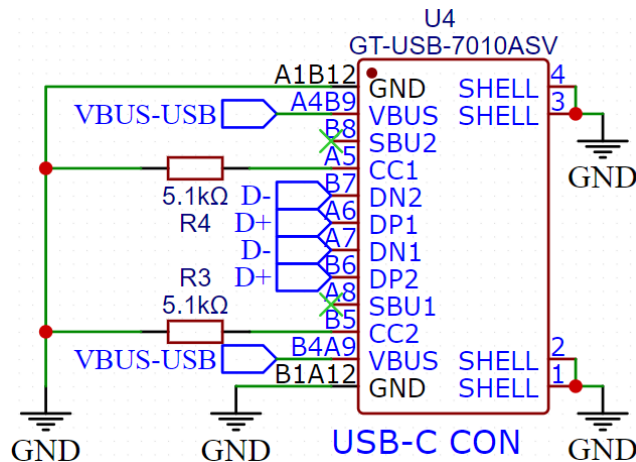


Figure 6: Blockschaltbild USB-C Buchse

Die Datenanschlüsse DN1 und DN2 sowie DP1 und DP2 werden direkt mit dem Mikrocontroller verbunden, um über diesen Port eine Software auf das Board zu laden.

5.1.4 Reset Knopf

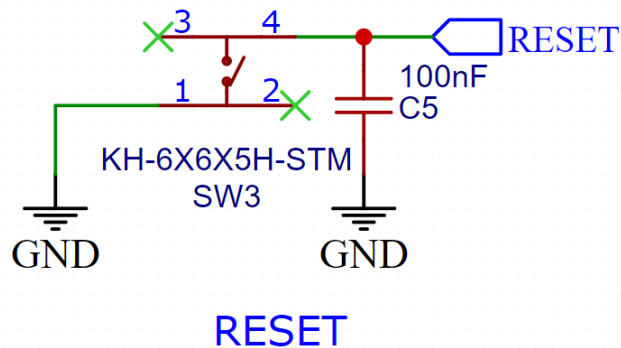
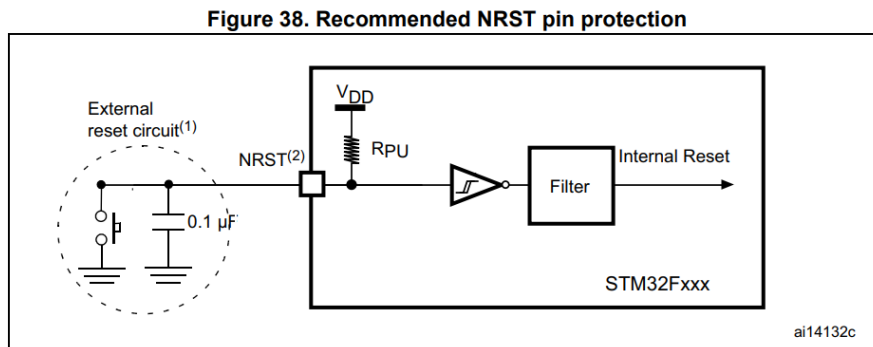


Figure 7: Blockschaltbild Reset Schaltung

Die Reset-Schaltung wurde nach der empfohlenen Schaltung aus dem Datenblatt des Mikrocontrollers gebaut.



1. The reset network protects the device against parasitic resets.
2. The user must ensure that the level on the NRST pin can go below the $V_{IL(NRST)}$ max level specified in [Table 50](#). Otherwise the reset is not taken into account by the device.

Figure 8: Empfohlene Schaltung aus dem Datenblatt

Diese hat zwei Anforderungen, die erfüllt werden müssen. Einmal sieht die Schaltung vor, dass die Verbindung gegen ungewollte Signale geschützt werden muss, was wir durch den Einsatz eines Kondensators (C5) erreichen. Des Weiteren muss beim Betätigen des Knopfes die Spannung laut Datenblatt am Reset-Pin unter 0.3V fallen, was durch eine direkte Masseverbindung erreicht werden kann.

5.1.5 Boot Modus

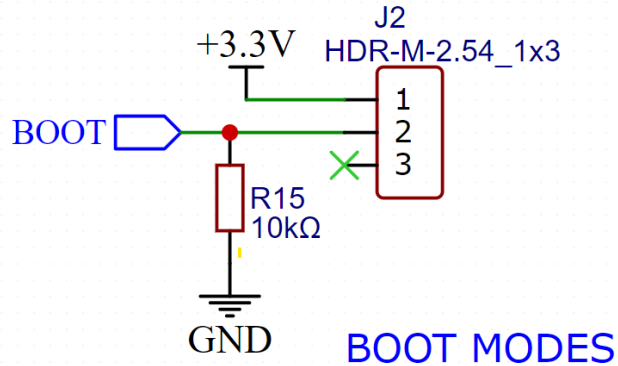


Figure 9: Blockschaltbild Boot Modes

Wie in dem Schaubild erkennbar ist, ist Boot0 über einen 10kΩ Pull-Down-Widerstand mit Ground verbunden. So ist, solange kein Jumper gesetzt ist, Boot0 low und der Mikrocontroller startet vom Haupt-Flash-Speicher. Wenn man allerdings den Jumper setzt, wird Boot0 hochgezogen, was zur Folge hat, dass der Mikrocontroller vom Systemspeicher aus startet. Dieser Modus wird verwendet, um vom USB-Port aus flashen zu können.

5.1.6 Debug Schnittstelle

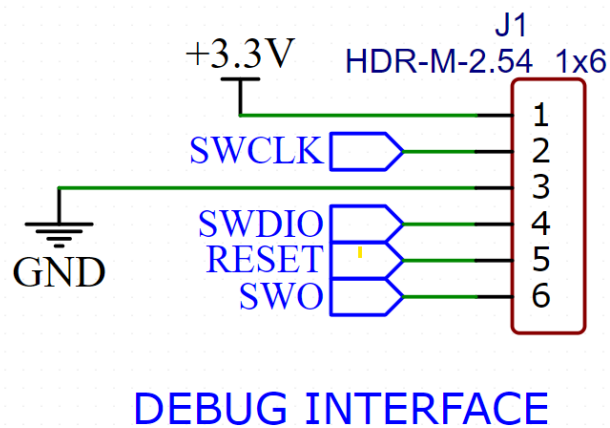


Figure 10: Blockschaltbild Debug Schnittstelle

Der Debugger wurde nach einem von der Hochschule vorgegebenen Pinout entworfen. Die Hochschule hat einen Segger J-Link mit einem PCB-Adapter für

genau das entworfene Pinout. Ebenfalls sind dies alle nötigen Pins, um auch schnell und einfach über einen anderen Mikrocontroller debuggen zu können.

5.1.7 Digitale Ein- und Ausgänge

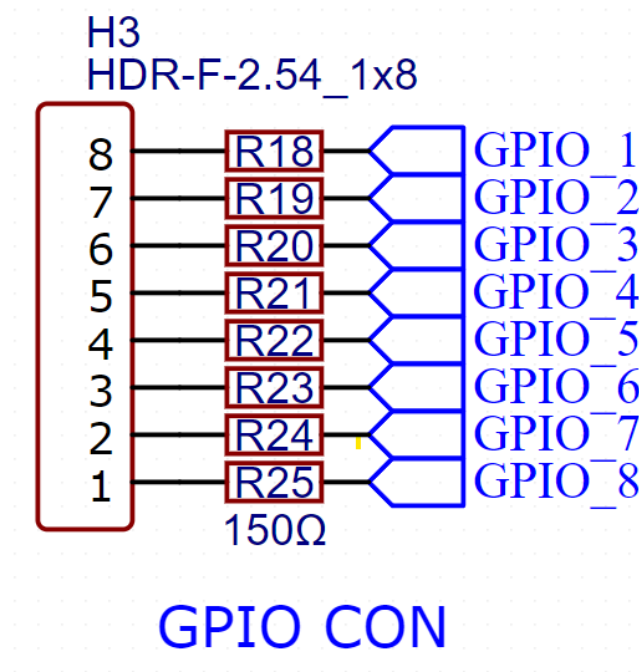


Figure 11: Blockschaltbild digitale Ein- und Ausgänge

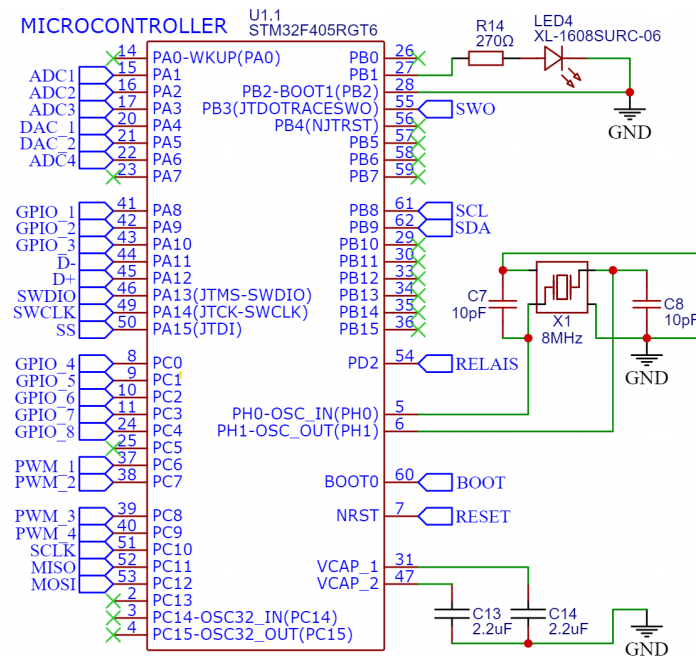


Figure 12: Blockschaltbild Debug Schnittstelle

5.1.8 PWM Ein- und Ausgänge

5.1.9 I2C Schnittstelle

5.1.10 SPI Schnittstelle

5.1.11 Digital Analog Wandler

5.1.12 Analog Digital Wandler

5.1.13 Spannungsverbinder

5.1.14 Schraubklemmenverbinder

5.1.15 BNC Verbinder

5.1.16 Mikrocontroller Spannungsversorgung

5.1.17 Mikrocontroller

5.1.18 Montageplatte

5.1.19 Kühlung

5.1.20 Montageplatte

5.2 Softwaredesign

6. Testspezifikation und -report

7. Evaluation

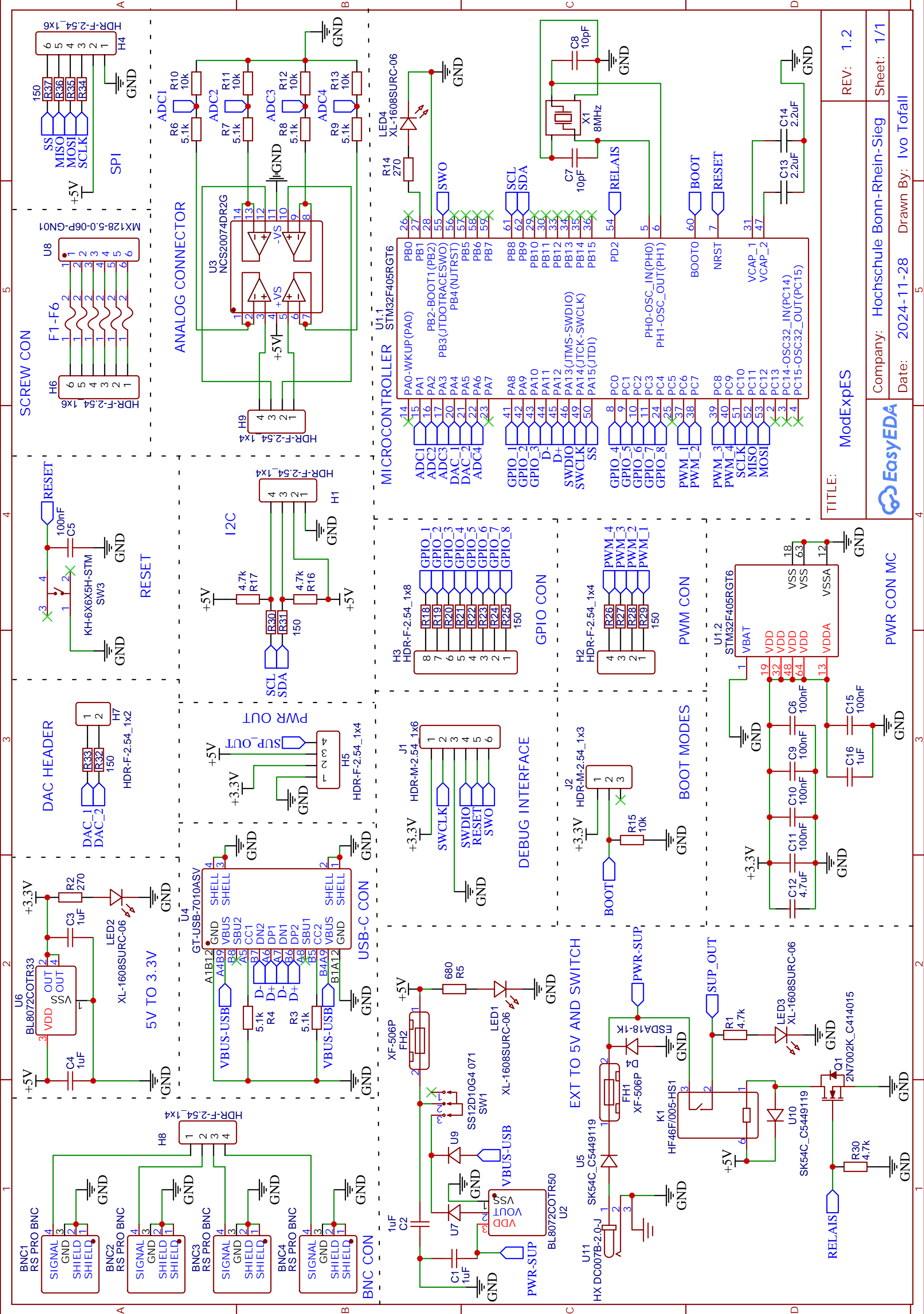
Pin	Beschreibung	Pin	Beschreibung
PA1	ADC1	PC3	GPIO7
PA2	ADC2	PC4	GPIO8
PA3	ADC3	PC6	PWM1
PA4	DAC1	PC7	PWM2
PA5	DAC2	PC8	PWM3
PA6	ADC4	PC9	PWM4
PA8	GPIO1	PC10	SCLK
PA9	GPIO2	PC11	MISO
PA10	GPIO3	PC12	MOSI
PA11	D-	PB1	LED4
PA12	D+	PB3	SWO
PA13	SWDIO	PB8	SCL
PA14	SWCLK	PB9	SDA
PA15	SS	PD2	RELAI
PC0	GPIO4	PH0	8MHz Clock
PC1	GPIO5	PH1	8MHz Clock
PC2	GPIO6	BOOT0	BOOT
NRST	RESET		

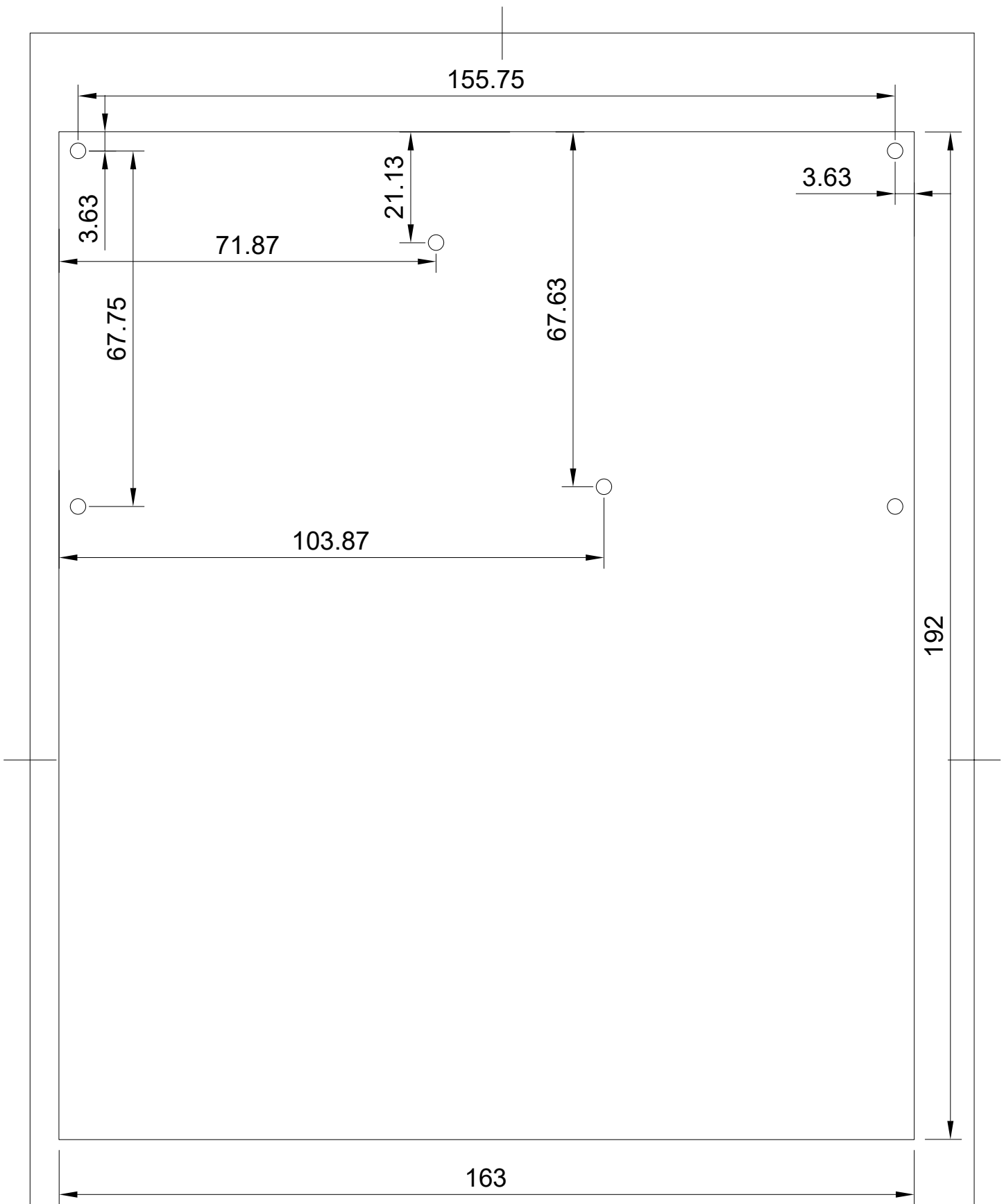
Table 2: Pinout ModExpES

8. Anhänge

8.1 Schaltbild

8.2 Technische Zeichnung der Montageplatte





Dept.	Technical reference	Created by Ivo Tofall	24.01.2025	Approved by
		Document type	Document status	
		Title ModExpES_Mount	DWG No.	
			Rev.	Date of issue
				Sheet 1/1