

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung und Anforderungen	3
1.1 Ziel des Projekts	3
1.2 Anforderungen	3
1.2.1 Schnittstellenanforderungen	3
1.2.2 Anforderungsliste	3
2. Tool- und Referenzliste	5
3. Arbeitsplan	6
4. Konzept	8
4.1 Hardware	8
4.1.1 Komplettdesign	8
4.1.2 Spannungsversorgung	8
4.1.3 Sicherungskonzept	8
4.1.4 Debugger	8
4.1.5 USB Schnittstelle	8
4.1.6 Pin Konzept	8
4.1.7 Kühlungskonzept	9
4.2 Software	9
5. Design	10
5.1 Hardwaredesign	10
5.1.1 Externe Spannungsversorgung zu 5V	10
5.1.2 5V zu 3.3V	14
5.1.3 USB Schnittstelle	15
5.1.4 Reset Knopf	16
5.1.5 Boot Modus	17
5.1.6 Debug Schnittstelle	17
5.1.7 Digitale Ein- und Ausgänge	18
5.1.8 PWM Ein- und Ausgänge	19
5.1.9 I2C Schnittstelle	20
5.1.10 SPI Schnittstelle	20
5.1.11 Digital Analog Wandler	21
5.1.12 Analog Digital Wandler	21
5.1.13 Spannungsverbinder	23
5.1.14 Schraubklemmenverbinder	23
5.1.15 BNC Verbinder	24
5.1.16 Mikrocontroller Spannungsversorgung	25
5.1.17 Mikrocontroller	26
5.1.18 Montageplatte	27
5.1.19 Leiterbahnen	28
5.1.21 Hardwarekosten	29
5.2 Softwaredesign	30
5.2.1 DAC_ADC_TEST	30
5.2.2 ENC_TEST	30
5.2.3 GPIO_TEST	30

5.2.4 I2C_BMP280	31
5.2.5 LED_BLINK	31
5.2.6 PWM_TEST	31
5.2.7 RELAI_BLINK	32
5.2.8 SPI_TEST	32
6. Testspezifikation und -report	33
6.1 Testlist Hardware	33
6.1.1 Testfall 1: USB-C Verbindungstest	33
6.1.2 Testfall 2: Externe Stromversorgung testen	33
6.1.3 Testfall 3: Reset-Knopf Funktion	33
6.1.4 Testfall 4: Spannungsmessung an Klemme	34
6.1.5 Testfall 5: Sicherung bei Überstrom (2A)	34
6.1.6 Testfall 6: BNC-Signaldurchleitung	34
6.1.7 Testfall 7: Sicherung bei Überstrom (5V)	34
6.1.8 Testfall 8: Sicherung bei Überstrom (3.3V)	35
6.1.9 Testfall 9: Debugger-Funktion	35
6.1.10 Testfall 10: An/Aus-Schalter Funktion	35
6.1.11 Testfall 11: Dokumentation und Beschriftung der Anschlüsse	36
6.1.12 Testfall 12: Maximale Breite des PCBs	36
6.1.13 Testfall 13: Maximale PCB-Dicke	36
6.1.14 Testfall 14: Schutz gegen Überspannung	36
6.1.15 Testfall 15: Schutz gegen Kurzschlüsse	37
6.1.16 Testfall 16: Saubere Signalverarbeitung	37
6.1.17 Testfall 17: Belastbarkeit der Leiterbahnen	37
6.1.18 Testfall 18: Aufbaumöglichkeiten	38
6.1.19 Testfall 19: Wärmeentwicklung	38
6.2 Testliste Software	39
6.2.1 Testfall 1: DAC_ADC_TEST	39
6.2.2 Testfall 2: ENC_TEST	40
6.2.3 Testfall 3: GPIO_TEST	40
6.2.4 Testfall 4: I2C_BMP280	41
6.2.5 Testfall 5: LED_BLINK	42
6.2.6 Testfall 6: PWM_TEST	42
6.2.7 Testfall 7: RELAI_BLINK	43
6.2.8 Testfall 8: SPI_TEST	44
6.3 Probleme während der Entwicklung	45
7. Evaluation	46
8. Anhänge	47
8.1 Schaltbild	47
8.2 Frontansicht PCB	47
8.3 Rückseite PCB	47
8.4 Technische Zeichnung der Montageplatte	47

1. Zielsetzung und Anforderungen

1.1 Ziel des Projekts

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.

Zusätzlich soll bei diesem Projekt auf die Langlebigkeit geachtet werden, damit dieses Produkt auch in 10 Jahren noch für den Endanwender nutzbar ist. Möglichkeiten, dies zu erreichen, werden im Konzept weiter erläutert.

1.2 Anforderungen

1.2.1 Schnittstellenanforderungen

Anzahl	Beschreibung
1	Spannungsversorgung
1	SPI Schnittstellen
1	I2C
4	Digitale Eingänge, wobei zwei 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

1.2.2 Anforderungsliste

Daraus können wir folgende Anforderungen festsetzen:

1. Alle genannten Schnittstellen sollten verfügbar und nutzbar sein. Dazu zählen:
 - (a) Spannungsversorgung
 - (b) SPI
 - (c) I2C
 - (d) Digitale Ein- und Ausgänge
 - (e) Encoder
 - (f) PWM Ausgänge

- (g) DAC Kanäle
 - (h) Analoge Eingänge
 - (i) Debugger Schnittstelle
 - (j) BNC Verbinder
 - (k) Klemmen
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. Damit die Herstellung einfacher ist, sollen Standarddicken für das PCB verwendet werden. Daher soll das PCB 1,6 mm dick sein.
 15. Bei Anlegen einer zu hohen externen Spannung soll das Board nicht direkt beschädigt werden.

2. Tool- und Referenzliste

1. Github <https://github.com/Ivolution-dev/ModExpES>
2. PDFtk Free 2.02: https://www.pdflabs.com/tools/pdftk-the-pdf-toolkit/pdftk_free-2.02-win-setup.exe
3. Pandoc 3.5: <https://pandoc.org/installing.html>
4. EasyEDA: <https://easyeda.com/page/download>
5. Datenblätter: Alle hinterlegt in **/Datenblätter**
6. STM32 Datenblatt ../Datenblätter/2304140030_STMicroelectronics-STM32F405RGT6_C15742.pdf
7. BL8072COTR50 Datenblatt ../Datenblätter/2407171722_BL-Shanghai-Belling-BL8072COTR50_C213389.pdf
8. BL8072COTR33 Datenblatt ../Datenblätter/2208251800_BL-Shanghai-Belling-BL8072COTR33_C5155191.pdf
9. ModExpES Schaltbild ../Fertigung/PCB/Schematic_ModExpES_2025-01-24.pdf
10. Grove Sensorsysteme: https://wiki.seeedstudio.com/Grove_Sensor_Intro/
11. STM32CubeIDE: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>
12. STM32CubeProgrammer CLI: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html>
13. PuTTY: <https://www.putty.org/>
14. J-Link Software (Segger): <https://www.segger.com/downloads/jlink/>

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**
 - ☒ 4.1 Anforderungen in Tests umwandeln
 - ☒ 4.2 Entwicklung eines DAC ADC Tests
 - ☒ 4.3 Entwicklung eines Encoder Tests
 - ☒ 4.4 Entwicklung eines GPIO Tests
 - ☒ 4.5 Entwicklung eines I2C Tests
 - ☒ 4.6 Entwicklung eines Tests für die Board-LED
 - ☒ 4.7 Entwicklung eines PWM Tests
 - ☒ 4.8 Entwicklung eines Relai Tests
 - ☒ 4.9 Entwicklung eines SPI Tests
- ☒ **5. Bestückung und Integration**
 - ☒ 5.1 Entwickeln und schneiden einer Montageplatte
 - ☒ 5.2 BNC Verbinden auf das Board löten
 - ☒ 5.3 Anbringen der Sicherungen
 - ☒ 5.4 Ankleben des Kühlers auf das PCB
 - ☒ 5.5 Zusammenbau des Boards und der Montageplatte
 - ☒ 5.6 Anbringen von Standfüßen
- ☒ **6. Testing**
 - ☒ 6.1 Durchführen der Hardwaretests
 - ☒ 6.2 Durchführen der Softwaretests
 - ☒ 6.3 Entwickeln eines Demoskripts
 - ☒ 6.4 Verbesserungsvorschläge

☒ 7. Evaluation

4. Konzept

4.1 Hardware

4.1.1 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.

4.1.2 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.

4.1.3 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 bleiben. 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.

4.1.4 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.

4.1.5 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.

4.1.6 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.

4.1.7 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. Außerdem soll im Design bei den Spannungswandlern ein Warnzeichen angebracht werden, das vor warmen Komponenten warnt.

4.2 Software

Die Software soll möglichst einfach zu verstehen und gut dokumentiert sein. Sie soll als Grundlage für weitere Projekte dienen und zudem das Board nach der Herstellung auf seine Funktionalität prüfen. Die einfachste Möglichkeit, die Software zu entwickeln, ist die STM32CubeIDE, da diese speziell für den STM32 ausgelegt ist. Daher wird bei der Entwicklung der Testsoftware wahrscheinlich auf diese zurückgegriffen. Zusätzlich ist das Board besonders von Pinout her auf den J-Link-Debugger ausgelegt, weshalb dieser auch hier verwendet wird, um die Software aufzuspielen und zu debuggen.

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).

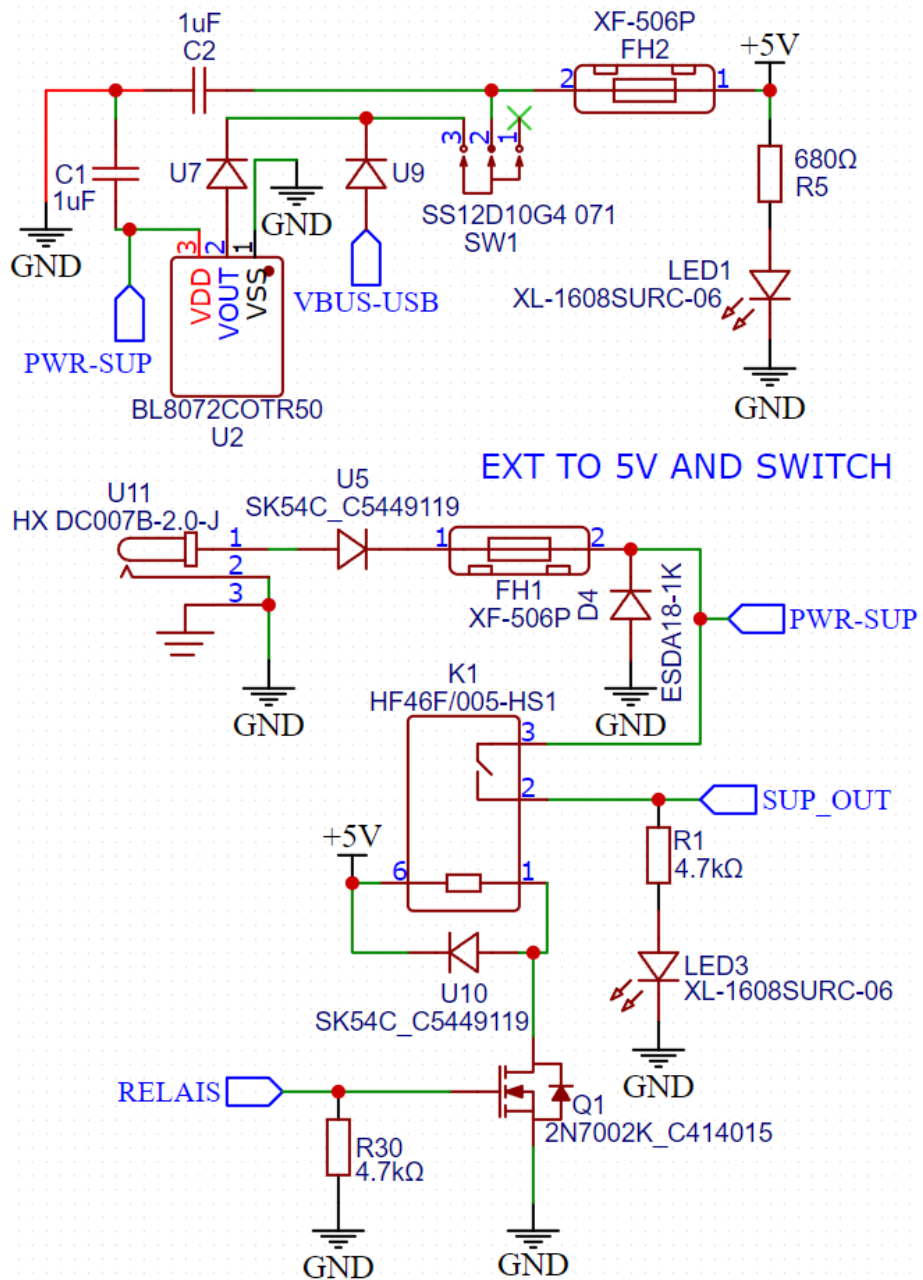


Figure 1: Blockschaltbild externe Spannungsversorgung zu 5V⁹

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. Damit keine Fehlströme das Relais versehentlich 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.

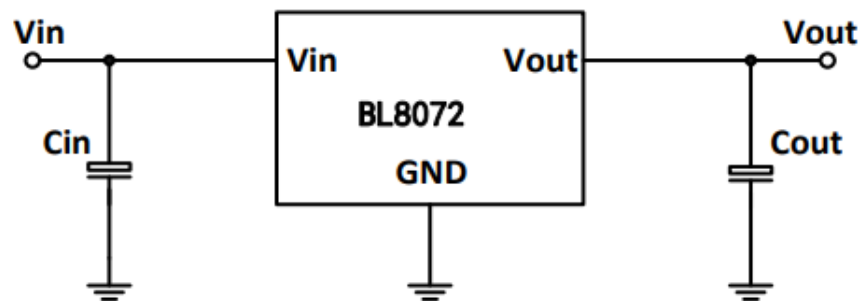


Figure 2: Typische Anwendung aus dem Datenblatt des BL8072COTR50⁷

Aus dem Datenblatt können wir eine empfohlene Schaltung für den Spannungswandler entnehmen. Diese besteht aus zwei Keramikkondensatoren der Größe 1 μ F 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.

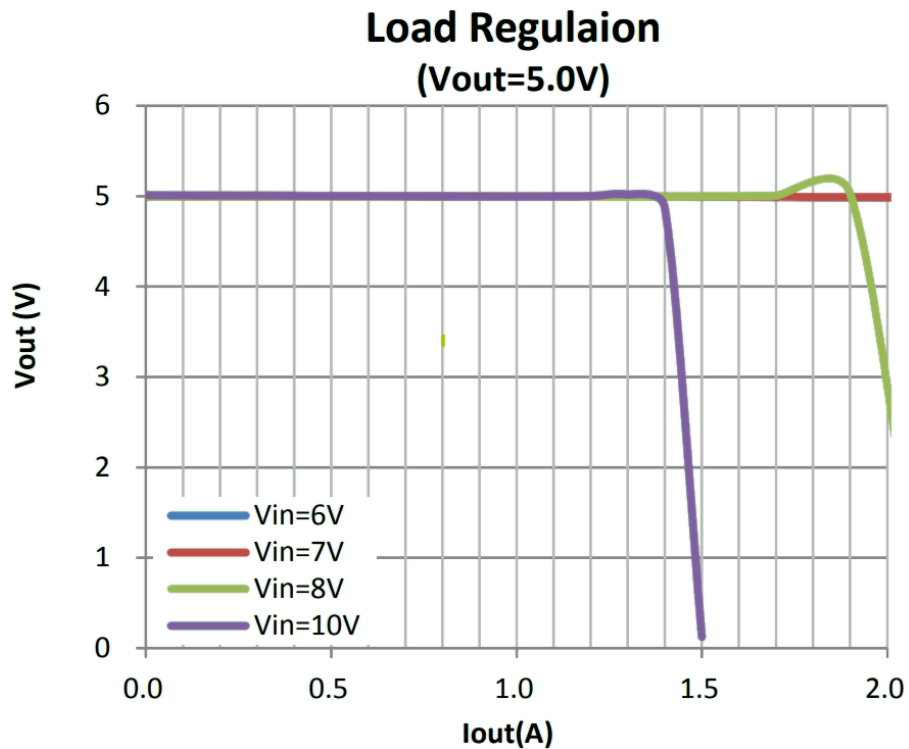


Figure 3: Lastregulierung des BL8072COTR50⁷

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 Ausgangspin 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.

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

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

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

Das heißt, es wird ein Vorwiderstand zwischen $3,1k\Omega$ und $5,2k\Omega$ benötigt. In diesem Bereich liegt die Standardgröße $4,7k\Omega$, 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.

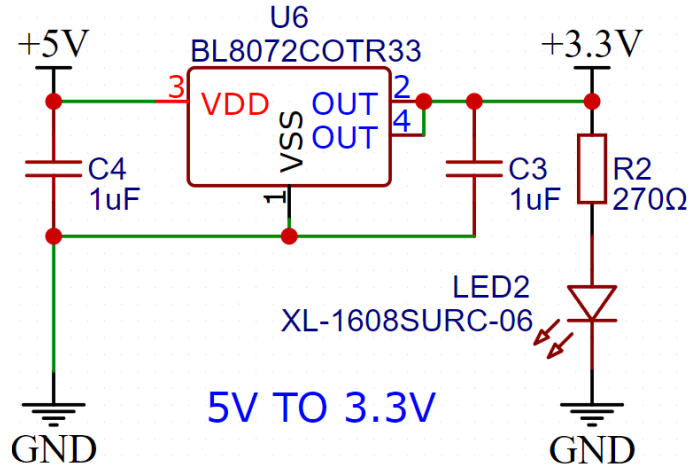


Figure 4: Blockschaltbild 5V zu 3.3V⁹

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.

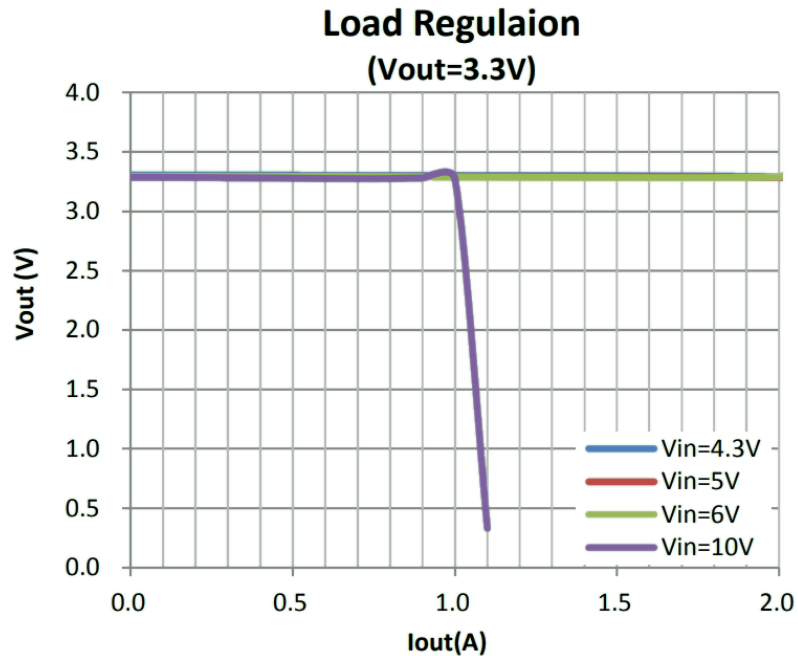


Figure 5: Lastregulierung des BL8072COTR33⁸

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.

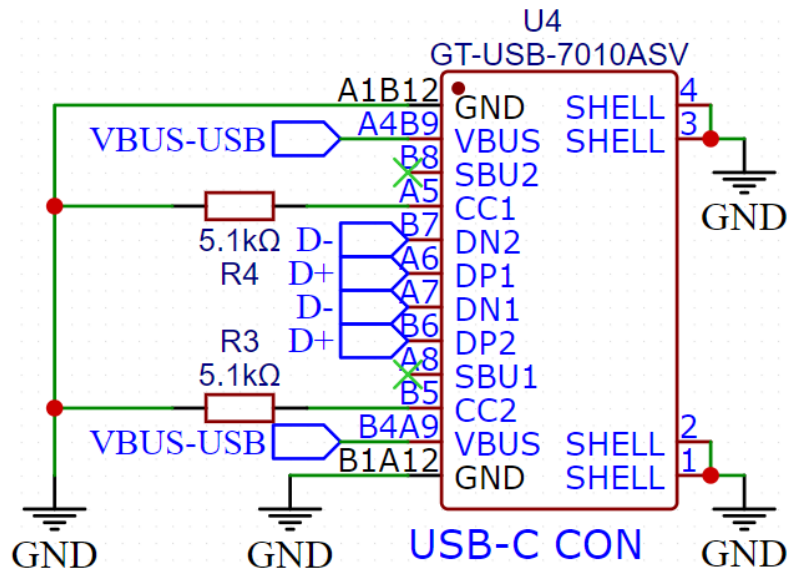


Figure 6: Blockschaltbild USB-C Buchse⁹

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

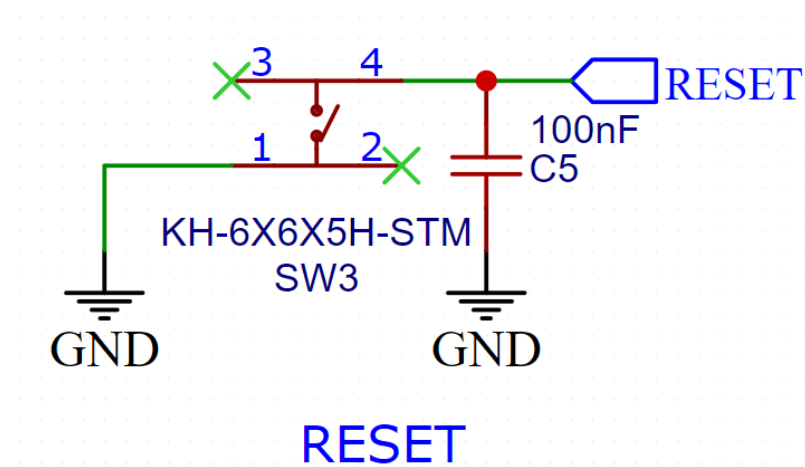
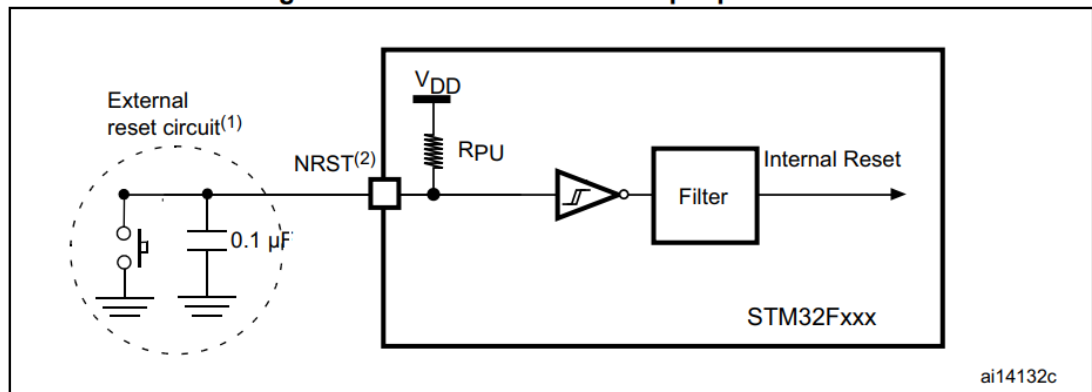


Figure 7: Blockschaltbild Reset Schaltung⁹

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

Figure 38. Recommended NRST pin protection



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 Datenblatt⁶

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

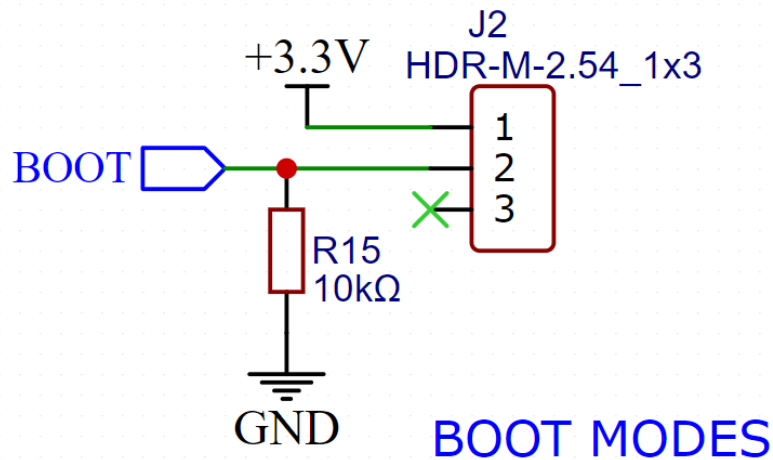


Figure 9: Blockschaltbild Boot Modes⁹

Wie in dem Schaltbild 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

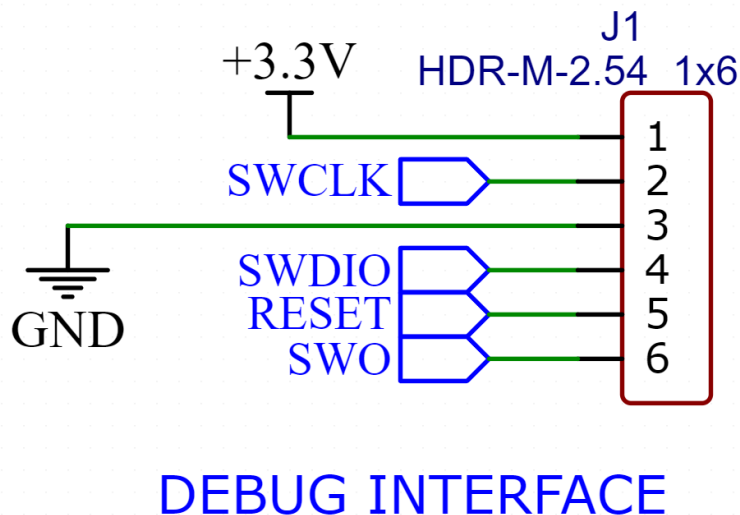


Figure 10: Blockschaltbild Debug Schnittstelle⁹

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

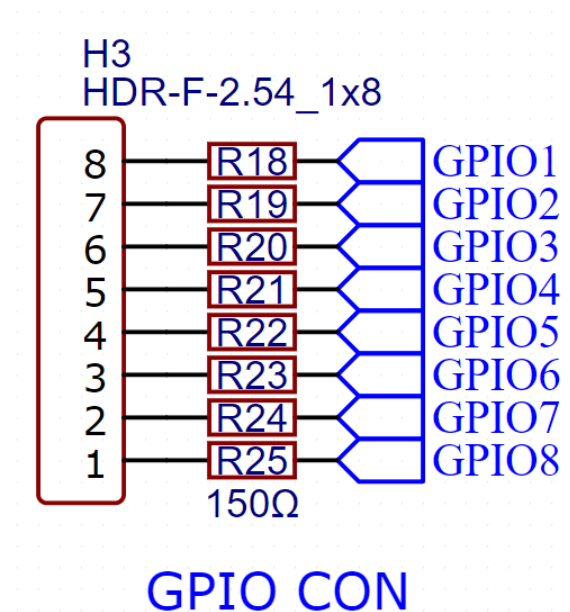


Figure 11: Blockschaltbild digitale Ein- und Ausgänge⁹

Die digitalen Ein- und Ausgänge sind mit den Mikrocontroller Pins PA8-10 und PC0-4 mit einem Widerstand direkt verbunden. Ein genaueres Pinout findet man nochmal unter der Sektion “Mikrocontroller”. Die Widerstände R18-R25 sollen gegen Kurzschlüsse bzw. Überstrom schützen und begrenzen den Strom auf unter 25 mA pro Pin. Die 25mA Grenze kann aus dem Datenblatt des STM32 unter “Table 12. Current characteristics” entnommen werden.

Table 12. Current characteristics

Symbol	Ratings	Max.	Unit
I_{VDD}	Total current into V_{DD} power lines (source) ⁽¹⁾	150	mA
I_{VSS}	Total current out of V_{SS} ground lines (sink) ⁽¹⁾	150	
I_{IO}	Output current sunk by any I/O and control pin	25	
	Output current source by any I/Os and control pin	25	
$I_{INJ(PIN)}^{(2)}$	Injected current on five-volt tolerant I/O ⁽³⁾	-5/+0	
	Injected current on any other pin ⁽⁴⁾	±5	
$\Sigma I_{INJ(PIN)}^{(4)}$	Total injected current (sum of all I/O and control pins) ⁽⁵⁾	±25	

Figure 12: Datenblatt STM32 Table 12.⁶

Als Widerstand wurde die Größe 150Ω gewählt, da dieser der nächstgrößere passende Widerstand aus der E12-Reihe ist.

$$R = \frac{V_{cc}}{I_{max}} \text{ wobei } V_{cc} = 3.3V, I_{max} = 25mA$$

$$\text{Für maximal 25mA: } R = \frac{3.3V}{25mA} = 132\Omega$$

$$\text{Bei } 150\Omega: I = \frac{3.3V}{150\Omega} = 22mA$$

Der Strom ist damit pro Pin auf 22mA begrenzt und kann somit den Mikrocontroller nicht beschädigen.

5.1.8 PWM Ein- und Ausgänge

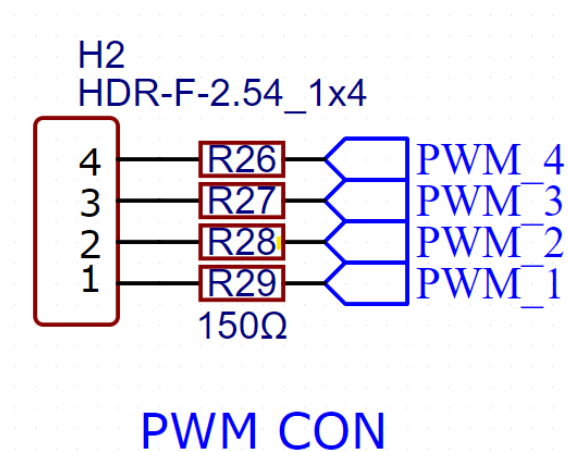


Figure 13: Blockschaltbild PWM Verbinder⁹

Die PWM-Ein- und Ausgänge sind ebenfalls mit einem 150Ω -Widerstand verbunden, um diese abzusichern. Die PWM-Anschlüsse sind an den Pins PC6-9 mit dem Mikrocontroller verbunden. Ein genaueres Pinout findet sich unter der Sektion “Mikrocontroller”. Die Berechnung des Widerstands ist dieselbe wie bei den digitalen Ein- und Ausgängen und kann von dort entnommen werden.

5.1.9 I2C Schnittstelle

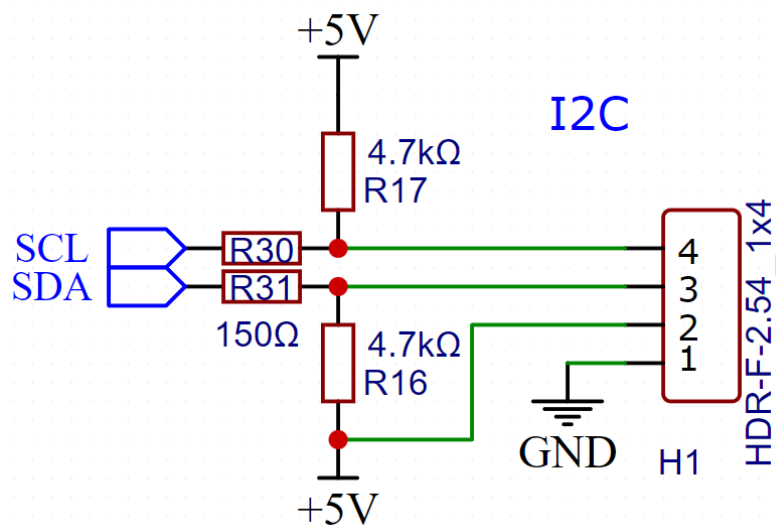


Figure 14: Blockschaltbild I2C Anschluss⁹

Die I2C-Schnittstelle wurde nach dem Pinout für Grove-Sensorsysteme¹⁰ entwickelt. Über dieses Pinout ist es möglich, Module direkt mit einem Kabel in den Header zu stecken, um diese zu nutzen. SCL und SDA wurden über einen 4,7kΩ Pull-up-Widerstand zu 5V verbunden und haben ebenfalls wieder einen 150Ω Widerstand, um gegen Kurzschlüsse und Überstrom abgesichert zu sein. Am Mikrocontroller ist SCL an PB8 und SDA an PB9 angeschlossen.

5.1.10 SPI Schnittstelle

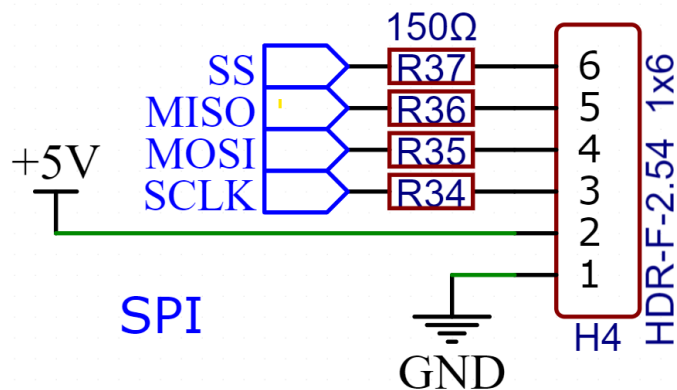


Figure 15: Blockschaltbild SPI Anschluss⁹

Die SPI-Schnittstelle ist genau wie die I2C-Schnittstelle auf der Pinout-Basis der Grove-Sensorsysteme¹⁰ entwickelt worden. Die Datenleitungen wurden auch über einen 150Ω Widerstand abgesichert und sind so sicher gegen Kurzschlüsse und Überspannung. Das

genaue Pinout am Mikrocontroller kann unter der Sektion ‘Mikrocontroller’ gefunden werden.

5.1.11 Digital Analog Wandler

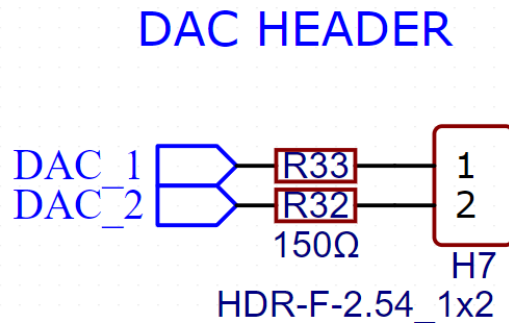


Figure 16: Blockschaltbild Digital Analog Wandler⁹

Der Digital-Analog-Wandler ist an PA4 und PA5 angeschlossen und kann eine Spannung von bis zu 3.3V erzeugen. Die Datenleitungen sind wieder mit einem 150Ω Widerstand abgesichert und ansonsten direkt mit dem Header verbunden.

5.1.12 Analog Digital Wandler

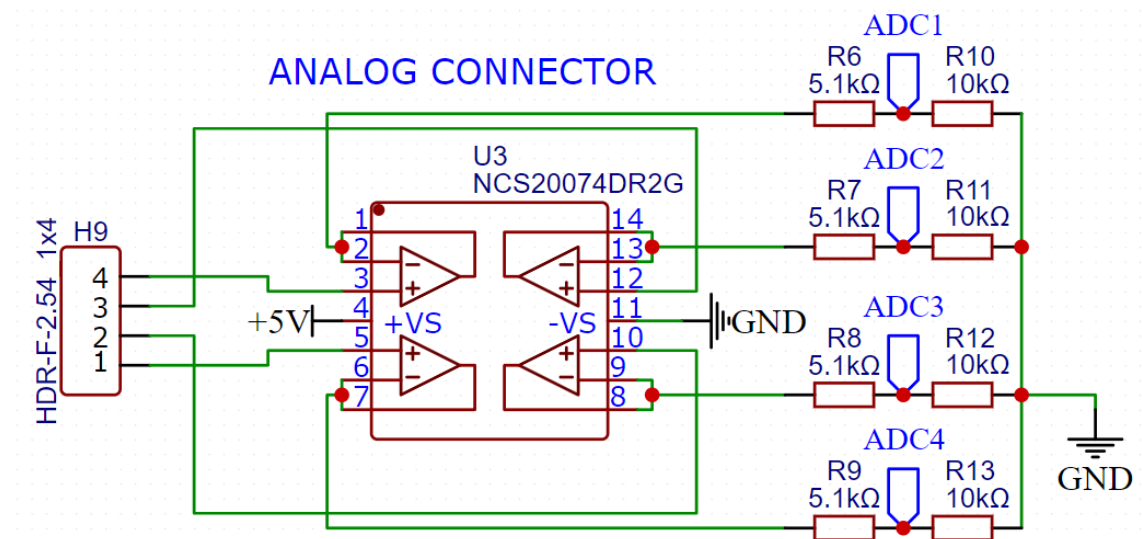


Figure 17: Blockschaltbild Analog Digital Wandler⁹

Der Analog-Digital-Wandler besteht aus zwei Hauptkomponenten: einem Spannungsteiler und einem Operationsverstärker. Da der Spannungsteiler eine hohe Ausgangsimpedanz aufweist, wird vor ihm ein Operationsverstärker geschaltet, um eine niedrige Eingangsimpedanz zu gewährleisten. Diese niedrige Eingangsimpedanz sorgt dafür, dass das Signal durch den Spannungsteiler möglichst wenig beeinflusst wird. Die Wahl der Widerstände lässt sich mit der Spannungsteilerformel berechnen.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{ wobei } V_{in} = 5V \text{ und } V_{out} = 3.3V$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Damit berechnen wir das erforderliche Verhältnis zwischen den Widerständen.

$$\frac{3.3V}{5V} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$0.66 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$0.66 * (R_1 + R_2) = R_2$$

$$0.66 * R_1 + 0.66 * R_2 = R_2$$

$$0.66 * R_1 = R_2 - 0.66 * R_2$$

$$0.66 * R_1 = 0.34 * R_2$$

$$R_1 \approx 0.515 * R_2$$

Damit wissen wir, dass der Widerstand R_1 ungefähr 0,515 mal so groß sein muss wie R_2 . Für R_1 wurde $10k\Omega$ gewählt. Um das Verhältnis zu erhalten, müssen wir nun R_2 berechnen.

$$R_1 = 0.515 * 10k\Omega \approx 5.1k\Omega$$

5.1.13 Spannungsverbinder

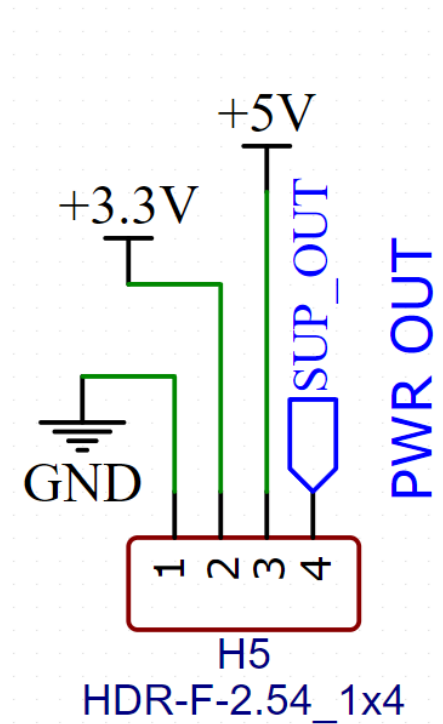


Figure 18: Blockschaltbild Stromanschlüsse⁹

Die Spannungsverbinder bestehen aus 5V, 3.3V, GND und einem Anschluss für ein externes Netzteil. Sie ermöglichen die Versorgung des Breadboards mit Spannung sowie den Betrieb externer Komponenten.

5.1.14 Schraubklemmenverbinder

SCREW CON

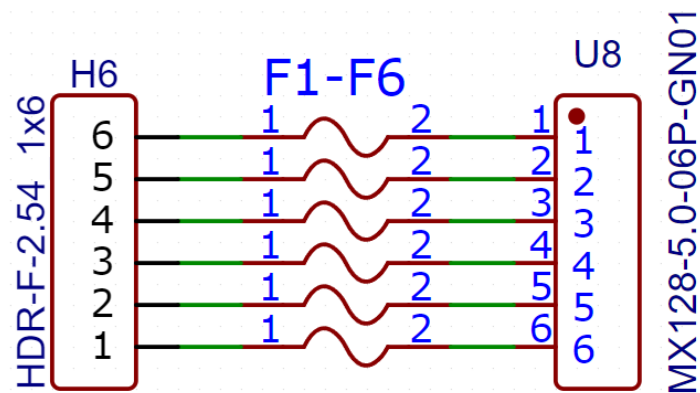


Figure 19: Blockschaltbild Schraubklemmenverbinder⁹

Die sechs Schraubklemmenverbinder, die jeweils mit einer 2A-Sicherung pro Leitung

abgesichert sind, sind selbstrückstellend. Das heißt, sie unterbrechen den Stromfluss bei Überlast und schützen so die Leiterbahnen auf der Platine vor Schäden. Sobald die Sicherung abkühlt, stellt sie die Verbindung automatisch wieder her. Die Klemmen sind zum Anschließen von externen Netzteilen oder Signalgeneratoren gedacht, um Schrittmotoren oder andere Geräte zu versorgen.

5.1.15 BNC Verbinder

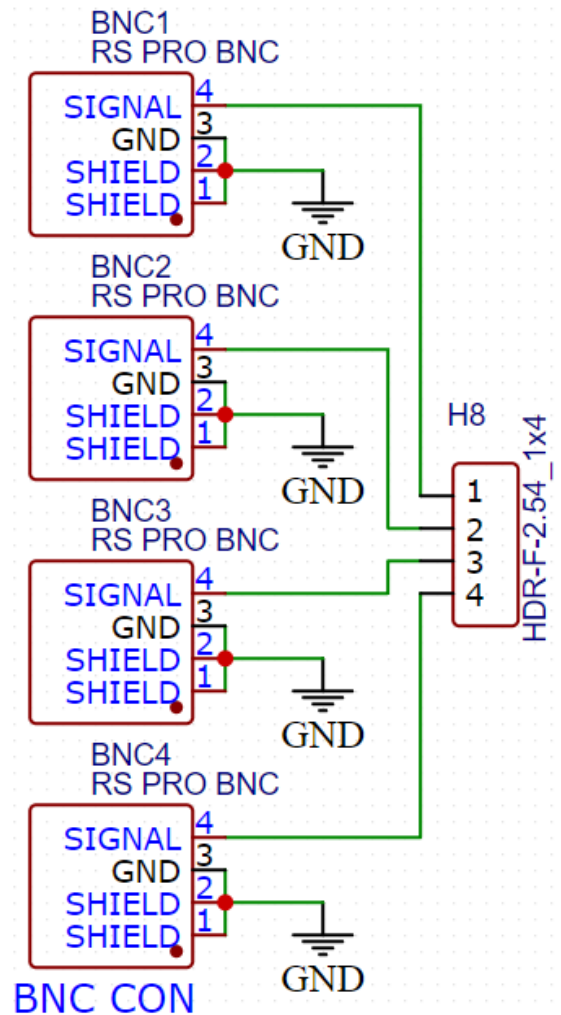


Figure 20: Blockschaltbild BNC Verbinder⁹

Die BNC-Verbinder dienen dem Anschluss eines Oszilloskops. Die Signale können direkt am Breadboard unter den BNC-Anschlüssen angeschlossen werden, wodurch ein besonders sauberer und übersichtlicher Aufbau ermöglicht wird. Diese Verbinder sorgen für eine saubere Signalübertragung und erleichtern die Messung sowie die Analyse von Schaltungen.

5.1.16 Mikrocontroller Spannungsversorgung

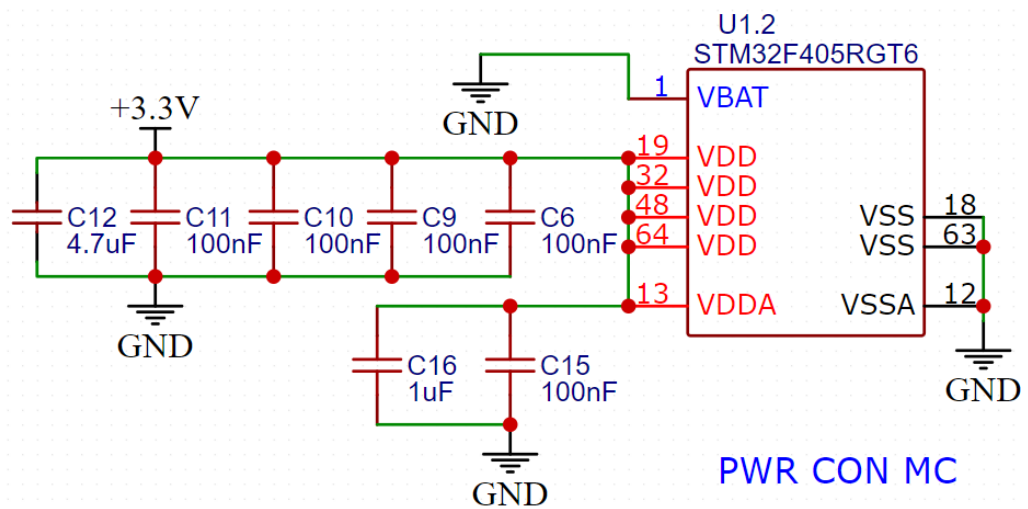


Figure 21: Blockschaltbild Mikrocontroller Spannungsversorgung⁹

Die Spannungsversorgung wurde gemäß dem Datenblatt umgesetzt.

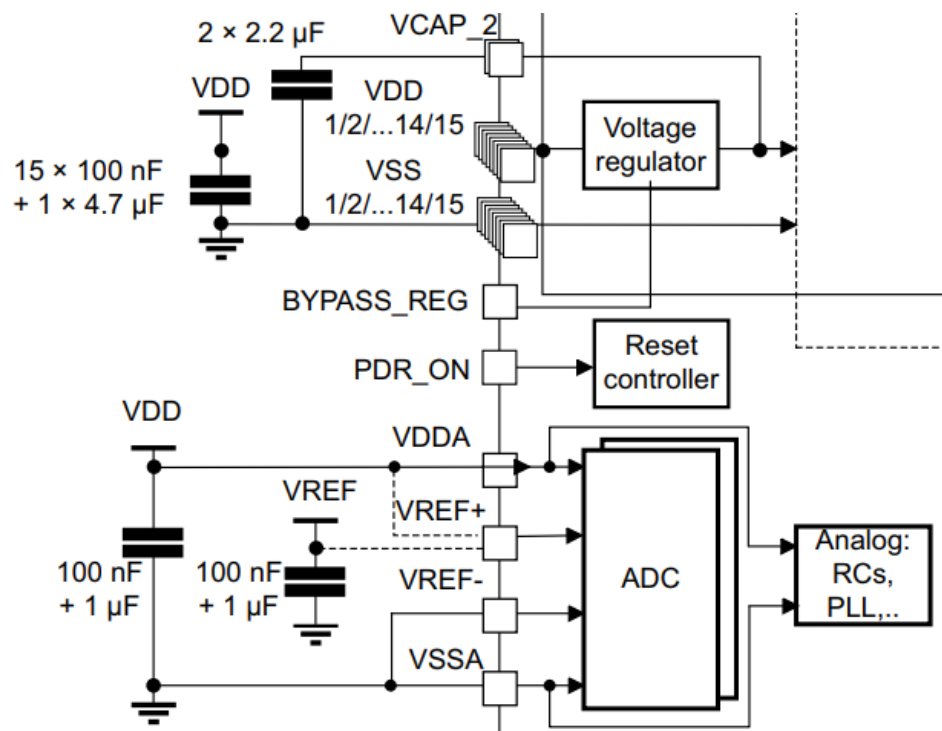


Figure 22: Ausschnitt STM32 Datenblatt Sektion 5.1.6 Power supply scheme⁶

Erkennbar ist, dass für jeden VDD-Pin ein 100nF Kondensator empfohlen wird, ergänzt durch einen zusätzlichen 4,7µF Kondensator. Ebenso ist für jeden VDDA-Pin ein 100nF Kondensator mit einem zusätzlichen 1µF Kondensator vorgeschrieben.

Da wir außerdem keine Batterie nutzen wollen, wurde der VBAT-Pin ebenso wie die Massepins VSS und VSSA mit Masse verbunden.

5.1.17 Mikrocontroller

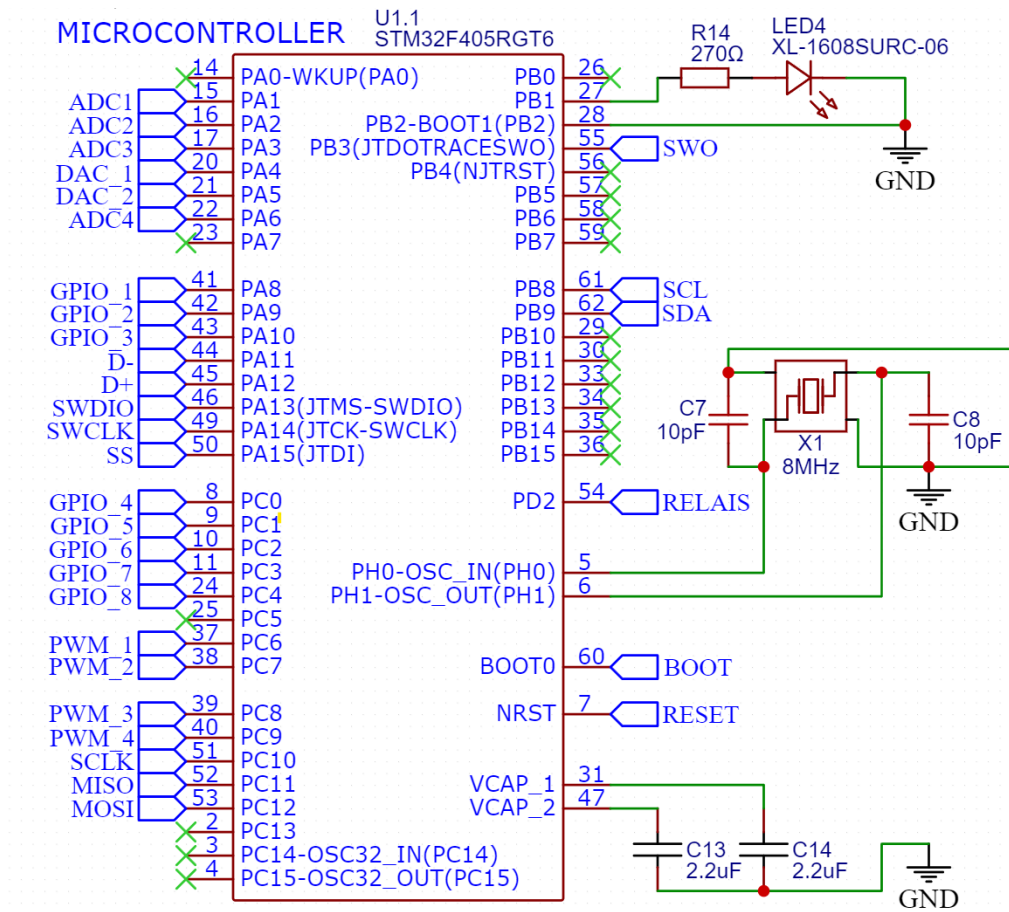


Figure 23: Blockschaltbild Mikrocontroller⁹

Der Mikrocontroller wurde gemäß den Anforderungen des Datenblatts angeschlossen. Die Kondensatoren C13 und C14 dienen zur Stabilisierung der Mikrocontrollerspannung und wurden entsprechend den Vorgaben aus “Table 16. VCAP_1/VCAP_2 operating conditions” gewählt.

Table 16. VCAP_1/VCAP_2 operating conditions⁽¹⁾

Symbol	Parameter	Conditions
CEXT	Capacitance of external capacitor	2.2 μ F
ESR	ESR of external capacitor	< 2 Ω

Figure 24: Datenblatt STM32 Table 16.⁶

Des Weiteren wurde an Pin PD2 das Relais für die externe Spannungsversorgung angeschlossen. Weitere Informationen zu dieser Schaltung sind in Abschnitt 5.1.1 zu finden. Die On-Board-LED wurde an Pin PB1 mit einem 270 Ω Vorwiderstand angeschlossen, um die Helligkeit zu begrenzen. Die Wahl des Widerstands basiert auf denselben Grundlagen wie in Kapitel 5.1.2.

Abschließend musste, um über USB flashen zu können, ein 8 MHz Quarz eingebaut werden.

Der Quarz vom ModExpES wurde zusätzlich mit zwei 10pF Kondensatoren stabilisiert.

Figure 32. Typical application with an 8 MHz crystal

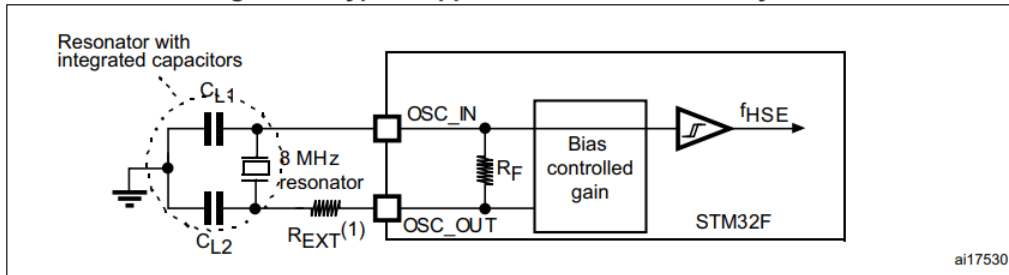


Figure 25: Datenblatt STM32 Fig 32.⁶

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	RELA1
PC0	GPIO4	PH0	8MHz Clock
PC1	GPIO5	PH1	8MHz Clock
PC2	GPIO6	BOOT0	BOOT
NRST	RESET		

Table 2: Pinout ModExpES

5.1.18 Montageplatte

Die Montageplatte soll das selbst designte PCB mit dem Breadboard verbinden. Als Auswahlkriterium muss ein Material gewählt werden, welches bestimmte Anforderungen erfüllt. Zum einen muss dieses mit dem Lasercutter der Hochschule geschnitten werden können. Ebenfalls darf die Dicke der Montageplatte nicht mehr als 2mm betragen, da die Schrauben, die das PCB mit der Montageplatte verbinden, nicht länger als 4mm sind. Zudem sollte das Material möglichst starr sein, um die nötige Stabilität für das PCB und das Breadboard zu bieten.

Ein Material welches diese Anforderungen erfüllt ist zum Beispiel originales Plexiglas. Dieses kann nicht nur mit dem Lasercutter sauber geschnitten werden, sondern bietet auch die nötige Stabilität und ist in vielen Farben verfügbar.

Meine Wahl fällt auf durchsichtiges Plexiglas, damit, falls ein Kurzschluss oder sonstige

Probleme auf dem PCB auftreten, diese auch von hinten begutachtet werden können. Außerdem passt es designtechnisch gut zu dem weißen Stil des ganzen Projekts.

Die genaue technische Zeichnung der Montageplatte findet man in 8.2.

5.1.19 Leiterbahnen

Die Berechnung der Breite der Leiterbahnen wird mithilfe der Fläche berechnet.

$$A = \left(\frac{I}{k * T_{Rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

Wobei für externe Schichten gemäß IPC-2221 gilt: $k=0.048$, $b=0.44$, $c=0.725$ und $T_{Rise}=10^\circ\text{C}$

Zur Sicherheit sind alle 2A-Leiterbahnen auf 3A und die 1A-Leiterbahnen auf 2A ausgelegt, da die Sicherungen etwas Zeit zum Durchbrennen benötigen.

$$\text{Für 2A: } A = \left(\frac{3}{0.048 * 10^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} \approx 74.16$$

$$\text{Für 1A: } A = \left(\frac{2}{0.048 * 10^{0.44}} \right)^{\frac{1}{0.725}} \approx 42.39$$

Damit kann man die benötigte Breite berechnen.

$$W = \frac{A}{t * 1.378}$$

$$\text{Für 2A: } W = \frac{74.16}{1 * 1.378} \approx 53.81 \text{ mil} \approx 1.36 \text{ mm}$$

$$\text{Für 1A: } W = \frac{42.39}{1 * 1.378} \approx 30.76 \text{ mil} \approx 0.78 \text{ mm}$$

Somit wurde für die 2A-Leiterbahnen eine Breite von 2mm und für die 1A-Leiterbahnen eine Breite von 1mm gewählt.

5.1.21 Hardwarekosten

Da dieses Board für die Entwicklung und den Einsatz an der Hochschule vorgesehen ist, sollen die Kosten pro Board möglichst gering gehalten werden. Daher sind alle Kosten in der folgenden Tabelle zusammengefasst, um einen Überblick über die Ausgaben zu bieten.

Produkt	Preis	Stückzahl	Stückpreis	Menge pro Produkt	Kosten pro Produkt
PCB	161,18 €	5	32,24 €	1	32,24 €
Breadboard	103,04 €	6	17,17 €	2	34,35 €
5mm Standoffs	9,39 €	20	0,47 €	6	2,82 €
BNC Verbinder	71,55 €	10	7,16 €	4	28,62 €
M3x4mm Schrauben	6,29 €	100	0,06 €	12	0,75 €
Gummi Standoffs	6,99 €	12	0,58 €	4	2,33 €
Wärmeleitkleber	6,90 €	3	2,30 €	1	2,30 €
Kühler	10,15 €	6	1,69 €	2	3,38 €
Sicherungen 1A	8,97 €	10	0,90 €	1	0,90 €
Sicherungen 2A	3,99 €	10	0,40 €	1	0,40 €
Acrylglas	19,81 €	3	6,60 €	1	6,60 €
Gesamtausgaben:					408,26 €
Gesamtkosten pro Produkt:					114,69 €

Table 3: Kostenübersicht der Bauteile

5.2 Softwaredesign

Die Software wurde, wie im Konzept vorgeschlagen, in der STM32CubeIDE entwickelt. Die Tests können geöffnet werden, indem der Ordner “Software” als Workspace in der IDE geöffnet wird. Man bekommt dann die acht Softwaretests, welche sich nach dem flashen so verhalten, wie im Code und in der Dokumentation beschrieben. Die Tests können ebenfalls als Basis für zukünftige Softwareentwicklungen dienen und gleichzeitig zeigen, was das Board leisten kann.

5.2.1 DAC_ADC_TEST

Dieser Test testet die Funktionalität des Digital-Analog-Wandlers (DAC) und des Analog-Digital-Wandlers (ADC) des ModExpES. Der DAC erzeugt eine analoge Spannung, die an den ADC-Eingang zurückgeführt wird. Die ausgelesenen ADC-Werte werden zur PWM-Steuerung genutzt, um daraus wieder ein digitales Signal zu erzeugen. Das digitale Signal kann an PWM1 gemessen werden, während gleichzeitig die On-Board-LED als Ausgabe genutzt wird.

Versuchsaufbau: DAC1 wird mit ADC1 verbunden. Zusätzlich kann auf dem Breadboard eine weitere Verbindung zu einem Oszilloskop hergestellt werden, um das Signal zu visualisieren.

Ablauf:

- Der DAC gibt eine steigende Spannung (0-3.3V) aus.
- Der ADC misst diese Spannung.
- Die gemessenen Werte werden zur Berechnung des PWM-Signals genutzt.

5.2.2 ENC_TEST

Dieser Test testet die Funktionalität eines Drehgebers (Encoder) und steuert die PWM-Ausgabe über Timer 3 basierend auf dem Encoderausgang.

Versuchsaufbau: Ein Encoder ist mit GPIO1 und GPIO2 verbunden. Zusätzlich kann auf dem Breadboard eine weitere Verbindung zu einem Oszilloskop hergestellt werden, um das Signal zu visualisieren.

Ablauf:

- Der Encoder wird auf GPIO1 und GPIO2 ausgelesen.
- Die Ausgabe erfolgt auf der On-Board LED und dem PWM1 Ausgang.

5.2.3 GPIO_TEST

Dieser Test testet die Funktionalität der digitalen GPIO-Ausgänge. Die Pins PA8, PA9 und PA10 sowie PC0 bis PC4 werden als digitale Ausgänge konfiguriert. Das Programm setzt alle Pins zunächst auf low und schaltet sie anschließend nacheinander auf high.

Versuchsaufbau: Schließe GPIO1 bis 8 an einem Ausgabegerät der Wahl an. Als Beispiel wurde in diesen Test das Modul H-Brücke V1.0 von der Hochschule benutzt.

Ablauf:

- Alle GPIO-Pins werden initial auf low gesetzt.
- Danach werden die Pins PA8, PA9 und PA10 jeweils nacheinander mit einer kurzen Verzögerung auf high gesetzt.
- Anschließend werden die Pins PC0 bis PC4 in gleicher Weise aktiviert.
- Der Vorgang wird kontinuierlich in einer Endlosschleife wiederholt.

5.2.4 I2C__BMP280

Dieser Test liest die Temperaturdaten vom BMP280-Sensor über I2C aus und sendet die Messwerte über die USB-Schnittstelle an den PC.

Versuchsaufbau: Ein Computer muss per USB-C an das Board angeschlossen werden. Der BMP280 muss außerdem richtig per I2C an das Board angeschlossen werden. Zusätzlich muss der Computer eine Ausgabe über den richtigen COM-Port offen haben.

Ablauf:

- Initialisiert den BMP280-Sensor.
- Liest die Kalibrierungsdaten des Sensors aus.
- Holt die Roh-Temperaturwerte und berechnet daraus die Temperatur in °C.
- Sendet die Temperaturwerte alle 100 ms über die USB-Schnittstelle.

5.2.5 LED__BLINK

Dieser Test steuert einen digitalen Ausgang für ein Relais sowie eine LED. Der Pin PD2 wird dauerhaft auf high gesetzt, um das Relais einzuschalten. Der Pin PB1 wird periodisch getogelt, um die On-Board LED blinken zu lassen.

Versuchsaufbau: Nicht benötigt.

Ablauf:

- Das Relais wird dauerhaft aktiviert.
- Die LED wird mit einer Frequenz von 1 Hz ein- und ausgeschaltet.

5.2.6 PWM__TEST

Dieser Test steuert die PWM-Signale auf mehreren Kanälen mit einer kontinuierlichen Änderung der Duty-Cycle-Werte. Die PWM-Signale werden auf den Kanälen TIM3, TIM8 und TIM1 ausgegeben. Die Duty-Cycle-Werte werden in einem Schleifenverfahren von 0 bis 65535 und wieder zurück verändert, um die Geräte der an den Pins und die On-Board LED zu steuern.

Versuchsaufbau: Beliebiges Ausgabegerät an den PWM Ports anschließen.

Ablauf:

- Das PWM-Signal wird schrittweise in der Duty-Cycle von 0 auf 65535 erhöht, dann wieder von 65535 auf 0 reduziert, wodurch zum Beispiel eine kontinuierliche Helligkeitsmodulation bei LEDs erzeugt wird.

5.2.7 RELAI_BLINK

Dieser Test testet das Relai. Die On-Board LED wird eingeschaltet und das Relai an PD2 wird alle 500ms umgeschaltet.

Versuchsaufbau: Nicht benötigt.

Ablauf:

- PB1 bleibt aktiv, wodurch die LED immer eingeschaltet bleibt.
- PD2 wird periodisch alle 500 ms getoggelt, wodurch das Relais blinkt.

5.2.8 SPI_TEST

Dieser Test steuert einen MCP4922 Digital-Analog-Wandler (DAC) über SPI und liest kontinuierlich den Wert eines ADCs aus, welcher mit dem DAC verbunden ist. Der ADC-Wert wird verwendet, um die PWM-Ausgangswerte auf den Pins PWM1 und der On-Board LED zu steuern, basierend auf dem ADC-Eingang. Die ADC-Werte werden kontinuierlich überwacht, um den minimalen und maximalen Wert zu ermitteln und den PWM-Ausgang entsprechend zu skalieren.

Versuchsaufbau: Der MCP4922 DAC wird über die SPI-Schnittstelle an das ModExpES angeschlossen. Der Ausgang des DAC, welcher die analoge Spannung erzeugt, wird direkt mit dem ADC4 verbunden. So wird die vom DAC erzeugte Spannung vom ADC4 gemessen. Um das Signal visuell zu überprüfen, kann ein Oszilloskop an den PWM1-Ausgang, sowie den ADC4-Eingang angeschlossen werden.

Ablauf:

- Der DAC wird in einer Schleife mit Werten zwischen 0 und 4095 beschrieben.
- Der ADC wird gestartet und die Werte werden gelesen.
- Der minimalste und maximalste ADC-Wert werden ermittelt, um die PWM-Ausgangswerte basierend auf dem aktuellen ADC-Wert zu skalieren.
- Die PWM-Werte werden über die On-Board LED und PWM1 ausgegeben.

6. Testspezifikation und -report

Tests sind wichtig, um die Funktionalitäten des Projekts zu überprüfen und wurden auf Basis der Anforderungen erstellt. Zudem wurden Tests für alle Schnittstellen entwickelt, um sicherzustellen, dass jede einzelne Verbindung wie vorgesehen funktioniert.

6.1 Testlist Hardware

6.1.1 Testfall 1: USB-C Verbindungstest

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 4.

Voraussetzung: Das Board ist ausgeschaltet.

Testschritte:

1. USB-C-Stecker an das Board anschließen.
2. Jumper setzt BOOT0 auf HIGH

Erwartetes Ergebnis:

- Das Board wird in Windows erkannt.
- Die +5V-LED und die +3.3V-LED leuchten auf.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.2 Testfall 2: Externe Stromversorgung testen

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 2. 10.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Externe Stromversorgung anschließen.

Erwartetes Ergebnis:

- Mindestens zwei der drei LEDs der Spannungsversorgung leuchten unabhängig von der USB-C-Verbindung.
- Die dritte LED leuchtet, solange das Relais über eine Software im Mikrocontroller eingeschaltet ist.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.3 Testfall 3: Reset-Knopf Funktion

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 8.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Reset-Knopf drücken.

Erwartetes Ergebnis:

- Der Mikrocontroller setzt sich zurück.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.4 Testfall 4: Spannungsmessung an Klemme

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 1.(k)

Voraussetzung: Eine externe Spannung wird an eine Klemme angelegt.

Testschritte:

1. Spannung an einer Klemme anschließen.
2. Spannung am gegenüberliegenden Port messen.

Erwartetes Ergebnis:

- Am gegenüberliegenden Port ist die angelegte Spannung messbar.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.5 Testfall 5: Sicherung bei Überstrom (2A)

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 3. 12.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Eine Stromquelle mit 2A an eine Klemme anschließen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die zugehörige Sicherung erwärmt sich und schließt den Stromkreis.

Status: Erfolgreich und wie erwartet. Die 2A-Sicherung schaltet jedoch erst bei längerer Last, was durch eine andere Kfz-Sicherung verbessert werden kann.

6.1.6 Testfall 6: BNC-Signaldurchleitung

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 1.(j)

Voraussetzung: Ein Signal wird an den BNC-Port angelegt.

Testschritte:

1. Signal an den BNC-Port anlegen.
2. Spannung am gegenüberliegenden Port messen.

Erwartetes Ergebnis:

- Am gegenüberliegenden Port ist das angelegte Signal messbar.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.7 Testfall 7: Sicherung bei Überstrom (5V)

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 3. 12.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Einen zu hohen Strom über den 5V-Port abrufen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Sicherung der 5V-Spannungsversorgung brennt durch.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.8 Testfall 8: Sicherung bei Überstrom (3.3V)

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 3. 12.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Einen zu hohen Strom über den 3.3V-Port abrufen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Sicherung der 3.3V-Spannungsversorgung brennt durch.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.9 Testfall 9: Debugger-Funktion

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 1.(i)

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Debugger anschließen.
2. Debugging starten.

Erwartetes Ergebnis:

- Debugging ist erfolgreich möglich.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.10 Testfall 10: An/Aus-Schalter Funktion

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 9. 10. 11.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet und ein externes Netzteil ist angeschlossen.

Testschritte:

1. Den An/Aus-Schalter betätigen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die gesamte Spannungsversorgung zum Breadboard und Mikrocontroller wird unterbrochen.
- Die 3.3V-, 5V- und EXT-LED leuchten, wenn Spannung anliegt, und gehen aus, wenn der Schalter ausgeschaltet wird.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.11 Testfall 11: Dokumentation und Beschriftung der Anschlüsse

Testtyp: Designprüfung

Anforderungen: 7.

Voraussetzung: Das PCB ist fertig bestückt.

Testschritte:

1. Sichtprüfung der Beschriftungen.
2. Dokumentation überprüfen.

Erwartetes Ergebnis:

- Alle relevanten Anschlüsse sind dokumentiert und gut lesbar beschriftet.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.12 Testfall 12: Maximale Breite des PCBs

Testtyp: Designprüfung

Anforderungen: 6.

Voraussetzung: PCB ist hergestellt.

Testschritte:

1. Die Breite der Platine messen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Breite des PCBs beträgt maximal 163 mm.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.13 Testfall 13: Maximale PCB-Dicke

Testtyp: Designprüfung

Anforderungen: 14.

Voraussetzung: PCB ist hergestellt.

Testschritte:

1. Die Dicke der Platine messen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Dicke des PCBs beträgt maximal 1.6 mm.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.14 Testfall 14: Schutz gegen Überspannung

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 15.

Voraussetzung: Externes Netzteil ist angeschlossen.

Testschritte:

1. Externes Netzteil anschließen, welches zu viel Spannung liefert.
2. Überprüfen, ob das Board weiterhin funktioniert.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Überspannung führt nicht zur Zerstörung des Boards.

- Die TVS-Diode leitet die Überspannung ab.

Status: Erfolgreich bis 28V, bei einer Spannung von über 28V wurden die Spannungswandler des Boards zerstört.

Grund: Die Diode kann effektiv nicht mehr als 28V ableiten. Diese Diode sollte bei einer neuen Revision des Entwicklungsboards gegen eine Diode getauscht werden, die höhere Spannungen ableiten kann.

Größe des Problems: Da das Board auf maximal 18V ausgelegt ist und der Fehler erst bei über 28V entsteht, kann dieses Problem vernachlässigt werden und schränkt die Nutzbarkeit des Boards nicht ein.

6.1.15 Testfall 15: Schutz gegen Kurzschlüsse

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 3.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Kurzschluss in einer experimentellen Schaltung erzeugen.
2. Überprüfen, ob das Board weiterhin funktioniert.

Erwartetes Ergebnis:

- Der Kurzschluss führt nicht zur Zerstörung des Boards.
- Die Sicherung schützt die Schaltung.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.16 Testfall 16: Saubere Signalverarbeitung

Testtyp: Funktionstest

Anforderungen: 1.

Voraussetzung: Das Board ist eingeschaltet.

Testschritte:

1. Testsignal über eine experimentelle Schaltung ausgeben.
2. Ergebnis am Ausgang messen.

Erwartetes Ergebnis:

- Das Signal ist möglichst sauber und störungsfrei.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.17 Testfall 17: Belastbarkeit der Leiterbahnen

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 3. 12.

Voraussetzung: Die Überstromtests sind abgeschlossen.

Testschritte:

1. Alle Überstromtests wurden ausgeführt.
2. Überprüfen der Leiterbahnen.

Erwartetes Ergebnis:

- Die Leiterbahnen wurden durch den Überstrom nicht beschädigt.
- Status:** Erfolgreich und wie erwartet.
-

6.1.18 Testfall 18: Aufbaumöglichkeiten

Testtyp: Designprüfung

Anforderungen: 5.

Voraussetzung: Eine beliebige Schaltung ist aufgebaut

Testschritte:

1. Prüfen, ob der Versuchsaufbau unübersichtlich geworden ist.

Erwartetes Ergebnis:

- Durch die Nutzung der Klemmen und Verbinder sollte ein übersichtlicher Versuchsaufbau entstanden sein.

Status: Erfolgreich und wie erwartet.

6.1.19 Testfall 19: Wärmeentwicklung

Testtyp: Sicherheitstest

Anforderungen: 13.

Voraussetzung: Es wird eine hohe Stromstärke innerhalb der Spezifikationen abgefragt.

Testschritte:

1. Prüfen, ob an Komponenten, die warm werden, ein Warnzeichen angebracht ist.
2. Überprüfen, wie warm die Komponenten werden.

Erwartetes Ergebnis:

- An den Stellen, an denen es warm wird, ist ein Warnzeichen angebracht.

Status: Die Spannungswandler werden warm, aber nicht so warm, dass man sich verbrennen kann. Da aber das Warnzeichen nicht wie erwartet vorhanden ist, wurden zur Sicherheit zusätzliche Kühlkörper angebracht.

6.2 Testliste Software

Um einen Überblick über die getesteten Anforderungen innerhalb der Softwaretests zu bekommen, wurde eine Tabelle mit den Testabdeckungen der Anforderungen erstellt. In dieser ist erkennbar, welcher Test welche Anforderung überprüft.

Test	Anforderungen
DAC_ADC_TEST	1.(g) 1.(h) 1.(f)
ENC_TEST	1.(e) 1.(f)
GPIO_TEST	1.(d)
I2C_BMP280	1.(c)
LED_BLINK	1.(a)
PWM_TEST	1.(f)
RELAI_BLINK	1.(a)
SPI_TEST	1.(b) 1.(h) 1.(f)

Table 4: Testabdeckung der Anforderungen

6.2.1 Testfall 1: DAC_ADC_TEST

Nach dem Ausführen des DAC-ADC-Tests kann man auf dem Oszilloskop folgendes Ergebnis sehen.

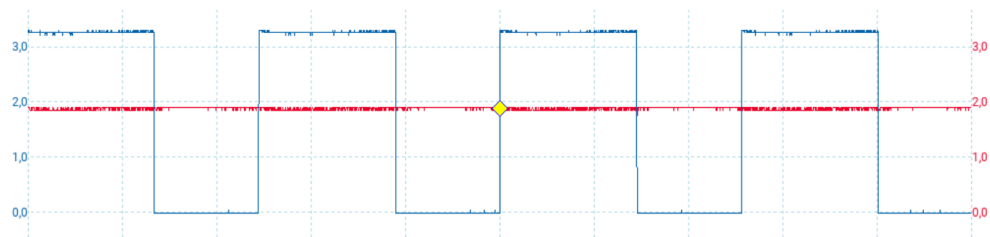


Figure 26: Ergebnis des DAC-ADC Tests

Auf dem Bild ist ein analoges Signal (rot) zu erkennen, das vom ADC eingelesen wurde und als PWM-Signal (blau) wieder ausgegeben wurde. Bei ungefähr 1.8V, was etwas mehr als der Hälfte der möglichen Spannung entspricht, wird eine PWM-Modulation von etwas über 50 % erkennbar. Dieser Test ist somit erfolgreich und das Board verhält sich wie erwartet.

6.2.2 Testfall 2: ENC_TEST

Nach dem Start dieses Tests kann man an einem angeschlossenen Encoder drehen und erhält folgendes Ergebnis.

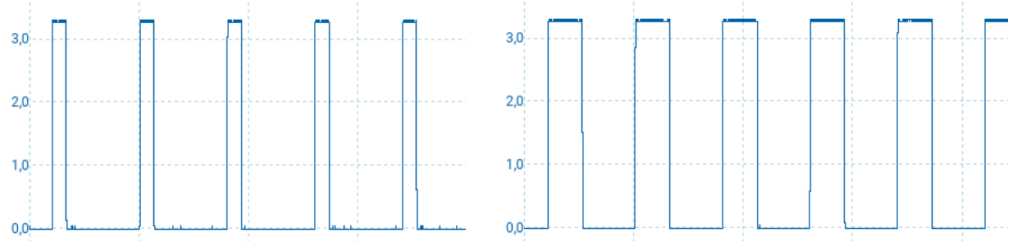


Figure 27: Ergebnis des Encoder-Tests

Auf dem Bild ist das Signal links vor dem Drehen am Encoder und rechts nach dem Drehen des Encoders nach rechts zu sehen. Erkennbar ist, dass das PWM-Signal jetzt länger eingeschaltet ist und dass sich die On-Board-LED in der Helligkeit erhöht hat. Somit ist dieser Test erfolgreich und das ModExpES arbeitet wie erwartet mit dem Encoder zusammen.

6.2.3 Testfall 3: GPIO_TEST

Das Ergebnis des GPIO-Tests zeigt, dass alle GPIO-Pins wie erwartet funktionieren. Nachdem eine LED an den Ausgangspins des Boards angeschlossen wurde, blinkt die LED gemäß der getesteten Schaltung. Dies bestätigt, dass alle GPIO-Anschlüsse korrekt arbeiten.

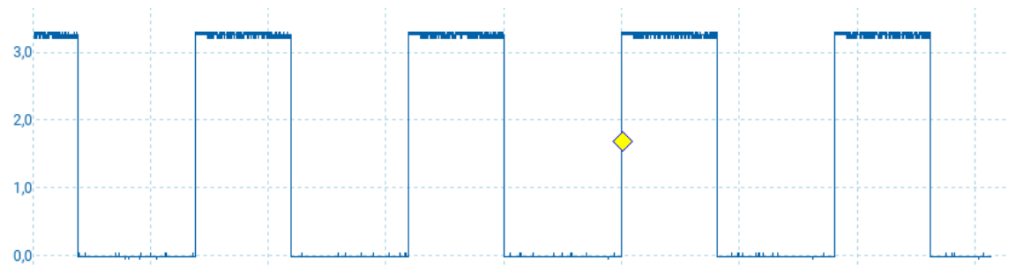
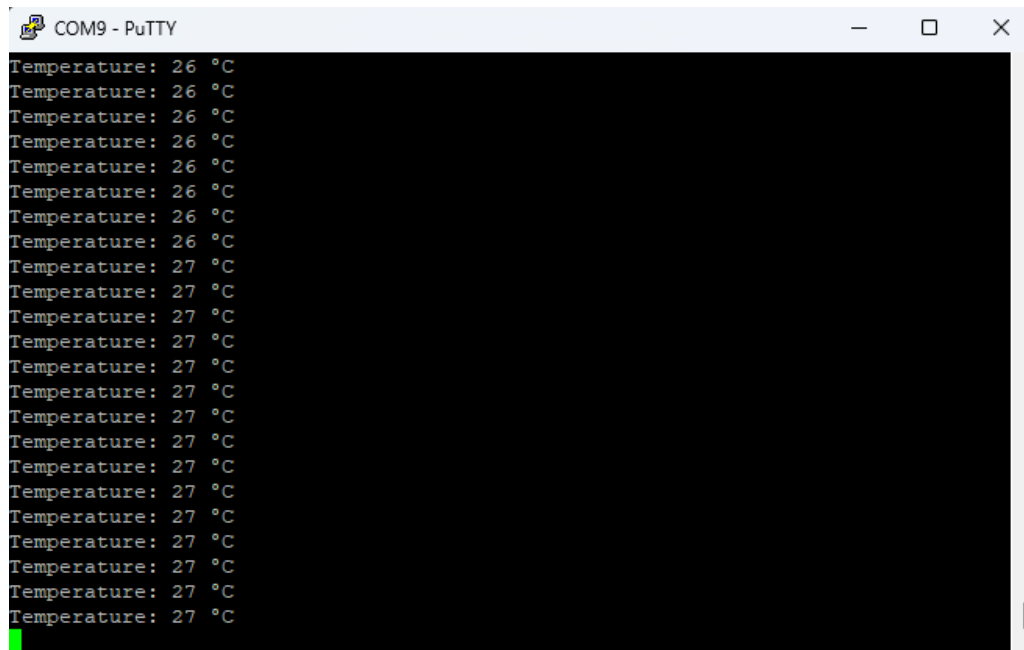


Figure 28: Ergebnis des GPIO-Tests

Auf dem Oszilloskop ist ebenfalls erkennbar, wie sich der GPIO-Port an- und ausschaltet.

6.2.4 Testfall 4: I2C_BMP280

Nachdem die Software auf das Board geladen wurde, kann man sich direkt mit dem neu geöffneten COM-Port mit dem ModExpES verbinden. Nachdem man diese Verbindung geöffnet hat, kann man folgende Ausgabe sehen.



```
COM9 - PuTTY
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 26 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
Temperature: 27 °C
```

Figure 29: Ergebnis des I2C_BMP280-Tests

Sobald man den Temperatursensor mit dem Finger oder ähnlichem erwärmt, ist erkennbar, wie die Temperatur, die ausgegeben wird, steigt. Somit funktioniert die Kommunikation sowie die Ausgabe wie erwartet.

6.2.5 Testfall 5: LED_BLINK

Dieser Test lässt die On-Board-LED des ModExpES mit einer Frequenz von 1 Hz blinken, was nach dem Starten der Software wie erwartet funktioniert.

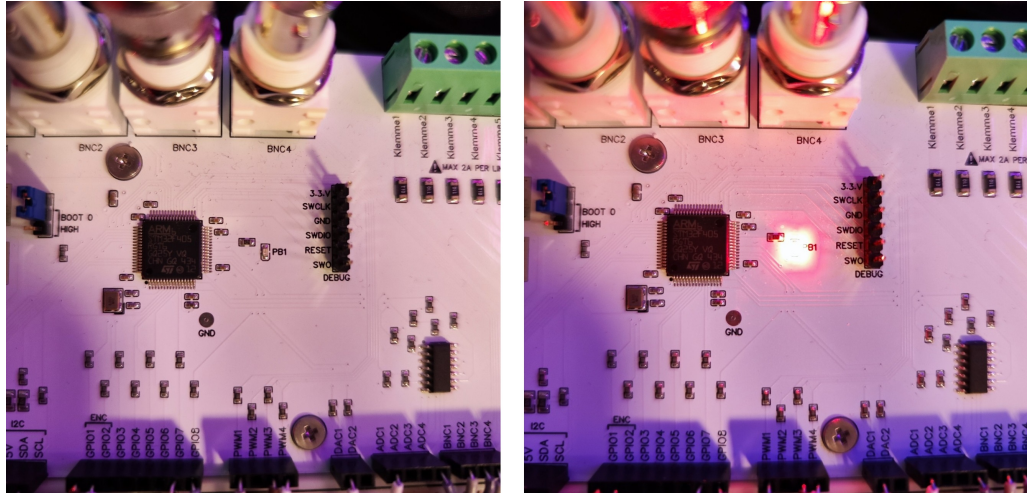


Figure 30: Ergebnis des LED-Tests

6.2.6 Testfall 6: PWM_TEST

Dieser Test prüft die Funktionalität der PWM-Schnittstellen. Der Mikrocontroller gibt ein PWM-Signal mit einer Modulation von 0% bis 100% auf den PWM-Ports aus, sodass überprüft werden kann, ob diese wie erwartet funktionieren. Da auf dem Oszilloskop eine Modulation von 0% bis 100% erkennbar ist, funktionieren die PWM-Ports wie erwartet.

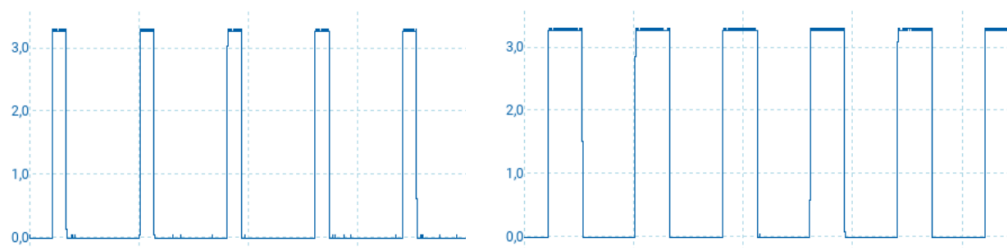


Figure 31: Ergebnis des PWM-Tests

6.2.7 Testfall 7: RELAI_BLINK

Als Ergebnis sollte das Relais alle 500ms umgeschaltet werden. Dies war deutlich hörbar, und die LED für die externe Spannungsversorgung ging ebenfalls an und aus, was signalisierte, dass das Relais die externe Spannungsversorgung zum Breadboard ein- und ausschalten kann.

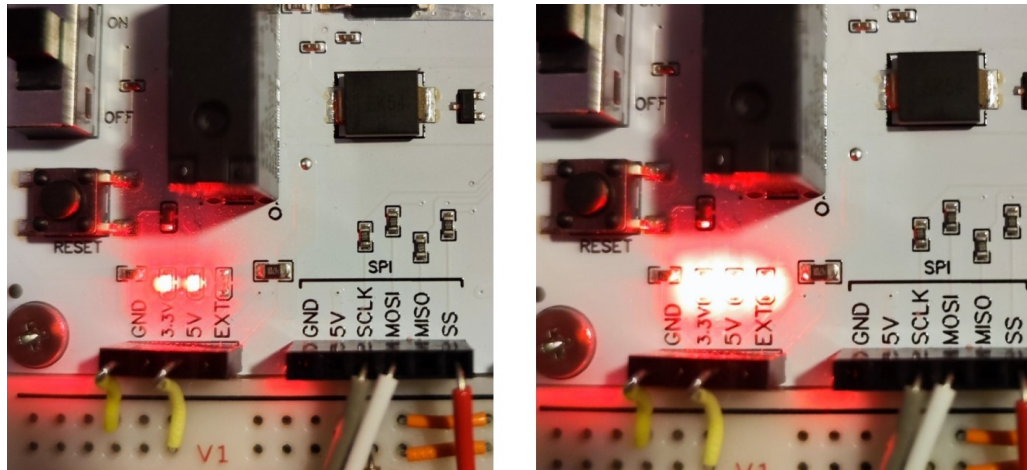


Figure 32: Ergebnis des Relai-Tests

Der Test war somit erfolgreich und die Schaltung funktioniert fehlerfrei.

6.2.8 Testfall 8: SPI_TEST

Dieser Test hatte zwei Ziele: Zum einen sollte die SPI-Kommunikation geprüft werden, und zum anderen sollte getestet werden, ob der ADC Spannungen im Bereich von 0V bis 5V korrekt einlesen kann.

Der SPI-Kommunikationstest war erfolgreich, da der über SPI angebundene DAC ein analoges Signal von 0V bis 5V erzeugt hat. Beim Einlesen des Signals war jedoch erkennbar, dass der Operationsverstärker nicht über 4V verstärkt hat. Eine genaue Erklärung für dieses Verhalten kann ich nur mit der Betriebsspannung von 5V begründen. Videos zu diesem Verhalten sind im Verzeichnis “Bilder/Testergebnisse” zu finden.

Unabhängig von diesem Problem war der restliche Test jedoch erfolgreich, und es wurde ein PWM-Signal entsprechend der Signalstärke des analogen Signals erzeugt.

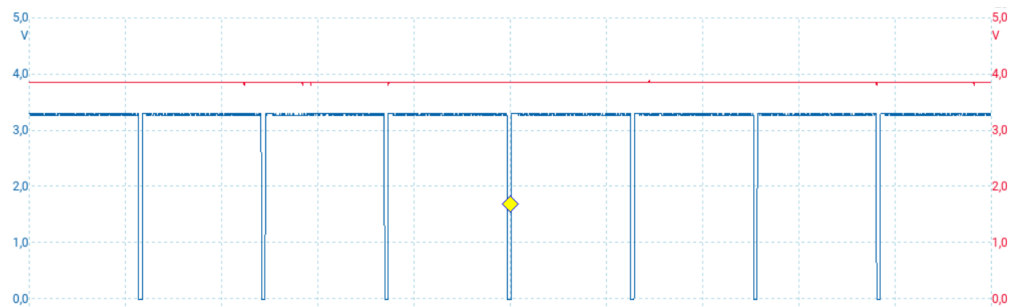


Figure 33: Ergebnis des SPI-Tests

Zu erkennen ist, dass das PWM-Signal bei 4V schon fast bei 100% liegt. Es hat sich nach Überschreiten der 4V auch nicht mehr verändert, da für den Mikrocontroller das Maximum erreicht war.

6.3 Probleme während der Entwicklung

Was mich etwas aus der Bahn geworfen hat, war ein Problem mit einem externen Netzteil, dessen Defekt ich zunächst nicht bemerkt hatte. Dieser Defekt führte dazu, dass die 5V-Spannungswandler von zwei Boards durchbrannten. Beim ersten Durchbrennen nahm ich fälschlicherweise an, dass es sich um einen Boarddefekt handelte, da es mein Testboard war. Nachdem jedoch auch ein zweites Board betroffen war, konnte ich diesen Verdacht ausschließen. Als ich das Netzteil durchgemessen habe, stellte ich fest, dass es anfangs einen 200V-Peak ausgab und zudem nicht die angegebenen 12V lieferte, sondern teilweise sogar 80V. Das hat meinen 5V-Spannungswandler natürlich zerstört. Glücklicherweise benötigen die betroffenen Boards lediglich einen neuen 5V-Spannungswandler, da der 3.3V-Spannungswandler hinter den 5V-Spannungswandler geschaltet ist. Durch diesen Sicherheitsmechanismus blieb der 3.3V-Spannungswandler unbeschädigt, sodass das Board weiterhin uneingeschränkt über USB-C genutzt werden kann.

Dieses Problem führt mich zu meinem ersten Verbesserungspunkt: Wie in 6.1.14 Testfall 14 erkennbar wurde, ist das Board nicht perfekt gegen Überspannung geschützt. In einer zukünftigen Version würde ich daher mehr Aufmerksamkeit in den Überspannungsschutz legen und diesen gezielt verbessern.

Ein weiterer kleiner kosmetischer Punkt ist, dass das ‚Achtung Warm‘-Zeichen bei den Spannungswandlern nicht sichtbar ist, da an dieser Stelle kein Silkscreen mehr vorhanden ist, weil die Fläche freigelegt wurde. In den 3D-Ansichten war das Symbol sichtbar, weshalb ich fälschlicherweise annahm, dass es automatisch invertiert wird. Da die Spannungswandler jedoch mit einem zusätzlichen Kühlkörper ausgestattet sind und somit kaum warm werden, ist es quasi unmöglich, sich daran zu verbrennen, sodass dies kein wirkliches Problem darstellt.

Dazu ist mir beim Experimentieren aufgefallen, dass sich eine Schraube gelöst hat. Ob sie anfangs nicht richtig fest war oder sich später gelöst hat, kann ich leider nicht sagen. Sollte dies jedoch häufiger vorkommen, lässt sich dieses Problem mit etwas Loctite leicht beheben.

Zuletzt möchte ich noch auf das SPI-Problem eingehen, welches während der Softwaretests aufgefallen ist. Dieses Problem kann durch die Wahl eines anderen Operationsverstärkers gelöst werden. Es wäre ebenfalls möglich, den Operationsverstärker mit einer höheren Spannung zu versorgen, allerdings müsste in diesem Fall für die Nutzung des analogen Eingangs ein externes Netzteil angeschlossen werden.

7. Evaluation

Die in den Anforderungen festgelegten Ziele konnten bis auf kleine Ausnahmen vollständig umgesetzt werden. Durch die Hardwaretests konnte verifiziert werden, dass alle gewünschten Sicherheitsaspekte des Boards vorhanden sind. Die Hardwaretests bestätigten, dass die getroffenen Designentscheidungen stabil funktionieren und die Schnittstellen wie erwartet angesprochen werden können. Der einzige Test, welcher nicht perfekt abgeschlossen werden konnte, war der Testfall 14, der gezeigt hat, dass der 5V-Spannungswandler bei über 10V, der maximalen Betriebsspannung, zerstört wird. Wünschenswert wäre natürlich, dass dies nicht passiert wäre, aber da 28V ungefähr 55% über der maximal vorgesehenen Betriebsspannung liegen, ist dies vernachlässigbar. Die Softwaretests zeigen ebenfalls, dass jede Funktionalität aus den Anforderungen an ein externes Breadboard weitergegeben werden kann, bis auf die Anforderung, dass die analogen Eingänge von 0V bis 5V lesen können. Man kann zwar, wie der Softwaretest 8. zeigt, ohne Probleme 5V anlegen, jedoch werden nur bis 4V am Mikrocontroller messbar sein. Dies schränkt jedoch die Funktionalität des Boards nicht erheblich ein, da man jedes Signal herunterskalieren kann. Zwar geht durch die Skalierung eine Reduzierung der Auflösung einher, konkret etwa 20% der ursprünglichen Auflösung, jedoch bleibt das Signal in einem nutzbaren Bereich. Während dieser Entwicklung konnten einige Probleme identifiziert werden, die unter 6.3 “Probleme während der Entwicklung” diskutiert wurden. Diese wurden teilweise jedoch schon im Laufe des Projekts behoben, sodass sich das erstellte Design durch die Hardware- und Softwaretests bewährt hat. Im Laufe dieser Diskussion wurden dort ebenfalls schon Verbesserungen vorgeschlagen, damit zukünftige Weiterentwicklungen an diesen Stellen ansetzen können. Zusammenfassend konnte das Hauptziel des Projekts, ein robustes und sicheres PCB für die Verwendung mit externen Schaltungen zu entwickeln, erfolgreich erreicht werden. Darüber hinaus wurde die Langlebigkeit des Produkts durch gezielte Designentscheidungen wie die Nutzung von Autosicherungen gefördert, sodass es auch langfristig für den Endanwender, in diesem Fall die Hochschule, nutzbar bleibt.

8. Anhänge

8.1 Schaltbild

8.2 Frontansicht PCB

8.3 Rückseite PCB

8.4 Technische Zeichnung der Montageplatte