

Entwicklung eines Aufnahme- und Wiedergabegerätes für DMX-Daten

Bachelorabschlussarbeit

von

Felix Bauer

Im Studiengang B.Eng Elektrotechnik/Informationstechnik
mit Schwerpunkt Mess- und Automatisierungstechnik

an der HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminden/Göttingen
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Gesundheit in Göttingen



Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Roman Grothausmann
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Tobias Bürmann

15. August 2021

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe. Alle fremden, öffentlichen Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass ich für die Quellen Dritter in dieser Arbeit die Nutzungsrechte zur Verwendung in dieser Arbeit benötige. Weiterhin versichere ich, dass diese Abschlussarbeit noch keiner anderen Prüfungskommission vorgelegen hat.

Göttingen, den Unterschrift
.....

Erklärung zu Nutzungsrechten und Verwertungsrechten^①

Ich bin hiermit einverstanden,
dass von meiner Abschlussarbeit (ggf. nach Ablauf der Sperre) 1 Vervielfältigungsstück erstellt werden kann, um es der Bibliothek der HAWK zur Verfügung zu stellen und Dritten öffentlich zugänglich zu machen.

Ich erkläre, dass Rechte Dritter der Veröffentlichung nicht entgegenstehen.

Göttingen, den Unterschrift
.....

Sperrvermerk der Abschlussarbeit

[] NEIN*

JA / Dauer der Sperre: [] 3 Jahre* [] 5 Jahre*

Göttingen, den Unterschrift
.....

* Zutreffendes bitte ankreuzen

① Dadurch räumen Sie der HAWK ein einfaches, zeitlich unbeschränktes, unentgeltliches Nutzungsrecht nach §§ 15 Abs. 2 Nr. 2, 16, 17, 19a, 31 Abs. 2 UrhG ein.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	2
2 Gegenstand und Ziel der Arbeit	3
3 Hardware	4
3.1 Schaltungsprinzip	4
3.2 STMicroelectronics STM32F446ZE	5
3.3 Maxim Integrated MAX14945EWE+ RS485 Treiberchip	7
3.4 Encoder	8
3.5 Liquid Crystal Display (LCD)	10
3.6 LED	10
3.7 Spannungsversorgung	11
3.8 Autodesk EAGLE	13
3.9 Platinendesign	14
3.10 Gehäusedesign	16
4 Software	19
4.1 STMicroelectronics CubeMX	19
4.2 STMicroelectronics CubeIDE	19
4.3 Taster	19
4.4 Encoder	20
4.5 Aufnahme eines DMX-Datenpaketes	21
4.6 Ausgabe eines DMX-Datenpaketes	23
4.7 Aufnahmefunktionen	25
4.7.1 Endlos	25
4.7.2 Feste Aufnahmezeit	25
4.7.3 Step-Aufnahme	25
4.8 Wiedergabefunktionen	25
4.9 LED	25
4.10 LCD	25
4.11 SD-Karte (SDIO)	25
4.12 Menü	25
A EAGLE	28
B CD-Anhang	28

1 Einleitung

2 Gegenstand und Ziel der Arbeit

Gegenstand und Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines für den Endbenutzer ausgelegten Gerätes zur Aufnahme und Wiedergabe von DMX-Daten. Die Entwicklung umfasst das Erstellen einer entsprechenden elektrischen Schaltung, das Planen und Herstellen einer zugehörigen Platine, sowie das Bestücken dieser. Die Platine soll in einem passenden Gehäuse eingebaut werden. Außerdem wird eine Software entwickelt, die zum einen die Aufnahme und Wiedergabe der DMX-Daten ermöglicht und zum Anderen eine Benutzerschnittstelle bildet mit der der Benutzer das Gerät möglichst intuitiv bedienen kann. Grundlegende Funktionsprinzipien sind bereits in der vorangegangenen Bachelorpraxisprojektarbeit aufgezeigt worden [1], welche in dieser Arbeit weiterentwickelt und erweitert werden.

Folgende Haupt- und Nebenanforderungen sind für die Entwicklung definiert.

Hauptanforderungen:

- Möglichkeit mehrere Aufnahmen anzulegen
- Einstellbare Aufnahmezeit
- Aufnahme eines DMX-Stroms und -Standbildern
- Benutzeroberfläche mit Display und Menüführung
- Maßgeschneidertes Platinendesign
- Gehäuse
- Handliche Größe

Nebenanforderungen:

- Intuitive Benutzbarkeit
- Optisch ansprechendes Design des Gehäuses
- Optimierung des Speicherbedarfs auf der SD-Karte
- Möglichkeit die Wiedergabegeschwindigkeit während der aktiven Wiedergabe zu ändern

3 Hardware

3.1 Schaltungsprinzip

In diesem Kapitel wird auf das grundlegende Prinzip der Schaltung eingegangen. Auf die einzelnen Komponenten und deren nötige Beschaltung wird in den folgenden Kapiteln eingegangen. Generell wird bei der Entwicklung der Schaltung darauf geachtet, dass möglichst keine fertigen Modulbausteine verwendet werden. Dadurch ergibt sich in der Regel ein Preisvorteil und das industrielle Bestücken einer Platine ist einfacher. Abbildung 1 zeigt das grundlegende Prinzip der Schaltung. Auf der linken Seite steht der Benutzer des Gerätes, der das Gerät durch Eingaben bedienen kann und entsprechende Rückmeldungen erhält. Die grüne Fläche spiegelt das Gerät wieder, welches mit der DMX-Quelle, bzw. der DMX-fähigen Lichttechnik kommuniziert. Im Folgenden wird auf die Bestandteile des Gerätes eingegangen.

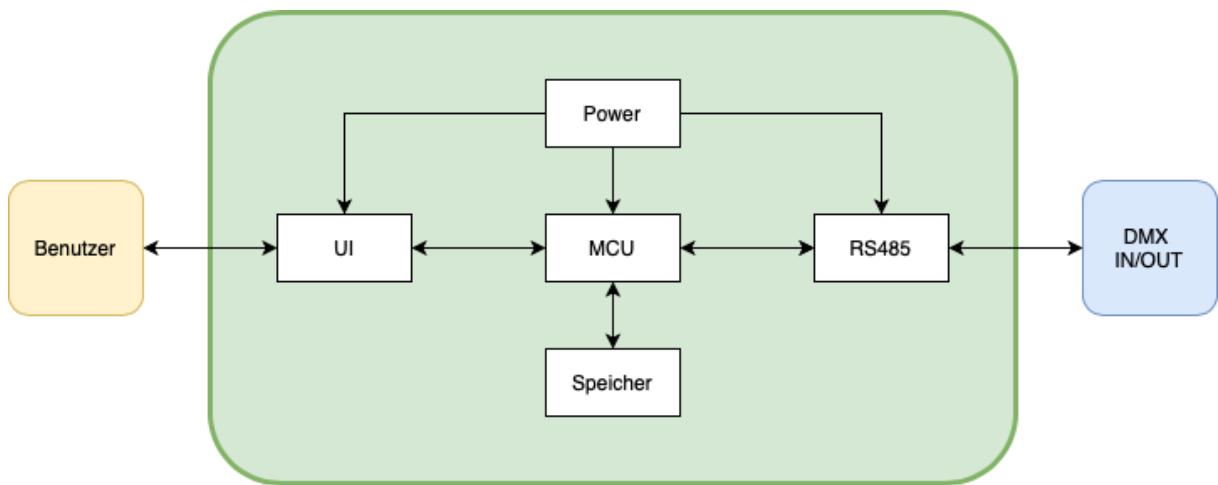


Abbildung 1: Schaltungsprinzip

Mikrocontroller (MCU)

Der MCU bildet das Herzstück der Schaltung, über den sämtliche Kommunikation für die Benutzerschnittstelle, den DMX-Ein- und Ausgang und die SD-Karte läuft. Aufgrund der hohen Anforderungen an den MCU wird bei der Entwicklung ein besonderes Augenmerk auf ihn gelegt. Die Auswahl des MCUs richtet sich an dem in der vorangegangenen Praxisprojektarbeit verwendeten Mikrocontroller. Auswahlkriterien sind eine mindestens gleichhohe Taktfrequenz des Prozessors, eine verfügbare UART-Schnittstelle, eine SDIO-Schnittstelle und mindestens drei Timer.

Spannungsversorgung (Power)

Die Spannungsversorgung für alle Komponenten wird von einer USB Schnittstelle geliefert, welche keine Daten überträgt. Über die USB-Schnittstelle werden 5V geliefert (Quelle), welche dann in entsprechend benötigte Spannungen gewandelt werden. Besonders kritisch ist die Versorgung des MCUs. Unter normalen Betriebsbedingungen darf die Versorgungsspannung nur soweit einbrechen, dass der MCU weiterhin den darauf befindlichen Programmcode fehlerfrei ausführen kann.

Benutzerschnittstelle (UI)

Damit der Benutzer das Gerät bedienen kann, ist ein Informationsfluss in zwei Richtungen erforderlich. Zum einen müssen Eingaben durch den Benutzer erfasst werden, zum anderen muss das Gerät dem Benutzer eine Rückmeldung ausgeben können. Für die Benutzereingaben werden Taster und ein Drehgeber (Encoder) verwendet. Durch den Einsatz von Tastern können präzise und zeitgenaue Eingaben vom Benutzer vorgenommen werden, an Stellen an denen es nötig ist, zum Beispiel beim starten einer Wiedergabe. Der Encoder hingegen bietet die Möglichkeit viele Eingaben in kurzer Zeit zu tätigen, zum Beispiel wenn die Aufnahmezeit eingestellt wird.

RS485

Die RS485-Schnittstelle ist die Verbindung zwischen DMX-Quelle/Senke und dem MCU, welche notwendig ist, da der MCU keine RS485 konformen Signalpegel liefern kann. Zudem werden durch die Schnittstelle die DMX-Leitungen galvanisch von der restlichen Schaltung getrennt. Spannungs- und Stromspitzen ausgehend von den DMX-Leitungen können so die Schaltung nicht beeinträchtigen oder beschädigen.

Speicher (SD-Karte)

Damit ein sinnvoller Einsatz des Gerätes möglich ist, ist es notwendig die aufgenommenen Daten auf einem Speichermedium zu sichern und diese nach einem Neustart des Gerätes nach wie vor verfügbar sind. In der vorangegangen Praxisprojektabreit wurde bereits gezeigt, dass der Einsatz einer SD-Karte für diesen Zweck geeignet ist. Die Verwendung einer SD-Karte ermöglicht dem Benutzer außerdem eine gewisse Sicherheit in Bezug auf den Schutz der Daten. Sollte ein Gerät einen Defekt aufweisen, so kann einfach ein neues Gerät mit der bereits beschriebenen SD-Karte bestückt werden. Zudem können für verschiedene Einsatzgebiete auch verschiedene SD-Karten verwendet werden.

3.2 STMicroelectronics STM32F446ZE

Aufgrund der aktuellen Corona-Pandemie und einer damit einhergehenden Siliziumchip-Knappheit wird für die Entwicklung ein anderer Mikrocontroller als in der Praxisarbeit verwendet. Die Eckdaten beider Mikrocontroller sind sich trotzdem sehr ähnlich. Abbildung 2 zeigt die Pinbelegung des Chips. Insgesamt stehen 114 interruptfähige Ein- und Ausgangsports, von denen 112 5 V Tolerant sind und bis zu 20 Schnittstellen zur Verfügung. Der interne 512 Kbytes große Flash-Speicher und 128 Kbyte SRAM bieten genügend Kapazität für komplexeren Programmcode, sowie genügend Platz für Heap und Stack. Der STM32F446ZE arbeitet mit einer maximalen Taktfrequenz von 180MHz und basiert auf einem *Arm[®]* 32-bit Cortex[®]-M4 Prozessor [2, s. 1].

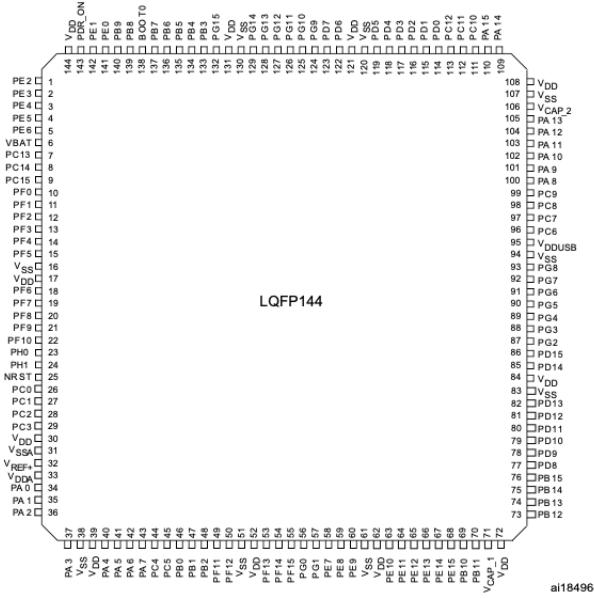


Abbildung 2: STMicroelectronics STM32F446ZE Mikrocontroller Pinout [2, S. 41]

Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung des MCUs ist besonders kritisch, da eine einbrechende Spannung zu Fehlern bei der Ausführung des Programmcodes oder sogar zum kurzzeitigen Ausfall des MCUs führen kann. Bei steigenden Schaltfrequenzen des MCUs wirken die Leiterbahnen auf der Platine induktiv, wodurch möglicherweise nicht schnell genug genügend Strom geliefert werden kann, was zu einem Einbruch der

Spannung führen kann. Um dem entgegenzuwirken werden sogenannte Stützkondensatoren möglichst nah an den Versorgungsspannungs-Pins (V_{DD} und V_{SS}) des MCUs plaziert. Benötigt der MCU kurzzeitig einen großen Strom, so entlädt sich der Kondensator. Durch die kurze Distanz zum MCU muss der Strom über eine kürzere Strecke der Leiterbahn fließen, was eine niedrige Induktivität bedeutet. Im Datenblatt [3] des MCUs kann die Dimensionierung der Stützkondensatoren entnommen werden. Insgesamt werden elf Pin-Paare, bestehen aus V_{DD} (3,3 V) und V_{SS} (0 V) mit $0,1 \mu\text{F}$ Kondensatoren parallel verbunden.

Taktgeber (Clock)

Der MCU verfügt über einen internen hochgeschwindigkeits-Oszilator *High-Speed-Internal-Clock* (HSI) und einen niedergeschwindigkeits-Oszilator *Low-Speed-Internal-Clock* (LSI). Die HSI schwingt mit einer Frequenz von 16 MHz und ist werkseitig auf eine Abweichung der Schwingfrequenz von einem Prozent kalibriert. Um die maximale Taktfrequenz des Prozessors zu erreichen wird eine interne Phasenregelschleife (PLL) eingesetzt. Durch die PLL kann ein Vielfaches der Oszilatorfrequenz erzeugt werden, wobei die Stabilität der Schwingung nicht eingeschränkt wird [4, S. 270]. Eine weitere Möglichkeit die Taktfrequenz zu generieren, ist die Verwendung eines externen Oszillators (HSE). Der in dieser Arbeit verwendete externe Quarz schwingt mit einer Frequenz von 25 MHz und hat dabei eine Genaigkeit von 30 ppm. Das entspricht einer maximalen Abweichung von ca. $30 * 10^{-6} \%$, also einer deutlich geringeren Abweichung im Vergleich zum internen Oszilator. Da für die Aufnahme und Wiedergabe der DMX-Daten möglichst genaue Zeitabstände benötigt werden, wird der externe Quarz verwendet.

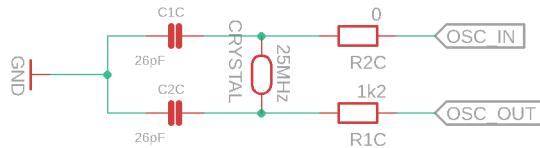


Abbildung 3: Beschaltung Quartz

Abbildung 3 zeigt die Beschaltung des externen Quartzes. Er wird parallel zu dem Eingang *OSC_IN* und dem Ausgang *OSC_OUT* des MCUs geschaltet. Zwischen dem Ein- und Ausgang des MCUs befindet sich ein integriertes *Nicht-Gatter* (Inverter) [5, S. 11], welcher bei einem Schaltvorgang hohe Ströme ausgeben kann. Damit kein Schaden am Quarz und MCU entsteht, wird der maximal fließende Strom durch den Widerstand $R1C$ begrenzt. Der Quarz wird mithilfe von zwei Lastkapazitäten mit dem 0 V Potential verbunden. Der Wert der Kapazitäten C_{L1} und C_{L2} lässt sich mit folgender Formel berechnen.

$$C_L = \frac{C_{L1} * C_{L2}}{C_{L1} + C_{L2}} + C_s [5, S.12] \quad (1)$$

C_L wird vom Hersteller des Quartzes vorgegeben und beträgt in diesem Fall 18 pF. C_s ist die Kapazität der Lötstellen und Leiterbahnen zwischen dem Quarz und dem MCU, welche mit 5 pF angenommen wird. Um möglichst wenig verschiedene Bauteile verwenden zu müssen, erhalten in der Regel die Kapazitäten C_{L1} und C_{L2} die gleiche Wertigkeit, wodurch die Formel wie folgt vereinfacht werden kann.

$$C_{L1} = C_{L2} = 2(C_L - C_s) \quad (2)$$

Laut der Formel müssen C_{L1} und C_{L2} eine Kapazität von 27 pF aufweisen. Da Kondensatoren mit dieser Kapazität nur schwer erhältlich sind wird eine marktüblichere Kapazität von 27 pF verwendet.

Serial Wire Debug-Schnittstelle (SWD)

Im Auslieferungszustand des MCUs befindet sich keine Software auf diesem. Mit einem Entwicklungsbrett, wie es in der Praxisarbeit verwendet wurde, kann eine Software einfach über eine USB-Schnittstelle

auf den MCU übertragen werden, da auf dem Entwicklungsboard ein sogenannter *programmer* verbaut ist. Das in der Praxisarbeit verwendete Entwicklungsboard bietet die Möglichkeit einen Teil der Platine abzutrennen und als eigenständigen *programmer* zu verwenden mit dem die Software mithilfe der *Serial Wire Debug*-Schnittstelle (SWD-Schnittstelle) auf den MCU übertragen werden kann. Die SWD-Schnittstelle ermöglicht das Übertragen der Software und das Debuggen¹ des Codes während der Laufzeit. Für die Datenübertragung zwischen MCU und PC werden nur zwei Verbindungen (SWD und SWCK) benötigt. Über die Leitung SWD werden die Daten gesendet wohingegen die Leitung SWCK den Takt des Datenstroms angibt. Soll ein neues Programm auf den MCU übertragen werden, so muss er zunächst in einen speziellen Modus versetzt werden, um den Programmspeicher beschreiben zu können. Dazu muss der MCU neugestartet werden und beim Start des MCU am *BOOT0*-Pin ein High-Pegel anliegen. Nun kann der Programmcode heruntergeladen werden. Sobald die Übertragung vollständig ist, muss der MCU ein weiteres Mal neugestartet werden um den Programmcode auszuführen, jedoch muss beim Start nun ein Low-Pegel am *BOOT0*-Pin anliegen. Das Anlegen der entsprechenden Pegel am *BOOT0*-Pin sowie der Neustart kann per Hand durchgeführt werden, jedoch kann diese Aufgabe auch von dem *programmer* übernommen werden. Dafür müssen zwei weitere Verbindungen für den *BOOT0*-Pin und *NRST*-Pin vorhanden sein. Zuletzt ist außerdem eine Verbindung des 0 V-Potentials notwendig da es sich bei allen Signalen um spannungsbezogene Signale handelt. Optional kann der MCU mit einer weiteren Verbindung vom *programmer* mit 3,3 V Spannung versorgt werden.

NRST- und *BOOT0*-Pin

Unter den 144 Pins des MCUs befinden sich unter anderem, wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, der *NRST*- und *BOOT0*-Pin. Beide Pins sind mit externen Tastern beschaltet um Fehler bei den Verbindungen zwischen MCU und *programmer* zu kompensieren. Außerdem kann das Programm mit dem Betätigen eines Tasters neugestartet werden, was bei der Programmierung angenehm ist. Für den verkaufsfertigen Zustand des Gerätes werden die Taster allerdings nicht mehr benötigt und können einfach weggelassen werden.

3.3 Maxim Integrated MAX14945EWE+ RS485 Treiberchip

Für das Senden und Empfangen von DMX-Daten wird eine galvanisch getrennte RS485-Schnittstelle benötigt [1, s.6-8]. Der Einsatz von einzelnen Optokopplern und einem RS-485-Treiberchip, wie in der vorangegangenen Praxisarbeit, benötigt viel Platz auf der Platine und bietet ein hohes Fehlerpotential, da insgesamt vier ICs auf die Platine aufgebracht werden müssen. Potentielle Fehlerquellen sind eine hohe Anzahl an Lötstellen der ICs und dessen Beschaltung, sowie die Leiterbahnen zwischen den einzelnen Komponenten. Jedes Stück Leiterbahn kann Störungen in den Rest der Schaltung streuen, was zu Fehlern in kritischen Teilen der Schaltung führen kann, beispielsweise der SD-Karte. Die Lösung dieses Problems ist der intern galvanisch getrennte Treiberchip *MAX14945EWE+* der Firma *Maxim Integrated*. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau des Treiberchips inklusive dessen typischer Beschaltung. Im blau markierten Bereich befindet sich die galvanische Trennung des Chips. Die gestrichelte Linie in der Mitte markiert die Trennung der Seiten *A* und *B*. Die Funktionen der Pins können Tabelle 1 entnommen werden. Die linke Seite (*A* Seite) ist dem Mikrocontroller zugewendet und wird mit dem 5 V Potential der USB-Schnittstelle versorgt und mit einem 0,1 μ F und 1 μ F Kondensator in Parallelschaltung gestützt. Die Kondensatoren sollen laut Datenblatt möglichst nah am Treiberchip platziert werden. Pin *TXD* wird mit dem Ausgang, Pin *RXD* mit dem Eingang der UART-Schnittstelle des MCUs verbunden. Zum aktivieren des Senders oder Empfängers des Treibers muss ein entsprechender Logikpegel an den Pins *DE* und *RE* anliegen. Da die Logik des Pins zum aktivieren und deaktivieren des Empfängers invertiert ist, können beide Pins kurzgeschlossen werden und mit einem Ausgang des MCUs verbunden werden. Ein interner pulldown-Widerstand an beiden Pins ermöglicht die direkte Verbindung zum MCU ohne

¹Analyse und Fehlerbehebung von Programmcode

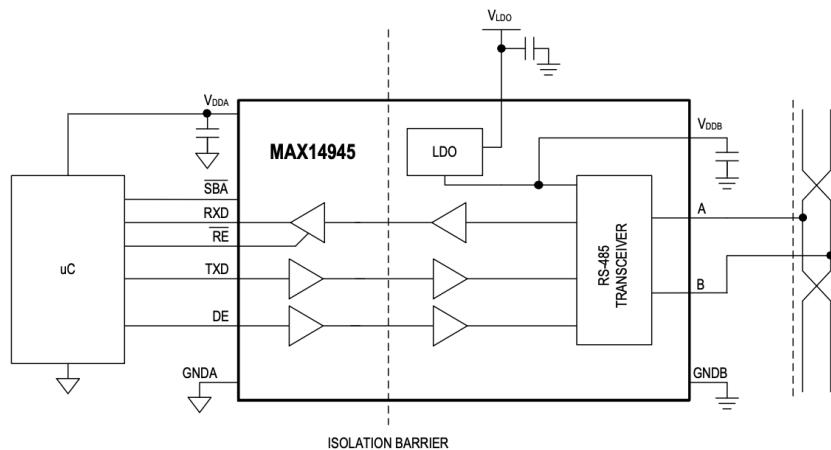


Abbildung 4: MAX14945EWE+ Typical Application Circuit [6, s.19]

weitere Beschaltung. Die rechte Seite (*B* Seite) des Treiberchips muss um die galvanische Trennung zu gewährleisten mit einer entsprechend getrennten Spannungsquelle versorgt werden. Diese wird mithilfe eines DC/DC Konverters, der die von der USB-Schnittstelle eingehenden 5 V isoliert und am Ausgang wieder ausgibt [7]. Um eine möglichst stabile Spannungsquelle zu gewährleisten wird der im Treiberchip interne *low – dropout*-Spannungsregler verwendet, wodurch Pin V_{DDB} als Ausgang der stabilisierten Spannung fundiert. Pin V_{DDB} und V_{LDO} werden mit jeweils einem $0,1 \mu\text{F}$ und paralegeschaltetem $1 \mu\text{F}$ Kondensator mit $GNDB$ verbunden.

Pin	Funktion
TXD	serieller Dateneingang
RXD	serieller Datenausgang
DE	1: Sender aktivieren, 0: Sender deaktivieren
\overline{RE}	1: Empfänger deaktivieren, 0: Empfänger aktivieren
SBA	1: <i>B</i> Seite inaktiv, 0: <i>B</i> Seite funktionsfähig
$A \& B$	symmetrischer Treiberausgang
$V_{DDA} \& GNDA$	Spannungsversorgung <i>A</i> Seite
$V_{DDB} \& GNDB$	Spannungsversorgung <i>B</i> Seite
V_{LDO}	Spannungsregler Eingang <i>B</i> Seite

Tabelle 1: Pinbeschreibung MAX14945EWE+ [6, s.12-13]

3.4 Encoder

Für die Benutzereingaben sind Taster und vor allem ein Encoder wichtig. Taster ermöglichen eine zeitlich präzise ein Eingabe, wohingegen ein Encoder viele Eingaben in kurzer Zeit ermöglicht. Möchte ein Benutzer eine Aufnahmezeit von 55 Sekunden einstellen, so müsste er 55 mal einen Taster betätigen, mit einem Encoder reichen wenige Umdrehungen dafür aus. In diesem Kapitel wird auf das Funktionsprinzip und die Beschaltung des verwendeten Encoders eingegangen.

Ein Encoder besteht im einfachsten Sinne aus zwei Schaltern, wie Abbildung 5 zeigt. Die Schalter sind auf der einen Seite intern miteinander verbunden (*Terminal C*) und werden auf das 0 V Potential geschaltet. Die andere Seite der Schalter wird direkt über *Terminal A* und *Terminal B* nach außen geführt. Jeweils ein exakter $10 \text{ k}\Omega$ Pull-Up-Widerstand (R1 und R3) zieht die Ausgänge auf die Betriebsspannung von 5 V. Ist der Schalter geöffnet, so fließt kein Strom und folglich fällt keine Spannung am Pull-Up-Widerstand ab. Am entsprechenden Terminal können 5 V gegenüber der Masse gemessen werden. Ist der Schalter geschlossen so fällt die gesamte Spannung am Widerstand ab und am entsprechenden Terminal

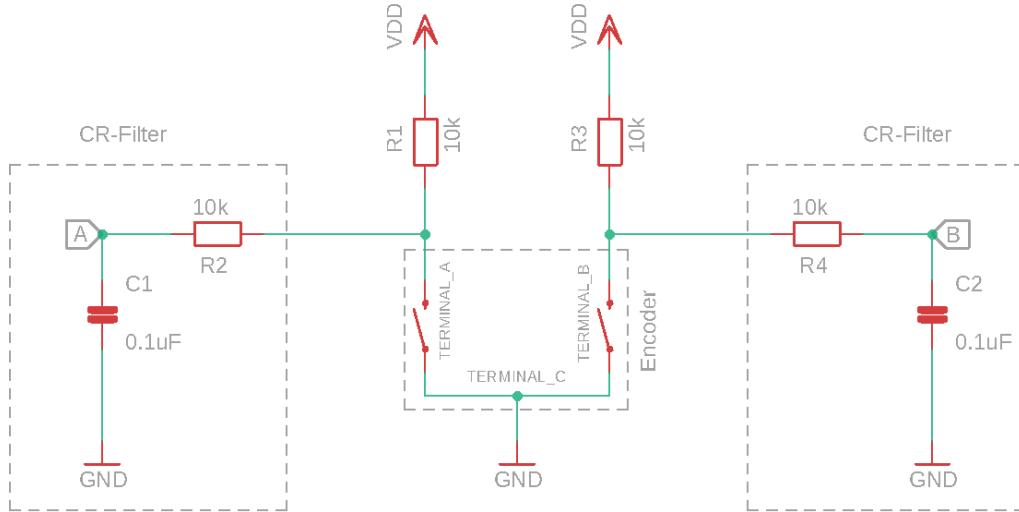


Abbildung 5: Encoder Schaltung [8]

liegt nun Masse-Potential an. Der Hersteller des Encoders empfiehlt das Beschalten des Encoders mit zwei CR-Tiefpassfiltern um hochfrequente Schaltvorgänge zu filtern. Bei einem Schaltvorgang können die Kontakte des Schalters mechanisch schwingen und dadurch mehrfach hintereinander öffnen und schließen [9, s. 67], wodurch mehfrache Eingaben getätigt werden, obwohl der Encoder nur um einen Schritt gedreht wurde. Die Signale des Encoder werden an Punkt A und B in Abbildung 5 entnommen und über zwei Leiterbahnen zum MCU geführt. Wenn der Encoder gedreht wird schließen und öffnen die internen

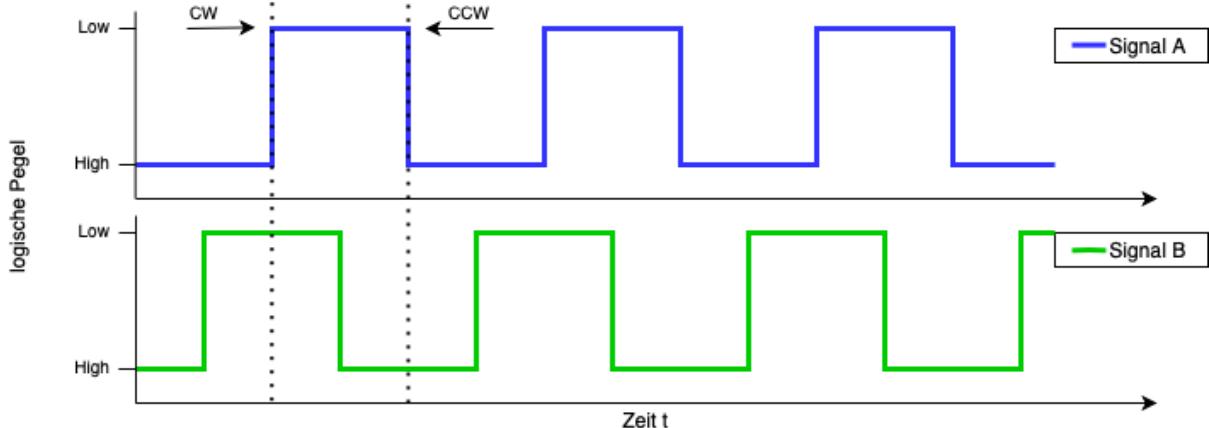


Abbildung 6: Encoder-Signal bei Drehung im Uhrzeigersinn

Schalter versetzt zueinander. Abbildung 6 zeigt die ausgehenden Signale an *Terminal A* und *Terminal B* im zeitlichen Verlauf bei einer gleichmäßigen Rotationsgeschwindigkeit. Durch den versetzten Rhythmus der beiden Schalter kann die Drehrichtung bestimmt werden, indem eines der beiden Signale betrachtet wird, in diesem Beispiel das Signal des *Terminal A*. Ändert sich der Zustand des Signals von *high* auf *low* kann zunächst bestimmt werden, dass eine Drehbewegung stattgefunden hat. Ist nun der Pegel des anderen Signals *high*, so handelt es sich um eine gegen den Uhrzeigersinn drehende Bewegung. Ist das Signal *low*, so handelt es sich um eine mit dem Uhrzeigersinn drehende Bewegung. Die einzelnen Schritte der Schalter können haptisch vom Benutzer wahrgenommen werden. Jeweils an den Stellen an denen sich die Pegel beider *Terminals* im *high*-Zustand befinden rastet der Drehregler leicht ein. Dadurch wird sichergestellt, dass sich die Signale des Encoders während der Nichtbenutzung in einem stabilen Zustand befinden. Zudem ergibt sich daraus eine zusätzliche Rückmeldung an den Benutzer während der Eingabe.

3.5 Liquid Crystal Display (LCD)

Das Display ist das Herzstück der Benutzerschnittstelle und dadurch ein sehr wichtiger Bestandteil des Gerätes generell. Auf ihm können wichtige Informationen über den aktuellen Status des Geräts angezeigt werden und eine Menüführung in Verbindung mit den Tasten und dem Encoder gibt dem Benutzer die Möglichkeit alle Funktionen intuitiv zu bedienen. Bei der Auswahl des Display ist vor allem die Geschwindigkeit der Datenübertragung zum Display wichtig, da das Beschreiben des Displays auf keinen Fall die Aufnahme oder Wiedergabe der DMX-Daten stören darf. Aus diesem Grund wird ein einfaches Liquid-Crystal-Display (LCD) für die Anzeige von Zeichen verwendet. Insgesamt stehen 80 Punkt-Matrizen, angeordnet in 20 Spalten und 4 Zeilen, zur Anzeige von Zeichen zu Verfügung, wobei jede Matrize aus 40 Punkten (5 Spalten x 8 Zeilen) besteht. Die Zeichen werden in weiß auf blauem Hintergrund dargestellt. Eine LED-Hintergrundbeleuchtung sorgt dafür, dass die angezeigten Inhalte auch in dunklen Umgebungen einfach abgelesen werden können. Im Auslieferungszustand (Abbildung 7 und 8) besteht das Modul

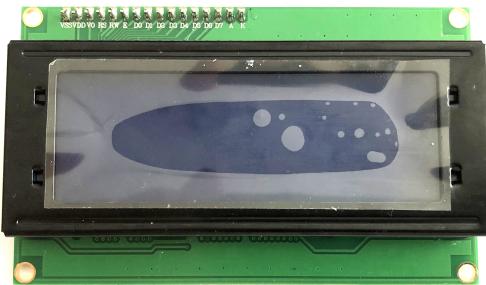


Abbildung 7: LCD-Modul Vorderseite



Abbildung 8: LCD-Modul Rückseite

aus einer großen grünen Platine mit dem fest verbauten LCD darauf und einem an die 16 Pins gelöteten I^2C^2 -Modul (kleine schwarze Platine) mit der das Beschreiben des Displays mittels serieller Übertragung möglich ist. Der Vorteil der seriellen Datenübertragung mittels I^2C ist, dass nur eine Datenleitung, eine Taktleitung und das 0 V-Potential mit dem MCU verbunden werden müssen. Ein Nachteil stellt die Übertragungsgeschwindigkeit dar, denn alle Bits müssen einzeln nacheinander übertragen werden. Geht man davon aus, dass die gleiche Taktrate bei einer parallelen Datenübertragung mit 8 Bits erreicht wird, so ist die Übertragungsrate der seriellen Übertragen mindestens um den Faktor 8 kleiner, da zu den 8 zu übertragenden Bits eine Start-Bedingung des I^2C -Protokolls hinzukommt [10, s. 62]. Da die Geschwindigkeit der Übertragung von besonderer Bedeutung ist, wird das I^2C -Modul von dem Modul entfernt und eine parallele Datenübertragung gewählt. Insgesamt werden elf Leiterbahnen vom LCD-Modul direkt zum MCU geführt. Die einzelnen Funktionen der Pins des LCD-Moduls können Tabelle 2 entnommen werden. Die Pin-Paare VDD/VSS und A/K werden jeweils mit dem 5 V und 0 V Potential der USB-Schnittstelle beschaltet. Pin R/\bar{W} wird außerdem mit dem 0 V Potential verbunden, da das LCD-Display ausschließlich vom MCU beschrieben und nicht gelesen werden soll. Die übrigen Pins werden direkt mit dem MCU verbunden. Der Kontrast des Display wird mit einer analogen Spannung an Pin VO eingestellt, welche als Pulsweitenmoduliertes Signal vom MCU ausgeht.

3.6 LED

Licht emittierende Dioden (LED) sind ein essentieller Bestandteil der Benutzerschnittstelle für die Lokalisierung von Fehlern und der Überwachung während einer Aufnahme- oder Wiedergabe aus kurzer und

²Bussystem zur seriellen Übertragung von Daten [10, s.61]

Pin	Funktion
VDD & VSS	generelle Spannungsversorgung
A & K	Anode und Kathode der LED-Hintergrundbeleuchtung
D0-D7	Datenbus
RS	H: Display Data, L: Display Instruction
E	Enable
R/W	Read/Write-Modus
VO	LCD-Kontrast

Tabelle 2: LCD-Pinbelegung [11, s. 7]

großer Distanz. Insgesamt werden fünf LEDs in vier verschiedenen Farben (blau, orange, grün und rot) verbaut um dem Benutzer eine Unterscheidung auch auf große Distanz zum Gerät möglichst einfach zu machen. Ziel ist eine möglichst hardwarenahe Rückmeldung an den Benutzer zu geben. Tabelle 3 fasst die Funktionen der einzelnen LEDs zusammen. Die erste blaue LED wird direkt an die 5 V Versorgungs-

LED-Farbe	Funktion
blau	Eingeschaltet bei aktiver Spannungsversorgung des Geräts
rot	Zustandsänderung bei eingehendem DMX-Datenpaket
blau	Zustandsänderung bei ausgehendem DMX-Datenpaket
orange	Eingeschaltet bei SD-Aktivität
grün	Allgemeine Zustandsanzeige

Tabelle 3: LED Funktionen

spannung, ausgehend von der USB-Buchse, über einen Widerstand zur Strombegrenzung, angeschlossen. Dadurch kann sehr einfach festgestellt werden ob das Gerät mit Spannung versorgt wird, unabhängig von der Funktion der restlichen Schaltung. Die zweite blaue und die rote LED müssen zwangsläufig per Software geschaltet werden, da der XLR Ein- und Ausgang parallel verbunden sind. Eine Unterscheidung von ein- bzw. ausgehenden Datenpaket ist so nicht möglich. Zudem haben Tests gezeigt, dass das direkte Verbinden einer LED mit einer Datenleitung die LED nur kaum bis nicht sichtbar zum leuchten bringt. Gleiches gilt für die orange LED. In einer Weiterentwicklung des Gerätes kann z.B. mithilfe einer monostabilen Kippstufe, wie einem NE555 IC [12], welche den eingeschalteten Zustand einer LED verlängern kann, eine hardwareähnere Lösung realisiert werden. Abbildung 9 zeigt die Verschaltung der von dem MCU gesteuerten LEDs. Jede LED wird mit 5 V Spannung versorgt. Jeweils ein Widerstand begrenzt den Strom um das Durchbrennen der LED zu verhindern. Da für die vorhandenen LEDs keine Datenblätter verfügbar sind, werden alle Vorwiderstände mit 120 Ohm dimensioniert. Das eigentliche Ein- und Ausschalten wird über jeweils einen Transistor realisiert. Die Basen des Transistoren werden mit jeweils einem Ausgang des MCUs verbunden. Der Benutzer soll die Möglichkeit besitzen die Helligkeit der LEDs je nach Anforderung zu verändern. Dazu werden die Kollektoren aller LED-Schalttransistoren auf den Emitter eines weiteren Transistors *TB* geschaltet. Die Basis wird mit einem Ausgangsspin des MCUs verbunden, der mittels eines Timers ein Pulsweitenmoduliertes-Signal (PWM-Signal) ausgeben kann. Mithilfe einer Anpassung der Pulsweite kann so die Helligkeit aller LEDs reguliert werden.

3.7 Spannungsversorgung

Eine stabile und zuverlässige Spannungsversorgung ist für jede Schaltung besonders wichtig, denn die beste Schaltung funktioniert nicht ohne sie. Um eine großtmögliche Kompatibilität für den Benutzer zu gewährleisten, wird das Gerät über eine USB-Schnittstelle mit der nötigen Spannung versorgt. Dadurch kann das Gerät von mobilen Akkus oder USB-Netzteilen betrieben werden. Die nachstehende

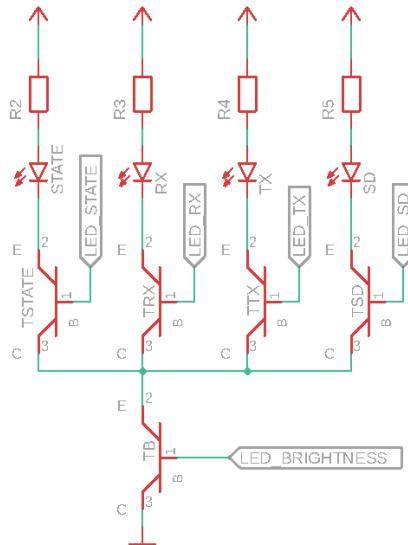


Abbildung 9: LED Schaltung

Tabelle zeigt den benötigten Versorgungsspannungs- und den Strombedarf der einzelnen Komponenten. Die USB-Schnittstelle liefert laut der USB2.0-Spezifikation zwischen 4,75 V und 5,5 V [13, s. 283] und

Bauteil	Versorgungsspannung	Strombedarf
MCU	1,7 V - 3,6 V	max. 240 mA
RS485 Treiberchip VDDA	1,71 V - 5,5 V	max. 6,6 mA
RS485 Treiberchip VDDB	4,5 V - 5,5 V (isoliert)	max. 12,5 mA
DC/DC Konverter	4,5 V - 5,5 V	28 mA
LCD-Modul	3 V - 10 V	100 mA
LED	5 V	ca. 20 mA
SD-Kartensteckplatz	3,3 V	-
Encoder	5 V	-
Taster	-	-
Gesamt	-	max. ca. 481 mA

Tabelle 4: Spannungs- und Strombedarf

standardmäßig einen Strom von 100 mA. Um mehr Strom von einem USB-Host³ anzufordern ist eine Kommunikation über die USB-Datenleitungen mithilfe eines Mikrocontrollers oder einem speziell für diesen Zweck vorgesehenen Chip notwendig. Allerdings kann das Gerät durch das Verbinden der beiden USB-Datenleitungen *D+* und *D-* mit einem Widerstand kleiner 200Ω als *dedicated charging port* (DCP) registriert werden [14, s. 41]. Durch die Einstufung als DCP kann der USB-Host ohne jegliche Kommunikation bis zu 1,5 A freigegeben [14, s. 45]. Als Stromversorgung können dann einfache USB-Netzteile, mobile -Batterien, -Anschlüsse an Laptops und PCs, sowie HUBs mit einer externen Stromversorgung genutzt werden. Voraussetzung für die Lieferung des Stroms ist eine ausreichende Stromversorgung des USB-Host selbst. Abbildung 10 zeigt die Schaltung der Spannungsverteilung der Schaltung. Der Widerstand *R1* sorgt dafür, dass das Gerät als DCP erkannt wird. Der Elektrolyt-Kondensator *C1* fungiert als kleiner Puffer, falls die Schaltung für einen kurzen Moment mehr Strom benötigt als die USB-Schnittstelle liefern kann. Der damit einhergehende Spannungsabfall wird zudem kurzzeitig ausgeglichen. Um eventuell zurückfließenden Strom in den USB-Host zu verhindern wird die Diode *D1* parallel zum 5 V Potential (VCC) und Ground (GND) geschaltet. Auf der rechten Seite der Abbildung 10 befindet sich ein LDO-Spannungsregler. Er regelt die eingehenden 5 V vom USB-Host auf 3,3 V herunter und stabilisiert

³In der Hierarchie übergeordnetes USB-Gerät

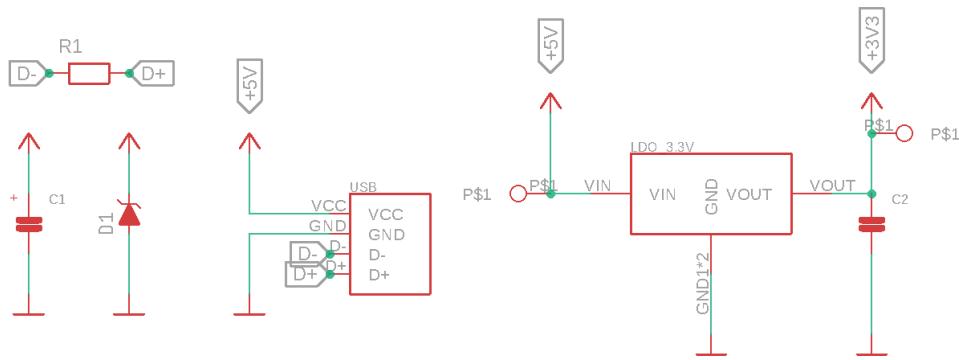


Abbildung 10: Schaltung Spannungsversorgung

diese gleichzeitig. Laut Tabelle 4 wird ein Strom von maximal ca. 240 mA aus dem Spannungsregler erwartet. Laut Datenblatt fällt an ihm bei 25 °C und einem Strom von 250 mA eine Spannung von ca. 100 mV ab. Der MCU und der SD-Kartensteckplatz können somit mit ausreichend Spannung versorgt werden. Alle anderen Komponenten werden direkt mit den 5 V der USB-Schnittstelle versorgt um den LDO-Spannungsregler so wenig wie möglich zu belasten.

3.8 Autodesk EAGLE

Die Schaltpläne und das Design der Platine wird in der *Electronic Design Automation* (EDA) Software *EAGLE*⁴ der Firma Autodesk entwickelt. Innerhalb der Software können Schaltungspläne erstellt werden und anhand dieser Schaltung ein entsprechendes Layout der zu fertigenden Platine erstellt werden. Zuletzt können Produktionsdaten exportiert werden, anhand dessen die Platine produziert werden kann [15].

Für die Erstellung des Schaltpans und Platinenlayouts wird eine Bauteilbibliothek benötigt. *EAGLE* beinhaltet bereits initial eine große Bibliothek mit verschiedenen Bauteilen vieler Hersteller, jedoch befinden sich längst nicht alle am Markt verfügbaren Bauteile in ihr. Viele der in dieser Arbeit verwendeten Bauteile befinden sich nicht darin, weswegen eine eigene Bauteilbibliothek erstellt und explizit für die Entwicklung verwendet wird. Zudem soll dadurch das Fehlerrisiko in Bezug auf Bauteilabmessungen und Pinbelegungen reduziert werden. Ein Bauteil der Bauteilbibliothek besteht aus Softwaresicht aus drei Teilen. Dem *symbol* (Abbildung 11), *footprint* (Abbildung 12) und einem 3D-Modell (Abbildung 13). Das Symbol wird für die Entwicklung des Schaltpans verwendet und besitzt keine elektrischen Ei-



Abbildung 11: EAGLE Symbol

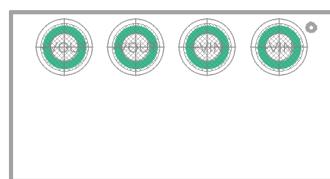


Abbildung 12: EAGLE Footprint

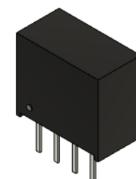


Abbildung 13: EAGLE 3D-Modell

genschaften oder Dimensionen. Eine Simulation der Sclatung ist dementsprechend nicht möglich. Die Anschlüsse der Symbole können im Schaltpans untereinander mit Leitungen verbunden werden. Um den Schaltpans auf die Hardwarebene zu projizieren, wird ein zugehöriger *footprint* benötigt. Dieser enthält die Dimensionen und Anordnung der entsprechenden Lötstellen des Bauteils, welche in der Regel vom Hersteller des Bauteils zur Verfügung gestellt werden. Im Bibliotheks-Manager in *EAGLE* werden dann die Anschlüsse des Symbols den entsprechenden Lötstellen des *footprints* zugeordnet. Die Verbindung

⁴<https://www.autodesk.de/products/eagle/overview>

zwischen Schaltplan und Platine ist nun hergestellt. Um einen noch realistischeren Entwurf der Platine einsehen zu können, kann ein 3D-Modell des Bauteils eingefügt werden. Standard Bauteile wie SMD-Kondensatoren, -Widerstände oder gängige Chip-Gehäuse können mit einem in *EAGLE* integrierten Generator generiert werden. Mit den vom Hersteller des Bauteils angegebenen Dimensionen und Toleranzen erzeugt der Generator einen *footprint* mit einem dazugehörigen 3D-Modell des Bauteils. Handelt es sich bei dem Bauteil um kein Standard-Bauteil, so muss der *footprint* in *EAGLE* und das 3D-Modell in einer externen CAD-Software konstruiert werden. Im Bibliotheks-Manager kann dann das 3D-Modell bezogen auf den *footprint* dreidimensional plaziert werden. Mithilfe der 3D-Modelle kann *EAGLE* in Verbindung mit der Software *Fusion 360* der Firma Autodesk ein 3D-Modell der gesamten Platine inklusive aller Bauteile, für die entsprechende 3D-Modelle in der Bauteilbibliothek existieren, exportieren. Dieses kann dazu verwendet werden Kollisionen zwischen Bauteilen oder einem Gehäuse vor der Fertigung der Platine zu erkennen oder ein passendes Gehäuse für die Platine zu entwerfen.

Mithilfe der in *EAGLE* integrierten sogenannten *Forward-Back-Annotation* werden Änderungen im Schaltplan unmittelbar in das Platinenlayout übertragen. Wird Beispielsweise nur der Wert eines Widerstandes im Schaltplan geändert, so ändert sich auch die Beschriftung des Bauteils auf der Platine. Außerdem werden in der Schaltung gesetzte Verbindungen im Platinenlayout dargestellt und damit das verlegen von Leiterbahnen vereinfacht und kann fehlerfrei durchgeführt werden. Im Schaltplan nicht bestehende Verbindungen können im Platinenlayout nicht hergestellt werden. Um die Schaltung möglichst

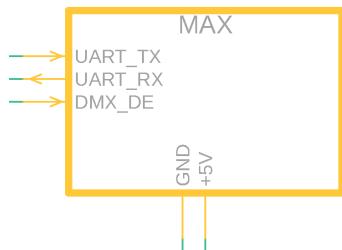


Abbildung 14: Modul "MAX"

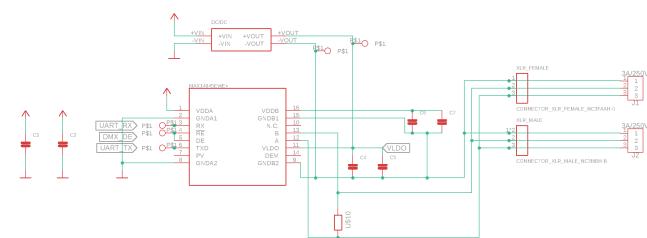


Abbildung 15: Inhalt des Moduls "MAX"

übersichtlich zu gestalten, werden sogenannte *Module* verwendet, durch die komplexe Schaltungen in kleinere "Black-Boxes"⁵ heruntergebrochen werden können. Abbildung 15 und 14 zeigen diese Vereinfachung. Zudem können Module mehrfach in einer Schaltung eingefügt werden. Änderungen in einem Modul wirken sich auf alle eingefügten aus. Verbindungen (grüne Linien in Abbildung 15) zwischen Bauteilen werden Namen (*net-names*) zugewiesen, die nur innerhalb des Moduls bekannt sind. Mithilfe der *net-names* können sogenannte *Ports* aus dem Modul herausgeführt werden, womit Verbindungen zu anderen Modulen oder einfachen Bauteilen hergestellt werden können. Pfeile an den *Ports* signalisieren die Flussrichtung von Signalen, nicht vorhandene Pfeilspitzen signalisieren einen Anschluss einer Spannungsversorgung.

3.9 Platinendesign

Das Design der Platine spielt eine wichtige Rolle in der Entwicklung des Gerätes, denn es müssen alle 78 Komponenten auf ihr Platz finden, sie muss elektrisch und logisch sinnvoll aufgebaut sein und gleichzeitig kompakte Maße haben damit das Endprodukt handlich ist. Zudem kommen einige technische Anforderung von Bauteilen wie die Platzierung der Stützkondensatoren des MCUs, die möglichst nah an ihm platziert werden müssen, hinzu. Außerdem muss der SD-Karten-Steckplatz im nachhinein für den Benutzer zugänglich sein, der Benutzer muss die Taster betätigen, die LEDs leuchten, den LCD sehen können und in der Lage dazu sein die DMX- und das USB-Kabel in die entsprechenden Buchsen zu stecken.

⁵Box mit Ein-, Ausgängen und unbekanntem Inhalt



Abbildung 16: Platinenvorderseite

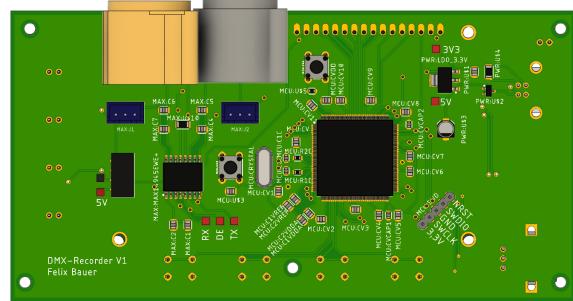


Abbildung 17: Platinenrückseite

Abbildung 16 und 17 zeigen das Layout der Platine als virtuelles dreidimensionales Modell. Auf der Platine werden zwei Arten von Komponenten verbaut. Zum einen sogenannte *surface-mount-technology*-Komponenten (SMT-Komponenten), zum anderen *through-hole technology*-Komponenten (THT-Komponenten). SMT-Komponenten werden direkt auf die Oberfläche der Platine gelötet, was keine Notwendigkeit von Löchern in der Platine erfordert. Durch die Oberflächenmontage befindet sich das Bauteil auch auf der selben Seite wie die dazugehörige Lötstelle. Für THT-Komponenten werden Löcher in der Platine benötigt, da die Pins der Komponenten im 90 Grad Winkel zur Oberfläche der Platine gerichtet sind. Diese können unter Umständen nur auf der gegenüberliegenden Seite der Platine verlötet werden. Eine LED zum Beispiel, die bündig mit der Platine verlötet werden soll, kann nur auf der gegenüberliegenden Seite der Platine verlötet werden, da die LED selbst ihre eigenen Pins verdeckt. Damit alle Komponenten frei auf der Platine platziert werden können, wird eine zweiseitige Platine entworfen. Diese besitzt auf der Vorder- und Rückseite eine Kupferschicht, welche mithilfe von sogenannten *Vias*⁶ verbunden werden können. Ab-

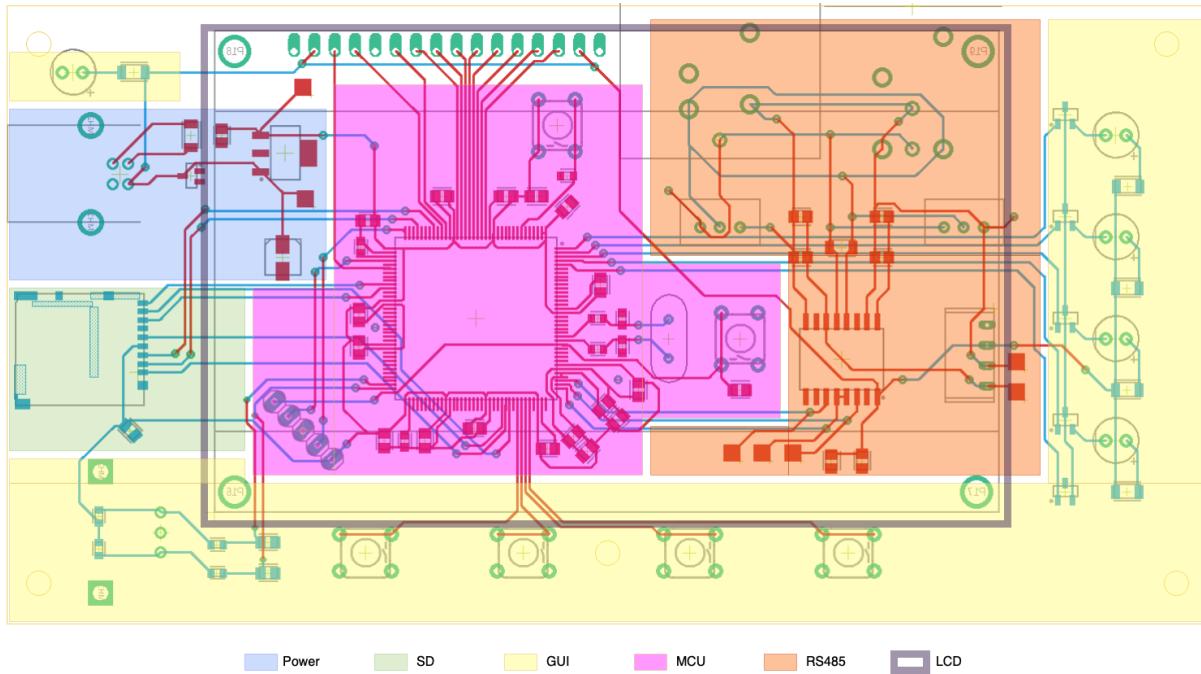


Abbildung 18: Platinenlayout-Aufteilung

Abbildung 18 zeigt die generelle Aufteilung der Platine. Diese Aufteilung vereinfacht die mögliche Fehlersuche und trägt dazu bei die Leiterbahnlängen zu verkürzen. Alle blau gefärbten *Pads*⁷ und Leiterbahnen befinden sich auf der Vorderseite, alle rot eingefärbten auf der Rückseite der Platine. Die freien Flächen

⁶Durchkontakte Löcher in der Platine

⁷In der Regel rechteckige Lötstellen (freigelegte Kupferflächen) zum verlöten von SMT-Komponenten

zwischen den Leiterbahnen auf der Ober- und Unterseite sind mit dem 0V Potential verbunden. Die grünen Bohrungen sind *Vias* und durchkontakteert Bohrungen für die THT-Komponenten. Der Formfaktor der Platine wird im wesentlichen von dem LCD-Modul vorgegeben, da es bei weitem das größte Bauteil darstellt. Neben dem LCD-Modul muss außerdem Platz für den Encoder, die Taster und LEDs vorhanden und für den Benutzer sichtbar und verwendbar sein. Aus diesem Grund werden das LCD-Modul, die Taster, der Encoder und die LEDs auf der Vorderseite der Platine platziert. Im Zentrum befindet sich das LCD-Modul. Unterhalb des Moduls befinden sich die Taster, rechts davon die LEDs. Die LED, die den Zustand der Spannungsversorgung anzeigt befindet sich oben links um eine Verwechslungen mit der zweiten blauen LED zu verhindern. Der SD-Kartensteckplatz, grün markiert, findet am linken Rand unterhalb der USB-Buchse und Schaltung der Spannungsversorgung, blau markiert, der Platine Platz. Der MCU bildet das Herzstück der Schaltung und befindet sich deswegen in der Mitte der Platine. Laut Hersteller sollen die Stützkondensatoren möglichst nah am MCU plaziert werden, damit die Induktivität der Leiterbahnen den hohen Stromfluss aus den Kondensatoren heraus nicht beeinträchtigt. **Erklärung / Quelle** Kritische an den MCU angeschlossene Komponenten sind unter anderem der SD-Kartenslot, der Quarz und der RS485-Treiberchip. Um möglichst wenig Störungen auf die Leiterbahnen einwirken zu lassen sind diese möglichst kurz. Die XLR-Buchsen für die ein- und ausgehenden DMX-Daten befinden sich am oberen Rand der Rückseite der Platine. Sie und die Schaltung des Treiberchips, rot markiert, liegen nah beieinander um auch hier das Störungspotential durch lange Leiterbahnen möglichst gering zu halten.

3.10 Gehäusedesign

Mit dem Gehäuse wird aus der abstrakten Platine ein vorzeigbares Produkt. Wichtig ist nicht nur die Optik sondern auch das Design in funktioneller Sichtweise. Das beschriebene Platinendesign in Kapitel 3.9 und 3D-Modell bildet die Basis für die Entwicklung des Gehäuses und kann durch die Verbindung von *EAGLE* mit der 3D-CAD-Software *Fusion360* direkt in die Konstruktion virtuell eingefügt werden. Damit kann sichergestellt werden, dass z.B. Bohrungen im Gehäuse mit den in der Platine befindlichen übereinstimmen und das die Bauteile auf der Platine nicht mit dem Gehäuse kollidieren. Die Konstruktion ist auf die Fertigung im 3D-Druckverfahren ausgerichtet, da damit in kurzer Zeit Iterationen des Designs kostengünstig gefertigt werden können. Bei dem verwendeten Material handelt es sich um den biologisch abbauaren Kunststoff *Poly-lactid-acid* (PLA). Er ist einfach zu drucken, nachzubearbeiten, kostengünstig in der Anschaffung und besitzt eine ausreichende Stabilität.

Abbildung 19 und 20 zeigen das 3D-Modell des Gehäuses, dessen grundsätzliches Design simpel und kompakt ist (15,7cm breit, 8,14cm tief und 5,25cm hoch). Die Breite und Tiefe des Gehäuses werden nahezu komplett von der Platine ausgefüllt. Die Höhe des Gehäuses wird von den XLR-Buchsen vorgegeben und ist daher besonders im vorderen Teil nicht voll ausgenutzt. Bei einer Weiterentwicklung könnte dieser freie Platz für einen integrierten Akku genutzt werden. Der Boden des Gerätes verläuft parallel zur Platine damit die eingesteckten Kabel rechtwinklig zur Tischoberfläche verlaufen und sie somit das Gerät durch ihr Eigengewicht nicht zum kippen bringen. Auf der Oberseite befindet sich das LCD-Modul, die LEDs, Taster und der Encoder. Über den LEDs befinden sich weiße Diffusionsscheiben, die das Licht der darunterliegenden LEDs brechen und somit das Leuchten aus größerer Distanz und einem größeren Blickwinkel sichtbar machen. Auf der Rückseite befinden sich die XLR-Buchsen und eine Vielzahl von Schlitzen, die einen Luftaustausch ermöglichen und einen Hitzestau vorbeugen. Auf der linken Seite befindet sich der SD-Kartensteckplatz und USB-Anschluss. Die Platine muss ausreichend im Gehäuse befestigt sein damit sie sich beim Betätigen der Taster nicht verbiegt und somit das Betätigen erschwert bzw. unmöglich macht. Abbildung 21 und 22 zeigen Schnittanalysen des 3D-Modells. Für einen größtmöglichen Halt der Platine im Bereich der Taster wird die Platine in einen Schlitz im Gehäuse eingeführt (rot markiert). Durch den Schlitz wird die Auflagefläche erhöht und die durch einen Tasten-

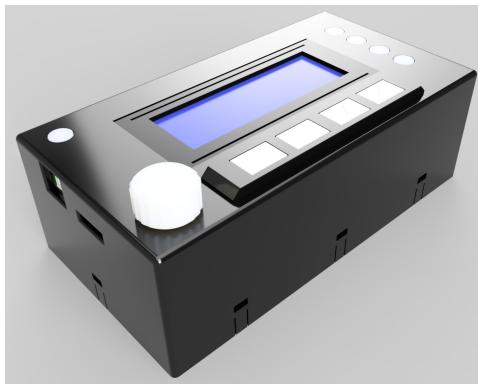


Abbildung 19: Gehäuse 3D-Modell Frontseite



Abbildung 20: Gehäuse 3D-Modell Rückseite

druck einwirkende Kraft auf sie verteilt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die Platine mithilfe von Schrauben mit M3-Gewinde befestigt (blau markiert). Dazu befinden sich zylinderförmige Extrusionen an der Oberseite, die mittig eine Bohrung mit einem M3 Gewinde besitzen. Zudem befinden sich auf der gleichen Seite Ausschnitte für die XLR-Buchsen, welche außerdem mit dem Gehäuse verschraubt werden, zu sehen in Abbildung 20. Mit der grün markierten Bohrung wird das LCD-Modul mit den bereits vorhanden Löchern verschraubt. Abstandshalter zwischen LCD-Modul und Platine ermöglichen die Verschraubung von der Unterseite der Platine. Damit die Platine im Gehäuse plaziert und befestigt werden

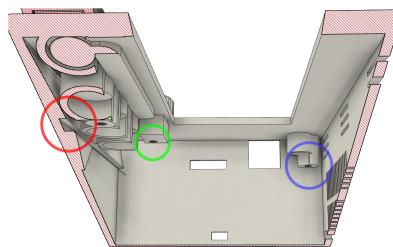


Abbildung 21: Gehäuse Schnitt

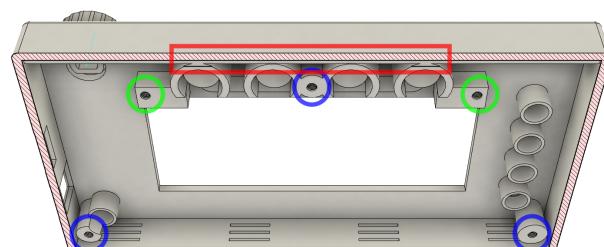


Abbildung 22: Gehäuse Schnitt Draufsicht

kann, muss das Gehäuse geöffnet werden können. Um bei der Entwicklung möglichst unkompliziert die Platine erreichen zu können, befindet sich ein Clip-Mechanismus an der Unterseite des Gerätes, mit dem der Boden einfach entfernt werden kann. Abbildung 24 zeigt die Seitenansicht des Mechanismus. In der Oberseite des Gehäuses befinden sich Rechteckige Aussparungen in die die an der Unterseite befindlichen Clips einhaken können. Durch das verwendete 3D-Druckverfahren sind die Clips eine Schwachstelle der Konstruktion, da PLA verhältnismäßig spröde ist und die Clips beim einhaken in die Aussparungen leicht gebogen werden müssen. Um das Material beim verbiegen weniger zu beladen ist die Länge der Clips bis in den Boden hinein verlängert. Dadurch wird das Material auf eine längere Strecke hinweg gebogen und das Biegemoment somit verteilt.

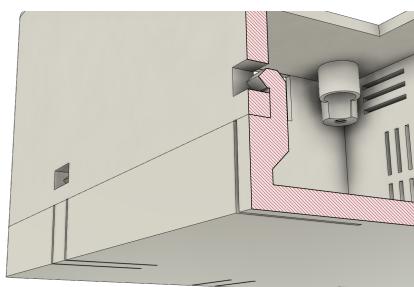


Abbildung 23: Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht frontal

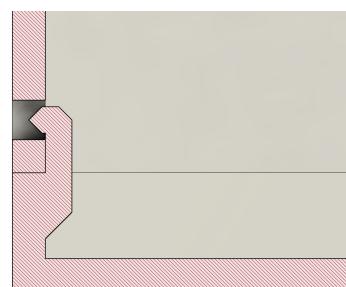


Abbildung 24: Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht

Ein wichtiger Bestandteil der Bedienbarkeit stellen die Taster dar. Abbildung 25 und 26 zeigen den Mechanismus zum Betätigen des Tasters als Schnittansicht des 3D-Modells. Die Körper mit der Kennzeichnung 1 sind das Gehäuse an sich, die Taster sind mit 4 gekennzeichnet. Unter den Tastern befindet sich die Platine. Im Gehäuse befinden sich vier nach unten gerichtete Führungen für einen beweglichen Zylinder, welcher mit 3 gekennzeichnet ist. Alle vier Zylinder sind mit miteinander verbunden um die Stabilität zu erhöhen und ein verkantnen dieser mit der Führung zu verhindern. Für die Zylinder wird ein gummiartiges Material, namens *TPU* für den 3D-Druck verwendet, wodurch das Klicken des Tasters gedämpft wird. Die für den Benutzer sichtbaren beweglichen Taster-Flächen, gekennzeichnet mit 2, drücken den Zylinder bei einer Betätigung nach unten und diese wiederum betätigen den Taster. Auf den Tasterflächen befinden sich Extrusionen mit der Kennzeichnung der entsprechenden Funktion des jeweiligen Tasters. Dadurch kann der Taster optisch und haptisch wahrgenommen werden, was besonders an Orten mit schlechten Belichtungsverhältnissen wichtig ist.

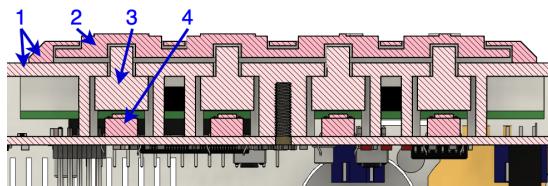


Abbildung 25: Gehäuse Clip-Mechanismus

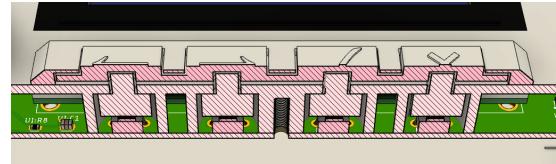


Abbildung 26: Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht

4 Software

4.1 STMicroelectronics CubeMX

4.2 STMicroelectronics CubeIDE

4.3 Taster

Um eine einwandfreie Funktion der Taster zu garantieren ist nicht nur deren Schaltung, sondern auch ein entsprechender Programmcode wichtig. Im folgenden Kapitel wird auf den Programmcode, der zum auslesen eines Tasterdrucks verwendet wird, eingegangen. Ein Tasterdruck kann zu jedem Zeitpunkt des Programmablaufs geschehen und sollte möglichst vom Programmcode nicht unbeachtet bleiben. Um diese Funktionalität zu gewährleisten, sind die Taster mit interruptfähigen Eingängen des MCUs verbunden. Die Beschaltung des Tasters mit einem im MCU internen Pull-Up-Widerstand sorgt dafür, dass an den Tastern im nicht betätigten Zustand ein High-Pegel und während der Betätigung ein Low-Pegel anliegt. Der Interrupt muss also auslösen, wenn sich ein Logikpegel von einem High- auf einen Low-Pegel ändert. In CubeMX werden die entsprechenden Konfigurationen und Interruptaktivitäten der Taster-Pins eingestellt. Code-Ausschnitt ?? zeigt einen Ausschnitt aus der Datei button.h. Jedem Taster wird ein Zahlenwert mit der Basis 2 zugewiesen. Diese Spiegeln die Bits 1-4 eines Bytes wieder. Wird ein Taster betätigt, so wird durch das Auslösen eines Interrupts die Funktion in Zeile 12 aufgerufen.

Listing 1: button.h: Definitionen und Funktionsprototypen label

```

5 #define BACK      0x1
6 #define ENTER     0x2
7 #define UP        0x4
8 #define DOWN     0x8
9
10 uint8_t Button_pressed(uint8_t button);
11 void Button_reset();
12 void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin);
```

Codeausschnitt 2 zeigt einen Teil der Interrupt-Funktion. Zunächst wird in Zeile 30 geprüft ob in den letzten 200 ms (*DELAYTIME*) bereits ein Aufruf der Funktion erfolgt ist. Diese Abfrage soll mehrfache Eingaben, augelöst durch ein Prellen des Tasters verhindern. Falls sie bereits aufgerufen wurde, so wird die Funktion beendet, falls nicht wird die Variable *last_updated* mit der aktuellen Zeit aktualisiert. Daraufhin wird mithilfe von einem *switch* festgestellt ob und welcher Taster den Interrupt ausgelöst hat. Dafür wird die Variable *GPIO – Pin*, welche an die Interruptfunktion übergeben wird, mit den einzelnen Pins der Taster verglichen.

Listing 2: button.c: Codeausschnitt Taster-Interruptfunktion

```

28 void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin)
29 {
30     if ((last_updated + DELAYTIME) > HAL_GetTick())
31         return;
32     last_updated = HAL_GetTick();
33     switch(GPIO_Pin)
```

Ist der auslösende Pin festgestellt, wird der Variable *presses* mithilfe einer bitweisen *oder*-Operation der entsprechende Wert des Tasters, der in der Datei *button.h* definiert ist, wie folgt zugewiesen.

Listing 3: button.c: Bitweise Zuordnung eines betätigten Tasters

```
37     case BTN_BACK_Pin:
```

```

38     {
39         presses |= BACK;
40         return ;
41     }

```

Der Vorteil der bitweisen *oder*-Operation ist, dass nur das entsprechende Bit gesetzt wird ohne alle anderen zu verändern. Ergänzende Abfragen ob das Bit bereits gesetzt ist entfallen. Im Hauptprogramm werden ausschließlich die Funktionen *Button_pressed(uint8_t button)* für die Abfrage ob ein bestimmter Taster betätigt wurde und *Button_reset()* um die Variable *presses* zurückzusetzen verwendet. Bei der Abfrage eines Tasters wird das entsprechende Bit wieder zurückgesetzt. Wurden zwei verschiedene Taster innerhalb kurzer Zeit betätigt, können beide nacheinander mit der Funktion *Button_pressed* abgefragt werden. Codeausschnitt 4 zeigt den Inhalt dieser Funktion. Zunächst folgt eine *if*-Abfrage wann die letzte Tastereingabe einging. Ist die Eingabe nicht älter als der Wert von *TIMEOUT*, so wird zunächst die temporäre Variable *temp* mit dem abgefragten Bit beschrieben und anschließend das abgefragte Bit aus der Variable mit einer 0 überschrieben. Der Rückgabewert der Funktion ist die Variable *temp*. Im Hauptprogramm kann anhand eines Rückgabewertes ungleich 0 erkannt werden, dass der oder einer der abgefragten Taster betätigt wurde.

Listing 4: button.c: Abfrage eines Tasters

```

10 uint8_t Button_pressed( uint8_t button )
11 {
12     if (!button || ((last_updated + TIMEOUT) < HAL_GetTick()))
13     {
14         Button_reset();
15         return 0;
16     }
17     uint8_t temp = 0;
18     temp = presses & button;
19     presses &= ~button;
20     return temp;
21 }

```

Optimierungsmöglichkeiten

Die Konstante *TIMEOUT* besitzt keine Zuordnung zu einem einzelnen Taster. Wurde vor längerer Zeit ein Taster betätigt und kurz vor der Abfrage ein anderer Taster betätigt, so scheint die Betätigung des ersten Tasters auch innerhalb der Timeout-Zeit geschehen zu sein. Dieses Problem kann gelöst werden, indem eine Variable pro Taster angelegt wird, in der die Zeit der letzten Betätigung des Tasters gespeichert wird. Diese ersetzt die globale letzte Aktualisierungszeit *last_updated*. Der Nachteil dieser Methode ist eine deutlich aufwendigere Abfrage in der Funktion *Button_pressed* und Zuweisung in der Interrupt-Funktion. Eine zweite Möglichkeit das Problem zu lösen ist der Einsatz eines Timers. Dieser wird gestartet wenn ein Taster betätigt wird. Läuft der Timer über, wird in der Interrupt-Funktion des Timers der Betätigungszustand in der Variable *presses* für alle Taster zurückgesetzt. Soll nur der Zustand eines Tasters zurückgesetzt werden, so muss je ein Timer pro Taster zur Verfügung stehen, da in der Interrupt-Funktion des Timers nicht unterschieden werden kann welcher Taster den Timer gestartet hat.

4.4 Encoder

Für den Programcode des Encoders kommt ein ähnliches Prinzip wie für die Taster im vorigen Kapitel zum Einsatz. Der Aufruf der entsprechenden Funktion erfolgt über einen Interrupt. Wie bereits in Kapitel 3.4 beschrieben, muss der Zustand beider Terminals des Encoders ausgelesen werden um eine Drehrichtung

bestimmen zu können. Terminal *A* ist in CubeMX als externer Interrupeingang mit Erkennung einer fallenden Flanke, Terminal *B* als Standard-Eingang konfiguriert. Wird durch eine fallende Flanke des Signals des Terminals *A* ein Interrupt ausgelöst, so entscheidet der Zustand des Terminals *B* über die Drehrichtung des Encoders. In der Interrupt-Funktion muss also lediglich der Zustand von Terminal *B* geprüft werden.

Listing 5: Encoder.c: Interrupt-Funktion

```

45 void enc_Interrupt()
46 {
47     if ((last_update + delaytime) > HAL_GetTick())
48         return;
49     last_update = HAL_GetTick();
50     if (HAL_GPIO_ReadPin(ENC_B_GPIO_Port, ENC_B_Pin))
51     {
52         if (enc_position > 0)
53             enc_position--;
54     }
55     else
56     {
57         enc_position++;
58     }
59     return;
60 }
```

Codeausschnitt 5 zeigt den Inhalt der Interruptfunktion. Zunächst wird in Zeile 47-49, wie auch in der Interrupt-Funktion der Taster, eine softwareseitige Entprellung durchgeführt. Die Verzögerungszeit fällt für den Encoder mit 50ms deutlich kürzer aus als für die Taster, um auch schnelle Drehbewegungen registrieren zu können. Eine längere Verzögerungszeit hat einen Verlust von getätigten Eingaben, besonders bei höheren Drehgeschwindigkeiten, zur Folge. 50ms haben sich in Tests als angenehm zu bedienen erwiesen und einen guten Balance zwischen maximaler Eingabegeschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Eingaben hergestellt. Nach der Entprellung folgt die Abfrage des Zustands des Terminals *B* mithilfe der Funktion *HAL_GPIO_ReadPin(..)*. Ist der Zustand *High*, so wird die global verfügbare Variable *enc_position* um 1 dekrementiert wenn sie größer als 0 ist. Ist der Zustand *Low*, so wird die Variable um 1 inkrementiert. Bei der Variable *enc_position* handelt es sich um eine 16-Bit Variable ohne Vorzeichen, welche $2^{16} = 65536$ Werte umfasst und damit genug Platz für Eingaben bietet.

Optimierungsmöglichkeiten

Bei der Entwicklung des Schaltplans ist ein Fehler im Bereich der CR-Filter zum Entprellen des Encoders nach der Fertigung der Platine aufgefallen. Durch diesen Fehler wird die Beschaltung des Encoders unwirksam im Bezug auf dessen Entprellung. Mit der Behebung könnte die softwareseitige Entprellung reduziert werden oder sogar vollständig entfallen. Dadurch kann die Responsivität des Encoders verbessert werden. Außerdem wäre eine Erkennung der Drehgeschwindigkeit sinnvoll um bei einer größeren Geschwindigkeit die Inkrement- und Dekrementgröße zu variieren, wodurch schnellere und präzise Eingaben gleichermaßen möglich sind.

4.5 Aufnahme eines DMX-Datenpaketes

Die Aufnahme eines DMX-Datenpaketes zählt zu den kritischsten Zeilen Programmcode des gesamten Projekts. Wird das erste Datenbyte nicht registriert, hat das bei der Wiedergabe, aufgrund der seriellen Übertragung des DMX-Protokolls, Auswirkungen auf alle angeschlossenen Geräte. Die Aufnahme eines

Datenpakete basiert auf den Interrupt-Events der UART-Schnittstelle. Bei jedem empfangenen oder gesendeten Datenbyte, erkannten Fehler der Übertragung oder der Schnittstelle wird ein globaler Interrupt ausgelöst. In der aufgerufenen Funktion wird identifiziert was den Interrupt ausgelöst hat und es wird ein entsprechender Code ausgeführt. Für die Aufnahme sind die Events des *Framing Errors* und des erfolgreichen Empfangs eines Datenbytes von Bedeutung. Mithilfe des *Framing Errors* wird das Ende eines DMX-Datenpaketes erkannt.

Listing 6: stm32f4xx_it.c: UART Framing Error

```

349 /* UART frame error interrupt occurred -----*/
350 if (((isrflags & USART_SR_FE) != RESET) && ((cr3its & USART_CR3_EIE) != RESET))
351 {
352     Clear_Rx_Error();
353     huart4.ErrorCode |= HAL_UART_ERROR_FE;
354 }
```

Listing 7: stm32f4xx_it.c: UART Clear_Rx_Error()

```

426 static void Clear_Rx_Error()
427 {
428     uint16_t tmp = huart4.Instance->SR;
429     tmp = huart4.Instance->DR;
430     (void) tmp;
431     Reset_Rx();
432 }
```

Listing 8: stm32f4xx_it.c: UART Reset_Rx()

```

434 static void Reset_Rx() //Rx complete or Error ->dmx-brake
435 {
436     huart4.RxXferCount = 513;
437     huart4.RxXferSize = 513;
438     huart4.pRxBuffPtr = Univers.RxBuffer;
439     (void)*huart4.pRxBuffPtr--;
440 }
```

Listing 9: stm32f4xx_it.c: UART Save_Byte_Rx()

```

442 static void Save_Byte_Rx()
443 {
444     if (huart4.Instance->DR != 1)
445         *huart4.pRxBuffPtr++ = huart4.Instance->DR; //DR in Buffer speichern
446     else
447         *huart4.pRxBuffPtr++ = 0;
448
449     if (--huart4.RxXferCount == 0U)
450     {
451         //save to SD
452         HAL_UART_RxCpltCallback(&huart4);
453         Reset_Rx();
454     }
455 }
```

Listing 10: DMX.c: Callback-Funktion eingehender UART-Daten

```

103 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart) // Aufruf wenn DMX Paket vollstaedt
104 {
105     if (Univers.recording == 1)
106     {
107         Univers.RxComplete = 1;
108         Univers.received_packets++;
109         HAL_GPIO_TogglePin(LED_RX_GPIO_Port, LED_RX_Pin);
110         return;
111     }
112     HAL_GPIO_TogglePin(LED_STATE_GPIO_Port, LED_STATE_Pin);
113 }
```

Optimierungsmöglichkeiten

4.6 Ausgabe eines DMX-Datenpaketes

Die Funktion zum Senden von DMX-Datenpakten wurde im Vergleich zu der Praxisarbeit optimiert und vereinfacht. Der Vollständige Sendevorgang wird mit nur zwei Funktionen ausgeführt. Codeausschnitt 11 zeigt die Funktion zum Senden eines DMX-Datenpaketes, welche als einzige aufgerufen werden muss um ein Datenpaket zu senden.

Listing 11: DMX.c: Transmit-Funktion

```

66 void DMX_Transmit(DMX_TypeDef* hdmx, uint16_t size)
67 {
68     HAL_GPIO_WritePin(DMX_DE_GPIO_Port, DMX_DE_Pin, GPIO_PIN_SET); // Treiber
69     DMX_set_TX_Pin_manual(); // Ausgang
70     HAL_GPIO_WritePin(DMX_TX_GPIO_Port, DMX_TX_Pin, GPIO_PIN_SET); // Ausgang
71     htim11.Instance->CNT = 0;
72     CLEAR_BIT(htim11.Instance->SR, TIM_SR UIF);
73     SET_BIT(htim11.Instance->CR1, TIM_CR1_CEN);
74     while (!READ_BIT(htim11.Instance->SR, TIM_SR UIF));
75     CLEAR_BIT(htim11.Instance->SR, TIM_SR UIF);
76     HAL_GPIO_WritePin(DMX_TX_GPIO_Port, DMX_TX_Pin, GPIO_PIN_RESET);
77     DMX_set_TX_Pin_auto();
78     HAL_UART_Transmit_IT(Univers.uart, Univers.TxBUFFER, size);
79 }
```

Die Übergabeparameter der Funktion sind eine DMX-Struktur (*struct*⁸) *DMX_TypeDef* hdmx* und die Anzahl der zu übertragenden Datenbytes *uint16_t size*. In der DMX-Struktur befinden sich Informationen über die zu verwendende UART-Schnittstelle, sowie das Array *TxBUFFER* mit den zu übertragenen Datenbytes. Zu Beginn der Funktion wird in Zeile 68 der Treiberchip über das Beschreiben des Pins *DMX_DE_Pin* mit einem High-Pegel aktiviert. Daraufhin wird der Ausgangspin der UART-Schnittstelle mithilfe der Funktion *DMX_set_TX_Pin_manual()* manuell beschreibbar gemacht und mit einem High-Pegel beschrieben. Das Prinzip dieses Vorgangs ist in der Praxisarbeit beschrieben [1]. Das Zählerregister (*CNT*) des Timers 11 (*htim11*) wird mit dem Wert 0 überschrieben und das *UIF*-Bit *Update Interrupt Flag* im Statusregister des Timers zurückgesetzt. Dieses Bit wird hardwareseitig gesetzt wenn der Timer

⁸text

übergelaufen ist. Mit der Funktion *SET_BIT(...)* wird das *CEN* Bit gesetzt, wodurch der Timer startet. Der Timer ist zuvor in CubeMX als *one – pulse*-Timer konfiguriert. Sobald der Timer übergelaufen ist, wird er gestoppt und zählt den Zähler *CNT* nicht weiter hoch. Mit der *while*-Abfrage in Zeile 74 wird auf den Überluf des Timers gewartet. Ist er übergelaufen, so wird das *UIF*-Bit wieder zurückgesetzt und der Ausgangspin in Zeile 76 mit einem Low-Pegel beschrieben. Zu diesem Zeitpunkt ist das DMX-Startsignal vollständig ausgegeben und die Datenbytes können gesendet werden. Um der UART-Schnittstelle wieder Zugriff auf den Ausgangspin zu gewähren wird mit der Funktion *DMX_set_TX_Pin_auto()* die manuelle Beschreibbarkeit des Pins deaktiviert. Anschließend wird mit dem Funktionsaufruf in Zeile 78 die Übertragung der Daten gestartet. Bei dieser Funktion handelt es sich um eine nicht-blockierende Funktion. Die Daten werden Interruptbasiert gesendet. Sind alle Daten vollständig gesendet, so wird durch einen Interrupt der UART-Schnittstelle die Funktion in Codeausschnitt 12 aufgerufen.

Listing 12: DMX.c: Interrupt-Funktion ausgehender UART-Daten

```

120 void HAL_UART_TxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
121 {
122     if (Univers.sending == 1)
123     {
124         DMX_set_TX_Pin_manual();
125         HAL_GPIO_WritePin(DMX_TX_GPIO_Port, DMX_TX_Pin, GPIO_PIN_RESET); // Ausga
126         HAL_GPIO_TogglePin(LED_TX_GPIO_Port, LED_TX_Pin);
127     }
128 }
```

Der Inhalt der Funktion soll nur ausgeführt werden, wenn ein aktiver Sendevorgang ausgeführt wird, also wenn die Variable *Univers.sending* den Wert 1 enthält. Ist dies der Fall, so wird der UART-Ausgangspin ein weiteres Mal mit der Funktion *DMX_set_DMX_Pin_manual* manuell beschreibbar gemacht und der Pin mit einem Low-Pegel beschrieben um das *Brake*-Signal des DMX-Protokolls zu senden. Anschließend wird der Zustand der entsprechenden LED invertiert um den Benutzer eine Rückmeldung über einen erfolgreichen Sendevorgang eines Datenpaketes zu geben.

Optimierungsmöglichkeiten

Wie auch in der Praxisarbeit wird das Signal ohne *Interbytedelay*, also Verzögerung zwischen den einzelnen Datenbytes, gesendet. Dadurch wird das eingehende Signal nicht originalgetreu wiedergegeben, jedoch antsteht daraus kein Datenverlust oder eine Veränderung der Wiedergabefrequenz der einzelnen Datenpakete. Außerdem wird in der aktuellen Version des Programmcodes das *Interbytedelay* während der Aufnahme nicht gemessen oder registriert. Um diese Funktionalität bei der Wiedergabe zu implementieren muss zunächst eine entsprechende Messung des *Interbytedelays* während der Aufnahme erfolgen.

4.7 Aufnahmefunktionen

4.7.1 Endlos

4.7.2 Feste Aufnahmezeit

4.7.3 Step-Aufnahme

4.8 Wiedergabefunktionen

4.9 LED

4.10 LCD

4.11 SD-Karte (SDIO)

4.12 Menü

Literatur

- [1] Felix Bauer. Prototypentwicklung eines Aufnahme- und Wiedergabegerätes für DMX-Daten. 2021.
- [2] STMicroelectronics. *STM32F446xC/E - Datasheet - production data*, 2021.
- [3] STMicroelectronics. *RM0390 Reference manual*, 2018.
- [4] Dietmar Ehrhardt. *PLL (Phase Locked Loop)*, pages 270–278. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1992.
- [5] STMicroelectronics. *AN2867 Application note*, 2020.
- [6] Maxim Integrated. *MAX14945*, 2017.
- [7] Traco Electronic AG. *DC/DC Converter TEA 1 Series, 1 Watt*, April 2020. Rev. April 27, 2020.
- [8] ALPS Electric co., ltd. *Specifications No. 12E2006-3023*, November 2006.
- [9] Günter Kemnitz. *Technische Informatik*, volume Band. Springer, entwurf digitaler schaltungen edition, 2011.
- [10] M. Mitescu I. Susnea. *Microcontrollers in Practice*. Springer, 2005.
- [11] Ltd Shenzhen Eone Electronics co. *Specification For LCD Module 2004A*.
- [12] conrad.de. NE555 Schaltungen - Aufbau & Funktionsweise des Timers erklärt. Webseite.
- [13] Inc. USB Implementers Forum. Universial Serial Bus Power Delivery Specification. January 2017.
- [14] Inc. USB Implementers Forum. Battery Charging Specification. (Revision 1.2), March 2012.
- [15] Autodesk.com. What is EAGLE. Webseite. Zugriff am 26.07.2021.

Abbildungen

1	Schaltungsprinzip	4
2	STMicroelectronics STM32F446ZE Mikrocontroller Pinout [2, S. 41]	5
3	Beschaltung Quartz	6
4	MAX14945EWE+ Typical Application Circuit [6, s.19]	8
5	Encoder Schaltung [8]	9
6	Encoder-Signal bei Drehung im Uhrzeigersinn	9
7	LCD-Modul Vorderseite	10
8	LCD-Modul Rückseite	10
9	LED Schaltung	12
10	Schaltung Spannungsversorgung	13
11	EAGLE Symbol	13
12	EAGLE Footprint	13
13	EAGLE 3D-Modell	13
14	Modul "MAX"	14
15	Inhalt des Moduls "MAX"	14
16	Platinenvorderseite	15
17	Platinenrückseite	15
18	Platinenlayout-Aufteilung	15
19	Gehäuse 3D-Modell Frontseite	17

20	Gehäuse 3D-Modell Rückseite	17
21	Gehäuse Schnitt	17
22	Gehäuse Schnitt Draufsicht	17
23	Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht frontal	17
24	Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht	17
25	Gehäuse Clip-Mechanismus	18
26	Gehäuse Clip-Mechanismus Schnittansicht	18

A EAGLE

- Partsbib
- Projekt
- 3D-Modelle aus Fusion
- Bilder der Schaltung & und Platinenlayout

B CD-Anhang