

# High-End Audio-Streamer

Komponenten-Evaluation und Hardware-Design  
eines Audio-Streamers als Ersatz für CD-Player und  
FM-Radio in HiFi Systemen

**Projektstudie**

Autoren:	Rafael Klossner, Stefan Lüthi
Betreuer:	Roger Weber
Auftraggeber:	Institut für Intelligente Industrielle Systeme I3S BFH
Experte:	-
Datum:	26.06.2019, V1.1
Studiengang:	Elektrotechnik und Informationstechnologie



# Zusammenfassung

Ziel dieser Projektstudie und der Bachelor-Thesis ist die Neuentwicklung eines Audio-Streamers als Ersatz für CD-Player und FM-Radio in HiFi Systemen. Durch den Audio Streamer sollen bestehende HiFi Verstärker mit den modernen digitalen Audio-Quellen über das Internet oder von lokalen Speichermedien ergänzt werden.

Dazu müssen zuerst bestehende Produkte analysiert und daraus ein Lösungskonzept erarbeitet werden. Aus dem Konzept können Komponenten gewählt und evaluiert werden. Zudem kann daraus die Schaltung und die Leiterplatten für die Hardware erstellt werden. Dieser Teil wird in der Projektstudie behandelt. Während Bachelor-Thesis wird die Software entwickelt und die Hardware wird getestet.

Für die Evaluation wurde das Apalis i.MX6 Quad Computer on a Modul (CoM) von Toradex gewählt. Dies verfügt über vier ARM Kerne. Weiter wurde für die Evaluation ein fünf Zoll grosses Display mit Touchpanel für die Bedienung und ein Evaluation Kit des Digital Analog Wandlers (DAC) beschafft. Diese Arbeit zeigt auf, wie für das gewählte CoM die GNU/Linux Distribution Debian und deren Toolchain eingerichtet wurde. Dies umfasst die Cross-Kompilierung des Kernels und dem Einrichten des Device Tree, wie auch der Cross-Kompilierung des GUI-Frameworks Qt. Letzteres wird während Bachelor-Thesis für die Entwicklung der Bedienoberfläche verwendet. Mit der Hardware konnte zudem die Konnektivität vom CoM zum Display geprüft werden. Ausstehend sind die Tests der Ansteuerung des DAC Evaluation Kits.

Nebst der Evaluation wurden für die Hardware mehrere Leiterplatten entwickelt. Das Herzstück des Audio-Streamers ist das Mainboard. Darauf befindet sich das CoM, Speisungen und der DAC mit Ausgangsfilter. Als DAC werden zwei AK4493 von Asahi Kasei Microdevices verwendet. Bei der Wahl der Komponenten wurde auf deren Langlebigkeit und Hochwertigkeit geachtet. Das Mainboard führt die Anschlussmöglichkeiten des CoM aus dem Gehäuse, diese sind: USB, Ethernet, WiFi (optional), sowie ein Display Anschluss und ein Power-Button. Nebst dem Mainboard wurde ein Power-Supply Modul entwickelt, welches die Netzspannung auf die Gleichspannungen für das Mainboard wandelt. Die Leiterplatten werden in einem Aluminium Gehäuse Untergebracht. Das Front-Panel des Gehäuses wurde dazu bereits konstruiert und bearbeitet. Ausstehend ist das Bestellen, Bestücken und Testen der Leiterplatten.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	iii
1 Einleitung .....	1
2 Marktanalyse .....	3
2.1 Übersicht kommerziell erhältlicher DACs und Streamer .....	3
2.2 Analyse Schiit Bifrost .....	4
3 Konzept .....	7
3.1 Bedienkonzept .....	7
3.2 Gehäusekonzept .....	8
3.3 Blockschaltbild .....	9
4 Komponenten .....	11
4.1 Digital to Analog Converter (DAC) .....	11
4.2 Operationsverstärker .....	13
4.3 Digital Audio Broadcast (DAB+) Modul .....	13
4.4 Computer on a Module (CoM) .....	13
4.5 Display .....	16
5 Evaluation .....	17
5.1 Ziel der Evaluation .....	17
5.2 Vorgehen .....	17
5.3 Toolchain .....	18
5.4 Flashing Tools .....	19
5.5 Bootloader .....	20
5.6 Kernel .....	21
5.7 Device-Tree .....	23
5.8 Root-Filesystem .....	25
5.9 GUI-Framework .....	25
5.10 Ansteuerung des Displays .....	28
5.11 DAC-Treiber .....	29
5.12 Bibliothek für Audio-Streaming .....	29
5.13 Treiber für den Drehgeber .....	29
6 Schaltungsdesign .....	31
6.1 Übersicht Mainboard .....	31
6.2 Digital/Analog Wandler .....	33
6.3 DAC/OPAMP Speisung .....	38
6.4 Digital Isolator .....	43
6.5 Toradex Computer on a Module Carrier Board .....	44
6.6 Power Supply Unit (PSU) .....	48
6.7 Encoder-Modul .....	48
7 Layout & Gehäuse .....	51
7.1 Design Considerations .....	51
7.2 PCB Design .....	53
7.3 Gehäuse .....	55
8 Fazit .....	57
8.1 Auswertung Ziele .....	57
8.2 Pendenzen .....	57

8.3 Weiteres Vorgehen .....	58
8.4 Persönliche Reflexion .....	58
Selbständigkeitserklärung .....	61
Literaturverzeichnis .....	63
Abbildungsverzeichnis .....	67
Tabellenverzeichnis .....	69
Versionenverzeichnis .....	71
A Schema Multiboard Assembly .....	73
B Schema Mainboard .....	77
C Schema Power Supply Unit .....	99
D Schema Rotary Encoder .....	103

# 1 Einleitung

Immer mehr Leute beziehen ihre Musik über Streaming-Dienste. Mittlerweile liefern einige dieser Dienste das breite Musikangebot auch in CD-Qualität. Damit sind Streaming-Dienste auch für audiophile Hörer interessant. Um diese Streaming-Dienste nutzen zu können werden hochwertige Geräte mit Netzwerkanbindung benötigt. Damit ältere High-End Verstärker weiterhin genutzt werden können, soll das Streaming von einem separaten Gerät übernommen werden. Der modulare Aufbau erhöht die Nutzungsdauer, da einzelne Komponenten ausgetauscht werden können.

Um die Bedürfnisse audiophiler Hörer befriedigen zu können, werden hohe Anforderungen an das Streaming-Gerät gestellt. Hier kommt der Audio-Streamer ins Spiel. Der Audio-Streamer soll High-End Verstärker um die Funktion des Streamings erweitern. Dabei steht vor allem der Digital-Analog-Wandler (englisch DAC) im Vordergrund. Der DAC entscheidet darüber, in welcher Qualität das Audiosignal beim Verstärker ankommt. Daher werden hohe Ansprüche an den DAC gestellt.

Um den Prototyp des Audio-Streamers zu entwickeln sollen im Rahmen der Vorstudie alle Vorbereitungsarbeiten abgeschlossen werden. Dazu gehört die Einarbeitung in das Thema und die Durchführung einer Marktanalyse um den aktuellen Stand der Technik zu ermitteln. Auf Basis der Marktanalyse wird das Konzept des Audio-Streamers erstellt. Das Konzept soll spezifizieren wie der Audio-Streamer aufgebaut werden soll. Anhand dieses Konzepts soll das Schema und das Layout für den Print erstellt werden. Dazu müssen alle Bauteile ausgewählt und ins Layout integriert werden. Dabei soll insbesondere Wert auf die Qualität des Schemas und der Bauteile gelegt werden, da sie für die Klangqualität massgebend ist. Der Print soll bis zum Ende der Vorstudie bestellt werden, damit dieser für die Thesis zu Verfügung steht.

Für die nötigen Softwarekomponenten wird anhand des Konzepts eine Evaluation durchgeführt. So sollen in einem ersten Schritt alle notwendigen Komponenten bestimmt werden. Anschliessend soll durch Recherche festgestellt werden welche Komponenten bereits existieren. Daraufhin soll mithilfe des Konzepts für jede Komponente die passende ausgewählt und für die Verwendung mit dem Audio-Streamer angepasst werden. Das Ziel ist es, am Ende der Evaluation die Grundlage für den Beginn der Softwareentwicklung vorliegen zu haben. So kann in der Thesis mit dem Design und der eigentlichen Softwareentwicklung gestartet werden.



## 2 Marktanalyse

Eine Analyse einiger kommerziell erhältlicher Produkte soll zeigen, wie moderne Audio-Streamer aufgebaut sind. Die gewonnenen Informationen sollen helfen das Konzept zu erstellen und Komponenten auszuwählen.

### 2.1 Übersicht kommerziell erhältlicher DACs und Streamer

Das Herzstück einer Audio-Quelle ist der Digital/Analog-Wandler (DAC). Dieser kann auf verschiedene Arten aufgebaut werden, das Spektrum reicht von vollintegrierten Audio-DAC ICs über konventionelle DAC ICs bis hin zu diskret aufgebauten R-2R Netzwerken.

Die folgende Tabelle soll aufzeigen, welche Art von DAC in welcher Preisklasse verwendet wird.

Bezeichnung	Preis / \$	DAC	Resolution / Bit	Sample Rate / kHz
<b>Sony DMP-Z1</b>	9999	AKM 2xAK4497	32	768
<b>Auralic Vega G2</b>	5699	Modified ESS SABRE Chip	32	384
<b>Chord Hugo 2</b>	2695	Xilinx Artix 7	32	768
<b>NAIM DAC V1</b>	2595	Analog Devices SHARC DSP	24	384
<b>Schiit Yggdrasil</b>	2399	Analog Devies AD5791	24	192
<b>Benchmark DAC3 HGC</b>	2195	ESS ES9028PRO	32	192
<b>Mytek Brooklyn DAC+</b>	2195	ESS ES9028PRO	32	384
<b>Cambridge Audio CXN</b>	1250	Cirrus Logic 2xWM8740	24	192
<b>RME ADI-2 DAC</b>	1099	Unknown	32	768
<b>NAD M-51</b>	1000	Unknown	25	844
<b>PS Audio PerfectWave DAC</b>	999	Cirrus Logic WM8742	24	192
<b>Parasound NewClassic 200</b>	895	TI PCM1798	32	192
<b>Marantz HD-DAC1</b>	799	Cirrus Logic CS4398	24	192
<b>Chord Mojo</b>	599	Xilinx Artix-7	32	768
<b>iFi Audio xDSD</b>	399	Unknown	24	768
<b>Resonessence Herus</b>	350	ESS ES9010K2M	24	352
<b>Meridian Audio Explorer2</b>	250	TI PCM5102	24	192
<b>Optoma NuForce uDAC5</b>	199	ESS SABRE	24	384
<b>FiiO Q1 Mark II</b>	100	Unknown	32	384
<b>Schiit Modi 3</b>	99	AKM AK4490	32	384
<b>Camb. Audio DacMagic XS V2</b>	75	ESS ES9023	24	192

Tabelle 2.1: Vergleich von DACs in kommerziellen Produkten [1]

### **2.1.1 Audio DAC oder konventioneller DAC**

Moderne Audio DACs verwenden die Sigma-Delta Architektur mit Oversampling, d.h. dass das digitale Audio Signal interpoliert wird, um eine höhere Sampling Rate zu erreichen. Dadurch wird die benötigte Stetigkeit der externen Alias-Filter verringert. Denn durch die höhere Sample Frequenz werden die Aliasfrequenzen auf eine höhere Frequenz gedrängt. Dieses Signal wird anschliessend digital gefiltert. [2]

Dieser Prozess benötigt einen Signalprozessor und beeinflusst das Klangbild des DACs. Um diese Eigenschaften steuern zu können verwenden einige Hersteller im teuersten Segment programmierbare Logikbausteine (FPGA) und konventionelle integrierte DACs. Diese sind in der DAC Spalte mit Xilinx oder Analog Devices SHARC DSP zu erkennen.

### **2.1.2 Hersteller**

Zu den aufgelisteten Audio DAC Hersteller gehören: Asahi Kasei Microdevices (AKM), ESS Technology, Cirrus Logic und Texas Instruments. Für die konventionellen DACs werden FPGAs von Xilinx oder Signalprozessoren von Analog Devices in Kombination mit DACs von Analog Devices verwendet.

### **2.1.3 Auflösung**

Die Auflösungen befinden sich alle im Bereich von 24 Bit bis 32 Bit. Diese Werte sind deutlich höher als die typische 16 Bit Auflösung von CDs und den meisten anderen digitalen Medien. Hier gilt es jedoch zu beachten, dass die Bitbreite bei der Signalverarbeitung Informationsverlust durch Rundungsfehler verhindert.

### **2.1.4 Sample Rate**

Die Sample Rate liegt zwischen 192 kHz und 844 kHz. Diese Werte überschreiten die typischen Werte von 44 kHz deutlich. Dies ist auf das beschriebene Oversampling-Verfahren zurückzuführen.

### **2.1.5 Zusammenfassung**

Für diese Arbeit werden keine Signalprozessoren oder FPGAs verwendet. Somit gilt es für die Audio-DACs von AKM, Cirrus Logic und Texas Instruments einen detaillierten Vergleich zu erstellen. ESS wurde hierbei ausgeschlossen, da dieser Hersteller Datenblätter nur mit Non Disclosure Agreements (NDA) zu Verfügung stellt.

Weiter soll der integrierte DAC vorzugsweise eine Auflösung von 32 Bit und eine Sample Rate von >384 kHz aufweisen.

## **2.2 Analyse Schiit Bifrost**

Detaillierte Produktbilder erlauben eine genauere Analyse des Schaltungsdesigns moderner DACs. Nur wenige Hersteller stellen hochauflösende Bilder der Leiterplatten auf ihre Webseite. Im Folgenden wird beispielhaft der Bifrost DAC von Schiit Audio untersucht. Andere DACs sind ähnlich aufgebaut, jedoch können die entsprechenden Bilder nur auf Foren in schlechter Qualität aufgefunden werden.

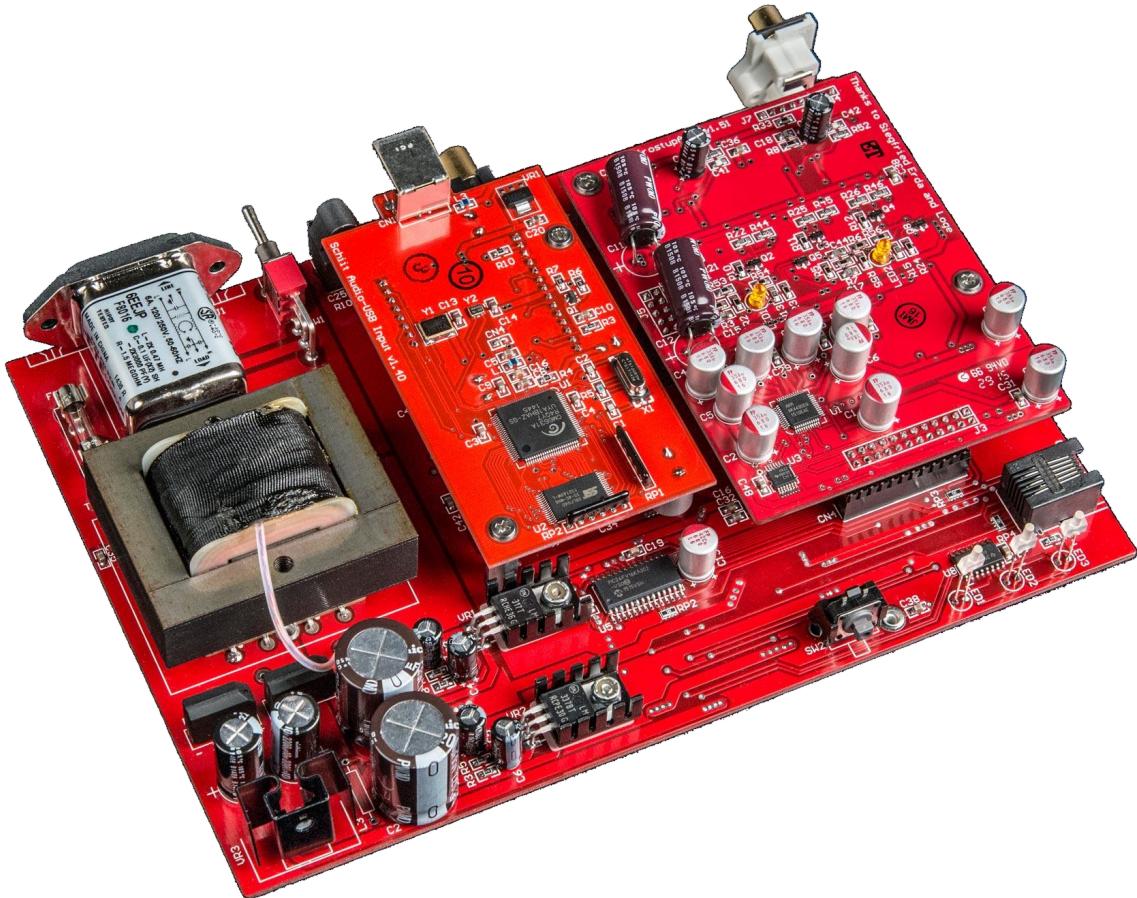


Abbildung 2.1: Leiterplatte des Schiit Bifrost DAC (\$399.-) [3]

### 2.2.1 Speisung

An der oberen linken Seite in Abbildung 2.1 ist der Gerätestecker mit Filter zu erkennen. Mit einem Durchgangsfilter können Störungen des Stromversorgungsnetz gedämpft und somit von der empfindlichen Analogschaltung ferngehalten werden. Nach dem Netzschalter und der Sicherung wird die Speisung auf einen Transformator geführt. An unteren linken Bildrand sind deutlich Gleichrichter und Glättungskondensatoren zu erkennen. Bei den *grossen* Kondensatoren handelt es sich um die PW Serie der Herstellers Nichicon. Diese Serie ist für kleine Impedanzen ausgelegt. Rechts neben den Kondensatoren sind zwei Komponenten im TO-220 Gehäuse ersichtlich. Die Aufschriften LM317 und LM337 lassen auf Linearregler schliessen.

### 2.2.2 DAC

Der DAC befindet sich auf einem Steckmodul auf der rechten Seite in Abbildung 2.1. Gemäss der Produktbeschreibung wird der DAC Chip AK4490 von AKM verwendet. Um das IC herum sind weitere Kondensatoren angeordnet. Die Aufschrift lässt auf die FP Serie der Aluminium-Polymer Kondensatoren von Nichicon schliessen. Polymer Kondensatoren haben im Vergleich zu anderen Aluminium Elektrolyt Kondensatoren den Vorteil, dass sie eine deutlich kleinere Impedanz aufweisen [4]. Die vielen kleinen Komponenten in der Mitte des Steckmoduls und die Absenz eines 8-Pin IC deuten auf einen diskreten aktiven Filter.

### 2.2.3 Zusammenfassung

Aus der Analyse lässt sich schliessen, dass für die Speisung der Analog-Schaltung der Ansatz mit Transformator plus Gleichrichter und nachfolgendem Linearregler einer Schaltung mit Schaltregler zu bevorzugen ist.

Weiter scheinen die Kondensatoren einen entscheidenden Einfluss auf die Schaltung zu nehmen. So sind beinahe keine Keramik Kondensatoren zu sehen. Es werden mehrheitlich Elektrolyt Kondensatoren hoher Qualität oder bei kritischen Stellen auch Aluminium Polymer Kondensatoren verwendet. Bei einem weiteren Produkt von Schiit (Gungir) werden für das aktive Filter zudem Folienkondensatoren von WIMA verwendet.

Die Beschaltung des DAC IC zeigt, dass hier nur hochwertige Komponenten verwendet werden können. Der Schaltungsaufbau des aktiven Filters variiert von Produkt zu Produkt, manchmal sind sie diskret oder integriert aufgebaut.

# 3 Konzept

In diesem Kapitel wird ein Lösungsvorschlag für die in der Einleitung stehender Fragestellung vorgestellt. Dies beinhaltet ein Blockschaltbild des Systems, ein Entwurf eines Gehäuses und ein Konzept für die Bedienung des Geräts.

## 3.1 Bedienkonzept

Das Bedienkonzept des Audio-Streamers spezifiziert die Schnittstelle zwischen Gerät und Nutzer. Daher entscheidet dieses Konzept darüber, wie intuitiv die Bedienung des Geräts ausfallen wird und letztlich über die Zufriedenheit der Nutzer.

Das Ziel des Audiostreamers ist das Abspielen von Musik. Daher muss durch das Bedienkonzept die Musikauswahl in den Vordergrund gestellt werden. Damit die Bedienung möglichst einfach bleibt, wird als Eingabegerät ein Touchscreen verwendet. Der Vorteil des Touchscreens liegt in der Verbindung von Ein- und Ausgabegerät. Um die Bedienbarkeit zu erleichtern, wird zusätzlich ein Drehgeber eingesetzt. Dieser erleichtert insbesondere das Scrollen durch Listen.

Damit der Audio-Streamer mehrere Funktionen erfüllen kann, ist eine Menu-Struktur notwendig. Für eine intuitive Bedienung, wird die Menu-Struktur möglichst flach gewählt. Das heisst, es sind möglichst viele Funktionen auf der gleichen Menu-Ebene verfügbar. Dies verhindert mühsames Suchen durch den Benutzer. Die Struktur wird deshalb in nur 3 Ebenen aufgeteilt:

1. Hauptmenu
2. Songauswahl
3. Abspielanzeige

Das Hauptmenu dient dazu ein Abspielmedium, wie Datenträger oder Streaming-Dienst, zu wählen. Zusätzlich sollen aus dem Hauptmenu die Einstellungen erreichbar sein. In den Einstellungen kann vor allem der DAC konfiguriert werden. Da der Audio-Streamer erweiterbar ist, wird das Hauptmenu modular aufgebaut. Die einzelnen Auswahlmöglichkeiten werden dem Benutzer als Kacheln präsentiert. Damit können, je nach Konfiguration, Kacheln entfernt oder hinzugefügt werden.

Die Songauswahl soll möglichst Zielführend sein. Da bei Streaming-Diensten oft Millionen von Songs zur Verfügung stehen, ist eine Suchfunktion notwendig. Um das Menu flach zu halten, kann der Suchbegriff eingegeben werden, ohne vorher zu spezifizieren nach was gesucht werden soll. Die Ergebnisse werden anschliessend kategorisch sortiert nach Album, Song und Interpret angezeigt. Zusätzlich kann auch auf eine Liste mit allen verfügbaren Songs, Interpreten oder Alben zugegriffen werden. In allen Fällen erfolgt die Auswahl des Songs durch den Drehgeber oder durch das Touchscreen.

Bei der Abspielanzeige wird der Titel, der Interpret und das Cover des aktuellen Songs angezeigt. Zusätzlich wird die aktuelle Abspielzeit mit einem Balken visualisiert. Die Bedienung erfolgt durch Knöpfe auf dem Touchscreen. Damit wird das Abspielen entweder gestoppt oder gestartet und zusätzlich kann der Song gewechselt werden.

## 3.2 Gehäusekonzept

Der Audio-Streamer wird in Kombination mit weiteren HiFi Geräten wie Verstärkern verwendet. Er muss somit optisch zu den anderen Geräten passen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Geräte-Breite und die Anschlüsse.

Die Audio-Ausgänge, Anschlüsse des Computer Moduls und der Gerätestecker sind auf der Rückseite zu platzieren. Dies erlaubt die einfache Verkabelung mit weiteren Geräten. Die Breite des Audio-Streamer wird für den in diese Arbeit verwendeten Vollverstärker 320BEE von NAD angepasst (430 mm). Das Design der Leiterplatten soll es jedoch auch ermöglichen Gehäuse von geringerer Breite zu verwenden (z.B. Neukomm Audio Systems, 320 mm).



Abbildung 3.1: Entwurf der Vorderseite des Audio-Streamers

Die Abbildung 3.1 zeigt die Frontplatte des Audio-Streamers. Darauf befindet sich von links nach rechts:

- Geräteschalter zum ein-/ausschalten des Computer Moduls
- USB Anschluss, der das Abspielen ab einem USB-Stick ermöglicht
- Touchscreen zur einfachen Bedienung des Audio-Streamers
- Drehgeber zum schnellen scrollen in Listen

## 3.3 Blockschaltbild

### 3.3.1 Übersicht

Aus den Anforderungen der Bedienung und der Konnektivität, sowie der Analyse kommerziell erhältlicher Audio-Streamer kann das Blockschaltbild erstellt werden.

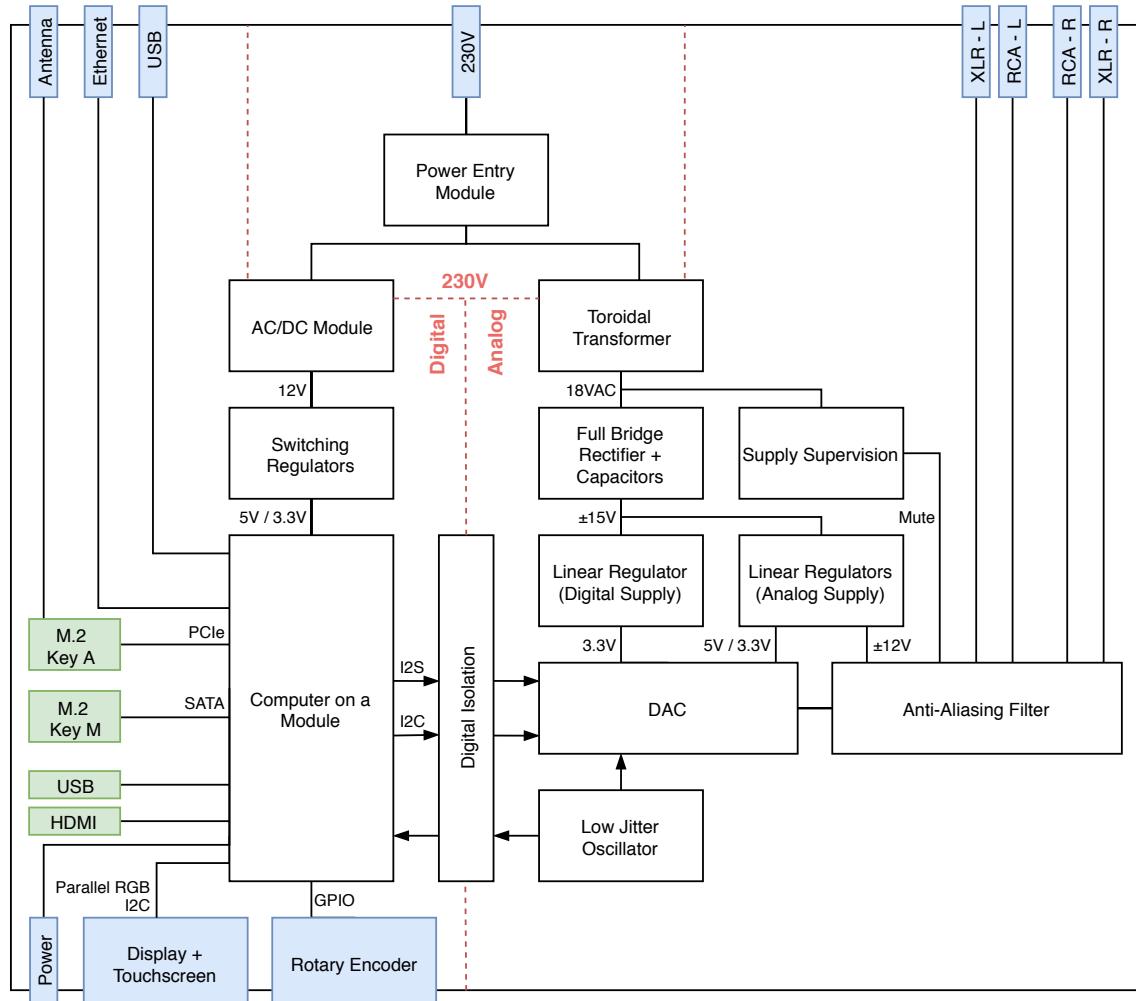


Abbildung 3.2: Blockschaltbild des Audio-Streamers; blau: Schnittstellen des Audio-Streamers, grün: interne Schnittstellen

In Abbildung 3.2 lassen sich drei Zonen identifizieren:

1. Die 230V Speisung, welche die DC Speisungen für die beiden weiteren Zonen bereitstellt
2. Die analoge Zone mit dem DAC, den Operationsverstärkern und deren Speisung
3. Die digitale Zone mit dem Computer Modul, Peripherie und deren Speisung

### 3.3.2 Speisung

Die Netzspannung wird bei Durchgang in den Audio-Streamer mit einem Power-Entry Modul gefiltert, um Störungen vom Netz zu beseitigen. Anschliessend trennt sich der Pfad für die digitale und analoge Speisung. Für die digitale Speisung wird ein geschaltetes AC/DC-Modul verwendet. Da beim Computer Modul ein Strom im Ampere-Bereich fliesst, ist die Verwendung eines Schaltreglers aufgrund der hohen Effizienz notwendig. Für die Speisung der analogen Seite wird der Ansatz eines Transformators in Kombination mit Gleichrichter und Glättungskondensatoren verwendet. Im Vergleich zum AC/DC-Modul benötigt diese Schaltung mehr Platz, ist schwerer und hat eine tiefere Nennleistung. Jedoch werden die Störungen hier auf ein Minimum beschränkt (in

erster Linie niederfrequente 100 Hz Ripple von der Netzfrequenz). Da beim DAC keine grossen Ströme erwartet werden, kann die Speisung in einer akzeptablen Fläche untergebracht werden.

Diese Schaltung wird als Power Supply Unit (PSU) auf einer separaten Leiterplatte realisiert.

### 3.3.3 Analog: DAC

Mittels Linearregler werden die Speisungen für den DAC und die Operationsverstärker erzeugt. Linearregler haben in Vergleich zu Schaltreglern einen deutlich tieferen Wirkungsgrad, da sie die Spannungsdifferenz dem Strom entsprechend in Wärme umwandeln. Sie weisen im Gegenzug weniger Störungen auf. Aufgrund dem geringen Leistungsverbrauch auf der analog Seite kann die Speisung mit Linearregler realisiert werden.

Der DAC empfängt den Audio Stream über die I<sup>2</sup>S-Schnittstelle. Er wandelt diese Daten in ein analoges Signal. Diese wird mit einem aktiven Filter (mit Operationsverstärker realisiert) auf die Alias Frequenzen der DA-Wandlung gefiltert. Das gefilterte Signal wird über XLR und RCA Buchsen auf die Rückseite des Audio-Streamers geführt. Konfiguriert wird DAC über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle.

Da der Master-Clock ein kritischer Bestandteil von I<sup>2</sup>S ist, soll ein Low Jitter Oscillator verwendet werden.

Die Schnittstellen zum Computer-Modul werden über einen Digitalen Isolator geführt, um Störungen der digitalen Seite bestmöglich zu isolieren.

### 3.3.4 Digital: Computer Modul

Das Computer Modul hat die Aufgabe eine Audio-Stream über das Netzwerk (Ethernet oder evtl. WiFi) zu empfangen und als digitalen Stream an den DAC zu leiten. Zudem muss es den DAC konfigurieren. Als weitere Audio Quellen können USB oder SATA implementiert werden. Das Computer-Modul verarbeitet zudem die Signale des Benutzers. Dieser kann das Gerät über ein Display mit Touchscreen oder einen Drehgeber steuern. Das Display soll über 24-Bit Parallel RGB oder HD-MI angeschlossen werden können. Der Power-Button auf der Frontseite steuert das Power-Signal des Computer-Moduls, d.h. das Gerät wird im Standby Modus betrieben und kann nicht komplett vom Netz genommen werden. Zur Reduktion des Stromverbrauchs, kann das Computer-Modul den Transformator ausschalten.

# 4 Komponenten

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an die einzelnen Komponenten aus dem Konzept Kapitel definiert. Mit diesen Angaben können angebotene Produkte für die Realisierung verglichen und ausgewählt werden.

## 4.1 Digital to Analog Converter (DAC)

### 4.1.1 Anforderungen

Der DAC hat die Aufgabe den digitalen Audio-Stream, den er vom CoM erhält in ein analoges Signal umzuwandeln. Bei dieser Umwandlung soll der DAC die Qualität des Audio Signals nicht beeinträchtigen. D.h. der Störabstand (SNR) des DAC muss höher sein, als den durch die digitale Codierung bedingten Störabstand. Die Störungen beim digitalen Signal sind durch das Quantisierungsrauschen bedingt und ergeben bei einer Auflösung von  $N = 16$  Bit folgenden Störabstand:

$$\text{SNR} = 6.02 \text{ dB} \cdot N + 1.76 \text{ dB} = 98.08 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Des Weiteren soll die *Total Harmonic Distortion* (THD) möglichst tief sein. Um Verzögerungen bei der Entwicklung zu verhindern muss der DAC bei einem Distributor auf Lager und das Datenblatt muss verfügbar sein.

### 4.1.2 Vergleich

Da sich die technischen Angaben Teils nur geringfügig unterscheiden, ist eine Gewichtung der Kenndaten nur schwer zu erstellen. Deshalb wird der Vergleich in Textform vorgenommen.

Ein Vergleich der der Auflösungen und Abtastraten in Tabelle 4.1 zeigt, dass die DACs eine Auflösungen von 24 oder 32 Bit haben und die Abtastraten weit über den üblichen 44 kHz liegen. Dies ist durch die Funktionsweise der DACs bedingt. Sie verwenden alle die *Oversampling*-Technologie, dabei wird das Eingangssignal auf eine höhere Abtastrate interpoliert. Für die Interpolation und das anschliessende digitale Filter schützt die hohe Auflösung vor Informationsverlust.

Beim Störabstand liegen alle Produkte (ausser dem PCM5242) innerhalb von 9 dB. Hierbei gilt zu beachten, dass alle DACs einen Mono-Mode unterstützen. In diesem Modus werden beiden Audio-Kanäle zusammengeschaltet, der SNR erhöht sich aufgrund der doppelten Amplitude um 3 dB. Dies ist insbesondere bei den günstigeren DACs (CS4398, AK4493, PCM5242) interessant.

Beim THD+N weisen alle, abgesehen vom PCM5242, gute Werte auf. Aus den Datenblättern wurde jeweils der beste Wert gewählt, bei der maximalen Abtastrate ist der THD+N jeweils tiefer.

Aus dieser ersten Analyse scheidet der PCM5242 aufgrund der schlechten Performance beim SNR und THD+N aus. Alle weiteren DACs erfüllen die technischen Anforderungen. Um die Auswahl weiter einzuschränken, müssten qualitative Merkmale, wie die digitalen Filter und der Oversampling Algorithmus beigezogen werden. Über solche Kriterien über Angaben aus dem Datenblatt zu entscheiden scheint nicht sinnvoll.

Somit kommen die letzten beiden quantitativen Kriterien zum Einsatz: Preis und die Verfügbarkeit eines Evaluations-Kits. Mit einem Kit können schon vor dem Schaltungsdesign Tests und Messungen mit dem CoM durchgeführt werden. Texas Instruments stellt die Kits für den PCM1792 und PCM1795 nicht mehr her. Für die Produkte von Cirrus, AKM und Analog Devices sind Kits verfügbar. Beim Preis scheidet der AK4497 aus, da der deutlich höhere Preis nicht durch bessere Performance gerechtfertigt werden kann.

Bauteilnummer	PCM1792 [5]	PCM1795 [6]	PCM5242 [7]	WM8741 [8]	CS4398 [9]	AK4497 [10]	AK4493 [11]	AD1955 [12]
<b>Hersteller</b>	TI	TI	TI	Cirrus	Cirrus	AKM	AKM	AD
<b>Auflösung / Bit</b>	24	32	32	24	24	32	32	24
<b>Sample Rate / kHz</b>	192	192	384	192	216	768	768	192
<b>SNR / dB</b>	129	123	114	125	120	128	123	120
<b>THD+N / dB</b>	-108	-106	-94	-100	-107	-116	-113	-110
<b>Preis / CHF</b>	14.04	6.04	8.39	20.73	11.05	52.53	8.75	14.77
<b>Distributor</b>	Mouser	Mouser	Mouser	Mouser	Mouser	Digikey	Digikey	Mouser

Tabelle 4.1: Vergleich bei Mouser und Digikey erhältlicher DAC ICs

Bauteilnummer	OPA1612 [13]	AD797 [14]	LT1115 [15]
<b>Hersteller</b>	Texas Instruments	Analog Devices	Linear Technology
<b>Channels</b>	2	1	1
<b>Input Voltage Noise @1kHz / nV/<math>\sqrt{\text{Hz}}</math></b>	1.1	0.9	0.9
<b>THD+N / dB</b>	-136	-120	-93
<b>PSRR / dB</b>	130	130	126
<b>Slew Rate / V/<math>\mu\text{s}</math></b>	27	20	15
<b>Preis / CHF</b>	6.38	10.1	5.75
<b>Distributor</b>	Mouser	Mouser	Mouser

Tabelle 4.2: Vergleich bei Mouser und Digikey erhältlicher Operationsverstärker

### 4.1.3 Entscheid

Die Wahl fällt auf den zwei AK4493, jeweils im Mono-Mode. Dadurch wird ein SNR von 126 dB erreicht, die Kosten steigen auf 17.50 Fr. Zu diesem Preis schlägt er den WM8741, CS4398 und den AD1955. Der AK4497 hat somit nur noch einen 2 dB besseren SNR, jedoch zum doppelten Preis. Die DACs Texas Instruments scheiden aufgrund der nicht mehr erhältlichen Evaluation Kits (PCM1792 und PCM1795) oder schlechten Performance (PCM5242) aus.

## 4.2 Operationsverstärker

Operationsverstärker werden für die Filter am Ausgang des DACs verwendet. Dabei soll wie schon beim DAC das Audio-Signal nicht beeinträchtigt werden. In der Tabelle 4.2 ist eine Auswahl von Operationsverstärker für den Audio-Bereich aufgelistet.

Beim Eingangsräuschen ist ein tiefer Wert erwünscht, hier liegen alle drei Operationsverstärker gleich auf. Der THD soll wie beim DAC möglichst negativ sein, um keine weiteren Störungen zum Signal hinzuzufügen. In diesem Punkt führt der OPA1612. Das *Power Supply Reject Ratio* (PSRR) gibt an, welchen Einfluss eine Störung der Speisung auf das Ausgangssignal hat. Dabei ist ein möglichst negativer Wert erwünscht. Hier liegen wiederum alle drei Verstärker gleich auf. Die *Slew Rate* gibt an, mit welcher Geschwindigkeit sich die Ausgangsspannung ändern kann. Der OPA1612 führt auch hier wieder. Beim Preis führt wiederum der OPA1612, da dieser der einzige der drei Operationsverstärker mit zwei Kanälen ist. Somit kostet ein Kanal 3.19 Fr.

Die Wahl fällt somit deutlich für den OPA1612 (2 Kanäle) und den OPA1611 (1 Kanal) von Texas Instruments.

## 4.3 Digital Audio Braodcast (DAB+) Modul

Die FM-Tuner werden in den kommenden Jahren mit der Abschaltung der FM-Sendestationen obsolet. Mit einem DAB+ Modul soll der FM-Tuner im HiFi System ersetzt werden. DAB+ Module werden von der Herstellern Frontier Smart Technologies, KeyStone Semiconductor und Silicon Labs angeboten. Von diesen Anbietern ist für Kleinkunden nur das IC (Si4684) von Silicon Labs erhältlich. Bei diesem IC ist zudem das Datenblatt frei verfügbar und es existiert ein Open Source Projekt auf GitHub [16].

Jedoch muss der Si4684 beim Starten mit einer Firmware geladen werden. Diese ist wiederum nicht mehr erhältlich. Silicon Labs hat auf Anfrage bestätigt, dass die Firmware nicht öffentlich verfügbar sein wird. Somit könnte nur eine binäre Applikation des Audio-Streamer, welche die Firmware bereits enthält vertrieben werden. Das compilieren aus dem Quellcode des Audio-Streamers wäre somit nicht möglich.

Aufgrund der Tatsache, dass kein DAB+ Modul existiert, welches in Kleinmengen bestellt kann, ein Datenblatt verfügbar ist und die notwendige Software frei zugänglich ist, wird kein DAB+ Modul im Audio-Streamer verbaut.

## 4.4 Computer on a Module (CoM)

### 4.4.1 Überblick

In diesem Kapitel wird der Variantenentscheid für den CoM dokumentiert. Dazu werden verschiedene Module miteinander verglichen. In der Tabelle 4.3 sind die unterschiedlichen Module aufgeführt. Darunter befinden sich drei Module der Firma Toradex und drei Raspberry Pi's. Bei den Raspberry Pi's handelt es sich in einem Fall um die klassische Ausführung als Einplatinencomputer und in den zwei anderen Fällen um ein sogenanntes Compute Module. Da die unterschiedlichen CoM nur schwer anhand ihrer Spezifikationen vergleichbar sind, wird der Variantenentscheid in textueller Form durchgeführt.

<b>SoM</b>	Apalis iMX6 Quad 1GB [17]	Apalis iMX6 Dual 1GB [18]	Colibri iMX6 DualLite 512MB [19]	Raspberry Pi 3 B+ [20]	Raspberry Pi Compute Module 3 [21]	Raspberry Pi Compute Module 3+[22]
<b>Hersteller</b>	Toradex	Toradex	Toradex	Raspberry Pi Foundation	Raspberry Pi Foundation	Raspberry Pi Foundation
<b>SoC</b>	NXP i.MX 6Quad	NXP i.MX 6Dual	NXP i.MX 6DualLite	BCM2837B0	BCM2837	BCM2837B0
<b>Kerne</b>	4 x Arm Cortex A9	2 x Arm Cortex A9	2x Arm Cortex A9	4 x Arm Cortex A53	4 x Arm Cortex A53	4 x Arm Cortex A53
<b>CPU Clock / GHz</b>	1	0.8	1	1.4	1.2	1.2
<b>GPU</b>	Vivante GC2000	Vivante GC2000	Vivante GC880	Broadcom Dual Core VideoCore IV	Broadcom Dual Core VideoCore IV	no Data
<b>GPU Clock / GHz</b>	0.8/1	0.8/1	0.315/0.575	0.3 / 0.4	0.3 / 0.4	no Data
<b>3D</b>	yes	yes	yes	yes	yes	no Data
<b>Flash (eMMC) / GB</b>	4	4	4	SD	4	32
<b>RAM DDR3 / GB</b>	1	1	0.512	1	1	1
<b>I2S</b>	yes	yes	yes	yes	yes	no Data
<b>PCIe</b>	yes	yes	no	no	no Data	no Data
<b>SATA</b>	SATA-II	SATA-II	no	no	no Data	no Data
<b>serial display</b>	Dual Lane MIPI DSI	Dual Lane MIPI DSI	no	MIPI DSI	MIPI DSI	no Data
<b>parallel display port</b>	24bbp	24bbp	24bbp	no	no	no Data
<b>Datasheets</b>	yes	yes	yes	only specs	only specs	only specs
<b>Reference Manual</b>	yes	yes	yes	no	no	no
<b>Design Ressources</b>	Altium Files Development Board	Altium Files Development Board	Altium Files Development Board	no	no	no
<b>Supported bis</b>	2028	2028	2028	2023	2023	no Data
<b>Temperaturbereich / °C</b>	0 to 70	(-40) to 85	0 to 70	0 to 70	0 to 70	no Data
<b>Kosten / CHF</b>	125.3	131.3	90.6	35	35	50

Tabelle 4.3: Vergleich von potentiellen CoM

Beim Vergleich hat sich herausgestellt, dass sich die Module von Toradex und die Raspberry Pi's im wesentlichen in folgenden Punkten unterscheiden:

- Dokumentation und Support
- Integrierbarkeit in den Audio-Streamer
- Konnektivität

In den folgenden Kapitel werden die Unterschiede zwischen den Modulen etwas genauer erläutert.

#### **4.4.2 Dokumentation und Support**

Als Basis zur Programmierung von neuen Funktionalitäten dient das Reference Manual. Dieses Manual ist bei allen Modellen des Raspberry Pi nur auf Einwilligung des Chipherstellers Broadcom verfügbar. Dies schränkt die Erweiterungsmöglichkeiten des Audio-Streamers auf bereits implementierte Treiber ein. Bei den Modulen von Toradex ist die komplette Dokumentation frei erhältlich. Somit können für den Hardwarezugriff eigene Treiber entwickelt werden.

Zusätzlich sind zu allen Evaluation Boards von Toradex die Altium Design Files vorhanden. Dies ist ein enormer Vorteil bei der Entwicklung einer eigenen, zum Modul passenden, Hardware. Dies bringt insgesamt eine „shorter time to market“. Dieser Punkt betrifft nur die SoM und nicht der klassische Raspberry Pi 3 B+.

Im Falle von Problemen bei der Entwicklung oder Erweiterung ist ein guter Support wichtig. Zwar bieten die Raspberry Pi's eine grosse Community, allerdings wird der Support von Toradex in diesem Vergleich als besser eingeschätzt. Da der Support bei Toradex direkt von Mitarbeiter übernommen wird, welche an der Entwicklung der Module beteiligt sind. Der Support durch den Hersteller ist durch Toradex bis 2028 und durch die Raspberry Pi Foundation bis 2023 garantiert. Damit kann bei Toradex länger mit Unterstützung gerechnet werden.

#### **4.4.3 Integrierbarkeit in den Audio-Streamer**

Grundsätzlich sind Module besser in das Endprodukt integrierbar als eine fertige Platine. Dies Spricht für die Wahl eines CoM mit einem SODIM Interface. Wobei hier nur das klassische Raspberry Pi 3 B+ benachteiligt ist.

#### **4.4.4 Konnektivität**

Die Konnektivität mit der Peripherie des Endproduktes wird hoch gewichtet. Den sie entscheidet über die Anzahl Erweiterungsmöglichkeiten und damit auch über die Nutzungsdauer des Produktes. Die Schnittstellen entscheiden auch darüber, wie einfach gewünschte Peripherien angeschlossen werden können. So kann z.B. durch den parallelen Display-Port (RGB 24bbp) eine HDMI Schnittstelle eingespart werden. Dies spart rund 30CHF bei den Kosten für das Display. Die RGB Schnittstelle ist allerdings nur bei den Toradex Modulen vorhanden.

Ein weiteres Kriterium ist die Erweiterbarkeit durch ein Massenspeichermedium, worauf Audio-Dateien abgespeichert werden können. Dazu ist eine SATA-II-Schnittstelle ideal. Zwar ist hier auch USB 3.0 eine Option, allerdings bietet SATA-II eine bessere Integrierbarkeit (kein Kabel) und die bessere Performance.

#### **4.4.5 Zusammenfassung und Entscheidung**

Die Vorteile in technischer Hinsicht, liegen klar bei den Modulen von Toradex. Allerdings ist der Preis für die Module von Toradex etwa dreimal so hoch, wie der Preis der Raspberry Pi's. Trotzdem wurde eine Verwendung eines Raspberry Pi's aus oben genannten Gründen ausgeschlossen. Durch die bessere Konnektivität der Module von Toradex kann der höhere Preis teilweise kompensiert werden.

Bei der Entscheidung zwischen den Toradex Modulen Apalis und Colibri fiel vor allem die PCIe Schnittstelle und GPU Performance ins Gewicht. Durch PCIe kann das Endprodukt später mit WLAN oder Bluetooth erweitert werden. Diese Option fehlt beim Colibri Modul. Zudem wird eine

Applikation mit GUI verwendet. Dazu ist eine bessere GPU wünschenswert. Aus diesen Gründen viel die Entscheidung auf ein Apalis Modul.

Das Apalis Modul gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Aus Performance-Gründen wurde die Variante mit 1GB RAM gewählt. Zusätzlich unterscheiden sich die Module durch die Anzahl der Kerne. Die Dual-Core Variante mit 1GB RAM ist nur für den industriellen Temperaturbereich erhältlich und ist damit teurer als die Quad-Core Variante. Aus diesem Grund fiel die Entscheidung auf den Apalis iMX6 Quad 1GB CoM.

## 4.5 Display

Das Gerät wird über ein Display mit Touchscreen gesteuert. Um die einfache Suche von Titel und Interpreten zu ermöglichen, wird eine Bildschirmtastatur benötigt. Damit die einzelnen Buchstaben treffsicher gewählt werden können, wird eine minimale Bildschirmdiagonale von ca. 5 Zoll benötigt. Grösserer Display würden die Bedienung vereinfachen, diese erhöhen jedoch die Geräte-Dicke und den Preis.



Abbildung 4.1: Newhaven NHD-5.0 Display mit kapazitiv Touchpanel

Für die Evaluation werden Displays von Newhaven Display verwendet, da diese bei den Distributoren Mouser und Digikey an Lager sind und somit innert wochenfrist geliefert werden. In der Abbildung 4.1 sind die ausgewählten Displays dargestellt. Dabei handelt es sich zwei mal um dasselbe Panel (NHD-5.0), jedoch mit unterschiedlichen Anschlüssen. Die Ausführung mit Parallelport benötigt zum Anschluss an das Toradex CoM einen Adapter. Das Design dieses *Generic RGB Display Adapter* wird von Toradex zur Verfügung gestellt. Das gewählte Display wird auf der Liste der unterstützten Displays aufgeführt [25]. Die Ausführung mit HDMI und USB ist teurer als die vorherige, ist jedoch einfacher zu verwenden, da kein Adapter verwendet werden muss. Die HDMI Ausführung wird als Rückfall-Ebene verwendet, um Verzögerungen im Projekt bei Problemen mit dem Display-Adapter oder Linux-Treibern zu verhindern.

# 5 Evaluation

## 5.1 Ziel der Evaluation

In diesem Kapitel wird die Evaluation rund um den HiFi-Audio-Streamer behandelt. Die Auswahl der HW-Komponenten wird in Kapitel 4 dokumentiert. Nun geht es darum die passenden Softwarekomponenten zu evaluieren. Der Fokus liegt dabei auf den nötigen Funktionalitäten zur Realisierung des Konzepts in Kapitel 3. Das Ziel der Evaluation ist es, am Ende alle nötigen Systemkomponenten ausgewählt und für einen Test bereitgestellt zu haben. Wo möglich, sollen die Komponenten bereits während Vorstudie getestet werden.

Aus der Aufgabenstellung geht hervor, dass ein Linux Betriebssystem eingesetzt wird um den HiFi-Audio-Streamer zu betreiben. Daraus ergeben sich folgende Komponenten welche evaluiert werden müssen:

- Toolchain
- Flushing Tools
- Bootloader
- Kernel
- Device-Tree
- Root-Filesystem

Aus dem Konzept ergeben sich weitere Anforderungen an das System. Es wird ein GUI für die Interaktion mit dem Benutzer benötigt. Zudem werden Treiber für die externen Hardwarekomponenten benötigt. Daraus ergeben sich folgende, weitere Komponenten, welche evaluiert werden müssen:

- GUI-Framework
- Ansteuerung des Displays
- DAC-Treiber
- Bibliothek für das Audio-Streaming
- Treiber für den Drehgeber

## 5.2 Vorgehen

Bei der Evaluation der Komponenten werden, wo vorhanden, Ressourcen des Apalis iMX6Q CoM Herstellers Toradex verwendet. Allerdings wird bei jeder Komponente eine Evaluation durchgeführt. Damit kann sichergestellt werden, dass die Komponenten auch zum Konzept des HiFi-Audio-Streamers passen.

Toradex stellt für den Apalis iMX6Q CoM , zusätzlich zu den Ressourcen, eine Reihe von Tutorials zur Verfügung. Im Zusammenhang mit dem Ixora Carrier Board existiert ein Tutorial zur Inbetriebnahme des Moduls [26]. Das Tutorial [27] zeigt den gesamten Ablauf vom Herunterladen des Source Codes der einzelnen Systemkomponenten bis hin zum Flashen des Apalis iMX6Q CoM . Dieser Ablauf wird als Grundlage zur Anpassung des Linux Systems verwendet. Natürlich müssen zusätzlich Änderungen und Konfigurationen vorgenommen werden um das System den Anforderungen des HiFi-Audio-Streamers anzupassen. In folgenden Unterkapiteln wird auf diese Änderungen eingegangen.

Für die einzelnen Arbeitsschritte wird, wo es möglich ist, ein Shell-Skript geschrieben um die Abläufe zu automatisieren und wiederholbar zu machen. So wird für die Erstellung der Ordnerstruktur und das Herunterladen der wichtigsten Komponenten, das Skript tools.sh verwendet. Dieses erstellt folgende Ordnerstruktur im Verzeichnis home/<username>.

```
audiostreamer
- tools
  - linaro
  - kernel
  - uboot
  - debian_rootfs
    - debian
  - image
  - easyinstaller
  - qt5
    - qt5
    - qt-build
    - qt5-source
  - qt5_host
  - others
    - configuration_files
    - shell_scripts
- work
- qt-workspace
```

Dieses Verzeichnis wird als Grundlage für die Erstellung der Systemkomponenten verwendet. Dabei steht jeder Unterordner von audiostreamer/tools für eine solche Komponente.

Der zeitlich Ablauf der Evaluation ist im Zeitplan im Anhang dieses Dokuments festgelegt ??.

## 5.3 Toolchain

### 5.3.1 Überblick

Die sogenannte Toolchain bildet die Basis eines jeden Linux Systems. Sie dient im wesentlichen zur Kompilierung der einzelnen Systemkomponenten des Betriebssystems. Da Linux aus dem Betriebssystem GNU entstanden ist, wird noch heute die GNU Toolchain zur Entwicklung der Linux Komponenten eingesetzt. Konkret wird für die Kompilierung des Linux Kernels die GNU Compiler Collection (GCC) eingesetzt [28].

Zusätzlich wurde auch die Lizenzierung des GNU-Projekts für Linux übernommen. Somit stehen beide Systeme unter der General Public License (GPL) [29]. Damit eignen sich Linux sowie die passende GNU Toolchain optimal für das Konzept des HiFi-Audio-Streamers.

### 5.3.2 Arten von Kompilierung

Bei der Kompilierung von Linux Komponenten gibt es mehrere mögliche Vorgehensweisen. Unterschieden wird dabei vor allem zwischen Native Kompilierung und Cross Kompilierung. Wobei beim Nativ-Ansatz die Kompilierung des Source Codes direkt auf dem Zielsystem erfolgt. Dies ist der Standardansatz bei der Entwicklung von Software für Desktopcomputer. Hingegen bei Embedded Systemen, ist die Rechenleistung oft zu gering für eine Nativ Kompilierung. Daher wird für Embedded Systeme sogenannte Cross Kompilierung eingesetzt. Dabei wird der Source Code nicht auf dem Zielsystem, sondern auf einem Host-Rechner kompiliert. Mit diesem Ansatz kann das Problem der geringen Rechenleistung umgangen werden. Der Vorteil der Cross Kompilierung soll auch für den HiFi-Audio-Streamer genutzt werden.

### 5.3.3 Wahl der passenden Toolchain

Entscheidend bei der Auswahl der Cross-Toolchain ist die Architektur des Zielsystems. Dabei spielt die CPU Architektur, Big- oder Little-Endian, der Floating Point Support und das Application Binary Interface eine Rolle. Letzteres spezifiziert die Übergabe von Parametern zwischen Funktionen auf der Hardwareebene.

In diesem Projekt wird der iMX6Q von NXP eingesetzt. Dieser besteht im wesentlichen aus 4 Arm Cortex A9-Kernen mit einer 32-Bit Architektur. Die genaue Bezeichnung der Architektur ist ARMv7. Genau für diese Architektur muss die Toolchain ausgelegt sein.

Bei der Auswahl der Toolchain für diese Architektur stehen mehrere Optionen zur Auswahl. Vom CoM Hersteller Toradex wird eine OpenEmbedded Toolchain zur Verfügung gestellt. OpenEmbedded ist ein Synonym für das Yocto Framework [30] [31]. Das Yocto Framework dient dem Erstellen einer eigenen Benutzerdefinierten Linux Distribution inklusive Toolchain. In diesem Zusammenhang verwendet Toradex die Yocto kompatible Angström-Linux Distribution. Diese Variante hat den Vorteil, dass das gesamte System der gewünschten Anwendung angepasst werden kann. Allerdings macht es dieser Ansatz auch schwieriger bestehende Software für dieses System zu portieren. Weiter ist das Yocto Framework sehr komplex und benötigt eine lange Einarbeitungszeit. Dies verlängert insgesamt die Time-to-Market.

Die zweite Variante ist die Verwendung einer Linaro Toolchain. Bei Linaro handelt es sich um eine Engineering Organisation, welche am Linux Kernel und der GNU Toolchain für die ARM-Architektur mitentwickelt. Diese Entwicklungen werden unter der GPL veröffentlicht [32]. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Varianten liegt darin, wie mit den unterschiedlichen Hardware Architekturen umgegangen wird. Yocto arbeitet mit austauschbaren Layern um die Kompatibilität mit den verschiedenen Architekturen sicherzustellen. Bei Linaro wird für jede Architektur eine eigene Toolchain zur Verfügung gestellt. Somit muss nur beim Herunterladen der Toolchain auf die richtige Architektur geachtet werden. Zudem arbeitet Linaro mit dem Buildsystem Make, während Yocto das weniger bekannte System BitBake verwendet [30].

Bei der Realisierung des HiFi-Audio-Streamers spielt die Time-to-Market eine wichtige Rolle. Zudem sollen spätere Anpassungen an der Software so einfach wie möglich sein. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt die Linaro Toolchain verwendet. Die genaue Bezeichnung der Toolchain lautet wie folgt:

```
gcc-linaro-6.2.1-2016.11-x86_64_arm-linux-gnueabihf
```

Aus Stabilitätsgründen wird nicht die aktuellste Version der Linaro Toolchain eingesetzt. Für diese Projekt wird die Version 6.2.1-2016.11 eingesetzt. Diese Version wurde von Toradex zusammen mit der Kernelversion 4.9 bereits getestet und ist daher eine stabile Lösung für ein Embedded System. Die Toolchain kann direkt vom Linaro Server heruntergeladen werden [33].

### 5.3.4 Verwendung

Für die Kompilierung der Systemkomponenten, wie Kernel oder Bootloader, wird bei Linaro das Buildsystem Make verwendet. Damit Make weiß wo sich das Interface zur GCC befindet, muss eine entsprechende Umgebungsvariable exportiert werden. Umgebungsvariablen sind Key-Value Paare, welche in einer Shell hinterlegt werden können. Wichtig anzumerken ist, dass dies Variable mit dem Schliessen der Shell verloren gehen. Aus diesem Grund ist es praktisch die Umgebungsvariablen, bei jedem Öffnen einer Shell, standardmäßig zu exportieren. Dies geschieht durch einen Eintrag im File `/etc/profile` im Linux Root-Filesystem. Zusätzlich zum Pfad werden auch die Architektur ARCH, das Architektur Tuple CROSS\_COMPILE, der Projektpfad PROJECT und der Pfad ins Root-Filesystem INSTALL\_MOD\_PATH angegeben. Letzterer wird verwendet um bei der Installation von Kernel-Modulen den Pfad ins Root-Filesystem vorzugeben.

```
PATH=~/audiostreamer/tools/linaro/gcc-linaro/bin/:$PATH
export ARCH=arm
export CROSS_COMPILE=arm-linux-gnueabihf-
export PROJECT=~/audiostreamer
export INSTALL_MOD_PATH=~/audiostreamer/tools/debian_rootfs/debian
```

Nun ist das System bereit um mit der Kompilierung der Systemkomponenten fortzufahren.

## 5.4 Flashing Tools

### 5.4.1 Überblick

Beim sogenannten Flashen, werden die Systemkomponenten von Linux in den Flash-Speicher des Apalis iMX6Q CoM geladen. Da es sich um Flash Speicher handelt, sind die Daten persistent. So kann der Apalis iMX6Q CoM auch nach einem Spannungsunterbruch wieder mit dem gleichen System starten. Um den Apalis iMX6Q CoM zu Flashen, wird ein sogenanntes Image verwendet.

Ein Image enthält die 4 Hauptkomponenten eines Linux Systems: Bootloader, Kernel, Device-Tree und Root-Filesystem.

Toradex stellt für den Apalis iMX6Q CoM fertige Images zur Verfügung. Diese Images dienen als Grundlage für die Evaluation. Allerdings müssen Anpassungen vorgenommen werden um den Anforderungen des HiFi-Audio-Streamers gerecht zu werden. Diese Images von Toradex sind für das Flashen mit dem EasyInstaller vorgesehen [34].

### 5.4.2 Wahl der Methode zum Flashen

Der EasyInstaller vereinfacht den Prozess des Flashens. Um den Apalis iMX6Q CoM zu flashen, wird das Image des EasyInstallers über eine USB-Schnittstelle ins RAM des Apalis iMX6Q CoM geladen. Dabei bleibt der persistente eMMC Speicher unangetastet. Nun kann über ein USB-Speichermedium oder über eine SD-Karte ein neues Image in den eMMC Speicher geflasht werden. [34]

Der Vorteil des EasyInstallers liegt in der einfachen Erstellung eines Images. Es reicht aus, das Kernel Image mit dem Device-Tree und das Root-Filesystem je in eine tar .xz Datei zu komprimieren. Dazu kommen das Image des Bootloaders und einige Konfigurationsdateien. Das Erstellen der Images der einzelnen Komponenten ist in Kapitel 5.5 und Kapitel 5.6 beschrieben.

Ohne EasyInstaller erfolgt das Flashen des Apalis iMX6Q CoM mit der sogenannten Legacy Methode. Beim Legacy Boot wird der Bootloader gestartet. Mit einer Abfolge von Befehlen, können nun die Images der Systemkomponenten ausgetauscht werden. Bei einem anschliessenden Neustart wird mit den neuen Systemkomponenten gebootet. Die Legacy Methode stellt im Vergleich mit dem EasyInstaller einen Mehraufwand dar. [35]

Da der EasyInstaller von Toradex frei zur Verfügung gestellt wird, einen Arbeitsschritt einspart und zusätzlich eine graphische Oberfläche bietet, ist er eine ideale Lösung für den HiFi-Audio-Streamer.

### 5.4.3 Konfiguration des Easy Installers

Ein weiterer Vorteil des EasyInstallers ist die einfache Konfiguration. So kann mithilfe zweier Dateien das Verhalten beim Booten vorgegebene werden.

Die Hauptkonfigurationsdatei trägt den Namen image.json. Wie es die Dateiendung sagt, handelt es sich hierbei um ein JSON-File. In diesem werden die eMMC-Partitionen mit ihrer jeweiligen Grösse angegeben. Zusätzlich wird spezifiziert welches Image in welcher Partition abgelegt werden soll. Für das gesamte Image wird eine Bezeichnung mit Versionsangabe vergeben, damit lassen sich die unterschiedlichen Images auf der graphischen Oberfläche des EasyInstallers besser unterscheiden.

Eine weitere Konfigurationsdatei ist uEnv.txt. Diese Datei enthält die Bootloader Umgebungsvariablen, welche beim Laden aus dem eMMC gesetzt werden. Damit können dem Kernel Informationen und Einstellungen übergeben werden. Dies sind beispielsweise Informationen zum mounten des Filesystems, zur Bildschirmauflösung und zur Auswahl des gewünschten Device-Trees.

## 5.5 Bootloader

### 5.5.1 Überblick

Der sogenannte Bootloader hat beim Startvorgang die Aufgabe die Hardware zu initialisieren, den Kernel aus dem Flash ins RAM zu laden und diesem die Kontrolle über das System zu übergeben [36]. Bei den meisten Systemen ist es nicht möglich ohne Bootloader zu starten, da der SRAM-Speicher für den Kernel zu klein ist und der SDRAM-Speicher zuerst initialisiert werden muss. Dies trifft auch für den Apalis iMX6Q CoM zu.

Der Standardablauf beim booten eines Linux Systems ist wie folgt [36]:

- ROM Code

- Initialisiert Clock und wichtigste Peripherien
- Sucht auf Medium nach Image
- Lädt Second Stage Bootloader
- Second Stage Bootloader
  - Startet Pin-Muxing
  - Initialisiert SDRAM
  - Laden von Bootlader
- Bootloader
  - Initialisiert zusätzliche Peripherie
  - Setzt die Bootargumente (Umgebungsvariablen)
  - Lädt Kernel in SDRAM
- Kernel
  - Initialisiert restliche Peripherie
  - Mounted Root-Filesystem

Der beschriebene Bootvorgang ist in Abbildung 5.1 grafisch Dargestellt.

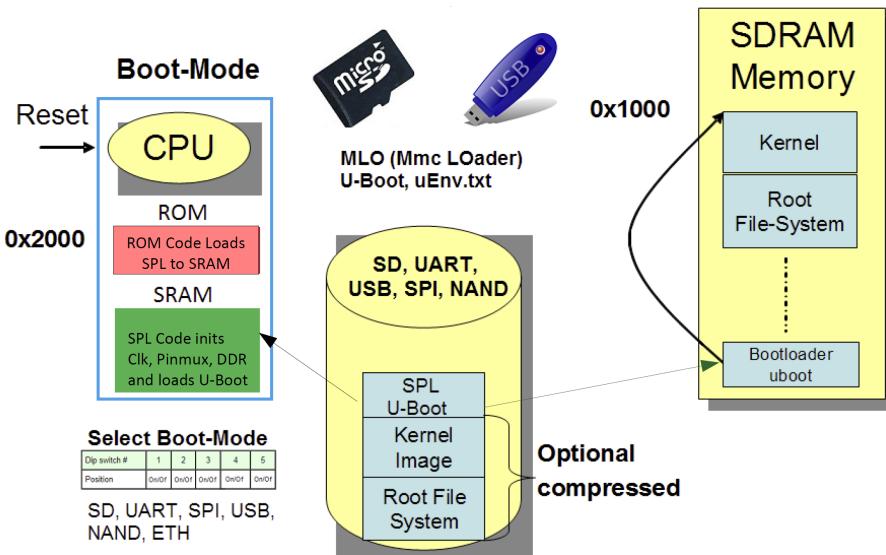


Abbildung 5.1: Bootvorgang eines Linux Systems [37]

### 5.5.2 Wahl des Bootloaders

Es gibt viele verschiedene Bootloader, die für Embedded Systeme verwendet werden können. Der universellste, und damit am häufigsten verwendete Bootloader, ist das U-Boot. U-Boot wird auch von Toradex als Bootloader eingesetzt. Aufgrund der universellen Einsatzmöglichkeiten und der Unterstützung durch Toradex, ist U-Boot die richtige Wahl für den HiFi-Audio-Streamer.

## 5.6 Kernel

### 5.6.1 Überblick

Der Kernel bildet den Kern des Linux Systems. Er ist im wesentlichen für die Kapselung der Hardware zuständig. Die Anzahl an Funktionalitäten die ein Kernel bietet ist stark vom Typ des Kernels abhängig. Es gibt sogenannte monolithische Kernel und Mikrokernle. Ein monolithischer Kernel beinhaltet schon vor dem Boot-Vorgang sämtliche Funktionalitäten. Während der Mikrokernle vor dem Boot-Vorgang nur Grundfunktionen zur Verfügung stellt. Diese Grundfunktionen sind Prozessverwaltung, Speicherverwaltung und Tools zur Kommunikation und Synchronisation. Zusätzlich zu den Grundfunktionen können zur Laufzeit sogenannte Kernel-Module geladen werden. Dabei erweitert jedes Modul die Funktionalität des Kernels. Dies hat den grossen Vorteil, dass kein

Neustart des Systems und keine Neukompilierung des Kernels erforderlich ist. Das ist besonders bei Embedded Systemen ein Vorteil. [36]

Für den HiFi-Audio-Streamer wird ein Linux-Kernel eingesetzt. Dieser ist eine Mischung aus monolithischem Kernel und Mikrokernell. Daher bietet der Linux-Kernel den Vorteil aus beiden Varianten.

### 5.6.2 Wahl der Kernelversion

Der Linux Kernel wird laufend weiterentwickelt. Daher gibt es regelmässig neue Releases. Zusätzlich zu den Stable Releases gibt es sogenannte Longterm Stable Releases (LTS). Jedes Jahr wird neben den normalen Releases genau ein LTS Release veröffentlicht. Diese werden in der Regel während zwei Jahren aktiv unterstützt. Zusätzlich gibt es spezielle LTS Releases welche noch länger unterstützt werden. Dies trifft beispielsweise für die Kernel Version 4.9 zu. Diese Version wird bis ins Jahr 2023 aktiv unterstützt.

Es handelt sich bei diesem Projekt um ein Embedded System, welches möglichst lange unterstützt werden soll. Daher wird der Linux Kernel 2.8b5 von Toradex auf Basis der Kernel Version 4.9 für dieses Projekt verwendet. Eine Tabelle mit sämtlichen Versionen der Toradex Images ist im Tutorial ersichtlich [38].

Das Herunterladen des Source Codes des Kernels wird vom Shell-Skript tools.sh übernommen. Dieses speichert den Source Code automatisch im Ordner Kernel der erstellten Ordnerstruktur ab.

### 5.6.3 Konfiguration

Der Ablauf und die genauen Befehle sind im Tutorial [27] zu finden. Hier wird der Fokus auf den groben Ablauf und auf die vorgenommenen Änderungen gelegt.

Da es nicht für jede Hardware einen eigenen Kernel gibt, muss der Kernel entsprechend konfiguriert werden. Im Rahmen der Vorstudie wird dazu das Konfigurationsfile apalis\_imx6\_defconfig als Basis verwendet. Dies wurde spezifisch für das verwendete Ixora Carrier Board von Toradex erstellt. Damit wird der Kernel unter anderem für die richtige CPU konfiguriert. Zusätzlich werden auch gleich einige Standardtreiber in den Kernel eingebunden und andere als Module geladen. Es müssen zusätzlich einige Anpassungen für das verwendete Display und für das DAC-Evaluationsboard vorgenommen werden. Diese sind:

```
# Audio
SoC Audio support for i.MX boards with AK4497
AKM AK4458 DAC I2c
AKM AK4497 CODEC

# Grafik
Vivante GCCore
ETNAVIV (DRM support for Vivante GPU IP cores)

# Touchscreen
Focaltech Touchscreen
```

Anpassungen am Kernel können mit dem Aufruf der folgenden Befehle vorgenommen werden.

```
cd ~/audiostreamer/tools/kernel/linux-toradex
make menuconfig
```

Damit öffnet sich ein Menu, in welchem die vorhandenen Komponenten zur Kompilierung ausgewählt werden können. Dabei gibt es folgende Konfigurationsmöglichkeiten.

```
[*] Komponente in den Kernel integrieren
[M] Komponente als ladbares Modul kompilieren und im Pfad /lib/modules/<kernel-version>
     im Root-Filesystem ablegen
```

Da der Grafiktreiber ETNAVIV und der Touchscreen Treiber Focaltech Touchscreen nicht im Kernel enthalten sind, werden beide manuell in den Kernel-Tree eingefügt.

#### 5.6.4 Integrieren von Treiber in den Kernel

Es gibt zwei verschiedene Ansätze um externe Treiber in den Kernel zu integrieren. Diese sind:

1. Innerhalb des Kernel Trees
2. Ausserhalb des Kernel Trees

Bei der ersten Variante wird der Source Code des Treibers direkt in den entsprechenden Unterordner im Pfad `kernel/linux-toradex/driver` kopiert. Im Treiber enthalten ist dabei ein File namens `Kconfig` und ein `Makefile`. Das `Makefile` gibt dabei vor, wie das Modul kompiliert werden soll. Es spezifiziert auch allfällige Abhängigkeiten zu anderen Modulen. Das File `Kconfig` beinhaltet die Daten zur Generierung eines Menu-Eintrags, beim Aufruf des Befehls `make menuconfig`. Dieser Menu-Eintrag kann nun wie im Listing 5.6.3 beschrieben konfiguriert werden.

Bei der zweiten Variante wird der Source Code nicht in den Kernel-Tree integriert. Zudem ist auch kein `Kconfig` File nötig. Dafür muss das `Makefile` so angepasst werden, dass die Variable `KERNEL_SRC` auf den Source Code des Kernels zeigt. Zusätzlich wird mit der Variable `ROOT_FS_PATH` der Pfad ins Root-Filesystem angegeben. Mit folgenden Befehlen kann das Modul nun kompiliert und installiert werden.

```
make modules  
make modules_install
```

Die beiden Varianten haben Vor- und Nachteile. So hat die erste Variante den Vorteil, dass der Treiber fest im Kernel integriert ist (monolithischer Ansatz). Dies hat aber den Nachteil, dass immer der ganze Kernel neu kompiliert werden muss. Die zweite Variante ist flexibler und praktischer, wenn Module nachinstalliert werden müssen. Allerdings kann das Modul nicht fest in den Kernel integriert werden. Daher muss das Modul nach dem Booten mit einem der folgenden Befehle geladen werden.

```
modprobe modul  
insmod modul
```

Der Befehl `modprobe` bietet den Vorteil, dass gleichzeitig sämtliche Abhängigkeiten mit geladen werden. Diese Abhängigkeiten werden beim Ausführen des Befehls `modules_install` im File `/lib/modules/<kernel-version>/modules.dep` gespeichert.

#### 5.6.5 Kernel für den Audiostreamer

Für den HiFi-Audio-Streamer sollen die Vorteile der Kompaktheit des monolithischen Kernels und der Modularität des Mikrokernels beide genutzt werden. Dazu werden Treiber welche für die Funktion des HiFi-Audio-Streamers zwingend notwendig sind, direkt in den Kernel integriert (Variante 1). Damit kann ein kompletter Kernel für den HiFi-Audio-Streamer generiert werden, in welchem alle essenziellen Funktionalitäten vorhanden sind. Optionale Treiber sollen als ladbare Module zur Verfügung gestellt werden (Variante 2). Damit wird die Konfiguration des Audiostreamers erleichtert.

### 5.7 Device-Tree

#### 5.7.1 Überblick

Der Linux Kernel kann die unterschiedlichsten Desktopcomputer sowie Embedded Devices betreiben. Wobei sich die Geräte vor allem durch die CPU Architektur und durch die daran ange schlossene Peripherie unterscheiden. Damit ein generischer Kernel für den Betrieb aller Geräte eingesetzt werden kann, müssen dem Kernel Informationen über die vorliegende Hardware zur Verfügung gestellt werden. Das ist die Aufgabe des Device-Trees.

Der Name des Device-Tree kommt von der Baumstruktur, in der die verschiedenen Files des Trees angeordnet sind. Die Struktur des Device-Trees des Ixora Carrier Board ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass der Device-Tree aus einem `dts`- und mehreren `dtsi`-Files besteht.

Das dts-File bindet die dtsi-Files mit #include ein. Die Files des Device-Trees sind auf den 3 Ebenen SoC, Module und Carrier Board angeordnet. Dabei überschreiben die unteren Files (Carrier Board Ebene) die darüberliegenden (SoC Ebene) [39].

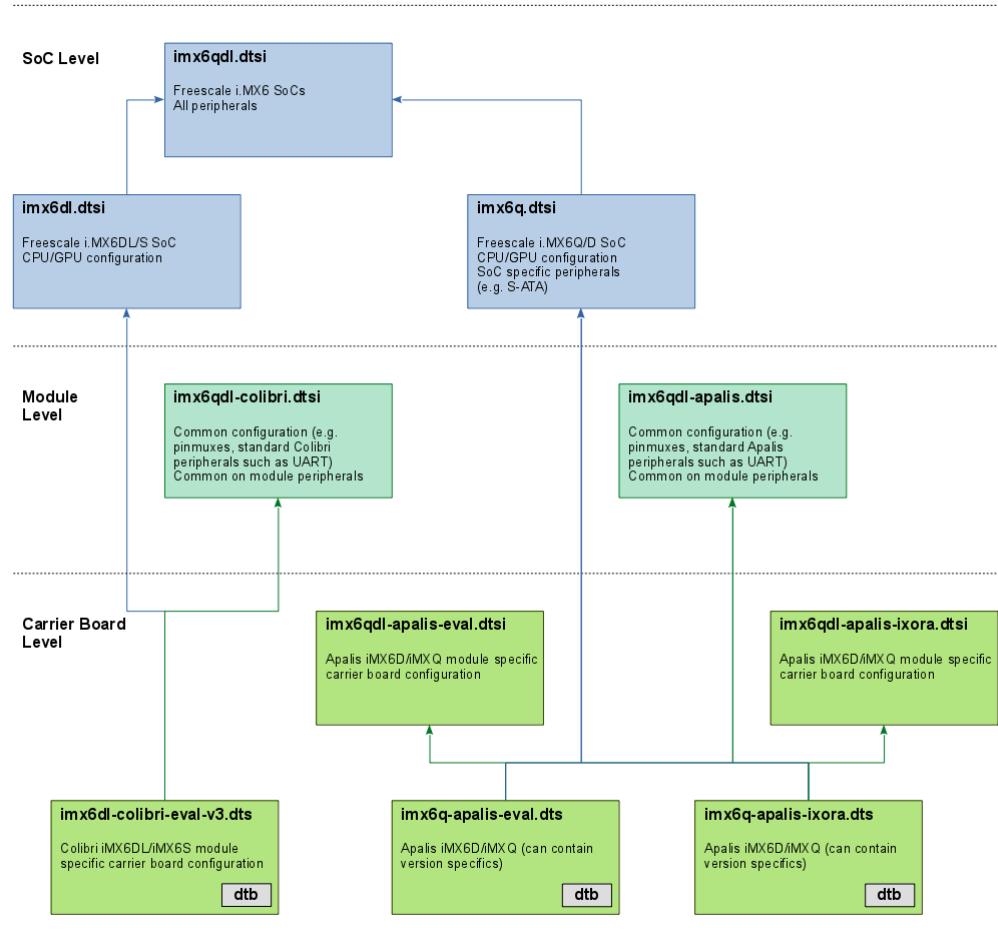


Abbildung 5.2: Device-Tree Struktur des Ixora Carrier Board [40]

Aufgebaut ist der Device-Tree aus sogenannten Nodes, welche wiederum aus Property-Value-Paaren bestehen. In folgendem Listing ist ein Beispiel eines solchen Nodes aufgeführt. Dieser Node ist Teil des Device-Trees des HiFi-Audio-Streamers und ist im File `imx6qdl-apalis.dtsi` enthalten.

```

/*
 * GEN1_I2C: I2C1_SDA/SCL on MXM3 209/211 (e.g. RTC on carrier
 * board)
 */
&i2c1 {
    clock-frequency = <100000>;
    pinctrl-names = "default";
    pinctrl-0 = <&pinctrl_i2c1>;
    status = "okay";
};

```

Dieses Beispiel ist die Umsetzung eines Nodes der Modul-Ebene. Daher fehlen bei diesem Node Angaben zu Register-Adressen, diese werden auf der SoC-Ebene definiert.

## 5.7.2 Wahl des Device-Tree

Toradex stellt für alle Evaluations-Boards und CoM einen Device-Tree zur Verfügung [41]. Die Hardware des Ixora Carrier Board wird als Grundlage zur Entwicklung der Hardware für den HiFi-Audio-Streamer verwendet. Daher ist es naheliegend den entsprechenden Device-Tree von Toradex auch für den HiFi-Audio-Streamer zu verwenden. Damit muss der Device-Tree nur für die zusätzlichen Hardware Komponenten angepasst werden.

## 5.8 Root-Filesystem

### 5.8.1 Überblick

Das Root-Filesystem besteht im wesentlichen aus Programmen, Libraries, Skripten und Daten. Die Art des Filesystems entscheidet darüber wie die einzelnen Files benannt und wo sie im Speicher platziert werden. Zusätzlich entscheidet die verwendete Speichertechnologie über die Layers, welche zwischen Userspace und Hardware liegen. [36]

Im Fall des Apalis iMX6Q CoM ist ein eMMC mit 4GB verbaut. Der eMMC Speicher gehört im Gegensatz zum NAND- oder NOR-Flash zu den sogenannten intelligenten Speicherchips. Wobei die Speicherung der Daten selbst, auch in einem NAND-Flash vorgenommen wird. Der Unterschied ist allerdings der sogenannter Flash Translation Layer (FTL). Dieser wandelt die logischen Adressen in NAND-Adressen um und erleichtert so den Zugriff.

### 5.8.2 Wahl des Root-Filesystems

In den Images von Toradex ist bereits ein komprimiertes Filesystem vorhanden. Dabei handelt es sich um ein, mit Yocto, selbst konfiguriertes Filesystem aus der Angström-Linux Distribution. Da für den HiFi-Audio-Streamer zusätzliche Software benötigt wird, ist ein selbst konfiguriertes Filesystem nicht optimal. Aus diesem Grund wird ein generisches Linux-Filesystem eingesetzt.

Es existiert eine grosse Auswahl an Linux Distributionen. Diese unterscheiden sich in der Länge des Release-Intervalls, im Package-Management System und in vielen weiteren Punkten. Die Distribution Debian hat einen langen Release-Intervall und ist daher stabiler als die meisten anderen Distributionen. Außerdem bietet Debian eines der besten Package-Management Systeme sowie eine starke Open Source Philosophie. Beides ist für den HiFi-Audio-Streamer wünschenswert. Abgrund dieser Übereinstimmung wird für den HiFi-Audio-Streamer das Debian Filesystem eingesetzt. Das Debian Filesystem der Version 9.8 mit eingerichtetem chroot ist BFH intern verfügbar [36].

Dabei bietet der Befehl chroot den Vorteil, dass mithilfe von Qemu [42] die Architektur des Ziel-systems auf dem Host-Rechner emuliert werden kann. Damit können fehlende Packages bereits auf dem Host-Rechner installiert werden. Dies geschieht mit folgenden Befehlen.

```
sudo chroot ~/audioStreamer/tools/debian_rootfs/debian/
apt get install <library>
exit
```

## 5.9 GUI-Framework

### 5.9.1 Wahl des GUI-Frameworks

Für den HiFi-Audio-Streamer soll eine Anwendung mit einem Graphical User Interface (GUI) entwickelt werden. Dies ermöglicht die intuitive Bedienung mittels Touchscreen. Um dieses Ziel in der vorgegebenen Zeit zu erreichen, ist ein Framework mit Bibliotheken notwendig. Es gibt einige solcher Frameworks welche ähnliche Funktionalitäten bieten. Diese sind z.B. wxWidgets, GTK+, FLTK, FOX. Allerdings ist Qt das wohl am weitest entwickelte Framework. Daher wird Qt als GUI-Framework für den HiFi-Audio-Streamer eingesetzt.

### 5.9.2 Qt im Überblick

Qt ist ein Framework von Bibliotheken zur Entwicklung von Anwendungen und eignet sich speziell für die Entwicklung grafischer Anwendungen. Dazu wird das sogenannte GUI-Toolkit verwendet. Das GUI-Toolkit basiert auf der Open-GL Programmierschnittstelle (API). Open-GL dient der Plattformübergreifenden Entwicklungen von 2D und 3D Grafiken. Damit über die Open-GL API auf die GPU zugegriffen werden kann, wird zusätzlich die EGL Schnittstelle verwendet. EGL ist die Schnittstelle zwischen Open-GL und dem native Windowing System. Als Windowing-System kann entweder X11 oder Wayland eingesetzt werden. Mit dem Qt-Plugin EGLFS kann auf die Verwendung eines Windowing-Systems verzichtet werden. Damit wird das gesamte System schlanker. EGLFS unterstützt Qt-Quick sowie auch native Open-GL. Damit EGLFS auf einer bestimmten Hardware genutzt werden kann ist ein zusätzlicher Plattformabhängiger Teil erforderlich. Für den iMX6Q ist dies der Teil EGLFS for i.MX6. [43]

Neben dem GUI-Toolkit stellt Qt auch noch andere Module zur Verfügung. Davon wird vor allem das Modul Qt-Quick für den HiFi-Audio-Streamer verwendet. Qt-Quick bietet die Möglichkeit sehr dynamische Applikationen mit konfigurierbaren User-Interfaces zu entwickeln. Dazu setzt Qt-Quick auf die Meta-Programmiersprache QML (Qt Meta-object Language). QML wurde von Qt entwickelt um das Entwickeln von Benutzeroberflächen zu vereinfachen. Aufgebaut ist die Sprache ähnlich wie JSON. Zusätzlich kann für die Implementation JavaScript verwendet werden. Der erstellte Code kann durch Qt in reinen C++ Code übersetzt werden. Damit ist Qt-Quick ideal geeignet für die Anforderungen des HiFi-Audio-Streamers. [44]

Qt ist neben der kommerziellen Lizenz auch unter der GPL verfügbar. Allerdings bietet Qt unter der GPL weniger Funktionalitäten. Speziell die Funktionalitäten rund um Embedded Devices sind unter der GPL nicht verfügbar [45]. Das bedeutet allerdings nicht, dass Qt unter der GPL nicht für Embedded Devices eingesetzt werden kann. Allerdings muss der Aufwand der Portierung auf die Zielhardware in Kauf genommen werden. Dazu müssen die nötigen Bibliotheken von Qt für das Embedded Device cross-kompiliert werden. Dies stellt, aufgrund der vielen Abhängigkeiten, keine zu unterschätzende Herausforderung dar.

### 5.9.3 Vorbereitung des Root-Filesystems

Als Grundlage für den Ablauf der Cross-Kompilierung von Qt wird das Tutorial [46] für den Raspberry Pi eingesetzt. Damit Qt für den Apalis iMX6Q CoM Cross-Kompiliert werden kann, müssen vorab einige Vorbereitungen getroffen werden. Um die Bibliotheken von Qt zu verwenden, sind zahlreiche zusätzliche Libraries nötig. Da Qt für den Apalis iMX6Q CoM Kompiliert wird, müssen diese Libraries im Root-Filesystem des Zielsystems vorhanden sein. Hier zahlt sich die Verwendung eines Root-Filesystems mit eingerichtetem chroot aus. Damit können die nötigen Libraries installiert werden, während sich das Filesystem noch auf dem Host-Rechner befindet. Die wichtigsten Pfade im Root-Filesystem sind:

```
/usr/include  
/usr/lib/arm-linux-gnueabihf  
/lib/arm-linux-gnueabihf
```

Im Pfad include befinden sich alle Header-Dateien der installierten Libraries. Diese sind wichtig, damit Qt bei der Kompilierung die Schnittstellen zu den Libraries auch findet. Daher ist bei der Installation von Libraries speziell auf die Endung –dev zu achten. Damit werden nebst der eigentlichen Library auch die passenden Header-Dateien installiert.

Im Pfad /usr/ lib /arm–linux–gnueabihf befinden sich die eigentlichen Libraries. Die Dateiendung der Libraries ist entweder .a oder .so. Bei .a handelt es sich um eine statisch gelinkte Library, bei .so um eine dynamisch gelinkte. Grundsätzlich sollten die dynamisch gelinkten Libraries bevorzugt werden, da diese effizienteren Code erzeugen.

Ein Teil der Libraries befindet sich auch im Pfad / lib /arm–linux–gnueabihf. Da die meisten Systeme die Libraries aber unter dem Pfad /usr/ lib /arm–linux–gnueabihf erwarten, existieren meist symbolische Links auf die echten Libraries. Leider sind die meisten Links mit absoluten Pfaden realisiert. Das bedeutet, die symbolischen Links sind auf dem Host-Rechner nicht mehr gültig. Da

als Root nun das Root des Host-Rechners angenommen wird. Daher müssen sämtliche symbolischen Links im Root-Filesystem in relative symbolische Links umgewandelt werden. Ein symbolischer Link kann mit folgendem Befehl erzeugt werden:

```
sudo ln -s ~/audiotracer/tools/debian_rootfs/debian/lib/arm-linux-gnueabihf/<Librarie  
auf den der Link zeigt> ~/audiotracer/tools/debian_rootfs/debian/usr/lib/arm-  
linux-gnueabihf/<symbolischer Link>
```

Um den Vorgang wiederholbar zu machen und zu automatisieren wird das Shell-Skript init-debian.sh geschrieben, welches sämtliche notwendigen symbolischen Links erstellt. Zusätzlich müssen folgende Bibliotheken nachinstalliert werden:

```
apt install libinput-dev libicu-dev libssl-dev libgbm-dev  
apt-get build-dep qt4-x11  
apt-get build-dep libqt5gui5  
apt-get install libudev-dev libinput-dev libts-dev libxcb-xinerama0-dev libxcb-  
xinerama0  
apt install fbset
```

#### 5.9.4 Kompilierung von Qt

Um Qt zu Kompilieren muss im ersten Schritt der Source Code aus dem Git-Repository ausgechecked werden. Dies geschieht mit folgender Befehlssequenz:

```
git clone git://code.qt.io/qt/qt5.git  
cd qt5  
git checkout v5.12.0  
perl init-repository
```

Verwendet wird dabei die aktuellste, stabile Version von Qt5, die Version 5.12.0.

Im nächsten Schritt wird mit dem Befehl .configure die, zur Kompilierung nötigen Makefiles, erzeugt. Der Befehl sucht die nötigen Libraries im Root-Filesystems. Das Ergebnis kann mit |tee Datei.log in einer Log-Datei gespeichert werden. In der Log-Datei kann das Ergebnis der Konfiguration für alle Qt Komponenten begutachtet werden. Im Fehlerfall wird angegeben welche Libraries nicht gefunden wurden.

Damit die Kompilierung auch für den Apalis iMX6Q CoM erfolgt, wird dem Befehl .configure als Argument –device linux-imx6-g++ mitgegeben. Im Pfad qtbase/mkspecs/devices/linux-imx6-g++ des Source Codes, befindet sich dazu die Datei qmake.conf. Diese konfiguriert das System für den iMX6Q. Zusätzlich können in dieser Datei die Pfade zu bestimmten Bibliotheken im Root-Filesystem angeben werden. Dies ist insbesondere für die Grafik-Libraries notwendig. Zusätzlich zum Argument –device müssen noch weiter Argumente angegeben werden. Insbesondere der Pfad ins Root-Filesystem, der Pfad zum GCC Interface (Toolchain) und ein Pfad in das Host-Filesystem müssen angegeben werden. In letzteren Pfad werden die nötigen Dateien zur Kompilierung auf dem Host-Rechner abgelegt. Dieser gesamte Prozess wird mit dem Shell-Skript qt\_config\_full.sh automatisiert.

Der nächste Schritt, ist die Kompilierung und Installation. Dies geschieht mit folgenden Befehlen:

```
make -j8  
sudo make install
```

Die Kompilierung nimmt, je nach Host-Rechner, zwischen 20 und 45 Minuten in Anspruch. Allfällige Fehler treten meist in den ersten 10 Minuten auf. Ist die Kompilation abgeschlossen, kann Qt auf dem Apalis iMX6Q CoM sowie auf dem Host installiert werden. Als Pfade werden diejenigen verwendet, welche bei der Ausführung von .configure als Argumente mitgegeben wurden.

#### 5.9.5 Einrichten des Qt-Creator

Die Einrichtung des Qt-Creators ermöglicht das Kompilieren von Qt-Applikation für das Zielsystem. Dazu wird ein Device mit folgenden Angaben erzeugt.

- Pfad zum Debugger-, C++- sowie C-Interface von GCC
- Pfad zu Qt auf dem Host-Rechner (mit make install installiert)

- Benutzername und Passwort des Target-Systems
- IP-Adresse des Target-Systems

Die beiden letzten Punkte werden zur direkten Installation und zum Debuggen der ausführbaren Datei verwendet. Dazu muss eine SSH-Verbindung zum Apalis iMX6Q CoM aufgebaut werden können. Als letztes muss in der Datei .pro des aktuellen Projektes folgender Inhalt hinzugefügt werden.

```
INSTALLS += target
target.path += /home/audiostreamer/application
```

Der Pfad spezifiziert den Ort im Root-Filesystem, wo die ausführbare Datei abgelegt wird. Wichtig ist, dass der verwendete User eine Berechtigung für diesen Pfad besitzt.

Bei der Ausführung auf dem Apalis iMX6Q CoM kann mit dem Parameter –platform <platform> die Grafik-Plattform gewählt werden, auf welcher die Applikation ausgeführt wird. Verwendet werden kann dabei z.B. linuxfb oder eglfs. Mit eglfs wird über die Open-GL API auf die GPU zugegriffen. Mit linuxfb wird direkt in den Framebuffer geschrieben. Bei der Verwendung des Framuffers wird die Grafikbeschleunigung der GPU nicht genutzt. Damit sind nur einfache grafische Oberflächen realisierbar. Grundsätzlich wird für den HiFi-Audio-Streamer die Verwendung von EGLFS vorgezogen.

Damit die Platform nicht bei jeder Ausführung der Applikation spezifiziert werden muss, kann auch die Umgebungsvariable Qt\_QPA\_PLATFORM linuxfb gesetzt werden. Dies geschieht am besten durch die Erstellung eines Eintrags im Qt-Creator. Dazu wird das Key-Value-Paar unter Project → Run Environment eingetragen. Damit wird die Exportierung der Umgebungsvariable von Qt übernommen. Damit ist Qt bereit für die Entwicklung von Applikationen.

## 5.10 Ansteuerung des Displays

### 5.10.1 Anpassungen für die Display-Ansteuerung

Damit das ausgewählte Display angesteuert werden kann, müssen einige Anpassungen vorgenommen werden. Da die Timings des Displays über die gewählte parallele Schnittstelle nicht automatisch übernommen werden, müssen diese konfiguriert werden. Dies geschieht durch einen zusätzlichen Eintrag im LCD-Treiber drivers/video/fbdev/mxc/mxc\_lcdif.c.

```
{
/* 800x480 @ 65 Hz , pixel clk @ 33 MHz / / 30303 ps*/
"newhaven1", 65, 800, 480, 30303,
.left_margin = 128,
.right_margin = 40,
.hsync_len = 48,
.upper_margin = 45,
.lower_margin = 13,
.vsync_len = 3,
.sync = 0,
.vmode = FB_VMODE_NONINTERLACED,
.flag = 0,}
```

Ausgewählt wird diese Konfiguration durch folgende Umgebungsvariable in U-Boot.

```
setenv vidargs 'mxc_hdmi.only_cea=0 video=mxcfb0:dev=lcd,newhaven1,if=RGB24
video=mxcfb1:off video=mxcfb2:off video=mxcfb3:off fbmem=32M'
```

### 5.10.2 Touchscreen-Treiber

Das verwendete Display hat einen Touchscreen. Um diesen zu verwenden, muss ein Linux-Treiber geladen werden. Der Source-Code des entsprechenden Treibers ist online verfügbar [47]. Dieser Source-Code muss für die Verwendung mit dem Apalis iMX6Q CoM kompiliert werden. Dieser Vorgang ist in Kapitel 5.6 beschrieben.

## 5.11 DAC-Treiber

### 5.11.1 Auswahl des DAC-Treibers

Damit das DAC-Evaluations-Board und später der DAC des HiFi-Audio-Streamers angesteuert werden kann, muss ein Treiber geladen werden. Im Linux-Kernel ist bereits ein Treiber für den AK4497 vorhanden. Der AK4497 ist auch auf dem DAC-Evaluations-Board verbaut. Für den HiFi-Audio-Streamer wird der AK4493 verwendet.

### 5.11.2 Verwendung des DAC-Treibers

Damit der Treiber verwendet werden kann, wird er bei der Konfiguration des Kernels 5.6.3 ausgewählt. Damit steht der Treiber nach der Kompilierung entweder als ladbares Modul oder als fester Bestandteil des Kernels zur Verfügung.

Der nächste Schritt in der Thesis ist das Testen des Treibers mit dem DAC-Evaluations-Board. Anschliessend wird der Treiber für den AK4497 für den AK4493 angepasst. Da die beiden DAC's sehr ähnlich sind, sollten kleine Änderungen genügen.

## 5.12 Bibliothek für Audio-Streaming

### 5.12.1 Auswahl der Bibliothek

Als erster Streaming-Dienst für den HiFi-Audio-Streamer soll Spotify integriert werden. Da Spotify weit verbreitet ist und eine sehr grosse Anzahl an Songs bietet. Um Musik von Spotify zu streamen wird eine Bibliothek benötigt. Dabei sind insbesondere für den Raspberry Pi Bibliotheken frei verfügbar. Einige Recherche hat ergeben, dass sich vor allem die Bibliothek librespot [48] für diese Zwecke eignet. Sie dient bereits als Grundlage für die Streaming-Applikation raspotify [49] für den Raspberry Pi.

### 5.12.2 Portierung für den HiFi-Audio-Streamer

Die Bibliothek librespot ist in der Programmiersprache Rust geschrieben. Daher muss die Kompilierung etwas anders ablaufen, als bei C-Code. Für die Cross-Kompilierung der Bibliothek existiert ein Repository mit Anleitung [50]. Dieses Tool unterstützt die verwendete ARM-Architektur. Daher ist es möglich die Bibliothek für den HiFi-Audio-Streamer zu portieren. Die Portierung selbst wird während der Thesis durchgeführt.

## 5.13 Treiber für den Drehgeber

Der Drehgeber oder englisch Rotary Encoder dient der relativen Positionserfassung. Damit kann er zum bequemen Scrollen durch Listen verwendet werden. Damit der gewählte Drehgeber verwendet werden kann, muss ein Treiber geladen werden.

Es befindet sich ein generischer Treiber im verwendeten Kernel von Toradex. Der genaue Pfad ist `/drivers/input/misc/rotary_encoder.c`. Allerdings muss dieser Treiber noch an die Hardware angepasst werden. Die Anpassung an die Hardware des HiFi-Audio-Streamers erfolgt während der Thesis.



# 6 Schaltungsdesign

Dieses Kapitel umfasst die Erläuterungen und Simulationen der einzelnen Schaltungen, die umgesetzt wurden um den Audio-Streamer zu realisieren. Diese basieren auf dem Blockschaltbild im Konzept Kapitel und den gewählten Komponenten. Die vollständigen Schaltpläne sind im Anhang zu finden.

Insgesamt wurden drei Leiterplatten realisiert:

1. Power Supply Unit (PSU): Konvertierung von Netzspannung (AC) auf DC Spannungen für die Analog-Schaltung (mit Ringkerntransformator) und das CoM (mit Schaltregler).
2. Mainboard: auf dem Mainbaord befindet sich die Analog-Schaltung (DAC und Filter) und das CoM mit zugehöriger Beschaltung
3. Rotary Encoder: für den Front-Panel Drehgeber wurde eine seperate Leiterplatte mit dem Drehgeber und LEDs für die Drehknopfbeleuchtung erstellt

## 6.1 Übersicht Mainboard

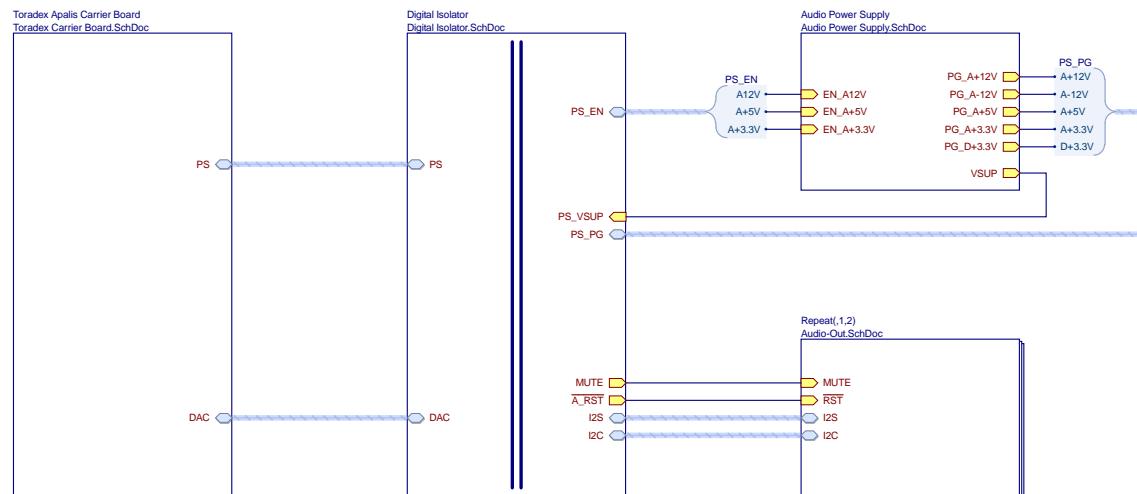


Abbildung 6.1: Schaltungsübersicht Audio-Streamer Mainboard

Das Mainboard kann, wie der Abbildung 6.1 in vier Schaltungsgruppen unterteilt werden:

1. Audio Power Supply: stellt die Power Rails für die DACs und die Operationsverstärker zur Verfügung
2. Audio-Out: Analog-Ausgang (zwei mal Mono) Digital-Analog-Wandlung und Filterung
3. Digital Isolator: koppelt die störungsbehafteten, digitalen Signale des CoM an die Analog-Schaltung
4. Toradex Carrier Board: Beschaltung des CoM, diese basiert auf Ixora Carrier Board Design von Toradex, umfasst weitere Schemablätter

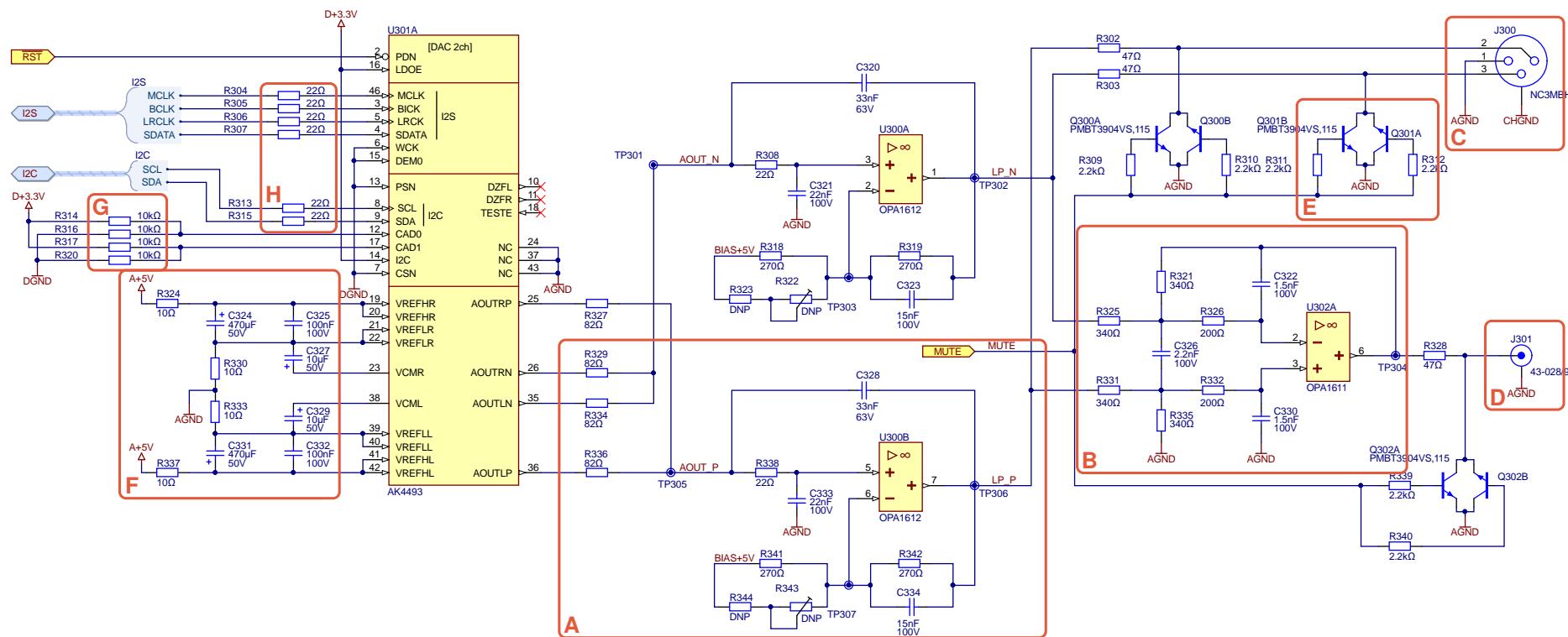


Abbildung 6.2: DAC Schaltung mit externen Filtern

## 6.2 Digital/Analog Wandler

### 6.2.1 Beschaltung

In der Abbildung 6.2 ist die Beschaltung des DAC und die analoge Filter dargestellt. Die Speisungsanschlüsse des DAC sind hierbei nicht abgebildet, da sie jeweils nur mit einem  $10\ \mu F$  (Panasonic FR1 Serie) und einem  $100\ nF$  Kondensator (WIMA MKP4 Serie, Metallisiert Polypropylen) entkoppelt werden.

Die Schaltung basiert auf den Schaltplänen aus dem Datenblatt des AK4493 [11], sowie den Schaltplänen der Development Kits AKD4497 [51] und AKD4493 [52].

#### Detail A: Sallen-Key Filter

Das hier verwendete Sallen-Key Filter hat das Verhalten eines Bessel Tiefpass Filter zweiter Ordnung. Es hat die Aufgabe die durch das Sampling-Theorem entstehenden Alias-Frequenzen zu entfernen. Dabei soll der Frequenz- und Phasengang im hörbaren Bereich möglichst linear sein.

Da der DAC im Mono-Mode betrieben wird, müssen jeweils die beiden positiven ( $AOUTxP$ ) und die beiden negativen ( $OUTxN$ ) Ausgänge aufsummiert werden. Dies geschieht über die  $82\ \Omega$  Widerstände. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Ausgänge des DAC einen DC Anteil von  $2.5V$  aufweisen. Die Offsets sollen nicht aufsummiert werden. Der Hersteller des DAC schlägt im Datenblatt vor einen Koppel-Kondensator pro Ausgang zu verwenden. Der Frequenzgang des Analog-Ausgangs wird somit massgeblich vom Frequenzgang des Koppel-Kondensators beeinflusst. Gute Charakteristiken für diese Aufgabe weisen Folienkondensatoren auf. Jedoch muss die Kapazität ausreichend gross sein, um tiefen Frequenzen nicht zu filtern. Folienkondensatoren mit solch hoher Kapazität sind teuer (ca. 2.- bis 5.- Fr. pro Stk.). Um dieses Problem zu umgehen wird eine DC-Kopplung verwendet und der Offset wird mit der Rückkopplung des Sallen-Key Filters kompensiert. Durch die negative Rückkopplung ( $R341$  und  $R432$ ) wird einerseits eine Spannungsverstärkung von 1 eingestellt, andererseits wird bei U300B Pin 6 eine DC-Spannung von  $2.5V$  eingestellt. Somit werden nur noch die Differenzen zu dieser Spannung verstärkt. Der DC Offset ist entfernt.

Abweichungen des DC-Offsets werden beim Differential-Single Ended Filter entfernt. Ist eine präzisere Möglichkeit die Offset-Spannung anzupassen erwünscht, kann R344 und der Trimmer R434 bestückt werden.

Der Kondensator C334 dient zur Kompensation eines Pols im Frequenzgang und wurde nach dem Trial-And-Error Verfahren dimensioniert.

#### Detail B: Differential-Single Ended & Low-Pass Filter

Die meisten Audio-Verstärker besitzen Chinch-Buchsen für ihre Eingänge. Diese besitzen ein Signal und eine Ground-Leitung, sie sind Single Ended. Das differenzielle Signal der Sallen-Key Filter muss zu einem Single Ended Signal umgewandelt werden. Nebst dieser Wandlung wird das Signal noch einmal mit einem Tiefpass-Filter gefiltert. Diese Schaltung weicht leicht vom Vorschlag aus dem Datenblatt ab und richtet sich nach dem Application Note [53] von Texas Instruments .

Für beide Filter werden Dünnfilm SMD Widerstände verwendet, da sie aufgrund ihrer Konstruktionsweise ein geringeres Rauschen und weniger Temperaturdrift als Dickfilm Widerstände aufweisen. Als Kondensatoren dienen Folienkondensatoren von WIMA der Serie FKP2. Diese enthalten einen Polypropylen Film und sollen sich gemäss dem Hersteller für Audio-Equipment eignen.

#### Detail C & D: Analoge Ausgänge

Der Audio-Streamer verfügt über Single Ended, wie auch differenzielle Audio-Ausgängen. Jeder Ausgang wird durch einen  $47\ \Omega$  Widerstand begrenzt. Zudem kann jeder Ausgang mit einer Mute-Schaltung stumm geschaltet werden.

### Detail E: Muting Schaltung

Die Muting Schaltung hat sicherzustellen, dass keine undefinierten Spannungen zum Verstärker gelangen. Dies kann bei Netzausfall oder bei Reset des DAC (Ausgänge schalten auf High-Impedance) auftreten. Am Mute Signal wird dazu die 15 V der PSU angelegt. Durch die beiden NPN Transistoren kann positiver wie negativer Strom auf Ground geleitet werden.

### Detail F: 5V-Referenz

Der DAC verwendet für die Analog Ausgänge eine 5V-Referenz. Dieser Referenz Eingang wird von der 5V Spannungsversorgung mit einem Tiefpass-Filter (10 Ω Widerstand + 470 μF Kondensator) gefiltert. Die Grenzfrequenz liegt bei 16.9 Hz.

### Detail G: I<sup>2</sup>C Adress-Selektor

Die letzten zwei Bits der I<sup>2</sup>C Adresse des DACs kann über Pins gesetzt werden. Mit Bestücken eines Widerstands zu 3.3 V oder zu GND kann die Adresse angepasst werden.

### Detail H: Signal Integrity

Um allzu steile Flanken (hohe Frequenzanteile) am Eingang des DAC zu verhindern werden 22 Ω Widerstände in die Signalleitungen geschaltet.

## 6.2.2 Filter Auslegung & Simulation

### Sallen-Key Filter

Der analoge Ausgang eines DAC muss auf die Alias-Frequenzen der Abtastung gefiltert werden. Aufgrund des Oversamplings sind in die Anforderungen an die Steilheit des Filters vergleichsweise gering. Der DAC wird voraussichtlich mit einer Sample Frequenz von 384 kHz oder 768 kHz betrieben, somit beträgt die Grenzfrequenz für das Filter  $f_s/2 = 192 \text{ kHz}$ .

Als Anti-Alias Filter wird die Sallen-Key Filter Topologie mit der Charakteristik eines Bessel Tiefpass Filter zweiter Ordnung verwendet. Das Bessel Filter hat im Vergleich zu Butterworth und Tchebycheff einen flacheren Roll-Off, im Durchlassbereich weist er jedoch minimalen Ripple und eine konstante Gruppenlaufzeit auf. Dadurch wird sichergestellt, dass es bei Flanken zu keiner Dispersion kommt.

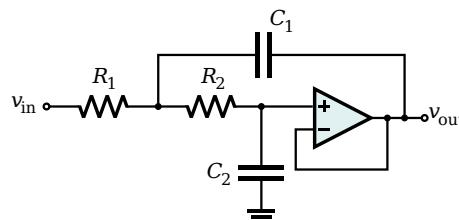


Abbildung 6.3: Sallen-Key Tiefpass Filter [54]

Die Übertragungsfunktion in Bezug auf die Bezeichner in Abbildung 6.3 lautet:

$$H(s) = \frac{1}{1 + \underbrace{C_2(R_1 + R_2)s}_{1/(\omega_0 Q)} + \underbrace{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2}_{1/\omega^2}}, \quad Q = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi \cdot 192 \text{ kHz} \quad (6.1)$$

Die Güte des Filters wird durch die Filterart (Bessel) bestimmt. Als Lösung gibt es eine unendliche Anzahl Kombinationen von Widerständen und Kondensatoren. Als weitere Bedingungen kommen hinzu, dass die Widerstände niederohmig sein müssen ( $< 100 \Omega$ ) und die Werte der Kondensatoren sind an die E6-Reihe gebunden. Tiefe Widerstandswerte reduzieren das thermische Rauschen.

Daraus resultiert die gewählte Kombination:

$$\begin{aligned} R_1 &= 43\Omega & R_2 &= 22\Omega \\ C_1 &= 33\text{nF} & C_2 &= 22\text{nF} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Für die Beschaltung des DACs wird der Wert von  $R_1$  verdoppelt, da zwei analoge Ausgänge parallel geschaltet werden.

### Differential-to-Single-Ended Filter

Nebst der Umwandlung von einem differentiellen zu einem single ended Signal filter die Schaltung in Abbildung 6.4 das Signal. Die Grenzfrequenz dieses Filters wurde wiederum auf 192 kHz gelegt.

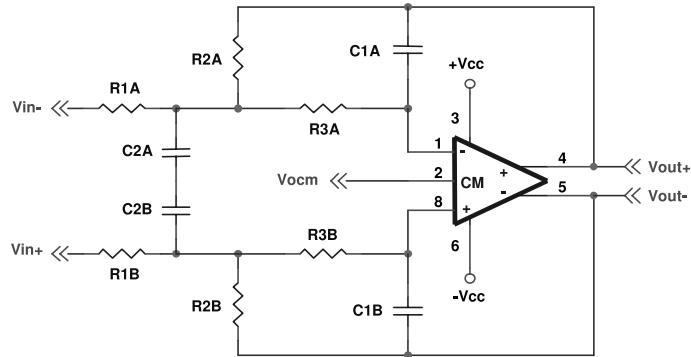


Abbildung 6.4: Differentieller Tiefpass Filter [53]; Vout- wird zur Umwandlung in ein Single Ended Signal auf GND angeschlossen

In [53] werden für eine Bessel Charakteristik mit Unity Gain folgende Gleichungen angegeben:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi RC} = 192\text{kHz} \\ R_1 = R_2 &= 0.625R & C_1 &= C \\ R_3 &= 0.36R & C_{2A} = C_{2B} &= 2.67C \end{aligned} \quad (6.3)$$

Die Kondensatorenwerte müssen wiederum in der E6-Reihe verfügbar sein. Da für  $C_2$  nur ein Kondensator verwendet wird, gilt  $C_2 = C_{2A}/2$ . Die gewählten Werte betragen:

$$\begin{aligned} R &= 552\Omega & C &= 1.5\text{nF} \\ R_1 = R_2 &= 340\Omega & C_1 &= 1.5\text{nF} \\ R_3 &= 200\Omega & C_2 &= 2.2\text{nF} \end{aligned} \quad (6.4)$$

### Simulation

Die Simulation wurden der Software TINA-TI durchgeführt, da Texas Instruments das Modell des OPA1611 für diese Software bereitstellt.

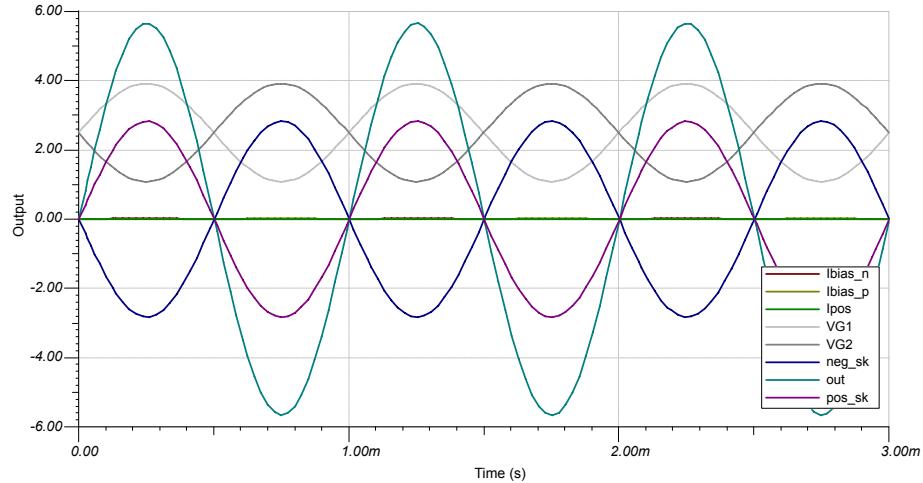


Abbildung 6.5: Filter Simulation Transiente

Abbildung 6.5 zeigt die Transiente über 3 ms. Das Quellsignale hat die Parameter  $V_{pp} = 2.83\text{ V}$ ,  $V_{DC} = 2.5\text{ V}$  und  $f = 1\text{ kHz}$ . Das simulierte Ausgangssignal des DAC ist mit den beiden grauen Kurven dargestellt (differentielles Signal). Die Ausgänge der Sallen-Key Filter sind blau und violett eingefärbt. Es ist zu erkennen, dass der DC-Offset entfernt wurde und sich die Signalamplitude verdoppelt hat. Die doppelte Amplitude wird durch das Addieren zweier Audio-Kanäle erzielt. Das Single Ended Ausgangssignal (türkis) hat nochmals die doppelte Amplitude und ist wiederum DC-frei. Die Simulation liefert somit das gewünschte Ergebnis.

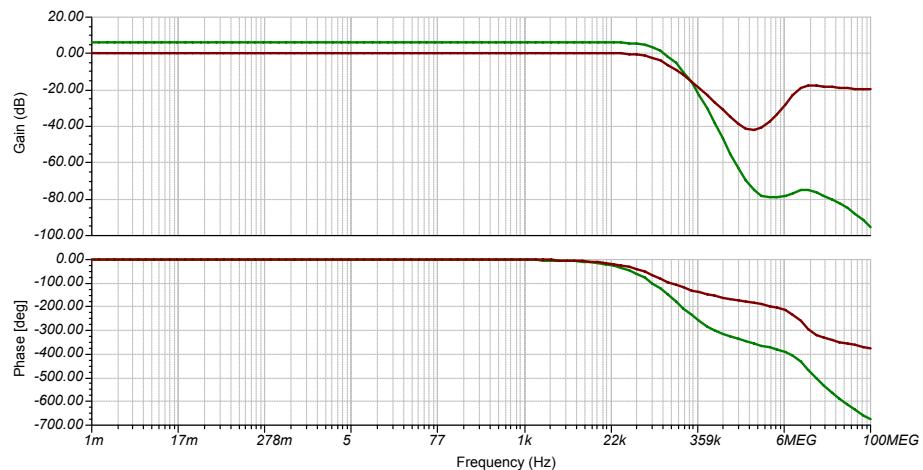


Abbildung 6.6: Filter Simulation Bode Diagramm bis 100 MHz; rot: pos\_sk, grün: out

Die AC Simulation der Schaltung ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Die rote Kurve zeigt den Ausgang des Sallen-Key Filters. Die einstellte Grenzfrequenz von 192 kHz ist somit bestätigt. Der Ausgangskurve (grün) hat im Durchlassbereich eine Verstärkung um 6 dB. Dies entspricht einer Vervierfachung, welche in der Transientenanalyse erklärt wurde. Das eingestell Filter in der Differential-To-Single-Ended Schaltung erhöht die Steilheit im Sperrbereich.

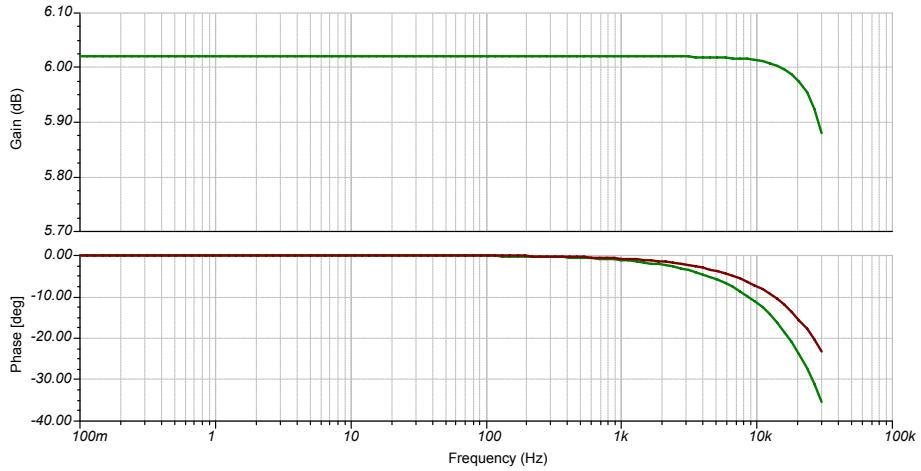


Abbildung 6.7: Filter Simulation Bode Diagramm im hörbaren Bereich; rot: pos\_sk, grün: out

Wichtig für die Audio Anwendung ist der hörbare Bereich. Dieser ist in Abbildung 6.7 abgebildet. Es zeigt sich, dass gemäss der Simulation die Dämpfung bis 28 kHz kleiner  $-0.1$  dB beträgt. Die Phase verändert sich auf maximal  $-30^\circ$ . Unter 1 kHz sind die Abweichungen der Phase und Amplitude minimal. Es ist zudem deutlich die Verwendung einer DC-Kopplung ersichtlich, da keine Hoch-Pass Charakteristik vorhanden ist.

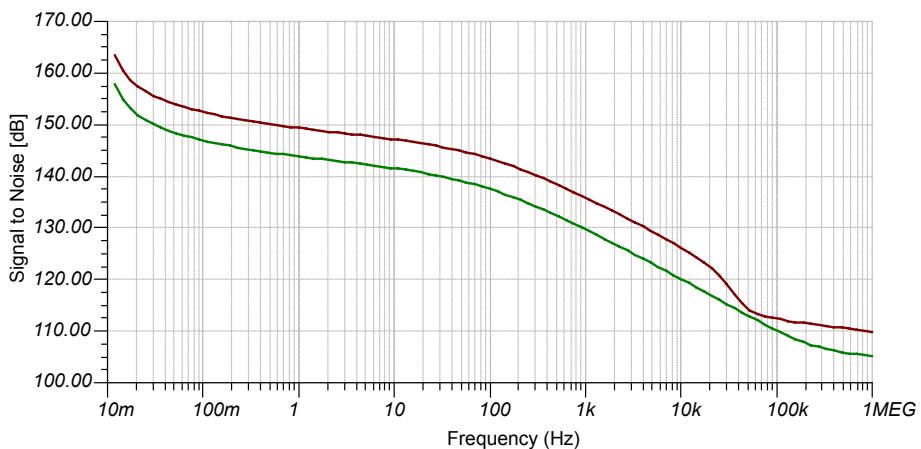


Abbildung 6.8: Filter Simulation Rauschabstand (SNR); rot: pos\_sk, grün: out

Mit der Simulations-Software lässt sich auch der SNR abschätzen. Dies ist in Abbildung 6.8 ersichtlich. In Referenz zum 1 kHz-Quellsignal liegt der SNR bis 10 kHz über 120 dB. Es gilt jedoch zu beachten, dass der SNR bei Audio Geräten als gewichteter Mittelwert angegeben wird und sich die Simulation auf die Filter beschränkt. Einflüsse des DACs, der Speisung oder Layouts sind nicht eingerechnet.

## 6.3 DAC/OPAMP Speisung

### 6.3.1 Eingang

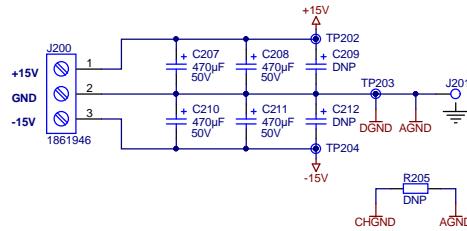


Abbildung 6.9: Stützkondensatoren am Eingang

Der Anschluss an die PSU erfolgt über einen Klemmverbinder, in Abbildung 6.9 als J200 ersichtlich. Anschliessend wird die Speisung durch  $470\ \mu F$  Kondensatoren gestützt. Dabei werden Kondensatoren der Panasonic FR1 Serie aufgrund ihres tiefen Seriewiderstandes (ESR) verwendet. Zudem wird an diesem Punkt der Schaltung das digitale und analoge Ground als Sternpunkt verbunden.

Grundsätzlich werden die Schaltungen ohne Erdanbindung verwendet. Sollte eine Verbindung erwünscht sein, kann an J201 ein Erdkabel angelötet werden.

R205 dient als Platzhalter zur Verbindung des Chassis Ground an das analoge Ground. Als Komponenten könnte ein Widerstand, Kondensator oder Ferrit verwendet werden.

### 6.3.2 Analoge Speisung

Der DAC benötigt für den analogen Teil die Spannungen 3.3 V und 5 V, hinzu kommen die  $\pm 12\ V$  der Operationsverstärker. Für die positiven Spannungen kommt der LT3045 von Linear Technology zum Einsatz, da dieser Linearregler ein tiefes Rauschen und ein hohes Power Supply Reject Ratio (PSRR) vorweist.

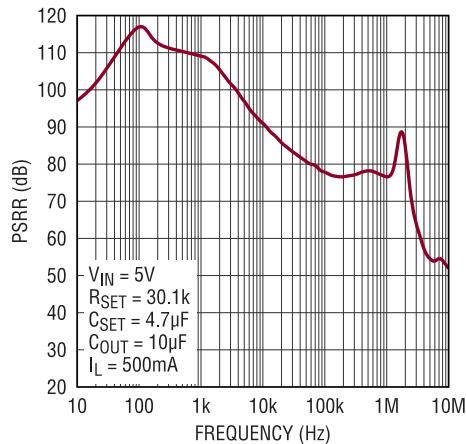


Abbildung 6.10: Power Supply Reject Ratio (PSRR) des LT3045 [55]

Abbildung 6.10 zeigt, dass bei 100 Hz das PSRR 115dB beträgt. Dies ist insbesondere wertvoll, da die PSU mit einer Transformator-Gleichrichter Schaltung aufgebaut ist. Denn durch die Gleichrichtung entstehen Ripple bei 100 Hz.

Da alle positiven Speisungen den LT3045 verwenden, wird hier nur die  $\pm 12\ V$  Speisung abgebildet. Der LT3094 bildet das Gegenstück für negative Spannungen.

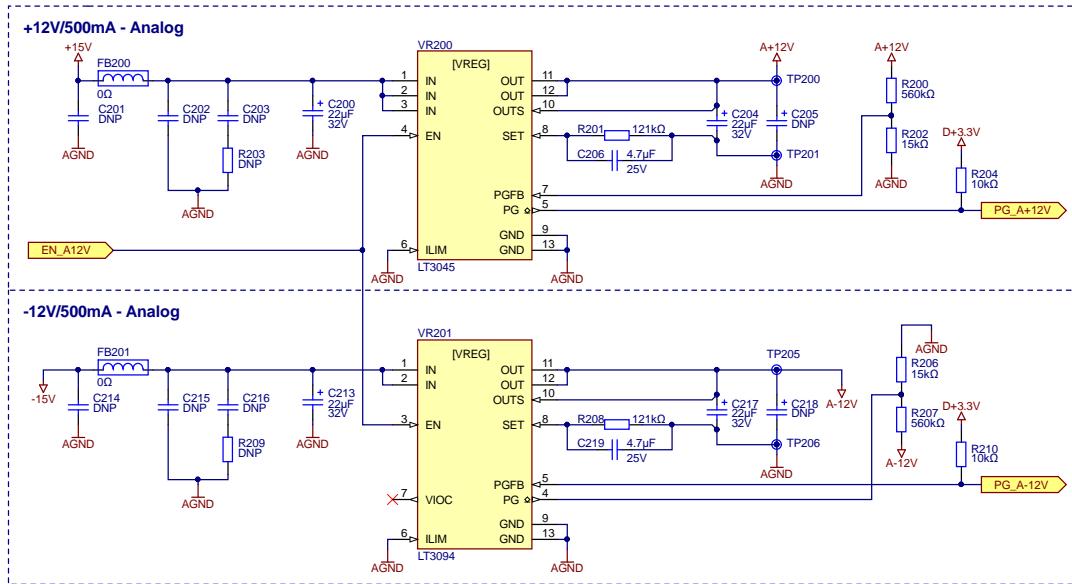


Abbildung 6.11: Linearregler für die Spannungsversorgung der Operationsverstärker

Auf der linken Seite in Abbildung 6.11 ist ein optionales Filter ersichtlich. Diese besteht aus Kondensatoren und einem Ferrit. Der Hersteller des Linearreglers empfiehlt eine tiefe Impedanz zu den Anschlussklemmen einem Filter vorzuziehen. Deshalb wird das Filter mit einem  $0\Omega$  Widerstand überbrückt.

Als Stützkondensatoren am Ein- und Ausgang des Reglers kommen  $22\mu F$  Polymer Aluminium Kondensatoren von Panasonic (SEPF Serie) zum Einsatz. Diese Art von Kondensatoren haben für die Baugröße einen sehr tiefen ESR (32SEP22M:  $35\text{ m}\Omega$  max [56]) und sind somit vergleichbar mit einem Keramik Kondensator. Jedoch ohne den Nachteil des piezoelektrischen Effekts und der spannungsabhängiger Kapazität von Keramik Kondensatoren. Am Ausgang wird nur ein Stützkondensator verbaut, ein zweiter kann bei Bedarf nachbestückt werden. Die beiden Testpunkte TP200 und TP201 dienen zur Ripple-Messung.

Die Ausgangsspannung des LT3045 ist variabel. Eingestellt wird diese über einen Set-Widerstand. Dieser ist in Abbildung 6.11 als R201 ersichtlich. Eine Tabelle der Widerstandswerte und der entsprechenden Spannungen ist im Datenblatt aufgeführt. Es wird nur ein Widerstand benötigt, da der Regler mit einer Konstantstromquelle arbeitet. Der parallel geschaltete Kondensator (C206) dient dabei zur Stabilisierung.

Zur Spannungsüberwachung verfügt der Regler über einen Komparator der auf eine Referenzspannung von  $300\text{ mV}$  reagiert. Der Eingang des Komparators ist in der Schaltung mit Power Good Feedback (PGFB) bezeichnet. Es gilt die Gleichung [55]:

$$V_{\text{out,th}} = 0.3\text{ V} \cdot \left( 1 + \frac{R_{\text{PG2}}}{R_{\text{PG1}}} \right) + I_{\text{PGFB}} \cdot R_{\text{PG2}} \quad (6.5)$$

$R_{\text{PG1}}$  und  $R_{\text{PG2}}$  entsprechen den Widerständen R202 und R200 im Schema.  $I_{\text{PGFB}}$  ist der Strom, der in den Eingang fliesst. Dieser kann vernachlässigt werden, wenn der  $R_{\text{PG1}}$  kleiner als  $30\text{ k}\Omega$  ist. Die eingestellten Threshold-Spannungen können der Tabelle 6.1 entnommen werden. Falls der Spannungspegel unter den Grenzwert fällt, wird dies am PG Ausgang mit einem Low-Pegel signalisiert. Dieser Ausgang wird zusammen mit dem Enable Anschluss zum CoM geführt.

Da es sich beim LT3045 um einen Linearregler handelt, muss die thermische Verlustleistung untersucht werden. Die Verlustleistung des Reglers berechnet sich gemäss dem Datenblatt [55]:

$$P_D = I_{\text{OUT}(\text{MAX})} \cdot (V_{\text{IN}(\text{MAX})} - V_{\text{OUT}}) + I_{\text{GND}} \cdot V_{\text{IN}(\text{MAX})} \quad (6.6)$$

Der thermische Widerstand vom IC zur Luft beträgt ca.  $R_{\text{th},\text{JA}} = 34\text{ K/W}$ . Daraus lässt sich der maximale Ausgangsstrom unter Annahme einer Umgebungstemperatur von  $T_A = 60^\circ\text{C}$  und einer maximalen Junction-Temperatur von  $T_J = 125^\circ\text{C}$  berechnen:

$$P_{D,\max} = \frac{\Delta T}{R_{th,JA}} = 1.76 \text{ W}, \quad \Delta T = T_J - T_A = 65 \text{ K}$$

$$I_{OUT(MAX)} = \frac{P_{D,\max} - I_{GND} \cdot V_{IN(MAX)}}{V_{IN(MAX)} - V_{OUT}}, \quad I_{GND} \cdot V_{IN(MAX)} \approx 12.5 \text{ mA} \cdot 15 \text{ V} = 188 \text{ mW}$$
(6.7)

Aus den Werten in Tabelle 6.1 geht hervor, dass die  $\pm 12 \text{ V}$  Speisung ausreichend gekühlt wird. Bei der  $3.3 \text{ V}$  und  $5 \text{ V}$  Speisungen ist die thermische Begrenzung deutlich erkennbar. Dafür gibt es zwei mögliche Lösungen:

1. Der Speisungseingang wird an die  $12 \text{ V}$  Speisung angeschlossen, so verteilt sich die Verlustleistung auf zwei Regler
2. Es wird ein SMD Kühlkörper auf die Leiterplatte angelötet um so den thermischen Widerstand zu verringern

Auf der umgesetzten Schaltung wurden beide Lösungsvarianten umgesetzt, damit beim Testen die Schaltung an den realen Bedingungen angepasst werden kann. Es gilt zu beachten, dass auf den beiden betroffenen Speisungen keine grossen Ströme ( $< 50 \text{ mA}$ ) erwartet werden, da diese nur für die analoge Sektion der DACs verwendet werden.

Analoge Speisung	Threshold Spannung	$I_{OUT(MAX)}$
$3.3 \text{ V}$	$3.03 \text{ V}$	$134 \text{ mA}$
$5 \text{ V}$	$4.8 \text{ V}$	$157 \text{ mA}$
$12 \text{ V}$	$11.5 \text{ V}$	$524 \text{ mA}$
$-12 \text{ V}$	$-11.5 \text{ V}$	$-524 \text{ mA}$

Tabelle 6.1: Kenndaten Analog Speisung

### 6.3.3 Digitale Speisung

Für die digitale Speisung des DACs wird wiederum ein Linearregler verwendet. Jedoch eine günstigerer Variante, da die Ansprüche an den Ripple im digitalen Teil geringer sind, als im analogen.

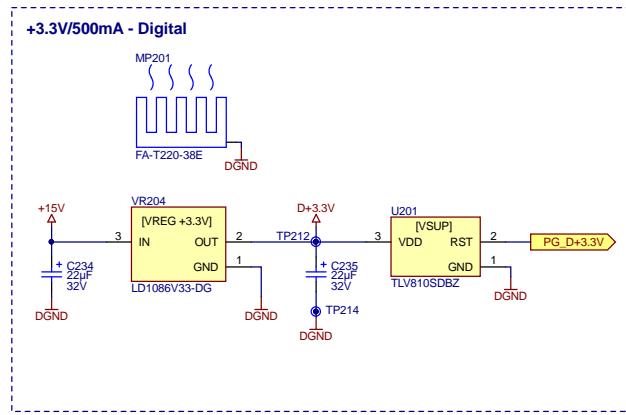


Abbildung 6.12: Linearregler für die digitale Spannungsversorgung des DAC

Der Linearregler und die nachfolgenden Spannungsüberwachung ist in Abbildung 6.12 ersichtlich. Der Schaltungsaufwand ist minimal.

Auch bei diesem Regler muss wiederum die Verlustleistung analysiert werden. Da dieser Regler im TO-220 Gehäuse geliefert wird, ist direkter Anschluss an einen Kühlkörper möglich. Der gewünschte Ausgangsstrom beträgt  $I_{out,max} = 500 \text{ mA}$ . Somit ergibt sich die Verlustleistung:

$$P_{D,max} = (V_{in} - V_{out}) \cdot I_{out,max} = 5.85 \text{ W}$$
(6.8)

Für die Wahl eines Kühlkörpers muss der maximale mögliche thermische Widerstand eines Kühlkörpers zu bestimmen. Dazu wird zuerst der maximale thermische Widerstand von der Junction und der Umgebung bestimmt:

$$R_{\text{th,JA}} = \frac{\Delta T}{P_{\text{D,max}}} = \frac{T_J - T_A}{P_{\text{D,max}}} = \frac{150^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}}{5.85\text{W}} = 15.38\text{K/W} \quad (6.9)$$

Von diesem Gesamtwiderstand muss Widerstand von der Junction zum Gehäuse [57] und der Wärmeleitpaste ( $\approx 1\text{K/W}$ ) abgezogen werden:

$$R_{\text{th,HA}} = R_{\text{th,JC}} - R_{\text{th,CH}} = 15.38 - 5\text{K/W} - 1\text{K/W} = 9.38\text{K/W} \quad (6.10)$$

Der gewählte Kühlkörper ist mit  $R_{\text{th,HA}} = 3.8\text{K/W}$  überdimensioniert um den Regler nicht am thermischen Limit zu betreiben.

### 6.3.4 Netzüberwachung

Ein separater Gleichrichter auf der PSU erlaubt die Spannung des Transformatoren zu überwachen. So können die Audio-Ausgänge bei Netzausfall stumm geschaltet werden, bevor die Operationsverstärker in einen undefinierten Zustand gelangen.

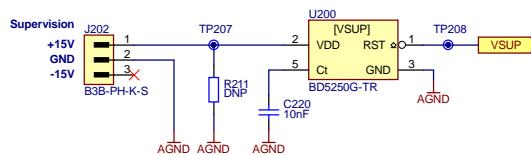


Abbildung 6.13: Überwachung der Netzspannung

Der in Abbildung 6.13 abgebildete Spannungsüberwacher zieht den RST Ausgang bei einer Spannung von  $<5\text{V}$  auf Ground. Der Widerstand R211 dient zur Anpassung der Reaktionsgeschwindigkeit der Schaltung.

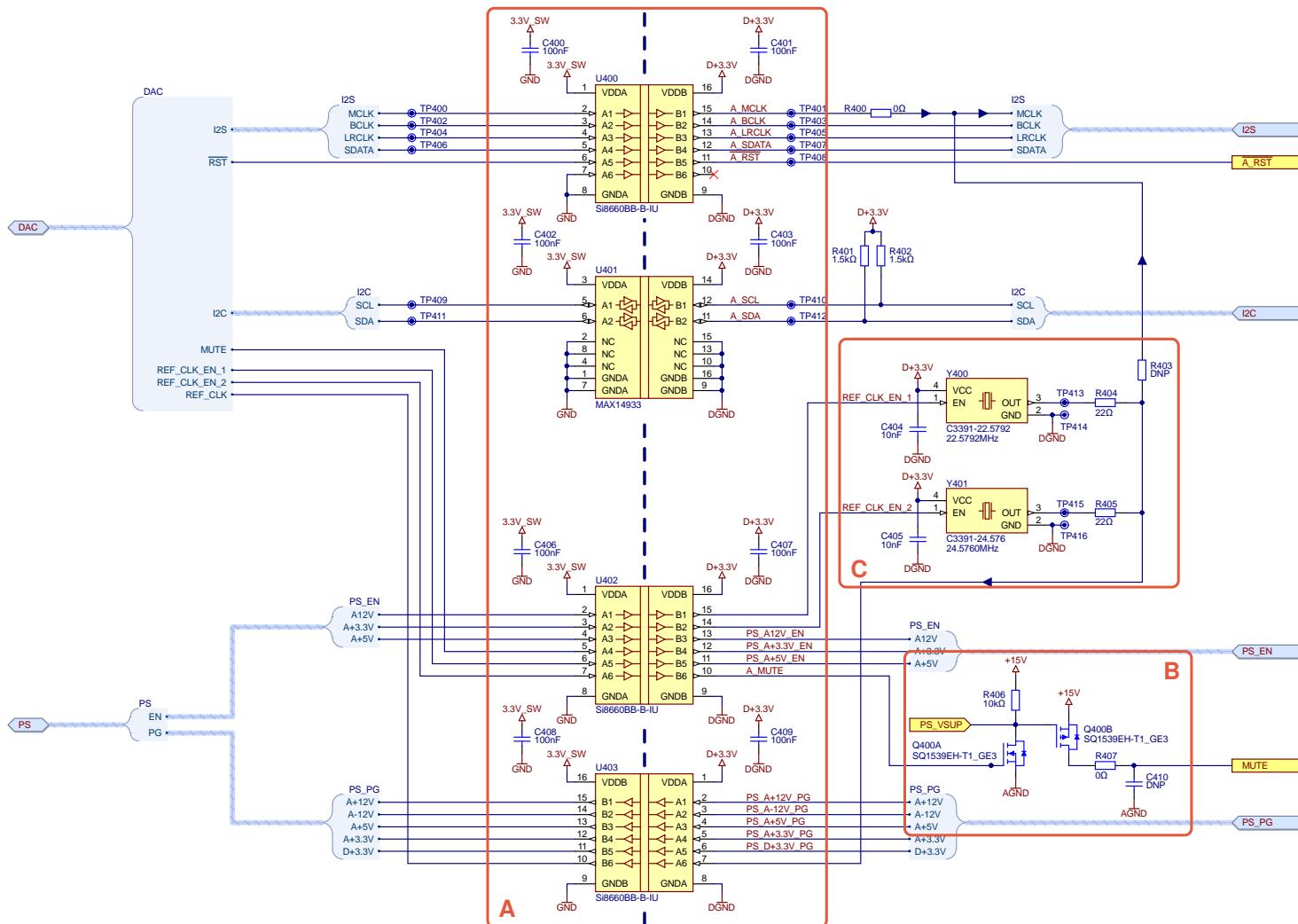


Abbildung 6.14: Schaltung Digitale Isolation

## 6.4 Digital Isolator

### 6.4.1 Detail A: Isolator

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Beschaltung des CoM stark störungsbehaftet ist. Grund dafür sind die Schaltregler der Speisung des CoM und die vielen digitalen, zum Teil hochfrequenten Signale. Die analoge Schaltung muss vor diesen Störungen bestmöglich geschützt werden. Dies soll durch digitalen Isolatoren erzielt werden.

Das Detail A in Abbildung 6.14 zeigt die vier Isolatoren. Die oberen zwei werden für die DACs verwendet. Der DAC verwendet die Schnittstellen I<sup>2</sup>S, I<sup>2</sup>C und eine Reset-Leitung. Der I<sup>2</sup>S-Bus und die Reset-Leitung sind unidirektional und gehen über den U400. Für den I<sup>2</sup>C-Bus wird der MAX14933 von Maxim Integrated verwendet (U401). Dieser Baustein erlaubt die bidirektionale Kommunikation mit Open-Drain Bussen.

Für alle anderen digitalen Signale wird der Si8660BB-B-IU von Silicon Labs verbaut. Dieses IC hat gemäß Datenblatt [58] einen maximalen Jitter von 350 ps. Eine tiefe Jitter-Zeit reduziert die Störungen auf dem digitalen Signal. Da sich die Hauptschlüsselquelle für den DAC (MCLK) auf der analogen Seite befindet, ist der Jitter nicht so kritisch, wie bei der Taktquelle auf der CoM Seite.

Auf dem U402 werden die Steuersignale für die Speisung der Taktquellen sowie die Mute-Steuerung geführt. Über den U403 werden die Power Good Signale der Speisung und eine Taktleitung zum CoM geführt.

### 6.4.2 Detail B: Mute Verknüpfung

Die Mute-Steuerung der analogen Ausgänge erfolgt in erster Linie bei Netzausfall. Das CoM hat jedoch auch die Möglichkeit, die Ausgänge zu muten. Dies wird im Datenblatt des AK4493 beim Power-Up/Down Vorgang empfohlen [11, S. 73]. Die Mute Signale des CoM und der Speisungsüberwachung sind mit einer Open-Drain-Schaltung oder verknüpft. Bei aktiviertem Mute-Signal werden mit Q400B die Bipolar Transistoren auf den analogen Ausgängen aktiviert.

Sollte die Ausschaltflanke bei Test zu steil sein (Klick-Geräusch), kann über R407 und C410 ein Tiefpassfilter eingestellt werden.

### 6.4.3 Detail C: Taktquelle

Die Master Clock ist ein kritisches Element in der I<sup>2</sup>S Schnittstellen. Denn der DAC benötigt diese Taktquelle für die digitale Signalverarbeitung und den Sigma-Delta Wandler. Eine stabile Taktquelle (tiefe Jitter-Zeit) ist hier erwünscht. Der vom CoM mittels PLL erzeugte Takt ist dazu zu instabil. Die Jitter-Zeit beträgt gemäß Messungen von NXP [59, S. 13] für den i.MX6QD 107.7 ps. Hinzu kommen die Jitter des Isolators. Ein präzisere Quelle bilden die Oszillatoren Y400 und Y401. Diese haben ein Jitter von maximal 1 ps [60]. Der Zusammenhang zwischen den MCLK-Taktraten und den Sampling-Frequenzen ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Dadurch, dass der Master Clock vom analogen Sektor zum CoM geführt und die davon abhängigen Signale über den Isolator zurückgeführt werden, entsteht unweigerlich ein Delay. Der DAC ist jedoch nicht darauf angewiesen, dass MCLK mit der I<sup>2</sup>S Schnittstelle in Phase ist. Die einzige Anforderung ist, dass die Takte synchronisiert sein müssen [10, S. 43].

Zum jetzigen Zeitpunkt ist der Takt-Pfad nicht vollständig verifiziert. Denn der i.MX6 hat keinen MCLK-Eingang (im Gegensatz zum i.MX8). Jedoch soll es gemäß [59] möglich sein, den internen Audio-PLL mit einem Takt-Eingang zu überbrücken. Als Takt-Eingang kann auf dem i.MX6 ein LVDS-Signal verwendet werden. Dazu ist im Audio-Teil des Carrier Boards ein LVDS-Treiber für die MCLK-Oszillatoren vorgesehen. Im Schema sind die Möglichkeiten Audio-PLL (CoM), Oszillatoren mit LVDS-Treiber (i.MX6) und CoM-MCLK-Eingang (i.MX8) vorgesehen. Mit 0 Ω-Widerständen kann die Schaltung beim Testen angepasst werden.

$f_s$	$f_{MCLK}$	Sampling Speed
32 kHz	24.5760 MHz	$768 \cdot f_s$
44.1 kHz	22.5792 MHz	$512 \cdot f_s$
48 kHz	24.5760 MHz	$512 \cdot f_s$
88.2 kHz	22.5792 MHz	$256 \cdot f_s$
96 kHz	24.5760 MHz	$256 \cdot f_s$
176 kHz	22.5792 MHz	$128 \cdot f_s$
192 kHz	24.5760 MHz	$128 \cdot f_s$
384 kHz	22.5792 MHz	$64 \cdot f_s$
768 kHz	24.5760 MHz	$64 \cdot f_s$

Tabelle 6.2: Sample Raten und MCLK Frequenzen gemäss [11, S. 41]

## 6.5 Toradex Computer on a Module Carrier Board

Das Apalis i.MX6 Quad Modul von Toradex wird als CoM verwendet. Darauf befindet sich das System on Chip (NXP i.MX 6 Quad) sowie RAM, eMMC und eine Ethernet PHY. Mit einem Carrier Board können die Schnittstellen des CoM an Buchsen geleitet oder intern verwendet werden. Das Carrier Board muss zudem das Modul speisen und die Steuersignale zum ein-/ausschalten bereitstellen. Das Design des Carrier Boards ist eine abgeänderte Kopie des Toradex Ixora (V1.1) Carrier Boards. Das Altium Projekt des Ixora Boards stellt Toradex unter [61] frei zur Verfügung. Dieses Design wurde für den Audio-Streamer angepasst.

### 6.5.1 Schnittstellen

Die verwendeten Schnittstellen werden in interne und extern zugänglich unterschieden. Die extern zugänglichen Schnittstellen befinden sich auf der Rückseite der Leiterplatte. Dies sind:

- 1x USB 2.0
- 1x USB 3.1
- 1x Virtual COM Port über USB (zu Debug Zwecken)

Weitere Schnittstellen sind auf dem Mainboard verbaut und sind bei Öffnen des Geräts zugänglich. Diese können zum Teil über Durchführungen aus dem Gerät geführt werden.

- 1x Gigabit Ethernet, Durchführung auf die Rückseite
- 1x USB 3.1, Durchführung auf die Front Seite für USB Sticks
- 1x USB 2.0, geteilt mit der Buchse auf der Rückseite, kann bei Bedarf für einen Touchscreen Controller genutzt werden
- 1x HDMI, kann bei Bedarf für ein Display verwendet werden
- 1x Parallel RGB Display Output mit I<sup>2</sup>C Anschluss für kapazitiv Touchscreen Controller
- 1x M.2 Key A Slot (PCIe) für ein WiFi Modul
- 1x M.2 Key M Slot (SATA) für eine SSD zur Ablage einer Musiksammlung auf dem Audio-Streamer

### 6.5.2 Änderungen

Da das Schema des Boards 19 Seiten umfasst wird es hier nicht abgebildet. Die nachfolgenden Seitenangaben beziehen sich auf das Schema von Toradex.

## **Entfernte Elemente**

Einige Elemente des Ixora Boards werden für den Audio-Streamer nicht benötigt und wurden entfernt:

- Blatt 4: Steuerung eines Lüfters
- Blatt 5: Board ID EEPROM
- Blatt 8: SD Card Slot
- Blatt 10: Analog Audio Output
- Blatt 11: Camera Interface
- Blatt 12: Resistive Touch Interface
- Blatt 14: LVDS Display Connector
- Blatt 15: CAN Bus Interface
- Blatt 19: Extension Connector

## **Geänderte Elemente**

Etliche Elemente der Schaltung mussten für die Anwendung als Audio-Streamer ergänzt oder erneuert werden:

- Alle SMD Bauteile der Grösse 0402 wurden mit 0603 Bauteilen ersetzt zur einfacheren Be-stückung von Hand
- Toradex behandelte alle Netze im Altium-Projekt als global, somit die Netze in allen Sche-mablätttern bekannt, der Verbinden mit Leitungen wird somit überflüssig. Dieser Trick wird häufig in Kombination mit einem Missbrauch von Signal-Bussen verwendet. Aufgrund der Benutzung eines Multi-Channel Elements (Audio-Out) mussten die Busse durch Signal-Harnesses ersetzt werden
- Die High-Speed Signale wurden mit den entsprechen Netzklassen versehen, um das Impe-dance Controlling und Length Tuning zu vereinfachen
- Blatt 4:
  - Der Linearreger NCV4264-2ST50T3G ist obsolet und wurde mit dem pinkompatiblen L5150BNTR ersetzt
  - Der Pushbutton Controller LTC2954CTS8-2#PBF ist obsolet und wurde mit dem Nach-folgemodell LTC2954CTS8-2#TRMPBF ersetzt
  - Die Power MOSFETs FDS6982AS sind zur Zeit nicht lieferbar und wurden mit dem FDS6910DKR ersetzt
  - Der On/Off-Button wurde mit einem Kabelaschluss für den Front-Panel Button ersetzt
- Blatt 7:
  - Die USB Buchse (X7) wurde mit einer internen USB Buchse ergänzt, um bei Bedarf ein Touchscreen anschliessen zu können
  - Die USB 3.0 Doppelbuchse wurde durch zwei einzelne Buchsen ersetzt, eine für das Back-Panel und eine interne für das Front-Panel
- Blatt 9: Da die Ethernet Buchse mit Transformator beim Back-Panel weiter vom CoM entfernt liegt als Toradex empfiehlt (>100 mm), musste eine interne Buchse mit Ethernet-Durchführung im Back-Panel verbaut werden; als interne Buchse wird die 5-2301995-1 verwendet
- Blatt 12: Die Parallel Display Schnittstelle wurde mit der Schaltung aus dem Generic Display Adapter [25] ergänzt, um das verwendete Display ansteuern zu können
- Blatt 13: Der ESD Schutz und Level Shifter IP4791CZ12 ist obsolet ohne Nachfolger, er wurde durch den HDMI2C1-6C1 ersetzt
- Blatt 16: Die RS232-Schnittstelle (UART1) wurde durch eine USB-UART-Bridge (CP2105) ersetzt
- Blatt 17: Der mSATA Sockel wurde durch den neueren M.2 Key B Standard ersetzt, als Sockel wird der 1-2199119-5 verwendet

- Blatt 18: Der mini PCIe Sockel wurde durch den neueren M.2 Key A Standard ersetzt, als Sockel wird der 2199119-8 verwendet

### 6.5.3 Kompatibilität

Das Carrier Board wurde so ausgelegt, dass ein Upgrade auf das Apalis i.MX8 Modul, welches noch entwickelt wird, möglich ist. Deshalb wurde ein Kompromiss für die Verwendung beider Module gemacht. Folgende Funktionen können mit i.MX6 nicht genutzt werden:

- USB 3.1 Schnittstellen werden nur mit USB 2.0 versorgt
- Der MCLK\_IN Anschluss steht nicht zur Verfügung

Das i.MX8 Modul wird folgende Inkompatibilität aufweisen:

- Der Parallel RGB wird nicht mehr unterstützt, kann durch ein HDMI-Display ersetzt werden

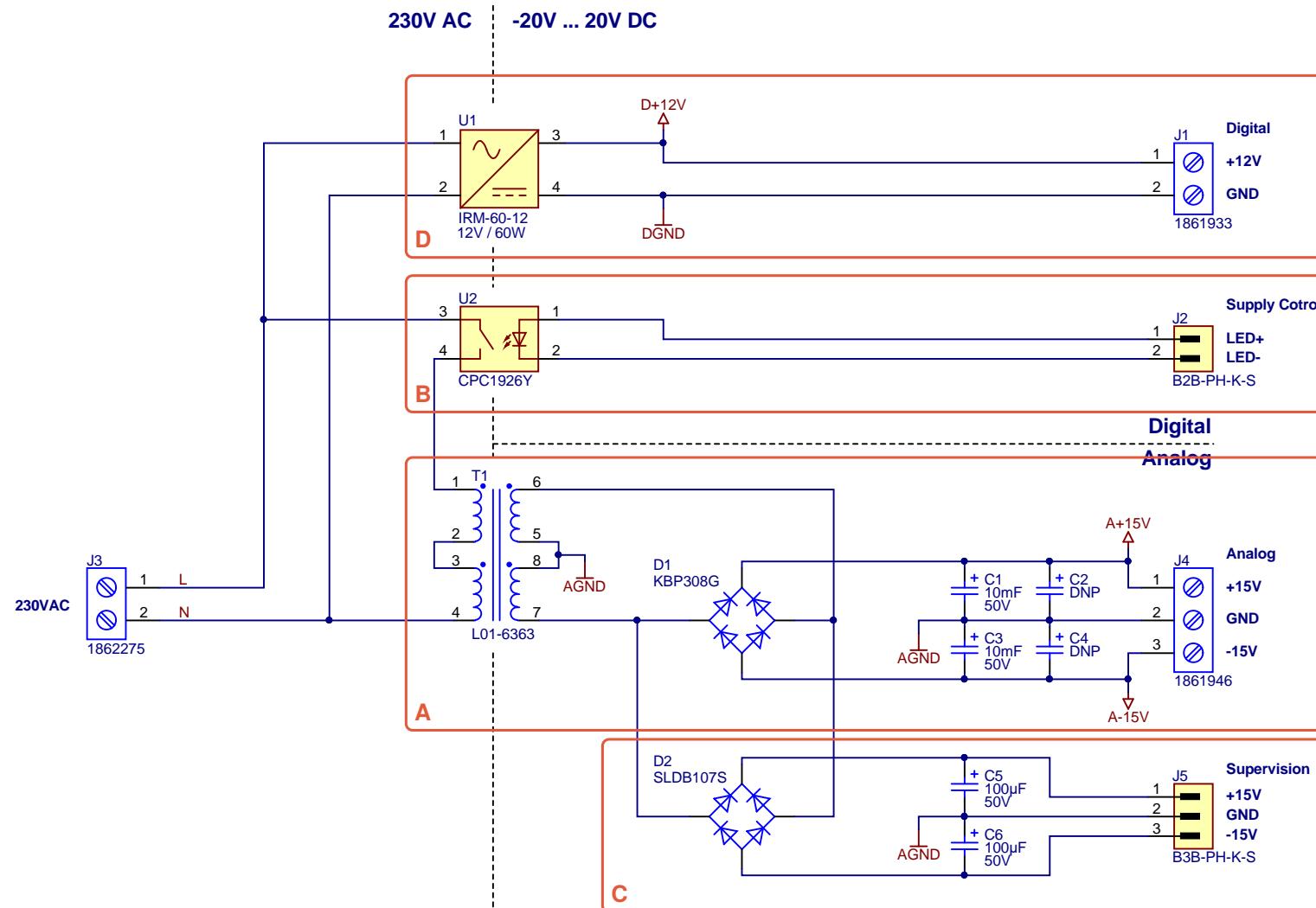


Abbildung 6.15: Schaltung Power Supply Unit (PSU)

## 6.6 Power Supply Unit (PSU)

### 6.6.1 Detail A: Analog Supply

Das Detail A in Abbildung 6.15 zeigt die Umsetzung des Speisung für die Analog Schaltung. Als Topologie wurde eine Transformator-Gleichrichter Schaltung gewählt. Um die Streufelder und Geräuschentwicklung zu minimieren, wird ein Ringkerntransformator verwendet. Die Nennscheinleistung beträgt 25 VA und die Ausgangsspannung zwei mal 18 VAC (unter Last). Da nur die DAC und die Operationsverstärker von dieser Schaltung gespeist werden, reicht die Nennscheinleistung aus. Der Transformator ist für 230 V beschaltet, die Schaltung könnte jedoch auf 115 V angepasst werden. Die transformierte Spannung wird über einen Vollbrückengleichrichter in die positive und negative DC Spannung gleichgerichtet. Die gleichgerichtete Spannung beträgt:

$$V_{DC} = \frac{2}{\pi} \hat{V}_{AC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{AC} = 16.02 \text{ V} \quad (6.11)$$

Für die Glättung der Ripple dieser Schaltung wird ein 10 mF Kondensator der Serie UKW von Nichicon verwendet. Dieser sollen gemäss dem Hersteller für den Audio Bereich eignen. Die erwartet Ripple-Spannung beträgt:

$$V_{ripple} = \frac{I_{load,max}}{f \cdot C}, \quad f = 100 \text{ Hz}, \quad C = 10 \text{ mF}, \quad I_{load,max} \approx 700 \text{ mA} \quad (6.12)$$
$$V_{ripple} = 70 \text{ mV}$$

Der maximale Strom wird durch den Transformator beschränkt. Es wird jedoch ein weit tieferen Stromverbrauch erwartet. Messungen mit dem AKD4497 Evaluation Kit haben gezeigt, dass der Stromverbrauch beim positiven Rail ca. 200 mA und beim negativen Rail <50 mA beträgt.

### 6.6.2 Detail B: Analog Supply Control

Der Audio-Streamer kann nicht über einen Schalter komplett vom Netz genommen. Es wird stattdessen die Standby Funktion des CoM verwendet. Um den Stromverbrauch im Standby zu reduzieren kann die Reaktanz des Transformator mit einem OptoMOSFET vom Netz getrennt werden. Das CoM ist für das Steuern der Speisungen verantwortlich.

### 6.6.3 Detail C: Analog Supply Supervision

Mit der Überwachungsschaltung können Netzausfälle schnell erkannt werden. Mittels einem separaten Gleichrichten und Glättungskondensatoren mit kleiner Kapazität kann ein Spannungseinbruch erkannt werden, bevor die Hauptspannungsversorgung einbricht. Mit einem Lastwiderstand auf dem Mainboard kann der Ripple und somit Geschwindigkeit der Schaltung angepasst werden.

### 6.6.4 Detail D: Digital Supply

Für die Versorgung des CoM und dessen Beschaltung wird ein vollintegriertes Schaltnetzteil verwendet. Die Nennleistung beträgt wie von Toradex empfohlen 60 W.

## 6.7 Encoder-Modul

Das Encoder Modul besteht aus einem Drehgeber (Rotary Encoder) und sechs blauen LEDs. Die Leiterplatte ist für die Front-Panel Montage ausgelegt. Die LEDs werden dazu in einem Kreis um den Drehgeber herum platziert. Durch einen kreisförmigen Ausschnitt soll eine matte Plexiglasscheibe ersichtlich sein. Mit der Hintergrundbeleuchtung wird somit einen blauen Ring um den Drehknopf erzeugt.

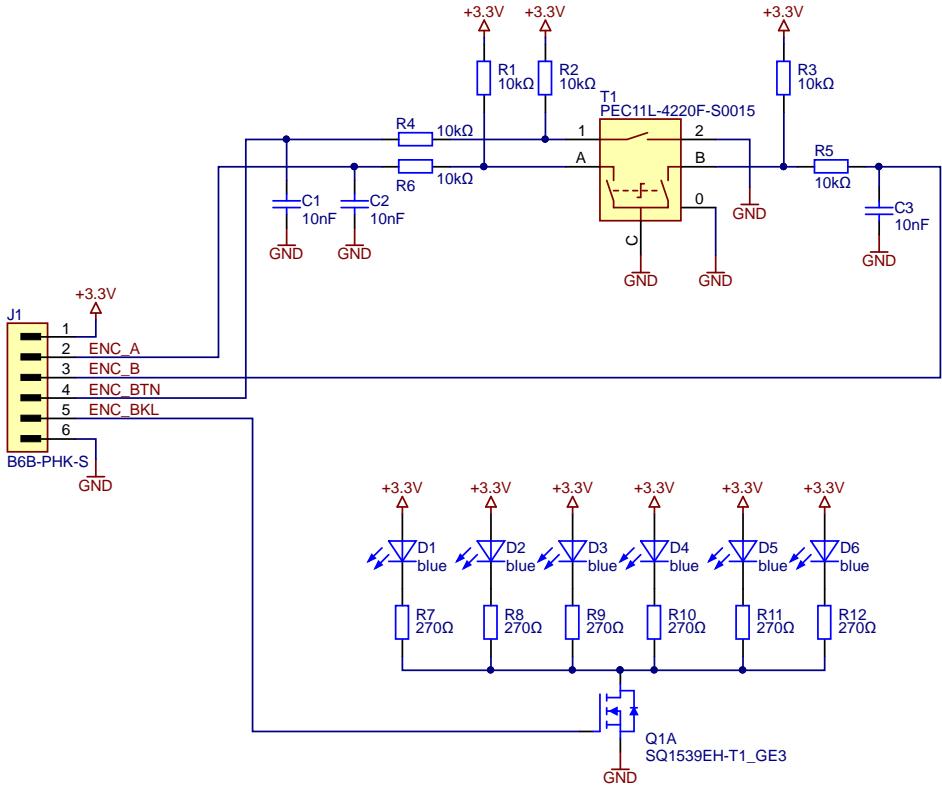


Abbildung 6.16: Drehgeber mit Hintergrundbeleuchtung

Aus Abbildung 6.16 ist ersichtlich, dass das Signal des Drehgebers mit einem RC-Tiefpass Filter gefiltert wird. Der Drehgeber verfügt zudem über einen Druckknopf, dieser wird auch gefiltert.

Im unteren Teil der Abbildung sind die LEDs mit ihren Vorwiderständen und dem Transistor zu deren Ansteuerung zu sehen. Da die Vorwärtsspannung der LEDs bei 10 mA bereits der Versorgungsspannung entspricht, wurden Widerstände platziert, jedoch nicht dimensioniert. Die Widerstandswerte können nach ersten Tests angepasst werden. Der ENC\_BKL Anschluss wird auf den CoM auf einen PWM Anschluss geführt, somit kann die Beleuchtung gedimmt werden.



# 7 Layout & Gehäuse

Dieses Kapitel beinhaltet die verwendeten Richtlinien beim Layout der Leiterplatten, wie auch deren Begründung. Das definitive Layout und Gehäuse Design ist hier nicht enthalten, da die letzten Änderungen im Übergang in die Bachelor-Thesis vorgenommen werden.

## 7.1 Design Considerations

### 7.1.1 PSU & Encoder-Modul

Für den Audio-Streamer wurden drei Leiterplatten erstellt. Diese haben unterschiedliche Anforderungen an das Layout und das verwendete Material. Die PSU und das Encoder-Modul lassen sich mit 2-Lagen realisieren, da nur wenige Verbindungen benötigt werden.

Beim Layout der Speisung muss auf die Spannungsfestigkeit in 230 V Teil geachtet werden. Lötstellen die nahe beieinander liegen und Netzspannung führen sollen mit Insulation Slots geschützt werden. Dies verhindert Funkensprung bei verschmutzten Leiterplatten, da der Weg zwischen den Kontakten verlängert wird. Auf der DC Seite der PSU müssen die Leiterbahnen den Strömen entsprechend breit ausgelegt werden.

### 7.1.2 Mainboard

#### Layer Stack

Beim Mainboard müssen die Leitungen der High Speed Verbindungen eine spezifizierte Impedanz aufweisen. Mit einer 2-Lagen Leiterplatte sind diese Impedanzen aufgrund der Lagendistanz von ca. 1.55 mm nicht sinnvoll realisierbar. Es wird deshalb ein 4-Lagen Layer Stack verwendet. Der Prototypen Hersteller Multi-CB bietet einen definierten Layer Stack an. Somit können die Leiterbahnen hinreichend genau auf die gewünschten Impedanzen ausgelegt werden.

Material	Höhe	Verwendung
Kupfer	35 µm	Signal
2x Prepreg 1080	140 µm	
Kupfer	35 µm	VCC
Core	1.2 mm	
Kupfer	35 µm	GND
2x Prepreg 1080	140 µm	
Kupfer	35 µm	Signal

Tabelle 7.1: Multi-CB Standard Defined 4 Layer Stack [62]

Aus dem Layer Stack in Tabelle 7.1 lässt sich erkennen, dass die äusseren beiden Lagen nahe zu einer Referenzfläche (Speisung) liegen. Dies stellt die Kopplung der Signale zur Fläche sicher.

## High Speed Signals

Als Grundlage für das Layout der High Speed Signale dient der Layout Design Guide [63] von Toradex. Nebst allgemeinen Layout Tipps werden auch spezifische Werte für die Impedanz und Längen einiger Signale angegeben. Eine Zusammenfassung dieser Werte ist in Tabelle 7.2 ersichtlich.

Signal	PCIe	SATA	Ethernet	USB 2.0	USB 3.0	LVDS	HDMI
<b>Impedance (differential)</b>	90 Ω	90 Ω	95 Ω	90 Ω	90 Ω	100 Ω	90 Ω
<b>Impedance (single ended)</b>	50 Ω	55 Ω	55 Ω	50 Ω	50 Ω	55 Ω	50 Ω
<b>Max trace length</b>	200 mm	55 mm	100 mm	200 mm	200 mm	500 mm	250 mm
<b>Max intra-pair skew</b>	150 µm	150 µm	250 µm	1.1 mm	150 µm	150 µm	750 µm
<b>Max vias</b>	2	2	2	-	2	-	-

Tabelle 7.2: Angaben zu High Speed Signal Leitungen aus [63], Toleranz der Impedanzen: ±15 %

Die *Max trace length* bezieht sich auf die Leiterbahnlänge auf dem Carrier Board. Sie ist insbesondere beim Ethernet eine Einschränkung. Diese Leitungen müssen so kurz wie möglich gehalten werden. Dies hat zur Folge, dass die Ethernet Buchse nicht auf die Rückseite der Leiterplatte geführt werden kann.

Das *intra-pair skew* bezeichnet die Differenz der Signallänge innerhalb einem Differential-Pair. Sie wird in Altium Designer über die Design Rules und das Length Tuning unter Kontrolle gehalten.

Aus den Vorgaben aus Tabelle 7.2 und dem Layer Stack aus Tabelle 7.1 können die Leiterbahnbreiten und -abstände berechnet werden. Als  $\epsilon_r$  wird 4.3 angenommen, dies kann bei FR-4 jedoch stark variieren. Die verwendeten Werte sind Tabelle 7.3 aufgeführt.

Bezeichnung	S50-D90	S55-D90	S55-D95	S55-D100
<b>Breite</b>	198 µm	165 µm	165 µm	165 µm
<b>Abstand</b>	160 µm	105 µm	135 µm	170 µm

Tabelle 7.3: Leiterbahnbreiten und -abstände der High Speed Leitungen, die Bezeichnung setzt sich aus der signled ended und diffiereziellen Impedanz zusammen

### 7.1.3 DAC & analoge Signale

Für die analoge Seite gelten diese Punkte zu beachten:

- Die Speisung soll sternförmig vom Anschlusspunkt aus geführt werden (digital vs analog)
- Digitale und analoge Signale müssen getrennt mit ihren jeweiligen Ground-Flächen geführt werden
- Signale dürfen nicht über einen Spalt zwischen zwei Ground-Flächen geführt werden
- Feedback Schlaufen bei Operationsverstärker sind kurz zu halten
- Die Speisung der beiden Audio Kanäle soll soweit möglich getrennt werden, um Crosstalk zu verringern
- Differentielle Signale sind parallel zu führen
- Bauteile sollen soweit möglich auf der Oberseite platziert werden, um Vias zu verhindern

## 7.2 PCB Design

Da das PCB Design gleichzeitig mit der Dokumentation der Projektstudie abgeschlossen wird, kann das Layout hier nicht mehr ausführlich beschrieben werden. Einige Render-Bilder sollen einen ersten Eindruck des Designs erlauben.

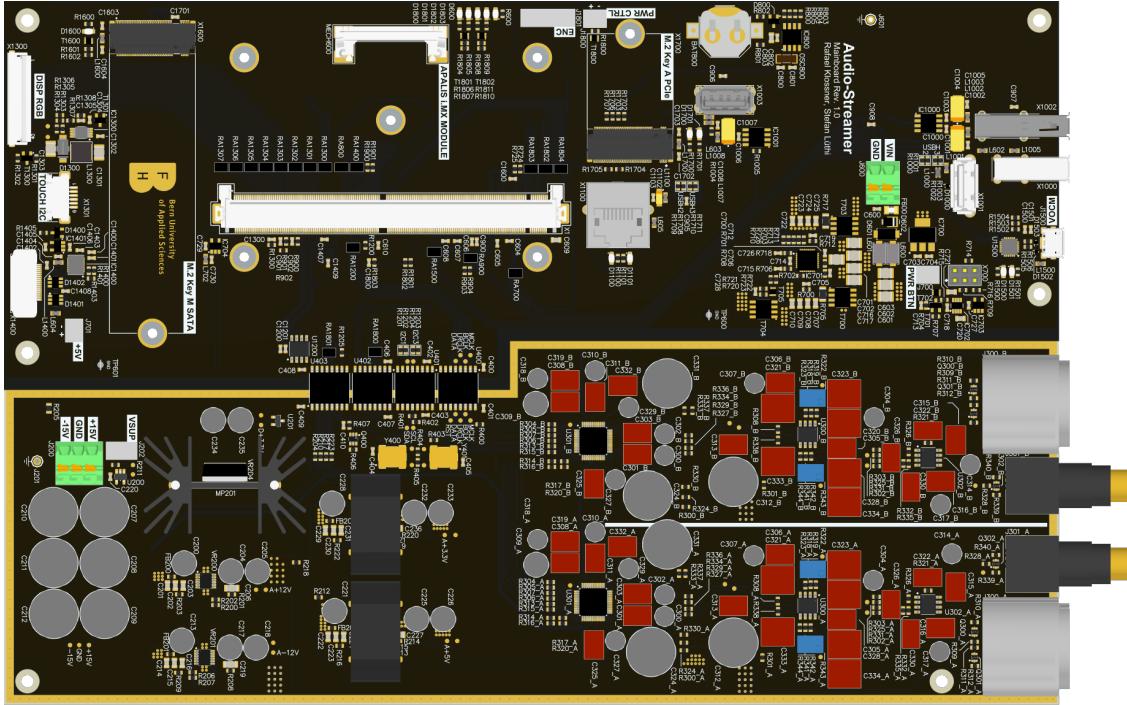


Abbildung 7.1: Render Ansicht des Mainboards

In Abbildung 7.1 ist die Analog-Zone auf der unteren Seite zu erkennen. Sie wird durch eine Bahn von freigelegt Kupfer umringt. Daran kann bei Bedarf eine Abschirmung befestigt werden. Links unten befinden sich die Linearregler. Rechts unten sind die beiden Audio-Kanäle in symmetrischem Design zu erkennen. Im Zentrum sind die digitalen Isolatoren als Brücke vom CoM zum Analog Teil platziert.

Auf der oberen Hälfte befindet sich das CoM mit Beschaltung. Der Sockel für das Computer Modul befindet sich direkt oberhalb der Isolatoren. Anschliessend an den Sockel befinden sich der M.2 Key M Sockel auf der linken und der M.2 Key A Sockel auf der rechten Seite, um die SATA und PCIe Leitungen kurz zu halten. Auf der Höhe des CoM Sockel befindet sich in unmittelbarer Nähe die Ethernet Buchse mit den restriktivsten Leiterbahnlängen-Bedingungen. Am Linken Rand befindet sich von oben nach unten ein 24-Bit Parallel RGB LCD Stecker mit PWM-Backlight Control, ein I<sup>2</sup>C Stecker für den Touch Controller, eine optionale HDMI Buchse sowie einen 5 V Anschluss zur Versorgung eines HDMI-Displays. Rechts vom M.2 Key A Sockel ist die RTC mit der Knopfzelle platziert. Darunter liegt die USB 3.1 Buchse für das Front Panel. Unterhalb des grünen Steckers ist der Schaltregler, mit Anschluss für den Geräteschalter, angeordnet. Auf der Rechten Seite befinden sich von oben nach unten eine USB 3.1, eine USB 2.0 Buchse, sowie eine Micro USB Buchse für die virtuelle Serielle Schnittstelle.

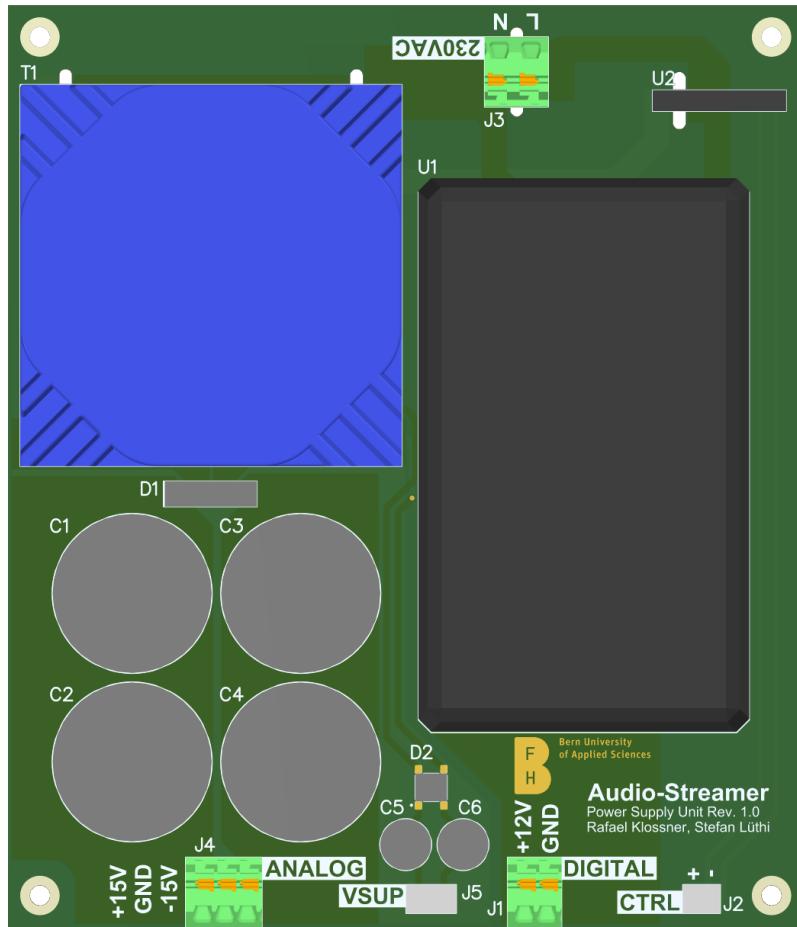


Abbildung 7.2: Render Ansicht der Power Supply Unit

In Abbildung 7.2 ist auf der linken Hälfte der Ringkern Transformator gefolgt von einem Vollbrückengleichrichter und Glättungskondensatoren ersichtlich. Auf der rechten Seite ist das AC/DC Modul platziert. Zwischen den beiden Spannungsversorgungen liegt der Gleichrichter für die Überwachung der analog Speisung. Rechts oben ist der OptoMOSFET zum Ausschalten des Transformatormoduls platziert.

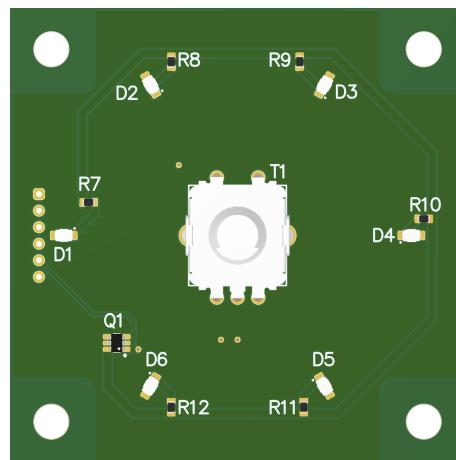


Abbildung 7.3: Render Ansicht des Rotary Encoder Moduls

Der Encoder mit dem Ring aus LEDs ist in Abbildung 7.3 dargestellt.

## 7.3 Gehäuse

Wie auch das Layout wird das Gehäuse Design erst kurz nach Abschluss der Projektstudie abgeschlossen. Deshalb wird auch hier eine erste Design Variante abgebildet.



Abbildung 7.4: Render Ansicht des geschlossenen Gehäuse von der Frontseite aus Autodesk Fusion 360

Das Gehäuse besteht aus sechs Aluminium Platten mit den Aussenmassen 430 mm (Breite) x 90 mm (Höhe) x 308 mm (Tiefe). Das Front Panel ist in Abbildung 7.4 zu sehen und besteht aus einer 8 mm dicken Aluminium Platte. Dies erlaubt ausschliesslich Schrauben von der Rückseite zu verwenden, um eine minimalistische Front Seite zu erhalten.

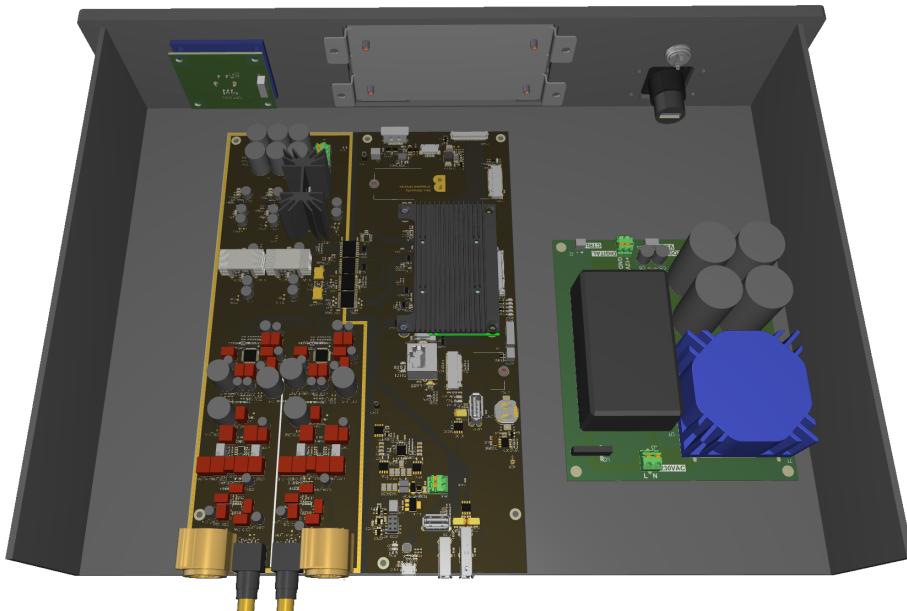


Abbildung 7.5: Render Ansicht des Inneren des Audio-Streamer mit allen Leiterplatten aus Altium Designer

Eine mögliche Anordnung der Leiterplatten im Gehäuse ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Das Back-Panel ist nicht abgebildet da dessen Design noch ausstehend ist.



# 8 Fazit

## 8.1 Auswertung Ziele

Die Anforderungen an die Software konnten zu grossen Teilen erfüllt werden. Es wurden sämtliche Systemkomponenten ausgewählt. Aus den Komponenten von Linux wurde ein bootfähiges Betriebssystem für den Apalis iMX6Q CoM erstellt. Bei der Bereitstellung von Qt sind Probleme mit Abhängigkeiten von GPU-Libraries aufgetreten. Dieses Problem war bei der Auswahl des Apalis iMX6Q CoM nur schwer voraus zu sehen und hat sich vor allem durch die Wahl eines generischen Root-Filesystems ergeben. Trotzdem ist es langfristig sicher die richtige Entscheidung, nicht auf das Filesystem von Toradex zu setzen. Um die GPU des Apalis iMX6Q CoM voll auszunützen lohnt es sich auch den Weg mit EGLFS weiterzuverfolgen und nicht einfach auf den Framebuffer zu setzen.

Bei der Evaluation des Displays gestaltete sich aufwändiger als erwartet. Da Schwierigkeiten mit den Timings aufgetaucht sind und darum der Treiber modifiziert werden musste. Zusätzlich gab es auch noch ein Problem bei der Verwendung des generischen Display Adapters von Toradex. Diese Probleme konnten aber, bis auf einen Fehler bei der Konfiguration des Front-Porch, behoben werden.

Zeitlich hat sich aufgrund der oben genannten Faktoren eine Diskrepanz zum Zeitplan ergeben. Weshalb die Evaluation des DAC und der Speisung nicht während der Vorstudie durchgeführt werden konnte. Trotz des entstandenen Mehraufwands, hat sich die Wahl des Apalis iMX6Q CoM anstatt des Raspberry Pi gelohnt. Insbesondere zukünftig betrachtet passt der Apalis iMX6Q CoM besser zum Konzept des HiFi-Audio-Streamers .

Die Anforderungen an die Hardware wurden grösstenteils erfüllt. So wurde eine Schaltung basierend auf einer Marktanalyse erstellt, die viele Gemeinsamkeiten mit dem Evaluation Kit des verwendeten DAC hat. Dadurch wird sichergestellt, dass getestete Technik verwendet wird, um Fehler durch neuartige Schaltungen zu vermeiden. Bei der Wahl der Komponenten wurde auf Langlebigkeit geachtet, d.h. die Komponenten sollen möglichst lange ersetzt werden können und nicht übermäßig thermisch belastet werden (Regler, Kondensatoren).

Aufgrund der Verwendung des Toradex CoM wurde der Audio-Streamer teurer und das Schaltungsdesign aufwändiger als zu Beginn des Projekts erwartet. Jedoch können mit dem CoM weitere Peripherie wie ein WiFi-Modul oder eine SSD angeschlossen werden. Aufgrund der hochwertigen Komponenten ist der Audio-Streamer mit ca. 600.- Fr. Materialkosten teuer, für seinen Funktionsumfang aber immer noch ein günstiges Produkt. Vergleichbare kommerzielle Produkte kosten ca. 2000.- Fr. Die definitiven Materialkosten können nach der Bestellung der Komponenten berechnet werden.

Ob die technischen Anforderungen an DAC erreicht werden (SNR, Klang Qualität) lässt sich erst nach dem Bestücken der Leiterplatten eruieren. Erst dann kann geprüft werden, ob die eingebauten Massnahmen zur Störungsreduktion (Ringkerntransformator, Linearregler, Digital Isolatoren) den gewünschten Effekt erzielen.

Die Hardware ist soweit abgeschlossen, dass nebst den abgeschlossenen Schaltplänen die Leiterplatten in aufgegeben werden können und das Front-Panel des Gehäuses bereits bearbeitet wurde.

## 8.2 Pendenzen

Um Evaluation der Softwarekomponenten abzuschliessen müssen folgende Pendenzen erledigt werden:

- Qt mit EGLFS ergänzen (Verwendung der GPU)
- System für die Verwendung von Newhaven Display konfigurieren
- Evaluation des DAC zusammen mit dem Apalis iMX6Q CoM
- Evaluation der Speisung

Um die Hardware abzuschliessen müssen folgende Pendenzen erledigt werden:

- Dokumentation Layout und Gehäuse
- Design Varianten im Altium Projekt erstellen, um die definitive Stückliste erstellen zu können
- Leiterplatte bestücken und testen
- Alle Teile in das Gehäuse montieren und verkabeln

## 8.3 Weiteres Vorgehen

Zu Beginn der Bachelor Thesis werden nebst dem Projektmanagement die bestehenden Pendenzen der Projektstudie abgearbeitet. Danach erfolgt die Ausarbeitung der Architektur und des Designs der Benutzer Applikation des Audio-Streamers. Zudem muss die Hardware messtechnisch und akustisch auf ihre Qualität geprüft werden.

## 8.4 Persönliche Reflexion

### Rafael Klossner

Bei der Auswahl des CoM war die eigentliche Herausforderung eine Basis zu schaffen auf der ein sinnvoller Vergleich möglich war. Insbesondere bei Produkten der Raspberry Pi Foundation war es schwierig an verlässliche Daten zu kommen. Eine allgemeine Spezifikation ist zwar erhältlich, allerdings sind Daten zu den einzelnen Hardwarekomponenten nur schwer zugänglich. Dies machte einen objektiven Vergleich schwierig. Daher war hilfreich einen Abgleich mit dem Konzept des HiFi-Audio-Streamers durchzuführen. Damit konnte gezeigt werden, dass der Apalis iMX6Q CoM besser ins Konzept passt.

Das Betriebssystem Linux ist sehr komplex. Dies hat sich bei der Evaluation der Systemkomponenten gezeigt. Die Flut an verfügbaren Informationen ist schier endlos. Das macht es schwierig sich zurecht zu finden. Deshalb ist es umso wichtiger auf die Vertrauenswürdigkeit und die Aktualität der Quellen zu achten. Die Wahl von Systemkomponenten kann nicht anhand von exakten Daten vorgenommen werden. Darum ist es wichtig stets die Anforderungen und das Konzept im Auge zu behalten. Das macht es einfacher die Vor- und Nachteile einzelner Komponenten gegeneinander abzuwägen. Bei der Evaluation der Linux-Komponenten bin ich auf mehr Wissenslücken als auf Wissen gestossen. Aus diesem Grund musste ich in einem iterativen Prozess immer wieder neues Wissen erarbeiten. Um die Übersicht zu behalten, war es zwingend notwendig sauber strukturierte Notizen zu erstellen. Dies hilft insbesondere Gedankengänge auch zu einem späteren Zeitpunkt noch nachzuvollziehen zu können. Als ein wertvolles Tool haben sich Shell-Skripte erwiesen. Damit ist es möglich Arbeitsabläufe zu automatisieren und damit wiederholbar zu machen. So kann bei einem Fehler die Ausgangslage einfacher wider erstellt werden, welche immer gleich bleibt. Denn es gibt nichts schlimmeres als wenn aus dem gleichen Arbeitsschritt jedes mal ein anderes Ergebnis resultiert, nur weil die Ausgangslage nicht die selbe war.

Trotz allen Schwierigkeiten bei der Evaluation, war der Lerneffekt sehr gross. Insbesondere das Erkennen von Zusammenhängen in einem solch komplexen Betriebssystem wie Linux war sehr befriedigend. Klar weist das Wissensnetz noch viele Lücken auf, allerdings bin ich zuversichtlich die grössten Lücken im Verlaufe der Thesis noch erschliessen zu können.

### Stefan Lüthi

Wer denkt, dass man einfach aufgrund der technische Werte eines DAC Chips auch einen guten DAC baut, liegt falsch. So ging es zumindest mir. Die technischen Angaben im Datenblatt geben nur begrenzt Auskunft über die finale Klangqualität. Dies liegt einerseits an den internen Prozessschritten, diese können nicht einfach in quantitative Werte umgewandelt werden. Andererseits

muss die aufwändige Beschaltung beachtet werden: Störungsfreie Speisungen, Operationsverstärker, Taktquellen, Abschirmung, Erdungspunkt, Ground-Flächen bis hin zu den Kondensatoren, die auch selektiert werden wollen. Ich bin nun der Meinung, dass die Wahl des DAC (aus der Auswahl in Tabelle 4.1) gar nicht so einen grossen Einfluss auf das Endergebnis hat, wie zu Beginn gedacht. Viel mehr sehe ich die Klangqualität als Zusammenarbeit des ganzen Systems, bei dem jede Komponente verpflichtet ist seine Aufgabe hervorragend zu lösen. Ob sich die verwendeten Komponenten bewähren, wird sich bei den Messungen und Klang Tests während der Bachelor-Arbeit zeigen.

Bei der Suche nach Komponenten bin ich immer wieder auf Audio-Foren gelandet. Bei diesen Diskussionen war es jeweils schwierig die Grenze zwischen hilfreichen Tipps und Humbug zu ziehen. Zudem bin ich als angehender Ingenieur etwas frustriert, wenn sich Qualität nicht anhand eines quantitativen Werts ausdrücken und vergleichen lässt. Ich möchte an dieser Stellen noch Herrn Aebischer der Firma Dynavox für die hilfreichen Hinweise zum Design des Analog Ausgangs danken.

Das Layout des Mainboards hat mir trotz des grossen Aufwands, aufgrund seiner Komplexität und der High-Speed Signale viel Spass bereitet. Mit einer Abmessung von 180 mm x 270 mm und über 600 Komponenten ist dies mein grösstes Layout Vorhaben.



# **Selbständigkeitserklärung**

Ich bestätige, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Sämtliche Textstellen, die nicht von mir stammen, sind als Zitate gekennzeichnet und mit dem genauen Hinweis auf ihre Herkunft versehen.

Burgdorf, 26.06.2019

Burgdorf, 26.06.2019

Rafael Klossner

Stefan Lüthi



# Literaturverzeichnis

- [1] The Master Switch, *BEST DACS OF 2019*, 20. Feb. 2019. Adresse: <https://www.themasterswitch.com/best-dacs> (besucht am 21.02.2019).
- [2] Analog Devices, *Oversampling Interpolating DACs*, Application Note MT-017, Rev. A, Aug. 2010.
- [3] Schiit, *Bifrost*. Adresse: <https://www.schiit.com/products/bifrost> (besucht am 21.02.2019).
- [4] Würth Elektronik, *Why Use Aluminum Polymer Capacitors?* Adresse: [https://www.we-online.com/web/en/passive\\_components\\_custom\\_magnetics/blog\\_pbcm/blog\\_detail\\_electronics\\_in\\_action\\_105536.php](https://www.we-online.com/web/en/passive_components_custom_magnetics/blog_pbcm/blog_detail_electronics_in_action_105536.php) (besucht am 03.04.2019).
- [5] Texas Instruments, *24-Bit, 192-kHz Sampling, Advanced Segment, Adio Stereo Digital-to-Analog Converter*, PCM1792 Datenblatt, Nov. 2006.
- [6] ——, *PCM5242 4.2-VRMS DirectPath™, 114-dB Audio Stereo Differential-Output DAC with 32-bit, 384-kHz PCM Interface*, PCM5242 Datenblatt, Rev. A, Okt. 2014.
- [7] ——, *PCM1795 32-Bit, 192-kHz Sampling, Advanced Segment, Stereo Audio Digital-to-Analog Converter*, PCM1795 Datenblatt, Rev. A, März 2015.
- [8] Cirrus Logic, *24-bit 192kHz DAC with Advanced Digital Filtering*, WM8741 Datenblatt, Rev. 4.3, Feb. 2013.
- [9] ——, *120-dB, 192-kHz Multibit DAC with Volume Control*, CS4398 Datenblatt, Rev. F2, März 2015.
- [10] Asahi Kasei Microdevices, *Quality Oriented 32-Bit 2ch DAC*, AK4497 Datenblatt, Rev. 00, Mai 2016.
- [11] ——, *Quality Oriented 32-Bit 2ch DAC*, AK4493 Datenblatt, Rev. 00, Dez. 2017.
- [12] Analog Devices, *High Performance Multibit Sigma-DAC with SACD Playback*, AD1955 Datenblatt, Rev. 0.
- [13] Texas Instruments, *OPA161x SoundPlus™ High-Performance, Bipolar-Input Audio Operational Amplifiers*, OPA161x Datenblatt, Rev. C, Aug. 2014.
- [14] Analog Devices, *Ultralow Distortion, Ultralow Noise Op Amp*, AD797 Datenblatt, Rev. K, März 2015.
- [15] Linear Technology, *Ultralow Noise, Low Distortion, Audio Op Amp*, LT1115 Datenblatt, Rev. A.
- [16] B. Biesenbach, *dabpi\_ctl - RPi fm/fmhd/dab receiver control interface*, [https://github.com/elmo2k3/dabpi\\_ctl](https://github.com/elmo2k3/dabpi_ctl), Commit 60b07f3, 2015.
- [17] Toradex, *Apalis iMX6 Datasheet*, Apalis iMX6 Datasheet, Rev. 1.4.
- [18] ——, *Apalis iMX6 Datasheet*, Apalis iMX6 Datasheet, Rev. 1.4.
- [19] ——, *Colibri iMX6 Datasheet*, Colibri iMX6 Datasheet, Rev. 1.8.
- [20] Raspberry Pi Foundation, *Raspberry Pi 3 Model B+*, Raspberry Pi 3 Model B+ Product Brief, Jan. 2019.
- [21] ——, *Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3)*, Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3) Datasheet, Rev. 1.0.
- [22] ——, *Raspberry Pi Compute Module 3+*, Raspberry Pi Compute Module 3+ Datasheet, Release 1.
- [23] Newhaven Display International, *NHD-5.0-800480MB-ATXL-CTP*. Adresse: <https://www.newhavendisplay.com/nhd50800480mbatxlctp-p-9611.html> (besucht am 23.03.2019).
- [24] ——, *NHD-5.0-HDMI-N-RTXL-CTU*. Adresse: <https://www.newhavendisplay.com/nhd50hdmirtxlctu-p-9550.html> (besucht am 23.03.2019).

- [25] Toradex, *Generic RGB Display Adapter Board*, 24. Nov. 2017. Adresse: <https://developer.toradex.com/knowledge-base/generic-rgb-display-adapter-board> (besucht am 21.02.2019).
- [26] ——, *Getting Started Guide*, <https://developer.toradex.com/getting-started?som=apalis-imx6&board=ixora-carrier-board>. (besucht am 01.03.2019).
- [27] ——, *Build U-Boot and Linux Kernel from Source Code*, <https://developer.toradex.com/knowledge-base/build-u-boot-and-linux-kernel-from-source-code>, Revision 117, 2019. (besucht am 21.02.2019).
- [28] GCC-Team, *GCC, the GNU Compiler Collection*, <http://gcc.gnu.org/>, 17. Apr. 2019.
- [29] F. S. Foundation, *GNU General Public License 3*, <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.de.html>, 3. Dez. 2016.
- [30] Toradex, *Yocto Project*, <https://developer.toradex.com/knowledge-base/yocto-project>, Revision 8, 8. Okt. 2018. (besucht am 01.03.2019).
- [31] ——, *OpenEmbedded (core)*, [https://developer.toradex.com/knowledge-base/board-support-package/openembedded-\(core\)](https://developer.toradex.com/knowledge-base/board-support-package/openembedded-(core)), Revision 107, 4. Feb. 2019. (besucht am 01.03.2019).
- [32] Linaro, *Linaro*, <https://www.linaro.org/>, 2019. (besucht am 21.02.2019).
- [33] ——, *The Linaro Binary Toolchain*, <https://releases.linaro.org/components/toolchain/binaries/6.2-2016.11/>, arch-arm-gnueabihf, 2016. (besucht am 21.02.2019).
- [34] Toradex, *Toradex Easy Installer*, <https://developer.toradex.com/software/toradex-easy-installer>. (besucht am 01.03.2019).
- [35] ——, *Flashing Embedded Linux to iMX6 Modules*, <https://developer.toradex.com/knowledge-base/flashing-linux-on-imx6-modules>, Revision 32, 17. Sep. 2018. (besucht am 01.03.2019).
- [36] M. Aebersold, *AOM1 - BTE5446 - Embedded Linux - 18/19*, 2019.
- [37] ——, *AOM1 - BTE5446 - Embedded Linux - 18/19*, 2019.
- [38] Toradex, *i.MX 6 Based Modules (Apalis/Colibri iMX6)*, <https://developer.toradex.com/knowledge-base/build-u-boot-and-linux-kernel-from-source-code>, Revision 117, 2019. (besucht am 01.03.2019).
- [39] elinux, *Device Tree Reference*, [https://elinux.org/Device\\_Tree\\_Reference](https://elinux.org/Device_Tree_Reference), 9. Apr. 2019.
- [40] Toradex, *apalis-colibri-imx-linux-device-tree-structure*. Adresse: <https://developer.toradex.com/device-tree-customization> (besucht am 29.04.2019).
- [41] ——, *Device Tree Customization*, <https://developer.toradex.com/device-tree-customization>, Revision 29, 28. Feb. 2019.
- [42] Focaltech, *Qemu*, <https://www.qemu.org/>. (besucht am 28.03.2019).
- [43] QT, *All Modules*, <https://doc.qt.io/qt-5/embedded-linux.html>. (besucht am 15.03.2019).
- [44] ——, *Qt for Embedded Linux*, <https://doc.qt.io/qt-5/qtmodules.html>. (besucht am 15.03.2019).
- [45] ——, *Licensing*, <https://www.qt.io/licensing/>, 20. Feb. 2019. (besucht am 15.03.2019).
- [46] ——, *RaspberryPi2EGLFS*, <https://wiki.qt.io/RaspberryPi2EGLFS>, 15. Dez. 2018. (besucht am 15.03.2019).
- [47] Focaltech, *FT5X26-Focaltech-Drivers*, <https://github.com/NewhavenDisplay/FT5X26-Focaltech-Drivers>.
- [48] librespot-org, *librespot*, <https://github.com/librespot-org/librespot>. (besucht am 15.03.2019).
- [49] D. Cooper, *raspotify*, <https://github.com/dtcooper/raspotify>.
- [50] T. tools team (rust), *cross*, <https://github.com/rust-embedded/cross>. (besucht am 15.03.2019).
- [51] Asahi Kasei Microdevices, *AK4497 Evaluation Board*, AKD4497 Manual, Rev. 0, Jan. 2015.
- [52] ——, *AK4493 Evaluation Board*, AKD4493 Manual, Rev. 1, Juli 2017.
- [53] Texas Instruments, *A Differential Op-Amp Circuit Collection*, Application Note SLOA064, Apr. 2003.
- [54] Wkimedia Commons, *Sallen-Key Lowpass General*, 25. Jan. 2009. Adresse: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Sallen-Key\\_Lowpass\\_General.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Sallen-Key_Lowpass_General.svg) (besucht am 20.04.2019).

- [55] Linear Technology, *20V, 500mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR Linear Regulator*, LT3045 Datenblatt, Rev. A, Okt. 2017.
- [56] Panasonic, *Conductive Polymer Aluminum Solid Capacitors*, SEPF Datenblatt, 1. Nov. 2015.
- [57] STMicroelectronics, *1.5 A adjustable and fixed low drop positive voltage regulator*, LD1086 Datenblatt, Rev. 36, 19. Dez. 2017.
- [58] Silicon Labs, *Low Power Six-Channel Digital Isolator*, Si866x Datenblatt, Rev. 1.72, Okt. 2018.
- [59] Linear Technology, *i.MX 6 Audio Clock Configuration Options*, Application Note AN4952, Rev. 0, Juni 2014.
- [60] Crystek Crystals, *Clock Oscillator C33xx Model*, C33xx Datenblatt, Rev. P, Feb. 2016.
- [61] Toradex, *Ixora Carrier Board*. Adresse: <https://developer.toradex.com/products/ixora-carrier-board> (besucht am 20. 04. 2019).
- [62] Multi Leiterplatten GmbH, *Defined layer buildup*. Adresse: [https://www.multi-circuit-boards.eu/fileadmin/pdf/leiterplatten\\_lagenaufbau/Multi-CB\\_Defined\\_layer\\_buildup.pdf](https://www.multi-circuit-boards.eu/fileadmin/pdf/leiterplatten_lagenaufbau/Multi-CB_Defined_layer_buildup.pdf) (besucht am 21. 04. 2019).
- [63] Toradex, *Layout Design Guide*, Rev. 1.0, 14. Apr. 2015.
- [64] OKAWA Electric Design, *Sallen-Key Low-pass Filter Design Tool*. Adresse: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm> (besucht am 21. 02. 2019).
- [65] librespot-org, *Cross compiling*, <https://github.com/librespot-org/librespot/wiki/Cross-compiling>. (besucht am 15. 03. 2019).



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Leiterplatte des Schiit Bifrost DAC (\$399.-) [3] .....	5
3.1	Entwurf der Vorderseite des Audio-Streamers .....	8
3.2	Blockschaltbild des Audio-Streamers; blau: Schnittstellen des Audio-Streamers, grün: interne Schnittstellen .....	9
4.1	Newhaven NHD-5.0 Display mit kapazitiv Touchpanel .....	16
5.1	Bootvorgang eines Linux Systems [37] .....	21
5.2	Device-Tree Struktur des Ixora Carrier Board [40] .....	24
6.1	Schaltungsübersicht Audio-Streamer Mainboard.....	31
6.2	DAC Schaltung mit externen Filter.....	32
6.3	Sallen-Key Tiefpass Filter [54] .....	34
6.4	Differentieller Tiefpass Filter [53]; Vout- wird zur Umwandlung in ein Single Ended Signal auf GND angeschlossen .....	35
6.5	Filter Simulation Transiente .....	36
6.6	Filter Simulation Bode Diagramm bis 100 MHz; rot: pos_sk, grün: out .....	36
6.7	Filter Simulation Bode Diagramm im hörbaren Bereich; rot: pos_sk, grün: out .....	37
6.8	Filter Simulation Rauschabstand (SNR); rot: pos_sk, grün: out .....	37
6.9	Stützkondensatoren am Eingang .....	38
6.10	Power Supply Reject Ratio (PSRR) des LT3045 [55].....	38
6.11	Linearregler für die Spannungsversorgung der Operationsverstärker .....	39
6.12	Linearregler für die digitale Spannungsversorgung des DAC .....	40
6.13	Überwachung der Netzspannung.....	41
6.14	Schaltung Digitale Isolation.....	42
6.15	Schaltung Power Supply Unit (PSU) .....	47
6.16	Drehgeber mit Hintergrundbeleuchtung .....	49
7.1	Render Ansicht des Mainboards .....	53
7.2	Render Ansicht der Power Supply Unit .....	54
7.3	Render Ansicht des Rotary Encoder Moduls .....	54
7.4	Render Ansicht des geschlossenen Gehäuse von der Frontseite aus Autodesk Fusion 360 .....	55
7.5	Render Ansicht des Inneren des Audio-Streamer mit allen Leiterplatten aus Altium Designer .....	55



# Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich von DACs in kommerziellen Produkten [1] .....	3
4.1	Vergleich bei Mouser und Digikey erhältlicher DAC ICs .....	12
4.2	Vergleich bei Mouser und Digikey erhältlicher Operationsverstärker .....	12
4.3	Vergleich von potentiellen CoM .....	14
6.1	Kenndaten Analog Speisung .....	40
6.2	Sample Raten und MCLK Frequenzen gemäss [11, S. 41].....	44
7.1	Multi-CB Standard Defined 4 Layer Stack [62] .....	51
7.2	Angaben zu High Speed Signal Leitungen aus [63], Toleranz der Impedanzen: $\pm 15\%$ .	52
7.3	Leiterbahnbreiten und -abstände der High Speed Leitungen, die Bezeichnung setzt sich aus der signled ended und diffiereziellen Impedanz zusammen .....	52



# Versionenverzeichnis

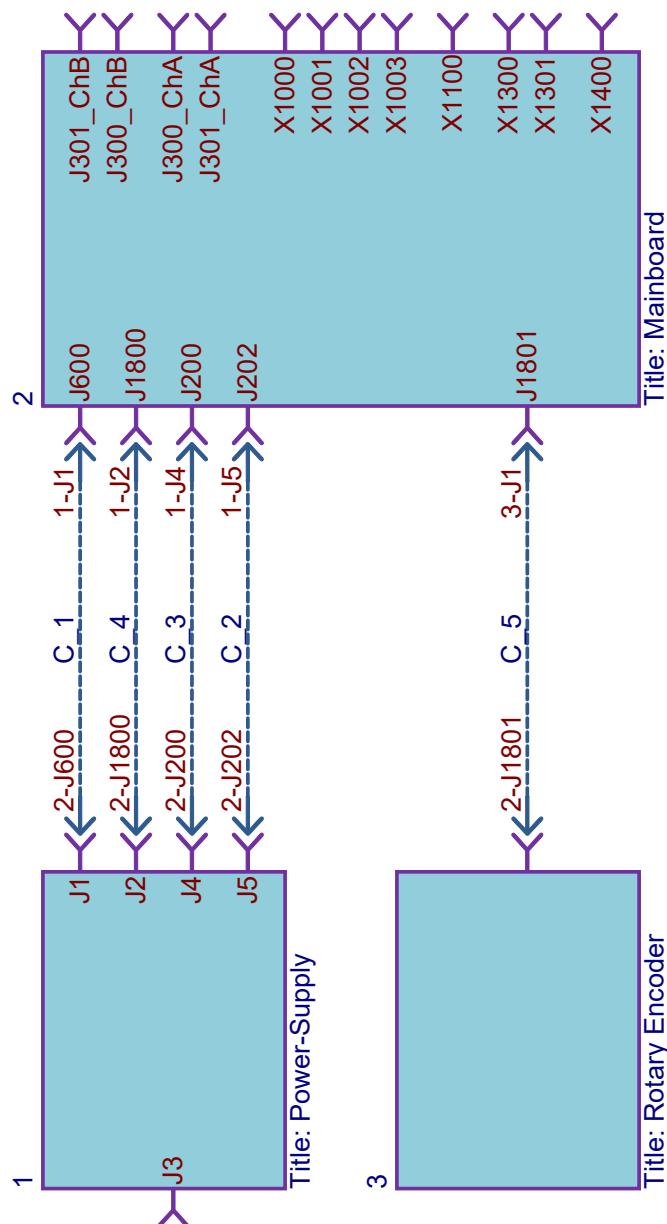
Version	Datum	Status	Bemerkungen
1.0	03.05.2019	Freigegeben	Erste komplette Version
1.1	26.06.2019	Freigegeben	Änderung Titel, HiFi → High-End



## **Anhang A**

# **Schema Multiboard Assembly**



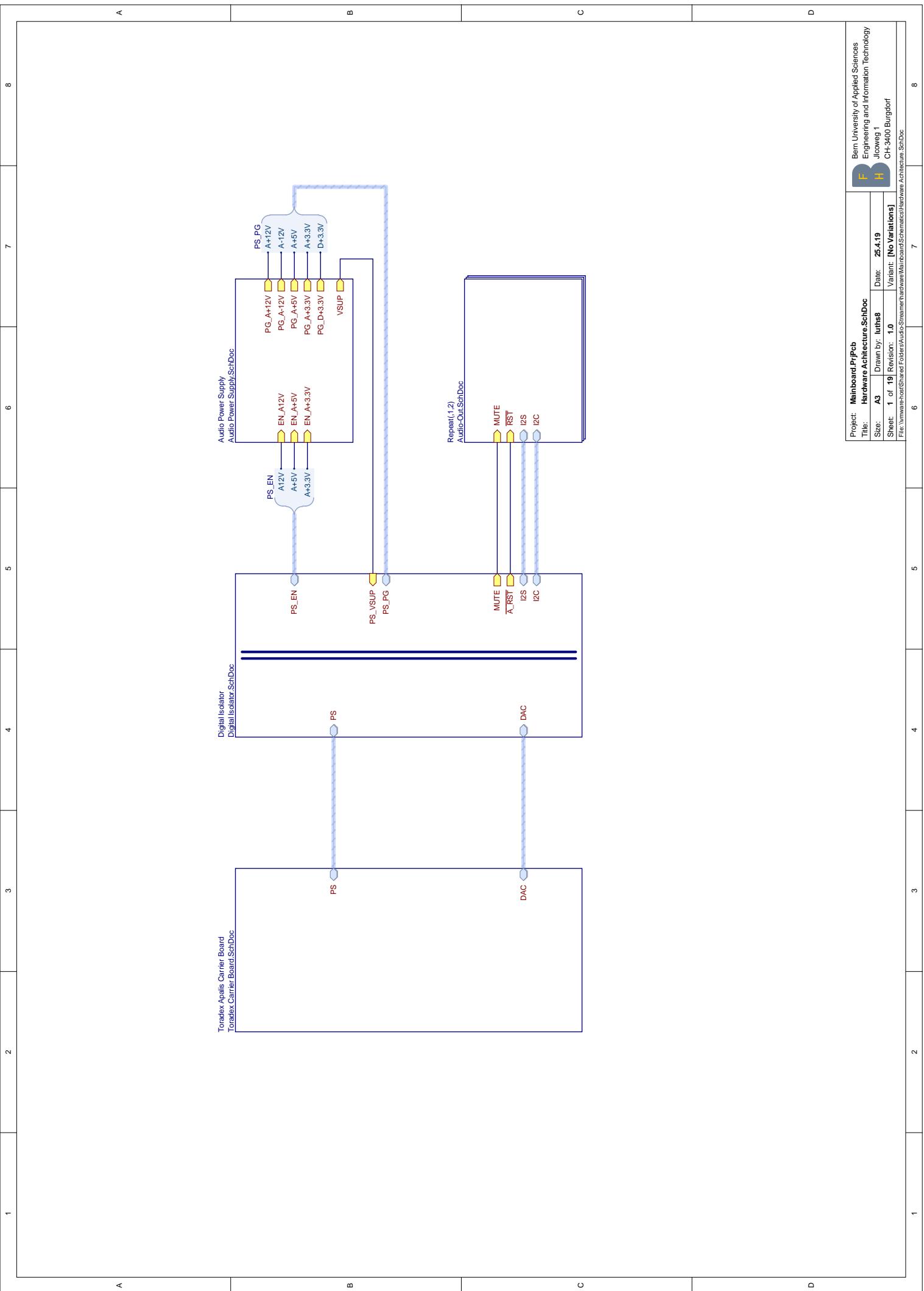


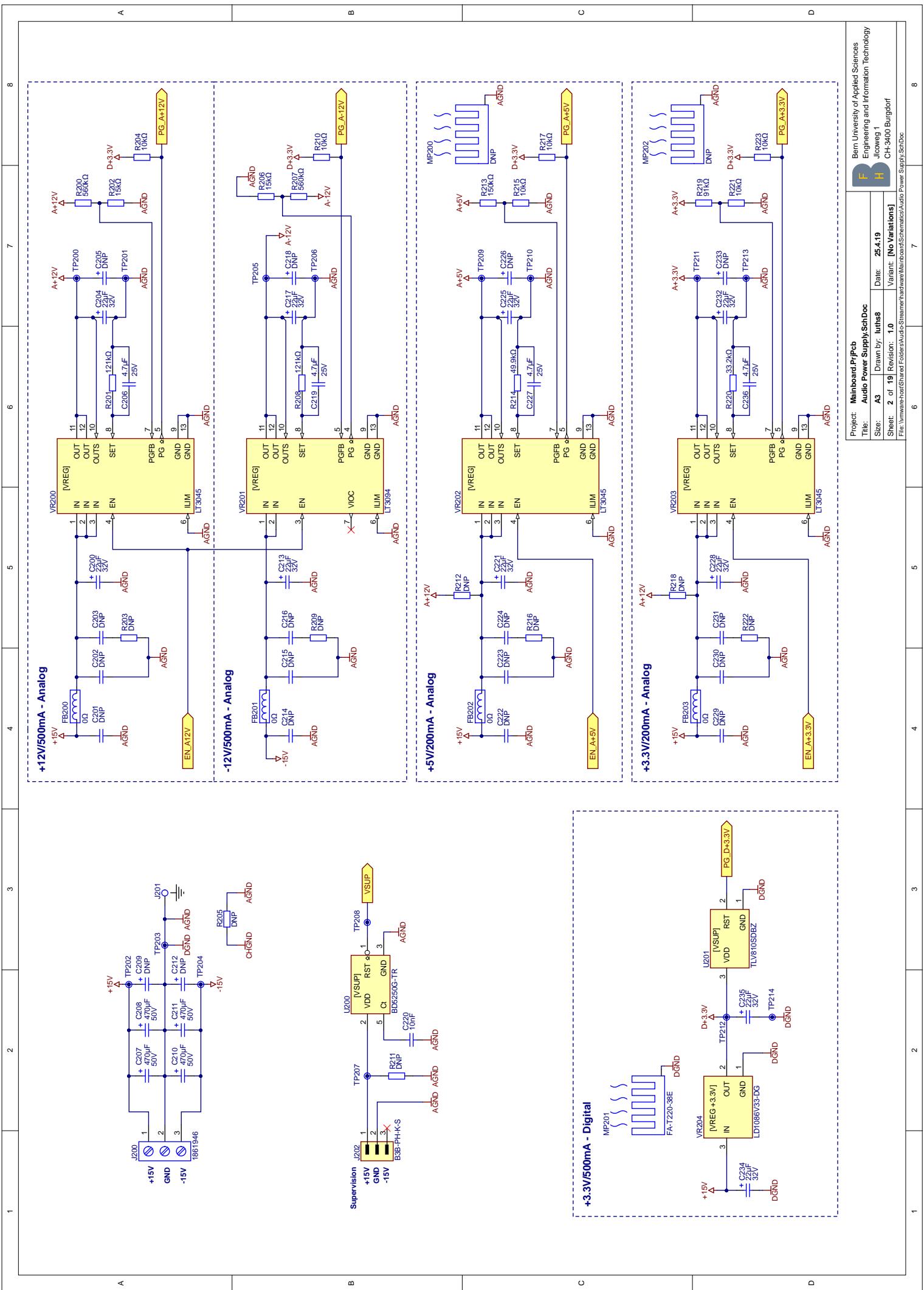


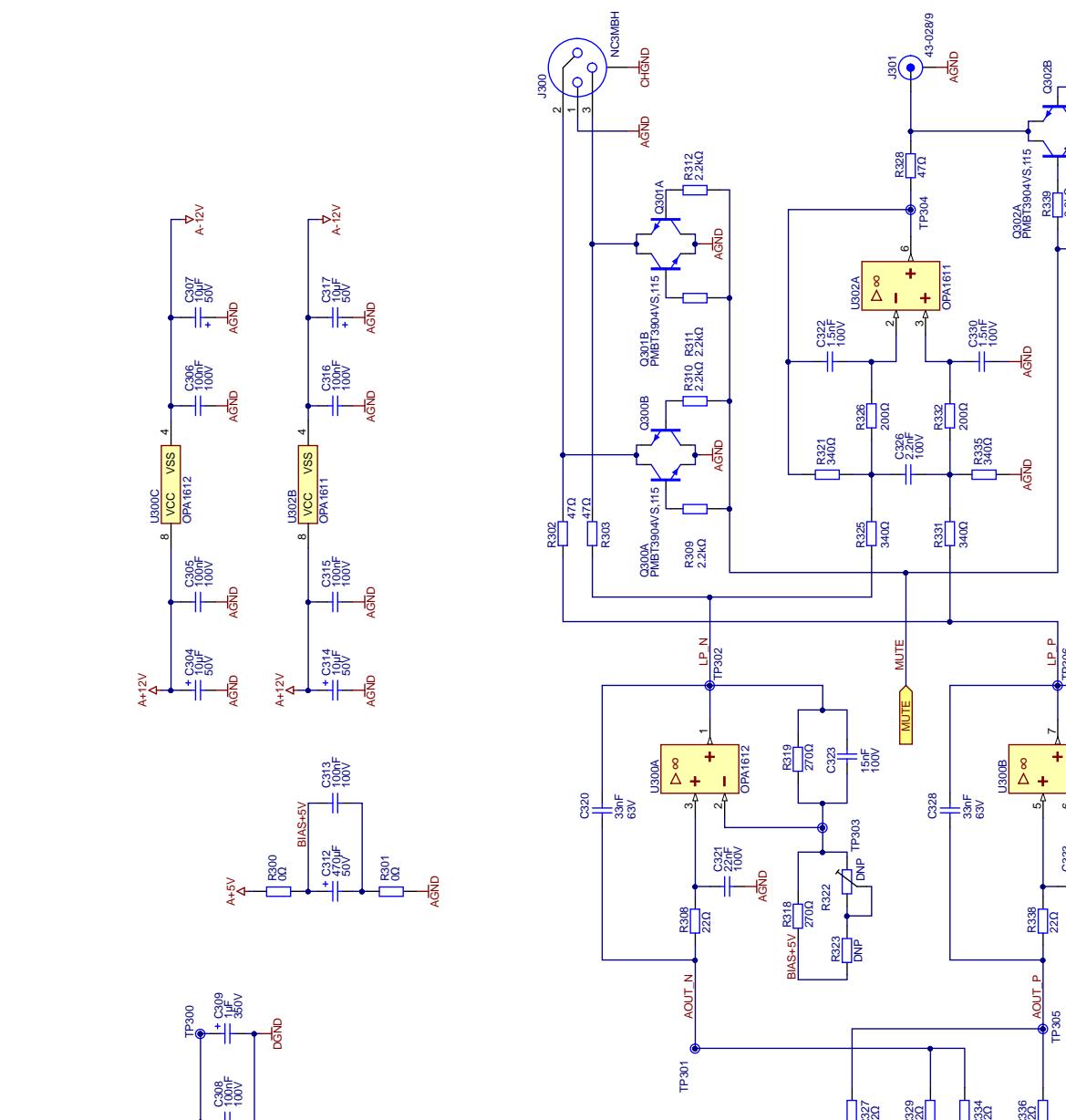
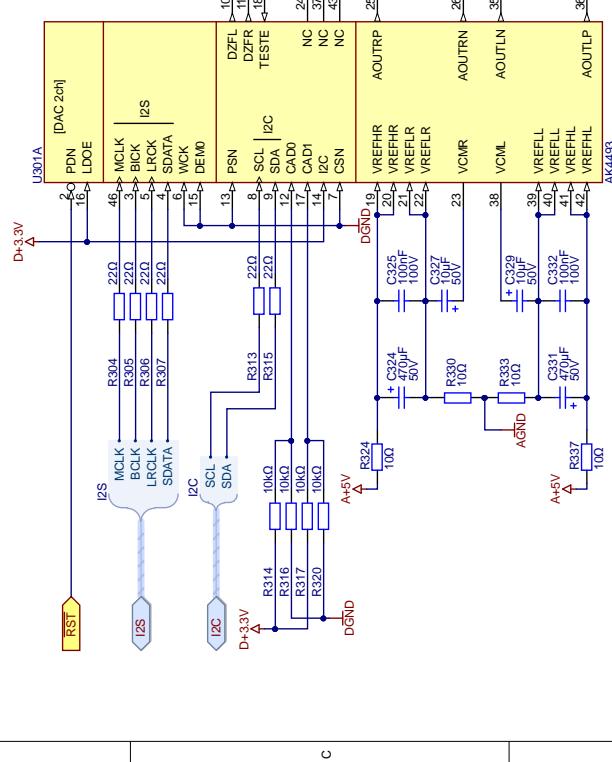
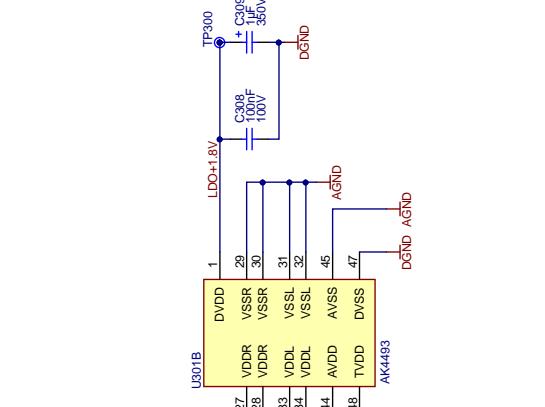
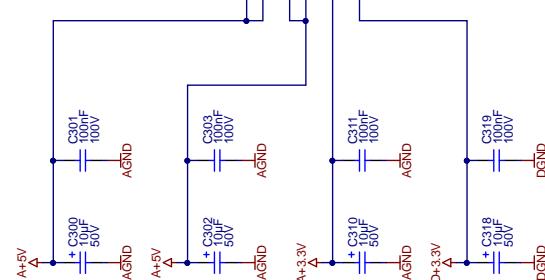
## **Anhang B**

### **Schema Mainboard**



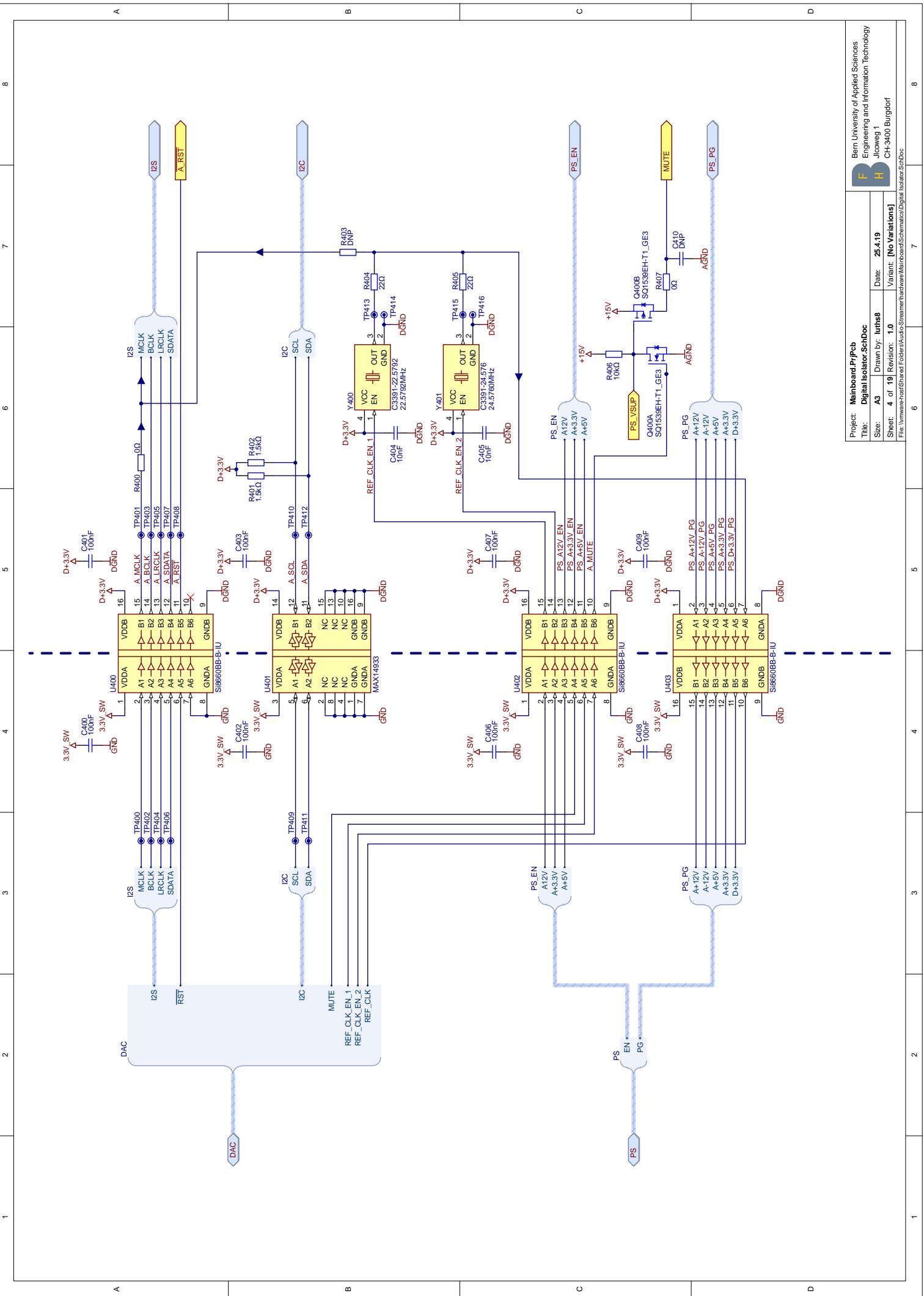


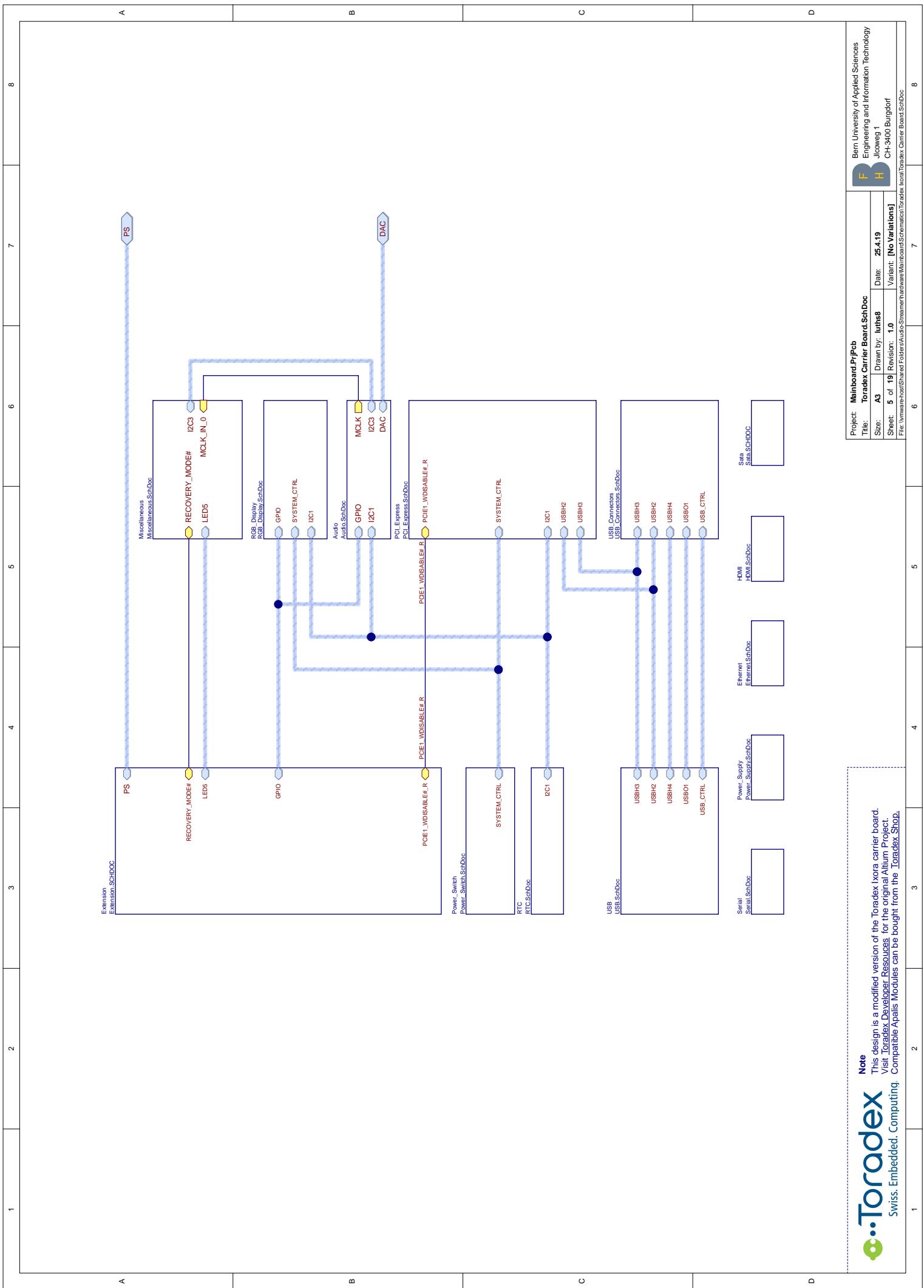


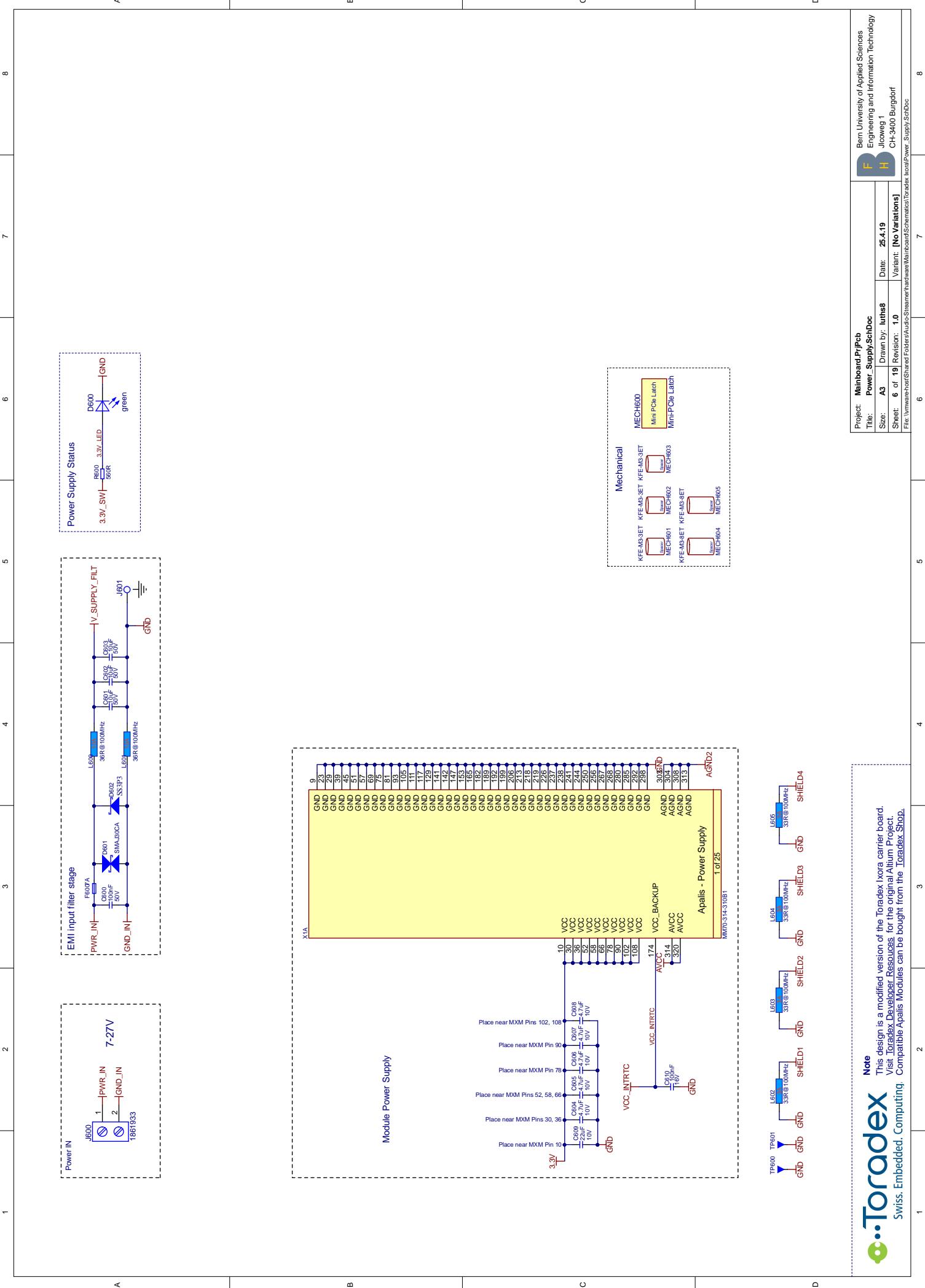


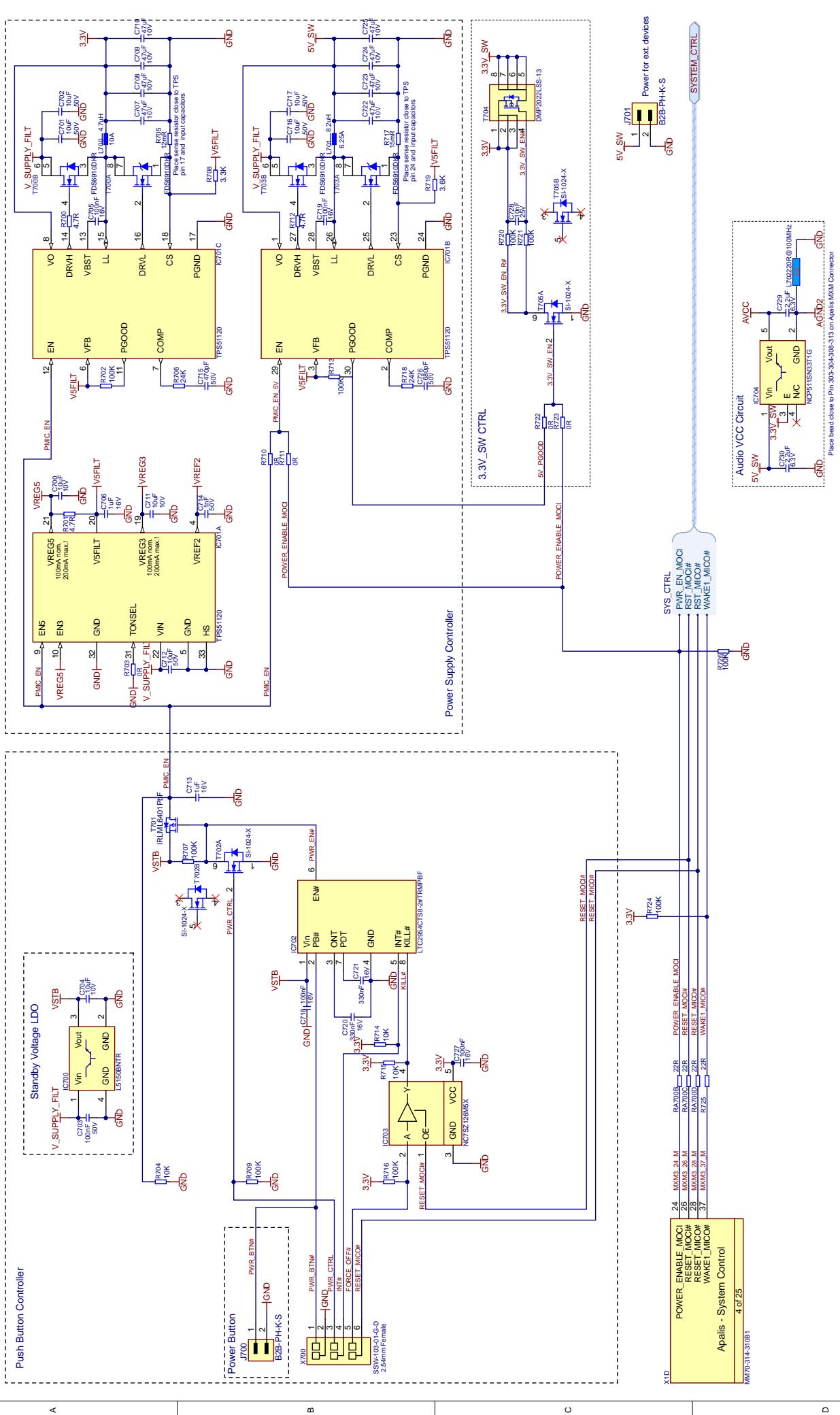
Project: Mainboard\_PiPcb  
Title: Mainboard\_PiPcb  
Size: A3  
Sheet: 3 of 19  
Variant: No Variations  
File: \wwwroot\shahriar\Feldner\Audio-Streamers\Mainboard\_Schematics\Mainboard\_SchDoc

Bern University of Applied Sciences  
Engineering and Information Technology  
Jicoveg 1  
CH-3400 Burgdorf





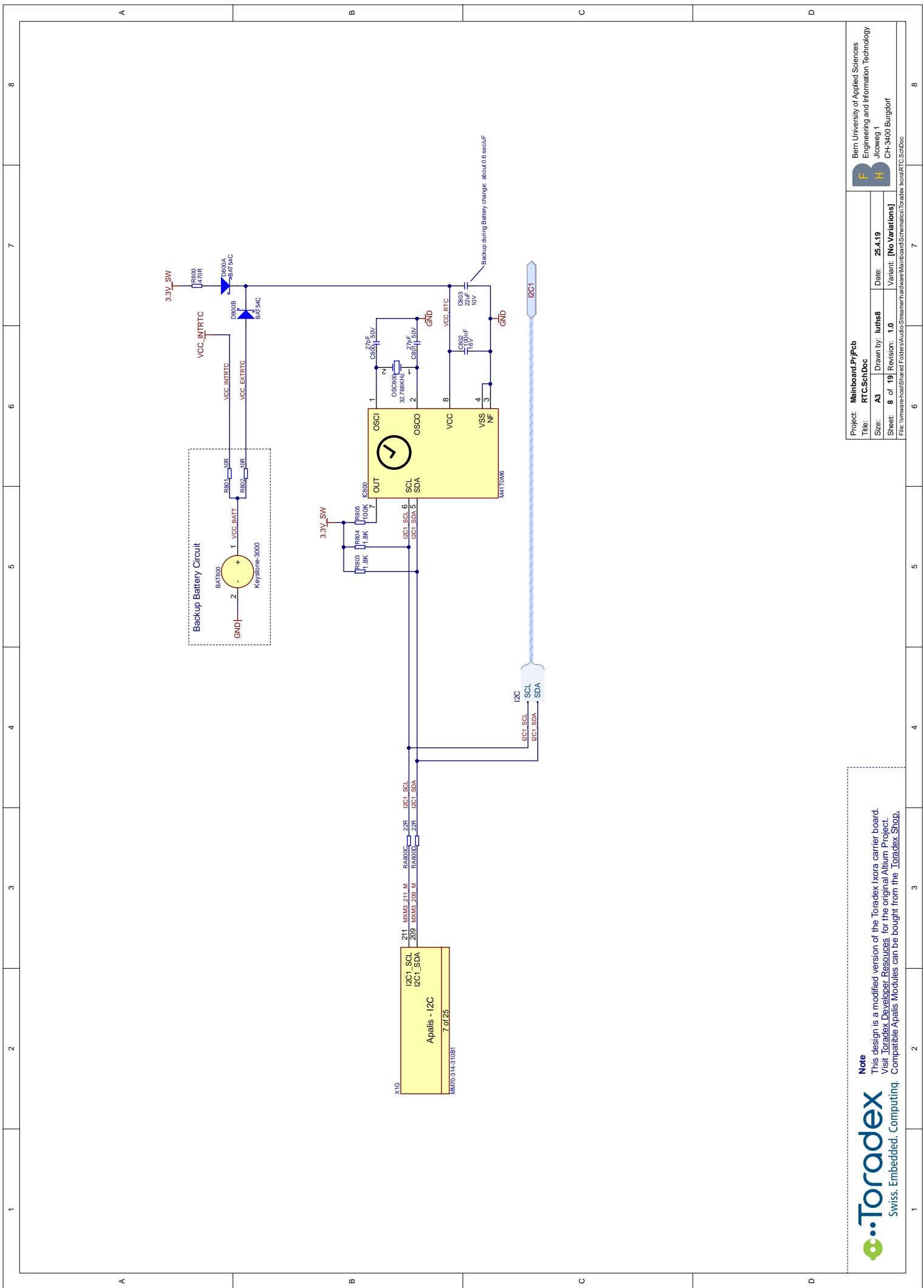




**Toradex**  
Swiss Embedded Computing

This design is a modified version of the Toradex Ixora carrier board.  
Visit [Toradex Developer Resources](#) for the original Altium Project.  
Compatible Apalis Modules can be bought from the [Toradex Shop](#).

Project:	Mainboard_P19_Pcb	Bern University of Applied Sciences
Title:	Power_Switch.SchDoc	Engineering and Information Technology
Size:	A3	Jcoveg 1
Variant:	No Variations	CH-340 Burgdorf
Date:	25.4.19	File: \wwwroot\shahid\felder\hardware\mainboard\schematic\Toradex\konf\Power_Switch.SchDoc



Project: MainboardPrjPcb  
 Title: RTCSchDoc  
 Drawn by: luthis8  
 Date: 25.4.19  
 Sheet: 8 of 19 Revision: 1.0 Variant: [No Variations]  
 File: \www\rechner\Shared Folders\Autodesk\AutoCAD\Standards\MarbandsSchematische\Toradex\Komfort\RTC\SchDoc

Page 8

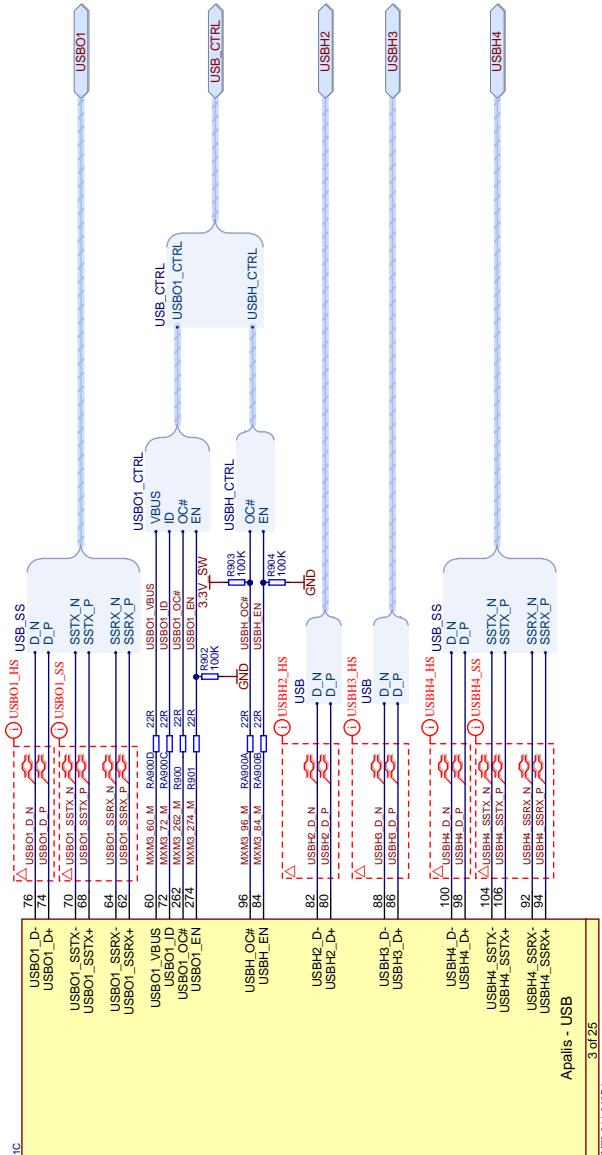
Bern University of Applied Sciences  
 Engineering and Information Technology  
**Jicoveg 1**  
**H**  
**CH-3400 Burgdorf**  
**F**  
**toradex**  
**Swiss Embedded Computing**  
**Note**  
 This design is a modified version of the Toradex Ixora carrier board.  
 Visit [Toradex Developer Resources](#) for the original Altium Project.  
 Compatible Apalis Modules can be bought from the [Toradex Shop](#).

Page 7

Page 8

1		2		3		4		5		6		7		8
---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---

A

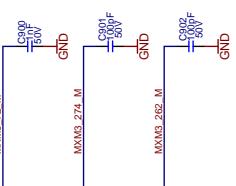


C

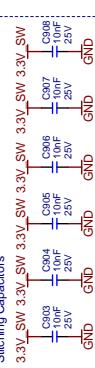
D

C

## Stitching Capacitors



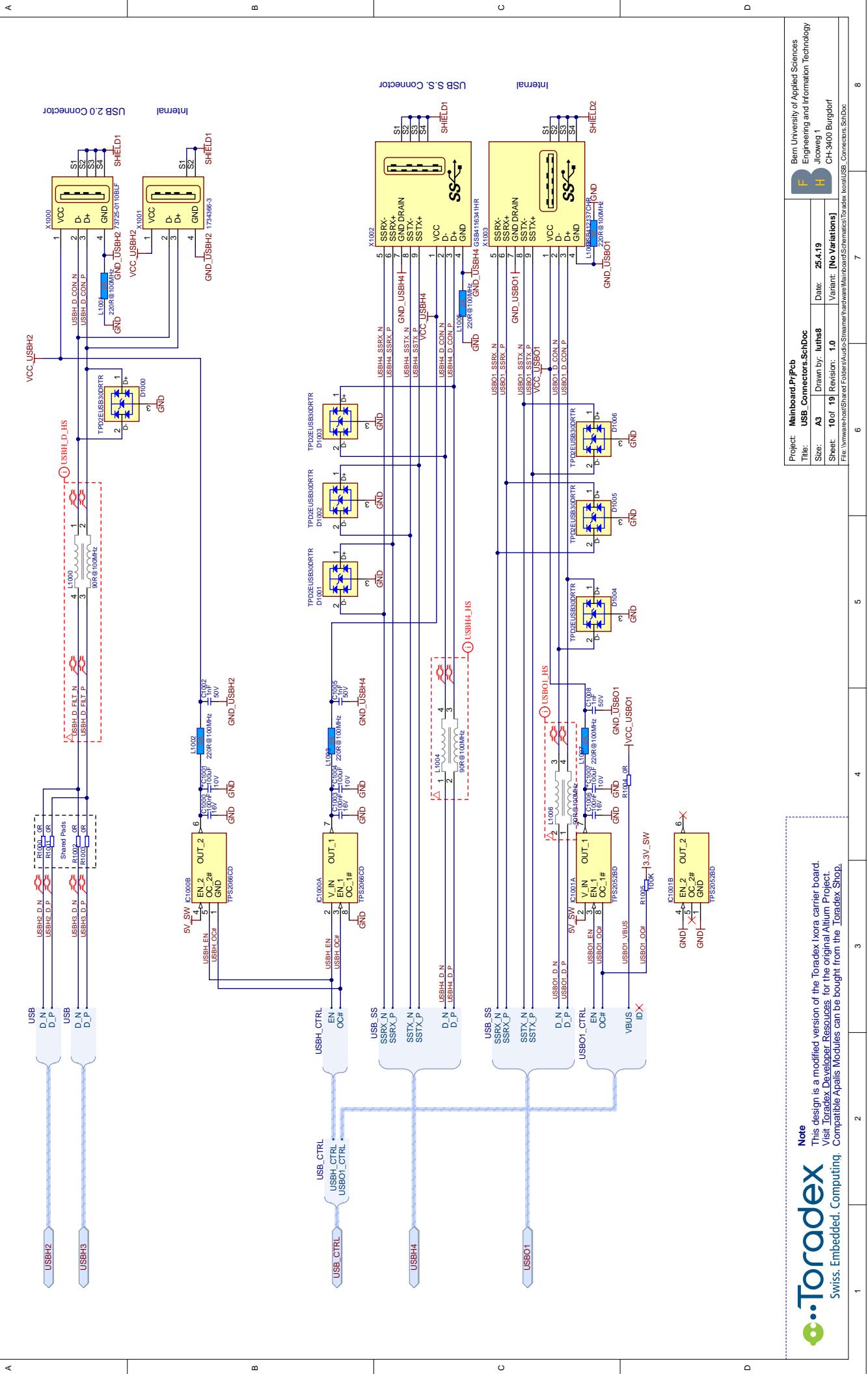
Place Close to the Module Connector.  
Stitching Capacitors  
3.3V\_SW 3.3V\_SW 3.3V\_SW 3.3V\_SW 3.3V\_SW 3.3V\_SW



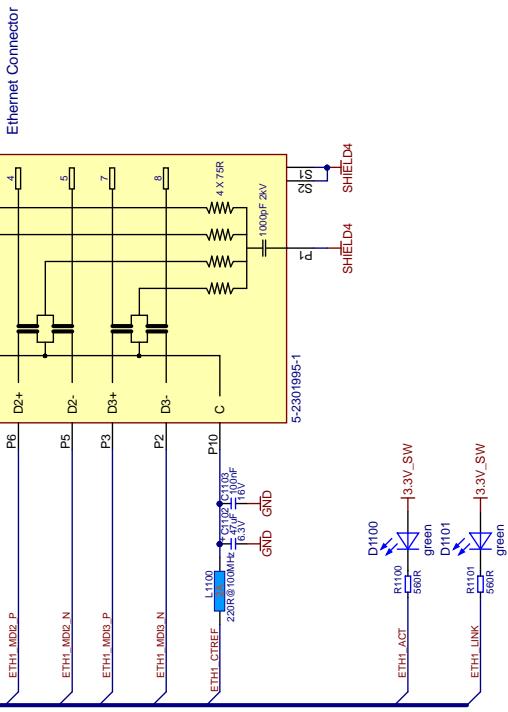
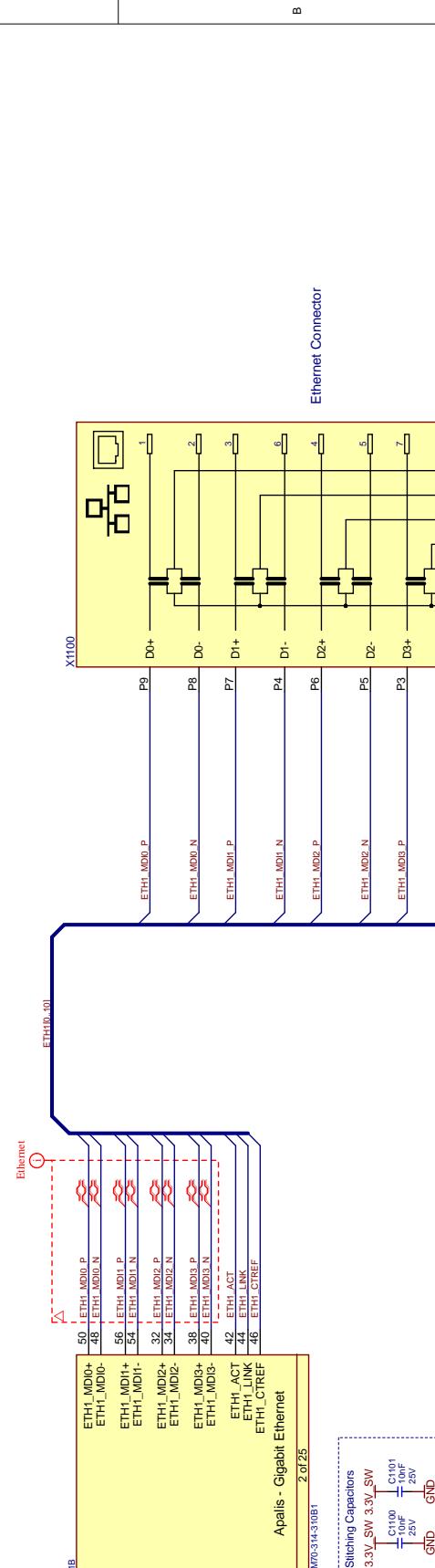
**•Toradex**  
Swiss Embedded Computing  
This design is a modified version of the Toradex Ixora carrier board.  
Visit [Toradex Developer Resources](#) for the original Altium Project.  
Compatible Apalis Modules can be bought from the [Toradex Shop](#).

Project:	MainboardP1[PCB]
Title:	USB_SchDoc
Engineering and Information Technology	
JCooveg 1	
CH-3400 Burgdorf	
Sheet: 9 of 19	Revision: 1.0
Variant: [No Variations]	
File: \wwwroot\eshop\Shared\Fields\My\Stream\Hardware\MainboardSchematic\Toradex_Konfig\SSB_SchDoc	

Page 8



Ethernet

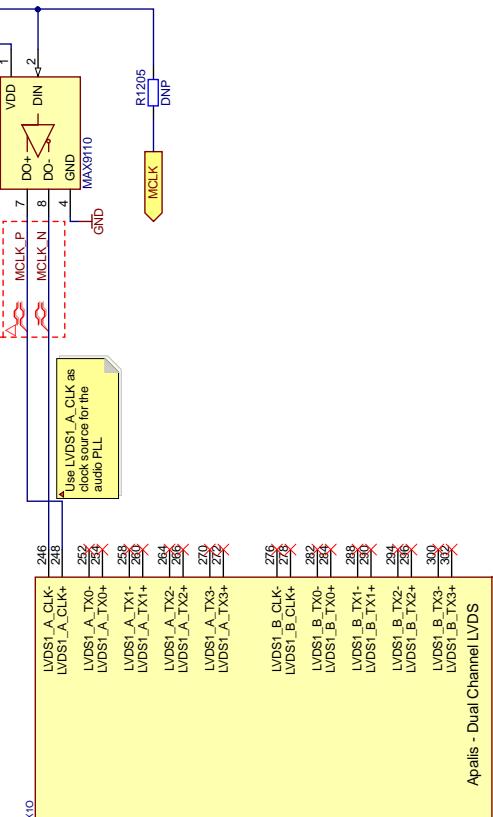
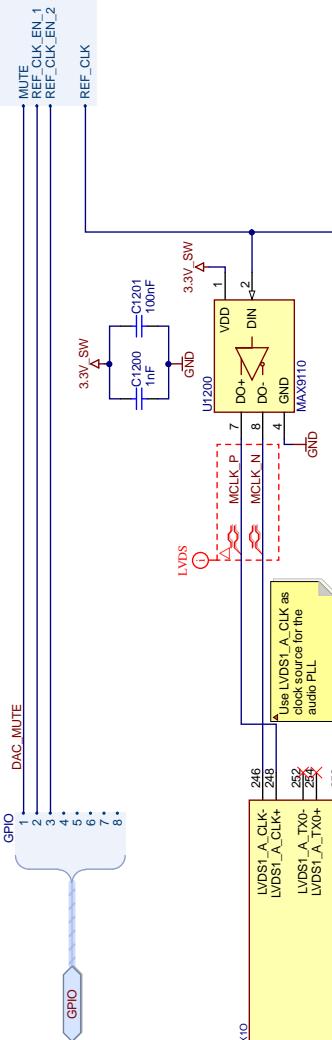
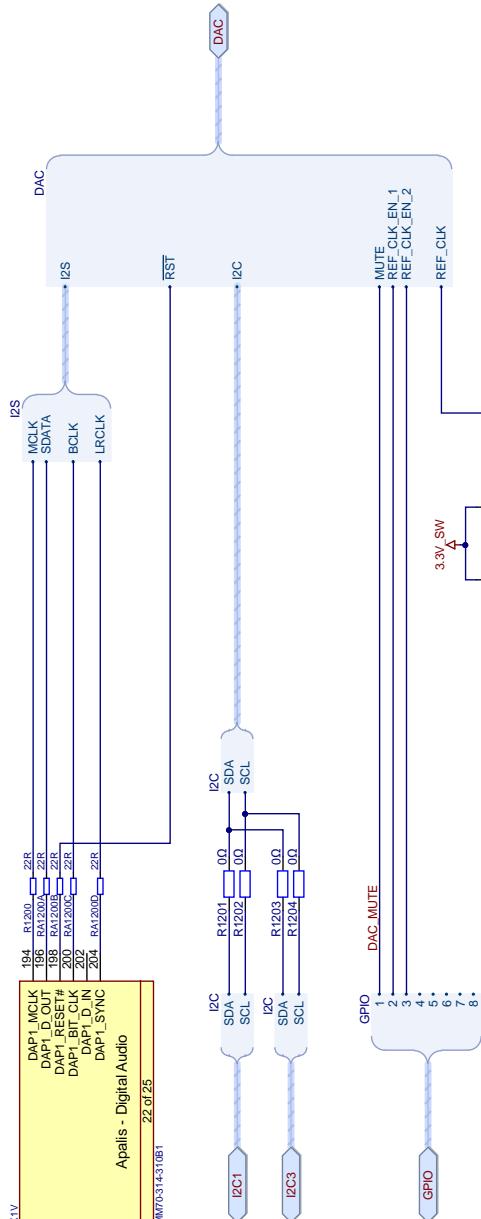


**Toradex**  
Swiss. Embedded. Computing.

This design is a modified version of the Toradex Ixora carrier board.  
Visit [Toradex Developer Resources](#) for the original Altim Project.  
Compatible Apalis Modules can be bought from the [Toradex Shop](#).

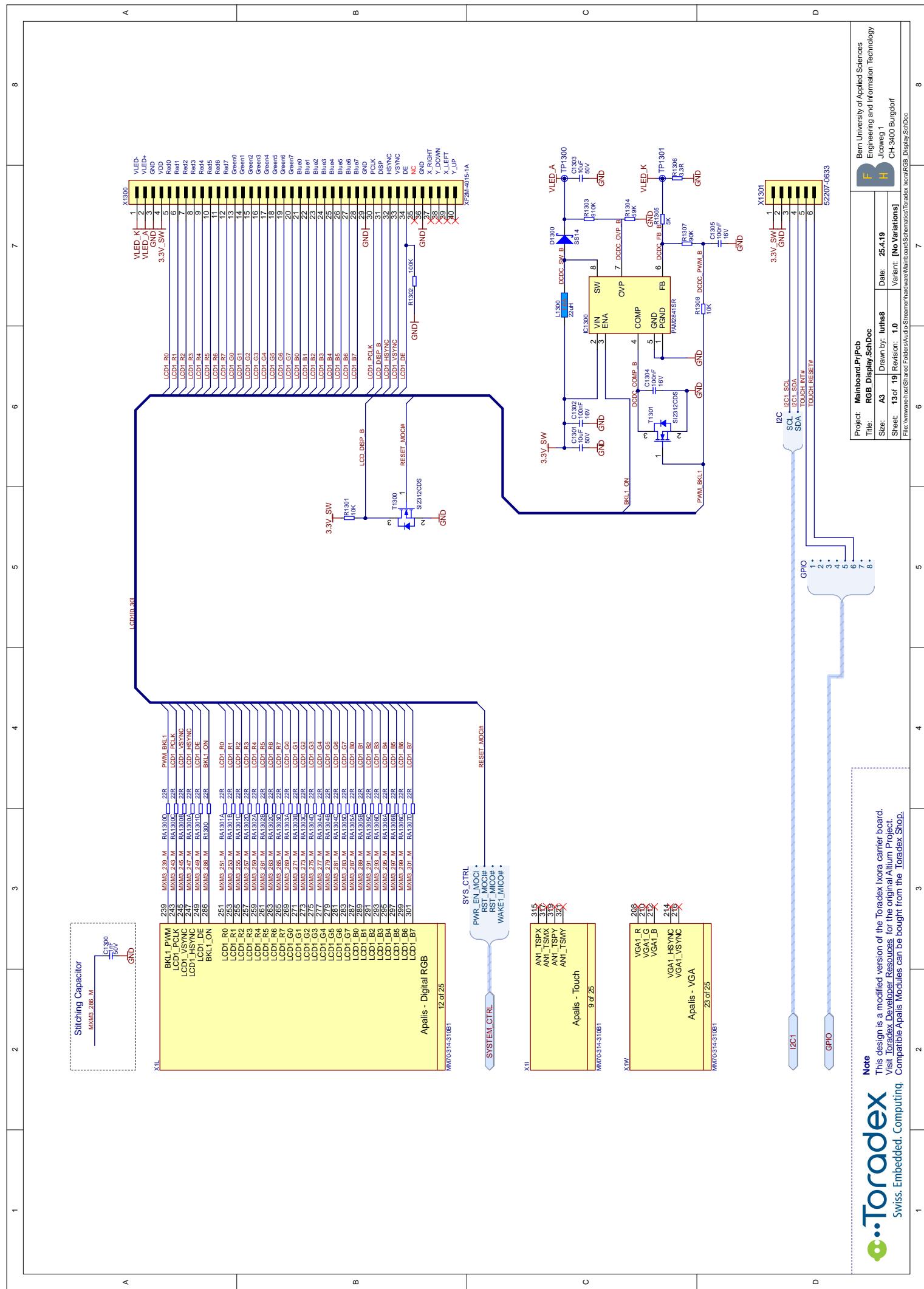
Project:	Mainboard_PiPcb
Title:	Ethernet-SchDoc
Engineering and Information Technology	
H	Jcoveg 1
Date:	25.4.19
Variant:	No Variations
Sheet:	11 of 19
Revision:	1.0
File:	\wwwroot\shahen\felder\Hardware\Network\ApalisSchematics\Toradex\konf\Mainboard_SchDoc

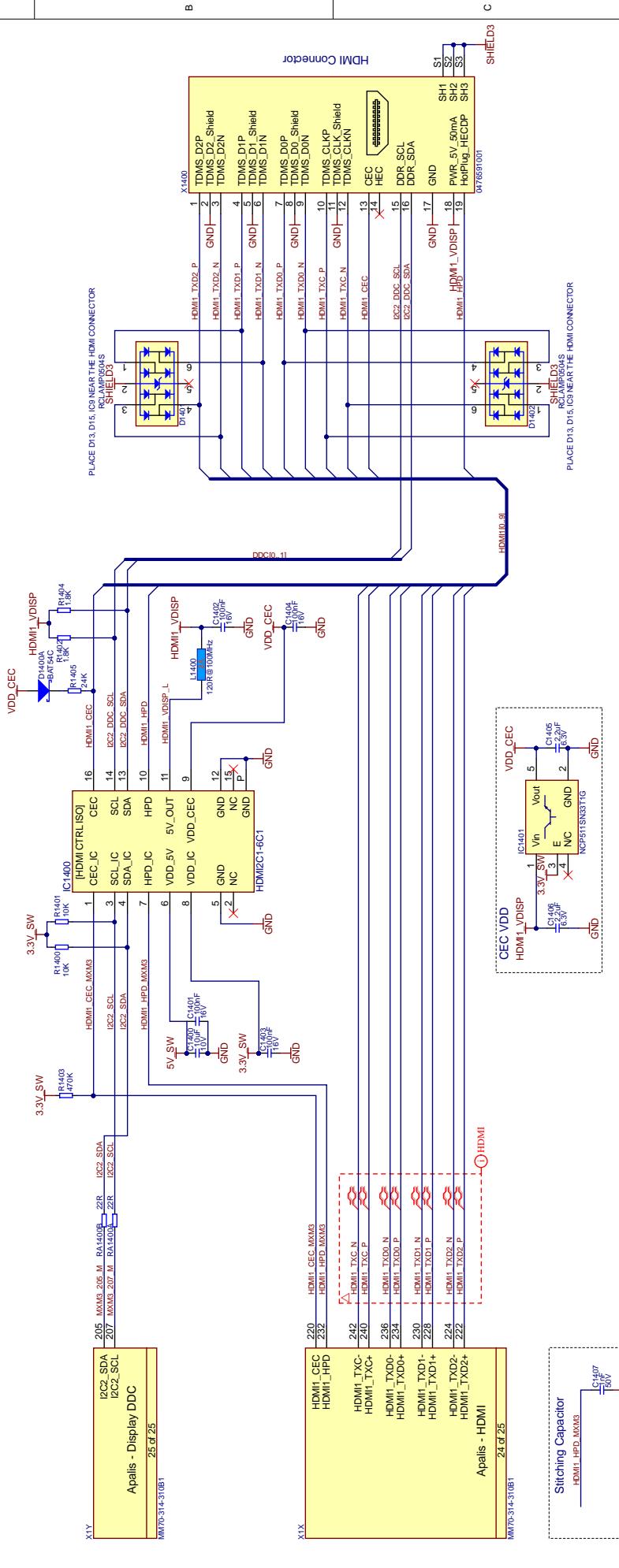
1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---



Project:	MainboardPnP[eb]
Title:	Audio_SchDoc
Size:	A3
Date:	25.4.19
Variant:	No Variations
File:	\mw70314\Shuttle\Fields\Hardware\MainboardSchematics\Toraex\kom\audio\SchDoc

Bern University of Applied Sciences  
Engineering and Information Technology  
Jürgen Graweg 1  
CH-3400 Burgdorf

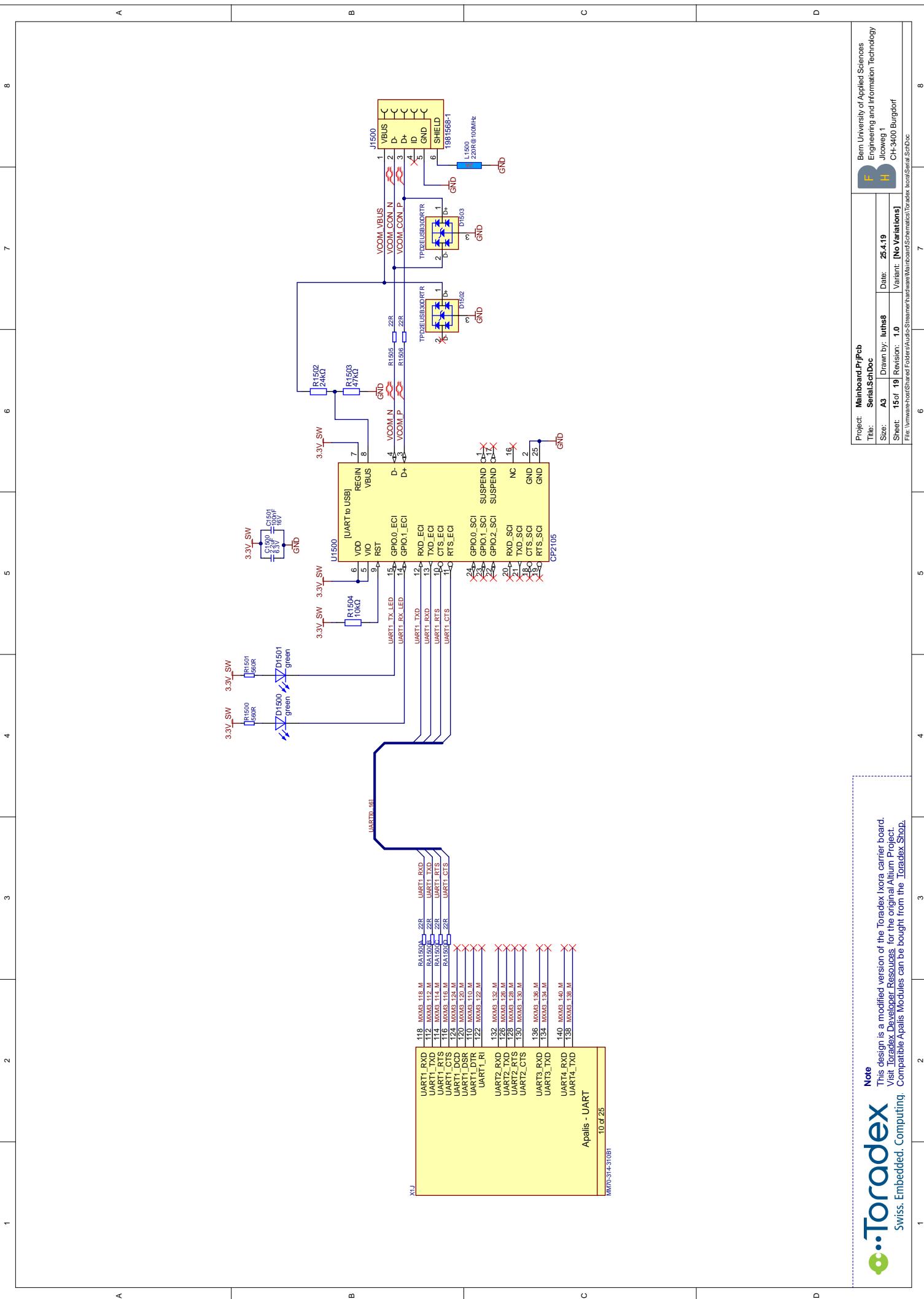


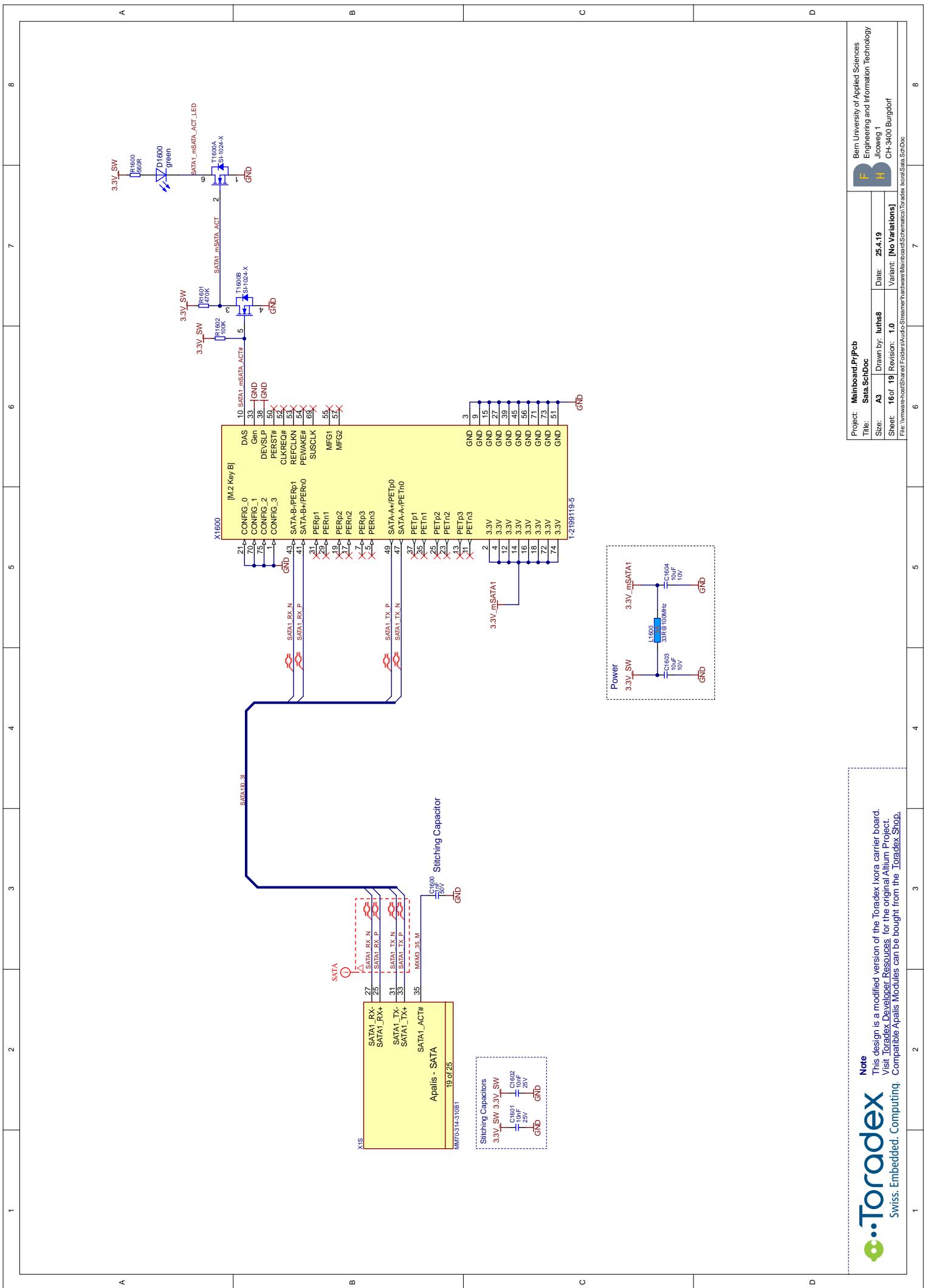


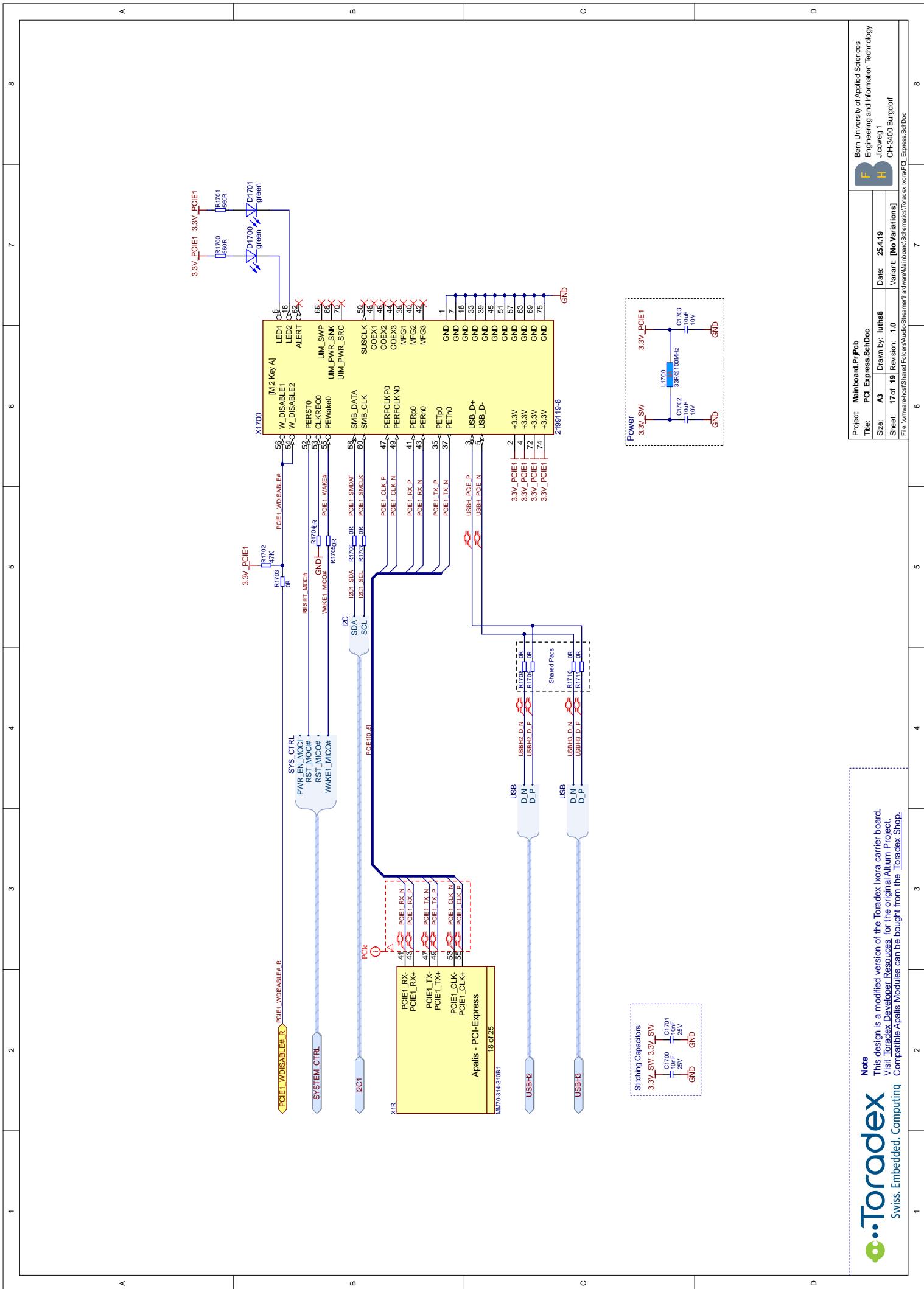
**Toradex** This design is a modified version of the Toradex Ixora carrier board. Visit [Toradex Developer Resources](#) for the original Altium Project. Compatible Apalis Modules can be bought from the [Toradex Shop](#).

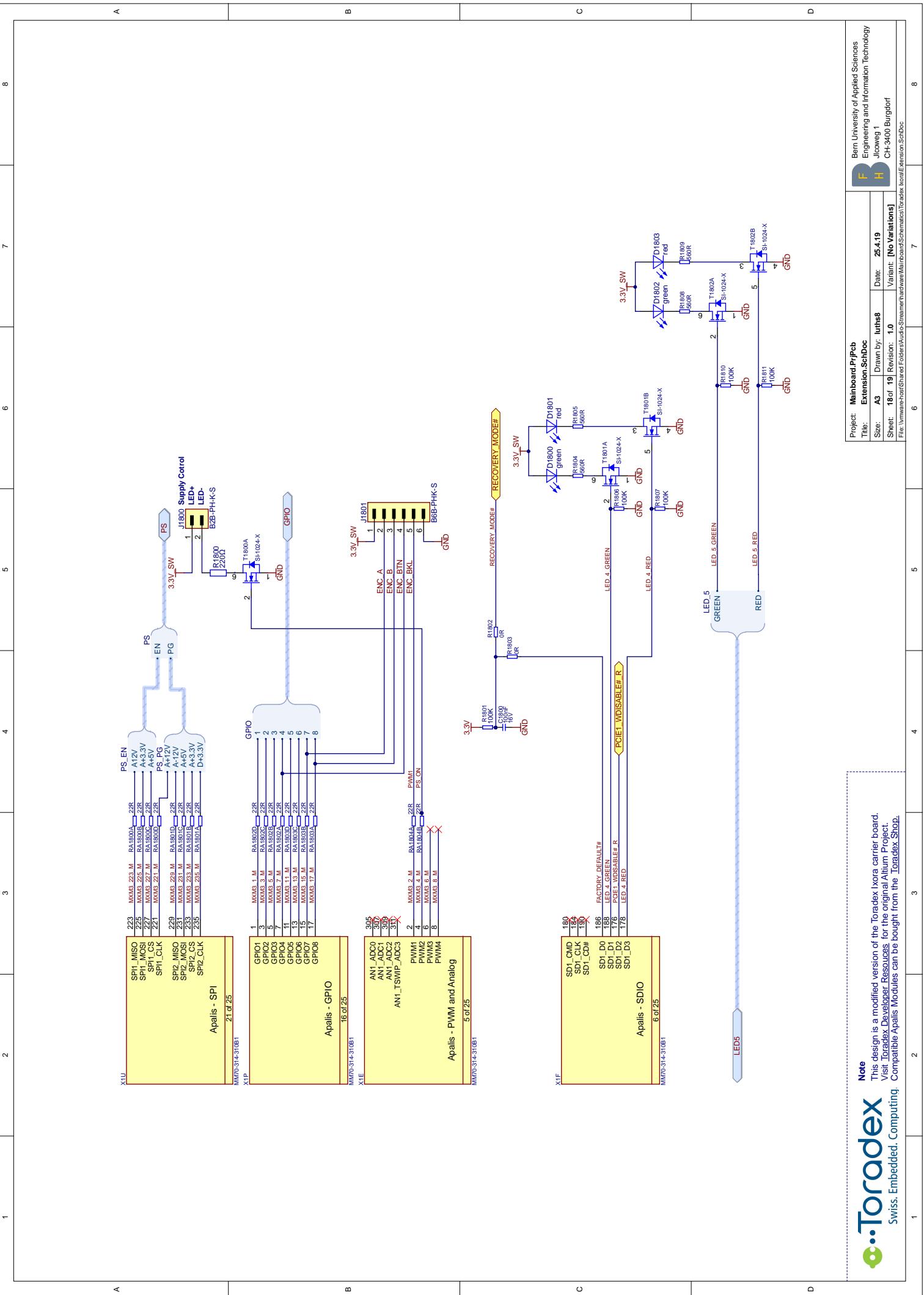
Engineering and Information Technology  
Department of Applied Sciences

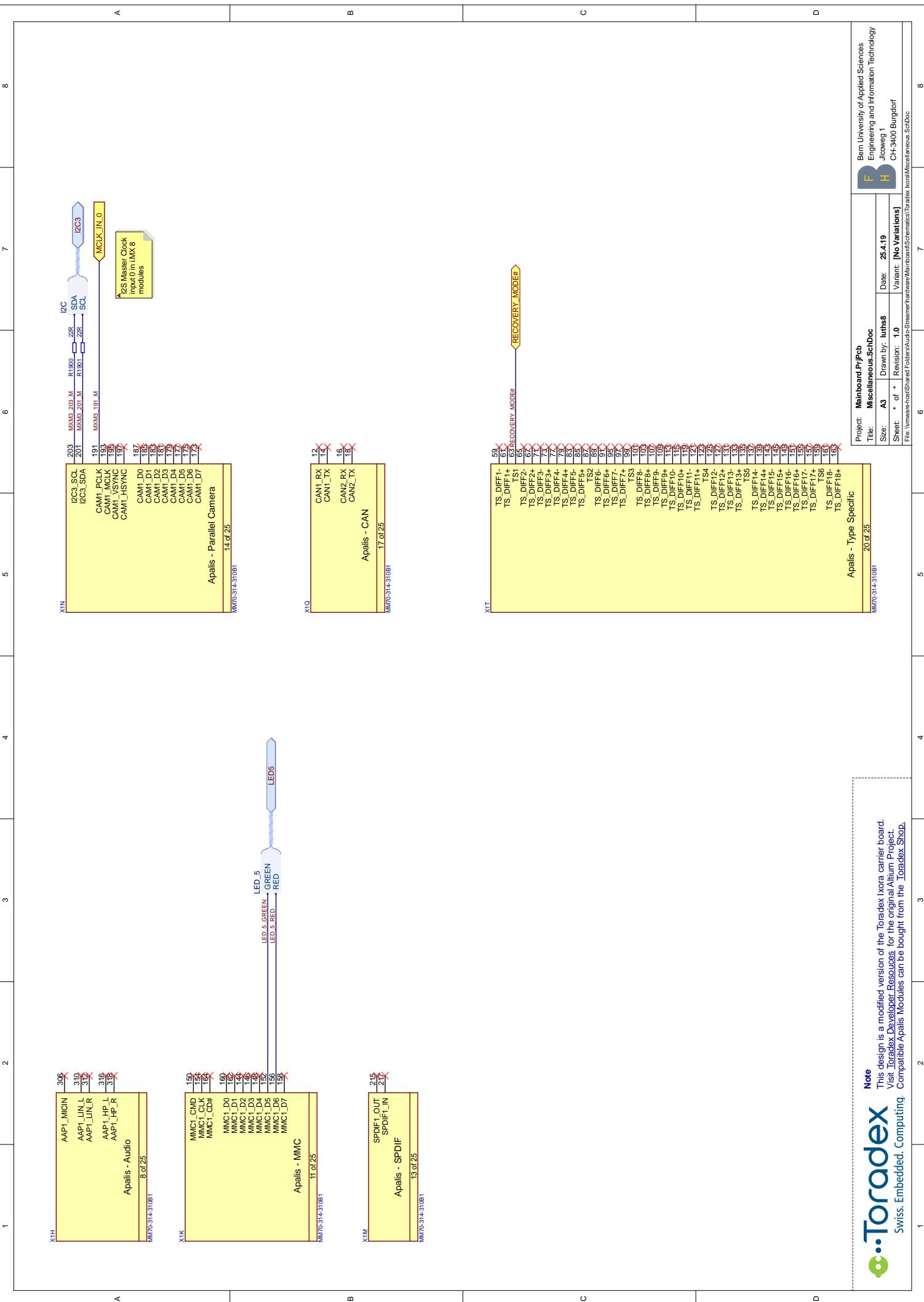
**Title:** HDMI-SchDoc  
**Size:** A3  
**Sheet:** 14of 19 Revision: 1.0  
**Date:** 25.4.19  
**Variant:** [No Variations]  
**Engineering and Information Technology**  
**Jcwegw 1**  
**CH-3400 Burgdorf**









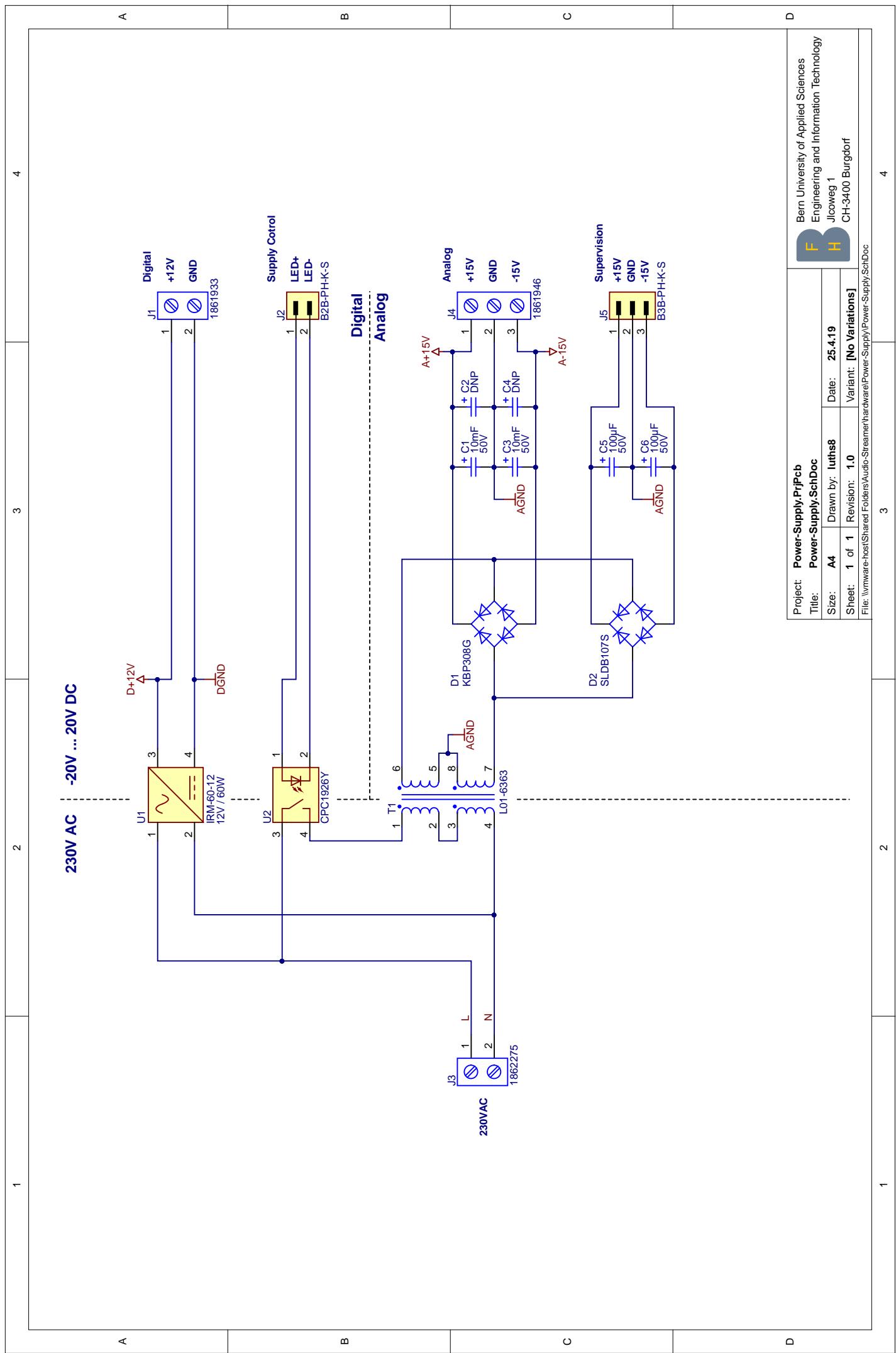




## **Anhang C**

### **Schema Power Supply Unit**







## **Anhang D**

# **Schema Rotary Encoder**



