

Fachhochschule Dortmund

Fachbereich Informatik

Entwicklung eines modularen Multiprotokoll- Kommunikationssystems

für den Einsatz im automotive Bereich

An der Fachhochschule Dortmund
im Fachbereich Informatik
Studiengang Informatik
erstellte Bachelorarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

von

Matthias Farke
geboren am 26.11.1990
Matr.-Nr. 708 4908

Betreuer:

Prof. Dr. Carsten Wolff
Dipl.-Ing. Dieter Zumkehr

Dortmund, 16. Februar 2016

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Thematik	1
1.3. Zielsetzung	2
1.4. Ausgangssituation	3
2. Grundlagen	5
2.1. ivanto	5
2.2. Protokolle	6
2.2.1. Bluetooth Smart	6
2.2.2. WLAN	7
2.2.3. Mobiles Internet	8
2.2.4. GNSS	10
2.2.5. IBIS	11
2.3. Module	11
2.3.1. Computer-Modul	11
2.3.2. Bluetooth-Modul	13
2.3.3. WLAN-Module	13
2.3.4. Cellular-Modul	14
2.3.5. GNSS-Modul	15
2.4. Class-D Audioverstärker	15
2.5. Elektromagnetische Verträglichkeit	15
2.6. Embedded-Linux	17
3. Entwurf und Modulauswahl	18
3.1. USB-Hub	19
3.2. Audioverstärker	20
3.3. Galvanisch-getrennte digitale Ein- und Ausgänge	21
3.4. Beschleunigungssensor	22
3.5. Debugging-Schnittstelle	23
3.6. Spannungsversorgung	24
3.6.1. 3V3-Versorgung	24
3.6.2. 5V-Versorgung	25
3.6.3. DC/DC-Wandler	26
3.7. Sonstiges	27

4. Implementierung	29
4.1. Spannungsversorgung	34
4.2. Modulabschaltung	39
4.3. USB-Hub	40
4.4. Computer-Modul	44
4.5. Cellular-Modul	45
4.6. GNSS-Modul	47
4.7. WLAN-Module	48
4.7.1. RS9113-N00-D1N	48
4.7.2. ESP-WROOM-02	49
4.8. Bluetooth-Module	50
4.9. Audioverstärker	51
4.10. Debugging-Schnittstelle	53
4.11. Ethernet	54
4.12. Optokoppler	54
4.13. Relais	55
4.14. Beschleunigungssensor	56
4.15. IBIS-Schnittstelle	57
5. Resümee	59
5.1. Zusammenfassung	59
5.2. Fazit	60
5.3. Ausblick	61
A. Schaltpläne	71
B. Platinenlayout	93
Eidesstattliche Erklärung	97

Abbildungsverzeichnis

1.1. Übersicht: Ausgangssituation	4
4.1. Platinenlayout: Ausgleich von Längenunterschieden bei differenti- ellen Signalpaaren	31
4.2. Platinenlayout: Anschlussbereich der Platine	33
4.3. Schaltplan: MOSFET-Schaltung für die Aktivierung und Deaktivie- rung einzelner Module	40
4.4. Platinenlayout: USB-Hub	42
4.5. Platinenlayout: Cellular-Modul	46
4.6. Platinenlayout: GNSS-Modul	48
4.7. Platinenlayout: WLAN-Modul 1	49
4.8. Platinenlayout: Bluetooth-Module	51
4.9. Platinenlayout: Beschleunigungssensor	57

Überblick

Kurzfassung

Ein modulares Multiprotokoll-Kommunikationssystem ist ein System, welches verschiedene Funkstandards und Kabel-gebundene Schnittstellen für die Kommunikation mit anderen Systemen implementiert. Bei den verschiedenen Funkstandards und Schnittstellen handelt es sich u.a. um Bluetooth, WLAN, GNSS, USB, Ethernet und IBIS. Diese werden durch verschiedene Module des Kommunikationssystem implementiert. Durch den Einsatz im automotive Bereich sind besondere Anforderungen bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit zu beachten. In dieser Bachelorarbeit wird der Entwurf und die Implementierung eines funktionale Prototypen des Kommunikationssystems vorgestellt.

Abstract

A modular multi-protocol communication system implements different radio networks and cable-bound interfaces for communication with other systems. The implemented wireless networks and interfaces including Bluetooth, WLAN, GNSS, USB, Ethernet and IBIS. These are implemented by various modules of the communication system. Due to the automotive domain special requirements respecting electromagnetic compatibility are to comply. This thesis describes design and implementation of a (full-)functional communication system prototype.

1. Einleitung

1.1. Motivation

Auf Grund der am 1. Januar 2013 [bag14] in Kraft getretenen Änderung des Personenbeförderungsgesetzes [pbe15] sind alle öffentlichen Verkehrsbetriebe (gemäß § 8, Satz 3) verpflichtet bis zum 1. Januar 2022 eine vollständige Barrierefreiheit in allen Einrichtungen und Fahrzeugen zu gewährleisten. Deshalb entwickelt die *Geomobile GmbH* ein Assistenzsystem für die Fahrgäste des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Das *ivanto* genannte System (siehe Abschnitt 2.1) bietet neben einer Smartphone-App als Kundenschnittstelle auch ein Kommunikationssystem, welches in den öffentlichen Verkehrsmitteln und Einrichtungen verbaut wird um die Kunden mit Informationen und zusätzlichen Funktionen zu versorgen.

Die Fachhochschule Dortmund ist durch Geomobile mit der Entwicklung einer Hardware-Plattform für ein neues Kommunikationssystem beauftragt worden.

1.2. Thematik

Bisher beinhaltet das *ivanto*-System ein Kommunikationssystem, das über zwei Informationsschnittstellen verfügt und mit Hilfe eines Mikrocontrollers gesteuert wird. Bei einer der Schnittstellen handelt es sich um Bluetooth Smart (siehe Unterabschnitt 2.2.1). Diese dient dazu das Kommunikationssystem mit der, auf dem Smartphone des Kunden installierten, *ivanto*-App zu verbinden. Die andere Schnittstelle verbindet das Kommunikationssystem mit dem integrierten Boardinformationssystem (IBIS) (siehe Unterabschnitt 2.2.5), um dem Kunden Informationen über das genutzte öffentliche Verkehrsmittel, wie z.B. die nächste Haltestelle, zukommen zu lassen. Des Weiteren können mit Hilfe des Kommunikationssystems Signale (z.B. an den Busfahrer) fernbedient werden.

Das neue Kommunikationssystem beinhaltet zusätzliche Kommunikationsschnittstellen, wie z.B. WLAN (siehe [Unterabschnitt 2.2.2](#)) und mobiles Internet (siehe [Unterabschnitt 2.2.3](#)). Außerdem verfügt es über mehr Rechenleistung, weshalb ein Betriebssystem mit Linux-Kernel (siehe [Abschnitt 2.6](#)) zum Einsatz kommt.

Bei der Entwicklung eines solchen Kommunikationssystems gilt es zu berücksichtigen, dass verschiedene Funkstandards wie Bluetooth und WLAN den selben Funkfrequenzbereich verwenden. Außerdem existieren für den Einsatz in öffentlichen Verkehrsmitteln zusätzliche Anforderungen, da zum Einen die Vorgaben des automotive Bereichs und zum Anderen die speziellen Vorgaben des Verbandes Deutscher Verkehrsbetriebe (VDV) zu berücksichtigen sind. Daraus ergeben sich höhere Anforderungen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Des Weiteren muss beispielsweise der, für automotive Anwendungen übliche, Temperaturbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingehalten werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen muss neben sorgfältiger Modulauswahl auch ein besonderes Augenmerk auf das Layout der Leiterplatte (Platine) gelegt werden. Dies beinhaltet neben anderen Maßnahmen beispielsweise eine geschickte Positionierung der Bauteile und Module zueinander und die hochfrequente Entkopplung von Signalen und Potenzialen.

1.3. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prototypen für das neue ivanto-Kommunikationssystem. Dazu werden die ausgewählten und getesteten Module in einer Schaltung zusammengefasst und um fehlende Module und Funktionen ergänzt. Das Konzept, welches als Ausgangspunkt dieser Arbeit dient ist in [Abschnitt 1.4](#) beschrieben. Diese Arbeit beschreibt den Entwurf und die Implementierung eines Prototypen auf Grundlage dieser schematischen Systemübersicht ([Abbildung 1.1](#)).

1.4. Ausgangssituation

Der Prototyp des Kommunikationssystems ist mit dem Arbeitstitel *Buscore2* bezeichnet. In diesem Abschnitt werden die Vorgaben beschrieben, welche bei der Entwicklung des Buscore2 berücksichtigt werden mussten. Diese Vorgaben wurden im Rahmen einer Projektarbeit entwickelt und resultierten in einem Konzept für das Kommunikationssystem. Des Weiteren wurden die konkreten Module für die verschiedenen Funkstandards und das verwendete Computermodul ausgewählt.

Bei dem Computermodul handelt es sich um ein *Colibri VF61* (siehe [Unterabschnitt 2.3.1](#)) von *Toradex*. Außerdem werden als Bluetooth-Smart-Module zwei *BLE112A* (siehe [Unterabschnitt 2.3.2](#)) von *Bluegiga Technologies* verwendet. Als WLAN-Modul (siehe [Unterabschnitt 2.3.3](#)) werden ein *RS9113-N00-D1N* von *Redpine Signals* und ein *ESP-WROOM-02* von *Espressif Systems* genutzt. Außerdem wird für eine mobile Datenverbindung ein *MPCI L210* (siehe [Unterabschnitt 2.3.4](#)) als Cellular-Modul und ein *NEO-M8Q* (siehe [Unterabschnitt 2.3.5](#)) als GNSS-Modul von *u-blox* eingesetzt.

Des Weiteren enthält das Konzept Vorgaben über Funktionen und Schnittstellen, ohne Angabe von konkreten Modulen. Diese Funktionen sind eine Spannungsversorgung für das gesamte System, eine Überwachung der Eingangsspannung und der Platinentemperatur, sowie ein Beschleunigungssensor. Die erforderlichen Schnittstellen sind ein Ethernet-Port, eine Schnittstelle für den Anschluss des IBIS-Bus (siehe [Abschnitt 4.15](#)) und ein Audioausgang, an welchem ein passiver Lautsprecher angeschlossen werden kann. Außerdem sind die Kommunikationsmodule (mit Ausnahme eines Wifi-Moduls) und ein USB-Client-Port über einen USB-Hub mit dem Computermodul verbunden. Abschließend sind in dem Konzept jeweils fünf digitale galvanisch getrennte I/O-Ports und eine Debugging-Schnittstelle für das Computermodul vorgesehen.

Aus diesen Vorgaben ergibt sich ein Gesamtsystem, welches in [Abbildung 1.1](#) als Systemübersicht dargestellt ist.

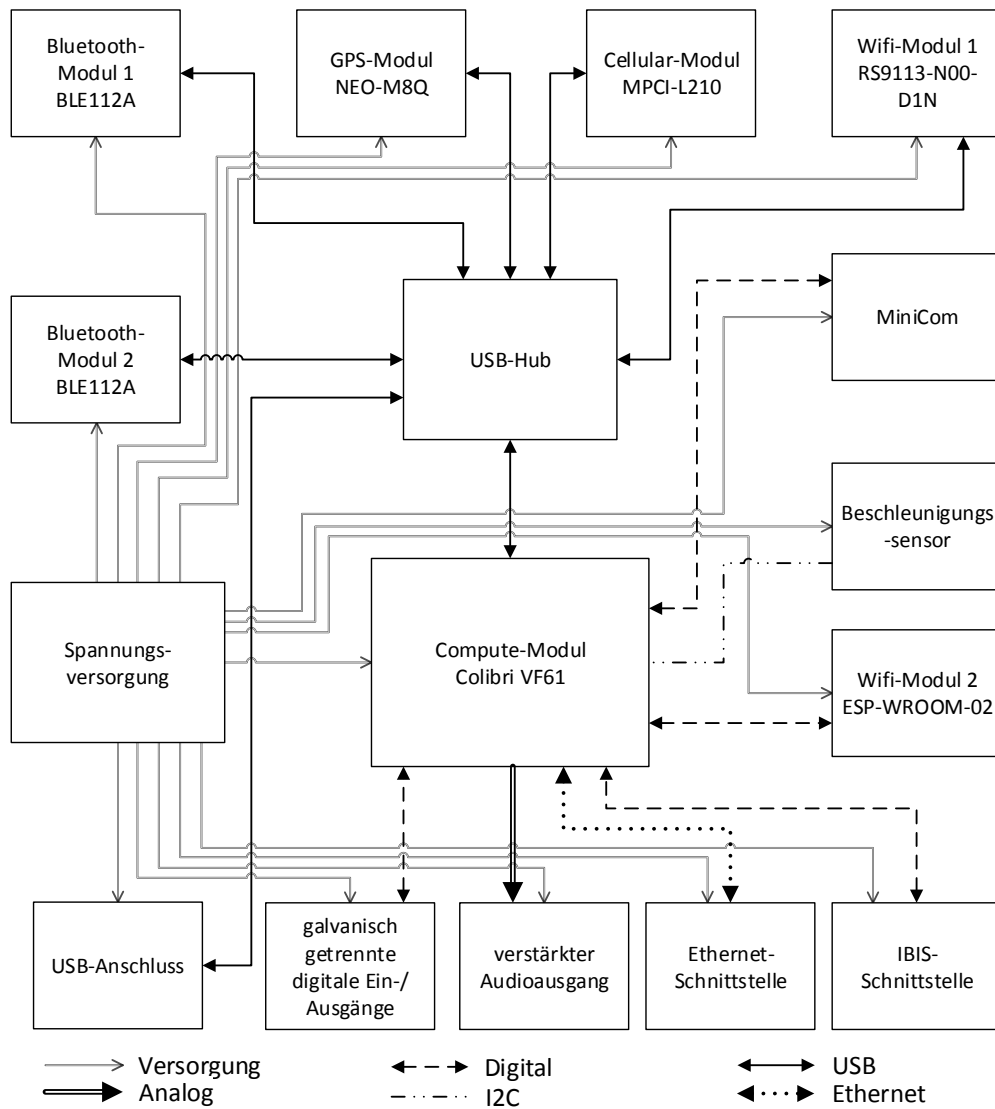


Abbildung 1.1.: Übersicht über die vorgegebenen und zu ergänzenden Module und Schnittstellen

2. Grundlagen

Zu Beginn dieses Kapitels wird das Konzept von Geomobile beschrieben, welches die Barrierefreiheit im ÖPNV verbessern soll. Danach folgen Beschreibungen der eingesetzten Kommunikationsprotokolle und der verschiedenen Module, welche diese Protokolle implementieren. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Themen elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und *Embedded Linux*. Dabei ist das Thema EMV für Geomobile von besonderem Interesse, da das Kommunikationssystem in der Version für die Serienfertigung eine entsprechende Zertifizierung für den Einsatz im ÖPNV benötigt. Auch das Thema Embedded Linux ist von besonderer Bedeutung. Die komplexen Kommunikationsmodule wurden alle unter der Maßgabe ausgewählt, dass ein Linux-Treiber vom jeweiligen Hersteller zur Verfügung steht. Hierbei bildet eines der WLAN-Module die einzige Ausnahme (siehe [Unterabschnitt 2.3.3](#)).

2.1. ivanto

Das ivanto-System [[Geo15a](#)] von Geomobile ist ein Assistenzsystem um die Barrierefreiheit in den Einrichtungen des ÖPNV zu verbessern. Dazu sind in den Fahrzeugen wie Bussen und Bahnen Kommunikationssysteme verbaut, welche als *BusAccess* bzw. als *TramAccess* bezeichnet werden. Diese Kommunikationssystem ermöglichen einen Informationsaustausch mit dem jeweiligen Verkehrsmittel. Des Weiteren gibt es die Orientierungshilfe *IndoorAccess*, welche dem Nutzer die Orientierung in den Umsteigebauwerken erleichtern soll. Dazu werden die Nutzer mit Hilfe von Bluetooth Beacons geortet und mit Hilfe verschiedener Signale an ihr Ziel geführt. Zusätzlich bietet ivanto ein *Application Programming Interface* (API) für die Nutzung dieser Systeme. Als Kundenschnittstelle dient eine Smartphone-App,

welche die API nutzt und die nachfolgend beschriebenen Funktionen zur Verfügung stellt.

Diese Funktionen umfassen die Routenplanung von Tür zu Tür und die Navigation der Nutzer. Das bedeutet, dass die App eine Route von einer Adresse zu einer anderen Adresse planen kann. Außerdem werden die Nutzer zu und in den Einrichtungen des ÖPNV geführt. Des Weiteren vermittelt die Smartphone-App Assistenzeninformationen wie Ansagen während der Fahrt und Echtzeitinformationen über Abfahrtszeiten und Verspätungen. Außerdem können Kunden über die Smartphone-App Halte- und Servicewünsche an das Personal des ÖPNV übermitteln oder ein digitales Ticket erwerben.

2.2. Protokolle

Nachfolgend sind die verschiedenen Protokolle beschrieben, welche das in dieser Arbeit entwickelte Kommunikationssystem verwendet und miteinander verbindet.

2.2.1. Bluetooth Smart

Mit Hilfe von Bluetooth werden sogenannte *Wireless personal area networks* (WPAN) implementiert. Eine formalisierte Form des Bluetooth Standards ist der IEEE 802.15.1 Standard [IEEE05]. Der Bluetooth-Standard wird von der Bluetooth *Special Interest Group* (SIG) spezifiziert und weiterentwickelt. Die Bluetooth SIG setzt sich aus dem *Board of Directors* und dem *Executive Team* zusammen. Beim Board of Directors handelt es sich um die Vertreter aller Unternehmen, welche an der Entwicklung von Bluetooth mitwirken. Zu den vertretenen Unternehmen gehören beispielsweise Microsoft, Apple, Intel und Lenovo. Das Executive Team sind die Angestellten der Bluetooth SIG. Diese sind an der Spezifizierung und Vermarktung des Bluetooth Standards beteiligt und pflegen den Internetauftritt¹ und die Dokumentation der Bluetooth SIG. Des Weiteren entwickelt das Executive Team Programme, um Bluetooth-Anwendungen zu testen.

Mit Bluetooth Smart (auch als Bluetooth Low Energy bezeichnet) wird ein energiesparender Funkübertragungsstandard bezeichnet, der vor allem in Geräten ein-

¹<https://www.bluetooth.com/>

gesetzt wird, die mit Batterien oder Akkus betrieben werden. Der Bluetooth Smart Standard ist ab Version 4.0 im Bluetooth Standard [SIG14] definiert. Dieser nutzt das 2,4 GHz Funkfrequenzband und besitzt bei einer typischen Reichweite von 10 m eine maximale Übertragungsgeschwindigkeit von 1 Mbit/s. Das energiesparendere Verhalten gegenüber klassischem Bluetooth wird durch kürzere Funkimpulse erreicht.

2.2.2. WLAN

Mit *Wireless Local Area Network* (WLAN) wird ein lokal begrenztes Funknetz bezeichnet. Meistens wird der Begriff für Funknetze verwendet, welche nach einem IEEE-802.11 Standard [IEE12] implementiert sind. Im Laufe der Zeit wurden Erweiterungen für den ursprünglichen IEEE-802.11 Standard entwickelt, welche beispielsweise Unterschiede bei der maximalen Datenrate oder dem verwendeten Modulationsverfahren aufweisen. Außerdem gibt es Erweiterungen, die wie der ursprüngliche Standard das Funkfrequenzband von 2,4 GHz verwenden. Andere Erweiterungen verwenden wiederum das 5 GHz Frequenzband oder besitzen eine höhere Bandbreite. Bei vielen WLAN-fähigen Geräten geben die Hersteller *802.11bgn* als *WLAN Typ* an. Dies bezieht sich auf die IEEE-Standards 802.11b, 802.11g und 802.11n.

Der Standard 802.11b stammt aus dem Jahr 1999 und definiert Bruttodatenraten von 5,5 Mbit/s oder 11 Mbit/s. Dafür wird das 2,4 GHz Funkfrequenzband und *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) als Modulationsverfahren genutzt.

Der Standard 802.11g aus dem Jahr 2003 ermöglicht Bruttodatenraten von bis zu 54 Mbit/s. Als Modulationsverfahren wird *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) und als Frequenzband 2,4 GHz genutzt.

Beim Standard 802.11n aus dem Jahr 2009 wird neben dem 2,4 GHz Frequenzband auch das 5 GHz Frequenzband genutzt. Im 2,4 GHz Frequenzband kann, mit Hilfe von Kanalbreiten bis 20 MHz, eine maximale Bruttodatenrate von 72,2 Mbit/s erreicht werden. Beim 5 GHz Frequenzband ist eine Kanalbreite bis maximal 40 MHz vorgesehen. Dadurch wird eine Bruttodatenrate von maximal 150 Mbit/s erreicht. Der Standard sieht die parallele Nutzung von bis zu vier Kanälen

vor, wodurch theoretisch eine maximale Bruttodatenrate von 600 Mbit/s erreicht wird.

Im privaten Bereich werden WLANs vor allem zur Vernetzung mobiler Endgeräte wie Laptops, Tablets und Smartphones verwendet. Diese Endgeräte werden entweder direkt (AdHoc) miteinander verbunden oder es wird mit Hilfe eines WLAN-Routers ein infrastrukturelles Funknetz aufgebaut. Gewöhnlich werden diese Router sowohl für das Routing im WLAN als auch in einem Kabel-gestützten *Local Area Network* (LAN) genutzt und verbinden diese Netzwerke mit dem Internet.

Im industriellen Umfeld existieren weitere Anwendungsfälle für WLANs, wie beispielsweise die Vernetzung von innerbetrieblichen Transportsystemen.

2.2.3. Mobiles Internet

Mit mobilem Internet wird die Bereitstellung von Internetdiensten auf einem mobilen Endgerät bezeichnet. Dies schließt auch Internetverbindungen zu Geräten ein, welche beispielsweise fest in einem Automobil verbaut sind. Hierfür wurden verschiedene Mobilfunkstandards entwickelt, die sich neben Telefonie auch für die Bereitstellung von mobilem Internet eignen. Die Mobilfunkstandards sind in fünf Generationen eingeteilt, wobei die erste Generation alle analogen Systeme zusammenfasst und die fünfte Generation planmäßig ab dem Jahr 2020 einsetzbar sein soll. Auf die Generation zwei (2G), drei (3G) und vier (4G) entfallen alle aktuell genutzten Standards für mobiles Internet. Für die legale Nutzung eines Mobilfunknetzes wird ein *Subscriber Identity Module* (SIM) benötigt. Diese Module werden in Form von Smart-Cards mit sechs bis acht Kontakten verwendet und als SIM-Karten bezeichnet. Die SIM-Karten werden von den Mobilfunkanbietern an die Kunden weitergegeben und enthalten die notwendigen Informationen damit einem mobilen Endgerät die Einwahl in ein Mobilfunknetz möglich ist. Mit Hilfe der SIM-Karte legt ein Mobilfunkbetreiber fest, welche Funkstandards ein Kunde mit seinem Endgerät nutzen darf. Beispielsweise kann der Mobilfunkbetreiber damit den Zugriff auf ein 2G Funknetz beschränken, auch wenn das Endgerät des Kunden die neueren Standards unterstützt.

Ausführliche Beschreibungen zu den oben genannten Standards der zweiten bis vierten Generation sind im Buch *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme* von

Martin Sauter [Sau15] zu finden. Nachfolgend werden die für diese Arbeit wichtigen Eigenschaften der Standards zusammengefasst.

Ein verbreiteter Mobilfunkstandard ist das *Global System for Mobile Communications* (GSM), welcher der zweiten Generation zugeordnet ist. Verbreitet bedeutet in diesem Fall laut *Ericsson AB* [Eri], dass es etwa vier Milliarden Mobilfunkverträge gibt, die ausschließlich einen Zugang zu einem GSM-Netz bieten. Die Netze nach dem GSM-Standard werden in 170 Ländern z.B. für mobile Telefonie eingesetzt. Für GSM ist der Dienst *General Packet Radio Service* (GPRS) standardisiert, welcher Paket-orientierte Datenübertragungen mit einer theoretischen maximalen Brutto-Übertragungsrate von $53,6 \text{ kbit/s}$ über GSM-Netze ermöglicht. Der GPRS Dienst wiederum wird durch *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) erweitert, um Bruttodatenraten bis 220 kbit/s zu erreichen. Für GSM sind weltweit vier verschiedene Frequenzbänder standardisiert. In Europa wird zum Einen GSM 900 und zum Anderen GSM 1800 genutzt. Beim GSM 900 Frequenzband werden Frequenzen im Bereich von 880 MHz bis 960 MHz und bei GSM 1800 werden Frequenzen im Bereich von 1710 MHz bis 1880 MHz genutzt. Für Nordamerika sind die Frequenzbänder GSM 850 und GSM 1900 spezifiziert. Dabei nutzt GSM 850 einen Frequenzbereich von 824 MHz bis 894 MHz und GSM 1900 einen Frequenzbereich von 1850 MHz bis 1990 MHz.

Der wichtigste Mobilfunkstandard der dritten Generation ist das *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS). Dieser ermöglicht eine maximale Bruttodatenrate für den Download von 384 kbit/s und für den Upload von 128 kbit/s . Dazu nutzt UMTS für die Verbindung vom Endgerät zum Netzwerk einen Frequenzbereich von 1920 MHz bis 1980 MHz und für die Verbindung vom Netzwerk zum Endgerät einen Frequenzbereich von 2110 MHz bis 2170 MHz. Beide Frequenzbereich sind in jeweils zwölf 5 MHz-Blöcke eingeteilt. Des Weiteren ist im UMTS-Standard auch die Nutzung des GSM 900 Frequenzbandes, also der Bereich von 880 MHz bis 960 MHz vorgesehen. Für UMTS gibt es mittlerweile mehrere Erweiterungen, wobei es von der Netzauslastung abhängt, ob UMTS oder eine der Erweiterungen genutzt wird. Die erste Erweiterung ist *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), welche die Download-Geschwindigkeit erhöht. Hierbei sind theoretisch Bruttodatenrate bis zu 14 Mbit/s möglich, in der Praxis werden aber oft nur etwa

7,2 Mbit/s erreicht. Die nächste Erweiterung für UMTS ist *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA). Diese Erweiterung erhöht die Bruttodatenrate für den Upload auf etwa 3 Mbit/s. Zusammengefasst werden HSDPA und HSUPA unter dem Begriff *High Speed Packet Access* (HSPA). Für HSPA wiederum existiert die Erweiterung HSPA+. Diese ermöglicht unter ideale Bedingungen eine Bruttodatenrate für den Download von etwa 42 Mbit/s und für den Upload von etwa 11,5 Mbit/s.

Mit Long Term Evolution (LTE) und LTE-Advanced sind die Mobilfunkstandards der vierten Generation bezeichnet. Bei der Entwicklung von LTE wurde der Fokus darauf gelegt, dass bestehende UMTS-Infrastruktur einfach auf LTE umgerüstet werden kann. Dies wird durch die Nutzung der UMTS Frequenzbänder ermöglicht. Außerdem wird von LTE das höher-frequente GSM Band genutzt und zusätzlich sind zwei weitere Frequenzbänder definiert worden. Damit kann LTE in Europa über fünf verschiedene Frequenzbänder genutzt werden, welche in **Tabelle 2.1** dargestellt sind.

Band	Downlink (MHz)	Uplink (MHz)	Auch verwendet für
1	2110 - 2170	1920 - 1980	UMTS
3	1805 - 1880	1710 - 1785	GSM
7	2620 - 2690	2500 - 2570	
8	925 - 960	880 - 915	GSM, UMTS
20	791 - 821	832 - 862	

Tabelle 2.1.: LTE Frequenzbänder in Europa

Des Weiteren sind bei LTE bis zu vier Antennen pro Endgerät vorgesehen, wodurch eine maximale Bruttodatenrate für den Download von bis zu 300 Mbit/s erreicht werden kann. Allerdings sind auf Grund des Platzbedarfs der Antennen an vielen Endgeräten nur zwei Antennen vorgesehen. Dadurch liegt die maximal erreichbare Bruttodatenrate bei etwa 150 Mbit/s. Für LTE ist bereits eine Erweiterung vorgesehen. Diese heißt LTE-Advanced und setzt auf Seiten der Netzbetreiber nur ein Software-Update der Basisstationen voraus. Durch das Update ergeben sich aber, mit den entsprechenden Endgeräten, Datenraten bis zu 1 Gbit/s.

2.2.4. GNSS

Das Akronym GNSS steht für Globales Navigationssatellitensystem (oder Englisch: Global Navigation Satellite System) und ist ein Oberbegriff für die satellitengestützten Navigationssysteme verschiedener Staaten. Zu diesen Systemen gehört das *Global Positioning System* (GPS), dass von den Vereinigten Staaten von Amerika betrieben wird und seit 1995 voll funktionsfähig ist. Ein aktuell nur eingeschränkt nutzbares System ist das von der Russischen Föderation betriebene *GLObal NAvigation Satellite System* (GLONASS). Zwei weitere Systeme befinden sich aktuell im Aufbau und werden voraussichtlich 2020 einsatzbereit sein. Dies ist zum Einen das zivil kontrollierte *Galileo*-System der Europäischen Union und zum Anderen das chinesische *Baidou*-System. Die einzelnen Systeme unterscheiden sich durch die Nutzung verschiedener Funkfrequenzen und Verfahren. Die grundlegende Funktionsweise zur Positionsbestimmung ist hingegen gleich.

2.2.5. IBIS

Das Akronym IBIS steht für integriertes Bordinformationssystem und ist der Oberbegriff für einen Bordrechner mit Bussystem in einem öffentlichen Verkehrsmittel. Das IBIS wurde vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) standardisiert und muss in allen Fahrzeugen und Einrichtungen des ÖPNV in Deutschland vorhanden sein [Geo15b]. Mit Hilfe von IBIS werden Funktionen wie die Kommunikation zwischen Fahrer und Betriebsleitstelle oder die Ausgabe von Fahrgastinformationen zur Verfügung gestellt. Die Fahrgastinformationen umfassen beispielsweise die Bezeichnung der Buslinie oder auch die nächste Haltestelle.

2.3. Module

In diesem Abschnitt werden die vorausgewählten Module näher beschrieben. Ein Modul ist ein integrierter Schaltkreis (engl. Integrated Circuit (IC)) oder eine Platine, das im Gesamtsystem eingelötet oder eingesteckt wird. Zu jedem Modul gehören Bauteile, welche die Beschaltung des Moduls darstellen. Dabei können sich Anzahl und Art der Bauteile von Modul zu Modul unterscheiden.

2.3.1. Computer-Modul

In dieser Arbeit wird ein Einplatinencomputer als Computer-Modul bezeichnet, welcher nur im Verbund mit einer Trägerplatine funktionsfähig ist. Im englischen Sprachgebrauch wird diese Computerart auch als Computer-on-Module (COM) bezeichnet. Die Trägerplatine gewährleistet die Spannungsversorgung des Computer-Moduls. Außerdem stellt die Trägerplatine die üblichen Steckverbinder für die verschiedenen Schnittstellen des Computer-Moduls zur Verfügung, beispielsweise USB- und Ethernet-Buchsen. Die Verbindung von Computer-Modul und Trägerplatine kann mit standardisierten Schnittstellen, wie z.B. DDR-Speichersockeln oder mit Hilfe von Stiftheilen vorgenommen werden.

Als Computermodule wird ein *Colibri VF61*-Modul von Toradex [Tor14a] verwendet. Dieses Modul ist eine Platine in Form eines DDR2-SODIMM-Speichermoduls, auf welcher sich ein *Vybrid VF61*-Chip von Freescale befindet. Außerdem befinden sich auf der Platine zusätzlich 512 MB Flash-Speicher und 256 MB DDR3-RAM. Des Weiteren beinhaltet die Platine eine Umsetzung der Spannungsversorgung auf +1,5 V und +1,2 V, einen Schwingquarz mit 24 MHz und einen mit 32,768 kHz, einen Chip als AC97- und *Touchcontroller* und einen Ethernet PHY².

Der *Vybrid VF61* [Fre14] ist ein Hybridcontroller, welcher einen ARM-Cortex-M4 Mikrocontroller und einen ARM-Cortex-A5 Applikationsprozessor in einem Chip zusammenfasst. Des Weiteren verfügt der VF61 über sechs *Universal asynchronous receiver/transmitter* (UART), von denen fünf über die SODIMM-Schnittstelle des Colibri verfügbar sind. Außerdem werden vier *Inter-Integrated Circuit* (I2C) Schnittstellen, zwei USB- und zwei Ethernet-Schnittstellen durch den *Vybrid VF61* unterstützt. Am Colibri sind alle vier I2C-Schnittstellen, beide USB-Schnittstellen und ein Ethernet-Schnittstelle über die SODIMM-Anschlüsse verfügbar. Der *Vybrid VF61* stellt weitere Schnittstellen und Eigenschaften bereit, welche allerdings am Colibri nicht verfügbar sind oder in dieser Arbeit nicht genutzt werden.

²Ein PHY setzt digitale in analoge modulierte Signale (und umgekehrt) um, außerdem wird der Physical Layer (Schicht 1) des ISO/OSI-Referenzmodells als PHY bezeichnet.

Für die Nutzung des Colibri VF61 wird vom Hersteller Toradex der Einsatz eines eingebetteten Betriebssystems [Tora] vorausgesetzt. Diese Betriebssysteme werden durch den ARM-Cortex-A5 Applikationsprozessor ausgeführt. Zwei mögliche Betriebssysteme sind *Windows Embedded Compact* (Windows CE) von Microsoft und *Embedded Linux* (siehe Abschnitt 2.6). Für diese Betriebssysteme stellt Toradex an die Hardware angepasste Versionen bereit. Des Weiteren bieten Service Partner von Toradex angepasste Versionen von Android und *Embedded Configurable Operating System* (eCos) an. Das eCos ist ein kostenloses *Open-Source* Betriebssystem für den Einsatz auf echtzeitfähigen eingebetteten Systemen. Dieses Betriebssystem ist im Bezug auf das Colibri-Modul eine Besonderheit, da es nicht vom Applikationsprozessor sondern durch den ARM-Cortex-A4 Mikrocontroller ausgeführt wird.

2.3.2. Bluetooth-Modul

Das vorausgewählte Bluetooth-Modul ist ein *BLE112-A-v1* von Bluegiga [Blu14]. Dieses Modul ist kompatibel zum Bluetooth 4.0 Standard und enthält eine Implementierung des Bluetooth Low Energy Stacks. Das Modul besteht aus einer Platine, auf welcher sich neben einer Keramikantenne, deren Beschaltung und zwei Schwingquarzen, ein *CC2540*-Chip von Texas Instruments befindet. Der Chip verfügt über einige GPIO-Pins, 2 USARTs, eine USB-Schnittstelle und ist programmierbar. Die Platine ist mit 32 Kontakten versehen und wird direkt auf eine Trägerplatine aufgelötet.

2.3.3. WLAN-Module

Die WLAN-Module sind zum Einen das *RS9113-N00-D1N* von Redpinesignals und zum Anderen das *ESP-WROOM-02* von Espressif Systems. Beide Module bestehen aus je einer Platine, welche mittels dafür vorgesehener Kontakte auf einer Trägerplatine aufgelötet werden. Beide Module nutzen integrierte *Printed Circuit Board* (PCB)-Antennen. Eine PCB-Antenne ist eine Leiterbahn, die über eine ansonsten freie Fläche einer Platine geführt wird. Durch die Form und die Länge der Leiterbahn werden Antenneneigenschaften wie z.B. die Impedanz der Antenne festgelegt.

RS9113-N00-D1N Das RS9113-N00-D1N Modul [Red15a] von Redpine Signals ist ein Dual-Band WLAN-Modul, welches die Standards IEEE802.11b/g/n implementiert. Als Hardwareschnittstellen sind USB und eine SDIO-Schnittstelle verfügbar. Die SDIO-Schnittstelle wird gewöhnlich für die Anbindung von SD-Speicherkarten eingesetzt. Für die RS9113-Module stellt der Hersteller einen Hardware-Treiber für Linux-Betriebssysteme zur Verfügung. Eine Besonderheit der RS9113 Familie ist, dass alle Module dieser Familie Pin-kompatibel sind. Dies bietet die Möglichkeit das Layout für eine Trägerplatine zu erstellen und diese je nach Bedarf zu bestücken, da RS9113-Module existieren, welche neben WLAN weitere Funkstandards implementieren (z.B. Bluetooth).

ESP-WROOM-02 Das ESP-WROOM-02 [Esp15] implementiert die Standards IEEE802.11b/g/n. Es verfügt über eine PCB-Antenne und wird mit Hilfe einer seriellen Schnittstelle angesteuert. Für das ESP-WROOM-02 ist kein Linux-Treiber verfügbar. Des Weiteren sind konfigurierbare GPIO-Pins, eine SPI-Schnittstelle zur Anbindung von externem Flash-Speicher oder einem Display, ein 10-Bit ADC und eine I2C-Schnittstelle vorhanden.

Zum Vergleich von Funktionsumfang und Leistungsfähigkeit, werden in [Tabelle 2.2](#) einige Eigenschaften der beiden Module verglichen.

	RS9113-N00-D1N	ESP-WROOM-02
Frequenzbänder:	2,4 GHz und 5 GHz	2,4 GHz
Antenne:	PCB	PCB
Treiber:	Linux, Windows CE, Android	–
Temperaturbereich:	–40 °C bis +85 °C	–40 °C bis +125 °C
Schnittstellen:	USB, SDIO	UART, SDIO, SPI, I2C, I2S, IR Remote Control

Tabelle 2.2.: Vergleich einiger Eigenschaften der beiden WLAN-Module

2.3.4. Cellular-Modul

Das Cellular-Modul ist ein *MPCI-L210* [ubl15] von u-blox. Diese Platine ist im *PCI Express Mini Card* Formfaktor ausgeführt. Auf der Platine befinden sich ein *TOBY-L210 multi-mode Cellular-Modul*, zwei Antennenanschlüsse und eine Signalamsetzung auf den MPCIE-Standard. Das MPCIE-L210 unterstützt die Mobilfunkstandards der zweiten und dritten Generation und LTE. Durch die Unterstützung von LTE und das Vorhandensein von zwei Antennenanschlüssen werden maximale Bruttodatenraten von 150 Mbit/s für den Download und 50 Mbit/s für den Upload ermöglicht (vergl. [Unterabschnitt 2.2.3](#)). Vorhandene Schnittstellen sind USB2.0 und die Schnittstelle, über welche eine SIM-Karte mit dem Cellular-Modul verbunden wird.

2.3.5. GNSS-Modul

Als GNSS-Modul wird ein *NEO-M8Q* [ubl14] von u-blox verwendet. Dieses ermöglicht die Signale verschiedener GNSS zu empfangen. Bei diesen System handelt es sich um GPS, GLONASS und BeiDou. Das Modul kann die Signale von zwei verschiedenen Systemen empfangen und verarbeiten um die Genauigkeit der Positionierung zu erhöhen. Dabei sind sämtliche Kombinationen der drei genannten Systeme möglich. Des Weiteren kann das NEO-M8Q auch die Signale des *Quasi-Zenith Satellite System* (QZSS) empfangen und verarbeiten. Dieses lokale Navigationssystem wird aktuell in Japan entwickelt und soll dort die Genauigkeit von GPS verbessern. Durch die Position der Satelliten, kann das System auch in Australien zur Verbesserung der Genauigkeit von GPS genutzt werden.

2.4. Class-D Audioverstärker

Bei einem Class-D Audioverstärker [Wue13] wird zunächst das Audiosignal in ein Pulsweiten-moduliertes (PWM) Signal umgewandelt. Dazu wird das Audiosignal mittels eines Komparators mit einer Dreiecksspannung verglichen. Der Ausgang des Komparators wechselt den Zustand, je nachdem welche der Spannungen größer ist. Dadurch entsteht ein PWM-Signal, bei welchem die Länge der Pulse von der

Spannungshöhe des Audiosignals bestimmt wird. Anschließend wird die Amplitude des PWM-Signals mittels eines Schaltverstärkers vergrößert. Das verstärkte PWM-Signal wird vom Audioverstärker ausgegeben. Abschließend wird das PWM-Signal durch einen LC-Filter in ein Audiosignal umgewandelt und durch einen passiven Lautsprecher ausgegeben.

Der interne Aufbau eines Class-D Audioverstärkers gleicht dem internen Aufbau eines Spannungsreglers (vergl. Abschnitt 7.2 in [TI15]).

2.5. Elektromagnetische Verträglichkeit

Der Begriff elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bezeichnet die Koexistenz mehrerer elektrischer Geräte ohne funktionale Einschränkungen. Diese Einschränkungen können entstehen, da alle elektrischen Geräte, neben oder als Teil der eigentlichen Funktion, Störungen aussenden. Mit Störungen sind in diesem Kontext alle elektrischen und magnetischen Felder und elektromagnetischen Wellen gemeint, welche ein anderes elektrisches Gerät beeinflussen können. Dies umfasst auch alle Störungen, die über angeschlossene elektrische Leitungen übertragen werden.

Bei einem System ist die elektromagnetische Verträglichkeit erreicht, wenn es kein anderes elektrisches System in dessen Funktion einschränkt. Außerdem darf auch das System nicht in der eigenen Funktion eingeschränkt sein. Dazu ist in verschiedenen Normen definiert, wie viele Störungen ein System in einem bestimmten Systemkontext aussenden darf. Des Weiteren ist durch diese Normen auch definiert, wie groß die Unempfindlichkeit des Systems gegenüber Störeinflüssen sein muss.

Eine umfassende Einführung in das Thema elektromagnetische Verträglichkeit ist im Buch *Elektromagnetische Verträglichkeit* [SK11] von Adolf Schwab und Wolfgang Kürner zu finden.

2.6. Embedded-Linux

Mit Embedded Linux [Tor**b**] sind allgemein eingebettete System bezeichnet, welche ein auf dem Linux-Kernel basierendes Betriebssystem verwenden. Für das BusCore2 Kommunikationssystem ist der Einsatz eines solchen Betriebssystems vorgesehen. Dazu wird das von Toradex angebotene Linux-Betriebssystem an die Hardware des Kommunikationssystems angepasst. Diese Anpassung beinhaltet beispielsweise, dass die Treiber der eingesetzten Module (Bluetooth-Modul, GNSS-Modul, usw.) direkt in den Betriebssystem-Kernel integriert sind.

3. Entwurf und Modulauswahl

Dieses Kapitel beschreibt den Entwurf des Kommunikationssystems. Dazu wird zunächst der Systemkontext beschrieben. Dadurch werden einige grundlegende Anforderungen an sämtliche Bauteile und Module des Kommunikationssystems erläutert. Des Weiteren ist in diesem Kapitel die Auswahl der Module beschrieben, welche für das Kommunikationssystem benötigt werden. Dabei werden nur die Module behandelt, die in [Abbildung 1.1](#) ohne konkrete Bezeichnung dargestellt sind. In den folgenden Abschnitten wird zunächst jedes Modul allgemein beschrieben und danach jeweils das ausgewählte Modul vorgestellt.

Der Entwurf des, in [Abschnitt 1.3](#) und [Abschnitt 1.4](#), beschriebenen Prototypen beginnt mit der Ermittlung des Systemkontextes. Dieser Systemkontext ergibt sich aus der Anforderung, dass der Prototyp für den Einsatz in einem Omnibus des ÖPNV geeignet sein muss. Dadurch ist die Versorgungsspannung des gesamten Kommunikationssystems festgelegt. Außerdem ist der Einbauort festgelegt – nämlich innerhalb eines Technikbereiches oberhalb bzw. hinter dem Busfahrer. Des Weiteren ist durch diesen Systemkontext der Betriebstemperaturbereich aller Bauteile vorgegeben, dieser liegt zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Auf Grund des Einsatzes in einem Fahrzeug muss die gesamte Konstruktion den, bei einer Fahrt auftretenden Erschütterungen widerstehen. Abschließend muss das Kommunikationssystem vollständig galvanisch von den umgebenden elektrischen Systemen getrennt sein.

Das in [Abschnitt 2.3](#) beschriebenen Bluetooth-Modul und das GNSS-Modul wurden mittels selbst-erstellter Platinen evaluiert. Auch für den Audioverstärker (siehe [Abschnitt 3.2](#)) wurde eine Platine zur Evaluation erstellt. Mit diesen Platinen sind die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten und Schnittstellen der Module getestet worden. Des Weiteren konnten erste Funktionstests der Module vorgenommen werden. Durch diese Evaluation wurden funktionsfähige Schaltungen und Pla-

tinienlayouts ermittelt. Dies vereinfacht die Integration dieser Module in das Kommunikationssystem.

3.1. USB-Hub

Der USB-Hub ist eines der primären Module des Kommunikationssystems, da dieser die für die Grundfunktionen notwendigen Funkmodule mit dem Computer-Modul verbindet. Mit Hilfe des USB-Hubs werden beide Bluetooth-Module, das GNSS-Modul, das Cellular-Modul und eines der WLAN-Module mit dem Computer-Modul verbunden. Der USB vereinfacht hierbei die Nutzung der Module, da diese sich nach dem Einschalten automatisch beim Betriebssystem des Computer-Moduls anmelden und danach durch die zu Verfügung stehenden Treiber genutzt werden können. Des Weiteren soll das Kommunikationssystem über eine USB-Buchse Type-A einen USB-Port für die Nutzung externer Geräte zur Verfügung stellen. Zusammenfassend ergeben sich für die Auswahl des USB-Hub folgende Anforderungen:

Der USB-Hub muss

- für automotive Anwendungen geeignet sein,
- den USB2.0-Standard implementieren,
- mindestens sechs Down-Stream-Ports zur Verfügung stellen und
- ohne externe Beschaltung(z.B. externe EEPROMs) und Konfiguration benutzbar sein.

USB2517i Diesen Anforderungen entspricht der USB-Hub *USB2517i* [SMS13] von Microchip. Bei diesem handelt es sich um eine USB2.0-Hub mit sieben Down-Stream-Ports für den Einsatz in einem industriellen Umfeld. Der USB-Hub unterstützt Low-Speed¹, Full-Speed² und Hi-Speed³ Geräte und kann die Stromversorgung der angeschlossenen Geräte steuern. Außerdem verfügt der USB-Hub über digitale Eingänge, über welche die angeschlossenen Geräte melden können wenn ein

¹Low-Speed entspricht einer Bruttodatenrate von 1,5 Mbit/s; spezifiziert im USB1.0-Standard

²Full-Speed entspricht einer Bruttodatenrate von 12 Mbit/s; spezifiziert im USB1.0-Standard

³Hi-Speed entspricht einer Bruttodatenrate von 480 Mbit/s; spezifiziert im USB2.0-Standard

zu großer Strom fließt (beispielsweise wegen eines Kurzschlusses in der Schaltung des Gerätes). Des Weiteren bietet der Hub die Möglichkeit mehrere Status-LEDs für jeden Port und ein EEPROM anzuschließen. Das EEPROM dient zur Speicherung von Registerwerten, welche der Hub nach einem Reset automatisch über die I2C-Verbindung zum EEPROM ausliest und in den internen Registern ablegt.

Als Versorgung benötigt der USB-Hub eine Spannung von +3,3 V. Laut Datenblatt liegt die maximale Stromaufnahme bei 460 mA, wenn alle sieben Ports als Hi-Speed-Port konfiguriert sind. Daraus ergibt sich eine maximale Leistungsaufnahme von ca. 1,5 W. Zusätzlich zu den +3,3 V benötigt die interne Schaltung des USB-Hubs noch eine Versorgungsspannung von +1,8 V. Diese Spannung wird entweder von außen angelegt oder der Hub nutzt interne Spannungsregler, um diese Spannung aus der +3,3 V Versorgungsspannung herzustellen. Zusätzlich zu den Versorgungsspannungen benötigt der USB-Hub eine 24 MHz Taktquelle.

Der USB-Hub wird als IC in einem QFN-64 Gehäuse ausgeliefert. Ein QFN-64 Gehäuse ist ein Standard IC Gehäuse in quadratischer Form mit einer Kantenlänge von 9 mm. Dieses Gehäuse liegt mit der gesamten Fläche auf der Platine auf. Bei dem USB-Hub ist das IC an der Unterseite mit einem sogenannten *Thermal-Pad* ausgeführt. Dieses Thermal-Pad wird an die Platine angelötet um die Abwärme des USB-Hubs abzuleiten. Die eigentlichen Kontakte des IC sind in Gruppen zu jeweils 16 Kontakten rund um das IC Gehäuse angeordnet.

3.2. Audioverstärker

Der Audioverstärker stellt dem Kommunikationssystem einen Stereo Audioausgang für den Anschluss von zwei passiven Mono-Lautsprechern zur Verfügung. Diese Lautsprecher dienen als akustische Signalgeber um beispielsweise Menschen mit eingeschränkter visueller Wahrnehmung den Weg zu einer Tür zu weisen. Um eine ausreichende Lautstärke zu erreichen, werden Lautsprecher mit einer Leistung zwischen 5 W und 10 W eingesetzt. Es folgt, dass der Audioverstärker

- für automotive Anwendungen geeignet sein muss,
- mindestens über eine Ausgangsleistung von 5 W verfügen und

- eine Versorgungsspannung von +24 V oder kleiner nutzen muss.

TPA3123D2 Der Audioverstärker *TPA3123D2* [TI10] von Texas Instruments erfüllt diese Anforderungen. Hierbei handelt es sich um einen 25 W D-Class Audioverstärker, welcher für eine Versorgungsspannung zwischen +10 V und +30 V ausgelegt ist. Bei +24 V stellt der Audioverstärker, in Verbindung mit zwei 4 Ω -Lautsprechern, eine Ausgangsleistung von 20 W zur Verfügung.

Für den TPA3123D2 ist ebenfalls eine Platine zur Evaluation erstellt worden. Damit können die verschiedenen Steuerungsoptionen des Audioverstärkers getestet werden. Hierbei handelt es sich um die *Shutdown Control*, die *Mute Control* und die *4-Step Gain Control*. Die *Shutdown Control* dient dazu den Audioverstärker in einen Energie-sparenden Ruhemodus zu versetzen. Bei der *Mute Control* bleibt der Audioverstärker aktiv, allerdings wird dieser, durch die Deaktivierung der Audioausgänge, stummgeschaltet. Mit Hilfe der *4-Step Gain Control* kann die Eingangsimpedanz des Audioverstärkers in vier Stufen eingestellt werden. Dabei gilt, je niedriger die Eingangsimpedanz desto höher die Eingangsverstärkung des Audioverstärkers.

3.3. Galvanisch-getrennte digitale Ein- und Ausgänge

Die galvanisch-getrennten digitalen Ein- und Ausgänge ermöglichen dem Kommunikationssystem die Verarbeitung von digitalen Signalen des umgebenden Systems. Dazu müssen die digitalen Signale des umgebenden Systems so umgewandelt werden, dass die digitalen Ein- und Ausgänge des Computermoduls nicht beschädigt werden. Des Weiteren muss für die galvanische Trennung gesorgt werden. Dies bedeutet, dass die Signale auf einem nicht-elektrischen Weg übertragen werden müssen. Für diesen Zweck eignen sich für die Eingänge z.B. Optokoppler und für die Ausgänge z.B. Relais. Mit diesen Bauteilen werden die Signale mittels Licht oder magnetischen Feldern von einem elektrischen System in ein anderes übertragen.

In diesem Entwurf werden Optokoppler für die galvanische Trennung der Eingänge genutzt. Durch die galvanische Trennung können unterschiedliche Potenziale an

die beiden Seiten des Optokopplers angelegt werden. Das Anlegen einer Spannung von +24 V von Seiten der Systemumgebung an die Optokoppler wird als logisches *HIGH*-Signal interpretiert.

Für die digitalen Ausgänge werden Relais eingesetzt. Diese werden vom Kommunikationssystem angesteuert und schalten jeweils einen potenzialfreien Kontakt. Der Begriff „Potenzialfrei“ bedeutet, dass die Relais einen Signalschaltkreis schließen, aber kein Potenzial des Kommunikationssystems an ein anderes System angelegt wird. Bei der Auswahl der Relais wird von einem +24 V Signalpegel der Systemumgebung ausgegangen.

Das Kommunikationssystem soll insgesamt über jeweils fünf digitale galvanisch-getrennte Ein- und Ausgänge verfügen. Von diesen Ausgängen sind zwei von Beginn der Entwicklung an für einen bestimmten Zweck vorgesehen. Über einen Ausgang soll dem Fahrer eines Omnibus im ÖPNV ein Haltewunsch signalisiert werden. Mit dem zweiten Ausgang wird dem Fahrer eine Anfrage für etwaige Hilfestellungen signalisiert. Eine solche Hilfestellung ist beispielsweise das Ausklappen oder Aufstellen einer Rollstuhlrampe.

3.4. Beschleunigungssensor

Mit Hilfe des Beschleunigungssensors ermittelt das Kommunikationssystem seine Lage im Raum. Dies wird genutzt, um Schlaglöcher und andere Unebenheiten in der Straße zu erkennen. Aus diesem Grund muss der Sensor Beschleunigungen in allen drei Raumachsen erkennen und für den automotive Bereich geeignet sein. Des Weiteren muss der Sensor eine der vorgesehenen Versorgungsspannungen und eine der im System vorhandenen Datenschnittstellen nutzen. Auf Grund der vorausgewählten Module beschränken sich die zur Verfügung stehenden Versorgungsspannungen auf +24 V, +5 V oder +3,3 V. Das Computer-Modul beschränkt die nutzbaren Datenschnittstellen auf eine serielle Schnittstelle (UART), den I2C-Bus, SPI oder USB.

MMA8451Q Diese Vorgaben erfüllt der *MMA8451Q* [Fre15] von Freescale. Dieser Chip stellt die Messdaten mit einer maximalen Auflösung von 14 Bit dar. Die tatsächliche Genauigkeit hängt allerdings vom eingestellten Messbereich ab. Es exis-

tieren die Messbereiche ± 4 g und ± 8 g. Außerdem existiert der Messbereich ± 2 g, bei welchem die Genauigkeit am höchsten ist, da sich die Stufen bei der Digitalisierung nur auf einen Bereich von 4 g verteilen. In diesem Fall ergibt sich also eine maximale Genauigkeit von ungefähr

$$4 \text{ g} / 2^{14} = 244 \text{ } \mu\text{g}.$$

Wird der Messbereich auf ± 8 g eingestellt ergibt sich eine maximale Genauigkeit von ungefähr

$$16 \text{ g} / 2^{14} = 976 \text{ } \mu\text{g}.$$

Alle Angaben mit der Einheit **g** beziehen sich auf die Erdbeschleunigung. Dabei gilt $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$, ein **g** ist also die Erdbeschleunigung. Die Datenverbindung zwischen dem Beschleunigungssensor und Computermodule wird mittels I2C hergestellt.

3.5. Debugging-Schnittstelle

Das Computer-Modul verfügt über eine serielle Schnittstelle zu Debugging-Zwecken. Bei dieser seriellen Schnittstelle handelt es sich um die UART_A des Computer-Moduls. Um eine Nutzung dieser Debugging-Schnittstelle zu ermöglichen, müssen deren Signale auf eine weit verbreitete Schnittstelle umgesetzt werden. Für diesen Zweck bietet sich USB an.

FT232RL Die Signalumsetzung der UART-Signale auf USB erfolgt mit Hilfe eines *FT232RL* von *Future Technology Devices International Limited* (FTDI). Um die vom FT232RL bereitgestellte USB-Schnittstelle zu nutzen, muss auf einem PC der entsprechende Treiber von FTDI installiert werden. Dieser Treiber erkennt, wenn ein FT232RL an den PC angeschlossen wird und erstellt einen virtuellen Com Port.

Ein Com Port ist die Darstellung einer seriellen Schnittstelle nach dem ANSI EIA/TIA-232-F Standard (RS-232). Diese Schnittstelle ermöglicht asynchrone Punkt-zu-Punkt Verbindungen und wurde ursprünglich verwendet, um ein Modem mit einem Terminal zu verbinden. Diese Verbindungen ermöglichen das Übertragen einzelner Byte.

Der FT232RL bildet zusammen mit dem Treiber eine serielle Punkt-zu-Punkt Verbindung zwischen den Betriebssystemen des Computer-Moduls und des PCs. An beiden Endpunkten wird das grundlegende Protokoll des RS-232 Standards verwendet.

3.6. Spannungsversorgung

Als Versorgungsspannung ergibt sich aus dem Systemkontext eine Gleichspannung von +24 V. Diese Gleichspannung wird mit Hilfe der Lichtmaschine und der Batterie des Omnibusses zur Verfügung gestellt. Während des Startvorganges des Busmotors benötigt der Anlasser viel Strom, wodurch die Versorgungsspannung kurzzeitig einbrechen kann. Außerdem können Spannungsspitzen durch das Anlaufen der Lichtmaschine entstehen. Dieses kurzzeitige über- bzw. unterschreiten der Versorgungsspannung darf keine Schäden oder dauerhafte funktionale Einschränkungen am Kommunikationssystem verursachen.

Die vorausgewählten Module benötigen die Versorgungsspannungen +5 V und +3,3 V. Die oben beschriebenen Module werden ebenfalls mit diesen Spannungen versorgt. Der Audioverstärker wird mit +24 V versorgt.

3.6.1. 3V3-Versorgung

Bei der Erzeugung der +3,3 V Versorgungsspannung werden zwei lineare Spannungsregler eingesetzt, da diese kostengünstiger als Schaltregler sind. Damit die linearen Spannungsregler +5 V in +3,3 V umsetzen, werden sogenannte *Low Drop-Out* Spannungsregler verwendet. Es werden zwei Spannungsregler für +3,3 V eingesetzt, da das Cellular-Modul einen maximalen Spitzenstrom von 2,6 A benötigt (siehe [Unterabschnitt 2.3.4](#)). Durch die Verwendung von zwei identischen Reglern werden in der Serienfertigung größere Stückzahlen benötigt, wodurch die Kosten sinken.

NCP4632 Für die Versorgung mit +3,3 V werden zwei NCP4632 [ONS14] von ON Semiconductor eingesetzt. Diese können mit einem maximalen Strom von 3 A belastet werden und verfügen über einen Überstromschutz. Der NCP4632 wird im

TO-252 Gehäuse mit fünf Anschlüssen ausgeliefert. Das Gehäuse verfügt an der Unterseite über ein zusätzliches großes Lötpad zur Verbesserung der Wärmeableitung. Der Hersteller empfiehlt, dieses Pad mit einer Bezugspotenzialfläche unter dem Gehäuse zu verbinden.

Beim NCP4632 handelt es sich um einen Low-Drop-Spannungsregler (LDO). Das bedeutet, dass der minimale Unterschied zwischen Ein- und Ausgangsspannung des Reglers nur 0,7 V betragen muss. Andere Varianten von linearen Spannungsreglern benötigen einen größeren Unterschied zwischen Ein- und Ausgangsspannung, um ordnungsgemäß zu funktionieren.

Bei LDOs ist der Anschluss für die Eingangsspannung über ein P-Kanal MOSFET mit dem Anschluss für die Ausgangsspannung verbunden. Dieser MOSFET fungiert als regelbarer Widerstand, an welchem die Spannungsdifferenz zwischen Eingangsspannung und gewünschter Ausgangsspannung abfällt. Am MOSFET entsteht, auf Grund dieser Verwendungsart, ein Verlust in Form von Wärme. Das Gate des MOSFETs ist mit dem Ausgang eines Operationsverstärkers verbunden. Dieser Operationsverstärker erhält eine Referenzspannung, welche beispielsweise mit Hilfe einer Z-Diode erzeugt wird. Die Ausgangsspannung des LDOs wird über einen Spannungsteiler heruntergeteilt und dem Operationsverstärker als zweite Eingangsgröße zugeführt. Der Operationsverstärker führt einen SOLL-IST-Vergleich durch und ändert die Regelgröße, also den Widerstandswert des MOSFETs.

3.6.2. 5V-Versorgung

Um die Versorgung der Module mit einer Spannung von +5 V zu ermöglichen, wird ein Schaltregler eingesetzt. Da in diesem Fall die Eingangsspannung (+24 V) größer ist als die Ausgangsspannung (+5 V) des Schaltreglers, wird dieser als Abwärtswandler (*Step-Down Voltage Regulator*) bezeichnet.

LM22677-Q1 Der Spannungsregler ist ein *LM22677-Q1* [TI15] von Texas Instruments, der die +24 V auf +5 V herunter regelt. Dieser Spannungsregler liefert bei +5 V einen maximalen Strom von 5 A, dies entspricht einer maximalen Leistung von 25 W. Standardmäßig arbeitet der LM22677-Q1 mit einer Schaltfrequenz von 500 kHz und ist mit einer Strombegrenzung ausgestattet. Außerdem schaltet

der Regler sich selbst ab, wenn eine Temperatur von 150 °C überschritten wird. Der LM22677-Q1 wird in einem TO-263 Gehäuse mit sieben Anschlüssen ausgeliefert. An der Unterseite des Gehäuses befindet sich ein Lötpad, welches mit einer Bezugspotenzialfläche verbunden werden muss.

Der LM22677-Q1 ist ein Abwärtswandler, diese erreichen die gewünschte Ausgangsspannung durch Pulsweitenmodulation (PWM). Das bedeutet, dass am Ausgang des Abwärtswandlers schnelle (mehrere tausend Mal pro Sekunde) Impulse der Eingangsspannung abgegeben werden. Deshalb muss dieser Ausgang mit einer Induktivität verbunden sein. Diese Induktivität kann den schnellen Impulsen nicht folgen, weshalb sich hinter der Induktivität eine niedrigere Spannung (Sekundärspannung) einstellt. Über die Länge von Puls- und Pausenzeiten wird die Höhe dieser Spannung festgelegt. Es handelt sich nur um einen Spannungsregler, wenn die Sekundärspannung dem Abwärtswandler als Ist-Wert wieder zugeführt wird. Als nächstes Bauteil hinter der Induktivität wird ein Kondensator benötigt, welcher parallel zur angeschlossenen Last geschaltet ist. Dieser Kondensator stützt die Sekundärspannung während der Pausenzeiten, wodurch der Kondensator und die Induktivität während dieser Zeiten als Spannungs- bzw. Stromquelle für die angeschlossene Last genutzt werden. Dies funktioniert allerdings nur, wenn das Bezugspotenzial über eine Diode mit dem „Eingang“ der Induktivität verbunden ist. Mit Eingang ist die Seite der Induktivität gemeint, welche mit dem Abwärtswandler verbunden ist.

3.6.3. DC/DC-Wandler

Als galvanische Trennung für die Versorgungsspannung wird ein DC/DC-Wandler eingesetzt. Die nicht-elektrische Energieübertragung erfolgt innerhalb des DC/DC-Wandlers mit Hilfe von Magnetfeldern. Die DC/DC-Wandler existieren in verschiedenen Ausführungen, welche Unterschiede in den Eingangsspannungsbereichen, der Strombelastbarkeit und der Anzahl und Höhe der Ausgangsspannungen aufweisen. Des Weiteren gilt es zu Berücksichtigen, dass DC/DC-Wandler nur mit Einschränkungen bis zu einer Umgebungstemperatur von +85 °C arbeiten.

UQQ-24/4-Q12NB-C Als DC/DC-Wandler wird der *UQQ-24/4-Q12NB-C* [MP] von *Murata Power Solutions* eingesetzt (nachfolgend als UQQ bezeichnet). Hierbei handelt es sich um einen DC/DC-Wandler mit einem Primärspannungsbereich von +9 V bis +36 V und einer galvanisch-getrennten Sekundärspannung von +24 V. Des Weiteren kann die Sekundärseite mit einem maximalen Strom von 4 A belastet werden. Dies ergibt für die Sekundärseite eine maximale Leistung von 96 W. Mit der Sekundärspannung werden der Audioverstärker und ein Spannungsregler versorgt. Zur Verbesserung der Kühlung ist der UQQ in dieser Variante mit einer Grundplatte (*baseplate*) ausgestattet.

Wie oben erwähnt arbeiten DC/DC-Wandler nur eingeschränkt bis zu einer Umgebungstemperatur von +85 °C. Beim UQQ ist im Datenblatt ein maximaler Strom an der Sekundärseite von ungefähr 2,7 A für die Umgebungstemperatur von +85 °C angegeben. Dieser Strom gilt für einen UQQ mit Grundplatte bei einer Eingangsspannung von +12 V ohne aktive Belüftung.

Für die +24 V Sekundärspannung des DC/DC-Wandlers ergibt sich eine maximale Belastung von 45 W. Diese maximale Belastung wird aus den maximal 25 W des Spannungsreglers und den maximal 20 W des Audioverstärkers zusammengesetzt. Daraus folgt, dass für den DC/DC-Wandler ein Leistungspuffer von 51 W vorgesehen ist. Dieser Puffer wird benötigt, damit das Kommunikationssystem bei höheren Umgebungstemperaturen funktionsfähig bleibt. Des Weiteren gilt es zu berücksichtigen, dass der DC/DC-Wandler auch bei Eingangsspannungen kleiner +24 V die Ausgangsspannung aufrecht erhält. Dadurch steigt allerdings der Strom, welcher an der Primärseite des DC/DC-Wandlers benötigt wird.

3.7. Sonstiges

In diesem Abschnitt sind alle erforderlichen Funktionen zusammengefasst, für welche kein komplexes Modul benötigt wird.

Das Kommunikationssystem muss über einen Ethernet-Port mit einem LAN verbindbar sein. Außerdem muss eine SD-Speicherkarten-Schnittstelle vorhanden sein, um ein neues Betriebssystemimage im Flash-Speicher des Computermoduls installieren zu können.

Eine Weitere Anforderung ist, dass das Computer-Modul, nach dem Bootvorgang, alle Module einschalten muss. Ausgenommen davon sind nur die Spannungsversorgung und die Debugging-Schnittstelle. Dadurch kann das Computer-Modul die anderen Module in einer bestimmten Reihenfolge einschalten. Außerdem kann es erforderlich sein die Module abzuschalten, beispielsweise, wenn sie nicht benötigt werden.

Sowohl die Temperatur als auch die Versorgungsspannung des Kommunikationssystems sollen durch das Computer-Modul überwacht werden. Die Temperaturüberwachung bedarf keiner hohen Genauigkeit, weshalb eine einfache Schaltung bestehend aus einem Temperatur-abhängigen Widerstand und einem ADC-Eingang des Computer-Moduls ausreichend ist. Bei der Überwachung der Versorgungsspannung besteht die besondere Problematik, dass die Eingangsspannung des Kommunikationssystems überwacht werden muss. Das bedeutet, der Messpunkt befindet sich vor dem DC/DC-Wandler, weshalb das Messsignal galvanisch von einem Eingang des Computer-Moduls getrennt werden muss. Zur Vereinfachung dieser galvanischen Trennung wird auf eine kontinuierliche Messung der Eingangsspannung verzichtet. Stattdessen wird dem Computer-Modul mit einem digitalen Signal mitgeteilt, wenn ein bestimmter Schwellwert unterschritten wird.

Mit LEDs werden die Betriebszustände der einzelnen Module und der Status des gesamten Kommunikationssystem signalisiert. Als Status-LED für das Kommunikationssystem wird eine RGB-LED (Drei-Farben-LED) eingesetzt.

4. Implementierung

Dieses Kapitel behandelt die Implementierung vom BusCore2 Prototyp in der Version 1.1. Die Implementierung des Prototypen erfolgt Modul-weise. Deshalb wird für jedes Modul zunächst der Schaltplan erstellt und daraus das Platinenlayout abgeleitet. Aus Kostengründen erfolgt die Implementierung des Prototypen als zweiseitige Platine.

Werkzeuge und die Darstellung der Platine

Die Erstellung von Schaltplan und Platinenlayout erfolgt mit Hilfe der ECAD-Software *Eagle* (Version 7.3.0) der *CadSoft Computer GmbH*. Hierbei wird die Eagle-Variante für das Windows Betriebssystem verwendet. Deshalb wird ein PC mit dem Betriebssystem *Windows 7 Professional* von *Microsoft* eingesetzt. Im Platineneditor von Eagle wird das Platinenmaterial als grauer Rahmen abgebildet. Dabei wird die Platine immer in der Draufsicht dargestellt. Durch diese Perspektive verfügt die Platine über eine Oberseite (den sogenannten *Top-Layer* oder Bestückungsseite) und eine Unterseite (den sogenannten *Bottom-Layer* oder Lötseite). Da die Perspektive im Platineneditor nicht gedreht werden kann, wird der Bottom-Layer durch die Platine hindurch betrachtet. Deshalb sind alle Bauteile und Beschriftungen des Bottom-Layers spiegelbildlich dargestellt. Die Leiterbahnen, SMD-Lötpads und Kupferflächen werden beim Top-Layer in rot und beim Bottom-Layer in blau abgebildet. Wobei die Kupferflächen nur als gepunktete Rahmen dargestellt sind. Mit der Farbe Grün sind die elektrisch leitenden Verbindungen zwischen den beiden Platinenseiten markiert. Diese Verbindungen sind Bohrungen, welche innen metallisiert werden, um eine leitfähige Verbindung herzustellen. Für diese Verbindungen gibt es zwei Verwendungszwecke. Entweder werden in diesen Verbindungen beidseitig Bauelemente eingelötet oder die Verbindung dient als sogenannter *vertical interconnect access* (Via). Mit Vias werden beispielsweise die Leiterbahnen eines

Signals auf dem Top- und dem Bottom-Layer der Platine verbunden. Außerdem markieren grün schraffierte Flächen, die Teile der Platine, an welchen keinerlei Metall platziert werden darf. Dies sind beispielsweise die Bereiche unter den Antennen der Funkmodule, da Funkwellen durch Metalle reflektiert werden.

Maßnahmen zur Verbesserung der EMV

Zur Verbesserung der EMV, werden für jedes Modul die Versorgungsspannungen (+24 V, +5 V und +3,3 V) und das Bezugspotenzial (GND) mit SMD-Ferriten abgekoppelt. In den Abbildungen des Schaltplans befindet sich an jedem SMD-Ferrit die Angabe seiner charakteristischen Merkmale. Diese Angabe beginnt immer mit einem Z, wodurch verdeutlicht wird, dass der Nachfolgende Wert eine Impedanz ist. Die Hersteller geben diese Impedanz bei SMD-Ferriten typischerweise für eine Frequenz von 100 MHz an. Mit der zweiten Angabe, welche durch einen Schrägstrich von der Impedanz abgetrennt ist, wird die maximale Strombelastbarkeit des SMD-Ferrites angegeben.

Als einfache Maßnahme zur Verbesserung der EMV wird das Bezugspotenzial auf der Vorder- und Rückseite der Platine an die Kupferflächen unter den Modulen angelegt. Außerdem werden die ein- und ausgehenden Signale mit Hilfe verschiedener Filterschaltungen entstört. Insbesondere bei den hochfrequenten Datenschnittstellen USB und Ethernet sind Maßnahmen zur Verbesserung der Signalqualität vorgesehen. Diese beinhalten unter anderem die Angleichung der Leiterbahnlängen der differentiellen Signale. Bei differentiellen Signalen wird der Signalpegel nicht mit Hilfe des Bezugspotenzials interpretiert, stattdessen werden immer Signalpaare betrachtet. Ein Signalpaar setzt sich aus einer positiven und einer negativen Signalleitung zusammen. Der aktuelle Pegel (*LOW* oder *HIGH*) wird durch die Differenz zwischen diesen beiden Signalleitungen bestimmt. Notwendig ist dieses Verfahren, da Störeinflüsse durch Magnetfelder mit einer Schirmung der Leitungen nicht verhindert werden können. Allerdings wirken diese Störeinflüsse auf ein differentielles Signalpaar in gleicher Höhe, wodurch die Differenz zwischen diesen Signalen nicht beeinflusst wird. Damit die Störeinflüsse gleich wirken, müssen wiederum die elektrischen Eigenschaften der Signalleitungen gleich sein. Dies wird beispielsweise in USB-Kabeln durch das sogenannte Verdrillen der Signaladern und die gemeinsame

Schirmung der Signalpaare gewährleistet. Wenn ein Signalpaar als Leiterbahn über eine Platine geführt wird, müssen beide Leiterbahnen möglichst dicht nebeneinander liegen. Außerdem sollten Längenunterschiede der beiden Leiterbahnen ausgeglichen werden. Zwei Beispiel für das Ausgleichen von Längenunterschieden sind in **Abbildung 4.1** dargestellt. Bei diesen Beispielen werden Längenunterschiede ausgeglichen, welche durch die Kurvenführung der Leiterbahnen entstanden sind. Die Signalpaare sind in der Abbildung durch schwarze Rahmen kenntlich gemacht.

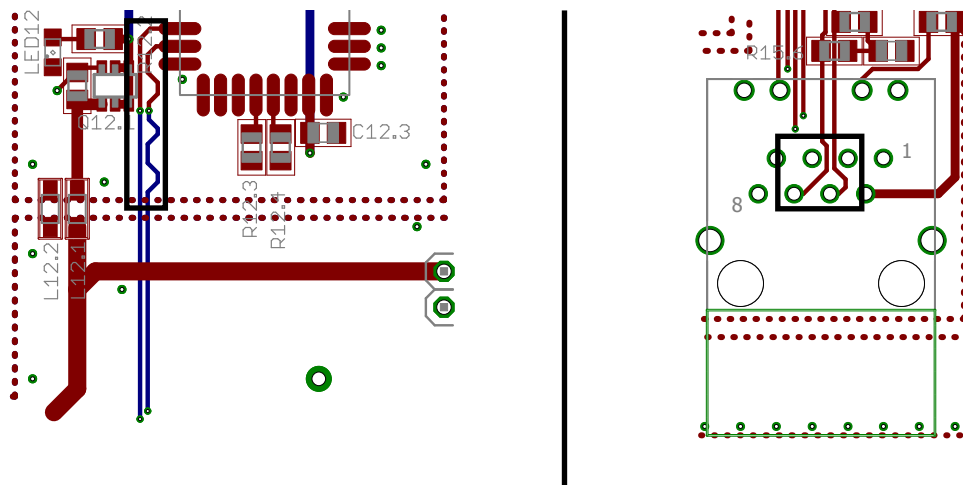


Abbildung 4.1.: Beispiel für den Ausgleich von Längenunterschieden bei differenziellen Signalpaaren. Im linken Teil ist ein USB Signalpaar dargestellt und im rechten Teil ein Ethernet Signalpaar.

Strombelastbarkeit der Leiterbahnen

Bei der Betrachtung des **Platinenlayouts** fallen die sehr unterschiedlichen Breiten der einzelnen Leiterbahnen auf. Diese ergeben sich aus den unterschiedlichen Anforderungen an die Strombelastbarkeit der Leiterbahnen (vergl. Abschnitt 12.7 in [HH96]). Allgemein gilt, je größer die Querschnittsfläche eines elektrischen Leiters, desto höher die maximale Strombelastbarkeit. Dieser Umstand beruht auf der Tatsache, dass durch eine größere Querschnittsfläche der Ohmsche-Widerstand eines elektrischen Leiters abnimmt. Die Ohmschen-Widerstände von elektrischen Leitern verursachen Verlustleistungen in Form von Wärme, wenn die Leiter von einem Strom durchflossen werden. Wird dies bei der Wahl der Querschnittsfläche nicht berücksichtigt, kann dies eine unzulässige Erwärmung des elektrischen Leiters in der Betriebsphase des Systems verursachen. Die Querschnittsfläche einer Leiter-

bahn ergibt sich, wenn die Breite mit der Dicke der Leiterbahn multipliziert wird. Da die Dicke des Kupfermaterials auf der Ober- und Unterseite der Leiterplatte (oder Platine) Produktions-bedingt auf 35 µm festgelegt ist, wird der Querschnitt der Leiterbahnen durch deren Breite bestimmt.

Deshalb sind beispielsweise die Leiterbahnen hinter den Spannungsreglern (1,27 mm) breiter, als die Leiterbahnen der digitalen Signale (0,3 mm). In **Tabelle 4.1** sind Richtwerte für die Strombelastbarkeit der verschiedenen Leiterbahnbreiten (bei einer Schichtdicke von 35 µm) des Platinenherstellers PCB-Pool abgebildet. Die Tabelle zeigt, dass die Leiterbahnen hinter den Spannungsreglern mit mehreren Ampere belastet werden können, während die Leiterbahnen der digitalen Signale für einen Strom von wenigen Mikroampere bemessen sind.

Leiterbahnbreite	Max. Strom in Abhängigkeit zur Temperaturerhöhung				
Temperatur	10 °C	20 °C	30 °C	45 °C	60 °C
0,25 mm	0,5 A	0,8 A	1,0 A	1,3 A	1,6 A
0,50 mm	1,0 A	1,6 A	2,0 A	2,5 A	3,0 A
1,00 mm	2,2 A	3,0 A	3,6 A	4,2 A	4,8 A
1,50 mm	3,0 A	3,8 A	4,6 A	5,3 A	6,5 A
2,00 mm	3,8 A	5,0 A	6,5 A	7,5 A	8,5 A
3,00 mm	4,5 A	6,5 A	8,0 A	9,5 A	11 A
4,00 mm	6,0 A	8,5 A	10 A	12 A	13,5 A
5,00 mm	7,0 A	10 A	12 A	14,5 A	16 A
6,00 mm	7,5 A	11 A	14 A	16 A	18 A
8,00 mm	9,0 A	14 A	17 A	20 A	22,5 A
10,00 mm	10 A	16 A	20 A	23 A	26 A

Tabelle 4.1.: Richtwerte für die Strombelastbarkeit von Kupferleiterbahnen.

Quelle: <http://www.pcb-specification.com/de>

Die Strombelastbarkeit ist besonders beim Anschluss und der Verteilung der Bezugspotenziale wichtig. Deshalb ist es sinnvoll, das Bezugspotenzial, wie oben bereits erwähnt, an alle anderweitig nicht genutzten Kupferflächen der Platine anzuschließen. Dadurch ergibt sich bei den meisten Modulen eine hervorragende elektrische Verbindung zwischen den elektrischen Lasten und dem Bezugspotenzial.

Platinenform und Gehäuse

Als Gehäuse des Kommunikationssystem wird eine *NET-BOX 220* von *OKW* [OKW07] eingesetzt. Durch dieses Gehäuse ergeben sich die Abmessungen und die Form der Platine (siehe *Platinenlayout*). Außerdem sind dadurch die Durchmesser und Positionen der Befestigungsbohrungen festgelegt. Das Gehäuse verfügt über einen abgetrennten Bereich, in welchem die Kabelanschlüsse untergebracht werden. Auf Grund dieser besonderen Anforderungen sind sämtliche Anschlussklemmen und Steckbuchsen am unteren Rand der Platine positioniert. Dadurch muss nur der kleinere Teil des Gehäusedeckels entfernt werden, um Änderungen an den Anschlüssen des Kommunikationssystems vorzunehmen. In diesem Bereich befindet sich auch die, im *Abschnitt 3.7* erwähnte, Status-LED (*WL-SFTW* von *Würth* [Wue11b]) des Kommunikationssystems.

In der *Abbildung 4.2* ist der untere Teil der Platine, auf welchem die Klemmenleisten positioniert sind, dargestellt. Auf dieser Abbildung sind Vias erkennbar, welche entlang des Platinenrandes die Kupferflächen auf dem Top- und dem Bottom-Layer miteinander verbinden. Diese Maßnahme ist eine Verbesserung der EMV, da ohne die Vias störende Magnetfelder am Rand der Platine auftreten können.

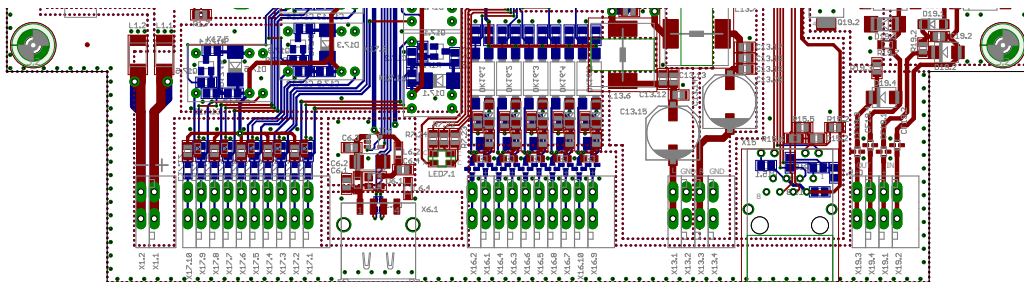


Abbildung 4.2.: Von Links nach Rechts: Zwei Klemmen für die Versorgungsspannung; Zehn Klemmen für die Relais-Ausgänge; Der USB-Client-Port; Zehn Klemmen für die Optokoppler-Eingänge; Vier Klemmen für den Stereo-Audioausgang; Der Ethernet-Port; Vier Klemmen für die IBIS-Schnittstelle

Allerdings existieren vier Anschlüsse, die nicht in diesem unteren Bereich der Platine platziert sind. Einer dieser Anschlüsse ist die USB-Buchse der Debugging-Schnittstelle (siehe *Abschnitt 4.10*), da diese nur im Falle einer Wartung benötigt

wird. Im Wartungsfall ist davon auszugehen, dass das Gehäuse des Kommunikationssystems komplett geöffnet wird. Die drei verbliebenen Anschlüsse sind die Antennenanschlüsse des GNSS- und des Cellular-Moduls. Diese Anschlüsse werden über kurze Koaxialkabel mit einer Koaxialkabel-Buchse verbunden. Die Buchse wird in der Seitenwand des Gehäuses verschraubt und ermöglicht den Anschluss eines Koaxial-Antennenkabels. Dazu muss das Gehäuse nicht geöffnet werden, da die Buchse, durch eine Bohrung in der Seitenwand, aus dem Gehäuse herausgeführt wird.

4.1. Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung des Kommunikationssystems besteht aus vier Modulen, dem DC/DC-Wandler, dem +5 V-Spannungsregler und den beiden +3,3 V-Linear-Reglern. Ab der Sekundärseite des DC/DC-Wandlers teilen sich diese vier Module ein Bezugspotenzial. Alle vier Module sind auf der jeweiligen Sekundärseite mit einer LED als Betriebsanzeige versehen.

DC/DC-Wandler Wie im [Abschnitt 3.6](#) beschrieben, muss die Spannungsversorgung des Kommunikationssystems galvanisch vom umgebenden System getrennt sein. Der zu diesem Zweck eingesetzte DC/DC-Wandler ist von der im [Schaltplan auf Seite 1](#) dargestellten Schaltung umgeben. Da der DC/DC-Wandler vom Typ UQQ-24/4-Q12NB-C ist, ist die Einschaltlogik negativ (erkennbar an dem N in der Bezeichnung). Das bedeutet, dass der Anschluss ON/OFF_CONTROL mit dem Bezugspotenzial verbunden sein muss, damit der DC/DC-Wandler eingeschaltet ist. Die positive Logik ist in diesem Fall nicht nutzbar, da für das Einschalten eine Spannung zwischen +3,5 V und 15 V benötigt wird. Dies bedeutet, dass bei einem DC/DC-Wandler mit positiver Logik und einer Eingangsspannung von +24 V nicht die Anschlüsse +VIN und ON/OFF_CONTROL miteinander verbunden werden können, um diesen einzuschalten. Durch den TRIM Anschluss kann die Ausgangsspannung des DC/DC-Wandlers entweder um bis zu zehn Prozent erhöht oder um bis zu zwanzig Prozent verringert werden. Dazu muss der TRIM Anschluss über einen Widerstand mit einem der SENSE Anschlüsse verbunden werden. Im konkre-

ten Fall wird keine Änderung der Ausgangsspannung benötigt, weshalb der TRIM Anschluss nicht genutzt wird.

An der Sekundärseite des DC/DC-Wandlers ist eine *Polymeric positive Temperature Coefficient* (PTC)-Sicherung (F2) platziert. Die PTC-Sicherungen bieten den Vorteil des automatischen Zurücksetzens nach dem Auslösen der Sicherung. Als F2 wird eine *POLYFUSE 30R400* [Lit10] des Herstellers *Littelfuse* mit einem Haltestrom von 4 A eingesetzt.

Die Primärseite des DC/DC-Wandlers ist mit der Strom-kompensierten SMD-Entstördrossel L1.3 (WE-UCF [Wue15] von *Wuerth Elektronik*) verbunden. Diese dient zur Kompensation von Gleichtaktstörungen. Vor der Ringkerndrossel befinden sich drei Elektrolyt-Kondensatoren (C1.2, C1.3 und C1.4) mit einer Kapazität von jeweils 470 μF . Diese dienen als Stützkondensatoren für das Kommunikationssystem. Die Diode D1.1 ist eine *Transient Voltage Suppressor* (TVS)-Diode von *Fairchild* (SMBJ24(C)A [Fai02b]). Diese TVS-Diode erzeugt einen Kurzschluss wenn die angelegte Spannung einen Wert zwischen 26,7 V und 29,5 V überschreitet. Diese Grenzspannung wird durch die Zusammensetzung der TVS-Diode festgelegt. Die TVS-Diode schützt den DC/DC-Wandler vor Überspannungsspitzen. Mit Überspannungsspitzen sind kurzzeitige (wenige Mikrosekunden) hohe Überspannungen gemeint, welche beispielsweise durch elektrostatische Entladungen entstehen. Für den Schutz vor längeren (Millisekunden bis Sekunden) Überspannungen ist der Varistor R1.1 von *Wuerth Elektronik* (WE-VD 820412001 [Wue10]) vorgesehen. Ab einer Spannung von 33 V wird der Widerstand des Varistors abrupt kleiner. Dadurch sind die Versorgungsspannung und das Bezugspotenzial über den Varistor niederohmig verbunden. Bei einem solchen Kurzschluss wird die Sicherung F1 von einem großen Strom durchflossen, welcher die Sicherung auslösen kann. Ob die Sicherung auslöst, wird durch die Dauer des Kurzschlusses und die Trägheit der Sicherung bestimmt. Nimmt die Versorgungsspannung wieder einen üblichen Betriebswert an, wird die TVS-Diode oder der Varistor wieder hochohmig. Die Diode D1.2 verhindert eine Beschädigung des Kommunikationssystems, wenn beim Anschluss der Versorgungsspannung das +24 V-Potenzial mit dem Bezugspotenzial vertauscht wird. Zur Entkopplung von Kommunikationssystem und umgebenden

System bezüglich hochfrequenter Störungen, werden die Ferrite L1.1 und L1.2 eingesetzt.

Um zu erkennen, ob die Versorgungsspannung des Kommunikationssystems einen bestimmten Wert unterschreitet (*Brown-Out-Detection*), wird der Komparator U2 (LM397 von Texas Instruments [TI13]) eingesetzt. Die Höhe des Grenzwertes ergibt sich aus den Verhältnissen der Spannungsteiler an den Eingängen des Komparators. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Spannung zwischen R1.4 und R1.5 als Referenzspannung dient. Der Spannungsteiler für die Referenzspannung befindet sich hinter der Diode D1.2. Die Spannung hinter der Diode wird für wenige hundert Millisekunden von den Stützkondensatoren des Kommunikationssystems aufrechterhalten, wodurch auch die Referenzspannung erhalten bleibt. Zwischen den Widerständen R1.2 und R1.3 ergibt sich die Eingangsspannung des Komparators, welche die zu überwachende Spannung ist. Die Spannungsteiler sind nötig, da die Versorgungsspannung des Komparators immer höher sein muss als die zu vergleichenden Spannungen.

Der Ausgang des Komparators ist mit dem Optokoppler OK1 (*SFH6206* von Vishay [Vis15]) verbunden. Dieser Optokoppler dient als galvanische Trennung für das digitale Schwellwert-Signal. Mit Hilfe des Optokopplers erfolgt auch die Umsetzung des +24 V-Signals in das für das Computer-Modul geeignete +3,3 V-Signal.

Im normalen Betriebszustand, liegen +24 V als Versorgungsspannung an, die zwischen dem Ausgang des Komparators und dem Bezugspotenzial +24 V messbar sind. In diesem Fall fließt kein Strom durch den Optokoppler. Die Referenzspannung des Komparators beträgt +3 V und die Eingangsspannung des Komparators beträgt +8V. Wird die Versorgungsspannung des Systems kleiner oder getrennt, verringert sich auch die Eingangsspannung des Komparators. Dadurch unterschreitet die Eingangsspannung den Wert der Referenzspannung und der Ausgang des Komparators wird mit dem Bezugspotenzial verbunden. Dies geschieht, wenn die Versorgungsspannung des Kommunikationssystems einen Wert von +9 V unterschreitet. Nun fließt ein Strom durch den Widerstand R1.6, den Optokoppler und den Komparator. Durch diesen Strom verbindet der Optokoppler das +3,3 V-Potenzial mit der Signalleitung, welche mit dem Computer-Modul verbunden ist.

5V - Versorgung Wie in [Unterabschnitt 3.6.2](#) beschrieben, wird für die Versorgung des Kommunikationssystems mit +5 V ein LM22677-Q1 Spannungsregler eingesetzt. Der Spannungsregler und dessen Beschaltung sind auf [Seite 2 des Schaltplans](#) dargestellt.

Die Eingangsseite des LM22677-Q1 besteht aus den drei Anschlüssen VIN, EN und RT/SYNC. An VIN wird die +24 V Versorgungsspannung angelegt, welche vom DC/DC-Wandler abgegeben wird. Diese Versorgungsspannung wird mit den Kondensatoren C2.1 und C2.2 gestützt. Über den EN Anschluss kann der LM22677-Q1 ein- bzw. ausgeschaltet werden. Dieser Anschluss ist über den Widerstand R2.2 mit der Versorgungsspannung verbunden, damit der Regler permanent eingeschaltet ist. Der RT/SYNC Anschluss dient zur Anpassung der Schaltfrequenz des Spannungsreglers. Wird der Anschluss über einen Widerstand mit dem Bezugspotenzial verbunden, kann die Schaltfrequenz des Reglers im Bereich zwischen 200 kHz und 1 MHz variiert werden. Des Weiteren kann beim Einsatz von mehreren Schaltregler die Schaltfrequenz über den RT/SYNC Anschluss synchronisiert werden.

Die Ausgangsseite des LM22677-Q1 besteht aus den drei Anschlüssen FB, BOOT (*BOOT -> BOOTstrap input*) und SW (*SW -> SWitch output*). Dabei steht FB für *FeedBack input*, das bedeutet dieser Anschluss dient als Rückkopplung für den Regler. Beim SW Anschluss handelt es sich um den eigentlichen Ausgang des Spannungsreglers.

Der BOOT Anschluss wird benötigt, damit der Leistungs-MOSFET des Reglers schalten kann. Ein funktionales Block Diagramm ist im Abschnitt 7.2 des Datenblattes [\[TI15\]](#) abgebildet. Am Gate-Anschluss dieses MOSFETs ist ein sogenannter Gate-Treiber verbaut, um die Umschaltzeit des MOSFETs zu verringern. Mit Umschaltzeit ist die Zeit gemeint, welche der MOSFET benötigt um vom leitenden Zustand in den nicht leitenden Zustand (und umgekehrt) überzugehen. Der Gate-Treiber wird mit einer internen Spannung des LM22677-Q1 versorgt und nutzt als Bezugspotenzial den Source-Anschluss des MOSFETs, welcher mit dem SW Anschluss verbunden ist. Da diese interne Spannung über den VIN Anschluss gespeist wird, muss der Gate-Treiber aus einer anderen Quelle versorgt werden, wenn der MOSFET leitend geschaltet ist (VIN und SW sind verbunden). In diesem Fall

besteht zwischen der internen Versorgungsspannung des Gate-Treibers und dessen Bezugspotenzial kein ausreichender Potenzial-Unterschied. Für diesen Fall wird der Kondensator (C2.3) am BOOT Anschluss benötigt. Intern ist der BOOT Anschluss mit der Versorgungsspannung für den Gate-Treiber verbunden. Dadurch wird C2.3 auf diese Spannung aufgeladen, während der MOSFET des Reglers abgeschaltet ist (VIN und SW sind nicht verbunden). Wenn der MOSFET leitend geschaltet wird, stellt der Kondensator C2.3 die Versorgungsspannung für den Gate-Treiber bereit. Der Kondensator C2.3 hat eine Kapazität von 10 nF und entspricht der Empfehlung des Herstellers.

Da der LM22677-Q1 ein Abwärtswandler ist, sind einige externe Bauteile für die Funktion notwendig. Bei diesen Bauteilen handelt es sich um die Schottky-Diode D2.1, die Induktivität L2.1 und den Kondensator C2.4. Mit diesen Bauteilen wird die im [Unterabschnitt 3.6.2](#) beschriebene Funktion gewährleistet. Der Kondensator C2.5 dient als zusätzlicher Stützkondensator für die angeschlossenen Lasten.

3V3 - Versorgung Für die Versorgung des Kommunikationssystems mit +3,3 V, werden zwei NCP4632 Linearregler eingesetzt (siehe [Unterabschnitt 3.6.1](#)). Der Schaltplan der +3,3 V Versorgung ist auf [Seite 3](#) dargestellt. Dieser Plan ist in zwei Schaltungen aufgeteilt. Den Kern der Schaltungen bildet jeweils ein NCP4632 (IC3 und IC4). Dabei wird mit IC4 ausschließlich das Cellular-Modul versorgt. Mit IC3 hingegen werden alle anderen Module und Bauteile versorgt, welche eine Versorgungsspannung von +3,3 V benötigen.

Ein NCP4632 benötigt als Beschaltung nur jeweils einen Kondensator an der Eingangs- und Ausgangsseite. Über den CE Anschluss (*Chip Enable*) kann der Linearregler ein- bzw. ausgeschaltet werden. Diese Funktion wird innerhalb des Kommunikationssystems nicht benötigt, weshalb der CE Anschluss mit der +5 V Versorgungsspannung verbunden ist. Der SENSE/VADJ Anschluss ist die nach außen geführte Rückkopplung für den Regler, deshalb muss dieser Anschluss mit dem Ausgang des Linearreglers verbunden werden. Über diesen Anschluss kann mit Hilfe eines Spannungsteilers die Ausgangsspannung erhöht oder verringert werden.

Der Spannungsteiler (bestehend aus R3.2 und R3.3) wird zur Messung der Platinentemperatur genutzt. Der Widerstand R3.2 ist ein *Negative Temperature Coefficient Thermistor* (NTC)-Widerstand mit einem Widerstandswert von 4,7 kΩ bei

einer Temperatur von 25 °C. Da der Widerstandswert eines NTC-Widerstandes bei steigender Temperatur abnimmt, werden diese auch als Heißleiter bezeichnet. Wie aus dem Schaltplan (Seite 3 und Seite 5) ersichtlich ist, sind R3.2 und R3.3 mit dem Eingang eines Analog-Digital-Wandlers (*Analog-to-Digital-Converter* (ADC)) vom Computer-Modul verbunden. Dieser Eingang ist als Belastung für den Spannungsteiler vernachlässigbar, weshalb dieser wie ein unbelasteter Spannungsteiler behandelt werden kann. Bei einer Temperatur von 25 °C liegt am Eingang des ADC eine Spannung von +1,65 V an. Wenn die Temperatur steigt, wird auch diese Spannung größer.

4.2. Modulabschaltung

Wie in Abschnitt 3.7 beschrieben, sollen die Module bei Betriebsbeginn des Kommunikationssystem abgeschaltet sein. Abgeschaltet bedeutet hierbei, dass die Module vollständig von ihrer jeweiligen Versorgungsspannung getrennt sind. Die einzige Ausnahme ist der Audioverstärker, dieser befindet sich in einem *Shutdown*-Modus.

Den Kern dieser Schaltung (siehe Abbildung 4.3) bildet ein *FDC5614P* [Fai02a] von *Fairchild Semiconductor Corporation*. Hierbei handelt es sich um ein P-Kanal MOSFET mit einer maximale Strombelastbarkeit von 3 A. Diese Strombelastbarkeit wird benötigt, da beim Cellular-Modul kurzzeitige Spitzenströme von 2,6 A auftreten können. Für die anderen Module, die mit dieser Schaltung ein- und ausgeschaltet werden sollen, könnte auch ein anderer Transistor mit geringere Strombelastbarkeit verwendet werden. Allerdings benötigt dies mehr unterschiedliche Bauteile, welche je nach produzierter Stückzahl des Kommunikationssystems zu höheren Kosten führen.

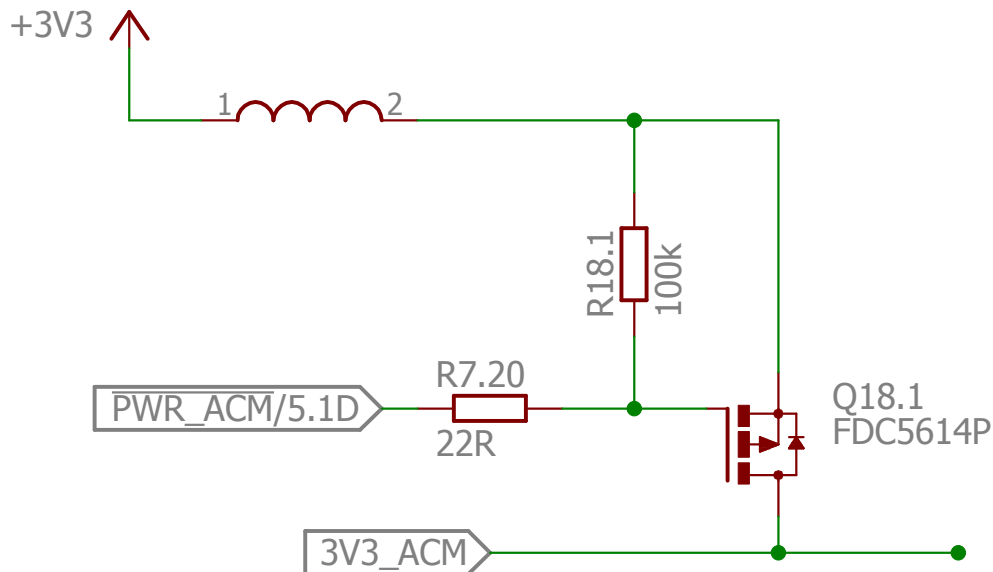


Abbildung 4.3.: Beispiel einer MOSFET-Schaltung für die Aktivierung und Deaktivierung einzelner Module. Die dargestellte Schaltung befindet sich am Beschleunigungssensor.

Durch die jeweiligen Transistoren wird an den einzelnen Modulen jeweils die +3,3 V Versorgungsspannung ein- bzw. ausgeschaltet. Damit die Module nach dem Einschalten des Kommunikationssystem nicht aktiv sind, muss am Gate-Anschluss des Transistors eine Spannung von +3,3 V anliegen. Aus diesem Grund verbindet ein 100 k Ω Widerstand den Gate- und den Source-Anschluss des Transistors. Um ein Modul einzuschalten muss mit Hilfe des jeweiligen GPIO-Anschlusses vom Computer-Modul der Gate-Anschluss des Transistors mit dem Bezugspotenzial verbunden werden. Der 22 Ω Widerstand entkoppelt die GPIO-Anschlüsse des Computer-Moduls und verschlechtert damit die Übertragung von hochfrequenten Störungen.

4.3. USB-Hub

Auf [Seite 4 des Schaltplans](#) ist der USB-Hub dargestellt. Dieser gliedert sich in zwei Teile. Der größere Teil des Schaltplans beschreibt die Beschaltung, welche zum Betrieb und zur Konfiguration des USB-Hubs benötigt wird. Während der kleinere Teil des Schaltplans die Komponenten und Beschaltung des nach außen

geführten USB-Ports beschreibt. Die beiden Teile sind durch eine gestrichelte Linie voneinander getrennt

Der Schaltplan des USB-Ports ist auf [Seite 4](#) in der unteren linken Ecke dargestellt. Den Kern der Schaltung bildet die USB-Buchse vom Typ A (X6.1), welchem für den Anschluss einzelner externer USB-Geräte genutzt werden kann. Da das Kommunikationssystem als USB-Host eingesetzt wird, muss diese USB-Buchse die Schirmung von angeschlossenen USB-Kabeln gewährleisten. Die Schirmung ist dann gewährleistet, wenn der metallene Schirm des USB-Kabels mit einem Bezugspotenzial verbunden ist. Dies geschieht durch den Kontakt zwischen den außen liegenden Metallteilen von Buchse und Stecker, da der Schirm des Kabels mit dem metallenen Äußeren des Steckers verbunden ist. Deshalb sind die Anschlüsse Z1 und Z2 der USB-Buchse X6.1 mit dem Bezugspotenzial verbunden. Mit dem gleichen Bezugspotenzial ist auch der Anschluss 4 der USB-Buchse verbunden. Dieser dient als Bezugspotenzial für die Versorgungsspannung, welche einem angeschlossenen USB-Client über den Anschluss 1 der USB-Buchse zur Verfügung gestellt wird. Der SMD-Ferrit L6.4 entkoppelt das Bezugspotenzial der USB-Buchse vom Bezugspotenzial des restliche USB-Systems zum Schutz vor hochfrequenten Störungen.

An den Anschlüssen 2 und 3 der USB-Buchse ist das differentielle Signalpaar angeschlossen. Dieses Signalpaar ist über den SMD-Filter L6.3 mit Down-Stream-Port 5 des USB-Hubs verbunden. Der Filter L6.3 ist ein stromkompensierter Datenleitungsfilter, der Gleichtaktstörungen entgegenwirkt. Des Weiteren sind beide Signalleitungen mit dem TVS-Dioden-Array D6.1 verbunden, welches als Schutz vor elektrostatischen Überspannungen dient.

Die Versorgungsspannung für einen angeschlossenen USB-Client wird über den SMD-Ferrit L6.1 gegen hochfrequente Störungen entkoppelt. Die Kondensatoren C6.1, C6.2 und C6.3 werden als Stützkondensatoren für diese Versorgungsspannung genutzt. Der Leistungsschalter *TPS2051B* von Texas Instruments (IC 6) wird durch den USB-Hub angesteuert und dient dazu die Versorgungsspannung des USB-Clients ein- bzw. auszuschalten. Dazu ist der Ausgang des Schalters mit den Kondensatoren (C6.2, C6.3) und dem SMD-Ferrit (L6.1) verbunden. Am Eingang

des Schalters liegt die USB-typische Versorgungsspannung von 5 V an. Der OC#-Anschluss von IC 6 ist mit dem OCS5_N-Anschluss des USB-Hubs verbunden. Über diese Verbindung signalisiert der Leistungsschalter, wenn dieser von einem zu großen Strom durchflossen wird. Außerdem wird in diesem Fall der Strom auf 1 A begrenzt. Wenn dieser Strom für eine längere Zeit fließt, erwärmt sich der Leistungsschalter bis zu dem Punkt, bei welchem der Übertemperaturschutz ausgelöst wird. In diesem Fall wird die Verbindung durch den Leistungsschalter unterbrochen und die Versorgungsspannung für den USB-Client ist getrennt. Des Weiteren verfügt der Leistungsschalter über einen EN#-Anschluss, welcher mit dem P RTPWR5-Anschluss des USB-Hubs verbunden ist. Über diese Verbindung kann der USB-Hub den Leistungsschalter deaktivieren, wodurch wiederum die Versorgungsspannung für den USB-Client getrennt wird.

Die Schaltung dieses USB-Client-Ports ist einer Schaltung vom Evaluationsboard [Tor14b] des Colibri VF61 nachempfunden. Auf diesem Evaluationsboard ist ebenfalls ein USB-Hub vorhanden, an welchem vier Down-Stream USB-Client-Ports angebunden sind.

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird der USB-Hub mit +3,3 V versorgt und erzeugt aus dieser Spannung die intern genutzten +1,8 V. Für beide Spannungen müssen Stützkondensatoren vorgesehen werden. Diese Stützkondensatoren sind mit C5.1 bis C5.13 bezeichnet. Es werden dreizehn Stützkondensatoren benötigt, da die Anschlüsse für die Versorgungsspannungen auf alle Seiten des ICs verteilt sind und Stützkondensatoren möglichst dicht am Anschluss platziert werden sollen. Das Platinenlayout des USB-Hubs ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

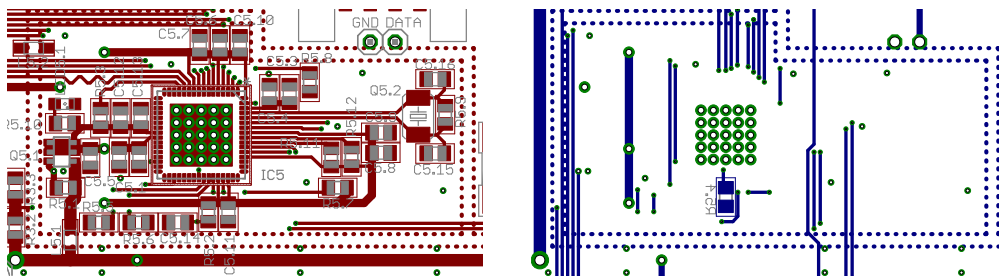


Abbildung 4.4.: Das Platinenlayout des USB-Hubs – Links ist der Top-Layer und rechts der Bottom-Layer dargestellt.

Die grundlegende Konfiguration des USB-Hubs wird mit Hilfe von drei Konfigurationsanschlüssen vorgenommen. Deren Status wird nach einem Reset des Hubs überprüft und dadurch eine von acht Konfigurationen ausgewählt. Die Konfigurationsanschlüsse sind mit CFG_SEL bezeichnet. Da der Anschluss CFG_SEL2 mit einem Pull-Up und die Anschlüsse CFG_SEL1 und CFG_SEL0 jeweils mit einem Pull-Down Widerstand versehen sind, ist die Konfiguration **1 0 0** ausgewählt. Das bedeutet, dass für die internen Register des Hubs die Standardwerte verwendet werden, die sogenannten *Strap Options* deaktiviert sind und das sogenannte *Dynamic Power Switching* aktiviert ist. Bei den *Strap Options* handelt es sich um eine ganze Reihe zusätzlicher Konfigurationsmöglichkeiten, wie z.B. das Ändern der Portpolarität für die Down-Stream Ports oder die Deaktivierung von ungenutzten Down-Stream Ports. Mit *Dynamic Power Switching* ist gemeint, dass alle Down-Stream Ports unabhängig voneinander ein- bzw. ausgeschaltet werden können.

Der Anschluss VBUS_DET dient als Erkennung, ob die Versorgungsspannung des Up-Stream Ports anliegt. Dieser Anschluss ist mit +3,3 V verbunden, da der USB-Hub nicht über den Up-Stream Port versorgt wird.

Über den Anschluss SUSP_IND/LOCAL_PWR/NON_REM0 wird festgelegt, ob der USB-Hub von einer lokalen Quelle oder über die +5 V des USB Up-Streams versorgt wird. Durch den Pull-Up Widerstand R5.7 ist der USB-Hub auf die lokale Spannungsversorgung konfiguriert.

Der Anschluss SDA ist über den Widerstand R5.4 mit dem Bezugspotenzial verbunden, da diese I2C-Schnittstelle nicht benutzt wird und unbenutzte Anschlüsse in einen definierten Zustand versetzt werden sollten. Aus diesem Grund sind auch die Anschlüsse BOOST0, BOOST1 und GANG_EN mit dem Bezugspotenzial verbunden und die Signalleitungen von Down-Stream Port 7 mit Pull-Ups versehen.

Für den Anschluss RBIAS enthält das Datenblatt des Hubs die Vorgabe, dass ein 12 k Ω Widerstand als Pull-Down einzusetzen ist. Ebenfalls dem Datenblatt ist die Beschaltung des 24 MHz Schwingquarzes entnommen. Dort ist eine Formel für die Berechnung der Kapazitäten der Kondensatoren C5.15 und C5.16 angegeben. Deren jeweilige Kapazität richtet sich nach der Kapazität des verwendeten Quarzes. Der Anschluss EPAD ist kein regulärer Anschluss des USB-Hubs, sondern die Bezeichnung des Thermal-Pads. Hierbei handelt es sich um eine Besonderheit von

Eagle, da der Anschluss im Schaltplan nur benötigt wird, damit das Thermal-Pad im Platinenlayout mit der Fläche unter dem IC verbunden werden kann. Diese Fläche ist mit dem Bezugspotenzial verbunden, wodurch die Wärmeableitung verbessert wird.

Mit Hilfe des RESET_N Anschlusses kann beim USB-Hub ein Reset durchgeführt werden. Dieser Anschluss ist mit einem Pull-Up Widerstand und einem Kondensator verbunden. Der Kondensator wiederum ist mit dem Bezugspotenzial verbunden. Durch diese Schaltung und die Werte von Widerstand und Kondensator ergibt sich ein spezifisches Verhalten am RESET_N Anschluss, wenn die Versorgungsspannung eingeschaltet wird. Nach dem Einschalten der Versorgungsspannung wird der Kondensator mit einem Strom, dessen Höhe durch den Widerstand festgelegt ist, aufgeladen. Durch diesen Umstand verzögert sich das Erreichen der +3,3 V am RESET_N Anschluss um 20 ms. Diese Zeit wird benötigt, um einen Reset des USB-Hubs durchzuführen. Das bedeutet, dass die beschriebene Schaltung eine Power-On-Reset-Funktion gewährleistet, weshalb der Reset nicht mit Hilfe des Computer-Moduls durchgeführt werden muss.

Die Verbindung des USB-Hubs mit dem Computer-Modul erfolgt über den Up-Stream Port des Hubs. Des Weiteren ist am Down-Stream Port 1 des Hubs das Cellular-Modul angeschlossen. Mit Port 2 ist das Bluetooth-Modul 1 und mit Port 3 das Bluetooth-Modul 2 verbunden. An Port 4 ist das GNSS-Modul und an Port 6 das WLAN-Modul 1 angeschlossen.

4.4. Computer-Modul

Da das Computer-Modul wie in [Unterabschnitt 2.3.1](#) beschrieben die Bauform eines DDR2-SODIMM-Moduls aufweist, wird ein entsprechender Speichersockel benötigt. Die Beschaltung dieses Speichersockels (X7) ist im [Schaltplan auf Seite 5](#) dargestellt. Als Stützkondensator für das Computer-Modul werden die vier Tantal-Elektrolytkondensatoren (Tantal-Elko) C7.1 bis C7.4 eingesetzt. Deren Kapazitätswerte und Positionierung ist dem Schaltplan und Platinenlayout des Colibri-Evaluationsboards [[Tor14b](#)] von Toradex entnommen. Ebenso ist die Verwendung von Schutzwiderständen, dieser Quelle entnommen. Diese entkoppeln die GPIOs,

um das Computer-Modul gegen hochfrequente Störungen abzuschirmen. Die Widerstände haben einen Wert von $22\ \Omega$ und sind mit R7.3 bis R7.41 bezeichnet. Im Schaltplan sind die Schutzwiderstände bei den jeweiligen Modulen platziert, welche über diese mit einem GPIO Anschluss verbunden sind. Auf der Platine wiederum sind die Schutzwiderstände bis auf wenige Layout-bedingte Ausnahmen direkt beim SODIMM-Sockel positioniert.

Die Spannungsversorgung für den AC97 (Audiocodec¹) des Colibri-Moduls wird über den SMD-Ferrit L7.3 extra von der +3,3 V Versorgung entkoppelt. Der AC97 verfügt mit C7.5 über einen eigenen Stützkondensator. Am unteren Rand des Schaltplans sind die Pull-Up Widerstände für die Daten- und Taktleitung des I2C Busses abgebildet.

4.5. Cellular-Modul

Das in [Unterabschnitt 2.3.4](#) beschriebene MPCIE-L210 Modul benötigt ähnlich wie das Computer-Modul eine Trägerplatine. Mit dieser Trägerplatine wird das Modul über einen Sockel für den *PCI Express Mini Card form factor* (MPCIE-Sockel) verbunden. Der Schaltplan für diesen MPCIE-Sockel (X8.1) ist auf [Seite 6 des Schaltplans](#) dargestellt. Als Stützkondensator benötigt das Cellular-Modul nur den Tantal-Elko C8.1 mit einer Kapazität von $330\ \mu\text{F}$. Der SIM-Kartenhalter (X8.2) wird durch das Cellular-Modul mit Spannung versorgt. Ansonsten sind das Cellular-Modul und die SIM-Karte über die drei Signalleitungen SIM_RESET, SIM_CLK und SIM_DATA miteinander verbunden.

Die LED8.2 wird durch das Cellular-Modul angesteuert um den Status der *Wireless Wide Area Network* (WWAN) Verbindung zu signalisieren. Die Mobilfunknetze werden als WWANs bezeichnet, da diese typischerweise eine Reichweite von mehreren Kilometern haben. Die tatsächliche Reichweite variiert auf Grund der Topologie und Bebauung eines Gebietes. Die LED8.2 ist mit dem LED_WWAN# Anschluss (X8.1-42) verbunden.

Durch das Signal W_DISABLE_CEL# kann das Computer-Modul über den W_DISABLE# Anschluss die Funkeinrichtungen des Cellular-Moduls deaktivie-

¹CoDec -> Coder/Decoder

ren. Mit einem solchen Signal wird beispielsweise bei einem Smartphone der sogenannte Flugzeugmodus aktiviert.

In **Abbildung 4.5** ist das Platinenlayout des Cellular-Moduls dargestellt. Diese Abbildung zeigt, dass ein großer Teil der Platinenfläche vom MPCie-Sockel und dem SIM-Kartenhalter belegt wird.

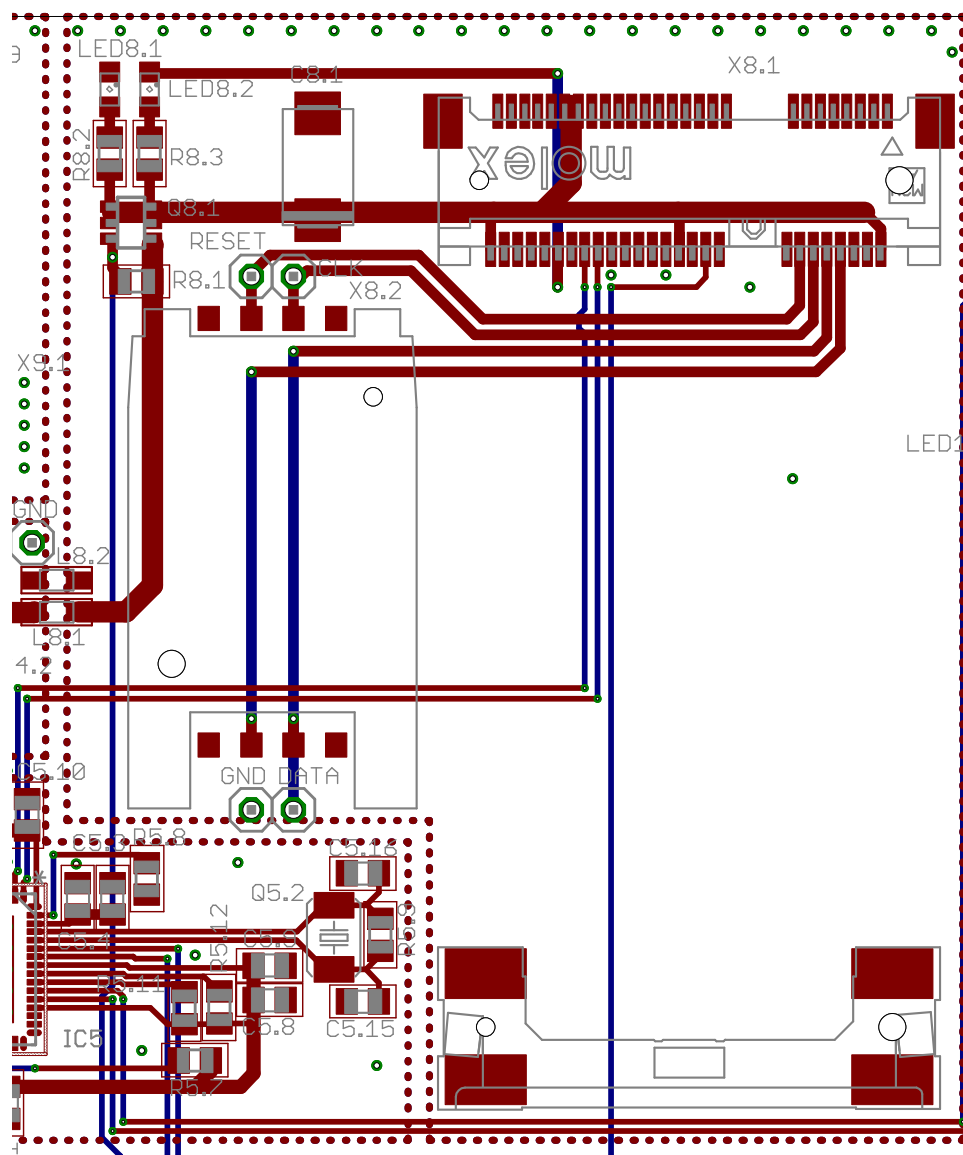


Abbildung 4.5.: Der MPCie-Sockel und die notwendige Beschaltung für das Cellular-Modul

4.6. GNSS-Modul

Im [Schaltplan auf Seite 7](#) ist die Schaltung des GNSS-Modul NEO-M8Q dargestellt. Durch die Beschaltung des Moduls erfolgt eine grundlegende Konfiguration. In der abgebildeten Konfiguration ist das Modul für den Anschluss von einer aktiven GNSS-Antennen mit einer Impedanz von $50\ \Omega$ geeignet. Der Anschluss der GNSS-Antenne erfolgt über einen *Microcoaxial*-Konnektor (X9.1) von Molex. Für den Datenaustausch ist das GNSS-Modul über den USB-Hub mit dem Computer-Modul verbunden. Die USB-Schnittstelle des Moduls unterstützt eine Bruttodatenrate von $12\ \text{Mbit/s}$.

Am RF_IN Anschluss werden die von der Antenne verstärkten Signale empfangen. Dazu ist dieser Anschluss direkt mit dem Innenleiteranschluss des Antennen-Konnektors verbunden. Die Stromversorgung der Verstärkerschaltung in der Antenne erfolgt über den Innenleiter des Koaxialkabels. Dazu ist der VCC_RF Anschluss des Moduls über den Widerstand R9.2 und den SMD-Ferrit L9.3 mit dem Innenleiteranschluss des Antennen-Konnektors verbunden. Der Widerstand R9.2 dient als Strombegrenzung, während der SMD-Ferrit L9.3 die Potenziale des Innenleiters und der Antennenversorgung entkoppelt. Der Kondensator C9.2 dient als Stützkondensator für den Antennenverstärker.

Das Modul verfügt über eine Power-On-Reset-Funktion. Deshalb kann ein Reset durch das aus- und wieder einschalten des Moduls durchgeführt werden. Da es sich bei der Reset-Funktion um einen Active-Low Reset handelt, wird der Reset-Anschluss über den Pull-Up-Widerstand R9.4 mit der Versorgungsspannung verbunden. Durch diese Maßnahme besitzt der Reset-Anschluss einen definierten Zustand und beeinflusst nicht das Reset-Verhalten des Moduls.

Eine Besonderheit beim Platinenlayout des GNSS-Moduls ist der, auf der Platine ausgeführte, Antennenanschluss. Das Platinenlayout ist in [Abbildung 4.6](#) dargestellt. Der Antennen-Konnektor X9.1 ist so dicht wie möglich am RF_IN Anschluss des GNSS-Moduls platziert. Um eine möglichst gute Abschirmung gegen hochfrequente Störungen zu gewährleisten, ist der gesamte Antennenanschluss mit Vias umgeben.

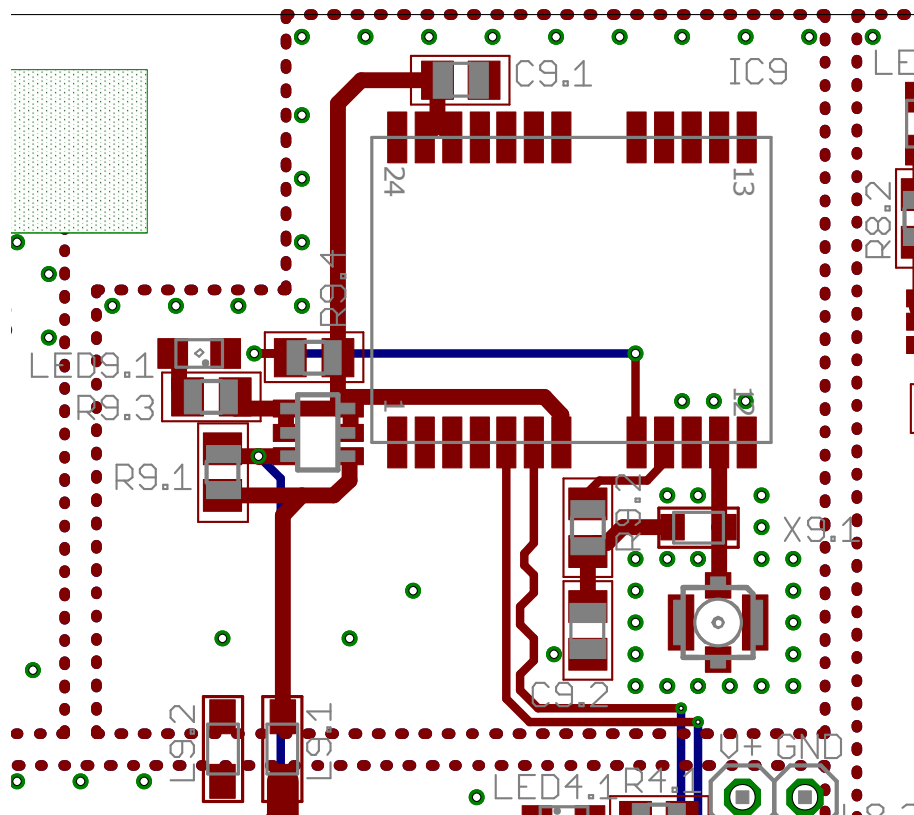


Abbildung 4.6.: Das Platinenlayout vom GNSS-Modul und dessen Beschaltung

4.7. WLAN-Module

Wie in [Unterabschnitt 2.3.3](#) beschrieben, werden zwei unterschiedliche WLAN-Module eingesetzt. In diesem Abschnitt wird zunächst die Beschaltung des RS9113-N00-D1N Moduls beschrieben. Es folgt die Beschreibung der Beschaltung des zweiten WLAN-Moduls (ESP-WROOM-02).

4.7.1. RS9113-N00-D1N

Die Beschaltung des RS9113-Moduls ist auf [Seite 8 des Schaltplans](#) dargestellt. Die Beschaltung und die Attribute der verschiedenen Bauteile sind den Beispielbeschaltungen aus dem *Module-Integration-Guide* [\[Red15b\]](#) nachempfunden. Am RESET_N Anschluss bilden die Bauteile R10.6, D10.1 und C10.8 die Schal-

tung, welche eine Power-On-Reset-Funktion gewährleistet. Über die Anschlüsse HOST_SEL_0, HOST_SEL_1 und BOOT_MODE_0 werden die verschiedenen Schnittstellenmodi konfiguriert. Durch die dargestellte Konfiguration befindet sich das RS9113-Modul im USB-Modus. Deshalb sind, mit Ausnahme von SDIO_DATA0, die SDIO Anschlüsse mit dem Bezugspotenzial verbunden. Diese Beschaltung wird unter *4.3 Pin Description* im Datenblatt [Red15a] empfohlen. Der Anschluss USB_VBUS wird, abweichend von der Beispielbeschaltung und der Anschlussbeschreibung, nicht mit der Versorgungsspannung von +5 V verbunden. Die USB-Schnittstelle des Moduls ist funktionsfähig, wenn am USB_VBUS Anschluss eine Spannung von nur +3,3 V angelegt ist. Dadurch kann eine zusätzliche Versorgung mit der +5 V Spannung bei diesem Modul eingespart werden. Diese Erkenntnis wurde durch die Tests am Prototypen Version 1.0 ermittelt.

In **Abbildung 4.7** ist der Ausschnitt der Platine dargestellt, in welchem das RS9113-Modul positioniert ist. Die Vias unter dem Modul verbessern die Wärmeableitung über die Bezugspotenzial-Flächen. Diese Maßnahme ist den Layout-Empfehlungen aus dem Datenblatt des Moduls entnommen.

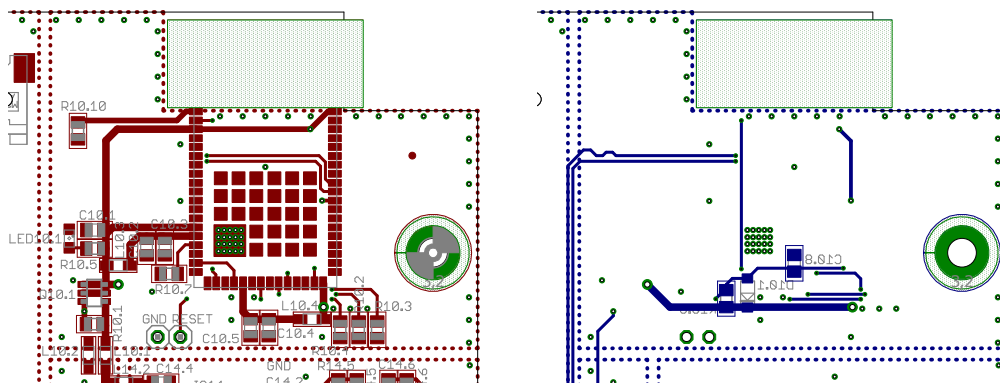


Abbildung 4.7.: Das Platinenlayout vom WLAN-Modul 1 – Links ist der Top- und rechts der Bottom-Layer dargestellt

4.7.2. ESP-WROOM-02

Ein Vorteil des ESP-WROOM-02 ist der geringe Aufwand für dessen Beschaltung. Dies wird bei der Betrachtung von **Seite 21 des Schaltplans** deutlich. Auf dem ESP-Modul sind alle Stützkondensatoren und sonstigen Beschaltungen für dessen Funk-

tionsfähigkeit vorhanden. Deshalb muss das ESP-Modul nur mit einer Spannung von +3,3 V versorgt und über den EN Anschluss aktiviert werden.

Das ESP-Modul und das Computer-Modul kommunizieren über eine UART-Schnittstelle. Dazu ist die UART0 des ESP-Moduls über Schutzwiderstände mit der UART_C des Computer-Moduls verbunden.

Des Weiteren sind die Anschlüsse RST, IO0, IO2 und IO15 des ESP-Moduls über Schutzwiderstände mit GPIO-Anschlüssen des Computer-Moduls verbunden. Durch ein HIGH-Signal am RST Anschluss wird ein Reset des ESP-Moduls ausgelöst. Die Anschlüsse IO0, IO2 und IO15 dienen zur Änderung des Betriebsmodus des ESP-Moduls. Neben dem Normalbetrieb existiert ein *UART Download Mode* und einen *Flash Boot Mode*. Im *Flash Boot Mode* kann die Firmware des ESP-Moduls geändert werden.

4.8. Bluetooth-Module

Die Schaltung der beiden Bluetooth-Module ist gleich (siehe [Seite 9](#) und [Seite 10](#) des Schaltplans). Daher bezieht sich die nachfolgende Beschreibung auf die Schaltung von Bluetooth-Modul 1 (IC11). Der Schaltplan zeigt, dass IC11 mit +3,3 V versorgt wird und über USB mit dem Computer-Modul verbunden ist. Der Reset-Anschluss des Moduls wird über den Widerstand R11.2 mit der Versorgungsspannung verbunden. Außerdem ist der Reset-Anschluss mit dem siebten Anschluss einer zweireihigen Stiftleiste (X11) verbunden. Mit dieser Stiftleiste sind neben der Versorgungsspannung und dem Bezugspotenzial, die Anschlüsse P2_1 und P2_2 von IC11 verbunden. Die Stiftleiste dient als Schnittstelle für einen CC-Debugger von Texas Instruments. Der Debugger ermöglicht Änderungen an der Firmware des Bluetooth-Moduls.

Im Datenblatt empfiehlt der Hersteller, dass die ungenutzten GPIO-Anschlüsse mit einem definierten Signale verbunden werden. Deshalb sind alle GPIOs bis auf P1_0, P1_1, P2_1 und P2_2 mit dem Bezugspotenzial verbunden. Die GPIOs P1_0 und P1_1 sind über je einen 10 kΩ Widerstand mit dem Bezugspotenzial verbunden, um das Auftreten übermäßiger Verlustströme zu verhindern. Diese externen Widerstände sind nur bei den beiden genannten Anschlüssen notwendig, da alle

weiteren GPIO-Anschlüsse über konfigurierbare interne Pull-Up oder Pull-Down Widerstände verfügen.

Das Platinenlayout der beiden Bluetooth-Module ist in [Abbildung 4.8](#) dargestellt. Der einzige Unterschied im Platinenlayout der beiden Bluetooth-Module ist, dass das Bluetooth-Modul 1 und dessen gesamtes Layout um 90° gedreht ist.

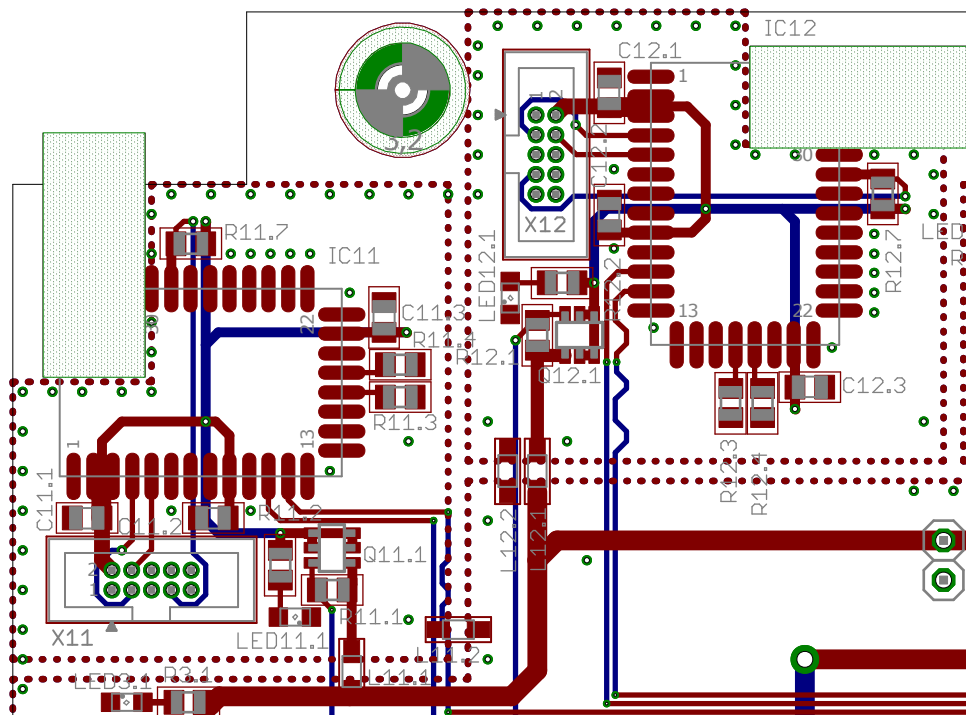


Abbildung 4.8.: Das Platinenlayout der Bluetooth-Module und deren Beschaltung

4.9. Audioverstärker

Die Implementierung des Audioverstärkers ist auf [Seite 11 des Schaltplans](#) dargestellt. Als Versorgungsspannung nutzt der Audioverstärker +24 V. Diese Versorgungsspannung wird dem Audioverstärker über sechs Anschlüsse zugeführt, wobei jeweils zwei Anschlüsse für die Laststromversorgung des rechten (PVCCR) und linken (PVCCL) Ausgangskanals genutzt werden. Über die beiden verbleibenden Anschlüsse (AVCC) wird die Schaltlogik des Audioverstärkers versorgt. Das Bezugspotenzial ist mit Hilfe von vier SMD-Ferriten entkoppelt. Dadurch entsteht je-

weils ein Bezugspotential für die Logik, für den Audioeingang und für beide Ausgangskanäle des Audioverstärkers.

Die Kondensatoren (und deren Kapazitätswert) C13.9 und C13.10 an den Anschlüssen VCLAMP und BYPASS sind einer Beispielapplikation des Herstellers entnommen. Aus dieser Beispielapplikation stammen ebenfalls die Werte der Kondensatoren C13.7, C13.8, C13.11 und C13.16.

Zur Steuerung bzw. Konfiguration stellt der Audioverstärker vier Logik-Eingänge zur Verfügung. Bei diesen Eingänge wird das Anlegen der +24 V Versorgungsspannung als logisches HIGH-Signal ausgewertet. Die Funktion der vier Eingänge ist in [Abschnitt 3.2](#) beschrieben. Diese Eingänge nutzt das Computer-Modul um den Audioverstärker zu steuern. Dazu müssen Signaltransistoren genutzt werden, da das Computer-Modul als logischen HIGH-Pegel eine Spannung von +3,3 V und der Audioverstärker eine Spannung von +24 V nutzt. Über Pull-Up-Widerstände ist ein Grundzustand für den Audioverstärker definiert, falls beispielsweise kein Computer-Modul im SODIMM-Sockel eingesteckt ist. In diesem Grundzustand befindet sich der Audioverstärker im Shut-Down Modus und ist zusätzlich über den MUTE Anschluss stumm geschaltet. Außerdem ist über die GAIN Anschlüsse die höchste Eingangsimpedanz konfiguriert. Der Anschluss für den Shut-Down Modus (SD#) weist gegenüber den anderen Logikeingängen die Besonderheit der invertierten Logik auf. Um diese invertierte Logik erneut zu invertieren, ist der zusätzliche Transistor Q19.3 vorgesehen. Nur durch diese Schaltung befindet sich der Audioverstärker im Shut-Down Modus während des Grundzustandes.

Um die Schaltfrequenz (250 kHz) der Puls-Weiten-Modulation aus dem verstärkten Audiosignal zu filtern, werden Tiefpassfilter an den Ausgängen (ROUT und LOUT) eingesetzt. Da die Ausgangsschaltung beider Kanäle gleich ist, wird nachfolgend die Schaltung für den rechten Kanal beschrieben. Der Tiefpassfilter besteht beim rechten Kanal aus der Induktivität L13.6 und den Kondensatoren C13.13, C13.14 und C13.15. Dieser LC-Tiefpass ist so dimensioniert, dass die Grenzfrequenz möglichst dicht oberhalb des von Menschen hörbaren Frequenzbereiches liegt. Die Grenzfrequenz berechnet sich wie folgt:

$$f_g = \frac{1}{2 * \pi \sqrt{L * C}}$$

Für diese Implementierung ergibt sich somit eine Grenzfrequenz von:

$$f_g = \frac{1}{2 * \pi \sqrt{47 \mu\text{H} * 0,7 \mu\text{F}}} = 27,7 \text{ kHz}$$

Dies entspricht etwa 28 kHz, wobei die Obergrenze des für Menschen hörbaren Frequenzbereiches bei 22 kHz liegt.

4.10. Debugging-Schnittstelle

Die Schaltung für die Debugging-Schnittstelle des Computer-Moduls ist im [Schaltplan auf Seite 12](#) abgebildet. Für die in [Abschnitt 3.5](#) beschriebene Umsetzung zwischen UART und USB wird ein FT232RL von FTDI eingesetzt. Dieses IC benötigt eine Versorgungsspannung von +5 V und ermöglicht eine Full-Speed (12 Mbit/s) USB-Verbindung. Über den VCCIO Anschluss wird festgelegt, mit welcher Spannung die digitalen Anschlüsse (RXD, TXD, usw.) betrieben werden. An VCCIO sind +3,3 V angeschlossen, um Kompatibilität zwischen den digitalen Anschlüssen des FT232RL und den GPIOs des Computer-Moduls zu erreichen. Die Anschlüsse TXD, RXD, RTS# und CTS# sind über Schutzwiderstände mit den Anschlüssen von UART_A des Computer-Moduls verbunden. Mit der LED14.1 und der LED14.2 zeigt der FT232RL Signale auf den Datenleitungen (RXD, TXD) an. Als USB-Anschluss wird eine USB Buchse vom Type B verwendet, da bei dieser USB-Verbindung der FT232RL als USB-Client fungiert. In den USB-Signalen zwischen der USB Buchse und dem FT232RL ist jeweils ein RC-Tiefpassfilter verbaut, um die Signalqualität zu verbessern. Dieser Filter besteht beim USBDM-Signal aus dem Widerstand R14.5 und dem Kondensator C14.5 und beim USBDP-Signal aus R14.6 und C14.6.

Der RESET# Anschluss des FT232RL ist über einen Spannungsteiler mit dem VCC Anschluss der USB-Buchse verbunden. Wenn über die USB-Buchse eine Verbindung zwischen dem Kommunikationssystem und einem USB-Host Gerät (z.B. einem PC) besteht, liegt am VCC Anschluss der USB-Buchse eine Spannung von +5 V an. Dadurch ist der RESET# Anschluss mit der +3,3 V Spannung verbunden. Wird die USB-Verbindung durch entfernen des USB-Kabels getrennt, dann liegt am RESET# Anschluss das Bezugspotenzial an. Dadurch wird der FT232RL in den Reset-Zustand versetzt.

4.11. Ethernet

Der in [Abschnitt 3.7](#) genannte Ethernet-Port wird fast vollständig vom Colibri VF61 implementiert. Das bedeutet, dass zur Vervollständigung nur ein sogenannter Übertrager und eine RJ45-Buchse benötigt werden. Ein Übertrager ist ein induktives Bauelement, mit dem eine galvanische Trennung des Kommunikationssystems vom angeschlossenen Ethernet gewährleistet wird. Für einen möglichst kompakten Aufbau des Ethernet-Ports wird eine RJ45-Buchse mit integriertem Übertrager eingesetzt. Deshalb wird der *WE-RJ45 LAN Übertrager* [[Wue11a](#)] von Würth verwendet, in welchem zusätzlich Strom-kompensierte Drosseln zur Entstörung der Ethernet-Signale integriert sind.

Auf [Seite 13 des Schaltplans](#) ist der WE-RJ45 LAN Übertrager und die umgebende Schaltung dargestellt. In dieser Schaltung sind zwei LEDs abgebildet. Diese befinden sich nicht auf der Platine, sondern sind in die RJ45-Buchse integriert und signalisieren zum Einen die Aktivität und zum Anderen die Geschwindigkeit der Verbindung. Die Schaltungen bestehend aus den Widerständen R15.3 bis R15.6 und den Kondensatoren C15.1 und C15.2 sind vom Evaluationsboard des Colibri-Moduls [[Tor14b](#)] übernommen worden. Mit diesen Schaltungen wird die Impedanz der Ethernet-Signalaare angepasst.

4.12. Optokoppler

Auf [Seite 14](#) und [Seite 15](#) des Schaltplans sind die Schaltungen für die galvanisch-getrennten digitale Eingänge des Kommunikationssystems abgebildet. Wie in [Abschnitt 3.3](#) beschrieben, werden Optokoppler (*SFH6206* von *Vishay* [[Vis15](#)]) für die galvanische Trennung eingesetzt. Es existieren fünf dieser Schaltungen, bei welchen der jeweilige Optokoppler im geschalteten Zustand eine Spannung von +3,3 V über einen Schutzwiderstand an einen GPIO des Computer-Moduls anlegt. Ob ein Strom durch die Primärseite (Anschlüsse 1 und 2) eines Optokopplers fließt, wird jeweils mit einer roten LED signalisiert. Die galvanisch-getrennten digitalen Eingänge des Kommunikationssystem sind für eine Signalspannung von +24 V ausgelegt. Damit beispielsweise der Optokoppler OK16.1 schaltet, muss an der zugehörigen Eingangsklemme X16.1 eine Spannung von mindestens +18 V und an X16.2

das zugehörige Bezugspotenzial angelegt werden. Diese Spannung von +18 V ergibt sich aus der Reihenschaltung des Widerstands R16.2, der Zener-Diode D16.1, der Primärseite des Optokopplers und der LED16.1. Als Zener-Diode wird eine *BZG03C12* von Vishay [Vis04] eingesetzt, welche in Sperrrichtung betrieben wird. Als Schutz vor elektrostatischen Entladungen werden bidirektionale TVS-Dioden (*SM6T24CA* von STMicroelectronics [ST10]) eingesetzt (z.B. D16.2). Um hochfrequente Störungen beispielsweise am OK16.1 zu reduzieren, werden die EMV-Filter CF16.1 und CF16.2 (*NFM21CC223R1H3* von Murata [Mur]) eingesetzt.

4.13. Relais

In Abschnitt 3.3 wird beschrieben, dass die digitalen Ausgänge des Kommunikationssystems mit Relais (*HRS1H-S DC24V* von Multicomp [Mul15]) realisiert werden. Die Beschaltung dieser Relais ist auf Seite 16 und Seite 17 des Schaltplans abgebildet. Da die Schaltungen bei allen Relais gleich sind, bezieht sich die nachfolgende Beschreibung auf die Bauteile, welche das Relais K17.1 umgeben. Im geschalteten Zustand verbindet K17.1 die Klemmen X17.1 und X17.2, dies wird durch LED17.1 signalisiert. Die SMD-Ferrite (L17.3, L17.4) und die Kondensatoren (C17.3, C17.4) dienen als Filter für mögliche Störungen auf den angeschlossenen Signalleitungen. Um das Relais zu schalten, wird ein digitaler Ausgang des Computer-Moduls verwendet. Allerdings ist dieser digitale Ausgang nicht direkt mit dem Relais verbunden. Während der Schaltvorgänge des Relais entstehen kurzzeitig hohe Ströme, welche den digitalen Ausgang des Computer-Moduls beschädigen können. Deshalb wird das Relais mit dem Signaltransistor Q17.1 (*BC847* von NXP [NXP14]) geschaltet.

Um die im Abschaltmoment entstehenden Spannungsspitzen abzufangen, wird die Freilaufdiode D17.1 (*BYM10-400* von Vishay [Vis06]) verwendet. Dies wird benötigt, da in diesem Abschaltmoment das Magnetfeld der Spule eine Spannung induziert, welche die Betriebsspannung der Spule weit übersteigt. Diese hohe Spannung kann die Sperrspannung des Transistors überschreiten, wodurch dieser zerstört würde. Um die Zerstörung des Transistors zu verhindern, fließt ein Ableitstrom durch die Diode D17.1. Damit wird der Potenzial-Unterschied zwischen der

Ein- und Ausgangsseite der Relaisspule ausgeglichen. Dadurch wird allerdings die Schaltzeit des Relais verlängert.

Wie unter [Abschnitt 3.3](#) erwähnt werden zwei der Ausgänge genutzt, um einen Haltewunsch bzw. eine Anfrage für Hilfestellungen zu signalisieren. Dies ist allerdings nur an den Bezeichnungen der Verbindung zwischen dem Computer-Modul und den Relais K17.1 und K17.2 erkennbar. Diese Bezeichnung beziehen sich auf den vorgesehenen Einsatzzweck. Die Signale zwischen dem Computer-Modul und den drei anderen Relais sind mit GP_REL bezeichnet. Dabei steht GP für *General Purpose*, also allgemeine Verwendbarkeit.

4.14. Beschleunigungssensor

Die Beschaltung des Beschleunigungssensors [\[Fre15\]](#) ist auf [Seite 18 des Schaltplans](#) dargestellt. Dieser Sensor wird mit einer Spannung von +3,3 V versorgt. Die Kapazitätswerte der Stützkondensatoren entsprechen den Empfehlungen aus dem Datenblatt des Beschleunigungssensors. Diesem Datenblatt sind auch die Widerstandswerte der beiden Pull-Up Widerstände (R7.1, R7.2) für die I2C Signalleitungen entnommen, welche beim SODIMM-Sockel des Computer-Moduls platziert sind (siehe [Seite 7 des Schaltplans](#)).

Bei der Positionierung des Beschleunigungssensors (IC18) auf der Platine ist die Ausrichtung wichtig. Die Raumachsen, in welchen die Beschleunigungen gemessen werden, sind im Bezug auf das Gehäuse des Beschleunigungssensors festgelegt. In [Abbildung 4.9](#) ist der Ausschnitt der Platine dargestellt, auf welchem sich der Beschleunigungssensor und dessen Beschaltung befinden. Die Ausrichtung der Messachsen des Beschleunigungssensors ist bezogen auf das Kommunikationssystem festgelegt, da das IC und die Platine fest miteinander verbunden sind. Die Ausrichtung der Beschleunigungsachsen des Sensors ist auf der Platine abgebildet. Dabei ist die Z-Achse nicht abgebildet, da diese im rechten Winkel aus der Abbildung heraus auf den Betrachter zeigt. Der Ursprung dieser Achsen liegt im Mittelpunkt von IC18.

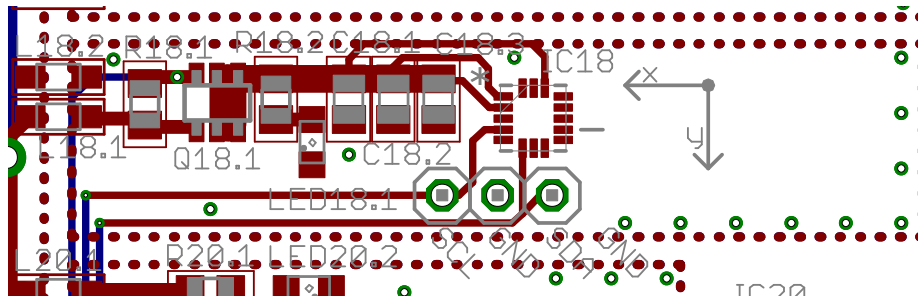


Abbildung 4.9.: Der Bereich der Platine, auf welchem der Beschleunigungssensor positioniert ist.

4.15. IBIS-Schnittstelle

Die IBIS-Schnittstelle nutzt das grundlegende Protokoll einer UART zur Kodierung einzelner Zeichen und wird mit einer Bruttodatenrate von 2400 bit/s betrieben. Die Signallogik der IBIS-Schnittstelle entspricht der Signallogik einer UART, also ein HIGH-Pegel im Idle-Zustand und ein LOW-Impuls als Start Bit. Auf [Seite 19 des Schaltplans](#) ist die IBIS-Schnittstelle abgebildet. Diese Schaltung wird benötigt, da die UART des Computer-Moduls mit einer Spannung von +3,3 V und die IBIS-Schnittstelle mit einer Spannung von +24 V betrieben wird.

Neben der Spannungsumsetzung wird mit der abgebildeten Schaltung eine galvanische Trennung der Signale vorgenommen. Dazu wird jeweils vor die Empfangsseite (RXD) und die Sendeseite (TXD) der UART ein Optokoppler geschaltet. Die UART-Signale der IBIS-Schnittstelle sind mit der UART_B des Computer-Moduls verbunden. Die Optokoppler-Schaltung an der Empfangsseite entspricht der Schaltung der galvanisch-getrennten digitale Eingänge des Kommunikationssystems (siehe [Abschnitt 4.12](#)). Mit dem Unterschied, dass bei der IBIS-Schnittstelle keine LEDs verbaut sind.

Mit der Sendeseite der IBIS-Schnittstelle wird ein angeschlossenes IBIS-Signal, entsprechend der LOW-Impulse der UART Sendeseite, kurzgeschlossen. Da die Strombelastbarkeit der GPIO Anschlüsse des Computer-Moduls zu gering ist, muss der Optokoppler OK19.2 über den PNP-Transistor Q19.1 (BC856 von NXP

[NXP04]) angesteuert werden. Zum Kurzschließen der IBIS-Signalleitung dient der NPN-Transistor Q19.2 (BCP56 von *NXP* [NXP11]). Dieser wird durch den Optokoppler OK19.2 angesteuert. Die Diode D19.3 schützt die Schaltung vor Beschädigungen, wenn die Signalleitung an Klemme X19.4 und deren Bezugspotenzial an X19.3 angeschlossen werden. Mit der Diode D19.4 wird die Schaltung vor elektrostatischen Entladungen und mit dem Varistor R19.7 vor Überspannungen geschützt.

5. Resümee

5.1. Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung und Implementierung eines modularen Multiprotokoll-Kommunikationssystems für den Einsatz im automotive Bereich. Mit dieser Entwicklung ist die Fachhochschule Dortmund durch Geomobile beauftragt worden. Durch den geplanten Einsatz im ÖPNV, als Teil des ivanto-Systems, sind besondere Anforderungen an das Kommunikationssystem gestellt. Das Ziel bei der Entwicklung ist die Erstellung eines funktionalen Prototypen, welcher im Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit getestet werden kann.

Zu Beginn der Entwicklung sind die verschiedenen Protokolle des Kommunikationssystems festgelegt und entsprechende Module ausgewählt worden. Zusätzlich wurden Funktionen festgelegt, welche das Kommunikationssystem benötigt. Auf dieser Grundlage basiert die **Ausgangssituation**, in welcher die ausgewählten Module und ermittelten Anforderungen zusammengefasst sind.

Im Kontext des ivanto-Systems wird das Kommunikationssystem als BusAccess bezeichnet. Die Protokolle für das Kommunikationssystem sind Bluetooth Smart, WLAN, mobiles Internet, GNSS und das IBIS-Protokoll. Die Module, welche die Funkstandards implementieren, sind als separate Platinen ausgeführt. Dabei werden die Module für Bluetooth, WLAN und GNSS direkt auf eine Trägerplatine aufgelötet. Das Modul für mobiles Internet ist im MPCIE Formfaktor ausgeführt. Bis auf das WLAN-Modul ESP-WROOM-02 nutzen alle Module eine USB-Verbindung zum Datenaustausch mit dem Computer-Modul. Das Computer-Modul ist ein Colibri VF61 mit einem Embedded-Linux als Betriebssystem. Für die über USB angebotenen Funkmodule liefern deren Hersteller Treibersoftware für Linux-Betriebssysteme mit. Im Konzept des BusAccess ist eine Audioausgabe vorgesehen. Dafür wird ein Class-D Audioverstärker eingesetzt.

Auf Grundlage der Systemübersicht sind einige Module ausgewählt und entworfen worden. Dazu gehören ein USB-Hub mit sieben Down-Stream Ports, über den die Module mit dem Computer-Modul verbunden sind. Außerdem ist darüber eine USB-Buchse angebunden, welche den Anschluss externer USB Geräte ermöglicht. Des Weiteren sind mit Optokopplern und Relais galvanisch-getrennte digitale Ein- und Ausgänge implementiert. Für die verschiedenen Module werden drei verschiedene Versorgungsspannungen benötigt. Außerdem müssen die internen Versorgungsspannungen des Kommunikationssystems galvanisch vom versorgenden System getrennt werden. Dazu wird ein DC/DC-Wandler eingesetzt, welcher eine Primär-Spannung von +9 V bis +36 V in eine Sekundär-Spannung von +24 V umsetzt. Mit der Sekundär-Spannung werden der Audioverstärker und der +5 V Spannungsregler versorgt. Diese +5 V versorgen die beiden Linear-Regler, die Debugging-Schnittstelle und die USB-Buchse für den Anschluss externer Geräte.

Bei der Implementierung sind zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit, die Module getrennt bearbeitet worden. Beim Platinenlayout zeigt sich dieses Vorgehen durch die Positionierung der Bauteile und durch die Einteilung der Kupferflächen. Mit den Kupferflächen der Platine ist das Bezugspotenzial verbunden. Das Bezugspotenzial ist bei jedem Modul gegen hochfrequente Störungen entkoppelt, woraus die erwähnte Einteilung der Flächen resultiert. Zusätzlich sind auch die Versorgungsspannungen der Module entkoppelt. Für die Entkopplung werden SMD-Ferrite eingesetzt. Als Gehäuse für das Kommunikationssystem wird eine NET-BOX verwendet. Durch dieses Gehäuse ist die Platinenform und die Position der Anschlüsse festgelegt.

5.2. Fazit

Der in [Kapitel 4](#) beschriebenen Implementierung des Prototypen in Version 1.1 sind umfangreiche Tests an der Version 1.0 des Prototypen vorausgegangen. Auf Grund dieser Tests behebt die Version 1.1 einige funktionale Defizite der ersten Version. Dadurch erfüllt der Prototyp in Version 1.1 die in der [Zielsetzung](#) definierten Ziele. Der Prototyp stellt das angestrebte Ergebnis dieser Arbeit dar, ein Prototyp, welcher

den geforderten Funktionsumfang bereitstellt und zum Testen der elektromagnetischen Verträglichkeit verwendet werden kann.

Die zur Implementierung von Version 1.0 des Prototypen verwendeten Evaluationsplatinen für das Bluetooth-Modul, GNSS-Modul und den Audioverstärker haben, wie in [Kapitel 3](#) erwähnt, die Integration dieser Module in das Kommunikationssystem vereinfacht. Allerdings sind nicht für alle Module Evaluationsplatinen erstellt worden, weshalb die Module erst mit Version 1.0 des Prototypen getestet werden konnten. Dies verzögerte die Funktionstests dieser Module.

Ein Beispiel ist der USB-Hub, welcher zu Beginn der Inbetriebnahme nicht nutzbar war. Da dieser aber für alle Module, die eine USB-Verbindung zur Kommunikation mit dem Computer-Modul nutzen, notwendig ist, verzögerte dies zusätzlich die Funktionstests dieser Module.

5.3. Ausblick

Bei der Weiterentwicklung des Kommunikationssystems sind Verbesserungen der EMV und des Layouts einiger Module möglich. Außerdem ist die Auswahl bestimmter Bauteile und Module zu überprüfen, da diese überdimensioniert oder funktional nicht optimal sind. Falls der Prototypen als Grundlage für eine Serienproduktion dient, bietet sich eine Überprüfung der Bauteil- und Modulauswahl bezüglich der Kosten an.

Spannungsversorgung Im Bereich der Spannungsversorgung gibt es zwei primäre Ansatzpunkte für Verbesserungen.

Der erste Punkt ist der DC/DC-Wandler ([Unterabschnitt 3.6.3](#)). Dieser ist überdimensioniert, um einer Überstrom-bedingten Abschaltung bei hohen Umgebungstemperaturen ($+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$) vorzubeugen. Diese Abschaltung kann erfolgen, da der Wirkungsgrad des Wandlers mit zunehmender Temperatur sinkt. Allerdings ist der vorgesehene Leistungspuffer möglicherweise überdimensioniert. Auf Grund des hohen Einkaufspreises des ausgewählten DC/DC-Wandlers ist eine kostengünstigere Alternative zu erwägen.

Beim zweiten Punkt ist der $+5\text{ V}$ Spannungsregler ([Unterabschnitt 3.6.2](#)) im Fokus. Dieser sollte zum Einen bezüglich des Platinenlayouts und zum Ande-

ren wegen Schalttakt-bedingten Störungen überarbeitet werden. Das Layout muss überarbeitet werden, da der Abstand zwischen dem Ausgang (SW Anschluss) und den angeschlossenen Bauteilen (L2.1 und D2.1) möglichst gering sein sollte. Die Schalttakt-bedingten Störungen sind Wechsellspannungsspitzen auf den Gleichspannungen vor und hinter dem Spannungsregler. Diese Spitzen haben eine Amplitude von etwa 200 mV und könnten mit Hilfe von Filtern am Ein- und Ausgang des Spannungsreglers ausgefiltert werden.

ESP-WROOM-02 Beim WLAN-Modul ESP-WROOM-02 existiert eine Besonderheit, welche die Verwendung des Moduls erschwert. Da das Modul mit einem Mikrocontroller ausgestattet ist, wird es mit einer bestimmten Firmware ausgeliefert. Diese Firmware kann bei Bedarf geändert werden. Dazu muss eine neue Firmware über die UART-Schnittstelle im Programmspeicher des Moduls abgelegt werden. Außerdem wird diese UART-Schnittstelle für jegliche Kommunikation zwischen dem ESP-Modul und dem Computer-Modul genutzt. Allerdings ist die Konfiguration der UART-Schnittstelle im Datenblatt des Moduls nicht dokumentiert. Durch eine Internetrecherche und Messungen mit einem Oszilloskop konnte ermittelt werden, dass die Bitrate der Schnittstelle auf den Wert 74880 bit/s vorkonfiguriert ist. Durch diesen ungewöhnlichen Wert wird die Nutzung der UART-Schnittstelle erschwert, da beispielsweise übliche Terminal-Emulationsprogramme (z.B. TeraTerm oder HTerm) diese Bitrate nicht unterstützen.

Auf Grund der beschriebenen Besonderheiten, sollte die Auswahl dieses Moduls evaluiert werden.

Verbesserung der EMV Die Verbesserung der EMV umfasst eine ganze Reihe von Maßnahmen, welche mit unterschiedlichem Aufwand durchgeführt werden können. Der Aufwand variiert dabei zwischen der Neu-Positionierung einiger Bauteile im bestehenden Platinenlayout und einer kompletten Überarbeitung der Platine hin zu einem Platinenlayout mit vier oder mehr Layern. Solche Maßnahmen sollten allerdings erst nach einem EMV-Test durchgeführt werden. Mit einem solchen Test wird zum Einen die generelle Notwendigkeit von Verbesserungsmaßnahmen geprüft und zum Anderen festgestellt, welche Teile der Platine überarbeitet werden müssen.

Eine Maßnahme zur Verbesserung der EMV kann aber auf jeden Fall durchgeführt werden. Diese Maßnahme ist die Neu-Positionierung bestimmter Bauteile, da dies einen geringen Aufwand bedeutet. Der Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass auch durch die Bezugspotenzial-Flächen hochfrequente Störungen übertragen werden. Wenn eine Leiterbahn durch eine solche Fläche geführt wird, können die Störungen auf diese Leiterbahn übertragen werden. Die Bezugspotenzial-Flächen sind mit SMD-Ferriten voneinander entkoppelt, um die Übertragung dieser Störungen zu erschweren. Durch Leiterbahnen, die über mehr als eine Bezugspotenzial-Fläche geführt werden, wird die Entkopplung verschlechtert. Die Übertragung hochfrequenter Störungen erfolgt ebenfalls über Leiterbahnen, welche die Lücken zwischen diesen Flächen überbrücken. Um die Entkopplung der Bezugspotenzial-Flächen zu verbessern, sollten auch die Signalleitungen an den Lücken zwischen den Flächen entkoppelt werden. Dazu können beispielsweise die in [Abschnitt 4.4](#) beschriebenen Schutzwiderstände genutzt werden. Diese Widerstände sollten das jeweilige Modul vom Rest der Platine entkoppeln. Als Beispiel sei hier die Signalleiterbahn genannt, über welche das Computer-Modul das Bluetooth-Modul 1 abschalten kann. Der Schutzwiderstand R7.9 sollte auf der Lücke zwischen der Bezugspotenzial-Fläche (GND_BM1) des Bluetooth-Moduls und der Fläche des allgemeinen Bezugspotenzials (GND) positioniert werden.

Die Entkopplung der Bezugspotenzial-Flächen kann auch bei den digitalen Ein- und Ausgängen, dem USB-Port, der IBIS-Schnittstelle und dem Versorgungsspannungsanschluss des Prototypen verbessert werden. Dazu ist die Neupositionierung vorhandener Bauteile der einzelnen Baugruppen nötig.

Literaturverzeichnis

- [bag14] *Vollständige Barrierefreiheit im ÖPNV - Hinweise für die ÖPNV-Aufgabenträger zum Umgang mit der Zielbestimmung des novellierten PBefG.* http://www.staedtetag.de/imperia/md/content/dst/internet/fachinformationen/2013/handreichung_hinweise_barrierefreiheit_im_%C3%B6pnv_20140926.pdf. Version: September 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [Blu14] BLUEGIGA: *BLE112 - Data Sheet.* <https://www.bluegiga.com/en-US/products/ble112-bluetooth-smart-module/>. Version: Oktober 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [DiZ15] DiZUM: *Fachgespräch mit dem Betreuer Dieter Zumkehr.* 2015
- [Eri] ERICSSON: *Ericsson GSM Radio Access Network.* http://www.ericsson.com/ourportfolio/products/gsm-radio-access-network?nav=productcategory006|fgb_101_0517. – abgerufen am 13.02.2016
- [Esp15] ESPRESSIF: *ESP-WROOM-02 Wifi Module - Version 0.3.* <http://espressif.com/en/products/wroom/>. Version: Juni 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Fai02a] FAIRCHILD: *FDC5614P - 60V P-Channel Logic Level PowerTrench MOSFET.* <https://www.fairchildsemi.com/products/discretes/fets/mosfets/FDC5614P.html>. Version: 2002. – abgerufen am 13.02.2016

- [Fai02b] FAIRCHILD: *SMBJ24CA - 600 Watt Transient Voltage Suppressors*. <https://www.fairchildsemi.com/products/discretes/circuit-protection/transient-voltage-suppressors-tvs/SMBJ24CA.html>. Version: 2002. – abgerufen am 13.02.2016
- [Fre14] FREESCALE: *VYBRIDFSERIESEC - VF6xx, VF5xx, VF3xx*. <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/arm-processors/vfxxx-controller/f-series/arm-cortex-a5-plus-cortex-m4-mpus-1.5-mb-sram-lcd-security-ethernet-l2-switch:VF6xx>. Version: November 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [Fre15] FREESCALE: *MMA8451Q - 3-Axis, 14-bit/8-bit Digital Accelerometer*. <http://www.nxp.com/products/sensors/accelerometers/3-axis-accelerometers/2g-4g-8g-low-g-14-bit-digital-accelerometer:MMA8451Q>. Version: Juni 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [FTD15] FTDI: *FT230X – Full Speed USB to Basic UART*. <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT230X.html>. Version: 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Geo15a] GEOMOBILE: *ivanto - Barrierefreie urbane Mobilität*. http://ivanto.de/wp-content/uploads/2014/10/ivanto_Barrierefreie-urbane-Mobilit%C3%A4t.pdf. Version: 2015. – Produktbroschüre
- [Geo15b] GEOMOBILE: *Kundengespräch*. 2015
- [HH96] HOROWITZ, Paul ; HILL, Winfield: *Die hohe Schule der Elektronik*. Elektor-Verlag, Aachen, 1996. – ISBN 3–89576–025–0
- [IEE05] IEEE: *IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 15.1a: Wireless*

- Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN). In: *IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002)* (2005), June, S. 1–700. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2005.96290>. – DOI 10.1109/IEEESTD.2005.96290. – abgerufen am 13.02.2016
- [IEE12] IEEE: IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Redline. In: *IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007) - Redline* (2012), March, 1-5229. <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6587721>. – abgerufen am 13.02.2016
- [Lit10] LITTELFUSE: *POLYFUSE® Resettable PTCs - Radial Leaded > 30R Series*. <http://www.littelfuse.de/products/resettable-ptcs/radial-leaded/30r.aspx>. Version: January 2010. – abgerufen am 13.02.2016
- [MP] MURATA-PS: *UQQ Series - Wide Input Range Single Output DC-DC Converters*. <http://power.murata.com/en/uqq-24-4-q12nb-c.html>. – abgerufen am 13.02.2016
- [Mul15] MULTICOMP: *HRS1H-S DC24V Signalrelais, Baureihe HRS1, SPDT, Durchsteckmontage, 3 A, 24 VDC*. <http://de.farnell.com/multicomp/hrs1h-s-dc24v/signalrelais-spdt-120vac-24vdc/dp/9480285>. Version: April 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Mur] MURATA: *NFM21CC223R1H3*. <http://www.murata.com/en-eu/products/productdetail.aspx?cate=luNoiseSupprFilteChip3TermiCapac&partno=NFM21CC223R1H3%23>. – abgerufen am 13.02.2016
- [NXP04] NXP: *BC856; BC857; BC858: PNP general purpose transistors*. <http://www.nxp.com/products/>

[discretes-and-logic/bipolar-transistors/
general-purpose-bipolar-transistors/
general-purpose-transistors/
single-transistors-pnp/pnp-general-purpose-transistors:
BC856_BC857_BC858](#). Version: January 2004. – abgerufen am
13.02.2016

[NXP11] NXP: *BCP56: 80 V, 1 A NPN medium power transistor*. <http://www.nxp.com/products/discretes-and-logic/bipolar-transistors/general-purpose-bipolar-transistors/medium-power-transistors/80-v-1-a-npn-medium-power-transistor/BCP56>. Version: October 2011. – abgerufen am 13.02.2016

[NXP14] NXP: *BC847 series: 45 V, 100 mA NPN general-purpose transistors*. http://www.nxp.com/products/discretes-and-logic/bipolar-transistors/general-purpose-bipolar-transistors/general-purpose-transistors/single-transistors-npn/45-v-100-ma-npn-general-purpose-transistors/BC847_SERIES. Version: September 2014. – abgerufen am 13.02.2016

[OKW07] OKW: *B3222101 - NET-BOX 220*. <https://www.okw.com/de/Net-Box/B3222101.htm>. Version: Juli 2007. – abgerufen am 13.02.2016

[ONS14] ONSEMI: *NCP4632 - 3A, Low Voltage, Low Dropout Linear Voltage Regulator with Reverse Current Protection*. <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCP4632>. Version: November 2014. – abgerufen am 13.02.2016

[pbe15] *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/pbefg/gesamt.pdf>. Version: August 2015. – abgerufen am 13.02.2016

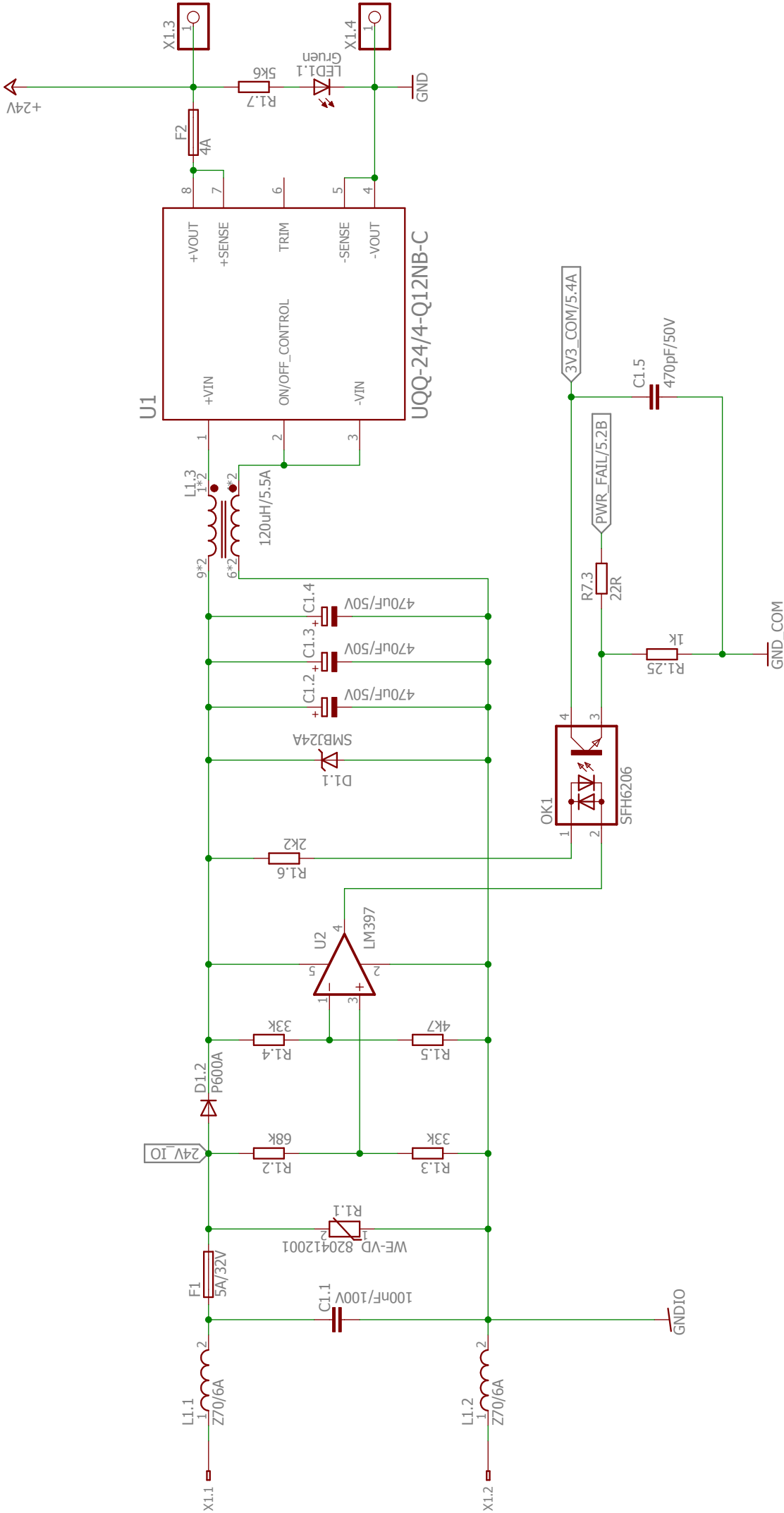
- [Red15a] REDPINE: *RS9113 Module Family - Datasheet Version 3.2*. <http://www.redpinesignals.com/Chipsets/IoT/RS9113.php>.
Version: Juli 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Red15b] REDPINE: *RS9113 Module Family - Module Integration Guide Version 2.6*. <http://www.redpinesignals.com/Chipsets/IoT/RS9113.php>. Version: June 2015. – abgerufen am 15.02.2016
- [Sau15] SAUTER, Martin: *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-08342-7>. – ISBN 978-3-658-08341-0
- [SIG14] SIG: Specification of the Bluetooth System - Covered Core Package version: 4.2 / Bluetooth Special Interest Group. Version: 2014. <https://www.bluetooth.com/specifications/adopted-specifications>. 2014. – Forschungsbericht. – abgerufen am 13.02.2016
- [SK11] *Kapitel Einführung in die Elektromagnetische Verträglichkeit*. In: SCHWAB, Adolf ; KÜRNER, Wolfgang: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, 1-62
- [SMS13] SMSC: *USB2517i - Industrial Temperature Rated USB 2.0 Hi-Speed 7-Port Hub Controller*. <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/USB2517>. Version: März 2013. – abgerufen am 13.02.2016
- [ST10] ST: *SM6T - Transil Std 600W*. http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM114/CL1460/SC234/PF64210. Version: October 2010. – abgerufen am 13.02.2016
- [TI10] TI: *25-W Stereo Class-D Audio Power Amplifier*. <http://www.ti.com/product/tpa3123d2>. Version: August 2010. – abgerufen am 13.02.2016

- [TI13] TI: *LM397 Single General Purpose Voltage Comparator*. <http://www.ti.com/product/lm397>. Version: March 2013. – abgerufen am 13.02.2016
- [TI15] TI: *LM22677-Q1 42-V, 5-A Simple Switcher - Step-Down Voltage Regulator With Features*. <http://www.ti.com/product/lm22677-q1/description>. Version: August 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Tora] TORADEX: *Betriebssysteme*. <https://www.toradex.com/de/operating-systems>. – abgerufen am 13.02.2016
- [Torb] TORADEX: *Embedded Linux*. <https://www.toradex.com/de/operating-systems/embedded-linux>. – abgerufen am 13.02.2016
- [Tor14a] TORADEX: *Colibri VFxx - Datasheet*. <https://www.toradex.com/de/computer-on-modules/colibri-arm-family/nxp-freescale-vybrid-vf6xx>. Version: November 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [Tor14b] TORADEX: *Evaluation Board 3.2*. <https://www.toradex.com/de/computer-on-modules/colibri-arm-family/nxp-freescale-vybrid-vf6xx>. Version: September 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [ubl14] UBLOX: *NEO-M8 - u-blox M8 concurrent GNSS modules - Data Sheet*. <https://www.u-blox.com/de/product/neo-m8qm8m-series>. Version: Dezember 2014. – abgerufen am 13.02.2016
- [ubl15] UBLOX: *MPCI-L2 series - LTE/DC-HSPA+/EGPRS Mini PCIe modules - Data Sheet*. <https://www.u-blox.com/de/product/mpci-l2-series>. Version: Januar 2015. – abgerufen am 13.02.2016

- [Vis04] VISHAY: *BZG03C-Series - Silicon Zener Diodes*. <http://www.vishay.com/product?docid=85593>. Version: January 2004. – abgerufen am 13.02.2016
- [Vis06] VISHAY: *BYM10-xxx, GL41x - Surface Mount Glass Passivated Junction Rectifier*. <http://www.vishay.com/product?docid=88546>. Version: June 2006. – abgerufen am 13.02.2016
- [Vis15] VISHAY: *SFH620A, SFH6206 - Optocoupler, Phototransistor Output, AC Input*. <http://www.vishay.com/product?docid=83675>. Version: March 2015. – abgerufen am 13.02.2016
- [Wue10] WUERTH: *WE-VD Disk Varistor*. <http://katalog.we-online.de/de/pbs/WE-VD/820412001>. Version: Juli 2010. – abgerufen am 13.02.2016
- [Wue11a] WUERTH: *WE-RJ45 LAN Übertrager*. <http://katalog.we-online.de/de/pbs/WE-LAN-RJ45/74990112116A>. Version: October 2011. – abgerufen am 13.02.2016
- [Wue11b] WUERTH: *WL-SFTW SMD TOP LED full-color waterclear*. <http://katalog.we-online.de/de/led/WL-SFTW/150141M173100>. Version: October 2011. – abgerufen am 13.02.2016
- [Wue13] *Kapitel 2.4 Class-D Audioverstärker*. In: WUERTH: *Trilogie der induktiven Bauelemente*. Bd. III. Anwendungen. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. 2013. – ISBN 978-3-89929-151-3
- [Wue15] WUERTH: *WE-UCF Stromkompensierte SMD-Entstördrossel*. <http://katalog.we-online.de/de/pbs/WE-UCF/744290121>. Version: August 2015. – abgerufen am 13.02.2016

A. Schaltpläne

Auf den nachfolgenden Seiten befinden sich die Schaltpläne von Prototyp V1.1 des BusCore2 Kommunikationssystems. Für eine größere Darstellung der Pläne wird auf diesen Seiten auf die Kopf- und Fußzeilen sowie die Seitennummerierung verzichtet.



- H1 MOUNT-PAD-ROUND3.2
- H2 MOUNT-PAD-ROUND3.2
- H3 MOUNT-PAD-ROUND3.2
- H4 MOUNT-PAD-ROUND3.2

DC/DC-Wandler

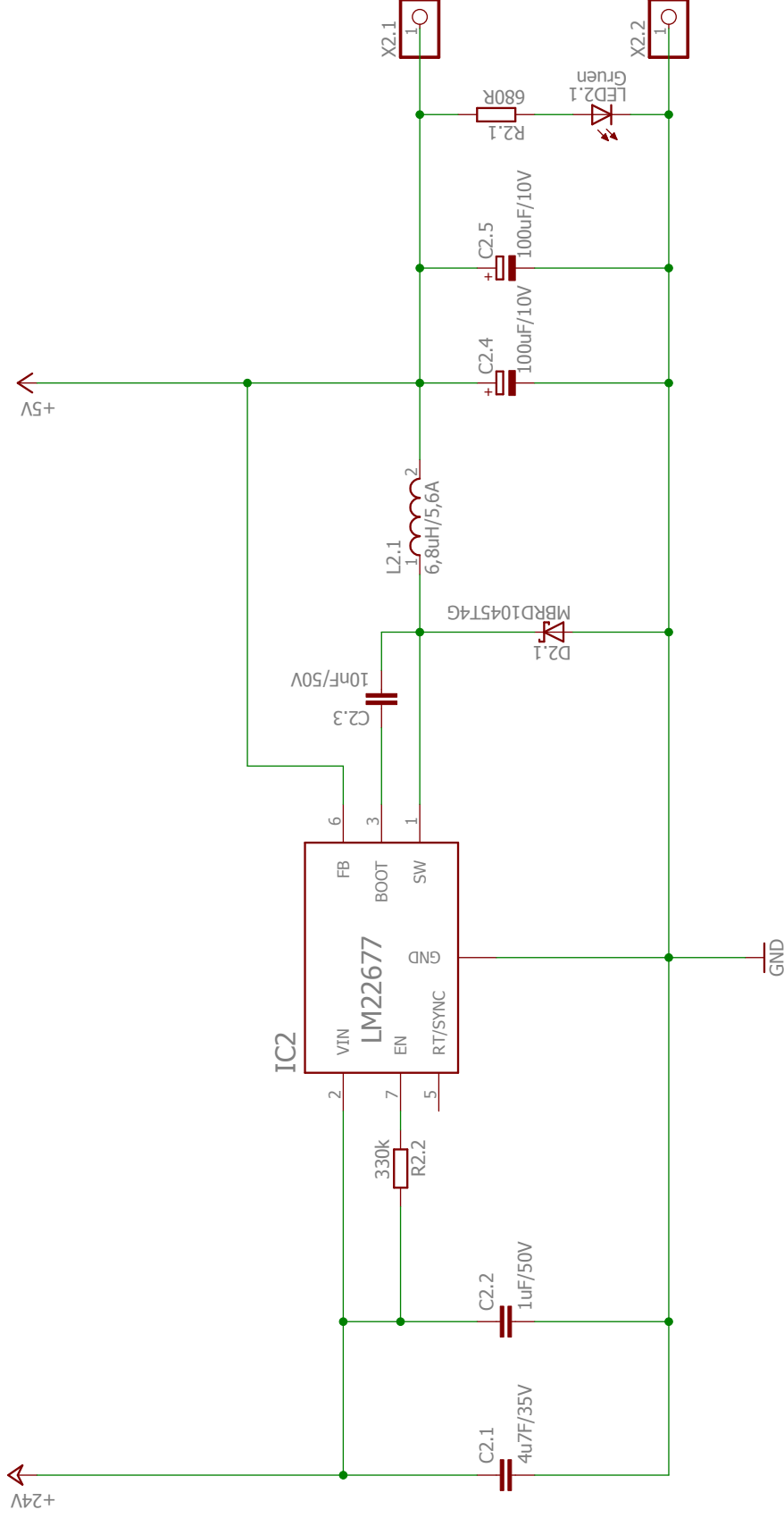
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: nicht gespeichert!

Sheet: 1/21



5V - Versorgung

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

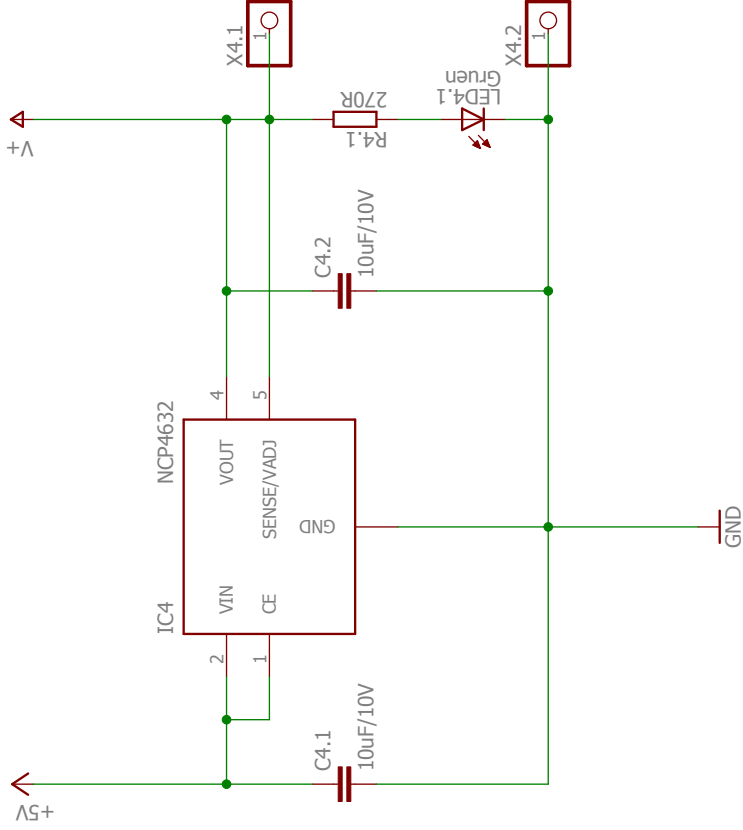
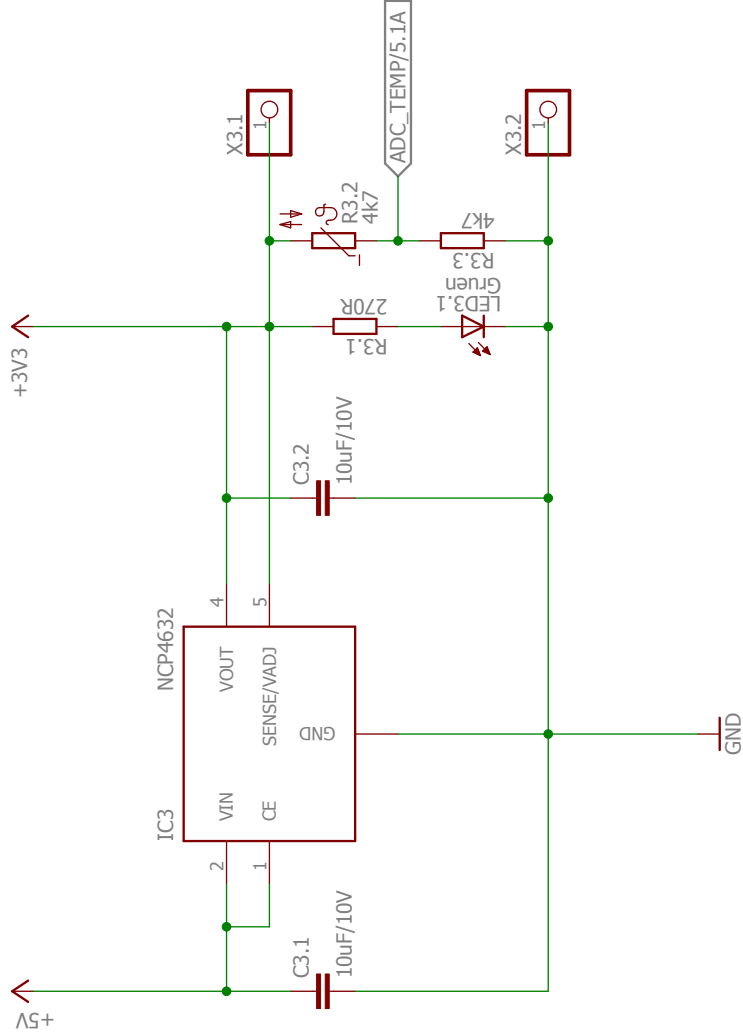
Document Number:

REV:

Date: nicht gespeichert!

Sheet: 2/21

Versorgung Cellular-Modul



3V3 - Versorgung

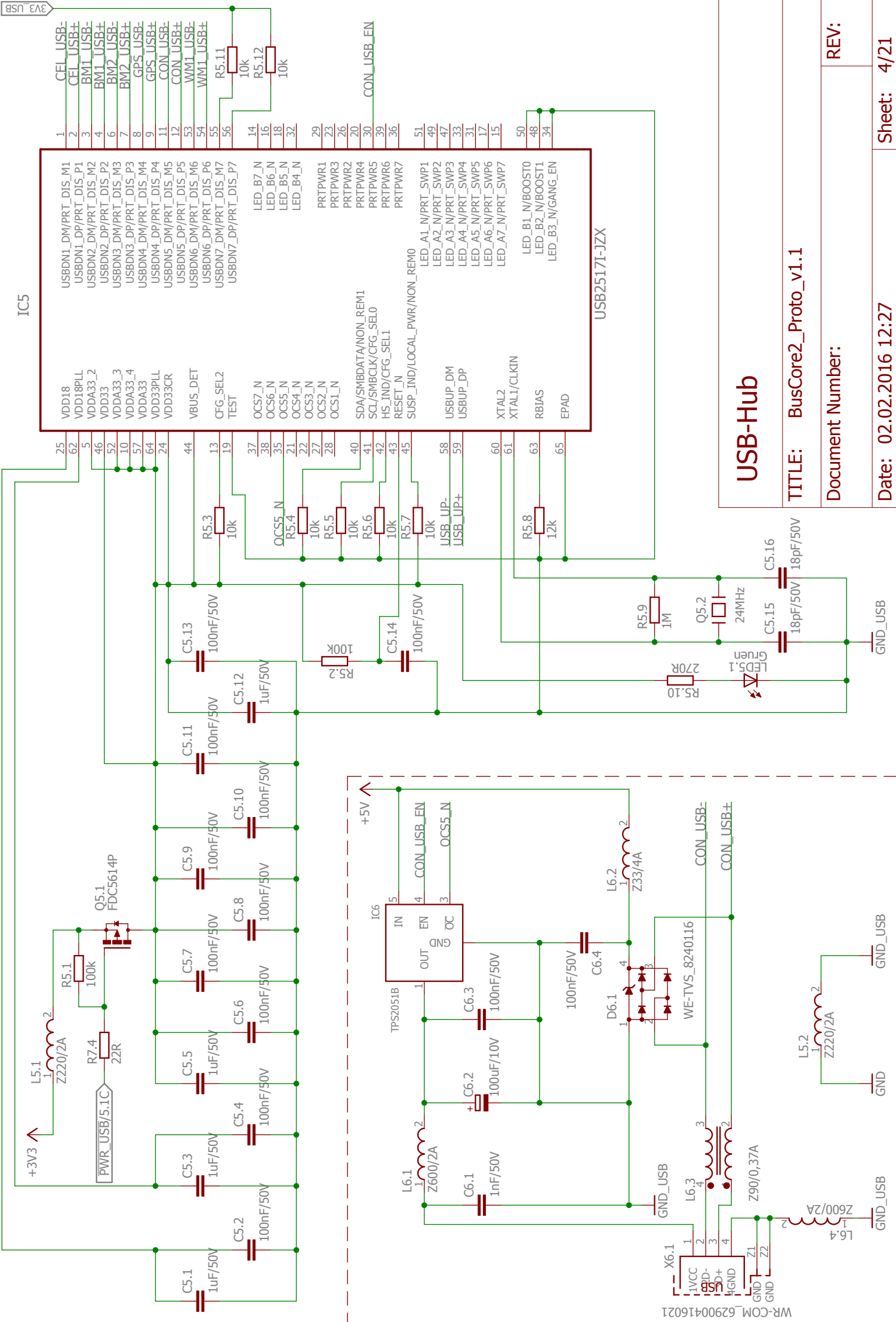
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

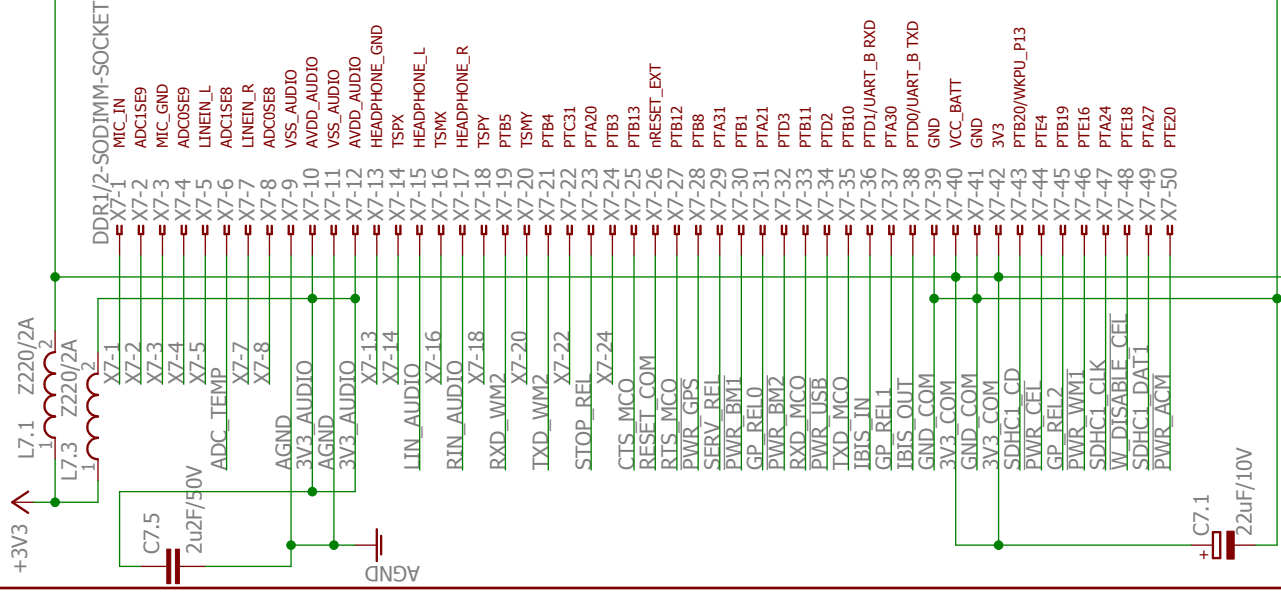
Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 3/21





Compute-Modul_SO-DIMM_Socket

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

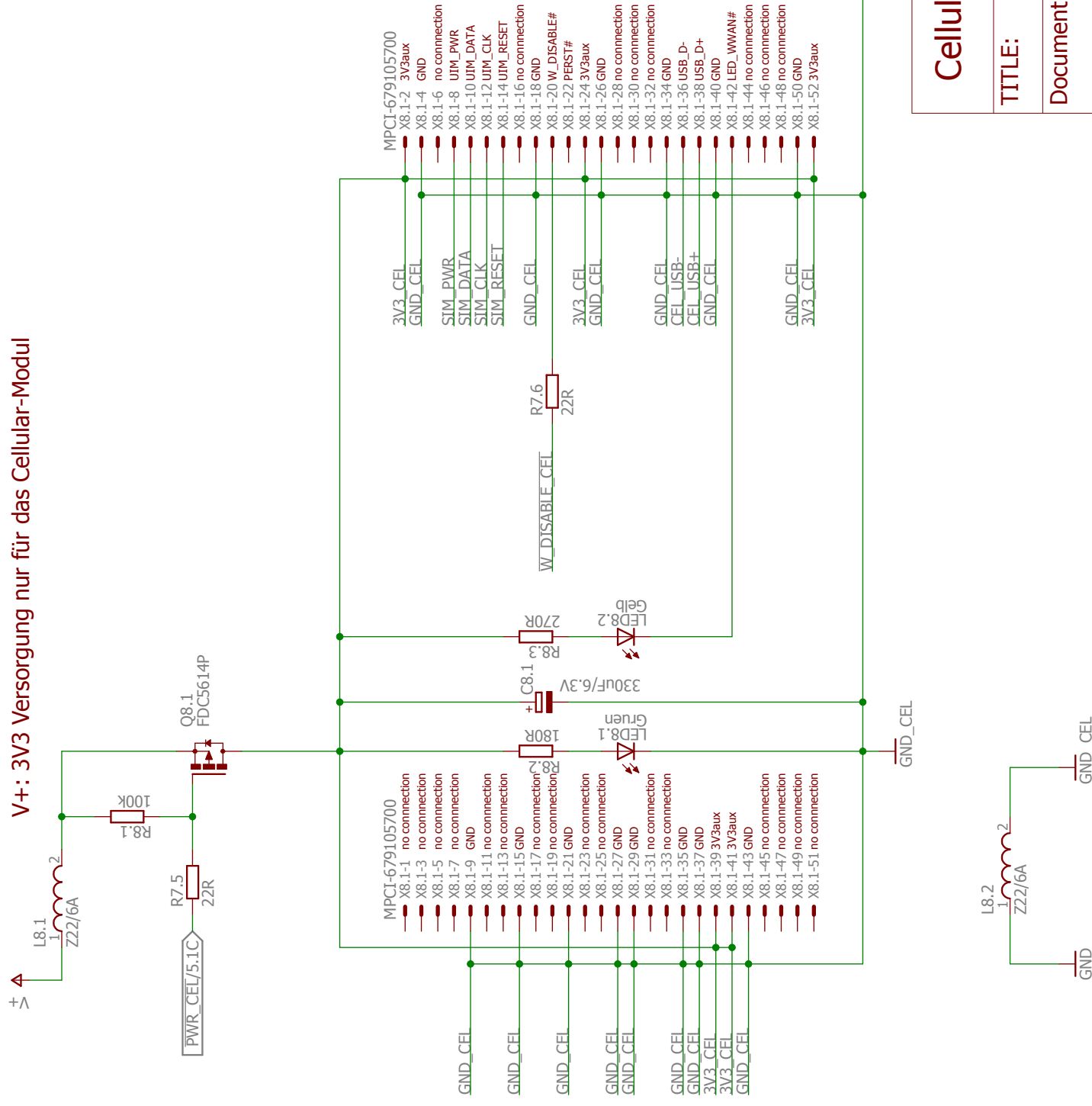
Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 5/21

V+: 3V3 Versorgung nur für das Cellular-Modul



Cellular-Modul_MPCI-Sockel

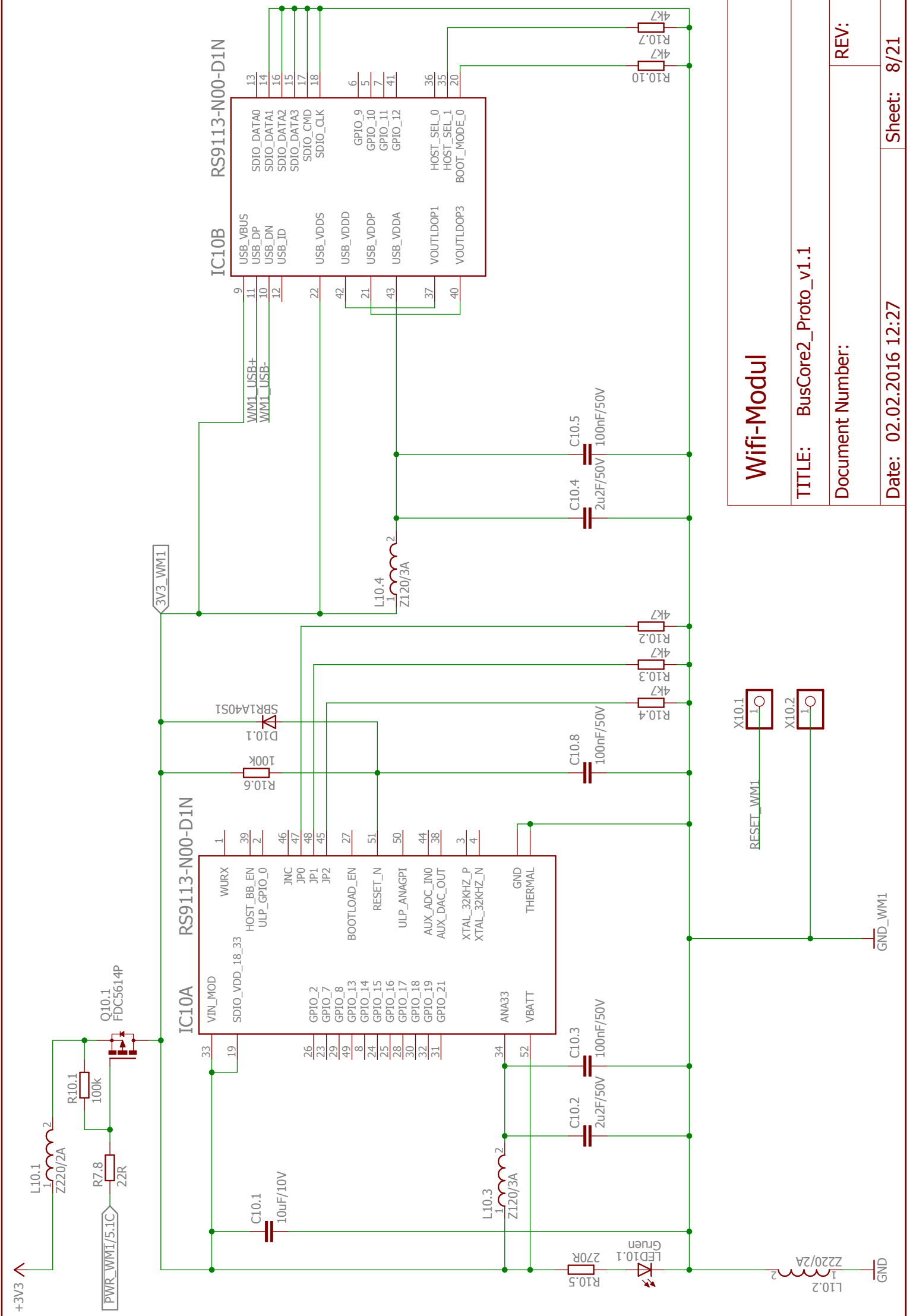
TITLE: BusCore2 Proto v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 6/21



Wifi-Modul

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 8/21



TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 9/21

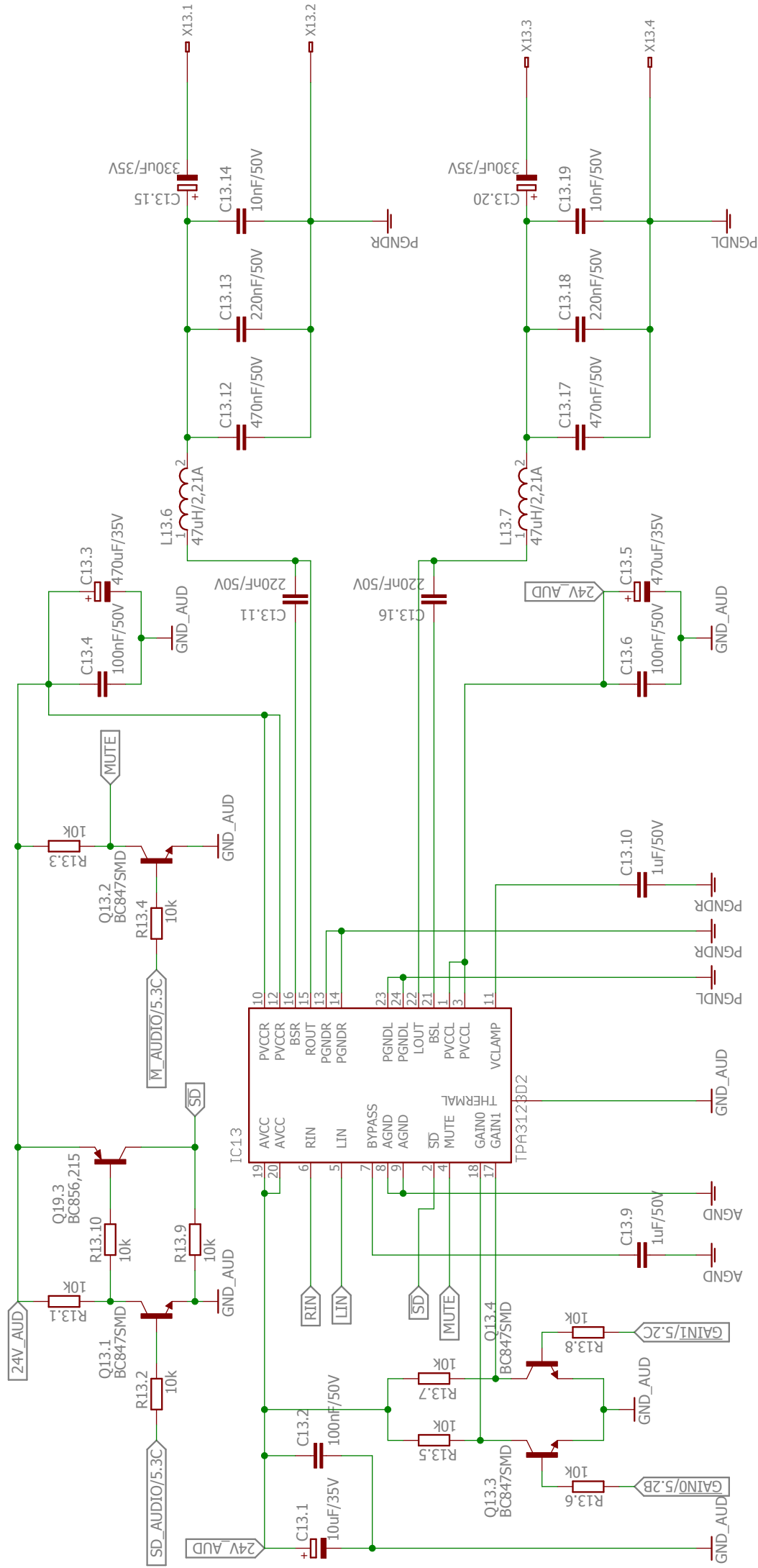


TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

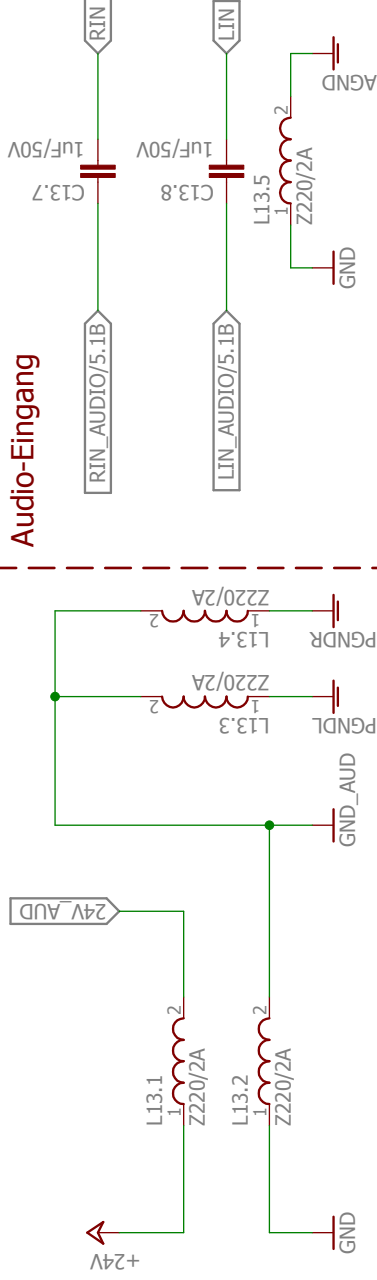
Document Number:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 10/21



Audio-Eingang



D-Class_Audioverstärker

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 11/21



Document Number:

+3V3

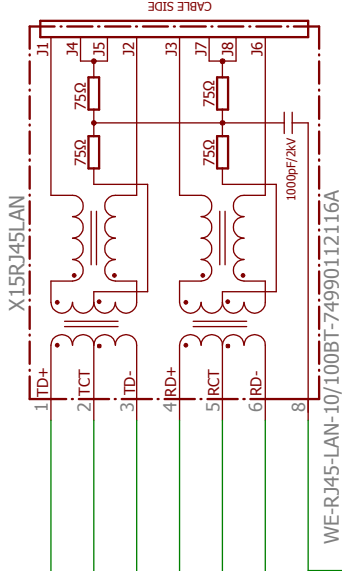
L15.1
1 2
Z220/2A

ETH_LINK_ACT
WE-RJ45-LAN-10/100BT-74990112116A
R15.1
180R

X15LED-GREEN

ETH_SPEED
WE-RJ45-LAN-10/100BT-74990112116A
R15.2
180R

X15LED-YELLOW



R15.3
50R

R15.4
50R

R15.5
50R

R15.6
50R

C15.1
100nF/50V

C15.2
100nF/50V

C15.3
100nF/50V

L15.2
1 2
Z220/2A

X15GND_SHIELD
Z1*2 WE-RJ45-LAN-10/100BT-74990112116A

GND

GND_LAN

Ethernet-Schnittstelle

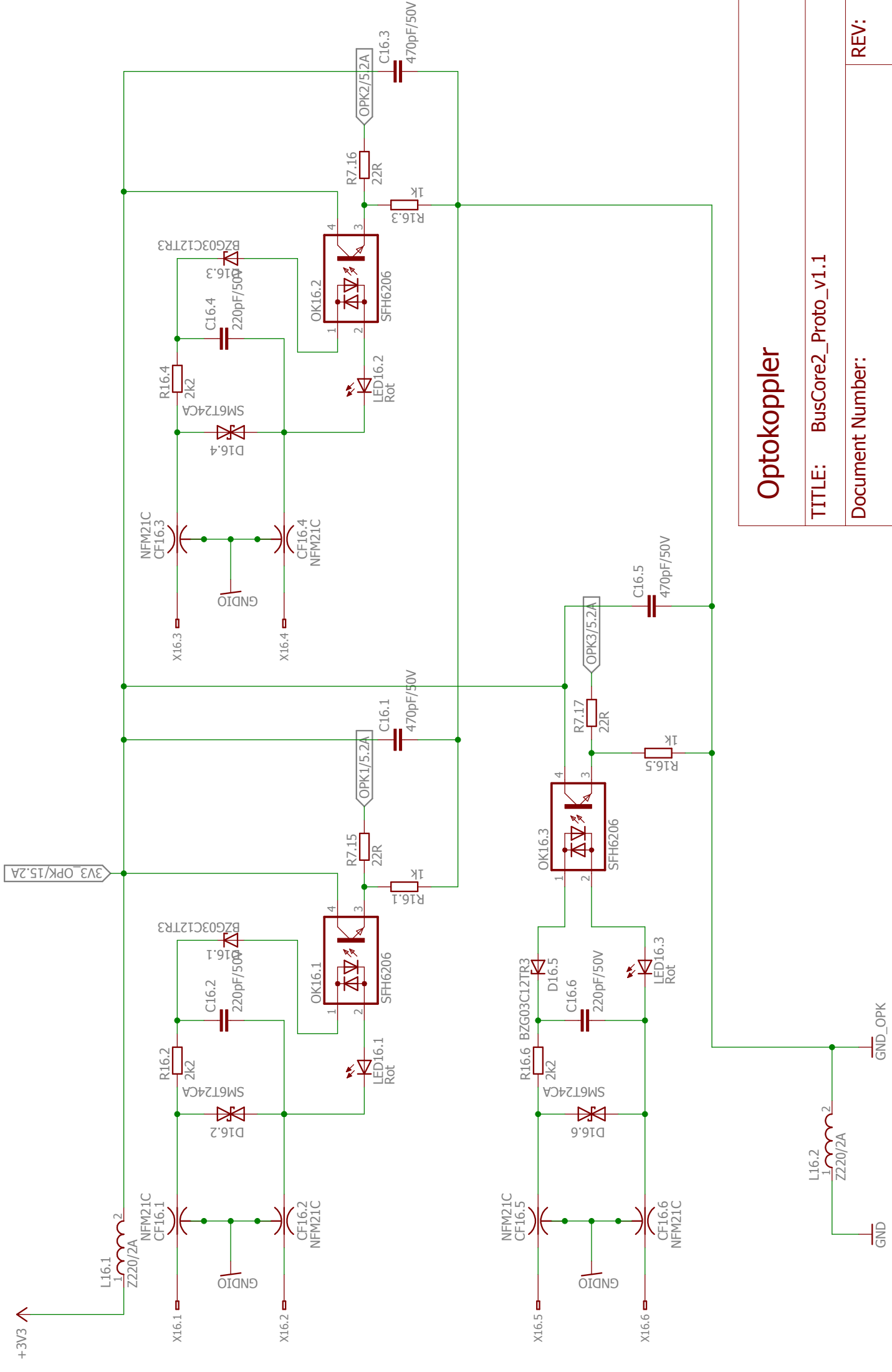
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 13/21



Optokoppler

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 14/21



Optokoppler

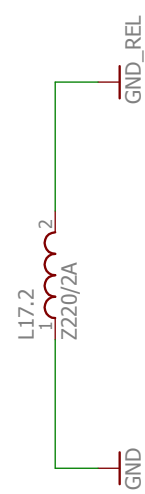
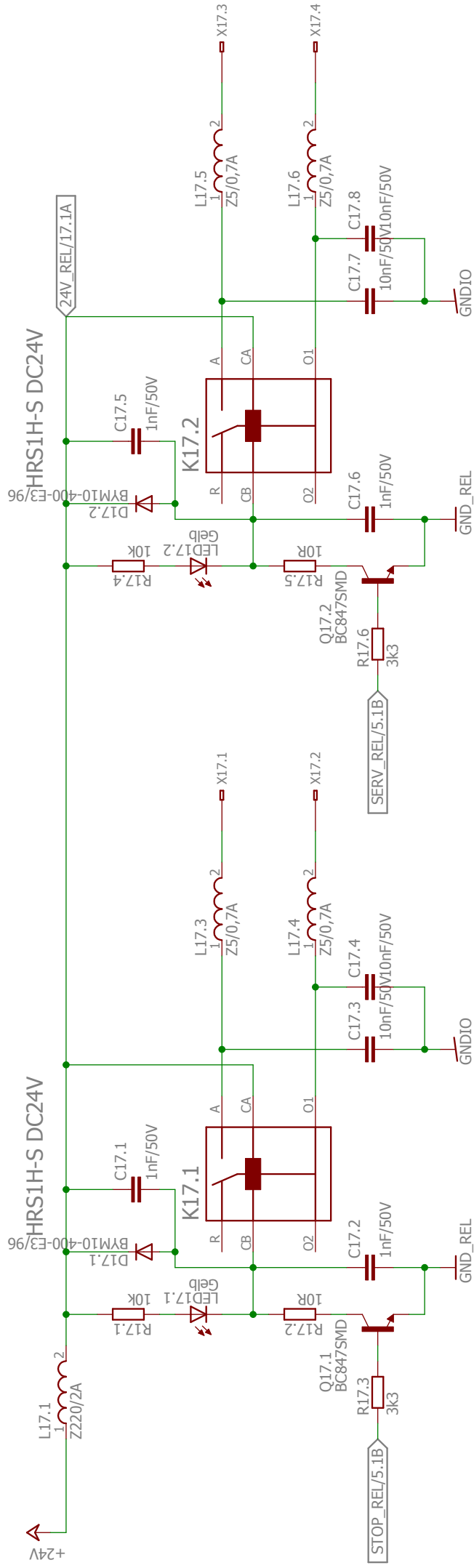
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 15/21



Relais

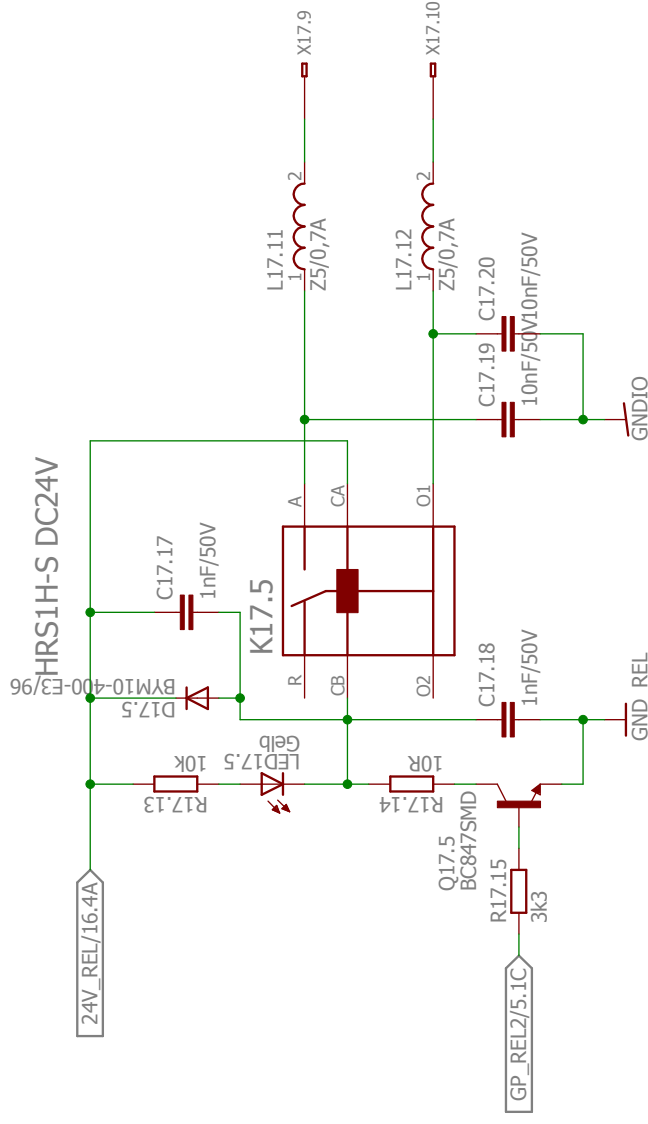
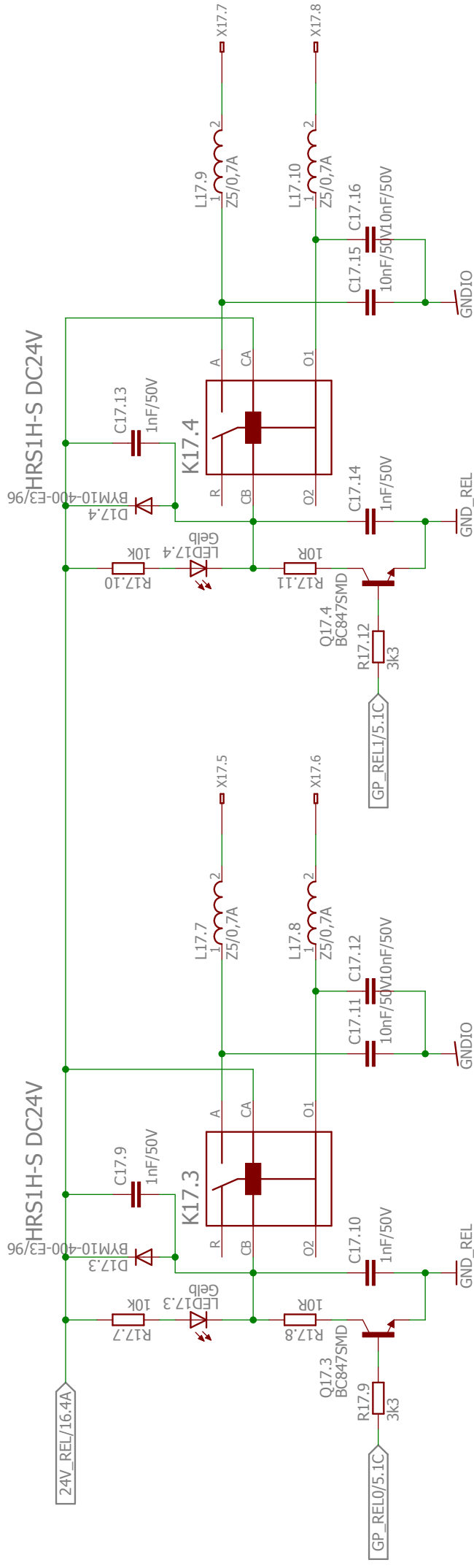
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 16/21



Relais

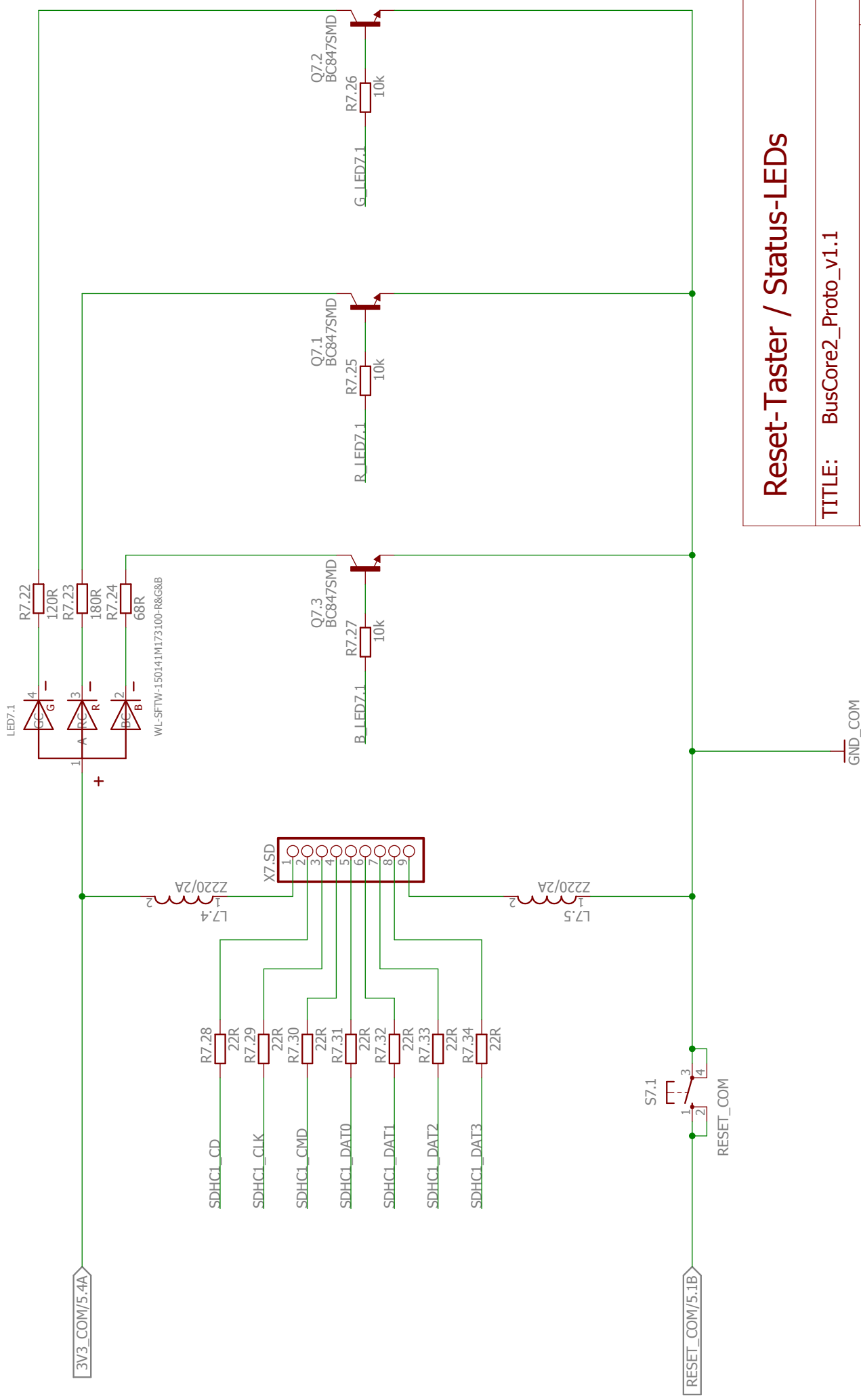
TITLE:	BusCore2_Proto_v1.1
--------	---------------------

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 17/21



Reset-Taster / Status-LEDs

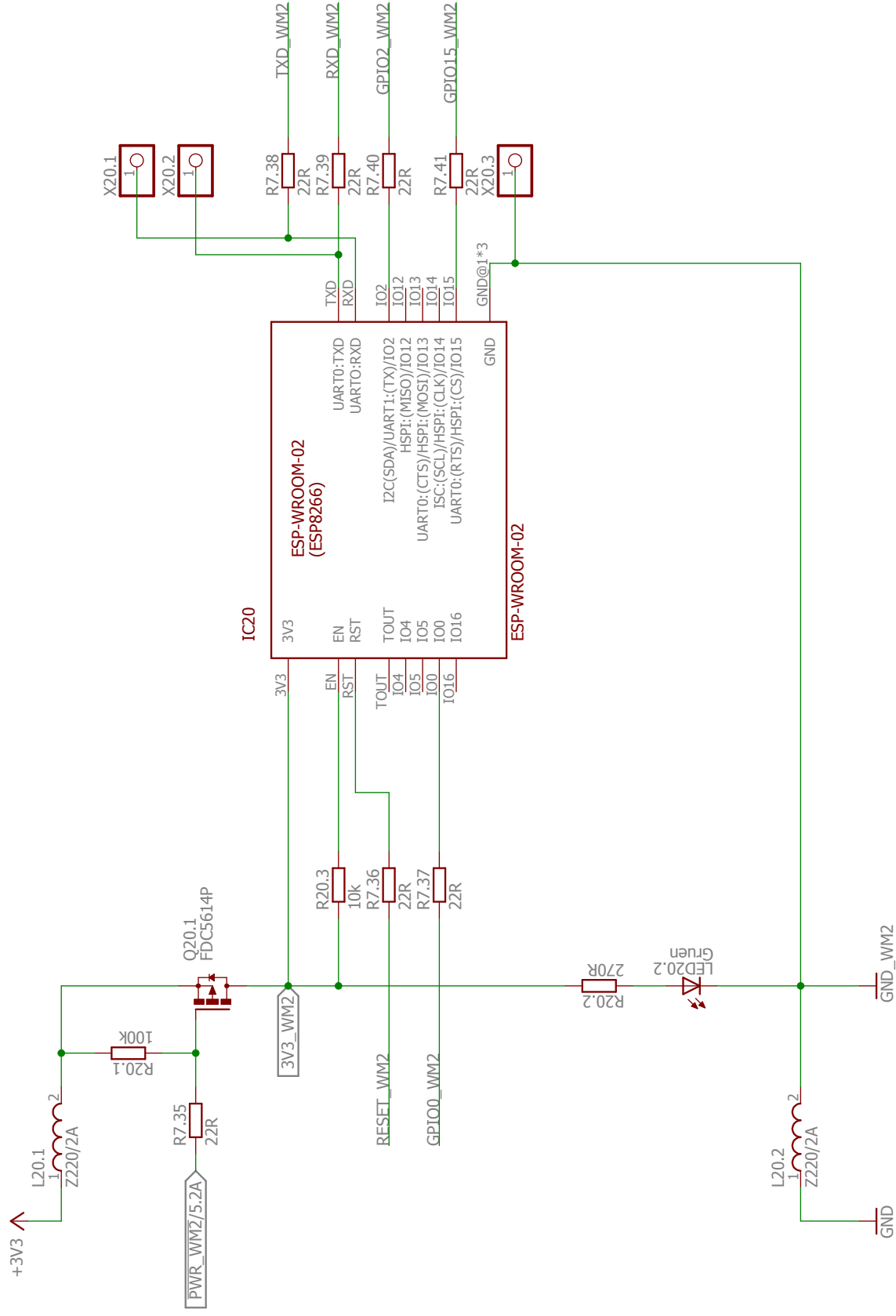
TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

REV:

Date: 02.02.2016 12:27

Sheet: 20/21



Wifi-Modul

TITLE: BusCore2_Proto_v1.1

Document Number:

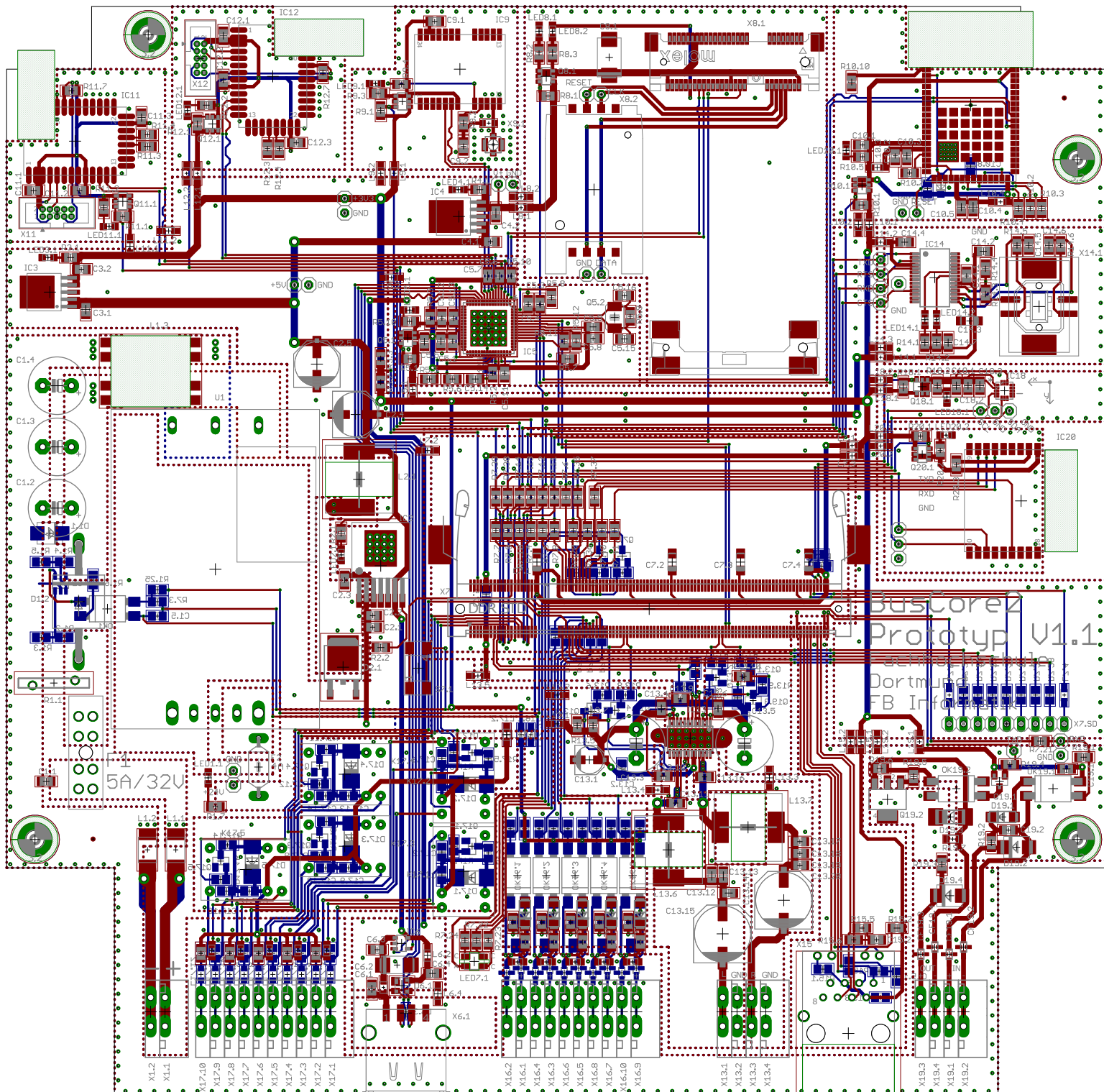
REV:

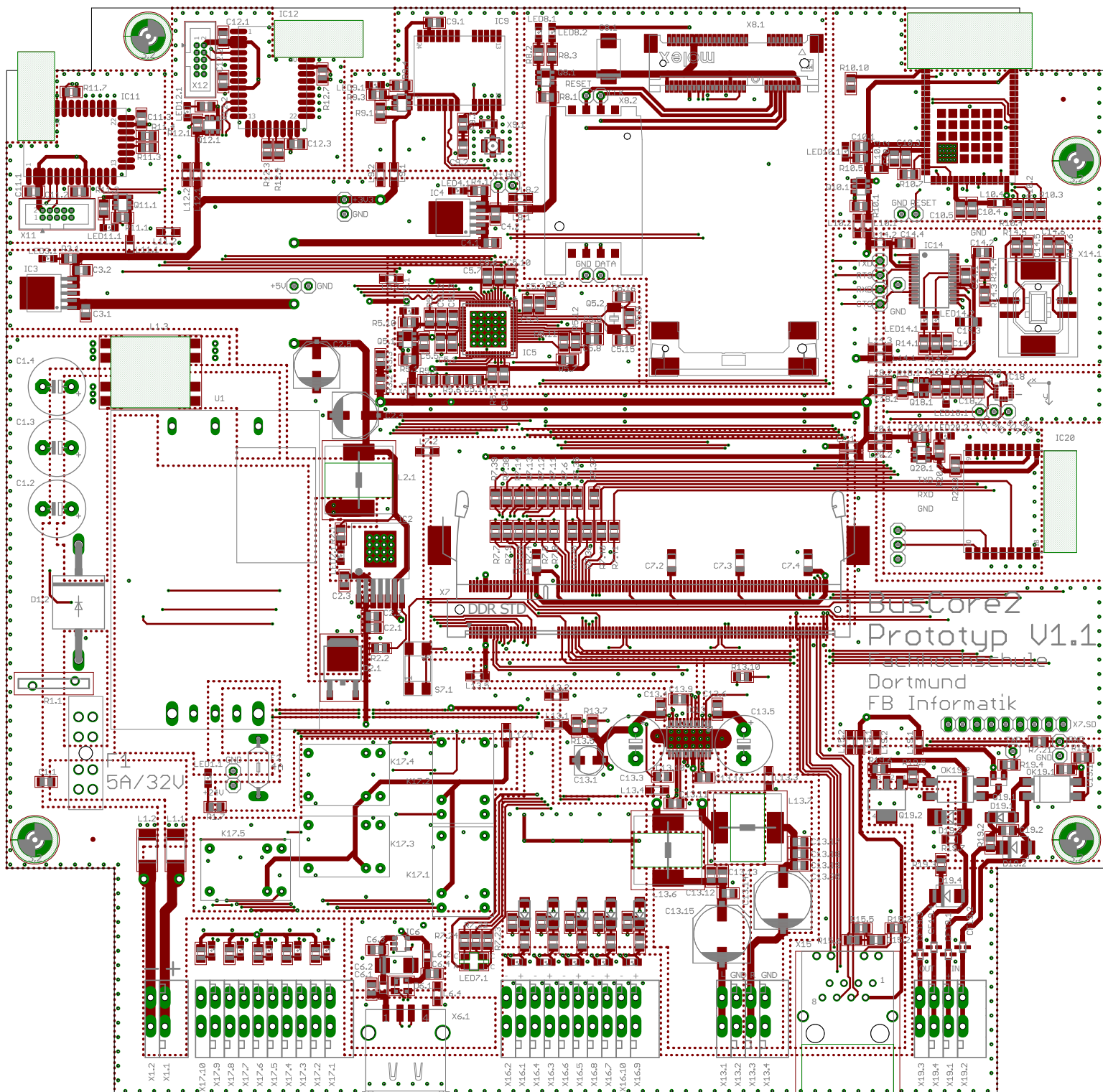
Date: 02.02.2016 12:27

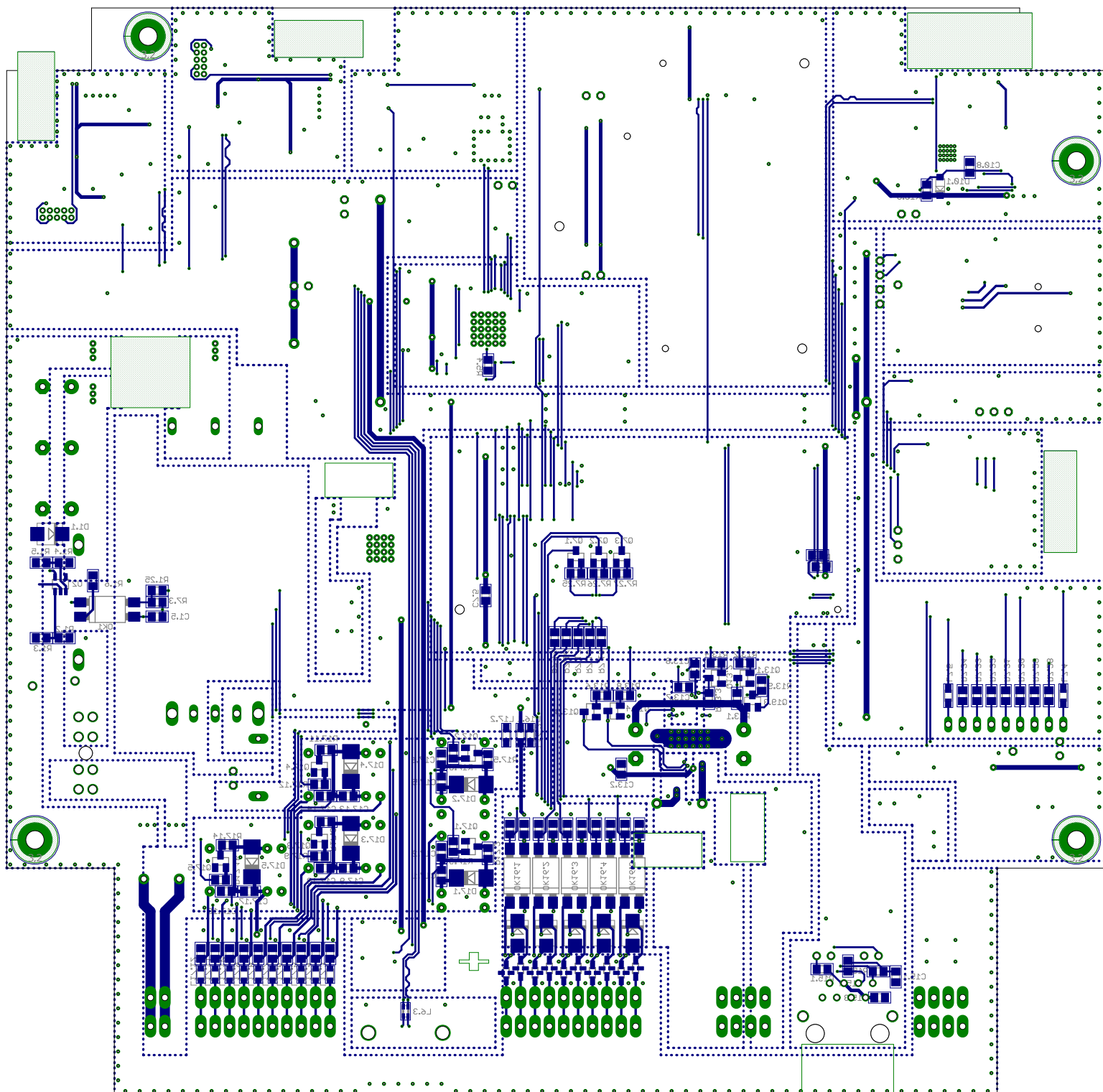
Sheet: 21/21

B. Platinenlayout

Um eine möglichst große Darstellung des Platinenlayouts zu gewährleisten, wird auf Seitenränder verzichtet. Auf den nachfolgenden Seiten wird zunächst das gesamte Platinenlayout vom Buscore2 Prototypen in der Version 1.1 abgebildet. Danach folgt eine Darstellung der Platine, bei welcher nur der Top-Layer eingeblendet ist. Abgeschlossen wird dieser Anhang von der Darstellung des Bottom-Layers der Platine.







Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und mich keiner fremden Hilfe bedient sowie keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften und anderen Quellen entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Dortmund, den 16. Februar 2016

Erklärung

Mir ist bekannt, dass nach § 156 StGB bzw. § 163 StGB eine falsche Versicherung an Eides Statt bzw. eine fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren bzw. bis zu einem Jahr oder mit Geldstrafe bestraft werden kann.

Dortmund, den 16. Februar 2016