



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG
TECHNISCHE FAKULTÄT



Lehrstuhl für Technische Elektronik

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer

Bachelorarbeit

im Studiengang

„Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (EEI)“

von

Christof Pfannenmüller

zum Thema

Aufbau und Inbetriebnahme einer mobilen Basisstation für feldstärkebasierte Lokalisierung

Betreuer: Dipl.-Ing. Felix Pflaum

Beginn: 25.04.2016

Abgabe: 26.09.2016

Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt habe und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen wurde.

Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Erlangen, den 26. September 2016

Christof Pfannenmüller

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Aufbau einer Basisstation mit sechs unabhängigen Transceivern. Der Einsatz dieses Aufbaus diente der späteren Lokalisierung von Sensoren oder anderen Sendern im Sub-GHz-Frequenzbereich um 868 MHz. Die relative Ortsbestimmung zur Basis sollte energieeffizient sein und gleichzeitig eine hohe Auflösung bieten.

Die genaue Position des Senders wurde dazu auf Basis der unterschiedlichen Feldstärken an den Transceivern eruiert. Ausgenutzt wurde dabei, das typische integrierte Transceiver die Empfangsfeldstärke selbst auswerten und bereitstellen, sodass diese ausgelesen werden kann. Das Erkennen von Übertragungen und das anschließende Auslesen der anfallenden Daten wurde dabei von einem Mikrocontroller übernommen. Zur weiteren Verarbeitung der Daten sollten diese anschließend einem Computer zur Verfügung gestellt werden. Dazu wurde sowohl eine USB- als auch eine Netzwerk-Schnittstelle vorgesehen. Die beim Aufbau der Platine verwendete Hardware basierte zum Großteil auf Bauteilen des Herstellers Infineon. Beim Layout der Platine wurden die sechs Transceiver sternförmig und regelmäßig um den Mikrocontroller und dessen Peripherie angeordnet, um ein gleichmäßiges Empfangsverhalten aus allen Raumrichtungen zu gewähren. Die Funksegmente der Platine wurden so gestaltet, dass diese bei Bedarf abgetrennt und mit einer Kabelverbindung weiter voneinander entfernt werden konnten. Antennen zum Senden wurden über Steckverbinder an die Basisstation angeschlossen.

Der anschließende Softwareentwurf für die Basisstation nutzte zu einem Großteil bereits bestehende Bibliotheken und hatte zur Aufgabe ankommende Übertragungen zu erkennen, die zur Ortung notwendigen gemessenen Werte abzufragen und an den Hostcomputer weiterzuleiten.

Abstract

Current localization measurements by magnitude and phase of electromagnetic waves have been complex and consume plenty of energy. However almost every receiver has knowledge of the electrical field strength, correlating to distance from transmitter, this information is nearly unused. A multi transceiver base station should start communication with a mobile wireless sensor. The relative positioning to the base could be calculated by the received signal strength (RSSI) already provided from transceivers without additional components. Due to the permeability of walls, the possible range and the wavelength, associated to resolution of localization, Sub-GHz frequency range is used. Therefore six identical transceiver-ICs were arranged over all horizontal directions in space. By detachable design of the transceiver-modules a rearranging of the antennas was made feasible to provide different distances for best resolution of localization. The ICs were controlled by a XMC4500 microcontroller connected to the transceivers with SPI and IRQ line for finished transmission. Distribution of received data and signal strength measurements to a host computer is accomplished by the XMC4500 over Ethernet and USB.

Abkürzungsverzeichnis

PCB	Printed Circuit Board	3
EDA	Electronic Design Automation	3
CAD	Computer-aided design	3
SMD	Surface-mounted device	4
SPI	Serial Peripheral Interface	5
DRC	Design-Rule-Check	5
FIFO	First In – First Out	6
NCS	Non-Chip-Select	6
IC	Integrierter Schaltkreis	7
SMA	Sub-Miniature-A	7
LQFP	Low Profile Quad Flat Package	9
BGA	Ball Grid Array	10
JTAG	Joint Test Action Group	10
TVS	Transient Voltage Suppressor	11
LDO	Low Drop-Out	13
SOT	Small Outline Transistor	13
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data	15
NC	Numerical Control	15
IDE	integrated development environment	17
GUI	Graphical User Interface	17
SDK	Software development kit	17
CPU	Central Processing Unit	18
ETH	Ethernet MAC (Ethernet Medium Access Control)	18
USB	Universal Serial Bus	18
GPIO	General Purpose Input/Output	18
USIC	Universal Serial Interface Channel	19

ISR	Interrupt Service Routine	20
ERU	Event Request Unit	20
ERS	Event Request Select	20
ETL	Event Trigger Logic	20
OGU	Output Gating Unit	20
NVIC	Nested Vectored Interrupt Controller	20
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard	21
GND	Masse (Ground)	22
MISO	Master-In Slave-Out	22
MOSI	Master-Out Slave-In	22
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	23
IRQ	Interrupt Request	24
PLL	Phasenregelschleife (phase-locked loop)	25
AGC	automatic gain control	26
RSSI	Received Signal Strength Indication	27

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zieldefinition	2
1.3	Projektmanagement	2
2	Platinenaufbau	3
2.1	Vorüberlegungen	3
2.2	Layoutprogramm Altium Designer	3
2.3	Verwendete Hardware	6
2.3.1	TDA5340	6
2.3.2	XMC4500	9
2.3.3	USB	10
2.3.4	Ethernet	11
2.3.5	Spannungsversorgung	13
2.4	Generierte Dokumente	15
2.5	Bestückung	16
3	Software	17
3.1	DAVE Entwicklungsumgebung	17
3.2	Verwendete Peripherie des XMC4500	18
3.2.1	GPIO	18
3.2.2	USIC	19
3.2.3	ERU	20
3.2.4	USB	20
3.2.5	Ethernet	21
3.3	Verwendete Bibliotheken	21
3.3.1	XMC Library (XMC Lib)	21
3.3.2	SPI Library	21
3.3.3	TDA5340 Library	23
3.3.4	Virtueller COM Port	23
3.4	Programmablauf	24
3.4.1	Konfiguration der Funkmodule	25
3.4.2	Interruptbasierte Datenerfassung	25
3.4.3	Weiterleitung der erfassten Daten	26

4	Feldtest	31
4.1	Aufbau	31
4.2	Durchführung	31
4.3	Ergebnisse und Auswertung	32
5	Zusammenfassung und Ausblick	35
	Abbildungsverzeichnis	37
	Tabellenverzeichnis	39
	Quellcodeverzeichnis	41
6	Anhang	43
6.1	Schaltpläne	43
6.2	Gehäuse	50
6.3	Seriennummern	51
6.4	Layout Aufsteckboard TDA5340	51
6.5	Quellcode	52
6.5.1	Main.c	52
6.5.2	ISRs.c	58
6.6	Feldtest	60
6.6.1	Feldtest 1	60
6.6.2	Feldtest 2	72

Einleitung

1.1 Motivation

Die Lokalisierung von Objekten bildet in der Sicherheits- und Automatisierungstechnik eine immer größere Basisdisziplin. Sie ist daher seit Anbeginn des Informationszeitalters eine zentrale Aufgabe der Elektronik. Im Zeitalter von Industrie 4.0 und allgegenwärtigen autonomen Systemen wird die Ortung von Objekten unersetzlich und gewinnt weiter an Bedeutung.

Bisherige Ansätze zur elektronischen Ortsbestimmung sind meist aufwändig mit einem hohen Energieverbrauch und benötigen viele Teilkomponenten. Dies macht die elektronische Ortsbestimmung teuer, was sich vor allem im Betrieb von Systemen wie GPS oder Galileo zeigt. Daneben haben diese Systeme vor allem den Nachteil, dass die verwendeten Frequenzen Wände kaum durchdringen und somit innerhalb von Gebäuden nicht verwendet werden können. Genau dieses Anwendungsszenario stellt jedoch in der Industrie 4.0 eine typische Fabrik dar. Dies führt dazu, dass für das am häufigsten verwendete Beispiel, einen autonom agierenden Roboter in einer Lagerhalle, andere Techniken zur Ortsbestimmung eingesetzt werden müssen.

Ortungsansätze für ein solches autonomes bewegliches System existieren bereits und werden, wie bei der WLAN-basierten Ortung, auch eingesetzt. Diese Systeme haben jedoch den Nachteil, dass sie viele Sender mit bekanntem Ort benötigen. Dies erfordert eine aufwändige Kalibrierung des Systems und führt vor allem zu einem großen Energieverbrauch des Gesamtsystems, da alle stationären Einheiten dauerhaft senden müssen, um eine Ortung zu ermöglichen. Ein weiterer Nachteil der Systeme ist, dass nur der zu ortende Client die Informationen über seinen Standort hat. Für ein außenstehendes System, wie den steuernden Hauptrechner einer Industrieanlage, ist nicht festzustellen, wo das Objekt sich befindet. Durch diese Probleme ließe sich das Anwendungsszenario eines einzelnen autarken Funksensors, dessen Messwert vom Hauptrechner abgefragt wird, nur schwer realisieren. Der Sensor müsste über eine große Energiereserve verfügen und ständig aktiv sein, um zu erkennen wenn er dazu aufgefordert wird seine Position zu ermitteln und mitzuteilen.

Durch das Verlagern der Ortungsaufgabe auf das stationäre System müsste der Sensor

nur beim Vorliegen eines neuen Messwertes eine Funkverbindung aufbauen. Die Basisstation könnte aus dem empfangenen Signal sowohl den Messwert extrahieren als auch eine Lokalisierung durchführen. Sollte der stationäre Teil aus nur einer Einheit bestehen, wäre auch eine Änderung am Gesamtsystems, wie eine Ortsänderung der stationären Einheit, einfach möglich, da nur die relative Position zu dieser ermittelt wird, weshalb eine Neukalibrierung des Systems entfällt. Der Sensor selbst benötigt im Normalfall keine Information über seinen Aufenthaltsort. Dies erlaubt eine mobile Ortung da die Basis unkompliziert bewegt werden kann.

Es bietet sich hierfür eine Nutzung des Sub-GHz-Frequenzbandes an, welches deutlich weniger belegt ist, in dem meist nur kurze Funkdauern verwendet werden und in welchem eine Übertragung vor allem energieeffizienter möglich ist [1]. Ein weiterer Vorteil des verwendeten Frequenzbandes sind die besseren Penetrationseigenschaften durch Wände und Personen im Vergleich zu Ansätzen, die etwa auf WLAN basieren.

1.2 Zieldefinition

Zum Umsetzen einer solchen oben beschriebenen Ortung sollte eine Basisstation aufgebaut werden, welche als stationäre Einheit einen Sender orten könnte. Die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit bestand im Einarbeiten in den vorgegeben Transceiver TDA5340 und den Mikrocontroller XMC4500. Bei der Gestaltung des Layouts für die Platine mit Altium Designer wurden diese über einen SPI-Bus verbunden. Die Platine sollte zusätzlich ein Konzept zur Bereitstellung der Versorgungsspannung enthalten. Um die Weiterverarbeitung der bezogenen Messwerte sicherzustellen, war eine LAN-Schnittstelle sowie eine Möglichkeit für einen USB-Anschluss zu einem PC zu integrieren.

Das ursprünglich geplante Design von PCB-Antennen an den Transceivern auf der Platine wurde wegen des Umfangs der dazu notwendigen Simulationen zu Beginn aus der Aufgabenstellung entfernt. Stattdessen wurden zugekaufte Antennen mit der Basisstation verwendet, welche über Steckverbinder angeschlossen wurden.

Eine funktionierende Firmware für das Initialisieren und Betreiben der Basisstation war ebenfalls mit der dazu notwendigen Entwicklungsumgebung zu erstellen. Dabei musste der Mikrocontroller auf, vom Transceiver ausgelöst, Interrupts für ankommende Übertragungen reagieren und Messwerte erfassen, beides wurde anschließend entsprechend weitergeleitet. Durch die Verwendung von Makros beim Softwareentwurf sollte eine spätere Anpassung, wie das Tauschen von Pins leichter möglich sein.

1.3 Projektmanagement

Die vorliegende Arbeit wurde innerhalb von fünf Monaten am Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität Erlangen-Nürnberg angefertigt. Dabei lag der Fokus in den ersten beiden Monaten auf dem Layout der Platine und dem anschließenden Bestücken. In der folgenden Zeit wurde vermehrt auf die Software für den Betrieb der Basisstation eingegangen. Außerdem wurde in den letzten zwei Monaten die Dokumentation mit Latex erstellt. Als Versionskontrolle für das gesamte Projekt wurde Github eingesetzt.

Platinenaufbau

2.1 Vorüberlegungen

Die Zielsetzung im Aufbau der Platine war eine kompakte Basisstation mit sechs Transceivern und einer zentralen Steuereinheit. Um sicherzustellen, dass alle Antennen gleichmäßig in die sechs vorgegebenen Raumrichtungen abstrahlen, sollte bereits die Platine symmetrisch aufgebaut werden. Dazu wurde zuerst das Layout der sechs identischen Transceiver-Einheiten mit dem TDA5340 Baustein und den Antennenanschlüssen erstellt und anschließend gleichmäßig um die weiteren für die Schaltung notwendigen funktionellen Segmente angeordnet.

2.2 Layoutprogramm Altium Designer

Bei dem Entwicklungswerkzeug „Altium Designer“ des Entwicklers Altium Limited handelt es sich um ein System zum Entwurf von gedruckten Schaltungen oder Printed Circuit Boards (PCBs). Ein solches Programm wird auch als Electronic Design Automation (EDA) oder ECAD für electronic Computer-aided design (CAD) bezeichnet, da es den Entwickler bei der Umsetzung der Anforderungen in einen Schaltplan und später eine Platine unterstützen soll. Wie viele andere EDA-Programme ist auch Altium Designer so aufgebaut, dass sich der Entwickler zuerst mit dem allgemeinen symbolisierten Schaltplan befassen kann und erst zu einem späteren Zeitpunkt die tatsächliche Anordnung der Bauteile auf dem PCB-Substrat festgelegt wird. Somit können zuerst im Schematic Editor die Funktionen der Schaltung umgesetzt werden. Dazu werden die verwendeten Bauteile aus zuvor angelegten Bibliotheken verwendet oder es werden bestehende Libraries genutzt, die etwa vom Hersteller der Bauteile zur Verfügung gestellt werden. Altium selbst bietet hierfür auch diverse Möglichkeiten an und stellt Bauteile nach Hersteller und Art geordnet bereit. In den Bibliotheken sind alle im weiteren Verlauf benötigten Informationen über die einzelnen Bauteile enthalten. So liegen dort etwa entsprechenden Abbildungen für das Bauteil im Schaltplan vor. In den so genannten „Footprints“ zu jedem Bauteil, welche ebenfalls in den Bibliotheken enthalten sind, wurden zuvor die, für das physikalische

Gehäuse, notwendigen Abmessungen, Löt pads und Ausmaße für Lötstopplack um das Bauteil festgelegt. Da es Bauteile, wie den verwendeten Mikrocontroller, in verschiedenen Gehäusen geben kann, besteht somit auch die Möglichkeit hier zwischen verschiedenen Footprints zu wählen. Da viele Gehäuse herstellerübergreifend genormt sind, konnten teilweise bestehende Footprints genutzt oder diese mehrfach verwendet werden.

Wie bereits erwähnt wird im EDA-Programm zuerst der symbolische Schaltplan erstellt. Dieser wird anschließend in ein Layout für eine Platine umgewandelt. Die zu den Schaltplansymbolen korrespondierenden Footprints werden dazu auf dem Layout der Platine angeordnet und durch das „Routing“ werden die Leiterbahnen definiert. Altium Designer ist dabei in drei Teilbereiche unterteilt: im „Board Planning Mode“ liegt der Fokus auf dem Anordnen der einzelnen Bauteile und Komponenten auf der Leiterplatte, außerdem wird in diesem Bereich die Form und das Ausmaß der Leiterplatte festgelegt. Im 2D-Modus des PCB-Editor lassen sich anschließend die aus der Definition im Schaltplan ergebenden elektrischen Verbindungen örtlich auf den verschiedenen Kupferebenen (Layern) anordnen. Die Hauptarbeit findet also in diesem Teil des PCB-Editors statt. Der 3D-Modus dient anschließend zur Evaluation des Designs und zur Anpassung an Gehäuse oder andere Komponenten. In den verschiedenen Ebenen oder „Layern“ sind die Kupferebenen und andere Schichten der späteren Platine wie der Bestückungsdruck oder der Lötstopplack gesammelt. Jede Ebene entspricht daher einer zu fertigenden Schicht und existiert für die Vorder- und Rückseite der Platine. Beim Bewegen eines Bauteils wird nicht nur die markierte Abmessung, sondern etwa auch die Anschluss-Pads und der Lötstopplack auf denen entsprechenden Ebenen bewegt. Durch Vias sind elektrische Verbindungen zwischen den Kupferschichten möglich.

Für die Basisstation wurden zwei Kupferebenen und ausschließlich sogenannte Surface-mounted device (SMD)-Bauelemente verwendet. Diese liegen nur auf der Oberfläche der Platine auf und sind durch ihre Lötverbindungen befestigt. Die Vorteile dieser Bauteile sind der geringe Preis und die kleinen Abmessungen.

Wegen der Größe des Projekts wurde zur besseren Übersicht ein so genanntes „Multi-Sheet-Design“ erstellt. Dadurch war es möglich, die verschiedenen funktionellen Blöcke der Basisstation auf getrennte Blätter des Schaltplans zu verteilen. Der Mikrocontroller, die Spannungsversorgung und der Transceiver, sowie die für eine Netzkommunikation notwendigen Bauteile wurden dabei auf unabhängigen Seiten angeordnet und dort die elektrischen Verbindungen erstellt.

Da der Transceiver und die entsprechende Peripherie sechsmal in identischer Anordnung und Beschaltung verwendet wurden und auch auf dem PCB-Substrat mehrfach mit Leiterbahnen verbunden und angeordnet werden mussten, wurde hierfür ein so genanntes „Multi-Channel“-Design gewählt. In Altium Designer können mit diesem Feature identische Schaltungsteile einmal angeordnet, mit Leiterbahnen verbunden und dieses Design auf alle anderen entsprechenden Schaltungsteile angewendet werden. Somit muss das aufwändige Anordnen der Bauteile und die Führung der Leiterbahnen nur bei einem der Kanäle durchgeführt werden. Dazu wurde mit Hilfe eines übergeordneten Sheet-Symbols der Schaltplan des Transceivers in den Schaltplan des Mikrocontrollers eingefügt und diesem somit untergeordnet. Über Ports, welche zum Schaltplansymbol hinzugefügt werden, lassen sich elektrische Verbindungen zwischen Netzen innerhalb der Schaltpläne für Transceiver und Mikrocontroller erstellen. Dabei wird im Transceiver-Schaltplan ein Port

hinzugefügt, der mit dem gewünschten elektrischen Netz verbunden werden kann. Auf dem Schaltplansymbol im Mikrocontroller-Schaltplan wird ein entsprechender gleichnamiger Port erstellt, der mit Netzen am Mikrocontroller verbunden werden kann. Da die drei Verbindungen der Serial Peripheral Interface (SPI)-Kommunikation jeweils aus einem Netz bestehen und etwa alle MISO-Leitungen an demselben Pin des XMC4500 und denselben Anschluss bei allen TDAs angebunden sind, konnte hierfür ein einfacher Port verwendet werden. Alle anderen Anschlüsse, wie etwa die Auswahlleitung für das SPI-Interface, welche für jede der sechs verschiedenen Transceiver-Einheiten mit einem anderen Anschluss des Mikrocontrollers verbunden sein musste, wurden deswegen mit dem Repeat-Kommando erstellt. So wird im untergeordneten Schaltplan, in diesem Fall dem des TDA, der Port beliebig benannt, etwa als „NCS“. Der auf dem Schaltplansymbol erstellte korrespondierende Port wird dagegen in „Repeat(NCS)“ umbenannt. Eine Verbindung mit dem Port auf dem Schaltplansymbol wird dadurch zu einem Bus. Dieser kann aufgetrennt werden und die Verbindungen von jedem Kanal als einzelnes Signal an den Mikrocontroller angeschlossen werden. Globale Netze wie die Versorgungsspannung von 3,3 Volt oder die Masse müssen dabei nicht als Port hinzugefügt werden. Altium Designer stellt deren Verbindungen automatisch her.

Wird nun noch der Name des Schaltplansymbols nach dem folgenden Muster angepasst, wird Altium Designer beim Kompilieren des Projektes ein Multi-Channel-Design erstellen, die Kanäle wie angegeben durchnummerieren und den Kanal im PCB-Editor entsprechend mehrfach erstellen. Dazu sollte der Name die Struktur „Repeat(<Name>,<Startnummer>,<Endnummer>)“ aufweisen. Anschließend kann die Anordnung und das Routing des ersten Kanals erfolgen. Da für jeden Kanal ein eigener so genannter „Room“ erstellt wird, lassen sich, nach dem Erstellen der Leiterbahnen des ersten Kanals, die Anordnungen der Bauteile und Leiterbahnen mit dem „Copy Room Format“-Befehl auf alle anderen Kanäle erweitern. Ein Room bezeichnet dabei eine Gruppe an Elementen im PCB-Editor und einen Bereich der Platine, in dem diese angeordnet sind und erlaubt so das Verschieben ganzer Schaltungsteile auf der Platine. Der Schaltplan des Hauptkanals, welcher einen einzelnen der sechs Kanal darstellt, ist in Abbildung 2.1 zu erkennen.

Altium Designer nummeriert automatisch die verwendeten Bauelemente durch, um die genaue Identifikation eines Bauteiles zu erlauben und erstellt automatisch einen Aufdruck neben dem Lötpad mit dem Bauteilnamen in der entsprechenden Ebene. Ein solcher Bestückungsdruck zur leichteren Anordnung der Bauteile auf der fertig entwickelten Platine wurde nur auf der Hauptplatine erstellt. Auf den Teilplatinen für die Transceiver wurde dieser aus Platzgründen weggelassen.

Um sicherzustellen, dass die sich aus der Bauteilanordnung ergebenden Pads und die Leiterbahnen auch fertigbar sind, stellt Altium Designer zwei Design-Rule-Checks (DRCs) bereit. Im ersten Live-DRC werden „Violations“, also Bauteile mit Verstößen gegen die Designregeln, durch ein farbiges Overlay markiert. Im folgenden kompletten Test zeigt Altium alle weiteren Verstöße an. Als Verstoß gelten etwa Leiterbahnen unterschiedlicher Netze, die sich berühren und zu einem Kurzschluss führen würden oder auch Verletzungen der festgelegten Abstandsregeln (Clearance). Alle Regeln für Violations können im „PCB Rules Editor“ eingestellt werden und so an die Möglichkeiten des PCB-Herstellers angepasst werden. Da die Leiterplatte für die Basisstation von Multi Circuit Boards Ltd. hergestellt wurde, konnten die auf der Webseite dieses Herstellers angegebenen Designre-

geln für den DRC übernommen werden. Da bei Altium Designer im DRC kurzgeschlossene und falsch verbundene Leitungen oder Pads angezeigt werden, muss kein extra „Layout vs. Schematic“-Test durchgeführt werden, der den vorher erstellten Schaltplan mit dem Layout abgleicht. Solche Unterschiede zwischen Schaltplan und dem PCB-Layout würden durch den DRC bereits angezeigt.

2.3 Verwendete Hardware

2.3.1 TDA5340

Der verwendete Transceiver TDA5340 wird von Infineon Technologies AG entwickelt und vertrieben. Er ist Teil der SmartLEWIS Produktfamilie die energiesparende Lösungen für Funkanwendungen im Frequenzspektrum unterhalb von einem Gigahertz bietet. Der Transceiver kommuniziert mit seinem Host über das SPI-Protokoll, der Mikrocontroller ist in diesem Fall sternförmig mit den einzelnen TDA-Bausteinen verbunden, die als Slaves fungieren. Die Daten werden mit drei gemeinsamen Leitungen übertragen, eine vierte Leitung dient dem XMC zur Auswahl des gewünschten Slaves für die Kommunikation. Diese Non-Chip-Select (NCS)-Leitung arbeitet active-low, sodass der jeweilige TDA5340 eine Interaktion akzeptiert, sobald diese vom XMC-Baustein auf Massepotential gezogen wird. Von den drei eigentlichen Datenleitungen fungiert eine als reiner Ausgang des Masters bzw. Dateneingang des TDA (MOSI), eine zweite als Eingang des Masters (MISO) und die dritte als ein vom Mikrocontroller getriebenes Clock-Signal. Bei dem auf MISO und MOSI anliegenden Signal handelt es sich um ein unipolar kodierte non-return-to-zero Signal, welches einer logischen 0 bei Massepotential entspricht. Der TDA unterstützt acht verschiedene Instruktionen, die es erlauben entweder einzelne Register des Bausteins zu lesen bzw. zu schreiben, auf mehrere hintereinander folgende Register oder auf die beiden Puffer des Bausteins zuzugreifen. In den beiden Puffern, die als First In – First Out (FIFO)-Strukturen aufgebaut sind, werden die vom TDA erkannten und demodulierten bzw. die auf Übertragung wartenden Signalkomplexe zwischengespeichert. Diese Zwischenspeicherung soll den Mikrocontroller entlasten, so können entsprechende Datenpakete dem TDA5340 mitgeteilt werden und dieser übernimmt selbsttätig eine korrekte Modulation und Übertragung mit den eingestellten Parametern.

Der TDA5340 kann sowohl mit einer Versorgungsspannung von 5 V als auch bei 3,3 V arbeiten. Da aber der XMC nur bei letzterer betrieben werden kann, wurde der TDA-Baustein und die externe Beschaltung ebenfalls auf 3,3 V ausgelegt.

Um zu einem späterem Zeitpunkt eine größere Entfernung zwischen den einzelnen Antennen, und somit auch den jeweiligen Transceivern zu erlauben, wurde eine Sollbruchstelle vorgesehen. Dadurch könnte die gesamte Baugruppe von der Mutterplatine entfernt werden, was unter Umständen notwendig gewesen wäre, um die Auswirkungen verschiedener Antennenabstände an der Basis zu evaluieren und somit eine bessere Auflösung in der Ortung zu erlauben. Dazu wurden Anschlussleisten im Rastermaß 2,54 mm an beiden Seiten der Sollbruchstelle vorgesehen. Die Verbindung der Transceiver-Einheiten mit der Hauptplatine wurde über diese Sollbruchstelle hinweg mit Leiterbahnen gewährleistet. Nach dem Abtrennen der TDA-Teilplatine, an der durch Bohrungen vorgesehenen Bruchstelle, wäre die elektrische Verbindung durch Kabel sichergestellt worden. Da es sich bei

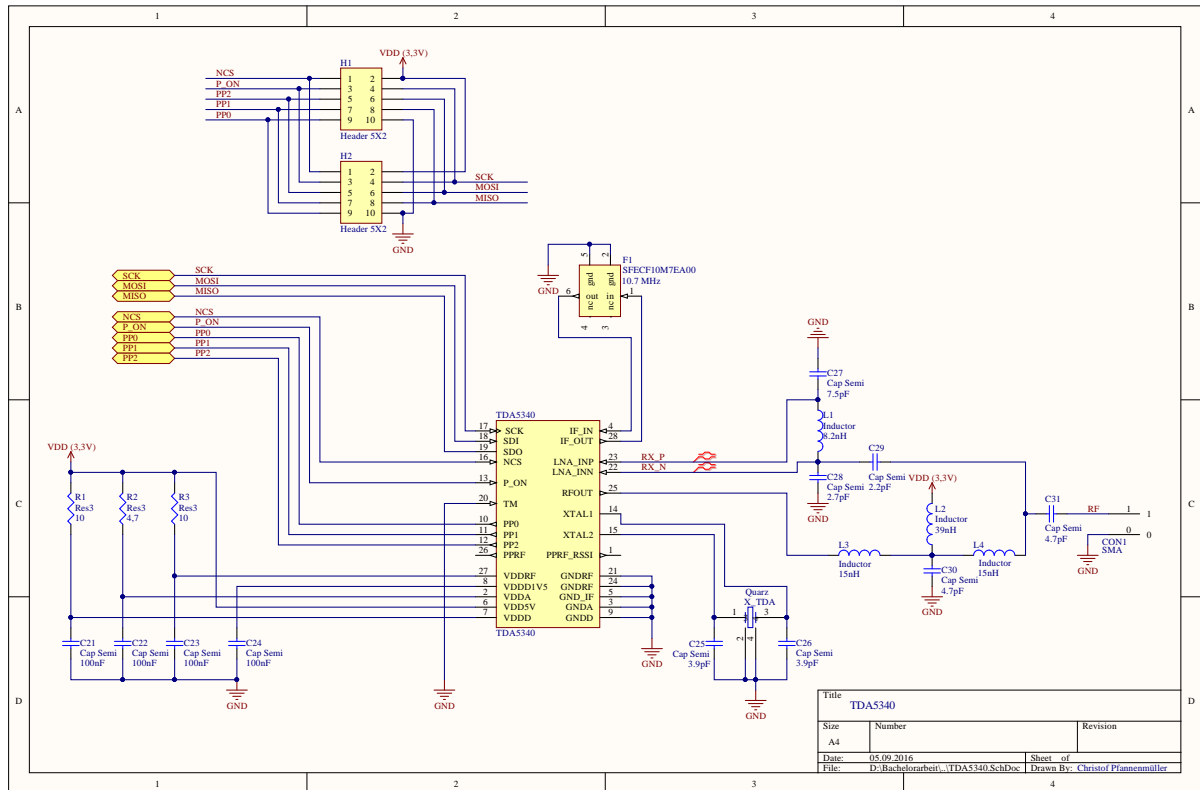


Abb. 2.1: Schaltplan der Transceiverbaugruppe

den zu übertragenden ausschließlich um digitale Signale geringerer Frequenzen im Bereich unter 1 MHz handelt, hätte dies unproblematisch mit ungeschirmten Flachbandkabeln realisiert werden können. Neben der Versorgungsspannung, Masse und den vier für die SPI-Kommunikation notwendigen Signalen wurden noch die drei multifunktionalen Digitalausgänge und der Power-On Reset-Pin (P_ON) dem XMC4500 über die Buchsenleisten zur Verfügung gestellt.

Der TDA5340 ist ein Integrierter Schaltkreis (IC) der über drei multifunktionale Digitalausgänge PP0, PP1 und PP2 verfügt. Diese können durch entsprechende Kalibrierung von Registern mit verschiedenen Signalen belegt werden. So ist es etwa möglich mit diesen einen externen Antennenumschalter zu steuern oder andere Signale wie ein Clocksignal auszugeben. PP2 wird vom TDA standardmäßig als Interrupt Signal verwendet. Die nicht verwendeten PP1 und PP0 wurden bei der späteren Konfiguration in den hochohmige Zustand geschaltet. Durch einen am P_ON-Pin anliegenden High-Pegel wechseln der Transceiver in den eingeschalteten Zustand. Anderenfalls ist dieser ausgeschaltet und verbraucht typischerweise weniger als 1 μ A.

Die Antenne wurde am oberen Ende jeder TDA5340-Teilplatine vorgesehen. Als Anschluss für die Antenne wurde hier eine Koaxialbuchse in Sub-Miniature-A (SMA)-Ausführung verwendet, welche auf 50 Ω angepasst ist. Durch den Koaxialsteckverbinder konnte sichergestellt werden, dass alle notwendigen Frequenzen auch korrekt und unge-dämpft passieren können. Das Anpassnetzwerk zwischen dem integrierten Transceiver und der verwendeten SMA-Buchse diente der Leistungsanpassung zwischen den Pins

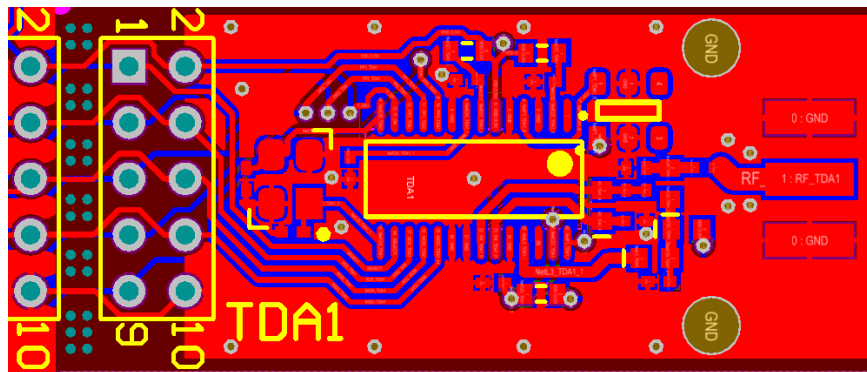


Abb. 2.2: Layout des Transceivers mit der Sollbruchstelle und der Steckerleiste (links) sowie dem Anpassnetzwerk. Die Lötflächen für die SMA-Buchse sind auf der rechten Seite erkennbar

des TDA5340 und der 50- Ω -Koaxialbuchse. Der Aufbau des Anpassnetzwerkes basiert auf einem von Stefan Erhard erstellten Schaltplan für eine Aufsteckplatine für das Evaluationsboard „XMC 2Go“ von Infineon. Das entsprechende Layout ist im Anhang 6.4 abgebildet. Durch die Verwendung von hoch abgestimmten Spulen und Kondensatoren mit Toleranzen von nur $\pm 0,05$ pF bei einem Nennwert von 2,5 pF wurde die korrekte Anpassung sichergestellt.

Zur Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften wurden die Freiräume zwischen den Leiterbahnen mit einer Kupferfläche gefüllt, die mit dem Masseanschluss verbunden war. Durch die Verwendung von Vias, vor allem im Bereich des Anpassnetzwerkes, sollte eine niederohmige Verbindung zwischen den beiden Masseflächen auf der Ober- bzw. Unterseite der Platine erreicht werden. Daneben dienten diese, auf Nullpotential liegenden Vias, jedoch vor allem der Abschirmung der Pfade für die HF-Signale gegen mögliche Einkoppelungen aus der Umgebung, welche ankommende Funksignale stören könnten.

Obwohl der TDA5340 einen eingebauten Zwischenfrequenz-Filter hat, der über eine umschaltbare Bandbreite verfügt, wurde ein externer Keramikfilter verwendet. Der TDA stellt dafür zwei Pins bereit, zwischen denen ein solcher Filter mit einer Frequenz von 10,7 MHz angeschlossen werden kann. Ohne einen hier extern angeschlossenen Filter würde der TDA als einfacher heterodyner Mischer direkt auf die Zwischenfrequenz $f_{IF2} = 274$ kHz heruntermischen. Bei Verwendung eines externen Keramik- oder auch eines LC- π -Filters kann das ankommende HF-Signal jedoch in zwei Stufen gefiltert werden, ehe es in das Basisband demoduliert wird, was zu einer höheren Signalqualität führt. Die Umstellung zwischen einfacher und Double Down Conversion erfolgt durch das setzen eines dafür vorgesehenen Bits [2][3].

Die elektrischen Verbindungen zwischen den beiden symmetrischen Eingängen des Low Noise Amplifier und dem Anpassnetzwerk wurden mit dem „Differential Pair Routing“-Feature von Altium Designer erstellt. Durch einen im Schaltplan auf die positive und negative elektrische Leitung zwischen dem TDA5340 und dem Anpassnetzwerk angewendeten Parameter wird das Leitungspaar als differentiell markiert. Anschließend kann mit dem interaktiven „Differential Pair Routing“ einer der beiden Leitungen begonnen werden. Altium Designer wird dabei selbstständig versuchen, die zweite Leiterbahn des Paares so anzuordnen, dass die beiden Leiterbahnen symmetrisch und parallel zueinander liegen,

sodass Störeinflüsse möglichst gleichmäßig auf die beiden Leitungen einwirken. So sollen Störungen besser toleriert und durch die Symmetrische Signalübertragung insgesamt ausgeglichen werden können [4]. Durch die Verwendung des „Differential Pair Routing“ versucht Altium Designer auch die Länge der beiden Verbindungen anzugleichen. Durch die Anpassungen der differentiellen Leiterbahnen wird eine korrekte Übertragung durch gleiche Signallaufzeiten sichergestellt. Da diese Leitungen hochfrequente Signale führen, ist eine genaue Anpassung notwendig.

Um Einkopplungen auf die Pfade für hochfrequente Signale zu vermeiden, wurde das für den Transceiver benötigte Quarz möglichst weit vom Sende- bzw. von den Empfangsanschlüssen des TDA angeordnet. Aus diesem Grund wurde der für den Oszillator benötigte Quarz mit einer Frequenz $f_{Crystal} = 21,948717 \text{ MHz}$ zwischen dem IC und der vorgesehenen Stiftleiste platziert. Die Frequenz des benötigten Quarzes ergibt sich aus dem Zusammenhang

$$f_{Crystal} = f_{IF2} \cdot 80 = \frac{f_{IF1}}{39} \cdot 80 = \frac{10,7 \text{ MHz}}{39} \cdot 80 = 21,948717 \text{ MHz}, \quad (2.1)$$

wobei die Zwischenfrequenz der ersten Stufe (f_{IF1}) durch die internen funktionalen Blöcke des TDA und den Keramikfilter vorgegeben ist. Die weiteren Faktoren ergeben sich aus dem Aufbau des Empfängers und werden von Infineon bereitgestellt [3].

2.3.2 XMC4500



Abb. 2.3: Der XMC4500 Mikrocontroller von Infineon im LQFP-Gehäuse mit 144 Pins [5]

Die Hauptsteuerung der Basisstation übernimmt ein Mikrocontroller der Bauart XMC4500, welcher aus der Mikrocontroller-Familie XMC4000 von Infineon stammt. Diese Baureihe stellt energieeffiziente ICs bereit, welche für industrielle Steuerungen und „Sense & Control“ optimiert sind. Der XMC4500 basiert auf einem Cortex-M4 Kern des britischen Herstellers ARM. Daneben arbeitet der Mikrocontroller mit der von Infineon selbst entwickelte Entwicklungsumgebung DAVE zusammen. Im speziellen Anwendungsfall kommt die Variante des XMC mit 144 Pins und einem Flash-Speicher von 1024 Kilobit zum Einsatz. Der Chip ist dabei in einem Low Profile Quad Flat

Package (LQFP)-Gehäuse verbaut. Durch die Wahl dieses Gehäuses konnte die elektrische Verbindung mit der Platine relativ leicht durchlöten erreicht werden. Im Gegensatz zum ebenfalls erhältlichen Ball Grid Array (BGA)-Gehäuse des XMC sind in diesem alle Kontakte direkt erreichbar und können leicht verlötet werden. Da beim BGA-Gehäuse die Anschlüsse auch in der Mitte unter dem Gehäuse sind, wäre hier ein Layout komplizierter und würde möglicherweise einen genaueren und somit teureren Prozess für die Herstellung der Platine fordern. Ein händisches Nachlöten von Kontakten oder Prüfen der Lötverbindung wäre ebenfalls nicht möglich.

Bei der Auswahl von Pins des XMC zur Verbindung mit den Transceivern wurde vor allem auf die Auswahl für die PP2 Pins geachtet. Um eine spätere Interruptsteuerung möglich zu machen, wurden hierfür nur solche Eingänge des Mikrocontroller gewählt, die im Datenblatt mit der Möglichkeit zum Erkennen von Interrupts gekennzeichnet sind. Die Zuordnung der Transceiverausgänge an die Pins des Mikrocontrollers sind in Abbildung 2.4 erkennbar und in Tabelle 3.3 auf Seite 26 aufgeführt. Tabelle 3.1 der Seite 20 zeigt die Zuordnung der für die SPI-Kommunikation notwendigen Leitungen an die Pins des Mikrocontrollers.

Zur Verteilung der entstehenden Abwärme wurden auch in diesem Bereich der Platine frei gebliebene Abschnitte zwischen den Leiterbahnen mit geerdeten Kupferflächen gefüllt. Durch teilweise auch mehrfache Durchkontaktierungen wurde sowohl eine saubere Kontaktierung der Flächen durchgeführt, um Flächen schwimmenden Potentials zu vermeiden. Durch die Vias wurde aber auch die thermische Leitfähigkeit zwischen den beiden Kupferlagen erhöht und somit die Abgabe entstehender Wärme von den Bauteilen verbessert. Beim verwendeten LQFP-Gehäuse des XMC4500 liegt die Rückseite des Halbleiters offen und ist nicht im Gehäuse verschlossen. Im Bereich unter der offenliegenden Rückseite des Chips ist deswegen zur Wärmeableitung ein Feld von 6x6 Vias vorgesehen. Dieser Aufbau dient dazu die Temperatur des Chips (junction temperature) auf den maximal erlaubten Wert $T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu beschränken.

Um die Ausgabe von aktuellen Systemzuständen zu ermöglichen wurden sieben Status-LEDs an freien Ausgängen des XMC4500 angeschlossen. Diese ermöglichten in active-low Ansteuerung eine Anzeige verschiedener im Mikrocontroller ablaufender Prozesse. Für vier der verwendeten Leuchtdioden wurde grün als Farbe gewählt, für die drei weiteren rot. Zur Vereinfachung eines Resets der Hardware wurde ein entsprechender Taster vorgesehen, mit dem der dafür vorgesehene $\overline{\text{PORST}}$ -Pin des Mikrocontrollers auf das 0V Potential gezogen wird und somit die Hardware zurückgesetzt wird. Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt über das Joint Test Action Group (JTAG)-Interface über welches auch das Debuggen möglich ist. Der XMC4500 stellt dafür ein JTAG-Modul bereit, welches mit den in IEEE 1149.1 festgelegten Standards übereinstimmt. Verwendet wird hierfür die achtpolige Variante des Debug-Steckers, bei dem der Platine vom JTAG-Adapter Versorgungsspannung und Masse sowie Signale für Reset, Systemtakt und die Steuerleitung übergeben wird [6].

2.3.3 USB

Für die Kommunikation des Mikrocontrollers mit einem Computer wird die im XMC bereitgestellte Peripherie genutzt. Zur Verbindung mit einem anderen Gerät wurde des-

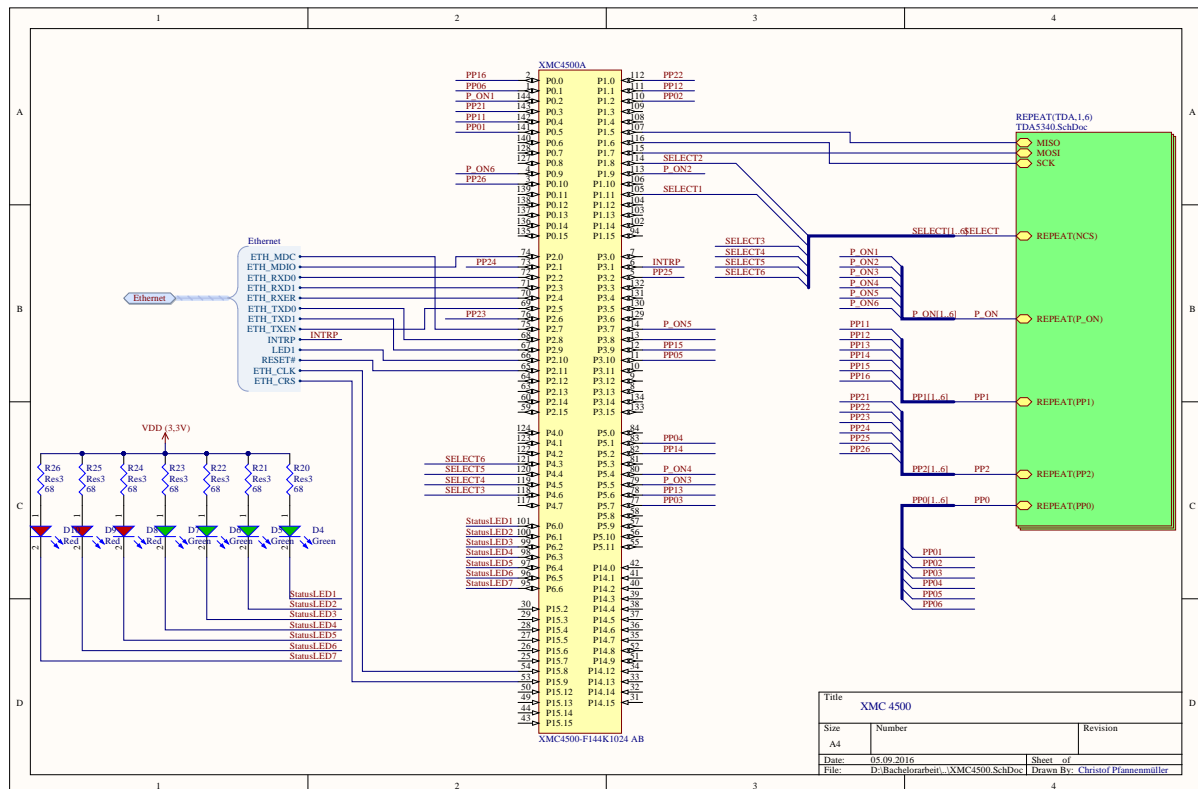


Abb. 2.4: Schaltplan des XMC4500 Mikrocontrollers

halb eine kombinierte Micro-USB-Buchse verwendet welche sowohl für Typ A oder Typ B Stecker geeignet ist. Um sowohl den Mikrocontroller als auch einen an die Basisstation angeschlossenen Computer gegen Fehlerströme über die USB-Leitung zu schützen wurden die Datenleitungen mit so genannten Transient Voltage Suppressor (TVS)-Dioden, welche gegen Masse geklemmt sind, geschützt. Sowohl positive als auch negative Spannungsspitzen werden dadurch gegen Masse kurzgeschlossen, was zum Schutz des XMC bzw. des angeschlossenen Computer dient. Um eine Verpolung bei Stromversorgung über die USB-Buchse, und somit eine Zerstörung von Bauteilen, zu vermeiden wurde eine Schottky-Diode im Strompfad zum Spannungsregler vorgesehen. Diese soll einen Stromfluss im Verpolungsfall unterbinden. Für den Fall das zeitgleich ein Netzteil sowie eine stromversorgende USB-Verbindung angeschlossen ist, dienen die Schottky-Dioden ebenfalls dem Schutz der Bauteile. Da der Mikrocontroller für die Kommunikation über das USB-Interface die aktuelle Busspannung auf der USB-Leitung benötigt, muss der extra dafür vorgesehene Pin des XMC direkt und ohne schützende Schottky-Diode mit der 5-V-Leitung der USB-Buchse verbunden werden. Die umgesetzte Beschaltung ist in Abbildung 2.7 auf Seite 2.7 zu erkennen.

2.3.4 Ethernet

Die Ethernetschnittstelle der Basisstation basiert auf dem Relax Kit von Infineon. Genau wie im Evaluations Board des Herstellers Infineon wurde der Ethernet-Controller

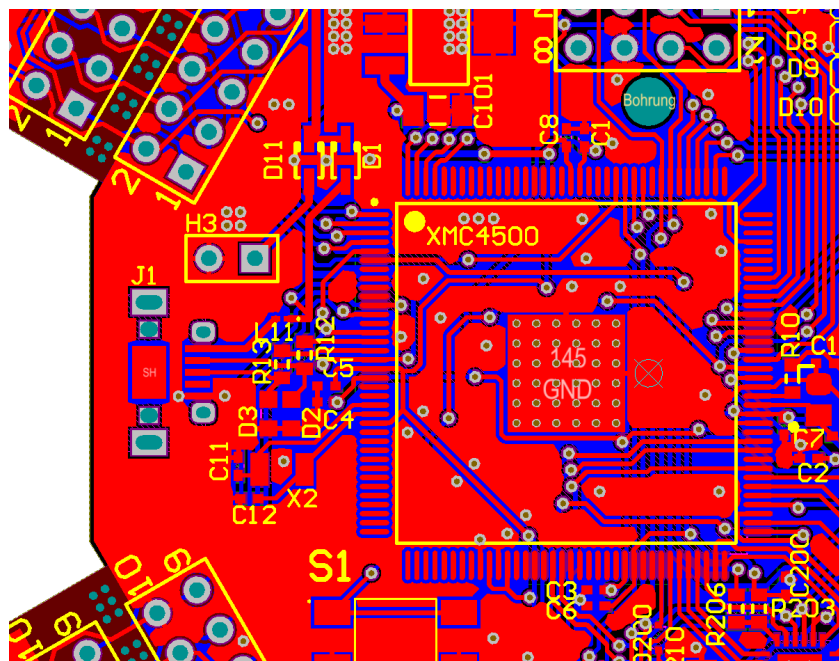


Abb. 2.5: Layout der USB-Buchse (links) auf der Basisstation mit der entsprechenden Schutzbeschaltung. In der Mitte des XMC sind die Thermal Vias zum Abführen der Wärme zu erkennen

KSZ8031RNL von Mircel Inc. verwendet. Dieser stellt alle wichtigen Peripherien selbst zur Verfügung und muss somit nur noch durch ein Quarz und diverse Kapazitäten und Induktivitäten an den Versorgungsleitungen ergänzt werden. Da die im Controller verbauten Stufe zur Interruptgenerierung nur über einen schwachen Pull-Up Widerstand verfügt, musste ein externer Widerstand von 1 k Ω verbaut werden. Am Reset-Eingang wurde ebenfalls ein Pull-Up Widerstand verbaut. Dieser wurde um zwei Dioden sowie einen Kondensator zu der im Datenblatt empfohlenen Verschaltung erweitert. So kann sichergestellt werden, dass sowohl beim Anlegen einer Spannung an das Gesamtsystem als auch bei einem Reset des Ethernetbausteins durch den steuernden Mikrocontroller alle Spannungen im sicheren Bereich liegen und die Funktion gewährleistet ist. Die dreizehn zum XMC4500 notwendigen Verbindungen wurden zur besseren Übersicht im Schaltplan in einem Signal-Kabelbaum zusammengefasst. Wegen der Gefahr von Rissen in Lötstellen durch die Platinenbelastung beim Ein- und Ausstecken wurde im Bereich um den Netzwerkstecker die Anordnung von Bauteilen vermieden. Da der KSZ8031RNL nicht lieferbar war und die anfallende Datenmenge nur von geringem Umfang ist, wurden der Controller und die entsprechende Netzbuchse von Würth Electronics zunächst nicht bestückt. Somit wurde eine Verwendung des Ethernet-Controllers auch in der Software des XMC-Mikrocontrollers nicht umgesetzt. Da jedoch ein entsprechendes Softwareprojekt für das Relax Kit von Infineon zur Verfügung gestellt wird, wäre eine Netzkommunikation vermutlich mit wenigen Anpassungen schnell umzusetzen [7].

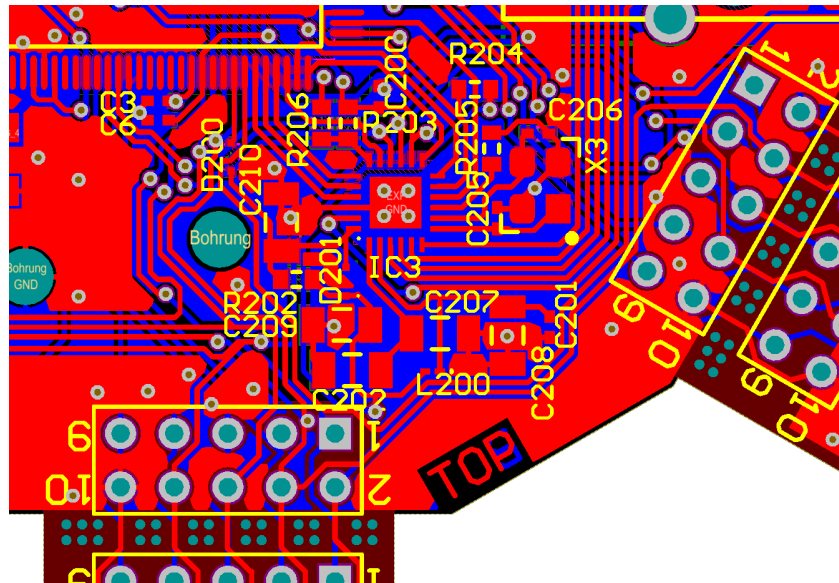


Abb. 2.6: Layout für den Ethernetcontroller von Mircel und die Anbindung an den XMC4500 Mikrocontroller

2.3.5 Spannungsversorgung

Die Bereitstellung der notwendigen Spannung sollte wahlweise über den zur Datenerfassung angeschlossenen Computer oder über ein externes Netzteil erfolgen. Zum Anschluss eines externen Netzteils wurden Lötanschlüsse für eine Steckerleiste im Rastermaß 2,54 mm vorgesehen. Genau wie bei der Stromversorgung über die USB-Buchse wurde auch hier eine Schottky-Diode zum Verpolungsschutz der Schaltung integriert. Ausgelegt ist die Basisstation für ein Gleichspannungsnetzteil mit einer Ausgangsspannung von 5 V, durch den Aufbau mit den beiden verwendeten Schottky-Dioden und die mögliche Eingangsspannung des nachfolgenden Reglers wäre jedoch auch eine angeschlossene 6-V-Versorgungsspannung (bei vernachlässigtem Spannungsabfall an der Diode) unproblematisch. Wegen der bereits erwähnten notwendigen Versorgungsspannung von 3,3 V für den XMC4500 und die Transceiver wurde diese mit einem Low Drop-Out (LDO)-Regler aus der externen angeschlossenen Spannungsversorgung generiert. Dieser verwendete Spannungsregler der Bauart MCP1826S von Microchip Technology Inc. sollte die Eingangsspannung auf das gewünschte Niveau herunter regeln. Als Gehäusetyp wurde das dreibeinige Small Outline Transistor (SOT)-Package gewählt, da keine Variante des LDO mit einstellbarer Ausgangsspannung und somit keine Variante des ICs mit mehr Anschlusspins benötigt wurde.

Statt des LDO von Microchip war zunächst ein gleichwertiger Spannungsregler von Infineon, der IFX1117MEV33, vorgesehen. Die beiden LDOs unterscheiden sich in der elektrischen Belegung der Kühlfahne des SOT-223: beim Spannungsregler von Infineon ist diese mit dem 3,3-V-Output kontaktiert, beim verwendeten LDO mit Ground. Da es sich bei dem Spannungsregler um ein SMD-Bauteil handelt, ist die Verwendung von Kühlkörpern schwer möglich. Die Abführung der im Spannungsregler erzeugten Verlustwärme erfolgt deshalb üblicherweise durch das Anlöten der Kühlfahne an eine

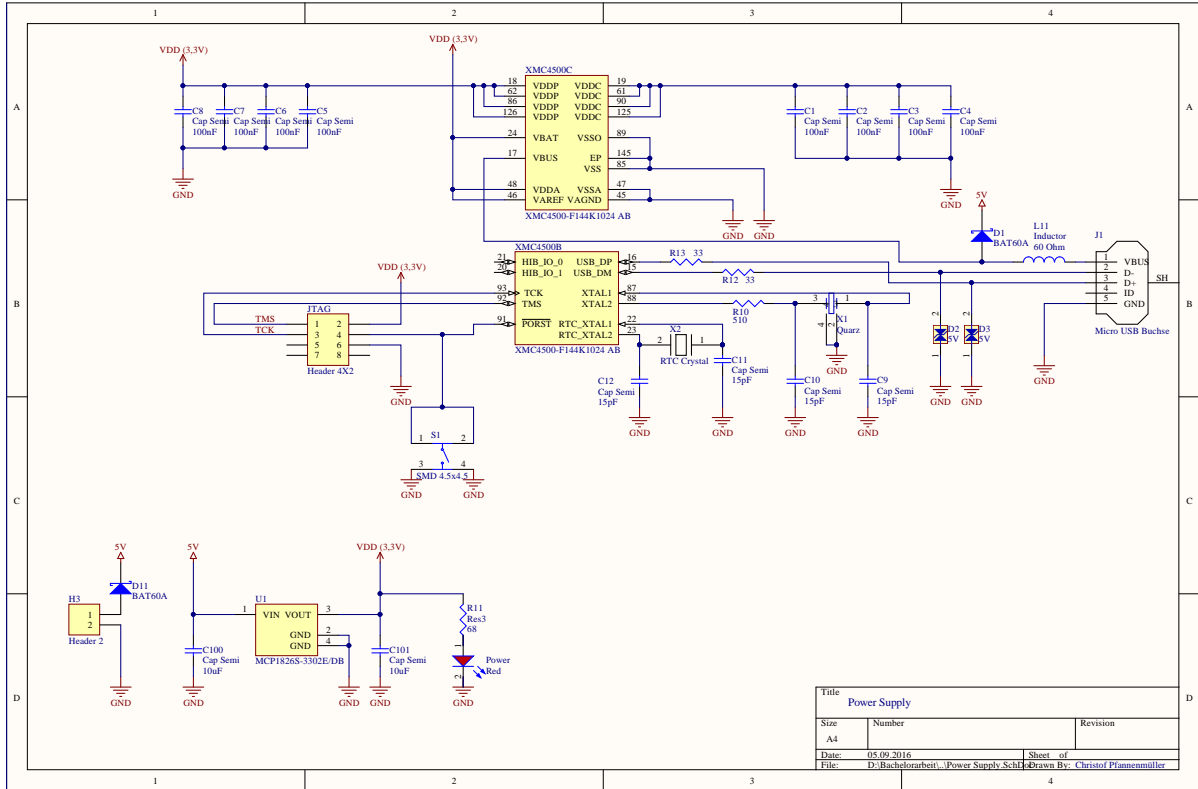


Abb. 2.7: Schaltplan der Spannungsversorgung und der USB-Verbindung des Mikrocontrollers

genügend große Kupferfläche, die als Wärmesenke dient. So wird die erzeugte Wärme gespreizt und kann gut an die Umgebung abgegeben werden.

Die im Spannungsregler umgesetzte Verlustleistung ergibt sich aus der vernichteten Spannungsdifferenz mal den Strom zu

$$P_V = (U_{\text{Eingang}} - U_{\text{Ausgang}}) \cdot I_{\text{Basisstation}}, \quad (2.2)$$

wobei für den Gesamtstrom der Basisstation $I_{\text{Basisstation}}$ eine maximale Stromaufnahme des Mikrocontrollers von 122 mA sowie bei den Transceivern eine Stromaufnahme von 26 mA angenommen werden kann [2][6]. Mit einem Spannungsabfall von 0,37 V an der Diode ergibt sich die Verlustleistung im LDO zu

$$P_V = ((5 \text{ V} - 0,37 \text{ V}) - 3,3 \text{ V}) \cdot (122 \text{ mA} + 6 \cdot 26 \text{ mA}) \approx 370 \text{ mW}. \quad (2.3)$$

Beide Spannungsregler dürfen nur bis zu einer Temperatur des Halbleiters von 125 °C betrieben werden. Bei der Verwendung des SOT-223-Gehäuses ohne eine Kupferfläche zum Abführen der Wärme würde die Chip-Temperatur T_j sogar bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C schnell Werte erreichen, die kritisch werden können, wie Gleichung 2.4 zeigt. Der zugrundeliegende Wärmewiderstand $R_{th,j-amb} = 164 \text{ K/W}$ zwischen dem Halbleiter und der Umgebung, welcher durch das Gehäuse bestimmt wird, ist dem Datenblatt des Infineon Spannungsreglers entnommen.

$$T_j = T_{amb} + \Delta T_{j-amb} = T_{amb} + P_V \cdot R_{th,j-amb} = 85,68^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

Bei Verwendung des zuerst eingeplanten IFX1117MEV33 wäre wegen der elektrischen Belegung der Kühlfinne eine Kupferfläche auf 3,3 V Potential zum Kühlen notwendig, welche elektrisch isoliert sein müsste. Wegen des Platzbedarfs durch den XMC4500 und andere Bauteile wäre somit nur eine Kupferfläche mit Abmessungen von etwa 15 mm auf 16 mm möglich, da die elektrischen Verbindungen bestehender Bauteile des Bereiches nicht unterbrochen werden sollten. Auf diese Weise wäre nicht einmal die im Datenblatt empfohlene Kühlfläche von 300 mm² erreichbar.

Durch die Verwendung des entsprechenden Bauteils von Microchip konnte auf eine abgetrennte Kupferinsel verzichtet werden und somit die bereits erwähnte GND-Kupferfläche um den Mikrocontroller als gemeinsame Masse- und Kühlfäche verwendet werden. Wegen der vorderseitigen Bauteilbestückung war die verfügbare Kupferfläche auf der Platinenrückseite größer. Um dies beim Ableiten der Wärme vom Bauteil zu nutzen, wurden vor allem im Bereich um die Kühlfinne des SOT-223-Gehäuses Durchkontaktierungen angebracht. Diese parallelen „Thermal Vias“ konnten als Wärmepfad zur unteren Kupferfläche dienen. Außerdem wurde der JTAG-Stecker des XMC absichtlich im Bereich neben dem Spannungsregler angebracht. Durch die große Oberfläche stellt auch dieser eine gute Wärmesenke dar.

2.4 Generierte Dokumente

Altium Designer kann aus den erstellten PCB-Daten die für die weitere Verarbeitung benötigten Dateien generieren. Im dazu vorgesehene Output-Job-Manager können entsprechende Outputs gewählt werden und einem Output-Container zugeordnet werden. Dies ist vor allem zum Erstellen gewünschter Dateistrukturen bei größeren Projekten notwendig um diese übersichtlich zu halten. In der vorliegenden Arbeit wurde dies jedoch nur bedingt benötigt. Für die Bestückung der Basisstation wurde zunächst eine „Bill of materials“, also eine Materialliste, exportiert mit deren Hilfe die entsprechenden Bestellnummern des Lieferanten Digi-Key herausgesucht und sortiert werden konnten. Mithilfe der ebenfalls generierten „Assembly Drawings“ war die Ausgabe aller Bauteile und deren Platzierung auf der Platine möglich. Ebenfalls wurden in diesem Menü die strukturierten Schaltpläne ausgegeben.

Zur dreidimensionalen Visualisierung wurde die fertige Platine mit den in den Footprints enthaltenen Bauteilabmessungen und Höhen als 3D-Modell im Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)-Format ausgegeben. Mithilfe des CAD-Programms „SolidWorks“ wurde daraus ein Gehäuse mit Deckel für die Basisstation erstellt. Diese wurde anschließend mit einem 3D-Drucker ausgedruckt und dient dazu, die Platine zu schützen. In Anhang 6.2 ist dieses Gehäuse abgebildet, das in Altium Designer erstellte 3D-Modell ist in Abbildung 2.8 zu erkennen.

Die Fertigung der Platine durch den Hersteller erfolgte durch sogenannte Gerber Daten, die ebenfalls aus dem Output-Job-Manager generiert wurden. Dabei wird für jedes Layer des PCB-Editors eine Gerberdatei erstellt, in der die Geometrie der entsprechenden Lage angegeben ist. Jede Lage entspricht dabei in der Herstellung einem Fertigungsschritt. Um Bohrungen in der Platine zu setzen, werden zusätzliche „NC Drill-Files“ also Daten für die Numerical Control (NC) der automatischen Maschinen zum Setzen von Bohrungen generiert. Diese enthalten den Bohrdurchmesser, die Art der Bohrung sowie den Ort

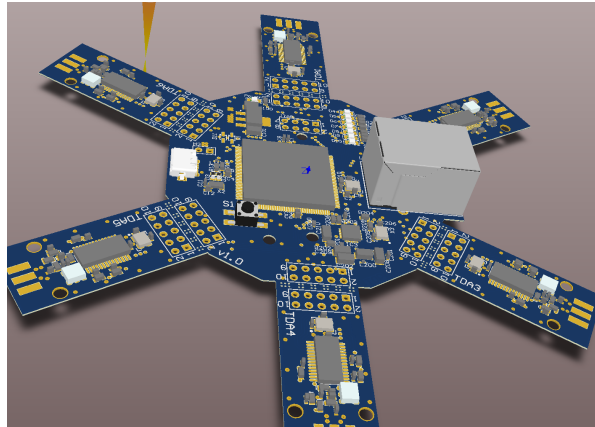


Abb. 2.8: 3D-Modell der Basisstation in Altium Designer

auf der Platine und müssen zusätzlich aus Altium Designer exportiert werden. Solche Bohrungen sind sowohl für Vias, als auch für Befestigungsbohrungen notwendig.

2.5 Bestückung

Die gefertigte Platine wurde vor der Programmierung mit den notwendigen Bauteilen bestückt. Dabei wurde zuerst der XMC4500 mit einer Bestückungsmaschine auf dem vorgesehenen Footprint der Platine verlötet. Im folgenden wurden alle weiteren Bauteile sowie die sechs Transceiver mit Lötpaste auf der Platine befestigt und anschließend durch Erhitzen der Platine auf der Heizplatte verlötet. Das Kontaktieren durch die Heizplatte wurde in mehreren Schritten durchgeführt. Dabei wurden zunächst Bauteile einer guten Toleranz hoher Temperaturen wie Stecker und Widerstände bestückt. Temperaturanfällige Bauteile wie Leuchtdioden und integrierte Schaltkreise wurden nach Möglichkeit zu einem späterem Zeitpunkt befestigt. Wie bereits erwähnt wurde der Ethernet-Controller nicht bestückt.

Software

3.1 DAVE Entwicklungsumgebung

Das Programm DAVE (Digital Application Virtual Engineer) wird von Infineon Technologies AG entwickelt. Es basiert auf der Entwicklungsumgebung oder integrated development environment (IDE) „eclipse“ die von der Eclipse Foundation entwickelt wird. Eine IDE beschreibt dabei allgemein ein Programm zur Softwareentwicklung, welches die einzelnen dazu notwendigen Tools gesammelt zur Verfügung stellt. Dies sind vor allem der Compiler, der Linker, und der Debugger auf die im folgenden noch eingegangen werden soll. DAVE stellt eine Möglichkeit zum Editieren von Quelltexten und Anordnen der einzelnen Programmdateien bereit. Über den enthaltenen GNU C-Compiler wird der erstellte Quellcode in vom XMC lesbare Maschinensprache übersetzt und anschließend durch den Linker zu einem ausführbaren Programm vereint. Durch den enthaltenen Debugger kann das Programm in den Speicher des XMC geladen werden. Dort kann der Programmablauf gestartet und gestoppt werden, außerdem können Werte einzelner Register und Variablen ausgelesen werden [8].

DAVE greift bei der Programmierung von Mikrocontrollern der XMC-Serie auf die so genannten XMC Libraries zurück, die von Infineon ebenfalls zur Verfügung gestellt werden. Auf diese soll ebenfalls im weiteren Verlauf eingegangen werden. Ein weiteres Feature in der IDE sind die sogenannten DAVE APPs. Mit diesen soll die Programmierung des Mikrocontrollers durch ein Graphical User Interface (GUI) ermöglicht werden. Dazu werden für mögliche von der Hardware zu verrichtende Teilaufgaben APPs von Infineon bereitgestellt. Durch das Einfügen der entsprechenden APPs in das Projekt können diese angepasst und miteinander grafisch verschalten werden. So wird der spätere Programmablauf im Mikrocontroller und dessen Aufgaben festgelegt. Nachdem vom Programmierer noch die Pins ebenfalls grafisch den Aufgaben zugeordnet werden, generiert DAVE den Programmcode mit den in den Apps enthaltenen Informationen [9]. Mithilfe des DAVE Software development kit (SDK) können nicht nur die Parameter der APPs beim Programmieren, sondern auch diese selbst grundlegend angepasst werden und das Entwickeln eigener APPs ist möglich [10].

Im Verlauf dieser Arbeit wurden DAVE APPs jedoch nur in einem bereits existierenden

Softwareprojekt für ein Relax Kit genutzt, mit welchem Signale zum Testen der Empfänger an die Basisstation gesendet wurden. In der Basisstation selbst wurden die APPs nicht benutzt.

3.2 Verwendete Peripherie des XMC4500

Der XMC4500-Baustein enthält diverse funktionelle Blöcke, die mit einer Bus Matrix an die ARM Cortex-M4 Central Processing Unit (CPU) angebunden sind. Dieser Aufbau soll den Prozessor entlasten und im Programmablauf Ressourcen freihalten für andere Operationen. Für die Basisstation waren vor allem der USIC, der Universal Serial Bus (USB) sowie der Ethernet MAC (ETH) die bedeutenden Peripherien. Von besonderer Bedeutung sind jedoch die General Purpose Input/Outputs (GPIOs).

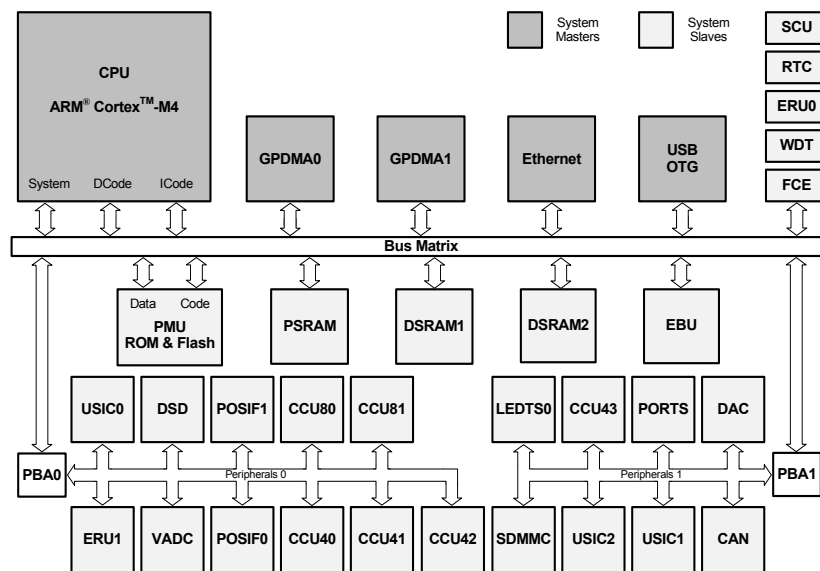


Abb. 3.1: Blockdiagramm zur Peripherie des XMC4500 Mikrocontroller und die Anbindung an den Cortex-M4 Kern [6]

3.2.1 GPIO

Die GPIOs werden im so genannten PORTS-Modul der XMC-Architektur gesteuert. In dieser lassen sich die Treiberstufen für die entsprechenden Pins des Mikrocontroller regeln. Dieses Modul ist über die Peripheriebrücke PBA1 ebenfalls an die Bus Matrix und somit den Cortex-M4 Kern angebunden.

Das Modul stellt für jeden Pin die erste Funktionsauswahl bereit und legt so die Datenrichtung fest. Im „Port Input/Output Control Register“ des Moduls wird für jeden Pin festgelegt, ob er als Eingang oder Ausgang verwendet wird. Das momentane elektrische Potential am Eingang wird bei letzterem mit einem Schmitt-Trigger in ein binäres logisches Signal übersetzt. Ist der Pin ein Eingang, so kann das logische Eingangssignal dort zusätzlich invertiert werden. Wird ein Pin des XMC als Ausgang konfiguriert, so kann

gesteuert werden, ob es sich um einen GPIO-Pin handelt, dessen Status von der Software direkt festgelegt wird. Dabei kann ausgewählt werden, ob das logische Ausgangssignal durch einen Treiber in Open-Drain-Konfiguration oder durch Push-Pull erzeugt werden soll.

Zur Nutzung eines Ausgangs durch die im Mikrocontroller verfügbaren Peripherie sind diese direkt mit den entsprechenden Modulen verbunden. Dadurch kann das Modul selbst den elektrischen Zustand am Eingang auslesen und verwerten oder festlegen wenn es sich um einen Ausgang handelt [11]. Auch das weitere Verhalten von Pins, wie etwa beim Anschalten, bevor die Versorgungsspannung ein gültiges Level erreicht hat, lassen sich im PORTS-Modul anpassen.

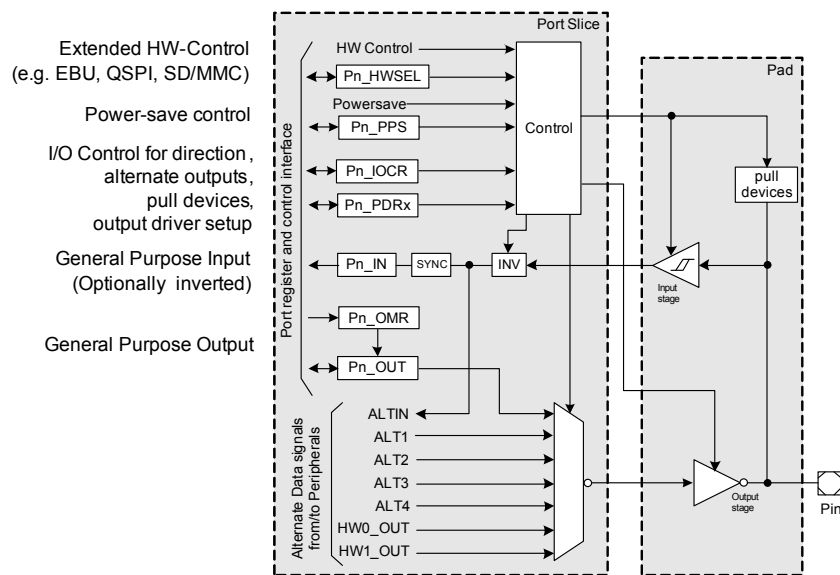


Abb. 3.2: Struktur eines Digitalpins des XMC Mikrocontrollers [11]

3.2.2 USIC

Die ICs der XMC-Familie verfügen über ein Modul zu Kommunikation über diverse serielle Protokolle, den Universal Serial Interface Channel (USIC). Dieses ist programmierbar und erlaubt damit eine individuelle Verwendung, kann aber gleichzeitig die notwendigen Arbeiten für den Prozessor übernehmen. Der XMC4500 verfügt über insgesamt sechs USIC-Kanäle und kann somit mehrere Protokolle gleichzeitig verwenden. Die Mikrocontroller unterstützen die Protokolle UART, I²C, IIS, LIN und das für die Basisstation verwendete SPI in einfacher, doppelter und quad-Ausführung. Für diese Arbeit wurde alle Kommunikation mit einem gemeinsamen USIC-Kanal umgesetzt. Da die einzelnen USICs und deren Kanäle verschieden viele Slave-Select-Leitungen besitzen, wurde der Kanal 0 des USIC 0 ausgewählt, nur dieser verfügt über die benötigten sechs Select-Leitungen. Eine Umsetzung mit einem anderen USIC wäre ebenfalls möglich gewesen. Die Wahl des Transceivers hätte dann aber manuell erfolgen müssen und hätten nicht vom Modul geregelt werden können.

Signal	Port/Pin des XMC
MISO	1.5
MOSI	1.7
SCK (Clock)	1.6
Select TDA1	1.11
Select TDA2	1.8
Select TDA3	4.6
Select TDA4	4.5
Select TDA5	4.4
Select TDA6	4.3

Tab. 3.1: Zuordnung der für die SPI-Kommunikation notwendigen Signale an die Pins des Mikrocontrollers. Alle Leitungen sind mit dem Kanal 0 der USIC 0 verbunden

3.2.3 ERU

Von zentraler Bedeutung für die Funktion der Basisstation war die Behandlung von Interrupts durch den IC. Der XMC4500 besitzt dafür zwei entsprechende Event Request Unit (ERU)-Module, die einen solchen erkennen können und den Prozessor zum Aufrufen einer Interrupt Service Routine (ISR) auffordern können. Jedes Modul verfügt über vier Kanäle, auf denen bei einem Interrupt ein vierstufiger Prozess durchlaufen wird: In der ersten Stufe der ERU, der so genannten Event Request Select (ERS), lassen sich aus zwei Eingängen mit jeweils vier Signalen die gewünschten Eingänge wählen. In der Event Trigger Logic (ETL) generiert der IC aus dem Signalstatus ein Trigger-Event, indem Veränderungen erkannt werden. So kann eine fallende oder steigende Flanke, die einen Interrupt auslösen soll, erkannt werden. In der Cross Connection Matrix können Signale der verschiedenen ETLs zu den vier Output Gating Units (OGUs) weitergeleitet und somit dort untereinander und mit Triggersignalen von anderen Peripherie-Modulen des XMC kombiniert werden. In der OGU wird durch Vergleich der verschiedenen aufgetretenen Trigger und Muster entschieden, ob ein kompletter Interrupt aufgetreten ist und leitet diese Information entsprechend weiter oder ob etwa nur das gewählte Muster erkannt wurde, was für andere Module wichtig ist. Diese Informationen werden entsprechend an die Peripherie weitergeleitet, sind aber für die Funktion der Basisstation nicht weiter von Bedeutung. Bei Vorliegen aller Bedingungen für einen Interrupt wird diese Information an den Nested Vectored Interrupt Controller (NVIC) im Cortex-M4 weitergeleitet. Dieser Teil des Prozessorkerns erkennt die Interruptaufforderung und sorgt dafür, dass der aktuelle Prozessorstatus gespeichert wird. Nach Ablauf der ISR wird der Prozessorstatus wieder hergestellt.

3.2.4 USB

Das USB-Modul des XMC4500 arbeitet nach den Spezifikationen für USB 2.0 und den „On-The-Go“-Spezifikationen der Version 1.3. Der Mikrocontroller könnte durch das USB-Modul entweder als Host oder als USB-Slave arbeiten. In diesem Fall wurde der IC als Slave betrieben. Das USB-Modul verfügt über eine eigene Interruptsteuerung und ist damit eine der oben erwähnten Peripherien des XMC, deren Steuerung auch über

Interrupts gelöst ist. Die gesamte Übertragung wird durch den USB-Kern gesteuert und empfangene oder zu sendende Pakete werden in einem FIFO-Puffer gespeichert. Für die Kommunikation der Basisstation mit dem Host-Computer wird ein virtueller COM-Port durch das USB-Interface emuliert.

3.2.5 Ethernet

Im XMC4500 werden Netzwerkverbindungen durch das Ethernet-Modul behandelt. Dieses unterstützt Datenübertragungen mit Geräten über IPv4 und IPv6 sowie Übertragungsraten von 10/100 MBit/s. Dazu werden zunächst die Daten von der CPU über ein Bus-Interface übertragen. Im „MAC Transaction Layer“ werden die vom Prozessor bzw. über Ethernet empfangenen Datenpakete zwischengespeichert. Der Ethernet-Kern formatiert die zu sendenden Daten und stellt sie einem „Physical Layer“ zu, welches die Daten für den Kanal moduliert.

3.3 Verwendete Bibliotheken

3.3.1 XMC Library (XMC Lib)

Infineon stellt für seine ICs der XMC4000 Serie, zu der auch der XMC4500 gehört, die „XMC Peripheral Library“ bereit. Diese erlaubt einen vereinfachten Zugriff auf alle Module und die entsprechenden Register und soll dadurch den Modulzugang übersichtlich gestalten und den Programmcode vereinfachen und leichter lesbar machen. Die Software baut auf dem Cortex Microcontroller Software Interface Standard (CMSIS) auf, erlaubt die Verwendung verschiedener Compiler und kann mit oder ohne DAVE bzw. mit oder ohne DAVE APPs verwendet werden. Für die Programmierung wurde mit der Software „doxygen“ eine Dokumentation zur Bibliothek als HTML generiert.

3.3.2 SPI Library

Die verwendete Bibliothek zur Steuerung des SPI-Interfaces basiert auf dem SPI-Modul der XMC Library. Die von Infineons XMC Library zur SPI-Kommunikation zur Verfügung gestellten Funktionen steuern das USIC-Modul des Mikrocontrollers an. Die Bibliothek zur SPI-Kommunikation muss somit nur noch die Funktion

```
1 XMC_SPI_CH_Transmit(channel, data, XMC_SPI_CH_MODE_STANDARD);
```

der XMC Library aufrufen, um eine Übertragung über das Serielle Interface durchzuführen. Daneben liegt die Hauptaufgabe der Bibliothek vor allem in der Auswahl des entsprechenden Transceivers über das Slave-Select-Signal. Dazu initialisiert die Bibliothek zuerst den USIC entsprechend den in der Headerdatei vorgegebenen Pins für MISO, MOSI und den Pins zur Auswahl des jeweiligen Slaves.

SPI Übertragung

Die durch die Software umgesetzte serielle Übertragung zwischen den ICs entspricht dem SPI-Protokoll, das ursprünglich von Motorola entwickelt wurde [12]. Durch das

Chip-Select-Signal wählt der XMC den entsprechenden Transceiver aus. Da der TDA5340 active-Low arbeitet, also bei anliegendem Masse (GND)-Potential als ausgewählt gilt, wird dieser Eingang im Datenblatt auch als Non-Chip-Select (NCS) bezeichnet.

Der USIC des XMC beginnt nun die Clockleitung des Busses zu treiben. Eine Periode dieser zyklischen Rechteckspannung begrenzt dabei die Zeit in der auf den Master-Out Slave-In (MOSI) und Master-In Slave-Out (MISO)-Leitungen ein Bit übertragen wird. Hierbei existieren verschiedene Konfigurationen: so kann die Clock-Leitung im Ruhezustand einen High- oder einen Low-Pegel aufweisen, was durch die Polarität (CPOL) festgelegt wird. Das Auslesen der Spannungswerte auf den Datenleitungen kann bei fallender und steigender Taktflanke (CKPHA) durchgeführt werden, woraus sich insgesamt vier Kombinationsmöglichkeiten ergeben. Im vorliegenden Fall war sowohl das CPOL- als auch das CKPHA-Bit 1, es wurde also bei jeder fallenden Flanke ein Bit übernommen und das Clocksignal wies zum Ruhezeitpunkt einen High-Pegel auf.

Bei der Übertragung stellt nach der Definition aus dem Datenblatt des Transceivers ein Spannungspegel von 0 V auch eine logische 0 dar. In der Kommunikation mit den TDA5340 werden jeweils acht Bit zu einem Datenwort zusammengefasst. Der Transceiver erwartet mit dem ersten Datenwort eine Instruktion und je nach Art dieser noch einen Parameter durch die Übertragung des folgenden Wortes. Mögliche Anweisungen sind dabei das Lesen oder Schreiben eines Registers dessen Adresse als Parameter übertragen wird, das Auslesen oder Beschreiben der FIFO-Speicher oder das Setzen des TDA5340 in den so genannten „Transparent Mode“ auf den nicht weiter eingegangen werden soll. Nach Übertragung von Instruktion und Parameter werden entweder vom Master oder vom Slave, also vom Transceiver, die gewünschten Daten übertragen.

Instruktion	Datenwort	übergebener Parameter
Register Schreiben (schnell)	0x01	Adresse des ersten zu schreibenden Registers
Register Schreiben	0x02	Adresse des zu schreibenden Registers
Register Lesen	0x03	Adresse des zu lesenden Registers
FIFO Lesen	0x04	<i>keinParameter</i>
Register Lesen (schnell)	0x05	Adresse des ersten zu lesenden Registers
FIFO Schreiben	0x06	Länge der Übertragung -1

Tab. 3.2: SPI-Instruktionen des Transceivers und die entsprechenden auf der MOSI-Leitung übertragenen Datenwörter und Parameter. Die beiden Instruktionen zum transparenten Senden sind nicht enthalten

Beim Schreibzugriff auf den TDA kann durch geeignete Instruktion gewählt werden ob nur auf ein Register geschrieben wird oder ob der Transceiver nachfolgende Datenwörter als Werte in die folgenden Register übernehmen soll. Beim Lesezugriff besteht die selbe Auswahlmöglichkeit. Bild 3.3 zeigt den Start einer solchen SPI-Kommunikation zwischen dem Transceiver TDA1 und dem Mikrocontroller. Die Dauer der Übertragung betrug etwa 0,26 ms. Bei dieser wurde die Instruktion „Read from Chip“, dargestellt durch den Hexadezimalwert 0x03, und die Registeradresse 0xD3 als Parameter vom Mikrocontroller zum Transceiver übertragen. Dieser teilt durch das folgende Datenwort auf der MISO-Leitung, in diesem Fall 0xFF den aktuellen Wert des Registers mit. Der Master beendet daraufhin die Kommunikation durch einen High-Pegel an der Select-Leitung

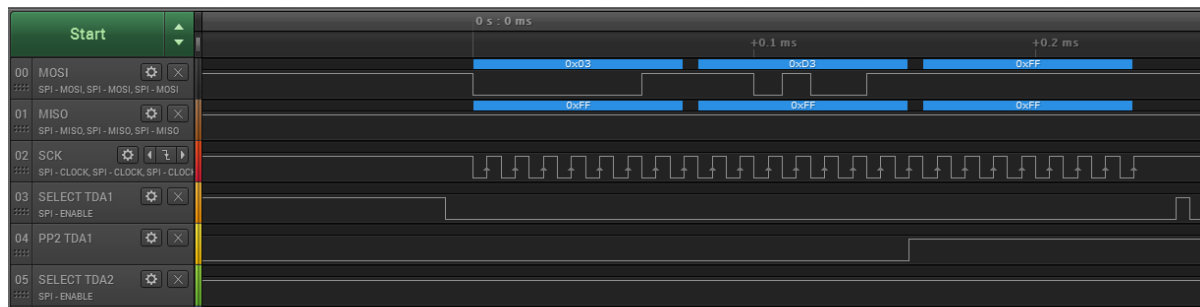


Abb. 3.3: Start einer SPI-Übertragung zwischen dem Mikrocontroller und dem Transceiver

3.3.3 TDA5340 Library

Die Hauptaufgabe in der Kommunikation mit den Transceiver-ICs wurde durch die vorgegebene Bibliothek für den TDA5340 übernommen. Diese stellte Funktionen zum Senden und Empfangen von Daten mit dem Transceiver zur Verfügung. Die Bibliothek liest dazu den Empfangs-FIFO aus oder schreibt in den Puffer für zu sendende Daten. Auch der Lese- und Schreib-Zugriff auf die Steuerregister der Transceiver kann über die Bibliothek geregelt werden. Dazu stellt die Bibliothek auch entsprechende Makros bereit, welche die Namen der Register in die hexadezimale entsprechende Adresse umwandeln um so die Lesbarkeit erheblich zu erhöhen. Daneben wurde über die Bibliothek auch die notwendigen Einstellungen für das Erkennen von Interrupt im XMC4500 vorgenommen. In diesem Bereich waren die notwendigen Anpassungen der Library am tiefgreifendsten, da diese nur für die Interruptbehandlung mit einem Transceiver ausgelegt war. Bei anderen Funktionen der Bibliothek waren nur kleinere Anpassungen notwendig, sodass etwa sichergestellt wurde, für welchen Transceiver die aufgerufene Funktion ausgeführt werden sollte, etwa bei welchem das entsprechende Register ausgelesen wurde. Zur Verbindung mit den TDA5340 verwendete die Bibliothek die SPI Library. Dieser wird die Nummer des Transceivers als Chip-Select übergeben um sicherzustellen, dass mit dem richtigen kommuniziert wird.

3.3.4 Virtueller COM Port

Die Kommunikation der Basistation mit dem Hostcomputer zum Übertragen der gemessene Werte wurde nach dem Vorbild eines Beispielprojektes für DAVE umgesetzt. Die Bereitstellung des virtuellen seriellen Ports erfolgt auf Seiten des XMC über die LUFA (Lightweight USB Framework for AVR)-Bibliothek. Mit dieser beschränkt sich die Ausgabe über den COM-Port auf das Übergeben der zu sendenden Zeichen an eine entsprechende Funktion. Eine Steuerung des XMC durch Empfangen von Daten über den COM-Port wäre mit der Bibliothek ebenfalls möglich, dies war jedoch nicht notwendig. Die Bibliothek und das Beispielprojekt wurde dahingehend angepasst, dass ganze Zeichenketten statt nur einzelner Zeichen der Funktion zum Senden übergeben werden konnten. Auch wurde das Senden von Integer-Variablen ermöglicht, indem diese zu Zeichen umgewandelt wurden. Dabei wurde der American Standard Code for Information Interchange (ASCII) beachtet, nach dem die Übertragung funktioniert. So benötigt der

COM-Port zur Ausgabe und Darstellung der Ziffer 1 den dezimalen Wert 49 nach der Vorgabe durch den ASCII-Code.

3.4 Programmablauf

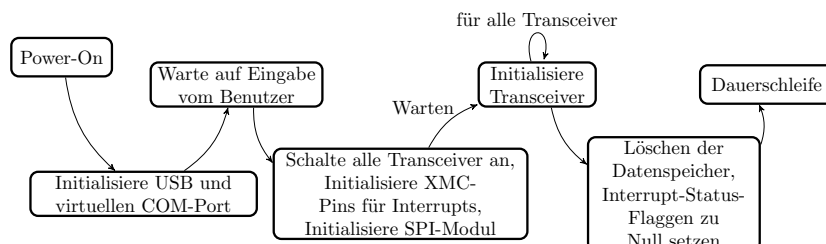


Abb. 3.4: Programmablauf der Basisstation

Im Programmablauf des XMC wurde zunächst eine Warteschleife umgesetzt, in welcher der Mikrocontroller auf eine erste Eingabe durch den Benutzer am Hostcomputer wartet. Bereits hier wurde die Übertragung über den seriellen COM-Port initialisiert. Nachdem diese Bestätigung über den COM-Port vom Mikrocontroller empfangen wurde setzt dieser zunächst alle Transceiver in den Schlafmodus, von welchem aus eine Kommunikation möglich ist. Daraufhin beginnt der XMC4500 mit der Konfiguration der für die Interrupts notwendigen Pins und ermöglicht somit das Empfangen von Interrupt Requests (IRQs) durch die TDA5430. Anschließend initialisiert er zunächst das SPI-Modul, um im folgenden die Transceiver darüber konfigurieren zu können. Bevor das dazu notwendige Schreiben in die Register der TDAs jedoch möglich ist, wird eine gewisse Verzögerung benötigt. Diese resultiert daher, dass der Wechsel des TDA vom ausgeschalteten Zustand in den Schlafmodus eine gewisse Zeitspanne benötigt. Im folgenden werden alle Transceiver initialisiert und anschließend in den Receiver-Modus gefahren. Daraufhin setzt der IC noch alle für die Übertragung notwendigen Variablen und alle Felder zum Speichern von Daten zu null. Nun beginnt der Prozessor mit einer Dauerschleife, in der dieser auf das Ankommen von Übertragungen wartet und teilt dies auch dem Benutzer am Hostcomputer über eine Ausgabe mit. In dieser Endlosschleife wechselt sich die interruptbasierte Datenerfassung mit der Weiterleitung der erfassten Daten zyklisch ab, wobei nur bei erfolgreichem Empfang ein Senden an den steuernden Computer erfolgt.

Bei der Programmierung wurde darauf geachtet möglichst alle Konstanten wie Adressen von Pins und Ports durch Makros für den Präprozessor auszulagern. Dadurch konnte einerseits die Lesbarkeit des Quellcodes erhöht werden, andererseits sind so aber Änderungen durch Vertauschen von Pins sowohl in der Hardware als auch nur in der Software leichter möglich. Da es sich beim XMC4500 um einen Mikrocontroller mit einer 32-Bit-Architektur handelt wurden Integervariablen ausschließlich vom Typ *uint32_t* oder *int32_t* verwendet. So konnte eine genaue Anpassung der Software an die Registergrößen im XMC vorgenommen werden.

3.4.1 Konfiguration der Funkmodule

Bei der Initialisierung erhalten die Transceiver die gewünschten Werte für die Sende- und Empfangs-Frequenzen. Diese werden über die Teilerate für die Phasenregelschleife (PLL) übergeben und ermittelt. Der TDA5340 stellt dafür mehrere Konfigurationssätze zur Verfügung in denen unterschiedliche Frequenzen eingestellt werden können. In diesem Fall wird zum Empfangen die Konfiguration A und Konfiguration B zum Senden eingestellt. Die entsprechenden Werte wurden zuvor aus der Zwischenfrequenz $f_{IF2} = 274 \text{ kHz}$ und der gewünschten Übertragungsfrequenz errechnet.

Über die entsprechenden Register wird auch das Verhalten bei ankommenden Übertragungen eingestellt. Im „Interrupt Mask“-Register wurde eingestellt bei welchen Ereignissen der Transceiver einen solchen auslösen wird. Zur Ausgabe dieser wurde der standartmäßige PP2-Pin des Transceivers verwendet. PP1 und PP0 wurde in einen hochohmigen Zustand versetzt, da diese zum aktuellen Zeitpunkt nicht genutzt wurden.

3.4.2 Interruptbasierte Datenerfassung

Die Erfassung der Daten erfolgt im Programmablauf innerhalb der dauerhaften Ablaufschleife. In der Interrupt Service Routine (ISR), in welche der Prozessor beim Auftreten eines Interrupts springt, wird lediglich einer globalen Variable der Wert 1 zugeordnet. Für jeden der möglichen Transceiver existiert eine solche Flagge, die einen aufgetretenen Interrupt anzeigt. Nach dem Setzen in der ISR kehrt der Prozessor zum Ablauf in die Dauerschleife zurück. Innerhalb dieser wird nun zyklisch abgefragt, ob diese Flagge gesetzt wurde. Beim Auftreten einer solchen Flagge, also nach dem aufgetretenen Interrupt, liest der XMC4500 die Interrupt Status Register des entsprechenden Transceivers aus.

Da davon auszugehen ist, dass alle sechs Transceiver-ICs zeitgleich eine Übertragung erhalten, wurde diese mehrstufige Abfrage gewählt. So wird zuerst nur in der ISR die Flagge gesetzt, um die dadurch verstreichende Zeit möglichst kurz zu halten und zu ermöglichen, dass eine solche Flagge auch jederzeit im Programmablauf gesetzt werden kann. In der zweiten Stufe liest der Mikrocontroller nun die drei Interrupt Status Register aus. Dies ist notwendig, da es sich dabei um so genannte „Read-Clear“-Register handelt, welche nach dem Auslesen über SPI automatisch zurückgesetzt werden. In den Interrupt-Registern sind die Ereignisse kodiert, die einen Interrupt ausgelöst haben. Bei der Konfiguration der Funkmodule wurde eingestellt bei welchen Ereignissen der Transceiver einen Interrupt auslöst. Typische Ereignisse sind ein fast gefüllter Empfangs-FIFO was eine angekommene Übertragung anzeigt oder auch ein leerer FIFO was anzeigt, dass dieser ausgelesen wurde.

Die dritte Stufe der Datenerfassung ist nun die Abfrage der Daten vom Transceiver. Da diese SPI-Datenübertragung deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt, muss diese getrennt vom Erkennen der Interrupts und dem Auslesen der Interrupt-Register erfolgen. Da die gewünschten Werte in den Registern gespeichert sind, ist das Auslesen zeitkritisch, denn eine erneute Übertragung würde diese Messwerte überschreiben. Jedoch ist das Auslesen der Werte bei weitem nicht so zeitkritisch wie die ankommenden Interrupts, da diese im Verlauf einer Übertragung auch mehrfach ankommen können. Das Abfragen der empfangenen Daten aus dem FIFO-Speicher hat eine noch geringere Priorität, da dieser die Datenpakete bis zum Auslesen behält.

Eine Abfrage der Messwerte und ein Auslesen des FIFO wird bei abgeschlossener Übertragung durchgeführt, diesen Zeitpunkt erkennt der Mikrocontroller durch das entsprechend gesetzte Bit des Interrupt-Register. Der XMC4500 speichert alle abgefragten Werte wie Feldstärke, die Einstellungen der automatic gain control (AGC) und die angekommenen Daten in den vorbereiteten dedizierten Speichern. Abschließend werden die Transceiver wieder in den Empfangsmodus gesetzt.

Beim Setzen der Flaggen durch den Interrupt fiel auf, dass die Interrupteingänge für Transceiver 3 und Transceiver 6 sich überlagern. So ist der PP2 Anschluss des dritten TDA5340 mit der ETL3 der ERU0 verbunden, ebenso wie der entsprechende Pin des TDA6. Grund dafür ist, dass die entsprechenden Pins des Mikrocontrollers auf den Kanal B3 bzw. A0 der genannten ERU-ETL-Kombination führen. Bei den ersten Tests von Interrupts auf diesen Kanälen stellte sich heraus, dass der XMC, entgegen den Erwartungen, somit nicht in der Lage ist ankommende Interrupts der beiden Transceiver zu unterscheiden. Durch entsprechende Einstellungen in der ERU0 war ein Sprung des Prozessors in die entsprechende Interrupt Service Routine nur für jeweils einen der beiden Transceiver möglich. Um trotzdem eine Auslesen der beiden Transceiver zu bewirken, wurden beide Flaggen in der Service Routine gesetzt. Der Versuch den PP2 Pin des TDA6 mittels

Transceiver	Port/Pin am XMC	ERU	ETL	Kanal
TDA1	0.3	1	3	B0
TDA2	1.0	0	3	B0
TDA3	2.6	0	1	B3
TDA4	2.1	1	0	B0
TDA5	3.2	0	0	A1
TDA5	0.10	0	1	A0

Tab. 3.3: PP2-Pins der Transceiver mit den entsprechenden Anschlüssen am XMC4500 und die Verbindung zur ERU

eines kurzen Drahtes auf den Pin 142 des XMC4500 zu legen schlug ebenfalls fehl. Dazu wurde der PP1 Pin des TDA1, welcher mit diesem Pin des Mikrocontroller verbunden ist im Transceiver 1 in einen hochohmigen Zustand geschaltet. Dieser Pin des XMC ist intern mit der ETL2 der ERU0 auf dem Kanal B3 verbunden. Da diese Kombination noch nicht verwendet wurde hätte hier eine Interrupterkennung funktionieren müssen. Warum durch diese Veränderung kein Interrupt ausgelöst werden konnte, ist nicht klar. Da in der Betrachtung mit dem Logic-Analyser keine Flanke auf dem Netz festgestellt wurde, ist zu vermuten, dass das Problem aus der Verbindung mit dem Draht resultiert.

3.4.3 Weiterleitung der erfassten Daten

Dass eine Übertragung über den COM-Port bereits weit vor der Dauerschleife vom Mikrocontroller gestartet wurde, diente dazu, dem Benutzer die Bereitschaft zum Empfangen mitzuteilen sobald sämtliche Initialisierungen abgeschlossen waren. Somit musste der COM-Port auch nun nicht mehr selbst initialisiert werden. Im zweiten Teil der Ablaufschleife des Programmes wurde nun die Weitergabe der empfangenen Daten und der gemessenen Werte behandelt. Dazu wurde nach dem Abholen der empfangenen Daten

von den Transceivern eine Statusflagge in Form einer Integer-Variable gesetzt. Nur beim Auftreten dieser Flagge wurde der Programmteil zum Senden über den COM-Port ausgeführt. Dort wurde nun jeweils abwechselnd ein Wert des Speichers und ein String mit einer Beschreibung oder dem Namen des Wertes über COM ausgegeben. Ein Ausschnitt des Quellcodes ist im Quellcode 3.1 zu erkennen. Die Zeichenfolge `\r\n` stellt dabei den Übergang in eine neue Zeile in der Ausgabekonzole dar. Wie in C üblich werden Strings in doppelten Anführungszeichen im Quelltext eingefügt. Eine entsprechende Ausgabe ist in Bild 3.5 zu erkennen.

```

1  COM_send_string("##### Übertragung erkannt #####\r\n");
2  COM_send_string("Übertragung Nummer ");
3  COM_send_int_as_string(transfervnumber);
4  COM_send_string("\r\n\r\n");
5  COM_send_string("TDA1:");
6  COM_send_string("\r\nPMF:");
7  COM_send_int_as_string(rssiTDA1.pmf);
8  COM_send_string("\r\nPRX:");
9  COM_send_int_as_string(rssiTDA1.prx);
10 COM_send_string("\r\nRX:");
11 COM_send_int_as_string(rssiTDA1.rx);
12 COM_send_string("\r\nPPL:");
13 COM_send_int_as_string(rssiTDA1.ppl);
14 COM_send_string("\r\nAGC:");

```

Quellcode 3.1: Ausschnitt aus dem Senden der Daten über den COM-Port

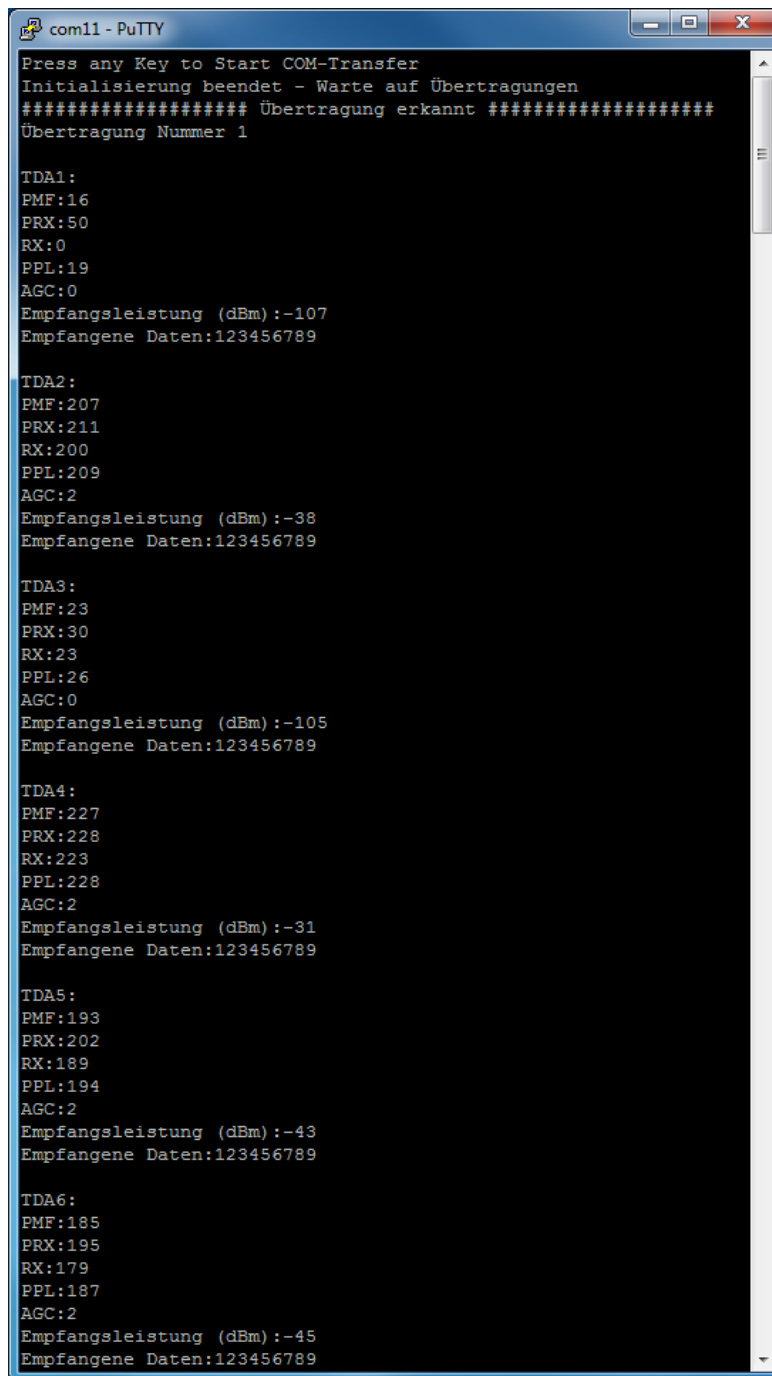
Am Hostcomputer wurden die Daten mit der Software „PuTTY“ entgegengenommen und dem Benutzer in einer Konsole angezeigt. Dazu wurde der von Infineon zur Verfügung gestellte Treiber verwendet, um dem XMC4500 als COM-Port zu erkennen. Die Einstellungen der Seriellen Übertragung wurden vom Beispielprojekt übernommen, so dass am Computer mit einer Baudrate von 115200 Bd und acht Daten Bits pro Zeichen empfangen wurde, was im Programm eingestellt werden musste. Nach der bereits erwähnten anfänglichen Bestätigung der Kommunikation durch den Nutzer, wurden bei jeder vom Mikrocontroller erkannten Übertragung die gemessenen Feldstärkewerte ausgegeben. Neben den PMF, PRX, RX, PPL und AGC-Werten wurde noch die Empfangsleistung ausgegeben. Diese wurde zur Laufzeit aus dem PPL und dem AGC-Wert errechnet und in dBm angezeigt. Dazu diente eine vorgegebene Funktion, welche aus dem PPL-Wert und dem Wert der AGC mittels kalibrierter Parameter eine Feldstärke berechnete. Die Werte wurden in einem Vorprojekt durch Messungen kalibriert und sind hier nicht weiter von Bedeutung. Die Abkürzungen der übertragenen Werte sind in Tabelle 3.4 aufgeführt. Die

PMF	Peak Memory Filter
PRX	Peak Detector
RX	Received Signal Strength Indication (RSSI)
PPL	RSSI Payload Peak Detector
AGC	Automatic Gain Control

Tab. 3.4: Verwendete Abkürzungen der übertragenen Messwerte

empfangenen Daten wurden ebenfalls ausgegeben. Alle Werte und Daten wurden nach Transceiver getrennt ausgegeben, um eine Vergleichsmöglichkeit zu geben und um die Ausgabe möglichst übersichtlich zu gestalten. Auch wurden die empfangenen Übertragungen durchnummeriert und die entsprechende Übertragungsnummer mit ausgegeben. So

ließen sich einerseits die Sendepositionen den gemessenen Werte zuordnen. Andererseits waren so aber auch verlorengegangene Übertragungen sichtbar. Eine typische Ausgabe der Konsole ist im Bild 3.5 zu erkennen. Zur Darstellung einer eingegangenen Übertragung an der Basisstation sollte die LED Nummer 7 nach jedem Empfangen kurz rot aufblinken.



```
com11 - PuTTY
Press any Key to Start COM-Transfer
Initialisierung beendet - Warte auf Übertragungen
##### Übertragung erkannt #####
Übertragung Nummer 1

TDA1:
PMF:16
PRX:50
RX:0
PPL:19
AGC:0
Empfangsleistung (dBm):-107
Empfangene Daten:123456789

TDA2:
PMF:207
PRX:211
RX:200
PPL:209
AGC:2
Empfangsleistung (dBm):-38
Empfangene Daten:123456789

TDA3:
PMF:23
PRX:30
RX:23
PPL:26
AGC:0
Empfangsleistung (dBm):-105
Empfangene Daten:123456789

TDA4:
PMF:227
PRX:228
RX:223
PPL:228
AGC:2
Empfangsleistung (dBm):-31
Empfangene Daten:123456789

TDA5:
PMF:193
PRX:202
RX:189
PPL:194
AGC:2
Empfangsleistung (dBm):-43
Empfangene Daten:123456789

TDA6:
PMF:185
PRX:195
RX:179
PPL:187
AGC:2
Empfangsleistung (dBm):-45
Empfangene Daten:123456789
```

Abb. 3.5: Ausgabe des Mikrocontrollers über den COM-Port in der Konsole bei einer beispielhaften Übertragung

Feldtest

4.1 Aufbau

Zur Evaluation der Basisstation wurde ein XMC4500 Relax Kit von Infineon mit einem aufgesteckten Evaluations-Board für den TDA5340 betrieben. Mit Hilfe einer Powerbank konnte dieses mobil über den USB-Anschluss des Relax Kits betrieben werden. Dieses wurde auf eine Sendefrequenz von 868,0 MHz und eine Empfangsfrequenz von 867,999 MHz programmiert was durch die Werte für die PLL im TDA5340 eingestellt wurde. Die Basisstation wurde mit sechs Antennen bestückt, die einen Verstärkungsfaktor von 3,6 dBi und eine Mittenfrequenz von 868 MHz aufwiesen. Die Basis wurde über USB an den Computer zur Auswertung angeschlossen. Das Auslesen der durch den virtuellen COM-Port übertragenen Daten erfolgte mit PuTTY. Die Messungen fanden innerhalb des Gebäudes statt.

4.2 Durchführung

Es wurden im selben Raum von diversen Positionen durch einen Tastendruck am Relax Kit eine Übertragung ausgelöst. Dabei wurde die zuvor einprogrammierte Zeichenkette 1,2,3,4,5,6,7,8,9 ausgesendet. Der Abstand zur Basisstation betrug im ersten Test 3,30 m und wurde nach jeder Übertragung um 30 cm verringert. In einem zweiten Test wurde ebenfalls mit einem Abstand von 3,30 m gestartet. Nach jeder Übertragung wurde der Sender 30 cm von der Startposition aus, entlang einer Linie, rechtwinklig zur Sichtverbindung Startpunkt-Basis, vom Relax Kit entfernt. Die gemessenen Werte wurden zur weiteren Auswertung abgespeichert. In beiden Test war die Basisstation so ausgerichtet, das TDA1 in Richtung der gemeinsamen Startposition der Tests zeigte. Logic Analyser und Debugger waren während der Tests nicht an der Basisstation angeschlossen. So sollten Abschattungseffekte durch diese verhindert werden. Die Basisstation wurde auf einem 70 cm hohen Tisch aufgestellt. Der Sender wurde auf gleicher Höhe freischwebend bewegt. Es wurden in beiden Tests zehn Messpunkte gesendet. Sowohl die Antennen an der Basisstation als auch jene am Relax Kit waren senkrecht nach oben zeigend ausgerichtet.

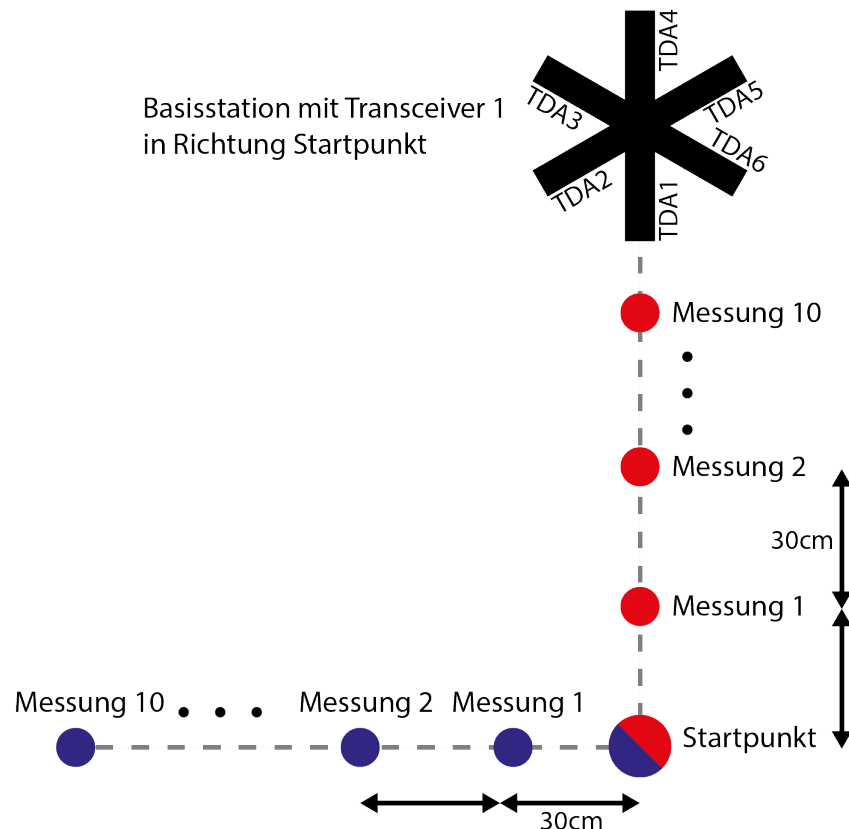


Abb. 4.1: Aufbau des ersten (rot) und des zweiten (blau) Feldtests der Basisstation. Transceiver TDA1 zeigt in Richtung des Startpunktes der beiden Feldtests

4.3 Ergebnisse und Auswertung

Auffallend ist, dass zwar in jedem Test zehn Mal durch das Drücken des Tasters eine Übertragung ausgelöst wurde, jedoch öfter eine Übertragung an der Basisstation registriert wurde. Im ersten Feldtest wurden fünfzehn, im zweiten sogar sechzehn, gültige Übertragungen von der Basisstation an den Hostcomputer weitergegeben. Beispielhafte Werte der Ausgabe sind in Tabelle 4.1 zu erkennen, die gesamte Ausgabe der Konsole ist im Anhang 6.6 eingefügt. Darin ist zu erkennen, dass die Empfangsleistung mit abnehmendem Abstand des Senders ansteigt, wie es zu erwarten war.

Im ersten Test konnten bei der ersten Übertragung an den Transceivern eins bis vier keine Daten empfangen werden. Erst in der darauffolgenden zweiten erkannten Übertragung wurde hier die gesendete Zahlenfolge empfangen. Bei der zweiten Übertragung, welche über die Konsole ausgegeben wurde, stimmten die Werte von TDA5 und TDA6 in allen ausgelesenen Registern mit den Messwerten der ersten Übertragung überein. Daraus ist zu folgern, dass es sich bei diesen Werten noch um die Messungen aus dem ersten Transfer handelt. Somit wäre zu vermuten, dass durch eine leichte Verzögerung zwischen den TDA5340 der steuernde Mikrocontroller eine gemeinsame Übermittlung als zwei getrennte Übertragungen interpretiert hat.

Transceiver 1 konnte in dem Test erst ab der vierten Übertragung gültige Daten

Position	Start	4	7	11	13	14	15
TDA1	-114	-114	-114	-114	-104	-104	-97
TDA2	-110	-37	-50	-33	-32	-32	-32
TDA3	-114	-114	-114	-114	-109	-106	-106
TDA4	-110	-35	-33	-36	-36	-31	-31
TDA5	-67	-50	-44	-43	-44	-33	-33
TDA6	-59	-58	-58	-55	-48	-43	-43

Tab. 4.1: Empfangsleistungen für ausgewählte Übertragungen des ersten Feldtests. In der ersten Zeile sind die durchnummerierten Positionen des Feldtests aufgeführt, an denen die jeweilige Messung durchgeführt wurde. Alle dargestellten Werte sind in dBm angegeben

empfangen. Außerdem waren die gemessenen Empfangsleistungen stets geringer als -100 dBm, lediglich bei der letzten Übertragung, welche bei einem Abstand von 30 cm stattfand, konnte hier ein Wert von -97 dBm gemessen werden. Da diese sehr schwachen Empfangsleistungen in vorherigen Tests nicht auftraten, ist zu vermuten, dass etwa eine nicht richtig verbundene Antenne Grund der schwachen Empfangswerte war.

TDA3 konnte in keiner einzigen Übertragung passable Messwerte liefern. Die errechnete und ausgegebene Empfangsfeldstärke von -114 dBm entsprach dem minimal möglichen Ausgabewert der dafür verwendeten Funktion. Es ist also davon auszugehen, dass in diesem Transceiver nie eine Funkverbindung erkannt wurde. Gründe dafür wären ein Fehler im Anpassnetzwerk zwischen der Antenne und dem Transceiver oder ein Defekt des selbigen. Letzteres ist eher unwahrscheinlich, da eine Verbindung über SPI mit dem IC möglich war. Lediglich ein Teildefekt in der RF-Sektion des Chips wäre also denkbar. Daneben waren vereinzelt auch noch Übertragungen zu erkennen, in denen Registerwerte mit den Messungen aus den folgenden oder vorherigen Übertragungen übereinstimmten. Auch hier ist zu vermuten, dass einzelne Transceiver eine Übertragung nicht erkennen konnten.

Zu beachten ist, dass die vermeintlich doppelt ankommenden Übertragungen auch vom Sender ausgehen konnten. Es ist nicht komplett sicher festzustellen ob die mehrfache Ausgabe einer Übertragung durch die Basisstation bedingt ist oder ob vom Relax Kit mehr als die gezählten Übertragungen versendet wurden. Das Versenden der Nachricht wurde an diesem durch einen Tastendruck ausgelöst. Durch ein Prellen des Tasters konnten auch mehrfache, nur minimal verzögerte Übertragungen ausgelöst worden sein. Für die Durchführung von nachfolgenden Tests wäre demnach ein Sicherstellen einer nur einfachen Übertragung notwendig. Zusätzlich wäre die Ausgabe eines Zählers für die Übertragungen am Relax Kit und ein neuer zu sendender Datensatz für jede Übermittlung hilfreich.

Ein Abtrennen der Transceiver-Baugruppen und somit ein Vergrößern des Abstandes der Antennen war zur Verbesserung der Empfangsleistung nicht notwendig.

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Basisstation den gewünschten Zweck gut erfüllt. Dabei besteht trotzdem noch die Möglichkeit zur weiteren Anpassungen an den aktuellen Nutzen. So können alle Transceiver ordnungsgemäß angesteuert werden und die Erkennung der Interrupts durch den Mikrocontroller funktioniert. Trotz der zum jetzigen Zeitpunkt nicht umgesetzten Netzwerkverbindung der Basisstation konnte eine funktionierende und einfache Ausgabe der Werte umgesetzt werden, welche trotzdem eine frei anpassbare und übersichtliche Ausgabe erlaubt. Problematisch war hierbei die Verwendung eines abgekündigten und nicht mehr hergestellten ICs. Mittlerweile existieren jedoch Nachfolgemodelle des Ethernet-Controllers, sodass eine Migration möglich sein sollte, entsprechende Datenblätter mit Hinweisen stellt der Hersteller bereit.

Ausblickend ließen sich an der Basisstation noch weitere Verbesserungen durchführen. So wäre noch das Eruiere des Grundes für den schlechten Empfang am Transceiver 3 notwendig. Dafür könnte durch das Anschließen eines Signalgenerators an die Antennenbuchse der entsprechenden Transceiverbaugruppe ein möglicher Fehler im Anpassnetzwerk aufgezeigt werden. Sollte auch dies nicht zu einer Verbesserung führen, wäre ein Austausch des ICs notwendig.

Für das bessere Erkennen von doppelten Übertragungen wäre das Einfügen eines Zeitstempel in die Ausgabe hilfreich. Dadurch könnten Übertragungen die kurz hintereinander eintreffen, markiert und entsprechend zu einer korrekten zusammengefügt werden. Zu diesem Zweck würde es sich anbieten, die Realtime-Clock des XMC4500 zu verwenden. Dazu würde das auf der Platine vorsorglich verbaute Uhrenquarz verwendet werden. Zwar wäre auch durch das Abwarten auf weitere verzögerte Übertragungen von anderen Transceivern das Problem der auf mehrere Ausgaben verteilten Übertragungen vermeidbar. Dies würde jedoch zu einer Todzeit führen, in der keine andere Übertragung möglich ist, was zu vermeiden ist.

Auch wäre für eine Veränderung an der Platine die Auswahl eines anderen Eingangspins am XMC für das vom PP2 Pin des Transceiver 6 kommenden Interruptsignals sinnvoll. So wären die TDA3 und TDA6 nicht an den selben Interruptkanal des Mikrocontroller angeschlossen. Die dazu notwendigen Änderungen an der Software würden sich auf die Änderungen der entsprechenden Makros in der Headerdatei beschränken. Alternativ ließe

sich möglicherweise das Problem der konkurrierenden Interrupts über Anpassungen in der Software lösen. So wäre es möglich, das Interruptsignal einzelner TDA5340 nicht über den PP2 Pin auszugeben, sondern auch über die ebenfalls mit dem XMC verbundenen PP0 und PP1 Pins. Somit wäre ein Verteilen auf einzelne Kanäle der ERU wahrscheinlich auch ohne eine Anpassung der Platine möglich.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schaltplan der Transceiverbaugruppe	7
2.2	Layout des Transceivers	8
2.3	Der XMC4500 Mikrocontroller von Infineon im LQFP-Gehäuse mit 144 Pins [5]	9
2.4	Schaltplan des XMC4500 Mikrocontrollers	11
2.5	Layout der USB-Buchse mit der entsprechenden Schutzbeschaltung . . .	12
2.6	Layout für den Ethernetcontroller von Mircel und die Anbindung an den XMC4500 Mikrocontroller	13
2.7	Schaltplan der Spannungsversorgung und der USB-Verbindung des Mikrocontrollers	14
2.8	3D-Modell der Basisstation in Altium Designer	16
3.1	Blockdiagramm zur Peripherie des XMC4500 Mikrocontroller und die Anbindung an den Cortex-M4 Kern [6]	18
3.2	Struktur eines Digitalpins des XMC Mikrocontrollers [11]	19
3.3	Start einer SPI-Übertragung zwischen dem Mikrocontroller und dem Transceiver	23
3.4	Programmablauf der Basisstation	24
3.5	Ausgabe des Mikrocontrollers über den COM-Port in der Konsole bei einer beispielhaften Übertragung	29
4.1	Aufbau des Testszenarios	32
6.1	Erstellte Box zum Schutz der Basisstation in der Software SolidWorks . .	50
6.2	Layout des Aufsteckboards mit dem TDA5340	51

Tabellenverzeichnis

3.1	Zuordnung der SPI-Signale an die Pins des Mikrocontrollers	20
3.2	SPI-Instruktionen des Transceivers und die entsprechenden Datenwörter .	22
3.3	PP2-Pins der Transceiver mit den entsprechenden Anschlüssen am XMC4500 und die Verbindung zur ERU	26
3.4	Verwendete Abkürzungen der übertragenen Messwerte	27
4.1	Beispielhafte Empfangsleistungen des ersten Feldtests	33
6.1	Seriennummern der im Projekt verwendeten TDA5340	51

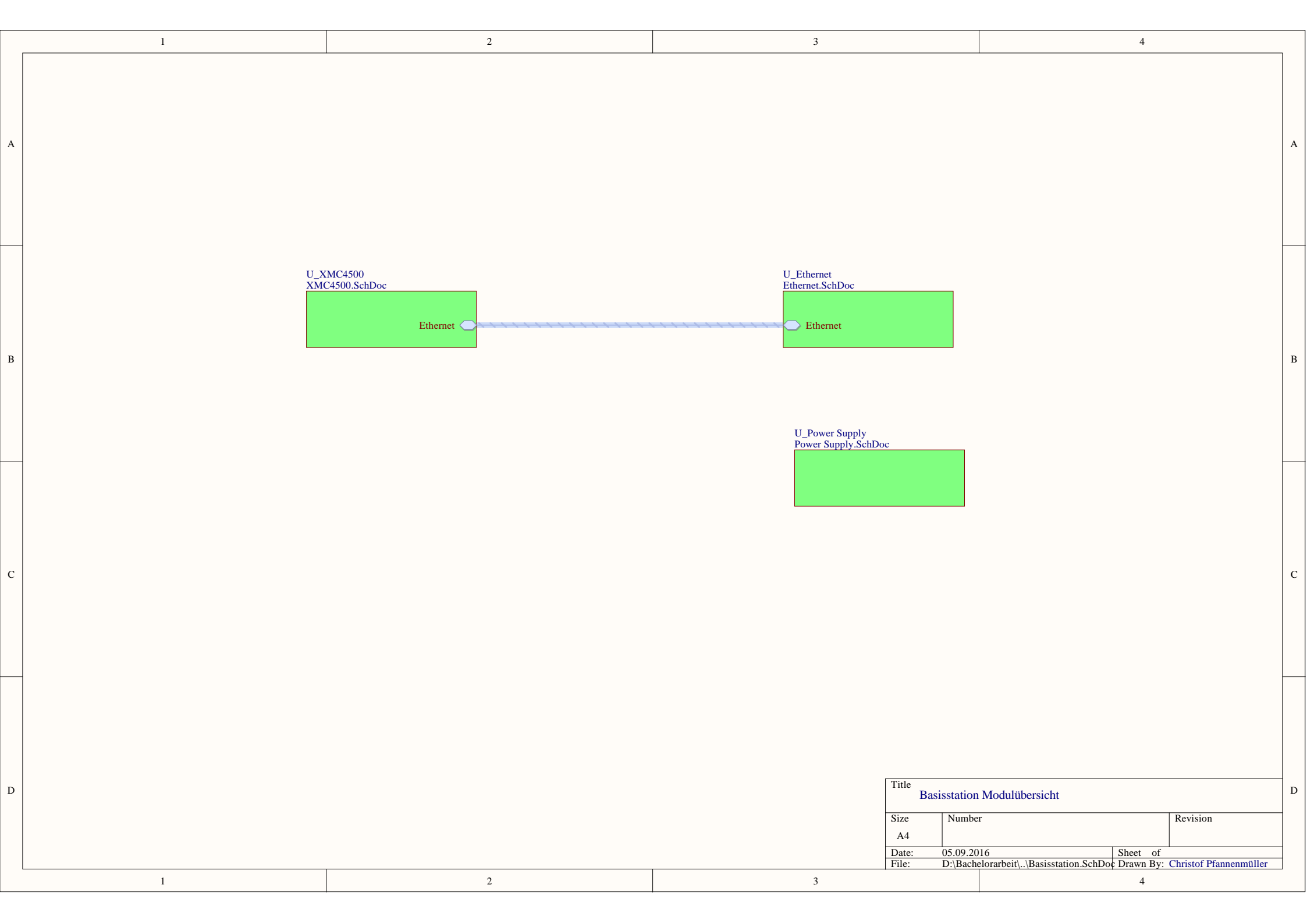
Quellcodeverzeichnis

3.1	Ausschnitt aus dem Senden der Daten über den COM-Port	27
6.1	Hauptdatei des Softwareentwurfs	52
6.2	Interrupt Service Routinen des Softwareentwurfs	58

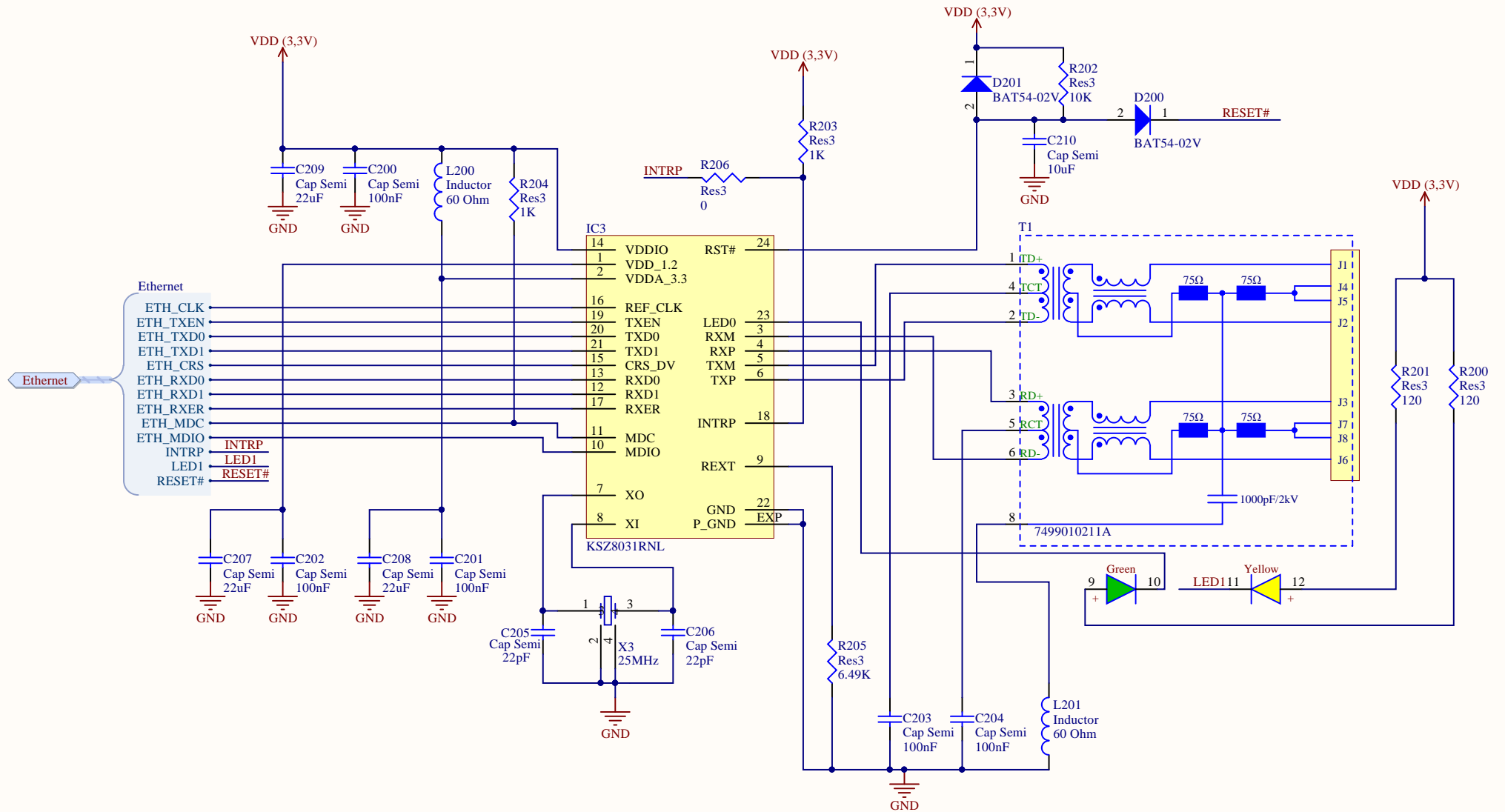
Anhang

6.1 Schaltpläne

Auf den folgenden Seiten sind die in Altium Designer erstellten Schaltpläne für alle Baugruppen der Basisstation dargestellt. Außerdem ist das PCB-Layout der Basisstation abgebildet.



Title			Basisstation Modulübersicht	
Size	Number		Revision	
A4				
Date:	05.09.2016		Sheet of	
File:	D:\Bachelorarbeit\...\Basisstation.SchDoc		Drawn By:	Christof Pfannenmüller



Title		
Ethernet		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05.09.2016	Sheet of
File:	D:\Bachelorarbeit\...\Ethernet.SchDoc	Drawn By: Christof Pfannenmüller

A

B

C

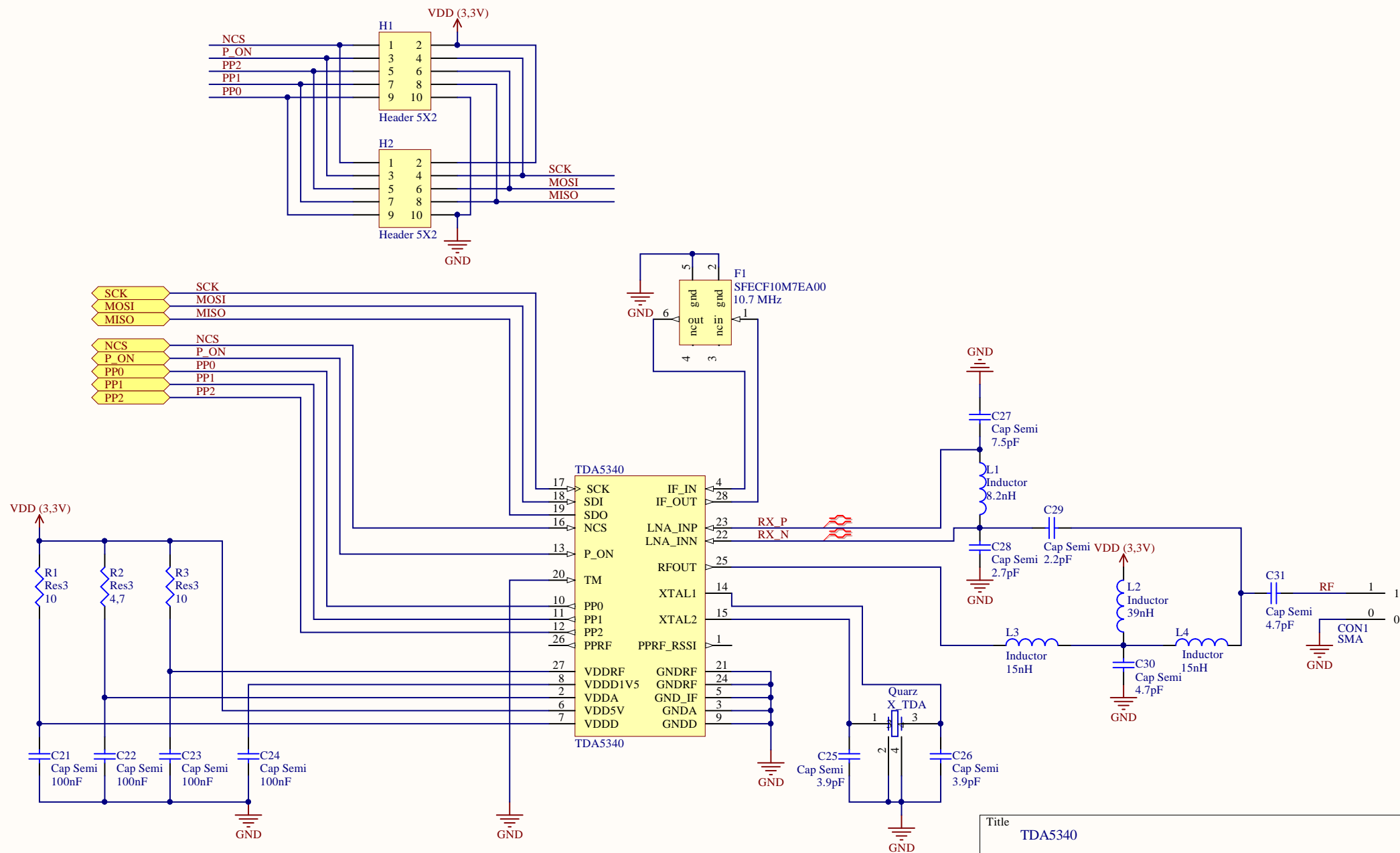
D

A

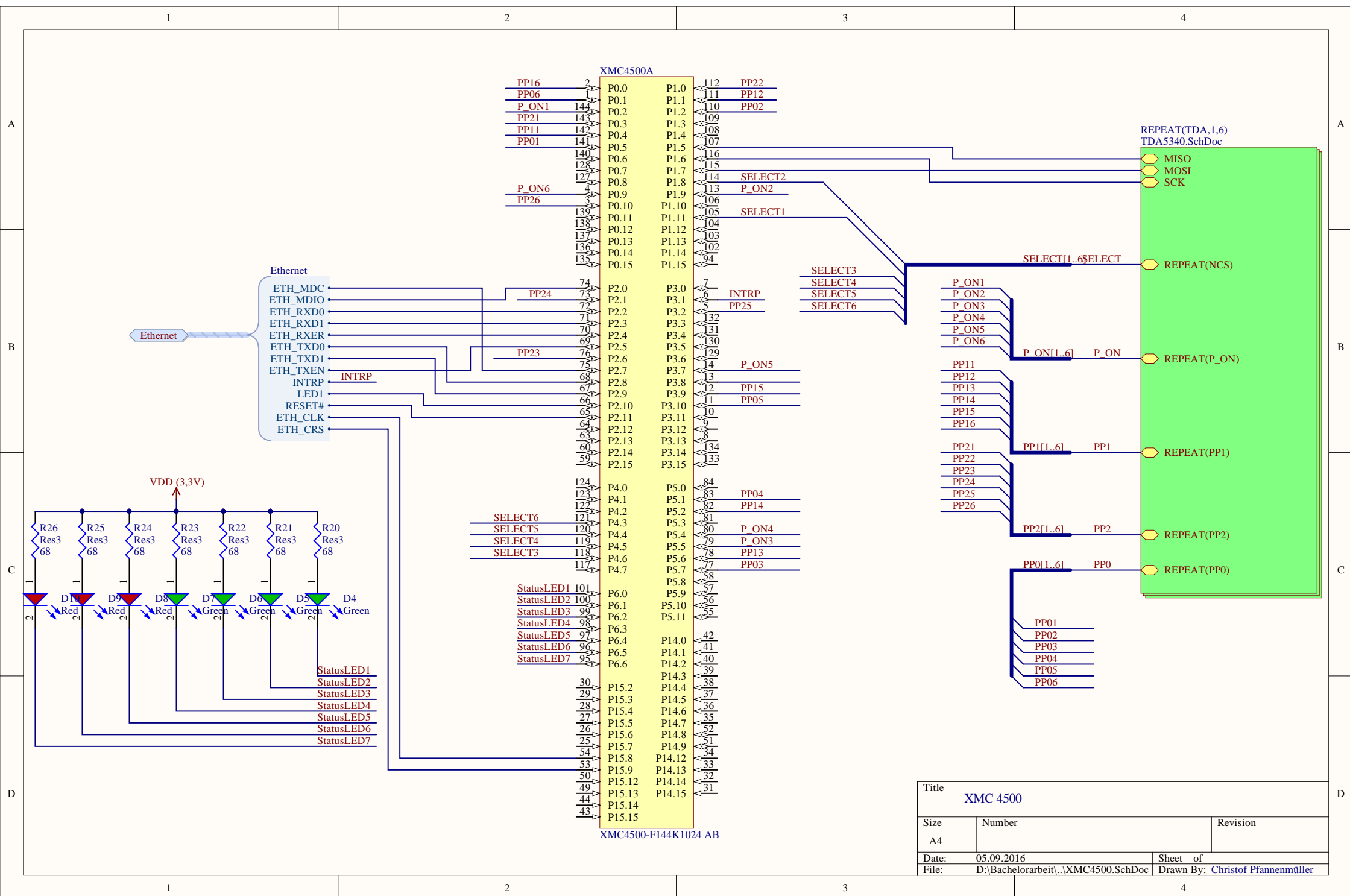
B

C

D



Title		
TDA5340		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	05.09.2016	Sheet of
File:	D:\Bachelorarbeit\...\TDA5340.SchDoc	Drawn By: Christof Pfannenmüller



1

2

3

4

A

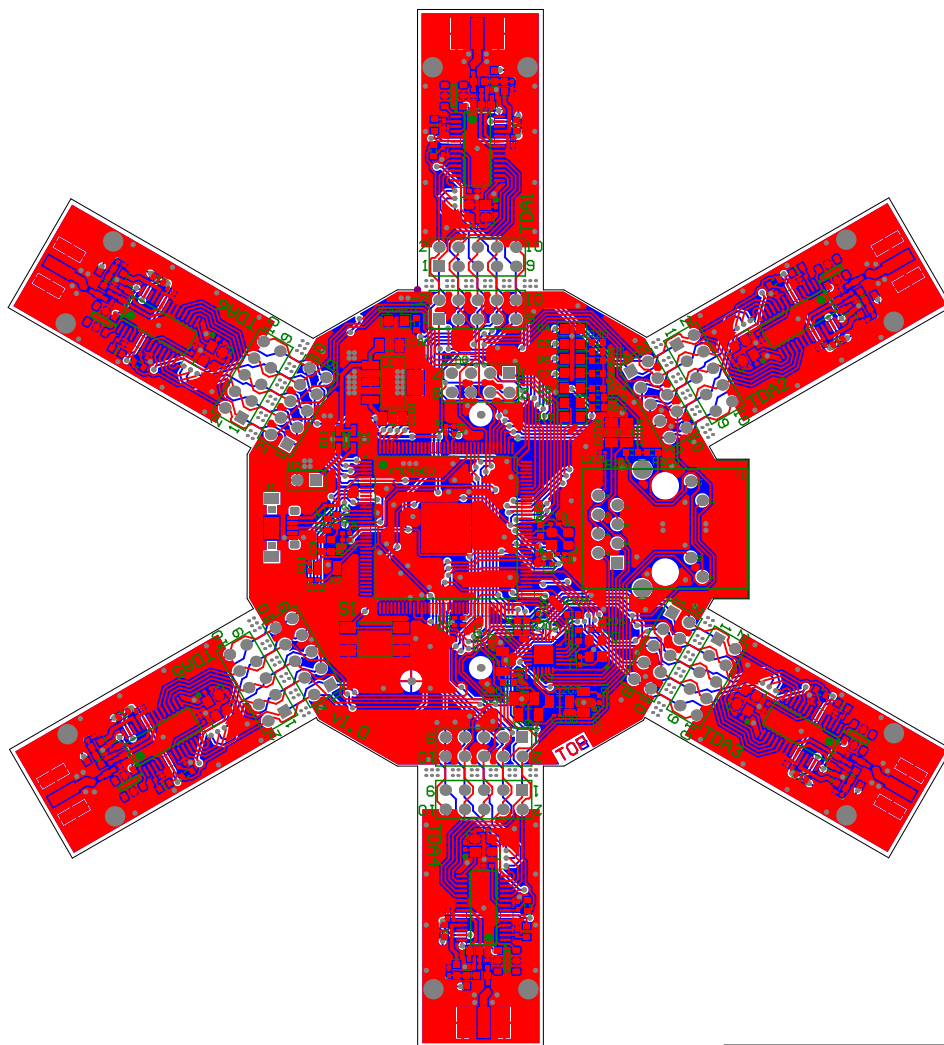
A

B

C

D

D



Altium Limited
12a Rodborough Rd
Frenchs Forest
NSW 2086

ENGINEER: Christof Pfannenmueller		TITLE: Basistation PCB Layout	
PCB DESIGNER:			
DATE: 05.09.2016	PART NO.:		REV:
FILE NAME: PCB_Testplatine.PcbDoc	DWG NO.:		SCALE:

1

2

3

4

6.2 Gehäuse

Mit der Software SolidWorks wurde ein Gehäuse für die Platine erstellt. Diese wurde anschließend mit einem 3D-Drucker aus Polylactide (PLA) ausgedruckt.

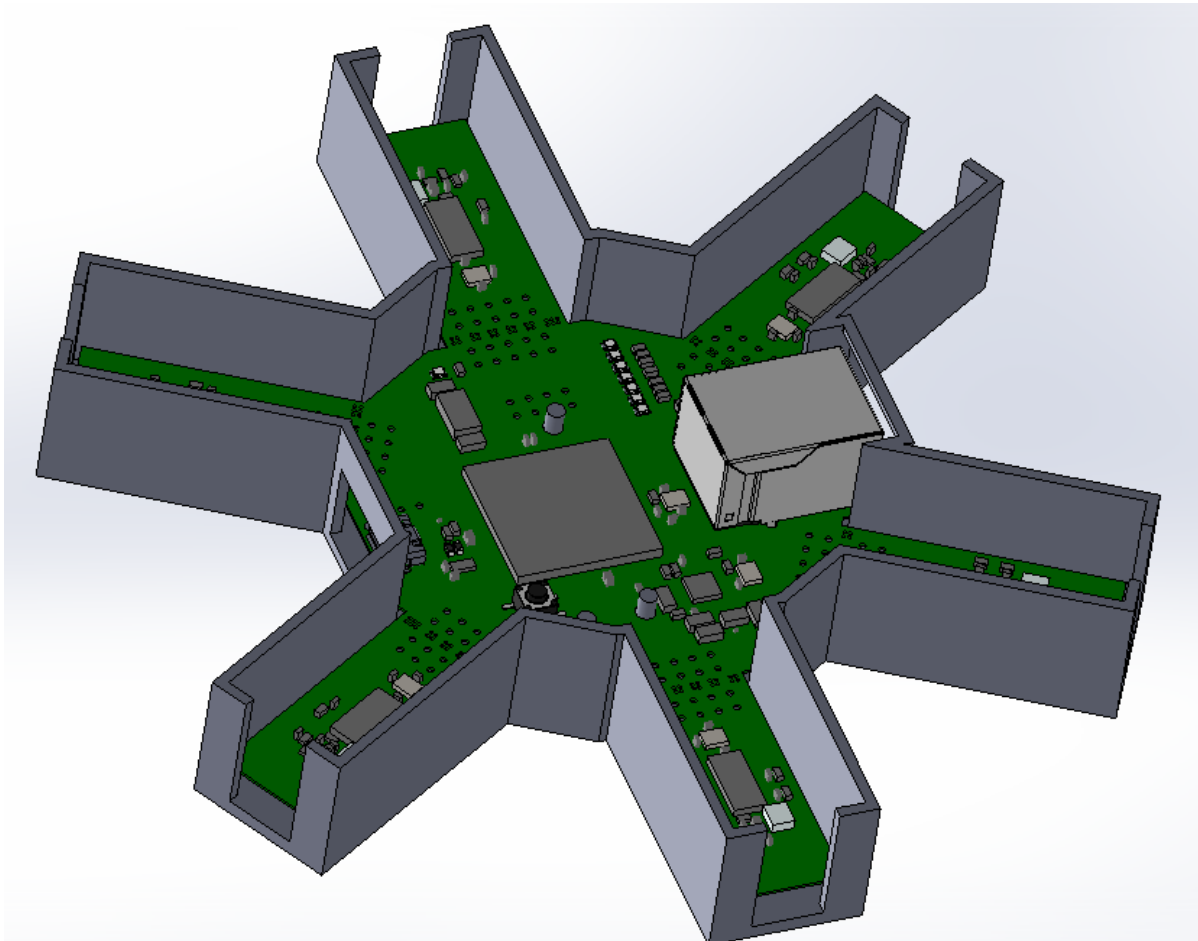


Abb. 6.1: Erstellte Box zum Schutz der Basisstation in der Software SolidWorks

6.3 Seriennummern

Alle TDA5340 verfügen über eine eingebaute Seriennummer, welche ausgelesen werden kann. Die Seriennummern der verwendeten TDA5340 sind in der Tabelle aufgeführt.

TDA	Seriennummer
TDA1	33020236
TDA2	11727080
TDA3	11545236
TDA4	11728870
TDA5	11550773
TDA6	33026263

Tab. 6.1: Seriennummern der im Projekt verwendeten TDA5340

6.4 Layout Aufsteckboard TDA5340

Das Layout der Transceiver-Unterbaugruppen orientiert sich an dem Layout eines Aufsteckboards für den „XMC 2Go“, damit ein TDA5340 mit diesem verwendet werden kann.

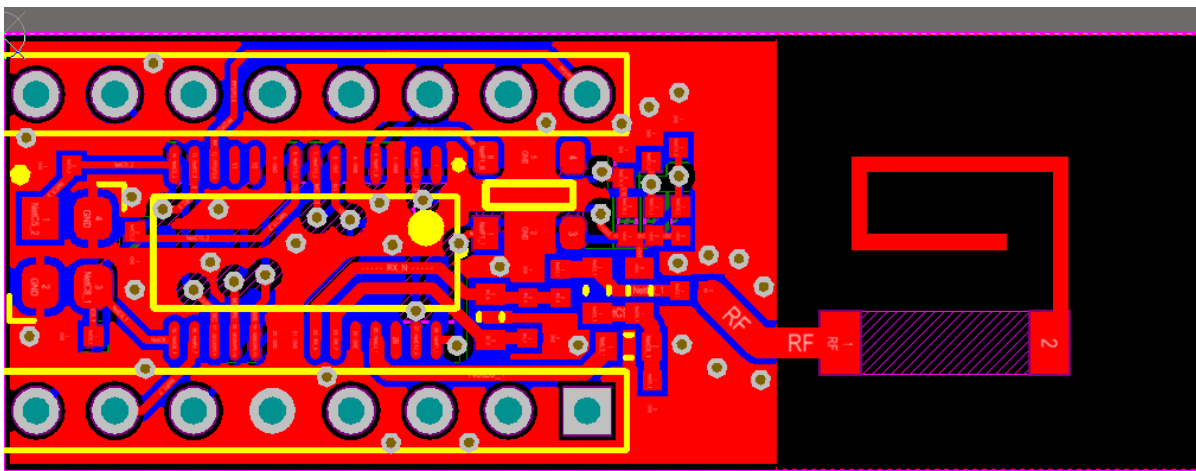


Abb. 6.2: Layout des Aufsteckboards mit dem TDA5340

6.5 Quellcode

Im folgenden sind die Main-Datei des Softwareentwurfs sowie die Interrupt Service Routinen dargestellt.

6.5.1 Main.c

Quellcode 6.1: Hauptdatei des Softwareentwurfs

```

1  /*
2   * Main.c
3   *
4   * Created on: Jun 13, 2016
5   * Author: Christof Pfannenmüller
6   */
7  #include "Header_general.h" //including all Header files

9  // Global variables
10 uint8_t query_interruptTDA1_flag = 0;
11 uint8_t query_interruptTDA2_flag = 0;
12 uint8_t query_interruptTDA3_flag = 0;
13 uint8_t query_interruptTDA4_flag = 0;
14 uint8_t query_interruptTDA5_flag = 0;
15 uint8_t query_interruptTDA6_flag = 0;

17 int16_t dig_to_dbm(uint8_t dig, uint8_t agc) {
18     int32_t dbm_val = (712L * dig - 231628L + 3289L * agc) / 2048UL;
19     return (int16_t) dbm_val;
20 }

22 int main(void) {

24     init();
25     USB_Init(); //for virt. COM Port
26     COM_wait_for_transfer();

28     set_TDA_status(TDA_ALL, 1);
29     delay(40000);
30     tda5340_gpio_init(TDA_ALL);
31     spi_init(spi_master_ch);

33     delay(1000);

36     led_on(LED_ALL);
37     delay(4000000);
38     led_off(LED_ALL);
39     led_on(LED1);
40     delay(4000000);
41     led_off(LED_ALL);
42     led_on(LED1);    //greet user

45     delay(40000);
46     tda5340_init(TDA1); //Verzoegerung nach set_TDA_status muss gros genug sein bis SPI
                        //Kom moeglich ist, delay(45000); müsste das richtige sein
47     tda5340_set_mode_and_config(TDA1, RX_MODE, 0);

49     delay(40000);

51     //für gesamte Platine:
52     tda5340_init(TDA2);
53     tda5340_set_mode_and_config(TDA2, RX_MODE, 0);
54     tda5340_init(TDA3);

```



```

55     tda5340_set_mode_and_config(TDA3, RX_MODE, 0);
56     tda5340_init(TDA4);
57     tda5340_set_mode_and_config(TDA4, RX_MODE, 0);
58     tda5340_init(TDA5);
59     tda5340_set_mode_and_config(TDA5, RX_MODE, 0);
60     tda5340_init(TDA6);
61     tda5340_set_mode_and_config(TDA6, RX_MODE, 0);

63 //   Ablaufschleife START
        ++++++
64     COM_send_string("Initialisierung beendet - ");
65     uint8_t data_recieved = 0;
66     uint32_t istateTDA1 = 0, istateTDA2 = 0, istateTDA3 = 0, istateTDA4 = 0, istateTDA5
        = 0, istateTDA6 = 0;
67     uint8_t lengthTDA1 = 0, lengthTDA2 = 0, lengthTDA3 = 0, lengthTDA4 = 0, lengthTDA5
        = 0, lengthTDA6 = 0;
68     uint32_t transfernumber = 0;
69     uint32_t led_ctr = 0;
70     char rx_data_TDA1[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };// wurde so initialisiert
        damit auffällt wenn keine neuen Messwerte eingetragen werden
71     char rx_data_TDA2[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };
72     char rx_data_TDA3[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };
73     char rx_data_TDA4[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };
74     char rx_data_TDA5[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };
75     char rx_data_TDA6[36] = { 1, 0, 3, 0, 5, 6, 7, 8, 9 };
76     struct rssi {
77         uint8_t pmf;
78         uint8_t prx;
79         uint8_t rx;
80         uint8_t ppl;
81         uint8_t agc;
82     };

84     struct rssi rssiTDA1 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };
85     struct rssi rssiTDA2 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };
86     struct rssi rssiTDA3 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };
87     struct rssi rssiTDA4 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };
88     struct rssi rssiTDA5 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };
89     struct rssi rssiTDA6 = { .pmf = 0, .prx = 0, .rx = 0, .ppl = 0, .agc = 0 };

91     query_interruptTDA1_flag = 0;
92     query_interruptTDA2_flag = 0;
93     query_interruptTDA3_flag = 0;
94     query_interruptTDA4_flag = 0;
95     query_interruptTDA5_flag = 0;
96     query_interruptTDA6_flag = 0;

98 //-----
99     COM_send_string("Warte auf Übertragungen\r\n");
100     while (1) {
101         if (query_interruptTDA1_flag) {
102             query_interruptTDA1_flag = 0;
103             istateTDA1 = tda5340_interrupt_readout(TDA1);
104         }
105         if (query_interruptTDA2_flag) {
106             query_interruptTDA2_flag = 0;
107             istateTDA2 = tda5340_interrupt_readout(TDA2);
108         }
109         if (query_interruptTDA3_flag) {
110             query_interruptTDA3_flag = 0;
111             istateTDA3 = tda5340_interrupt_readout(TDA3);
112         }
113         if (query_interruptTDA4_flag) {
114             query_interruptTDA4_flag = 0;
115             istateTDA4 = tda5340_interrupt_readout(TDA4);
116         }
117         if (query_interruptTDA5_flag) {
118             query_interruptTDA5_flag = 0;
119             istateTDA5 = tda5340_interrupt_readout(TDA5);

```

```

120     }
121     if (query_interruptTDA6_flag) {
122         query_interruptTDA6_flag = 0;
123         led_on(LED3);
124         istateTDA6 = tda5340_interrupt_readout(TDA6);
125     }
126     //-----

128     if (istateTDA1 & (1 << 1)) {
129         rssiTDA1.pmf = tda5340_transfer(TDA1, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
130         rssiTDA1.rx = tda5340_transfer(TDA1, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
131         rssiTDA1.agc = (tda5340_transfer(TDA1, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
132             >> 1;
133         istateTDA1 &= ~(1 << 1);
134     }
135     if (istateTDA2 & (1 << 1)) {
136         rssiTDA2.pmf = tda5340_transfer(TDA2, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
137         rssiTDA2.rx = tda5340_transfer(TDA2, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
138         rssiTDA2.agc = (tda5340_transfer(TDA2, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
139             >> 1;
140         istateTDA2 &= ~(1 << 1);
141     }
142     if (istateTDA3 & (1 << 1)) {
143         rssiTDA3.pmf = tda5340_transfer(TDA3, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
144         rssiTDA3.rx = tda5340_transfer(TDA3, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
145         rssiTDA3.agc = (tda5340_transfer(TDA3, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
146             >> 1;
147         istateTDA3 &= ~(1 << 1);
148     }
149     if (istateTDA4 & (1 << 1)) {
150         rssiTDA4.pmf = tda5340_transfer(TDA4, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
151         rssiTDA4.rx = tda5340_transfer(TDA4, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
152         rssiTDA4.agc = (tda5340_transfer(TDA4, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
153             >> 1;
154         istateTDA4 &= ~(1 << 1);
155     }
156     if (istateTDA5 & (1 << 1)) {
157         rssiTDA5.pmf = tda5340_transfer(TDA5, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
158         rssiTDA5.rx = tda5340_transfer(TDA5, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
159         rssiTDA5.agc = (tda5340_transfer(TDA5, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
160             >> 1;
161         istateTDA5 &= ~(1 << 1);
162     }
163     if (istateTDA6 & (1 << 1)) {
164         rssiTDA6.pmf = tda5340_transfer(TDA6, READ_FROM_CHIP, RSSIPMF, 0xFF);
165         rssiTDA6.rx = tda5340_transfer(TDA6, READ_FROM_CHIP, RSSIRX, 0xFF);
166         rssiTDA6.agc = (tda5340_transfer(TDA6, READ_FROM_CHIP, AGCADRR, 0xFF) & 0x06)
167             >> 1;
168         istateTDA6 &= ~(1 << 1);
169     }
170     //-----
171     if (istateTDA1 & (1 << 3)) {
172         rssiTDA1.prx = tda5340_transfer(TDA1, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
173         rssiTDA1.ppl = tda5340_transfer(TDA1, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
174         tda5340_set_mode_and_config(TDA1, SLEEP_MODE, 0);
175         if (!tda5340_receive(TDA1, rx_data_TDA1, &lengthTDA1)) {
176             if (lengthTDA1 > 32)
177                 lengthTDA1 = 32;
178         }
179         tda5340_set_mode_and_config(TDA1, RX_MODE, 0);
180         data_recieved = 1;
181         istateTDA1 &= ~(1 << 3);
182     }
183     if (istateTDA2 & (1 << 3)) {
184         rssiTDA2.prx = tda5340_transfer(TDA2, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
185         rssiTDA2.ppl = tda5340_transfer(TDA2, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
186         tda5340_set_mode_and_config(TDA2, SLEEP_MODE, 0);

```

```

183     if (!tda5340_receive(TDA2, rx_data_TDA2, &lengthTDA2)) {
184         if (lengthTDA2 > 32)
185             lengthTDA2 = 32;
186     }
187     tda5340_set_mode_and_config(TDA2, RX_MODE, 0);
188     data_recieved = 1;
189     istateTDA2 &= ~(1 << 3);
190 }
191 if (istateTDA3 & (1 << 3)) {

193     rssiTDA3.prx = tda5340_transfer(TDA3, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
194     rssiTDA3.ppl = tda5340_transfer(TDA3, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
195     tda5340_set_mode_and_config(TDA3, SLEEP_MODE, 0);
196     if (!tda5340_receive(TDA3, rx_data_TDA3, &lengthTDA3)) {
197         if (lengthTDA3 > 32)
198             lengthTDA3 = 32;
199     }
200     tda5340_set_mode_and_config(TDA3, RX_MODE, 0);
201     data_recieved = 1;
202     istateTDA3 &= ~(1 << 3);
203 }
204 if (istateTDA4 & (1 << 3)) {

206     rssiTDA4.prx = tda5340_transfer(TDA4, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
207     rssiTDA4.ppl = tda5340_transfer(TDA4, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
208     tda5340_set_mode_and_config(TDA4, SLEEP_MODE, 0);
209     if (!tda5340_receive(TDA4, rx_data_TDA4, &lengthTDA4)) {
210         if (lengthTDA4 > 32)
211             lengthTDA4 = 32;
212     }
213     tda5340_set_mode_and_config(TDA4, RX_MODE, 0);
214     data_recieved = 1;
215     istateTDA4 &= ~(1 << 3);
216 }
217 if (istateTDA5 & (1 << 3)) {

219     rssiTDA5.prx = tda5340_transfer(TDA5, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
220     rssiTDA5.ppl = tda5340_transfer(TDA5, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
221     tda5340_set_mode_and_config(TDA5, SLEEP_MODE, 0);
222     if (!tda5340_receive(TDA5, rx_data_TDA5, &lengthTDA5)) {
223         if (lengthTDA5 > 32)
224             lengthTDA5 = 32;
225     }
226     tda5340_set_mode_and_config(TDA5, RX_MODE, 0);
227     data_recieved = 1;
228     istateTDA5 &= ~(1 << 3);
229 }
230 if (istateTDA6 & (1 << 3)) {

232     rssiTDA6.prx = tda5340_transfer(TDA6, READ_FROM_CHIP, RSSIPRX, 0xFF);
233     rssiTDA6.ppl = tda5340_transfer(TDA6, READ_FROM_CHIP, RSSIPPL, 0xFF);
234     tda5340_set_mode_and_config(TDA6, SLEEP_MODE, 0);
235     if (!tda5340_receive(TDA6, rx_data_TDA6, &lengthTDA6)) {
236         if (lengthTDA6 > 32)
237             lengthTDA6 = 32;
238     }
239     tda5340_set_mode_and_config(TDA6, RX_MODE, 0);
240     data_recieved = 1;
241     istateTDA6 &= ~(1 << 3);
242 }
243 //-----
244 //send to COM
245 if (data_recieved) {
246     transfernumber++;
247     COM_send_string("##### Übertragung erkannt #####\r\n");
248     COM_send_string("Übertragung Nummer ");
249     COM_send_int_as_string(transfernumber);
250     COM_send_string("\r\n\r\n");

```

```

251     COM_send_string("TDA1:");
252     COM_send_string("\r\nPMF:");
253     COM_send_int_as_string(rssiTDA1.pmf);
254     COM_send_string("\r\nPRX:");
255     COM_send_int_as_string(rssiTDA1.prx);
256     COM_send_string("\r\nRX:");
257     COM_send_int_as_string(rssiTDA1.rx);
258     COM_send_string("\r\nPPL:");
259     COM_send_int_as_string(rssiTDA1.ppl);
260     COM_send_string("\r\nAGC:");
261     COM_send_int_as_string(rssiTDA1.agc);
262     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
263     if (dig_to_dbm(rssiTDA1.ppl, rssiTDA1.agc) < 0) {
264         COM_send_string("-");
265     }
266     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA1.ppl, rssiTDA1.agc)));
267     COM_send_string("\r\n");
268     COM_send_string("Empfangene Daten:");
269     for (int i = 0; i <= lengthTDA1; ++i) {
270         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA1[i]);
271     }
272
273     COM_send_string("\r\n\r\n");
274
275     COM_send_string("TDA2:");
276     COM_send_string("\r\nPMF:");
277     COM_send_int_as_string(rssiTDA2.pmf);
278     COM_send_string("\r\nPRX:");
279     COM_send_int_as_string(rssiTDA2.prx);
280     COM_send_string("\r\nRX:");
281     COM_send_int_as_string(rssiTDA2.rx);
282     COM_send_string("\r\nPPL:");
283     COM_send_int_as_string(rssiTDA2.ppl);
284     COM_send_string("\r\nAGC:");
285     COM_send_int_as_string(rssiTDA2.agc);
286     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
287     if (dig_to_dbm(rssiTDA2.ppl, rssiTDA2.agc) < 0) {
288         COM_send_string("-");
289     }
290     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA2.ppl, rssiTDA2.agc)));
291     COM_send_string("\r\n");
292     COM_send_string("Empfangene Daten:");
293     for (int i = 0; i <= lengthTDA2; ++i) {
294         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA2[i]);
295     }
296
297     COM_send_string("\r\n\r\n");
298
299     COM_send_string("TDA3:");
300     COM_send_string("\r\nPMF:");
301     COM_send_int_as_string(rssiTDA3.pmf);
302     COM_send_string("\r\nPRX:");
303     COM_send_int_as_string(rssiTDA3.prx);
304     COM_send_string("\r\nRX:");
305     COM_send_int_as_string(rssiTDA3.rx);
306     COM_send_string("\r\nPPL:");
307     COM_send_int_as_string(rssiTDA3.ppl);
308     COM_send_string("\r\nAGC:");
309     COM_send_int_as_string(rssiTDA3.agc);
310     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
311     if (dig_to_dbm(rssiTDA3.ppl, rssiTDA3.agc) < 0) {
312         COM_send_string("-");
313     }
314     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA3.ppl, rssiTDA3.agc)));
315     COM_send_string("\r\n");
316     COM_send_string("Empfangene Daten:");
317     for (int i = 0; i <= lengthTDA3; ++i) {
318         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA3[i]);

```

```
320     }
321     COM_send_string("\r\n\r\n");

323     COM_send_string("TDA4:");
324     COM_send_string("\r\nPMF:");
325     COM_send_int_as_string(rssiTDA4.pmf);
326     COM_send_string("\r\nPRX:");
327     COM_send_int_as_string(rssiTDA4.prx);
328     COM_send_string("\r\nRX:");
329     COM_send_int_as_string(rssiTDA4.rx);
330     COM_send_string("\r\nPPL:");
331     COM_send_int_as_string(rssiTDA4.ppl);
332     COM_send_string("\r\nAGC:");
333     COM_send_int_as_string(rssiTDA4.agc);
334     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
335     if (dig_to_dbm(rssiTDA4.ppl, rssiTDA4.agc) < 0) {
336         COM_send_string("-");
337     }
338     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA4.ppl, rssiTDA4.agc)));
339     COM_send_string("\r\n");
340     COM_send_string("Empfangene Daten:");
341     for (int i = 0; i <= lengthTDA4; ++i) {
342         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA4[i]);

344     }
345     COM_send_string("\r\n\r\n");

347     COM_send_string("TDA5:");
348     COM_send_string("\r\nPMF:");
349     COM_send_int_as_string(rssiTDA5.pmf);
350     COM_send_string("\r\nPRX:");
351     COM_send_int_as_string(rssiTDA5.prx);
352     COM_send_string("\r\nRX:");
353     COM_send_int_as_string(rssiTDA5.rx);
354     COM_send_string("\r\nPPL:");
355     COM_send_int_as_string(rssiTDA5.ppl);
356     COM_send_string("\r\nAGC:");
357     COM_send_int_as_string(rssiTDA5.agc);
358     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
359     if (dig_to_dbm(rssiTDA5.ppl, rssiTDA5.agc) < 0) {
360         COM_send_string("-");
361     }
362     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA5.ppl, rssiTDA5.agc)));
363     COM_send_string("\r\n");
364     COM_send_string("Empfangene Daten:");
365     for (int i = 0; i <= lengthTDA5; ++i) {
366         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA5[i]);

368     }
369     COM_send_string("\r\n\r\n");

371     COM_send_string("TDA6:");
372     COM_send_string("\r\nPMF:");
373     COM_send_int_as_string(rssiTDA6.pmf);
374     COM_send_string("\r\nPRX:");
375     COM_send_int_as_string(rssiTDA6.prx);
376     COM_send_string("\r\nRX:");
377     COM_send_int_as_string(rssiTDA6.rx);
378     COM_send_string("\r\nPPL:");
379     COM_send_int_as_string(rssiTDA6.ppl);
380     COM_send_string("\r\nAGC:");
381     COM_send_int_as_string(rssiTDA6.agc);
382     COM_send_string("\r\nEmpfangsleistung (dBm):");
383     if (dig_to_dbm(rssiTDA6.ppl, rssiTDA6.agc) < 0) {
384         COM_send_string("-");
385     }
386     COM_send_int_as_string(abs(dig_to_dbm(rssiTDA6.ppl, rssiTDA6.agc)));
387     COM_send_string("\r\n");
388     COM_send_string("Empfangene Daten:");
```

```

389     for (int i = 0; i <= lengthTDA6; ++i) {
390         COM_send_int_as_string(rx_data_TDA6[i]);

392     }
393     COM_send_string("\r\n\r\n");

395     led_ctr = 400000;
396     led_on(LED7);
397     data_recieved = 0;
398 }

400 if (led_ctr) {
401     led_ctr--;

403     if (!led_ctr)
404         led_off(LED7);
405 }
406 }
407 // Ablaufschleife ENDE
    ++++++

409 //ab hier nur zum Testen
410 //function for general test purposes
411 //general_test();

413 while (1) {

415 }

417 }

```

6.5.2 ISRs.c

Quellcode 6.2: Interrupt Service Routinen des Softwareentwurfs

```

1  /*
2   * ISRs.c
3   *
4   * Created on: Jul 7, 2016
5   * Author: Christof Pfannenmueller
6   */

8  #include "Header_general.h" //including all Header files

10 // ISR für TDA1 (ERU1 OGU0 IRQ)
11 extern void ERU1_0_IRQHandler(void) {
12     query_interruptTDA1_flag = 1;
13     // COM_send_string("INTERRUPT1\r\n");
14 }
15 // ISR für TDA2 (ERU0 OGU0 IRQ)
16 extern void ERU0_0_IRQHandler(void) {
17     query_interruptTDA2_flag = 1;
18     // COM_send_string("INTERRUPT2\r\n");
19 }
20 // ISR für TDA3 + TDA6 (ERU0 OGU1 IRQ)
21 extern void ERU0_1_IRQHandler(void) {
22     //XMC_ERU_ETL_ClearStatusFlag(XMC_ERU0, 1);
23     // COM_send_string("ISR 3 und 6 \r\n");

25     // //Check which Interrupt has occurred
26     // uint32_t status_tda3 = XMC_GPIO_GetInput(PORT_PP2_TDA_3, PIN_PP2_TDA_3);
27     // uint32_t status_tda6 = XMC_GPIO_GetInput(PORT_PP2_TDA_6, PIN_PP2_TDA_6);
28     // if ((!status_tda3) && (status_tda6)) {
29     //     COM_send_string("INTERRUPT3\r\n");
30     //     query_interruptTDA3_flag = 1;
31     // }
32     // if ((status_tda6 == 0) && (status_tda3 != 0)) {
33     //     COM_send_string("INTERRUPT6\r\n");

```

```
34 //      query_interruptTDA6_flag = 1;
35 //  }
36 //  if ((status_tda6 == 0) && (status_tda3 == 0)) {
37 //      COM_send_string("INTERRUPT 3&6 \r\n");
38 //      query_interruptTDA3_flag = 1;
39 //      query_interruptTDA6_flag = 1;
40 //  }
41      query_interruptTDA3_flag = 1;
42      query_interruptTDA6_flag = 1; //beide setzen egal welcher ankommt -> es werden
        beide ausgelesen
43 //  led_on(LED7);
44 }
45 // ISR für TDA4 (ERU1 OGU1 IRQ)
46 extern void ERU1_1_IRQHandler(void) {
47     query_interruptTDA4_flag = 1;
48     //  COM_send_string("INTERRUPT4\r\n");
49 }
50 // ISR für TDA5 (ERU0 OGU2 IRQ)
51 extern void ERU0_2_IRQHandler(void) {
52     //  COM_send_string("INTERRUPT5\r\n");
53     query_interruptTDA5_flag = 1;
54 }
55 // ISR für TDA6 (ERU0 OGU3 IRQ)
56 extern void ERU0_3_IRQHandler(void) {
57     led_on(LED5);
58     query_interruptTDA6_flag = 1;
59 }
```

6.6 Feldtest

6.6.1 Feldtest 1

Quellcode 6.3: Ausgabe des ersten Feldtests in der Konsole

```
1 Press any Key to Start COM-Transfer
2 Initialisierung beendet - Warte auf Übertragungen
3 ##### Übertragung erkannt #####
4 Übertragung Nummer 1

6 TDA1:
7 PMF:0
8 PRX:0
9 RX:0
10 PPL:0
11 AGC:0
12 Empfangsleistung (dBm):-114
13 Empfangene Daten:1

15 TDA2:
16 PMF:203
17 PRX:0
18 RX:196
19 PPL:0
20 AGC:2
21 Empfangsleistung (dBm):-110
22 Empfangene Daten:1

24 TDA3:
25 PMF:0
26 PRX:0
27 RX:0
28 PPL:0
29 AGC:0
30 Empfangsleistung (dBm):-114
31 Empfangene Daten:1

33 TDA4:
34 PMF:191
35 PRX:0
36 RX:186
37 PPL:0
38 AGC:2
39 Empfangsleistung (dBm):-110
40 Empfangene Daten:1

42 TDA5:
43 PMF:133
44 PRX:137
45 RX:126
46 PPL:135
47 AGC:0
48 Empfangsleistung (dBm):-67
49 Empfangene Daten:123456789

51 TDA6:
52 PMF:151
53 PRX:163
54 RX:145
55 PPL:152
56 AGC:1
57 Empfangsleistung (dBm):-59
58 Empfangene Daten:123456789

60 ##### Übertragung erkannt #####
```



```
61 Übertragung Nummer 2

63 TDA1:
64 PMF:0
65 PRX:0
66 RX:0
67 PPL:0
68 AGC:0
69 Empfangsleistung (dBm):-114
70 Empfangene Daten:1

72 TDA2:
73 PMF:203
74 PRX:210
75 RX:196
76 PPL:205
77 AGC:2
78 Empfangsleistung (dBm):-39
79 Empfangene Daten:123456789

81 TDA3:
82 PMF:0
83 PRX:0
84 RX:0
85 PPL:0
86 AGC:0
87 Empfangsleistung (dBm):-114
88 Empfangene Daten:123456789

90 TDA4:
91 PMF:191
92 PRX:201
93 RX:186
94 PPL:192
95 AGC:2
96 Empfangsleistung (dBm):-44
97 Empfangene Daten:123456789

99 TDA5:
100 PMF:133
101 PRX:137
102 RX:126
103 PPL:135
104 AGC:0
105 Empfangsleistung (dBm):-67
106 Empfangene Daten:123456789

108 TDA6:
109 PMF:151
110 PRX:163
111 RX:145
112 PPL:152
113 AGC:1
114 Empfangsleistung (dBm):-59
115 Empfangene Daten:123456789

117 ##### Übertragung erkannt #####
118 Übertragung Nummer 3

120 TDA1:
121 PMF:0
122 PRX:0
123 RX:0
124 PPL:0
125 AGC:0
126 Empfangsleistung (dBm):-114
127 Empfangene Daten:1

129 TDA2:
```

```
130 PMF:21
131 PRX:209
132 RX:16
133 PPL:204
134 AGC:0
135 Empfangsleistung (dBm):-43
136 Empfangene Daten:123456789

138 TDA3:
139 PMF:0
140 PRX:0
141 RX:0
142 PPL:0
143 AGC:0
144 Empfangsleistung (dBm):-114
145 Empfangene Daten:123456789

147 TDA4:
148 PMF:191
149 PRX:201
150 RX:186
151 PPL:192
152 AGC:2
153 Empfangsleistung (dBm):-44
154 Empfangene Daten:123456789

156 TDA5:
157 PMF:0
158 PRX:136
159 RX:0
160 PPL:134
161 AGC:0
162 Empfangsleistung (dBm):-67
163 Empfangene Daten:123456789

165 TDA6:
166 PMF:0
167 PRX:164
168 RX:0
169 PPL:152
170 AGC:0
171 Empfangsleistung (dBm):-61
172 Empfangene Daten:123456789

174 ##### Übertragung erkannt #####
175 Übertragung Nummer 4

177 TDA1:
178 PMF:0
179 PRX:50
180 RX:0
181 PPL:0
182 AGC:0
183 Empfangsleistung (dBm):-114
184 Empfangene Daten:123456789

186 TDA2:
187 PMF:208
188 PRX:211
189 RX:77
190 PPL:210
191 AGC:2
192 Empfangsleistung (dBm):-37
193 Empfangene Daten:123456789

195 TDA3:
196 PMF:0
197 PRX:0
198 RX:0
```

```
199 PPL:0
200 AGC:0
201 Empfangsleistung (dBm):-114
202 Empfangene Daten:123456789

204 TDA4:
205 PMF:216
206 PRX:217
207 RX:209
208 PPL:217
209 AGC:2
210 Empfangsleistung (dBm):-35
211 Empfangene Daten:123456789

213 TDA5:
214 PMF:177
215 PRX:179
216 RX:178
217 PPL:179
218 AGC:1
219 Empfangsleistung (dBm):-50
220 Empfangene Daten:123456789

222 TDA6:
223 PMF:158
224 PRX:159
225 RX:152
226 PPL:159
227 AGC:0
228 Empfangsleistung (dBm):-58
229 Empfangene Daten:123456789

231 ##### Übertragung erkannt #####
232 Übertragung Nummer 5

234 TDA1:
235 PMF:0
236 PRX:50
237 RX:0
238 PPL:0
239 AGC:0
240 Empfangsleistung (dBm):-114
241 Empfangene Daten:123456789

243 TDA2:
244 PMF:204
245 PRX:210
246 RX:198
247 PPL:206
248 AGC:2
249 Empfangsleistung (dBm):-39
250 Empfangene Daten:123456789

252 TDA3:
253 PMF:0
254 PRX:0
255 RX:0
256 PPL:0
257 AGC:0
258 Empfangsleistung (dBm):-114
259 Empfangene Daten:123456789

261 TDA4:
262 PMF:210
263 PRX:213
264 RX:77
265 PPL:211
266 AGC:2
267 Empfangsleistung (dBm):-37
```

```
268 Empfangene Daten:123456789

270 TDA5:
271 PMF:189
272 PRX:189
273 RX:182
274 PPL:189
275 AGC:1
276 Empfangsleistung (dBm):-46
277 Empfangene Daten:123456789

279 TDA6:
280 PMF:151
281 PRX:165
282 RX:152
283 PPL:153
284 AGC:1
285 Empfangsleistung (dBm):-59
286 Empfangene Daten:123456789

288 ##### Übertragung erkannt #####
289 Übertragung Nummer 6

291 TDA1:
292 PMF:0
293 PRX:0
294 RX:0
295 PPL:0
296 AGC:0
297 Empfangsleistung (dBm):-114
298 Empfangene Daten:123456789

300 TDA2:
301 PMF:204
302 PRX:210
303 RX:198
304 PPL:206
305 AGC:2
306 Empfangsleistung (dBm):-39
307 Empfangene Daten:123456789

309 TDA3:
310 PMF:0
311 PRX:0
312 RX:0
313 PPL:0
314 AGC:0
315 Empfangsleistung (dBm):-114
316 Empfangene Daten:123456789

318 TDA4:
319 PMF:210
320 PRX:213
321 RX:77
322 PPL:211
323 AGC:2
324 Empfangsleistung (dBm):-37
325 Empfangene Daten:123456789

327 TDA5:
328 PMF:189
329 PRX:189
330 RX:182
331 PPL:189
332 AGC:1
333 Empfangsleistung (dBm):-46
334 Empfangene Daten:123456789

336 TDA6:
```

```
337 PMF:151
338 PRX:165
339 RX:152
340 PPL:153
341 AGC:1
342 Empfangsleistung (dBm):-59
343 Empfangene Daten:123456789

345 ##### Übertragung erkannt #####
346 Übertragung Nummer 7

348 TDA1:
349 PMF:0
350 PRX:0
351 RX:0
352 PPL:0
353 AGC:0
354 Empfangsleistung (dBm):-114
355 Empfangene Daten:123456789

357 TDA2:
358 PMF:178
359 PRX:179
360 RX:171
361 PPL:179
362 AGC:1
363 Empfangsleistung (dBm):-50
364 Empfangene Daten:123456789

366 TDA3:
367 PMF:0
368 PRX:0
369 RX:0
370 PPL:0
371 AGC:0
372 Empfangsleistung (dBm):-114
373 Empfangene Daten:123456789

375 TDA4:
376 PMF:221
377 PRX:222
378 RX:215
379 PPL:222
380 AGC:2
381 Empfangsleistung (dBm):-33
382 Empfangene Daten:123456789

384 TDA5:
385 PMF:191
386 PRX:200
387 RX:185
388 PPL:192
389 AGC:2
390 Empfangsleistung (dBm):-44
391 Empfangene Daten:123456789

393 TDA6:
394 PMF:153
395 PRX:165
396 RX:153
397 PPL:155
398 AGC:1
399 Empfangsleistung (dBm):-58
400 Empfangene Daten:123456789

402 ##### Übertragung erkannt #####
403 Übertragung Nummer 8

405 TDA1:
```

```
406 PMF:0
407 PRX:0
408 RX:0
409 PPL:0
410 AGC:0
411 Empfangsleistung (dBm):-114
412 Empfangene Daten:123456789

414 TDA2:
415 PMF:203
416 PRX:179
417 RX:196
418 PPL:179
419 AGC:2
420 Empfangsleistung (dBm):-48
421 Empfangene Daten:123456789

423 TDA3:
424 PMF:0
425 PRX:0
426 RX:0
427 PPL:0
428 AGC:0
429 Empfangsleistung (dBm):-114
430 Empfangene Daten:123456789

432 TDA4:
433 PMF:224
434 PRX:222
435 RX:219
436 PPL:222
437 AGC:2
438 Empfangsleistung (dBm):-33
439 Empfangene Daten:123456789

441 TDA5:
442 PMF:194
443 PRX:203
444 RX:188
445 PPL:194
446 AGC:2
447 Empfangsleistung (dBm):-43
448 Empfangene Daten:123456789

450 TDA6:
451 PMF:160
452 PRX:171
453 RX:161
454 PPL:162
455 AGC:1
456 Empfangsleistung (dBm):-56
457 Empfangene Daten:123456789

459 ##### Übertragung erkannt #####
460 Übertragung Nummer 9

462 TDA1:
463 PMF:0
464 PRX:0
465 RX:0
466 PPL:0
467 AGC:0
468 Empfangsleistung (dBm):-114
469 Empfangene Daten:123456789

471 TDA2:
472 PMF:203
473 PRX:210
474 RX:196
```

```
475 PPL:204
476 AGC:2
477 Empfangsleistung (dBm):-39
478 Empfangene Daten:123456789

480 TDA3:
481 PMF:0
482 PRX:0
483 RX:0
484 PPL:0
485 AGC:0
486 Empfangsleistung (dBm):-114
487 Empfangene Daten:123456789

489 TDA4:
490 PMF:224
491 PRX:225
492 RX:219
493 PPL:225
494 AGC:2
495 Empfangsleistung (dBm):-32
496 Empfangene Daten:123456789

498 TDA5:
499 PMF:194
500 PRX:203
501 RX:188
502 PPL:194
503 AGC:2
504 Empfangsleistung (dBm):-43
505 Empfangene Daten:123456789

507 TDA6:
508 PMF:160
509 PRX:171
510 RX:161
511 PPL:162
512 AGC:1
513 Empfangsleistung (dBm):-56
514 Empfangene Daten:123456789

516 ##### Übertragung erkannt #####
517 Übertragung Nummer 10

519 TDA1:
520 PMF:0
521 PRX:0
522 RX:0
523 PPL:0
524 AGC:0
525 Empfangsleistung (dBm):-114
526 Empfangene Daten:123456789

528 TDA2:
529 PMF:208
530 PRX:211
531 RX:201
532 PPL:209
533 AGC:2
534 Empfangsleistung (dBm):-38
535 Empfangene Daten:123456789

537 TDA3:
538 PMF:0
539 PRX:0
540 RX:0
541 PPL:0
542 AGC:0
543 Empfangsleistung (dBm):-114
```

```
544 Empfangene Daten:123456789

546 TDA4:
547 PMF:220
548 PRX:221
549 RX:214
550 PPL:221
551 AGC:2
552 Empfangsleistung (dBm):-34
553 Empfangene Daten:123456789

555 TDA5:
556 PMF:189
557 PRX:198
558 RX:188
559 PPL:190
560 AGC:2
561 Empfangsleistung (dBm):-44
562 Empfangene Daten:123456789

564 TDA6:
565 PMF:164
566 PRX:172
567 RX:157
568 PPL:165
569 AGC:1
570 Empfangsleistung (dBm):-55
571 Empfangene Daten:123456789

573 ##### Übertragung erkannt #####
574 Übertragung Nummer 11

576 TDA1:
577 PMF:0
578 PRX:16
579 RX:0
580 PPL:0
581 AGC:0
582 Empfangsleistung (dBm):-114
583 Empfangene Daten:123456789

585 TDA2:
586 PMF:222
587 PRX:223
588 RX:222
589 PPL:223
590 AGC:2
591 Empfangsleistung (dBm):-33
592 Empfangene Daten:123456789

594 TDA3:
595 PMF:0
596 PRX:0
597 RX:0
598 PPL:0
599 AGC:0
600 Empfangsleistung (dBm):-114
601 Empfangene Daten:123456789

603 TDA4:
604 PMF:214
605 PRX:216
606 RX:207
607 PPL:215
608 AGC:2
609 Empfangsleistung (dBm):-36
610 Empfangene Daten:123456789

612 TDA5:
```



```
613 PMF:193
614 PRX:202
615 RX:194
616 PPL:194
617 AGC:2
618 Empfangsleistung (dBm):-43
619 Empfangene Daten:123456789

621 TDA6:
622 PMF:164
623 PRX:172
624 RX:157
625 PPL:165
626 AGC:1
627 Empfangsleistung (dBm):-55
628 Empfangene Daten:123456789

630 ##### Übertragung erkannt #####
631 Übertragung Nummer 12

633 TDA1:
634 PMF:14
635 PRX:17
636 RX:15
637 PPL:17
638 AGC:0
639 Empfangsleistung (dBm):-108
640 Empfangene Daten:123456789

642 TDA2:
643 PMF:224
644 PRX:225
645 RX:220
646 PPL:225
647 AGC:2
648 Empfangsleistung (dBm):-32
649 Empfangene Daten:123456789

651 TDA3:
652 PMF:0
653 PRX:0
654 RX:0
655 PPL:0
656 AGC:0
657 Empfangsleistung (dBm):-114
658 Empfangene Daten:123456789

660 TDA4:
661 PMF:225
662 PRX:226
663 RX:221
664 PPL:226
665 AGC:2
666 Empfangsleistung (dBm):-32
667 Empfangene Daten:123456789

669 TDA5:
670 PMF:189
671 PRX:197
672 RX:189
673 PPL:190
674 AGC:2
675 Empfangsleistung (dBm):-44
676 Empfangene Daten:123456789

678 TDA6:
679 PMF:177
680 PRX:178
681 RX:38
```

```
682 PPL:178
683 AGC:1
684 Empfangsleistung (dBm):-50
685 Empfangene Daten:123456789

687 ##### Übertragung erkannt #####
688 Übertragung Nummer 13

690 TDA1:
691 PMF:27
692 PRX:29
693 RX:0
694 PPL:29
695 AGC:0
696 Empfangsleistung (dBm):-104
697 Empfangene Daten:123456789

699 TDA2:
700 PMF:225
701 PRX:226
702 RX:221
703 PPL:226
704 AGC:2
705 Empfangsleistung (dBm):-32
706 Empfangene Daten:123456789

708 TDA3:
709 PMF:11
710 PRX:13
711 RX:9
712 PPL:13
713 AGC:0
714 Empfangsleistung (dBm):-109
715 Empfangene Daten:123456789

717 TDA4:
718 PMF:212
719 PRX:214
720 RX:207
721 PPL:214
722 AGC:2
723 Empfangsleistung (dBm):-36
724 Empfangene Daten:123456789

726 TDA5:
727 PMF:191
728 PRX:200
729 RX:186
730 PPL:192
731 AGC:2
732 Empfangsleistung (dBm):-44
733 Empfangene Daten:123456789

735 TDA6:
736 PMF:184
737 PRX:185
738 RX:177
739 PPL:185
740 AGC:1
741 Empfangsleistung (dBm):-48
742 Empfangene Daten:123456789

744 ##### Übertragung erkannt #####
745 Übertragung Nummer 14

747 TDA1:
748 PMF:48
749 PRX:29
750 RX:48
```

```
751 PPL:29
752 AGC:0
753 Empfangsleistung (dBm):-104
754 Empfangene Daten:123456789

756 TDA2:
757 PMF:225
758 PRX:226
759 RX:221
760 PPL:226
761 AGC:2
762 Empfangsleistung (dBm):-32
763 Empfangene Daten:123456789

765 TDA3:
766 PMF:21
767 PRX:23
768 RX:19
769 PPL:23
770 AGC:0
771 Empfangsleistung (dBm):-106
772 Empfangene Daten:123456789

774 TDA4:
775 PMF:227
776 PRX:228
777 RX:223
778 PPL:228
779 AGC:2
780 Empfangsleistung (dBm):-31
781 Empfangene Daten:123456789

783 TDA5:
784 PMF:223
785 PRX:224
786 RX:223
787 PPL:224
788 AGC:2
789 Empfangsleistung (dBm):-33
790 Empfangene Daten:123456789

792 TDA6:
793 PMF:192
794 PRX:202
795 RX:77
796 PPL:194
797 AGC:2
798 Empfangsleistung (dBm):-43
799 Empfangene Daten:123456789

801 ##### Übertragung erkannt #####
802 Übertragung Nummer 15

804 TDA1:
805 PMF:48
806 PRX:51
807 RX:48
808 PPL:49
809 AGC:0
810 Empfangsleistung (dBm):-97
811 Empfangene Daten:123456789

813 TDA2:
814 PMF:225
815 PRX:226
816 RX:221
817 PPL:226
818 AGC:2
819 Empfangsleistung (dBm):-32
```

```
820 Empfangene Daten:123456789

822 TDA3:
823 PMF:21
824 PRX:23
825 RX:19
826 PPL:23
827 AGC:0
828 Empfangsleistung (dBm):-106
829 Empfangene Daten:123456789

831 TDA4:
832 PMF:227
833 PRX:228
834 RX:223
835 PPL:228
836 AGC:2
837 Empfangsleistung (dBm):-31
838 Empfangene Daten:123456789

840 TDA5:
841 PMF:223
842 PRX:224
843 RX:223
844 PPL:224
845 AGC:2
846 Empfangsleistung (dBm):-33
847 Empfangene Daten:123456789

849 TDA6:
850 PMF:192
851 PRX:202
852 RX:77
853 PPL:194
854 AGC:2
855 Empfangsleistung (dBm):-43
856 Empfangene Daten:123456789
```

6.6.2 Feldtest 2

Quellcode 6.4: Ausgabe des zweiten Feldtests in der Konsole

```
1 Press any Key to Start COM-Transfer
2 Initialisierung beendet - Warte auf Übertragungen
3 ##### Übertragung erkannt #####
4 Übertragung Nummer 1

6 TDA1:
7 PMF:0
8 PRX:0
9 RX:0
10 PPL:0
11 AGC:0
12 Empfangsleistung (dBm):-114
13 Empfangene Daten:1

15 TDA2:
16 PMF:194
17 PRX:205
18 RX:194
19 PPL:195
20 AGC:2
21 Empfangsleistung (dBm):-43
22 Empfangene Daten:123456789

24 TDA3:
25 PMF:0
26 PRX:30
```

```
27 RX:0
28 PPL:0
29 AGC:0
30 Empfangsleistung (dBm):-114
31 Empfangene Daten:123456709

33 TDA4:
34 PMF:186
35 PRX:187
36 RX:186
37 PPL:187
38 AGC:1
39 Empfangsleistung (dBm):-47
40 Empfangene Daten:123456789

42 TDA5:
43 PMF:140
44 PRX:142
45 RX:133
46 PPL:142
47 AGC:0
48 Empfangsleistung (dBm):-64
49 Empfangene Daten:123456789

51 TDA6:
52 PMF:158
53 PRX:169
54 RX:151
55 PPL:159
56 AGC:1
57 Empfangsleistung (dBm):-57
58 Empfangene Daten:123456789

60 ##### Übertragung erkannt #####
61 Übertragung Nummer 2

63 TDA1:
64 PMF:0
65 PRX:50
66 RX:0
67 PPL:0
68 AGC:0
69 Empfangsleistung (dBm):-114
70 Empfangene Daten:123456789

72 TDA2:
73 PMF:194
74 PRX:205
75 RX:194
76 PPL:195
77 AGC:2
78 Empfangsleistung (dBm):-43
79 Empfangene Daten:123456789

81 TDA3:
82 PMF:0
83 PRX:30
84 RX:0
85 PPL:0
86 AGC:0
87 Empfangsleistung (dBm):-114
88 Empfangene Daten:123456709

90 TDA4:
91 PMF:186
92 PRX:187
93 RX:186
94 PPL:187
95 AGC:1
```

```
96  Empfangsleistung (dBm):-47
97  Empfangene Daten:123456789

99  TDA5:
100 PMF:140
101 PRX:142
102 RX:133
103 PPL:142
104 AGC:0
105 Empfangsleistung (dBm):-64
106 Empfangene Daten:123456789

108 TDA6:
109 PMF:158
110 PRX:169
111 RX:151
112 PPL:159
113 AGC:1
114 Empfangsleistung (dBm):-57
115 Empfangene Daten:123456789

117 ##### Übertragung erkannt #####
118 Übertragung Nummer 3

120 TDA1:
121 PMF:0
122 PRX:0
123 RX:0
124 PPL:0
125 AGC:0
126 Empfangsleistung (dBm):-114
127 Empfangene Daten:123456789

129 TDA2:
130 PMF:206
131 PRX:211
132 RX:199
133 PPL:207
134 AGC:2
135 Empfangsleistung (dBm):-38
136 Empfangene Daten:123456789

138 TDA3:
139 PMF:0
140 PRX:0
141 RX:0
142 PPL:0
143 AGC:0
144 Empfangsleistung (dBm):-114
145 Empfangene Daten:123456789

147 TDA4:
148 PMF:184
149 PRX:193
150 RX:77
151 PPL:185
152 AGC:1
153 Empfangsleistung (dBm):-48
154 Empfangene Daten:123456789

156 TDA5:
157 PMF:154
158 PRX:166
159 RX:148
160 PPL:155
161 AGC:1
162 Empfangsleistung (dBm):-58
163 Empfangene Daten:123456789
```

```
165 TDA6:
166 PMF:145
167 PRX:149
168 RX:146
169 PPL:147
170 AGC:0
171 Empfangsleistung (dBm):-62
172 Empfangene Daten:123456789

174 ##### Übertragung erkannt #####
175 Übertragung Nummer 4

177 TDA1:
178 PMF:0
179 PRX:0
180 RX:0
181 PPL:0
182 AGC:0
183 Empfangsleistung (dBm):-114
184 Empfangene Daten:123456789

186 TDA2:
187 PMF:193
188 PRX:203
189 RX:187
190 PPL:194
191 AGC:2
192 Empfangsleistung (dBm):-43
193 Empfangene Daten:123456789

195 TDA3:
196 PMF:0
197 PRX:0
198 RX:0
199 PPL:0
200 AGC:0
201 Empfangsleistung (dBm):-114
202 Empfangene Daten:123456789

204 TDA4:
205 PMF:215
206 PRX:216
207 RX:208
208 PPL:216
209 AGC:2
210 Empfangsleistung (dBm):-35
211 Empfangene Daten:123456789

213 TDA5:
214 PMF:185
215 PRX:186
216 RX:182
217 PPL:186
218 AGC:1
219 Empfangsleistung (dBm):-47
220 Empfangene Daten:123456789

222 TDA6:
223 PMF:155
224 PRX:156
225 RX:149
226 PPL:156
227 AGC:0
228 Empfangsleistung (dBm):-59
229 Empfangene Daten:123456789

231 ##### Übertragung erkannt #####
232 Übertragung Nummer 5
```

```
234 TDA1:
235 PMF:0
236 PRX:0
237 RX:0
238 PPL:0
239 AGC:0
240 Empfangsleistung (dBm):-114
241 Empfangene Daten:123456789

243 TDA2:
244 PMF:197
245 PRX:207
246 RX:191
247 PPL:198
248 AGC:2
249 Empfangsleistung (dBm):-42
250 Empfangene Daten:123456789

252 TDA3:
253 PMF:0
254 PRX:0
255 RX:0
256 PPL:0
257 AGC:0
258 Empfangsleistung (dBm):-114
259 Empfangene Daten:123456789

261 TDA4:
262 PMF:179
263 PRX:181
264 RX:42
265 PPL:181
266 AGC:1
267 Empfangsleistung (dBm):-49
268 Empfangene Daten:123456789

270 TDA5:
271 PMF:175
272 PRX:176
273 RX:168
274 PPL:176
275 AGC:1
276 Empfangsleistung (dBm):-51
277 Empfangene Daten:123456789

279 TDA6:
280 PMF:144
281 PRX:148
282 RX:144
283 PPL:145
284 AGC:0
285 Empfangsleistung (dBm):-63
286 Empfangene Daten:123456789

288 ##### Übertragung erkannt #####
289 Übertragung Nummer 6

291 TDA1:
292 PMF:0
293 PRX:0
294 RX:0
295 PPL:0
296 AGC:0
297 Empfangsleistung (dBm):-114
298 Empfangene Daten:123456789

300 TDA2:
301 PMF:195
302 PRX:205
```



```
303 RX:189
304 PPL:196
305 AGC:2
306 Empfangsleistung (dBm):-42
307 Empfangene Daten:123456789

309 TDA3:
310 PMF:0
311 PRX:0
312 RX:0
313 PPL:0
314 AGC:0
315 Empfangsleistung (dBm):-114
316 Empfangene Daten:123456789

318 TDA4:
319 PMF:192
320 PRX:201
321 RX:185
322 PPL:192
323 AGC:2
324 Empfangsleistung (dBm):-44
325 Empfangene Daten:123456789

327 TDA5:
328 PMF:171
329 PRX:175
330 RX:172
331 PPL:173
332 AGC:1
333 Empfangsleistung (dBm):-52
334 Empfangene Daten:123456789

336 TDA6:
337 PMF:144
338 PRX:148
339 RX:144
340 PPL:145
341 AGC:0
342 Empfangsleistung (dBm):-63
343 Empfangene Daten:123456789

345 ##### Übertragung erkannt #####
346 Übertragung Nummer 7

348 TDA1:
349 PMF:0
350 PRX:0
351 RX:0
352 PPL:0
353 AGC:0
354 Empfangsleistung (dBm):-114
355 Empfangene Daten:123456789

357 TDA2:
358 PMF:182
359 PRX:205
360 RX:176
361 PPL:196
362 AGC:1
363 Empfangsleistung (dBm):-44
364 Empfangene Daten:123456789

366 TDA3:
367 PMF:0
368 PRX:0
369 RX:0
370 PPL:0
371 AGC:0
```

```
372 Empfangsleistung (dBm):-114
373 Empfangene Daten:123456789

375 TDA4:
376 PMF:181
377 PRX:201
378 RX:174
379 PPL:192
380 AGC:1
381 Empfangsleistung (dBm):-45
382 Empfangene Daten:123456789

384 TDA5:
385 PMF:147
386 PRX:150
387 RX:146
388 PPL:148
389 AGC:0
390 Empfangsleistung (dBm):-62
391 Empfangene Daten:123456789

393 TDA6:
394 PMF:144
395 PRX:148
396 RX:144
397 PPL:145
398 AGC:0
399 Empfangsleistung (dBm):-63
400 Empfangene Daten:123456789

402 ##### Übertragung erkannt #####
403 Übertragung Nummer 8

405 TDA1:
406 PMF:0
407 PRX:0
408 RX:0
409 PPL:0
410 AGC:0
411 Empfangsleistung (dBm):-114
412 Empfangene Daten:123456789

414 TDA2:
415 PMF:182
416 PRX:184
417 RX:176
418 PPL:183
419 AGC:1
420 Empfangsleistung (dBm):-48
421 Empfangene Daten:123456789

423 TDA3:
424 PMF:0
425 PRX:0
426 RX:0
427 PPL:0
428 AGC:0
429 Empfangsleistung (dBm):-114
430 Empfangene Daten:123456789

432 TDA4:
433 PMF:181
434 PRX:182
435 RX:174
436 PPL:182
437 AGC:1
438 Empfangsleistung (dBm):-49
439 Empfangene Daten:123456789
```

```
441 TDA5:
442 PMF:147
443 PRX:150
444 RX:146
445 PPL:148
446 AGC:0
447 Empfangsleistung (dBm):-62
448 Empfangene Daten:123456789

450 TDA6:
451 PMF:144
452 PRX:148
453 RX:144
454 PPL:145
455 AGC:0
456 Empfangsleistung (dBm):-63
457 Empfangene Daten:123456789

459 ##### Übertragung erkannt #####
460 Übertragung Nummer 9

462 TDA1:
463 PMF:0
464 PRX:0
465 RX:0
466 PPL:0
467 AGC:0
468 Empfangsleistung (dBm):-114
469 Empfangene Daten:123456789

471 TDA2:
472 PMF:184
473 PRX:184
474 RX:178
475 PPL:183
476 AGC:2
477 Empfangsleistung (dBm):-47
478 Empfangene Daten:123456789

480 TDA3:
481 PMF:0
482 PRX:0
483 RX:0
484 PPL:0
485 AGC:0
486 Empfangsleistung (dBm):-114
487 Empfangene Daten:123456789

489 TDA4:
490 PMF:191
491 PRX:182
492 RX:185
493 PPL:182
494 AGC:1
495 Empfangsleistung (dBm):-49
496 Empfangene Daten:123456789

498 TDA5:
499 PMF:168
500 PRX:172
501 RX:167
502 PPL:170
503 AGC:1
504 Empfangsleistung (dBm):-53
505 Empfangene Daten:123456789

507 TDA6:
508 PMF:144
509 PRX:148
```

```
510 RX:144
511 PPL:145
512 AGC:0
513 Empfangsleistung (dBm):-63
514 Empfangene Daten:123456789

516 ##### Übertragung erkannt #####
517 Übertragung Nummer 10

519 TDA1:
520 PMF:0
521 PRX:0
522 RX:0
523 PPL:0
524 AGC:0
525 Empfangsleistung (dBm):-114
526 Empfangene Daten:123456789

528 TDA2:
529 PMF:184
530 PRX:194
531 RX:178
532 PPL:185
533 AGC:2
534 Empfangsleistung (dBm):-46
535 Empfangene Daten:123456789

537 TDA3:
538 PMF:0
539 PRX:0
540 RX:0
541 PPL:0
542 AGC:0
543 Empfangsleistung (dBm):-114
544 Empfangene Daten:123456789

546 TDA4:
547 PMF:191
548 PRX:193
549 RX:185
550 PPL:192
551 AGC:1
552 Empfangsleistung (dBm):-45
553 Empfangene Daten:123456789

555 TDA5:
556 PMF:168
557 PRX:172
558 RX:167
559 PPL:170
560 AGC:1
561 Empfangsleistung (dBm):-53
562 Empfangene Daten:123456789

564 TDA6:
565 PMF:144
566 PRX:148
567 RX:144
568 PPL:145
569 AGC:0
570 Empfangsleistung (dBm):-63
571 Empfangene Daten:123456789

573 ##### Übertragung erkannt #####
574 Übertragung Nummer 11

576 TDA1:
577 PMF:0
578 PRX:0
```

```
579 RX:0
580 PPL:0
581 AGC:0
582 Empfangsleistung (dBm):-114
583 Empfangene Daten:123456789

585 TDA2:
586 PMF:190
587 PRX:200
588 RX:190
589 PPL:191
590 AGC:2
591 Empfangsleistung (dBm):-44
592 Empfangene Daten:123456789

594 TDA3:
595 PMF:0
596 PRX:0
597 RX:0
598 PPL:0
599 AGC:0
600 Empfangsleistung (dBm):-114
601 Empfangene Daten:123456789

603 TDA4:
604 PMF:192
605 PRX:201
606 RX:186
607 PPL:193
608 AGC:2
609 Empfangsleistung (dBm):-43
610 Empfangene Daten:123456789

612 TDA5:
613 PMF:161
614 PRX:172
615 RX:155
616 PPL:162
617 AGC:1
618 Empfangsleistung (dBm):-56
619 Empfangene Daten:123456789

621 TDA6:
622 PMF:144
623 PRX:148
624 RX:144
625 PPL:145
626 AGC:0
627 Empfangsleistung (dBm):-63
628 Empfangene Daten:123456789

630 ##### Übertragung erkannt #####
631 Übertragung Nummer 12

633 TDA1:
634 PMF:0
635 PRX:0
636 RX:0
637 PPL:0
638 AGC:0
639 Empfangsleistung (dBm):-114
640 Empfangene Daten:123456789

642 TDA2:
643 PMF:190
644 PRX:200
645 RX:190
646 PPL:191
647 AGC:2
```

```
648 Empfangsleistung (dBm):-44
649 Empfangene Daten:123456789

651 TDA3:
652 PMF:0
653 PRX:0
654 RX:0
655 PPL:0
656 AGC:0
657 Empfangsleistung (dBm):-114
658 Empfangene Daten:123456789

660 TDA4:
661 PMF:192
662 PRX:201
663 RX:186
664 PPL:193
665 AGC:2
666 Empfangsleistung (dBm):-43
667 Empfangene Daten:123456789

669 TDA5:
670 PMF:161
671 PRX:172
672 RX:155
673 PPL:162
674 AGC:1
675 Empfangsleistung (dBm):-56
676 Empfangene Daten:123456789

678 TDA6:
679 PMF:144
680 PRX:148
681 RX:144
682 PPL:145
683 AGC:0
684 Empfangsleistung (dBm):-63
685 Empfangene Daten:123456789

687 ##### Übertragung erkannt #####
688 Übertragung Nummer 13

690 TDA1:
691 PMF:0
692 PRX:0
693 RX:0
694 PPL:0
695 AGC:0
696 Empfangsleistung (dBm):-114
697 Empfangene Daten:123456789

699 TDA2:
700 PMF:188
701 PRX:200
702 RX:182
703 PPL:191
704 AGC:1
705 Empfangsleistung (dBm):-46
706 Empfangene Daten:123456789

708 TDA3:
709 PMF:0
710 PRX:0
711 RX:0
712 PPL:0
713 AGC:0
714 Empfangsleistung (dBm):-114
715 Empfangene Daten:123456789
```

```
717 TDA4:
718 PMF:170
719 PRX:176
720 RX:170
721 PPL:171
722 AGC:1
723 Empfangsleistung (dBm):-53
724 Empfangene Daten:123456789

726 TDA5:
727 PMF:158
728 PRX:160
729 RX:152
730 PPL:160
731 AGC:0
732 Empfangsleistung (dBm):-58
733 Empfangene Daten:123456789

735 TDA6:
736 PMF:118
737 PRX:154
738 RX:112
739 PPL:119
740 AGC:0
741 Empfangsleistung (dBm):-72
742 Empfangene Daten:123456789

744 ##### Übertragung erkannt #####
745 Übertragung Nummer 14

747 TDA1:
748 PMF:0
749 PRX:0
750 RX:0
751 PPL:0
752 AGC:0
753 Empfangsleistung (dBm):-114
754 Empfangene Daten:123456789

756 TDA2:
757 PMF:188
758 PRX:189
759 RX:182
760 PPL:189
761 AGC:1
762 Empfangsleistung (dBm):-46
763 Empfangene Daten:123456789

765 TDA3:
766 PMF:0
767 PRX:16
768 RX:0
769 PPL:0
770 AGC:0
771 Empfangsleistung (dBm):-114
772 Empfangene Daten:123456789

774 TDA4:
775 PMF:170
776 PRX:176
777 RX:170
778 PPL:171
779 AGC:1
780 Empfangsleistung (dBm):-53
781 Empfangene Daten:123456789

783 TDA5:
784 PMF:158
785 PRX:160
```

```
786 RX:152
787 PPL:160
788 AGC:0
789 Empfangsleistung (dBm):-58
790 Empfangene Daten:123456789

792 TDA6:
793 PMF:118
794 PRX:154
795 RX:112
796 PPL:119
797 AGC:0
798 Empfangsleistung (dBm):-72
799 Empfangene Daten:123456789

801 ##### Übertragung erkannt #####
802 Übertragung Nummer 15

804 TDA1:
805 PMF:0
806 PRX:0
807 RX:0
808 PPL:0
809 AGC:0
810 Empfangsleistung (dBm):-114
811 Empfangene Daten:123400009

813 TDA2:
814 PMF:191
815 PRX:189
816 RX:191
817 PPL:189
818 AGC:1
819 Empfangsleistung (dBm):-46
820 Empfangene Daten:123456789

822 TDA3:
823 PMF:0
824 PRX:16
825 RX:0
826 PPL:0
827 AGC:0
828 Empfangsleistung (dBm):-114
829 Empfangene Daten:123456789

831 TDA4:
832 PMF:194
833 PRX:176
834 RX:188
835 PPL:171
836 AGC:2
837 Empfangsleistung (dBm):-51
838 Empfangene Daten:123456789

840 TDA5:
841 PMF:161
842 PRX:160
843 RX:161
844 PPL:160
845 AGC:1
846 Empfangsleistung (dBm):-56
847 Empfangene Daten:123456789

849 TDA6:
850 PMF:118
851 PRX:154
852 RX:112
853 PPL:119
854 AGC:0
```



```
855 Empfangsleistung (dBm):-72
856 Empfangene Daten:123456789

858 ##### Übertragung erkannt #####
859 Übertragung Nummer 16

861 TDA1:
862 PMF:0
863 PRX:0
864 RX:0
865 PPL:0
866 AGC:0
867 Empfangsleistung (dBm):-114
868 Empfangene Daten:123400009

870 TDA2:
871 PMF:191
872 PRX:192
873 RX:191
874 PPL:192
875 AGC:1
876 Empfangsleistung (dBm):-45
877 Empfangene Daten:123456789

879 TDA3:
880 PMF:0
881 PRX:16
882 RX:0
883 PPL:0
884 AGC:0
885 Empfangsleistung (dBm):-114
886 Empfangene Daten:123456789

888 TDA4:
889 PMF:194
890 PRX:204
891 RX:188
892 PPL:195
893 AGC:2
894 Empfangsleistung (dBm):-43
895 Empfangene Daten:123456789

897 TDA5:
898 PMF:161
899 PRX:170
900 RX:161
901 PPL:162
902 AGC:1
903 Empfangsleistung (dBm):-56
904 Empfangene Daten:123456789

906 TDA6:
907 PMF:118
908 PRX:154
909 RX:112
910 PPL:119
911 AGC:0
912 Empfangsleistung (dBm):-72
913 Empfangene Daten:123456789
```

Literatur

- [1] R. Sabolcik, *2,4-GHz- oder Sub-GHz-Funknetze? Schneller ist nicht immer besser*, Oktober 2010 (siehe S. 2).
- [2] *TDA5340 Data Sheet*, Revision 1.2, Infineon Technologies AG, Juni 2012 (siehe S. 8, 14).
- [3] *TDA5340 User Manual*, Revision 1.0, Infineon Technologies AG, Feb. 2012 (siehe S. 8, 9).
- [4] *High-Speed Interface Layout Guidelines*, Application Report SPRAAR7E, Texas Instruments Inc., Juli 2015 (siehe S. 9).
- [5] P. Bauer, P. Schäfer und S. Zizala, *New Infineon 32-bit Microcontroller Family XMC4000 for Industrial Applications Combines Powerful Application-optimized Peripherals and ARM® Cortex™-M4 processor*, Presseerklärung, 2012 (siehe S. 9).
- [6] *XMC4500 Data Sheet*, Revision 1.3, Infineon Technologies AG, März 2014 (siehe S. 10, 14, 18).
- [7] *DAVE™ 3 Example Project Download* (siehe S. 12).
- [8] M. Dausmann, U. Bröckl, D. Schoop und J. Goll, *C als erste Programmiersprache*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011, Bd. 1 (siehe S. 17).
- [9] *DAVE™ v4 - Quick Start*, Infineon Technologies AG, Feb. 2015 (siehe S. 17).
- [10] *DAVE™ (Version 4) - Development Platform for XMC™ Microcontrollers* (siehe S. 17).
- [11] *XMC4500 Reference Manual*, Revision 1.5, Infineon Technologies AG, Juli 2014 (siehe S. 19).
- [12] C. Büch, *SPI - Serial Peripheral Interface*, Physik- Seminar, Universität Koblenz-Landau, 2006 (siehe S. 21).