

Draadloze audio

Een implementatie van hedendaagse technologie

Rens Bloom

Chris Bonsema

Lars Wijtemans

Technische Universiteit Delft



Draadloze audio

Een implementatie van hedendaagse technologie

door

Rens Bloom
Chris Bonsema
Lars Wijtemans

in overeenstemming met de vereisten voor het verkrijgen van de graad van

Bachelor of Science
in Electrical Engineering

aan de Technische Universiteit Delft,
te verdedigen op donderdag 3 juli om 9:00 uur.

Begeleider:	dr. ir. G. J. M. Janssen	
Afstudeercommissie:	dr. prof. A. Neto,	TU Delft
	dr. ir. G. J. M. Janssen,	TU Delft
	dr. J. Hoekstra,	TU Delft

Een elektronische versie van dit verslag is beschikbaar op <http://repository.tudelft.nl/>.

Voorwoord

Voor u ligt het ontwerpverslag van ons bachelor afstudeer project, dat in nauwe samenwerking met Frits Kastelein en Niels Koeman is volbracht. In de afgelopen acht weken hebben we ons vastgebeten in uitdagende problemen, samen doorbraken gevierd, en vooral veel nieuwe ervaring opgedaan. Uiteindelijk heeft dit geleid tot een werkend prototype. Natuurlijk hebben wij dit niet alleen gedaan. Daarom bedanken wij graag de volgende mensen voor hun hulp, zonder welke er waarschijnlijk geen werkend prototype tot stand zou zijn gekomen.

Pascal Aubry, voor het doormeten van de verschillende antenne's en tips over het ontwerp daarvan.

Jeroen Bastemeijer, voor zijn tips over printplaat ontwerp en productie.

Nikolay D. Gaubitch en Jorge Martínez Castañeda, voor het testen van de S/PDIF-aansluiting.

Alexander de Graaf, Xavier van Rijnsoever, en Martin Schumacher, voor het verwerken van onze last minute bestellingen.

Gerard Janssen, voor de begeleiding tijdens het ontwerpproces en tussentijdse feedback.

Ali Kaichouhi, voor zijn onmisbare hulp bij het solderen en afwerken van de printplaat.

Dit verslag beschrijft een deel van het ontwerpproces waarmee we tot het uiteindelijk ontwerp zijn gekomen. Voor een compleet beeld van het volledige project leest u ook het verslag van Frits Kastelein en Niels Koeman.

*Rens Bloom
Chris Bonsema
Lars Wijtemans*

Delft, juni 2014

Begrippenlijst

In deze scriptie is gebruik gemaakt van de volgende termen en afkortingen:

- **ADC** Analooq-digitaalozetter
- **BAP** Bachelor afstudeerproject
- **BTW** Belasting over de toegevoegde waarde
- **DAC** Digitaal-analooqozetter
- **DC** Gelijkspanning
- **EN** Europese norm
- **ETSI** European Telecommunications Standards Institute
- **FEC** Voorwaartse errorcorrectie
- **FIR** Eindige impulsresponctie
- **Hifi** Werkelijkheidswaergave (high fidelity)
- **I²S** Integrated Interchip Sound
- **IC** Geïntegreerd circuit
- **I/O** Input / output
- **IIR** Oneindige impulsresponctie
- **LED** Halfgeleidercomponent dat licht uitzendt (Light Emitting Diode)
- **PCB** Printplaat (printed circuit board)
- **PCM16** Pulse-code modulatie 16-bit
- **PCME24** Pulse-code modulatie 24-bit companded formaat (16-bit)
- **PCMLF** Pulse-code modulatie voor lage frequenties
- **PvE** Programma van eisen
- **RF** Radiofrequent
- **R&TTE** Radio Equipment and Telecommunications Terminal Equipment
- **RMS** Kwadratisch gemiddelde
- **RoHS** Beperking van gevaarlijke stoffen
- **SLAC** Slightly Lossy Audio Compression [1]
- **SMT** Surface Mount Technology
- **SNR** Signaal-ruisverhouding
- **S/PDIF** Sony/Philips Digital Interface Format [2]
- **SVN** Subversion versiebeheersysteem

- **TI** Texas Instruments
- **TOSLINK** Optisch verbindingssysteem ontworpen door Toshiba (Toshiba Link)
- **USB** Universal serial bus [3]
- **USD** Amerikaanse dollar

Inhoudsopgave

1 Samenvatting	1
2 Inleiding	3
3 Programma van eisen	5
3.1 Probleemdefinitie	5
3.2 Eisen vanuit het beoogde gebruik	5
3.3 Eisen vanuit de ecologische situering van het systeem in de omgeving	5
3.4 Gebruikskenmerken	6
3.5 Productie-eisen	6
3.6 Liquidatie-eisen	6
4 Ontwerpproces	7
4.1 Systeemoverzicht	7
4.2 Voeding van modules	8
4.2.1 Keuze voedingscircuit	8
4.2.2 Implementatie voedingscircuit	8
4.3 Zendmodule	9
4.3.1 Keuze zendmodule	9
4.3.2 Implementatie CC85xx	10
4.3.3 Firmware CC85xx	11
4.4 Antenneversterker	12
4.4.1 Keuze antenneversterker	12
4.5 Antenneswitch	12
4.5.1 Beslissing antenneswitch	12
4.5.2 Implementatie AS214-92	13
4.6 Analoog-digitaalomzetter	13
4.6.1 Keuze ADC	13
4.6.2 Implementatie PCM1861	13
4.7 Digitaal-analoogomzetter	14
4.7.1 Keuze DAC	14
4.7.2 Implementatie PCM5100A	14
4.8 S/PDIF-converter	15
4.8.1 Keuze S/PDIF-converter	15
4.8.2 Implementatie DIT4096	16
4.9 Circuit	16
4.10 Materiaalkeuze printplaat	16
4.10.1 Producent	16
4.10.2 Aantal koperlagen en dikte substraat	16
4.10.3 Afwerking koperlaag	17
4.11 Aandachtspunten printontwerp	20
4.11.1 Analoog/Digitaal scheiden	20
4.11.2 Impedantie van een printspoor	20
4.11.3 Het pad van de RF-stroom	21
4.11.4 Aardvlakken	21
4.11.5 Beperking van lusoppervlak	22
4.11.6 Ontkoppeling	22

4.12	Printontwerp zender	23
4.12.1	Afmetingen en plaatsing componenten	23
4.12.2	Opdeling in functieblokken	24
4.12.3	Layout voedingscircuit.	25
4.12.4	Breedte van printsporen.	25
4.12.5	RF-gedeelte	25
4.13	Printontwerp ontvanger	26
4.13.1	Afmetingen en plaatsing componenten	26
4.13.2	Opdeling in functieblokken	27
4.13.3	RF-Gedeelte	27
4.14	Assemblage van de printplaten.	27
4.15	Kosten	29
4.15.1	Kosten Prototype	29
4.15.2	Kosten bij massaproductie	29
5	Resultaten	31
6	Discussie	33
6.1	Bereik	33
6.2	Algemene verbeteringen	33
6.3	Connectoren.	34
6.4	Printontwerp	35
7	Conclusie	37
7.1	Eisen vanuit het beoogde gebruik	37
7.2	Eisen vanuit de ecologische situering van het systeem in de omgeving	37
7.3	Gebruikskennmerken	38
7.4	Productie-eisen	38
7.5	Liquidatie-eisen.	39
8	Reflectie	41
A	Procesverslag	43
A.1	Verdeling werk	43
A.2	Verdeling thesis.	43
	Bibliografie	45

1

Samenvatting

In dit werk wordt het ontwerp en de implementatie beschreven van een systeem dat draadloos de transmissie van audiosignalen realiseert. Het systeem accepteert zowel analoge als digitale audiosignalen aan de ingang en biedt aan de uitgang het audiosignaal zowel als een digitaal als een analog signaal. Het systeem is ontworpen rond een geïntegreerd circuit van Texas Instruments dat draadloze transmissie van een digitaal audiosignaal mogelijk maakt met diverse foutcorrectietechnieken.

De uitdagingen bij het systeemontwerp omvatten onder andere het halen van een kamerbreed afstands bereik tussen de zender en de ontvanger, en het laten werken van het systeem met een beperkt beschikbaar vermogen. Er wordt getoond dat er een systeem afgeleverd wordt dat werkt met het beperkte beschikbare vermogen, maar dat het afstands bereik niet aan de eisen voldoet. Dit vereist doorontwikkeling van het systeem, voordat het in audiosystemen voor eindgebruikers kan worden geïntegreerd.

2

Inleiding

Al jaren is het in huishoudens gebruikelijk om in de woonkamer een versterker met luidsprekerset te hebben staan voor een goede (of acceptabele) geluidskwaliteit bij het kijken van televisie of voor het afspelen van muziek. Voorheen was het gebruikelijk om hiervoor een hifi stereo-systeem te hebben, maar tegenwoordig beschikken steeds meer consumenten over een surround-systeem met vijf (of meer) kleine luidsprekers en een losse subwoofer voor de weergave van de lage tonen. De toename van het aantal luidsprekers zorgt voor een toename in het aantal kabels dat vanuit de versterker naar diverse locaties in de kamer gaat. Dit betekent dat er bij het plaatsen van de surroundset moeite moet worden gedaan om deze kabels netjes weg te werken, of dat lelijke luidsprekerkabels zichtbaar zijn.

Tegenwoordig zijn er diverse audiosystemen beschikbaar zoals JBL [4] en Bose Soundlink [5] die draadloos audiosignalen oversturen en geen last hebben van het kabelprobleem. Dit soort systemen maken zo goed als allemaal gebruik van bluetooth. Bluetooth heeft als voordeel dat er geen bestaande infrastructuur vereist is om een verbinding tot stand te brengen, maar het beperkte bereik is echter een nadeel, evenals een beperking in geluidskwaliteit en het maximaal aantal van twee geluidskanalen [6]. Dit werk gaat in op de mogelijkheid om recent beschikbaar gekomen geïntegreerde circuits te gebruiken om het kabelprobleem op te lossen zonder kwaliteitsverlies en met de mogelijkheid om vier audiokanalen over te sturen. In hoofdstuk 3 worden de doelen van het project en het te ontwerpen systeem beschreven, waarvan het ontwerpproces wordt beschreven in hoofdstuk 4. De behaalde resultaten zijn te vinden in hoofdstuk 5 en in hoofdstuk 6 worden de resultaten besproken. De conclusie op de gestelde doelen is te vinden in hoofdstuk 7.

3

Programma van eisen

3.1. Probleemdefinitie

Het doel van ons bachelor afstudeerproject is om – eventueel met behulp van bestaande geïntegreerde circuits – draadloze audiotransmissie te realiseren. De eindgebruiker kan dan zorgeloos genieten van hifi-geluid, zonder lange kabels vanuit de versterker. Luidsprekers waarin dit systeem geïntegreerd zal worden, zullen van een eigen versterker moeten zijn voorzien, zoals bij een groot deel van de subwoofers al het geval is. Praktisch betekent dit dat, met integratie van ons systeem, een lange draad naar de versterker kan worden vervangen door een korte draad naar een nabijzijnd stopcontact.

3.2. Eisen vanuit het beoogde gebruik

- [2.1] Het systeem werkt als vervanging van een bekabelde audio-verbinding voor muziek- en entertainmentinstallaties.
- [2.2] Het systeem bestaat uit minimaal twee modules: één zender, één of meerdere ontvangers.
- [2.3] Er is geen kabelverbinding tussen de zender en ontvanger nodig voor gebruik.
- [2.4] Het systeem kan ongemoduleerde, analoge elektrische audiosignalen met een RMS-spanning tot 2,1 V alsingangssignaal accepteren.
- [2.5] Het systeem kan ongemoduleerde, analoge elektrische audiosignalen met een RMS-spanning niet hoger dan 2,1 V aanbieden aan een uitgang.
- [2.6] Het systeem kan digitale audio alsingangssignaal accepteren, via een USB-aansluiting.
- [2.7] Het systeem kan een S/PDIF-sigitaal aanbieden via TOSLINK.
- [2.8] Het analoge ingangssignaal wordt aangeboden via twee stereo 3,5 mm audio jacks.
- [2.9] De zender moet in een USB poort gebruikt kunnen worden, zonder omliggende poorten te blokkeren.
- [2.10] Het systeem hoeft niet te worden geconfigureerd voordat het gebruikt kan worden.
- [2.11] Er is geen merkbaar kwaliteitsverlies bij gebruik van het systeem.

3.3. Eisen vanuit de ecologische situering van het systeem in de omgeving

- [3.1] De draadloze transmissie moet plaatsvinden in de internationaal vrije 2,4 GHz band [7].
- [3.2] Het zendvermogen mag niet meer dan 100 mW EIRP zijn.

- [3.3] De modules moeten voldoen aan R&TTE 1999/5/EC, ETSI EN 300 440, ETSI EN 301 489. Het prototype hoeft nog niet aan deze eisen te voldoen.
- [3.4] Alle gebruikte onderdelen moeten voldoen aan de Nederlandse RoHS-richtlijn.

3.4. Gebruikskenmerken

- [4.1] De zender moet minimaal vier audiokanalen ondersteunen.
- [4.2] De ontvanger moet uit het signaal minimaal twee audiokanalen kunnen filteren en ondersteunen.
- [4.3] De digitale ingangs- en uitgangssignalen moeten minimaal een bemonsteringsfrequentie hebben van 48 kHz en 16 bit kwantisatie.
- [4.4] Er kunnen minstens vier ontvangers gebruikt worden in het systeem.
- [4.5] De modules moeten werken op een voedingsspanning van $(5,0 \pm 0,5)$ V.
- [4.6] De voeding gebeurt door middel van een USB-aansluiting, de modules moeten voldoen aan de USB standaard.
- [4.7] Eis 2.9 limiteert de breedte en dikte van de zender. Bovendien moet de zender een handzame lengte hebben om als USB-stick te worden aangesloten op een computer. Zodoende zijn de maximale afmetingen voor de printplaat met componenten erop 19 mm breed, 10 mm dik en 100 mm lang. Het eerste prototype hoeft nog niet aan deze afmetingen te voldoen.
- [4.8] De ontvanger moet ingebouwd kunnen worden in luidsprekers van diverse formaten. De maximale afmetingen voor de printplaat met componenten erop is daarom 7,5 cm breed, 15 cm lang en 2 cm dik.
- [4.9] Het systeem werkt correct als *a)* de SNR, bij aanbieden van een sinusvormig signaal met een frequentie tussen 30 Hz en 20 kHz en maximale amplitude, ten minste 85 dB bedraagt *b)* bij gebruik van de digitale in- en uitgang, het uitgangssignaal identiek is aan hetingangssignaal *c)* er maximaal 1 onderbreking in het audiosignaal van maximaal 1 s is per uur.
- [4.10] Het systeem moet binnenshuis correct werken tot minimaal 15 m, onder voorwaarde dat er zich geen voorwerpen direct tussen de zender en ontvanger bevinden.

3.5. Productie-eisen

- [5.1] Er moeten als prototype minimaal twee ontvangerbordjes en één zenderbordje worden geproduceerd.
- [5.2] De totale kosten voor het prototype (inclusief componenten) mogen niet meer bedragen dan €300 exclusief BTW.
- [5.3] De productiekosten per systeem (één zender, twee ontvangers) mogen niet hoger zijn dan €50 exclusief BTW.
- [5.4] De componenten moeten met behulp van enkel de faciliteiten beschikbaar aan de TU Delft op de printplaat bevestigd kunnen worden.
- [5.5] Het prototype moet vóór 13 juni 2014 geproduceerd zijn.

3.6. Liquidatie-eisen

- [6.1] De componenten moeten door middel van verhitten weer van de printplaat gescheiden kunnen worden.

4

Ontwerpproces

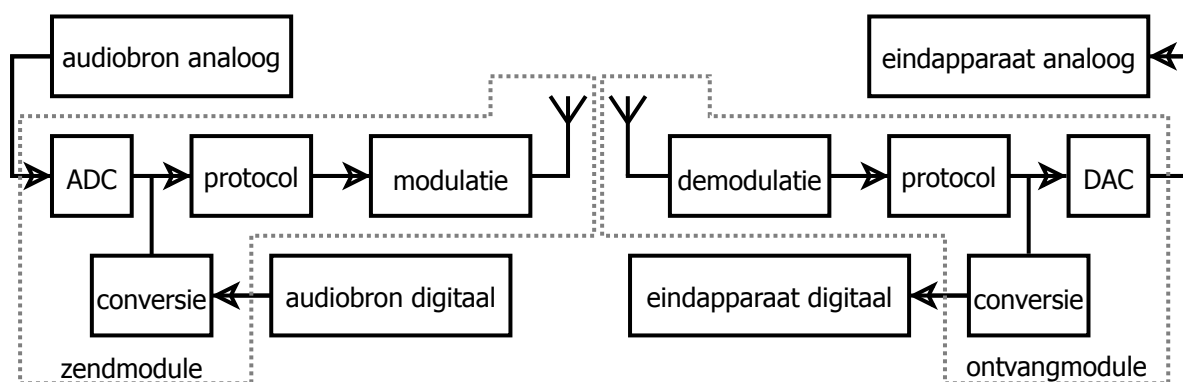
4.1. Systemoverzicht

Het te ontwerpen systeem bestaat uit een zend- en ontvangmodule [PvE 2.2], dat wordt aangesloten op een bestaande audiobron en audiobestemming [PvE 2.1]. Beide modules moeten om kunnen gaan met digitale en analoge audio-data [PvE 2.4 tot 2.7]. Er is gekozen voor digitale communicatie tussen de modules, omdat de implementatie van geavanceerde correctietechnieken (FEC, retransmission [8]) bij digitale communicatie, in vergelijking met analoge communicatie, eenvoudig en goedkoop te implementeren is [9].

Het analoge audiosignaal zal in de zendmodule omgezet moeten worden naar een digitaal formaat door middel van een ADC. Het digitale ingangssignaal wordt ook omgezet naar dit formaat, zodat beide signalen met hetzelfde systeem verder verwerkt kunnen worden. Omgekeerd wordt in de ontvangmodule dit digitale signaal weer omgezet naar een analogo audiosignaal door middel van een DAC [PvE 2.5] en naar S/PDIF door middel van een digitaal-digitaalomzetter [PvE 2.7]. Een voordeel van dit ontwerp is dat de modules eenvoudig van andere in- en uitgangen voorzien kunnen worden, door slechts een klein deel van het totaalsysteem aan te passen.

Verder kan er een apart deel voor het communicatieprotocol en voor een modulatiestap onderscheiden worden, zoals in fig. 4.1 is aangegeven. De fysieke antenne en benodigde aansluiting zal door de andere subgroep van het BAP gespecificeerd en ontworpen worden.

Vanwege de beperkte tijd voor het ontwerpen, de productie, en het uitvoeren van tests, is er besloten om – waar mogelijk – gebruik te maken van commercieel verkrijgbare geïntegreerde circuits. In de modules zijn, zoals in fig. 4.1 te zien is, een aantal hoofdfuncties te onderscheiden: 1) het omzetten van hetingangssignaal naar een bepaald formaat voor intern gebruik 2) het implementeren van een communicatieprotocol tussen zender en ontvanger(s) 3) modulatie van het digitale signaal op de 2,4 GHz band. De keuzes van de geïntegreerde circuits zal in volgende secties toegelicht worden.



Figuur 4.1: Systemoverzicht

4.2. Voeding van modules

4.2.1. Keuze voedingscircuit

De modules moeten hun vermogen uit een USB-poort krijgen [PvE 4.6]. Als een apparaat op een USB-host wordt aangesloten, mag deze volgens de USB-specificatie maximaal 100 mA (USB 2.0) of 150 mA (USB 3.0) gebruiken [3]. Meer stroom mag alleen gebruikt worden nadat dit door middel van het USB-protocol is aangevraagd en door de USB-host is goedgekeurd. Onze modules zijn dus gelimiteerd tot 100 mA, tenzij een grotere stroom wordt aangevraagd en goedgekeurd door middel van het USB-protocol.

Voor het implementeren van het USB-protocol om een grotere stroom aan te vragen, zal een IC nodig zijn. Omdat dit extra ruimte, tijd, en geld kost om te implementeren en het ons realistisch lijkt de benodigde stroom voor de zender/ontvanger onder de 100 mA te houden, zullen we ons ontwerp limiteren tot een stroomgebruik van 100 mA. Gegeven een busspanning van 5 V, is er dan een vermogen beschikbaar van 500 mW.

De voedingsspanning van de gebruikte IC's (zie volgende secties) moet tussen 3,0 V en 3,6 V liggen. De 5 V die door de USB-poort wordt geleverd zal dus verlaagd moeten worden. Hiervoor kan gekozen worden tussen een lineaire en een schakelende regulator. Een schakelende regulator zal meer elektromagnetische emissies hebben dan een lineaire regulator. Daarentegen zal een lineaire regulator bij onze toepassing over het algemeen een lagere efficiëntie hebben. Het verlies bij een schakelende regulator zal bestaan uit een vast vermogen voor de elektronica, en een vermogensafhankelijk verlies door interne weerstand. Bij een lineaire regulator zal de benodigde spanningsval door een regelbare weerstand gerealiseerd worden, waarbij $P_{\text{verlies}} = V_{\text{spanningsval}} \cdot I_{\text{voeding}} \approx 0,2 \text{ W}$; ongeveer 40% van het beschikbare vermogen. Door dit verlies bij lineaire regulators, blijft er waarschijnlijk te weinig vermogen over om de modules te voeden. Er is daarom gekozen voor een schakelende regulator.

De voorkeur ging uit naar een IC van TI, zodat deze samen – eventueel gratis – met de andere IC's besteld kan worden. De eisen aan de regulator zijn als volgt: accepteert iedere ingangsspanning tussen 4,5 V en 5,5 V, heeft een uitgangsspanning van 3,3 V, uitgangsstroom van minimaal 100 mA, oppervlak van maximaal 9 mm². De regulators die aan deze eisen voldoen zijn genoemd in tabel 4.1. Uiteindelijk is de keuze gevallen op de `TPS62291`, vanwege de hogere efficiëntie en het kleine oppervlak.

4.2.2. Implementatie voedingscircuit

De `TPS62291` is een buck converter, en wordt aangesloten zoals in fig. 4.2 is aangegeven. De rimpelstroom en -spanning worden gegeven door [10]

$$\Delta I_L = V_{\text{out}} \frac{1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}}}{fL}$$

$$\Delta V_{\text{out}} = \frac{\Delta I_L}{8fC_{\text{out}}}$$

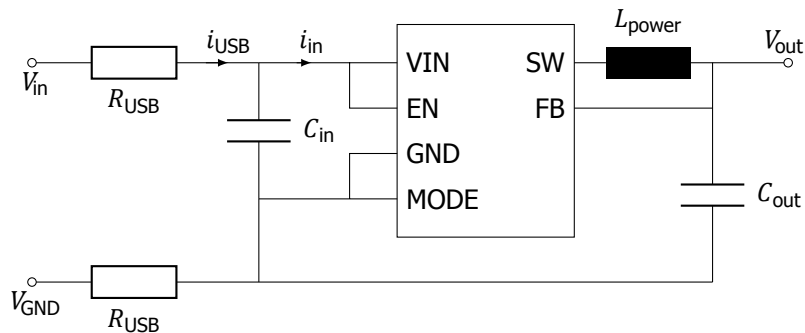
De uitgangsspanning is nominaal 3,3 V. Deze mag absoluut niet boven 3,6 V komen, omdat een hogere spanning de IC's kan beschadigen. De maximum spanning die de `TPS62291` levert is 3,39 V [10]. Hierbovenop komt de rimpelspanning, waarbij de maximum spanning gegeven wordt door $V_{\text{nominaal}} + \frac{1}{2}\Delta V_{\text{out}}$. Hieruit volgt dat $\Delta V_{\text{out}} < 2(3,6 \text{ V} - 3,39 \text{ V}) = 420 \text{ mV}$. De `TPS62291` is geoptimaliseerd voor een C_{in} en C_{out} van 10 μF , en een L_{power} van 2,2 μH . Bij deze waarden is, bij een ingangsspanning van 5,5 V, $\Delta V_{\text{out}} = 1,5 \text{ mV}$. Dat is ruim binnen de marge, ook wanneer de regulator in *power save mode* werkt, waarbij de rimpelspanning tot 20 keer zo hoog kan zijn [10].

De maximaal toegestane (piek)stroom aan de voedingsingang is, om aan de USB-standaard te voldoen, 100 mA. Aangezien de componenten naar verwachting ongeveer 100 mA zullen gebruiken, moet de rimpelstroom zo veel mogelijk gelimiteerd worden. Hoe hoger de waarde van L_{power} , hoe lager de rimpelstroom, dit is geïllustreerd in fig. 4.3. De `TPS62291` is ontworpen voor een L_{power} tussen 1,5 μH en 4,7 μH . Er is daarom gekozen voor een waarde van 4,7 μH , de grootste waarde waarvoor de spanningsregulator is ontworpen.

Aan de ingang van de spanningsregulator is een condensator geplaatst om de ingangsspanning stabiel te houden en stroompieken af te vlakken. De aanbevolen capaciteit van deze condensator is 10 μF [10], tevens de maximaal toegestane capaciteit volgens de USB-standaard [3]. De stroom die geleverd wordt door de USB-poort is hierdoor niet gelijk aan de stroom aan de ingang van de

Tabel 4.1: Vergelijking van spanningsregulators

Model	Oppervlak	Efficiëntie (%)	Schakelfrequentie	Prijs ¹
		$I_{uit} = 100 \text{ mA}$	(MHz)	
TPS62142 [12]	9	92	2,5	1,00
TPS62152 [13]	9	95	2,5	0,90
TPS62172 [14]	4	91	2,3	0,65
TPS62063 [15]	4	93	3,0	0,85
TPS62082 [16]	4	89	var	0,83
TPS62291 [10]	4	95	2,3	0,80



Figuur 4.2: Schema van voedingscircuit

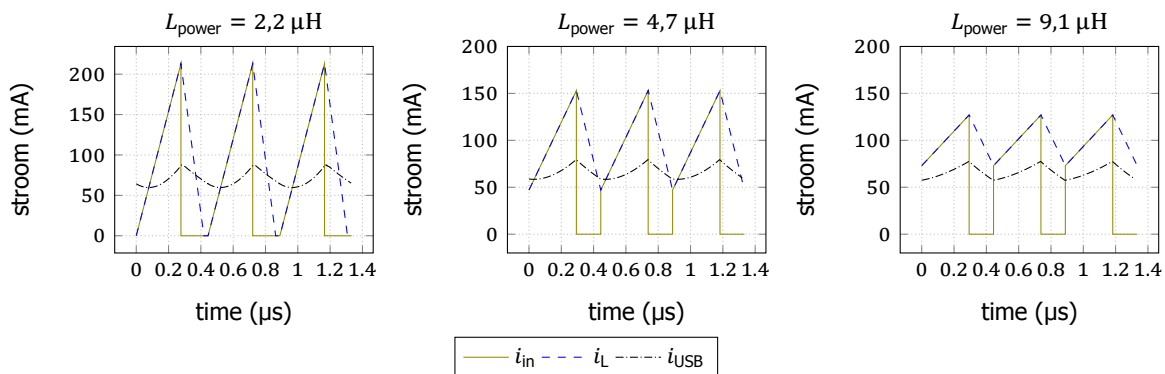
spanningsregulator. Een typische weerstand van een USB-kabel, R_{USB} , ligt tussen $0,1 \Omega$ en $1,0 \Omega$ [11]. In fig. 4.3 is de stroom die geleverd wordt door de USB-poort geplot voor $R_{USB} = 25 \text{ m}\Omega$. Voor een stroom van 100 mA aan de uitgang, een C_{in} en C_{out} van $10 \mu\text{F}$, een L_{power} van $4,7 \mu\text{H}$, en een R_{USB} van $25 \text{ m}\Omega$, blijft i_{USB} onder 80 mA . Hiermee voldoet het stroomgebruik aan de USB-standaard.

4.3. Zendmodule

4.3.1. Keuze zendmodule

Voor het versturen van een digitaal audiosignaal binnen de vrije $2,4 \text{ GHz}$ -band zijn verschillende technieken beschikbaar. Naast de nieuwere chipsets met hun eigen protocollen, zijn er langer bestaande technologieën die gebruikt kunnen worden voor het versturen van de audiodata: bluetooth en WiFi. Bluetooth heeft het nadeel dat het niet mogelijk is om zonder dataverlies 4-kanaals, 16 bit audio met een bemonsteringsfrequentie van $44,1 \text{ kHz}$ te versturen. WiFi heeft dat probleem niet, dankzij een veel hogere datasnelheid. Echter is voor een oplossing met WiFi ruim meer vermogen nodig dan voor de

¹Indicatieprijis gegeven door TI (USD)



Figuur 4.3: Buck converter: stroom door ingang en spoel

Tabel 4.2: Vergelijking van zendmodules

	CC85xx [1]	nRF24Z12 [17]	XInC2 [18]
Max. kanalen	4	2	4
Interne ADC	nee	nee	4-kanaals, 10-bit
Max f_s voor audio-overdracht	48 kHz	48 kHz	45 kHz
Errorcorrectie	FEC	nee	Cyclic Redundancy Check
USB-ondersteuning	ja	nee	nee

andere oplossingen, en is bovendien software voor elk apparaat benodigd.

De nieuwere chipsets die beschikbaar zijn en speciaal zijn ontworpen voor het sturen van audiodata in de 2,4 GHz-band zijn er drie:

- TI heeft de `CC85xx`. Deze chip is speciaal ontworpen voor het draadloos streamen van audio. De chip ondersteunt USB en verschillende technieken om de robuustheid van het systeem te garanderen.
- De `Nordic nRF24Z1` is een vergelijkbare chip die twee audiokanalen kan oversturen.
- Een wat minder bekende speler is de `ElevenEngineering XInC2` van `ElevenEngineering`. Deze chip wordt gebruikt in SKAA producten en onderscheidt zich door een ingebouwde AD-converter.

Een vergelijking tussen deze drie chipsets is te vinden in tabel 4.2. Te zien is dat de `nRF24Z12` niet voldoet aan de eis om 4-kanaals audio te ondersteunen [PvE 4.1]. De `XInC2` voldoet niet aan de eis om audio met een bemonsteringsfrequentie van 48 kHz te kunnen sturen [PvE 4.3]. De `CC85xx` voldoet wel aan deze eisen en heeft tevens ondersteuning om als USB-apparaat te functioneren. Dit betekent dat er geen aparte chip nodig is om digitale audio via een USB-poort te accepteren [PvE 2.6]. Op basis van deze vergelijkingspunten is het triviaal dat de keus is gevallen op de `CC85xx`.

4.3.2. Implementatie CC85xx

De chipserie `CC85xx` is in vier varianten beschikbaar: `CC852x` biedt ondersteuning voor twee audiokanalen en de `CC853x` biedt voor het zenden ondersteuning tot vier audiokanalen (bij ontvangen slechts twee audiokanalen). De `CC85x1` heeft USB-ondersteuning en de `CC85x0` biedt ondersteuning voor een antenneswitch. De zender moet vier kanalen ondersteunen [PvE 4.1] en moet digitale audio accepteren via een USB-aansluiting [PvE 2.6], zodoende moet voor de zender de `CC8531` worden gebruikt. De ontvanger heeft een antenneswitch nodig [paragraaf 4.5] en moet twee audiokanalen kunnen ontvangen [PvE 4.2], dus zowel de `CC8520` als `CC8530` voldoen hiervoor. De `CC8520` is iets goedkoper, dus in principe valt de keus daarop. Bij het prototype hebben wij echter gebruik gemaakt van de `CC8530`, omdat deze hiervoor gratis beschikbaar was en de pin-layout en overige eigenschappen exact hetzelfde zijn als bij de `CC8520`.

De digitale audio-input en -output geschiedt met het protocol I^2S , left-justified, right-justified of DSP. Hiervan is I^2S het meest gangbaar en heeft het voordeel dat de woorddiepte van het signaal niet uitmaakt: als de resolutie van de ontvanger hoger is, vindt er zero-padding plaats en als de resolutie van de ontvanger lager is, worden de minst significante bits genegeerd [19]. Wij hebben ervoor gekozen gebruik te maken van I^2S met de `CC85xx` als master (en andere chips dus als slave). Voor I^2S wordt gebruik gemaakt van poorten `MCLK`, `BCLK`, `WCLK` waarop de diverse kloksignalen worden gegenereerd. De audiodata wordt bij de zender geaccepteerd bij poorten `AD0` en `AD1` (tweemaal twee kanalen), bij de ontvanger wordt voor de output van de audiodata enkel poort `AD0` gebruikt.

Op poorten `X0`, `X1` moet een kristal worden aangesloten met een resonantiefrequentie van 48 MHz. De antenneversterker [paragraaf 4.4] wordt aangesloten op poorten `RF_N`, `RF_P` (voor het 2,4 GHz-signaal), `XLNAEN` en `XPAEN` (voor aansturing van de versterker). Pinnen 1 en 2 zullen bij de zender gebruikt worden voor de USB-datalijnen van/naar de computer en bij de ontvanger voor de aansturing van een antenneswitch [paragraaf 4.5].

In ontvangstmodus kan de *voltage controlled oscillator* (VCO) van de `CC853x` een 4,8 GHz-signaal lekken op de digitale I/O pinnen [20]. Dit kan ervoor zorgen dat de modules niet aan stralingseisen



Figuur 4.4: De CC Debugger

(voor signalen boven 1 GHz) van ETSI voldoen. Om deze reden zijn RF-spoeltjes van 6,8 nH in sommige I/O-lijnen geplaatst.

Het equivalente circuit van deze RF-spoeltjes is een inductantie in serie met een DC-weerstand (DCR) en een gedistribueerde capaciteit tussen de afzonderlijke wikkelingen. De gekozen spoeltjes hebben een zelfresonantiefrequentie (SRF) die ligt op 4,8 GHz. Daarom zorgen deze spoeltjes ervoor dat een 4,8 GHz lekstroom in de I/O-lijn een hoge impedantie 'ziet', dit vermindert de ongewenste straling op deze frequentie.

De CC85xx bevat een gespecialiseerde microprocessor en flashgeheugen [1, paragraaf 2.1 tot 2.1.2], welke geprogrammeerd kan worden door middel van TI's *CC Debugger* [fig. 4.4]. Ten behoeve hiervan zijn de benodigde acht aansluitingen voor de *CC Debugger* toegevoegd [21, paragraaf 6.4].

4.3.3. Firmware CC85xx

De CC85xx wordt geleverd zonder firmware, deze moet gegenereerd worden door de *PurePath Wireless Configurator* [1]. Daarna kan de firmware door middel van de *CC Debugger* en de *PurePath Wireless Configurator* in het flashgeheugen van de chip gezet worden [22]. De *PurePath Wireless Configurator* is alleen voor Microsoft Windows beschikbaar.

Er kan gekozen worden tussen verschillende basisconfiguraties, welke daarna verder aangepast kunnen worden. Bij de keuze van de basisconfiguratie wordt de rol van het apparaat (master/slave), het type aansluiting (USB, digitaal overig), het aantal kanalen, en de richting daarvan (in- of uitgang) vastgelegd. Hierna volgen de belangrijkste instellingen zoals deze in de *PurePath Wireless Configurator* te vinden zijn.

Audio interface — Het communicatieprotocol tussen de CC85xx en de audio-omvormer (ADC, DAC, S/PDIF, etc.) kan gespecificeerd worden. Hierbij kan het kloksignaal voor de audio-omvormers geleverd worden door de CC85xx. Er is gekozen voor de laagste klokfrequenties waarop de chips en het protocol kunnen werken, om energiedissipatie zo laag mogelijk te houden. Dit heeft verder geen negatieve invloed op het systeem.

Audio streaming — Hier kan de bron (nummer van de aansluiting) en het doel (midden voor, rechts achter) van ieder kanaal worden ingesteld. Daarnaast wordt ook de bemonsteringsfrequentie hier bepaald, waarbij voor dit ontwerp 48 kHz moet worden gekozen vanwege eis 4.3 in het PvE. Een andere belangrijke instelling is het audioformaat, waarbij de instellingen PCM16 en PCME24 een hogere bitsnelheid nodig hebben dan PCMLF en SLAC. Een lagere bitrate zorgt voor een betrouwbaardere audio-overdracht, omdat er meer bandbreedte beschikbaar is voor hertransmissies. De instelling van de tijdsvertraging heeft hier ook enig effect op; bij een hogere tijdsvertraging zijn er meer kansen om een bepaald audio-segment opnieuw te verzenden. De hogere bitsnelheid kan niet gekozen worden wanneer er gebruik wordt gemaakt van drie of meer kanalen.

Device identification — Hier kan de naam van het product ingesteld worden, welke onder andere te zien is als het apparaat via USB gebruikt wordt. Daarnaast is het nodig een identificatienummer in te stellen. Het identificatienummer wordt gebruikt om een master en slave module automatisch met elkaar te koppelen.

Tabel 4.3: Vergelijking van Antenneversterkers

Model	Min. inputstroom (mA)	Max. outputvermogen (dBmW)	Prijs ¹
CC2590	1,8	14	1,55
CC2591	3,4	22	1,75
CC2592	2,0	22	1,20

Radio — Het RF-uitgangsvermogen van de CC85xx kan hier worden ingesteld, evenals het gebruik van een RF-versterker en antenneschakelaar. Er kunnen bepaalde RF-kanalen uitgesloten worden van gebruik, dit is eigenlijk alleen nuttig als vooraf bekend is dat er op deze kanalen veel storing optreedt. Onder normale omstandigheden zal de CC85xx zelf de vier best werkende kanalen uitkiezen [1, paragraaf 2.4.3]. We kiezen ervoor om geen *pairing trigger* te gebruiken, zodat de gebruiker het systeem slechts hoeft aan te zetten om het te gebruiken. Bij de slave moet de *default network ID* opgegeven worden. Dit moet gelijk zijn aan het (onveranderbare) unieke chipnummer van de master. Er is een optie om willekeurige masters te accepteren, maar deze werkt alleen in combinatie met een *pairing trigger*. Het *pairing filter* zal in de praktijk weinig verschil uitmaken, omdat de slaves vantevoren zijn gekoppeld aan één bepaalde master door middel van het *default network ID*.

Power management — Bij het prototype is ervoor gekozen om alle energiebesparende functies uit te schakelen, om het debuggen te vereenvoudigen. Er is enkel een knop aan de zendmodule toegevoegd om deze functionaliteit eventueel te kunnen testen.

Advanced options — Een belangrijke instelling is de RF-bitsnelheid (2 Mbit s^{-1} of 5 Mbit s^{-1}). Een hogere bitsnelheid maakt het systeem minder gevoelig voor het radiosignaal, maar geeft ook meer kans tot hertransmissies. Uit experimenten is gebleken dat het systeem zeer matig presteert bij 5 Mbit s^{-1} , we hebben daarom gekozen voor 2 Mbit s^{-1} . Helaas kunnen op 2 Mbit s^{-1} niet de audio-formaten worden gekozen die een hoge bitsnelheid hebben.

IO mapping — Hier kunnen bepaalde functies (status-LED, aan/uit knop, etc.) aan I/O-pinnen gekoppeld worden. Er moet wel rekening mee gehouden worden dat niet alle I/O-pinnen evenveel stroom kunnen leveren. Sommige functies moeten aan een bepaalde pin gekoppeld zijn en kunnen niet vrij gekozen worden.

Na alle opties ingesteld te hebben, en de *CC Debugger* aan de module en via USB aan de computer gekoppeld te hebben, is het mogelijk de firmware binnen enkele seconden op de CC85xx te zetten.

4.4. Antenneversterker

4.4.1. Keuze antenneversterker

TI heeft een serie van drie antenneversterkers voor 2,4 GHz beschikbaar die compatibel zijn met de CC85xx. Deze zijn ter vergelijking onder elkaar zijn gezet in tabel 4.3. In de datasheet van de CC85xx wordt verwezen naar de CC2590 om als antenneversterker te gebruiken. Het maximale outputvermogen van 14 dBm moet genoeg zijn om het gewenste bereik van 15 m te halen. Op basis hiervan hebben wij de keus gemaakt om de CC2590 te gebruiken als antenneversterker.

4.5. Antenneswitch

4.5.1. Beslissing antenneswitch

Op basis van bevindingen van Niels Koeman en Frits Kastelein, die zich bezighielden met het antenneontwerp, werd het nodig geacht om bij de ontvanger twee antennes te gebruiken op minimaal 6 cm afstand van elkaar. Tussen deze twee antennes moet dan met een antenneswitch geschakeld kunnen worden, zodat de antenne met het sterkste signaal gebruikt wordt. TI levert zelf geen antenneswitches, dus hebben we onderzocht welke andere antenneswitches goedkoop te bestellen zijn, zodat deze beschikbaar was voor het prototype. Via Farnell zijn diverse antenneswitches van Skyworks beschikbaar. De keuze is simpelweg op de goedkoopste gevallen: de AS214-92. Deze chip biedt bij een frequentie van 2,4 GHz een isolatie van 23 dB tussen de signalen van beide antennes en een ingangsverlies van 0,4 dB.

4.5.2. Implementatie AS214-92

De implementatie van de AS214-92 is relatief simpel. Poort J1 wordt gebruikt voor de transmissie van het antennesignaal naar de antenneversterker en op poorten J2 en J3 worden de twee antennes aangesloten. Tot slot worden poorten V1 en V2 aangesloten op het stuursignaal voor de antenneswitch, geleverd door de CC8520.

4.6. Analooq-digitaalozmetter

4.6.1. Keuze ADC

De audio-input van de CC85xx geschiedt digitaal, waarbij de keuze gemaakt kan worden uit 4 verschillende standaarden: I²S, Left-justified, Right-justified en DSP. De keus hiervoor is gevallen op het gebruik van I²S [paragraaf 4.3.2]. De datalijn bestaat in elk van die gevallen uit twee kloksignalen en één (voor stereo audio) of twee (voor vierkanaals audio) signalen met audiodata. De CC85xx kan hierbij als master functioneren, wat betekent dat deze de kloksignalen genereert. De bemonsteringsfrequentie van het audiosignaal moet gelijk zijn aan 44,1 kHz of 48 kHz.

Voor het omzetten van een analooq audiosignaal dat als invoer aan het systeem wordt gegeven, is gebruik van een ADC benodigd. Het is hierbij mogelijk om een enkele vierkanaals ADC te gebruiken, of om twee tweekanaals ADC's te gebruiken. Productietechnisch is het voordelig om zoveel mogelijk chips bij dezelfde fabrikant te kunnen bestellen, dus is de keuze gemaakt om in principe voor een ADC van TI te gaan. In tabel 4.4 zijn diverse beschikbare ADC's van TI uiteengezet, die allemaal volgens de I²S-standaard een digitaal uitgangssignaal kunnen leveren van 44,1 kHz of 48 kHz, afhankelijk van de aangeleverde kloksignalen.

Voor de SNR geldt dat deze 101 dB of hoger moet zijn, zodat de SNR van de ADC minimaal een factor twee hoger is dan die van het 16-bits-audiosignaal dat overgestuurd wordt van de zender naar de ontvanger (98 dB). Het is daarnaast belangrijk het vermogen van de ADC en de stukprijs laag te houden, zodat het geen problemen oplevert met het maximaal toegestane vermogen van de gehele schakeling [paragraaf 4.2] en de kosten niet te hoog oplopen.

Voor de analoge audio input geldt dat deze single-ended of differentieel kan zijn. Single-ended betekent dat het signaal wordt gemeten ten opzichte van de aarde op de printplaat, differentieel betekent dat het inputsignaal wordt gemeten ten opzichte van de, via de kabel aangebrachte, referentie-aarde. Het voordeel van differentieel is dat het signaal minder gevoelig is voor ruis (storing heeft vergelijkbare invloed op beide ingangen), maar het heeft het nadeel dat het signaal een offset-spanning kan krijgen die de ADC zou kunnen beschadigen als deze te groot wordt. Single-ended input heeft geen last van het laatstgenoemde probleem, omdat de aarde van de printplaat gekoppeld wordt aan de aarde van de audiokabel. Aangezien het de bedoeling is om de zender dichtbij de audiobron te plaatsen, zullen kabels naar de zender in principe nooit lang zijn. De invloed van ruis op het analoge audiosignaal zal dan beperkt zijn, waardoor het voordeel van differentiële input niet opweegt tegen de risico's ervan. Wij willen daarom bij de ADC gebruik maken van single-ended input.

Op basis van de vergelijking in tabel 4.4 is de keus gevallen op de PCM1861, die een laag vermogen en een relatief lage prijs combineert met een SNR van 110 dB, verwaarloosbaar ten opzichte van de maximale SNR van het signaal dat wordt overgestuurd.

4.6.2. Implementatie PCM1861

De PCM1861 beschikt over genoeg ingangen voor acht audiokanalen bij single-ended input, of vier kanalen bij differentieële input. Er kunnen echter maar twee kanalen tegelijkertijd verwerkt worden. Voor de maximaal vier audiokanalen die aangeboden worden aan de zender, gebruiken we dus twee van deze chips in dezelfde configuratie. De audio-input geschiedt single-ended, dus we gebruiken hiervoor simpelweg poorten VINL1 en VINR1, die we selecteren met MD6 = 0, MD5 = 0, MD2 = 0.

Het digitale audiosignaal dat aangeboden wordt aan de CC85xx via poorten DOUT, BCK, LRCK, SCKI kan het I²S-protocol volgen of het Left Justified-protocol. Grote verschillen zitten hier niet in, en we hebben hier besloten I²S te gebruiken. Voor de selectie hiervan moet MD4 = 0. De CC85xx zal als master dienen voor de I²S-interface tussen die chip en de twee chips type van PCM1861, dus moet voor de PCM1861 slavemodus geselecteerd worden door MD1 = 0, MD0 = 0.

Voor digitale filtering van het uitgangssignaal kan er gekozen worden tussen een standaard FIR-filter en een IIR-filter met iets een lagere tijdsvertraging. IIR-filters zijn in tegenstelling tot FIR-filters in de regel niet in lineaire fase. Dat wil zeggen het faseverschil tussen twee sinuscomponenten van

Tabel 4.4: Vergelijking van ADC's

Model	Kanalen	SNR (dB)	Vermogen (mW) $f_s = 48 \text{ kHz}$	Input	Output	Kwantisatie-niveaus	Prijs ¹
PCM1802	2	105	147	single-ended	I ² S	24	1,58
PCM1803	2	103	60	single-ended	I ² S	24	1,05
PCM1804	2	112	225	differentieel	I ² S/DSD	24	3,00
PCM1807	2	101	62	single-ended	I ² S	24	0,90
PCM1808	2	99	62	single-ended	I ² S	24	1,25
PCM1851	2	101	160		I ² S	24	1,25
PCM1861	2	110	80	diff./single-ended	I ² S	24	1,75
PCM1870	2	90	13	single-ended	I ² S	16	?
PCM4202	2	118	308		I ² S/TDM		3,97
PCM4204	4	118	600		I ² S/DSD		7,55
PCM4220	2	123	305		I ² S/TDM		8,55
PCM4222	2	124	305		I ² S/TDM		?

Tabel 4.5: Vergelijking van DAC's

Model	Kanalen	SNR (dB)	Vermogen (mW) $f_s = 48 \text{ kHz}$	Output	Input	Kwantisatie-niveaus	Prijs ¹
PCM1754	2	106	80				1,57
PCM1794A	2	132	205				12,71
PCM1798	2	123	115				6,91
PCM5100	2	100	99				1,88
PCM5101	2	106	99				1,94
PCM5102	2	112	99				3,40

het signaal kan veranderen bij IIR-filters [23]. Audiotechnisch is het gewenst dat deze faseverschillen constant blijven, zodat de golfvorm en het klankbeeld niet veranderen. Daarom hebben we besloten het FIR-filter te selecteren door $MD3 = 0$.

De voeding van de PCM1861 wordt uiteraard ontkoppeld met enkele condensatoren, analoog aan het referentie-ontwerp.

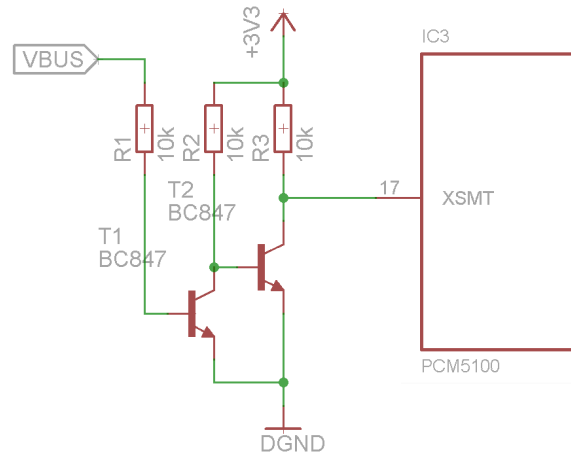
4.7. Digitaal-analoogomzetter

4.7.1. Keuze DAC

Om analoge output bij de ontvanger te realiseren, is het nodig dat het digitale signaal afkomstig van de CC85xx wordt geconverteerd met een DAC. Omdat een ontvanger slechts twee audiokanalen verwerkt [paragraaf 4.3.2], voldoet een enkele tweekanaals DAC. Net als bij de ADC van de zender, geldt dat het vermogen en de prijs zo laag mogelijk moeten zijn. Ruis toegevoegd door de DAC zal in de rest van het systeem niet doorwerken, dus is de SNR van alle DAC's die zijn weergegeven in tabel 4.5 hoog genoeg. De SNR van het hele systeem moet ten minste 85 dB zijn, dus een SNR van 100 dB of hoger is daarbij verwaarloosbaar. De keus is echter niet gevallen op de PCM1754, met de laagste prijs en het laagste vermogen, maar op de PCM5100A. De chips van type PCM51xxA maken gebruik van nieuwere technieken, waardoor onder andere geen DC-offsetspanning op de uitgang kan ontstaan, en er minder ruis is buiten de passband. Deze beloofde kwaliteitstoename in het audiosignaal en het beperkte meerbedrag en -vermogen heeft ervoor gezorgd dat de keus is gevallen op de PCM5100A.

4.7.2. Implementatie PCM5100A

Voor de implementatie van de PCM5100A hebben we het voorbeeldcircuit [24, fig. 38] overgenomen, zodat de voedings- en referentiepoorten zijn aangesloten zoals nodig. Het I²S-audiosignaal wordt aangeboden op poorten LRCK, DIN, BCK, SCK en het analoge audiosignaal wordt (single-ended) gegeven



Figuur 4.5: Transistorschakeling voor geluidsdemping

Tabel 4.6: Vergelijking van S/PDIF-converterers

Model	Max. vermogen (mW) $f_s = f_{max}$	Max. samplefreq (kHz)	Prijs ¹
DIT4096	150	96	1,52
DIT4192	175	192	2,00

op poorten OUTL en OUTR. Dit analoge audiosignaal wordt nog gefilterd met een laagdoorlaatfilter.

Voor de protocolselectie dient $FMT = 0$, zodat het I²S-signaal goed geïnterpreteerd wordt. Er is geen pre-emphasis uitgevoerd op het digitale audiosignaal, dus hoeft er ook geen de-emphasis te worden uitgevoerd. Hiervoor moet $DEMP = 0$. Voor interpolatie van het signaal kan worden gekozen tussen twee filters: een standaard FIR-filter of een IIR-filter met een lagere tijdsvertraging. Een vergelijkbare keuze was er bij de implementatie van de PCM1861 [paragraaf 4.6.2], en om dezelfde reden is ook hier gekozen voor het FIR-filter: IIR-filters zijn audiotechnisch minder interessant doordat faseverschillen kunnen optreden tussen verschillende frequenties.

Pin XSMT is voor de controle van een zachte geluidsdemping om het 'ploppen' van een aangesloten luidspreker te voorkomen. Als dit signaal hoog wordt zal het audiosignaal geleidelijk ingeschakeld worden en als dit signaal laag wordt zal het audiosignaal geleidelijk gedempt worden. Deze overgang kost een tijd van $104 \cdot t_s$. Wij hebben besloten een simpele transistorschakeling (zie fig. 4.5) te maken die een hoog signaal geeft als de 5,0V-lijn ingeschakeld is en een laag signaal als er geen spanning meer op staat. Om te zorgen dat er lang genoeg voedingsspanning op de 3,3V-lijn staat voor de zachte geluidsdemping plaatsen we een condensator tussen de aarde en de 3,3V-lijn. Gegeven het stroomgebruik, de toegestane spanningsval, en de minimum tijd waarin deze spanningsval mag optreden, is de waarde van deze condensator te berekenen met vergelijking 4.1. Met een kleine marge is er gekozen voor een 1,2 mF condensator.

$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{I \cdot 150 \cdot \frac{1}{f_s}}{V_{\text{nominaal}} - V_{\text{minimaal}}} = \frac{100 \text{ mA} \cdot 150 \cdot \frac{1}{48 \text{ kHz}}}{3,3 \text{ V} - 3,0 \text{ V}} = 1,1 \text{ mF} \quad (4.1)$$

4.8. S/PDIF-converter

4.8.1. Keuze S/PDIF-converter

De digitale audio-output van de ontvanger moet gebeuren via het S/PDIF-protocol en een TOSLINK-connector [PvE 2.7]. De CC85xx-chips ondersteunen het S/PDIF-protocol niet, dus is er een chip nodig om het I²S-signaal te converteren. Bij TI zijn twee types beschikbaar, welke zijn weergegeven in tabel 4.6. Het enige significante verschil tussen de twee types is dat de DIT4192 een hogere maximale bemonsteringsfrequentie heeft. Omdat wij met een bemonsteringsfrequentie van maximaal 48 kHz werken, voldoet de goedkopere DIT4096 aan onze eisen en hier valt dan ook de keuze op.

4.8.2. Implementatie DIT4096

In de datasheet van de DIT4096 staat beschreven dat deze twee modi heeft om in te werken: een softwaremodus en een hardwaremodus [25]. We gebruiken deze chip in hardwaremodus ($MODE = 1$), zodat we niet een aparte chip nodig hebben waarop software draait om de DIT4096 aan te sturen.

Het 24-bits I²S-signaal afkomstig van de CC85xx wordt aangesloten op poorten SYNC, SCLK, SDATA, MCLK. Om te zorgen dat die signaal goed wordt geïnterpreteerd, moet voor de protocolselectiepoorten gelden $FMT0 = 1$, $FMT1 = 0$. De CC85xx werkt als master voor het I²S-signaal (dus $M/\bar{S} = 0$) en voorziet in een klokfrequentie van $256 \cdot f_s$, dus moet voor de kloksnelheidselectie worden gezorgd dat $CLK0 = 1$, $CLK1 = 0$. De DIT4096 kan zelf blokdetectie uitvoeren op het I²S-signaal, dus zetten we $BLSM = 1$ (en BLS niet verbonden).

Het uitgevoerde S/PDIF-signaal is (uiteraard) ook stereo, dus moet de monoselectie worden ingesteld op niet-mono door $MONO = 0$, $MDAT = 0$. Voor het S/PDIF-signaal [2] maken we geen gebruik van kopieerbeveiliging, omdat het ook niet mogelijk is om een audiosignaal met kopieerbeveiliging aan te leveren aan de zender. Om consumentenaudio zonder kopieerbeveiliging te selecteren moet $CSS = 0$, $COPY = 1$, $L = 1$. We hebben geen gebruikersdata om mee te leveren in het S/PDIF-signaal en we gaan ervan uit dat er altijd geldige audio-data wordt aangeleverd vanuit de CC85xx. Dit betekent dat moet gelden dat $\overline{AUDIO} = 0$, $V = 0$, $U = 0$. Er is daarnaast geen pre-emphasis uitgevoerd op het audiosignaal, dit moet worden aangegeven door $\overline{EMPH} = 1$.

De \overline{RST} -pin moet worden gebruikt om de DIT4096 te resetten als de ontvanger wordt ingeschakeld. Op het moment dat de spanning hoog genoeg is om de chip te laten functioneren (meer dan 2,7V), moet het signaal \overline{RST} minimaal 500 ns laag zijn, daarna moet het signaal hoog worden. Hiervoor maken we gebruik van een TLV803S, een kleine chip die bedoeld is voor het geven van een reset-signaal. Zodra de spanning boven de 2,93V uitkomt, houdt deze chip het uitgangssignaal laag gedurende 200 ms \pm 40%, daarna wordt het uitgangssignaal hoog.

Beide voedingsspanningen ($V_{DD} = 5,0\text{ V}$, $V_{IO} = 3,0\text{ V}$) zijn, net zoals in de voorbeeldimplementatie uit de datasheet, elk ontkoppeld met een condensator van 1 μF . De S/PDIF-uitvoer naar de optische connector geschiedt single-ended op poort TX+, poort TX- blijft hierbij niet verbonden.

4.9. Circuit

De implementaties van alle IC's zijn gecombineerd in twee circuitontwerpen: van de zender (fig. 4.7) en de ontvanger (fig. 4.8). Bij het maken van deze circuitontwerpen is gebruik gemaakt van referentieschema's die zijn gepubliceerd door TI. Bij de transmissielijnen van de antennes is rekening gehouden met plek voor een compensatienetwerk en aansluitingen om de antennes te meten, zoals de heren Kastelein en Koeman dat wensten.

4.10. Materiaalkeuze printplaat

4.10.1. Producent

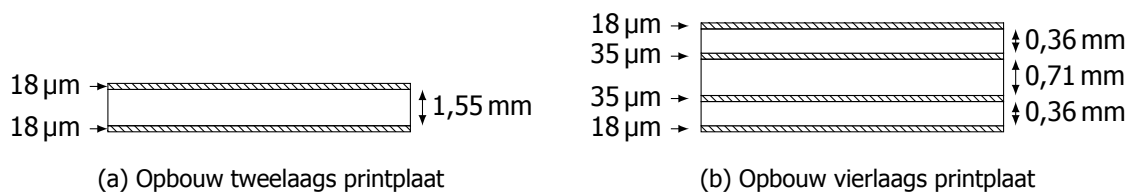
De afmetingen van de gebruikte componenten maakte het noodzakelijk om de printplaten te laten fabriceren door een hierin gespecialiseerd bedrijf. De keuze van dit bedrijf was voornamelijk afhankelijk van de levertermijn en kosten maar ook van betrouwbaarheid en service. Er moet op tijd een prototype worden gemaakt, daarom is een korte levertijd van groot belang. Een bedrijf in Europa verdient daarom de voorkeur boven een bedrijf in China. Uiteindelijk is gekozen voor Eurocircuits, een bedrijf gevestigd in België dat een goede staat van dienst heeft en korte (minder dan 7 werkdagen) levertijd biedt.

4.10.2. Aantal koperlagen en dikte substraat

Een printplaat kan uit meerdere signaallagen bestaan, in dit geval was de keuze tussen een twee- of vierlaags printplaat. In fig. 4.6a en fig. 4.6b is de opbouw en dikte van de lagen gegeven, hierbij zijn de lagen voor het soldeermasker en de componenten opdruk (silkscreen) niet weergegeven. De in tabel 4.7 genoemde prijzen zijn voor twee stuks tweelaags printplaten van 100 mm \times 80 mm (een halve eurokaart) groot en met een standaard dikte van 1,55 mm, tenzij anders vermeld.

Het aantal signaallagen dat gebruikt wordt in een ontwerp is afhankelijk van de aard en complexiteit van de schakeling. Bij hoogfrequente schakelingen worden vaak vier signaallagen gebruikt. De binnenste lagen dienen dan als voedingsvlakken en vergemakkelijken zo het routen van de printplaat aanzienlijk. Een printplaat met vier signaallagen is echter een stuk duurder dan een met twee lagen.

Tevens is het niet eenvoudig om een fout in een vierlaags printplaat te corrigeren, omdat sporen op de binnenste lagen niet van buitenaf bereikbaar zijn.



Figuur 4.6: Opbouw van twee- en vierlaags printplaten bij Eurocircuits

Het aantal gebruikte signaallagen is van invloed op de eigenschappen van de gebruikte antennes en transmissielijnen. Gebruik van een tweelaags printplaat met dun substraat, of een vierlaags printplaat met bijbehorende dunne bovenlaag, maakt het mogelijk dünnere transmissielijnen te gebruiken, dan bij gebruik van een dikker substraat. Dit kan echter ook bereikt worden door een transmissielijn met een hogere karakteristieke impedantie te gebruiken. De eigenschappen van de gekozen antennes in de zender [26] en ontvanger [27] zijn, volgens Texas Instruments, slechts in geringe mate afhankelijk van de dikte van het substraat. In tabel 4.7a zijn de prijzen van een twee- en een vierlaags printplaat weergegeven. Uit de tabel volgt dat gebruik van een vierlaags printplaat zorgt voor bijna een verdubbeling in kostprijs ten opzichte van gebruik van twee signaallagen.

In tabel 4.7b is een aantal bij Eurocircuits beschikbare substraatdiktes weergegeven. De kolom met extra kosten geeft de extra kosten ten opzichte van een substraat van 1,55 mm dikte.

Tabel 4.7: Prijzen van verschillende configuraties bij Eurocircuits

(a) Prijzen twee- en vierlaags printplaat

Optie	# lagen	Prijs (€)
1	2	75,94
2	4	145,45

(b) Beschikbare substraatdiktes

Optie	Dikte (mm)	Extra kosten (€)
1	1.55	0
2	1.20	400+
3	1.00	50
4	0.80	400+

Gebruik van een tweelaags printplaat in RF-toepassingen is niet ideaal wegens redenen die worden genoemd in paragraaf 4.11. Het is echter wel mogelijk de schakeling te maken op een tweelaags printplaat. De lagere kosten en de mogelijkheid van het verbeteren van fouten in een tweelaags printontwerp, zijn de voornaamste redenen waarom uiteindelijk voor gebruik van tweelaags printplaten is gekozen.

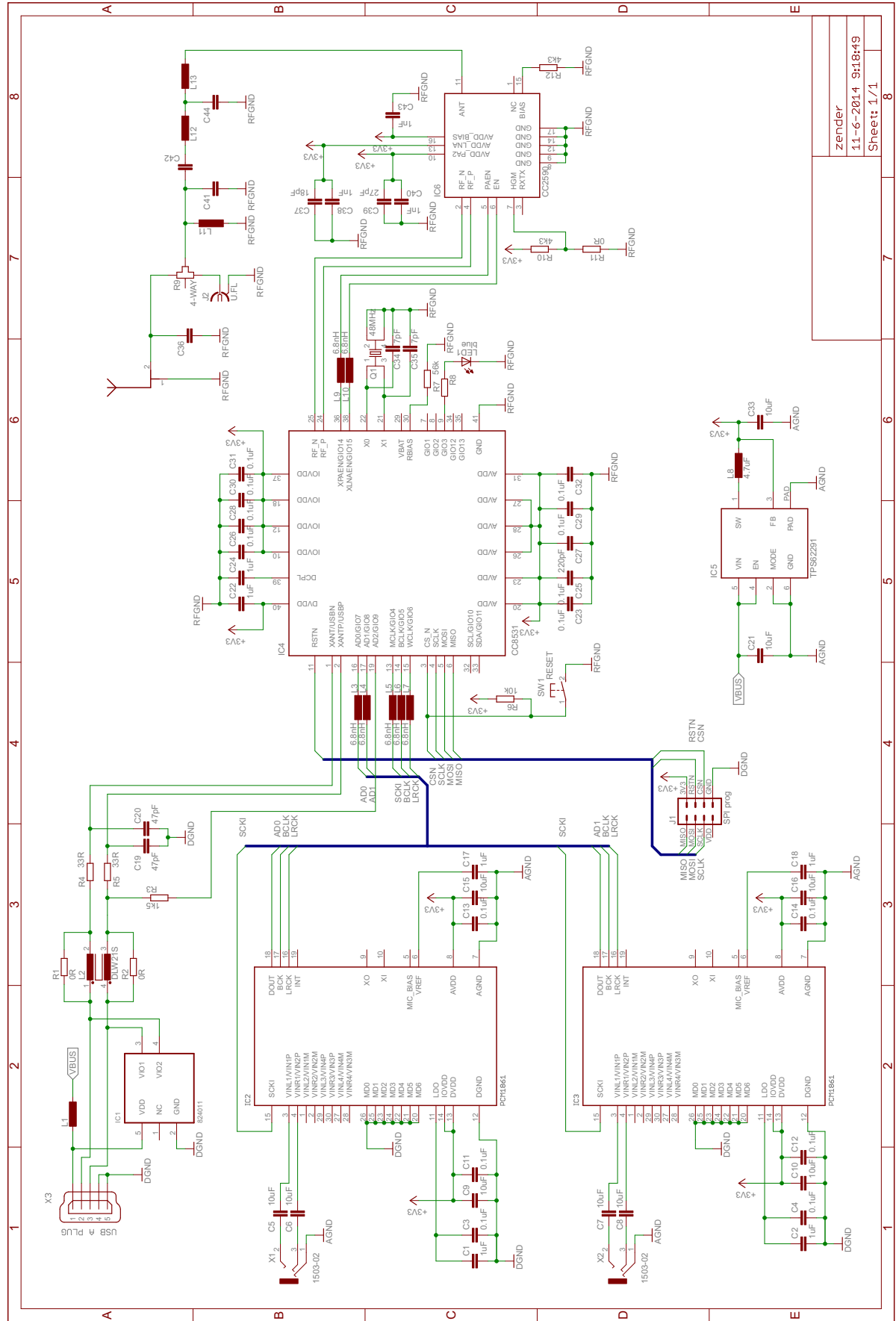
4.10.3. Afwerking koperlaag

Na aanbrengen van het soldeermasker, kan het blootliggende koper bedekt worden met een laagje metaal om oxidatie van het soldeeroppervlak te voorkomen. In tabel 4.8 zijn de mogelijke afwerkingen bij Eurocircuits² gegeven. Een * naast de naam van de afwerking geeft aan dat de optie niet *poolable* is, ofwel dat deze niet standaard is en er extra kosten aan verbonden zijn. De kolom *RoHS compliant* geeft aan of de afwerking voldoet aan de Nederlandse RoHS richtlijn [28].

Afwerkingen 2 en 7, gebruiken *Hot Air Solder Leveling* (HASL), hierbij worden de printen ondergedompeld in vloeibaar soldeertin waarna met perslucht het overtollige tin eraf geblazen wordt. Dit resulteert in een dunne, echter niet compleet vlakke, laag tin op het blootliggende koper. Deze on-effenheden kunnen in sommige gevallen problemen opleveren, de gebruikte componenten zijn echter niet van het formaat waarbij dit het geval zal zijn.

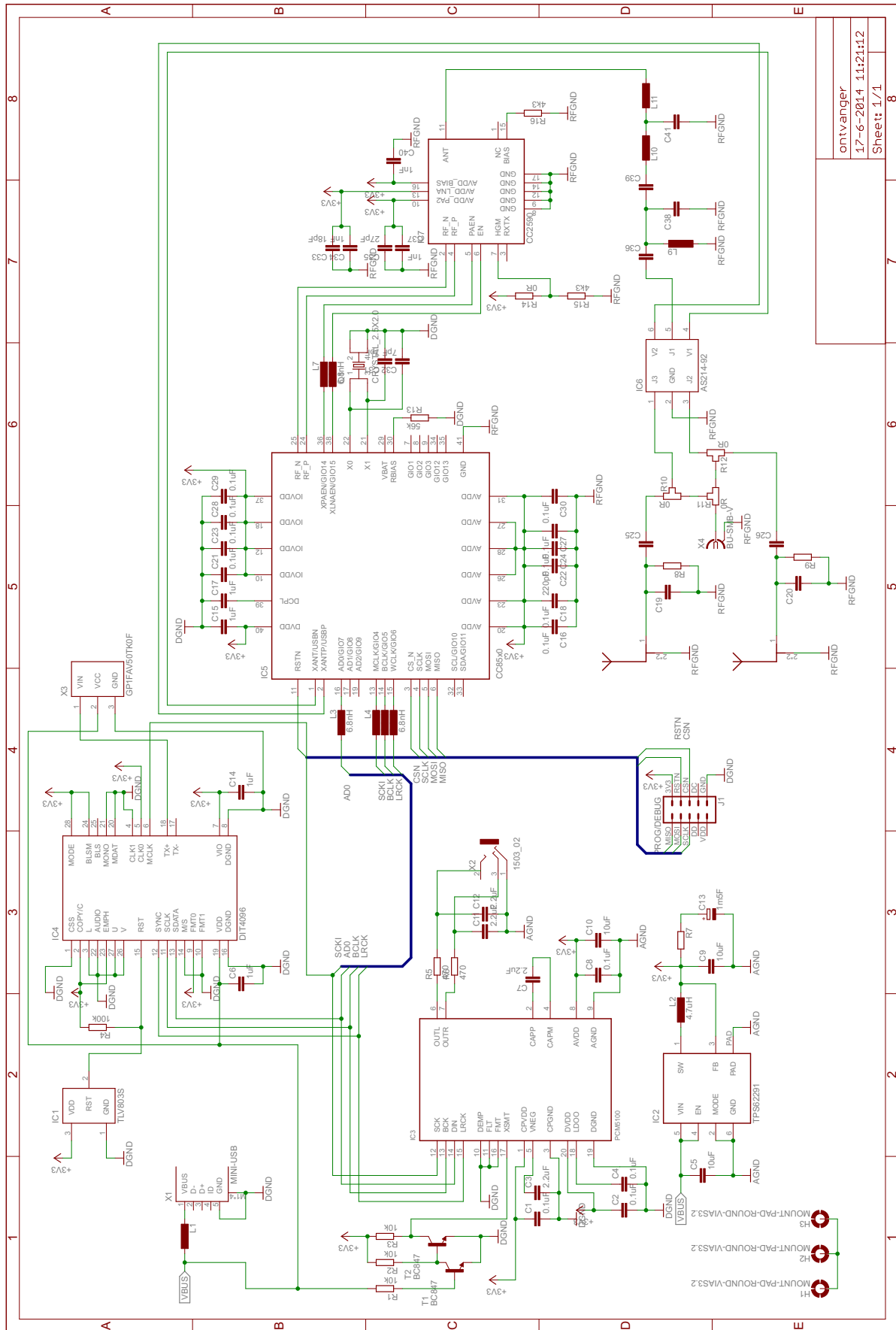
Bij optie 4 wordt chemisch een laagje zilver op het koper aangebracht. Zilver heeft een hogere geleiding dan koper en goud en is daarom een goede keus. Opties 3 en 5 bieden een afwerking waarbij chemisch een laagje goud op het koper wordt aangebracht. Bij optie 3 wordt het goud selectief

²prijzen zijn afkomstig van online prijscalculator <http://be.eurocircuits.com/shop/orders/configurator.aspx>, geraadpleegd op 6 juni 2014



Zender
11-6-2014 9:18:49
Sheet: 1/1

Figuur 4.7: Circuit van de zender



Figuur 4.8: Circuit van de ontvanger

Tabel 4.8: Prijzen van verschillende afwerkingen bij Eurocircuits.

Optie	Koper afwerking	Extra kosten	RoHS compliant
1	Elke loodvrije finish	0	ja
2	Loodvrij HASL	7	ja
3	Chem. Au selective	20	ja
4	Ag	120	ja
5	Chem. Au overall	143	ja
6	Geen afwerking*	400+	ja
7	Loodhoudend HASL*	400+	nee

aangebracht en bij optie 5 wordt het op de het gehele oppervlak aangebracht. Goud oxideert niet maar heeft echter wel een lagere geleiding dan koper. Hoewel bij RF-toepassingen een afwerking met goede geleiding de voorkeur heeft, in verband met het *skin effect*, is dit waarschijnlijk niet van veel invloed in deze toepassing.

Uit tabel 4.8 volgt dat afwerking 1, *Elke loodvrije finish*, prijstechnisch de voordeligste keuze is. Bij keuze van deze optie kiest Eurocircuits de (loodvrije) afwerking, dit kan elke andere optie behalve optie 7 zijn. Er is voor optie 1 gekozen omdat dit de voordeligste keuze is en de mogelijkheid bestaat om zonder extra kosten ENIG (optie 5), de meest oxidatiebestendige afwerking, te krijgen.

4.11. Aandachtspunten printontwerp

Het ontwerp van printplaat is bij RF-toepassingen vrij kritisch. In deze paragraaf wordt een aantal aandachtspunten gegeven met betrekking tot printontwerp bij RF-toepassingen.

4.11.1. Analog/Digitaal scheiden

De FET's die de digitale signaalpinnen aansturen in IC's, moeten snel schakelen. Daarvoor moeten hun gate-capaciteiten snel worden op- en ontladen, het IC trekt hierdoor kortstondig hoge stromen.

Snel veranderende signalen stralen relatief veel elektromagnetische energie uit, dit kan voor ruis zorgen op gevoelige analoge signalen. Om deze reden hebben mixed-signal IC's (IC's die zowel analoge als digitale signalen verwerken) zoals ADC's en DAC's vaak afzonderlijke voedingspinnen voor het analoge (V_{DD} en $AGND$) en het digitale ($DVDD$ en $DGND$) gedeelte van de schakeling. Soms zijn er ook aparte voedingspinnen voor communicatielijnen de ($IOVDD$ en $IOGND$). De verschillende voedingspinnen moeten afzonderlijk worden ontkoppeld (paragraaf 4.11.6) naar het bijbehorende aardvlak (paragraaf 4.11.4).

4.11.2. Impedantie van een printspoor

Voor lage frequenties is het reële deel van de impedantie van een printspoor dominant en meestal in de orde van milliohms. Voor lage frequenties kan een schakeling dan ook benaderd worden als een verzameling discrete circuitcomponenten die met ideale draden zijn verbonden. Echter voor hoge frequenties speelt het reactieve deel van de impedantie van een printspoor ook een rol. Er moet dan rekening worden gehouden met de inductantie van printsporen, via's en andere gedistribueerde circuitelementen, deze kunnen dan niet langer als ideaal verondersteld worden. Vaak wordt van deze elementen een *lumped element* benadering gemaakt, deze elementen worden dan gezien als discrete circuitcomponenten.

De inductantie, L , van een stroomlus is gedefinieerd als

$$L = \frac{\psi}{I} \quad [\text{H}] \quad (4.2)$$

hierbij is ψ de magnetische flux die koppelt met de spoel en I de stroom door de spoel. De inductantie van een stroomlus kan enkel bepaald worden als informatie over de gehele topologie van de stroomlus bekend is. Het is echter handig om inzicht te krijgen over de bijdrage van individuele secties op de totale inductantie van de stroomlus. Om deze reden, introduceren we de *partiële inductantie* [29], die

is gedefinieerd als

$$L_i = \frac{\psi_i}{I} \quad [\text{H m}^{-1}] \quad (4.3)$$

hierbij is ψ_n de flux geproduceerd door segment i van een stroomlus die koppelt met deze stroomlus en I is de stroom door de stroomlus. De eenheid van partiële inductantie is henry per meter.

Naast partiële inductantie is er ook de *partiële zelfinductantie*, L_{ii} , deze is gedefinieerd als de ratio van de flux gekoppeld met een oneindige rechthoekige lus (zie [29]) aan dit segment en de stroom door dit segment, bij afwezigheid van alle andere segmenten en stromen. Analoog is er ook de *wederzijdse partiële inductantie*, L_{ij} , tussen twee afzonderlijke segmenten. Deze is gedefinieerd als de ratio van de flux geproduceerd door segment i die koppelt met een oneindige rechthoekige lus aan segment j en de stroom door de lus. De partiële inductantie kan geschreven worden als

$$L_i = L_{ii} \pm \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n L_{ij} \quad (4.4)$$

waarbij het teken van de sommatie afhangt van de relatieve orientatie van de stromen door beide segmenten. De partiële inductantie van een korte draad van lengte ℓ en straal r , wordt in [29] benaderd met

$$L_{draad} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \ln \left(\frac{2\ell}{r} \right) \quad [\text{H m}^{-1}] \quad (4.5)$$

De inductantie van een rechthoekig printspoor kan vervolgens benaderd worden door meerdere dunne ronde draden naast elkaar te leggen. De natuurlijke logaritme is een stijgende functie, dus bij vaste r is vergelijking verg. (4.5) een stijgende functie van ℓ . Voor vaste ℓ is verg. (4.5) een dalende functie van r . Om de inductantie van een printspoor laag te houden is het dus van belang deze zo kort en breed mogelijk te maken.

4.11.3. Het pad van de RF-stroom

Een stroom van de voeding die loopt naar een bepaald punt A in de schakeling, moet altijd een weg terug vinden naar de voeding, om zo een gesloten stroomkring te creëren. Het pad van A terug naar de voeding heet het *return path*. Het is van belang dat er een laagimpedant pad is waarlangs deze stroom kan lopen, als dit niet het geval is, dan kan deze namelijk een weg zoeken via de vrije ruimte en zo zorgen voor ongewenste straling. Hierdoor komt het apparaat wellicht niet door EMI/EMC keuringen.

Ongewenste straling door een signaal kan tegen worden gegaan door het *return path* van de stroom direct onder of naast dat van de stroom te laten lopen. Dit zorgt voor een hoge wezerzijdse partiële inductantie tussen het pad van de stroom en het *return path*. Doordat de stroom en de return stroom in tegengestelde richting lopen, is de som in verg. (4.4) gelijk aan nul. De partiële inductantie van dit deel van de stroomlus wordt dan dus gegeven door enkel de zelfinductantie.

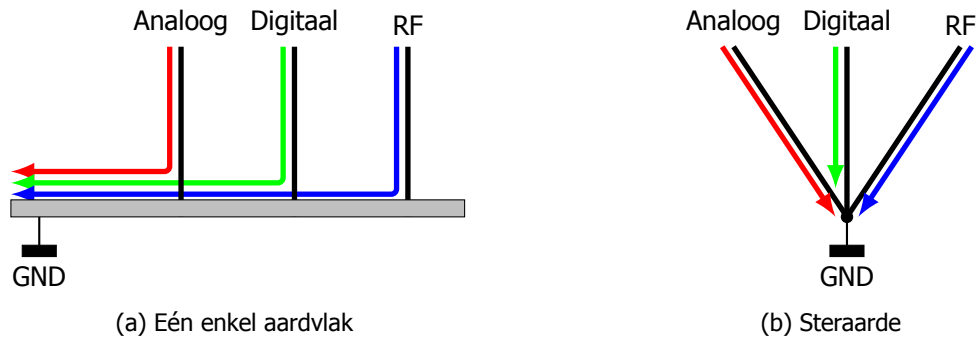
Een manier om te zorgen voor een laagimpedant pad voor de return stroom, is door gebruik te maken van een aardvlak onder (of boven) het signaalpad.

4.11.4. Aardvlakken

Een aardvlak is een kopervlak dat de aarde-aansluitingen van verschillende IC's en passieve componenten met elkaar verbindt en verbonden is met de 0V referentie van het systeem. Een aardvlak kan gezien worden als een breed printspoor, uit paragraaf 4.11.2 volgt dan dat dit vlak een lage inductantie heeft. Zowel de bovenlaag als de onderlaag van de printplaat is met de aarde verbonden, de capaciteit tussen beide aardvlakken is dus vrijwel nul. De weerstand van een breed kopervlak is in de orde van milliohms. Er volgt dat een aardvlak een laagimpedant pad vormt voor hoogfrequent (return) stromen.

Men kan één aardvlak gebruiken dat op een punt met de aarde van de voeding is verbonden, zoals weergegeven in fig. 4.10a. Echter dit kan ervoor zorgen dat hoge piekstromen, afkomstig van digitale signalen, een ruisspanning (*ground noise voltage*) veroorzaken over het aardvlak. De (gevoelige) analoge schakelingen zijn op hetzelfde aardvlak aangesloten. Dit kan, afhankelijk van de locatie van hun aard-aansluitingen, zorgen voor een offsetspanning op de analoge signalen.

Om dit probleem te voorkomen, kan gebruik gemaakt worden van een steraarde, zoals weergegeven is in fig. 4.10b. Bij gebruik van steraarde, hebben de verschillende signaaltypen een eigen aardvlak.



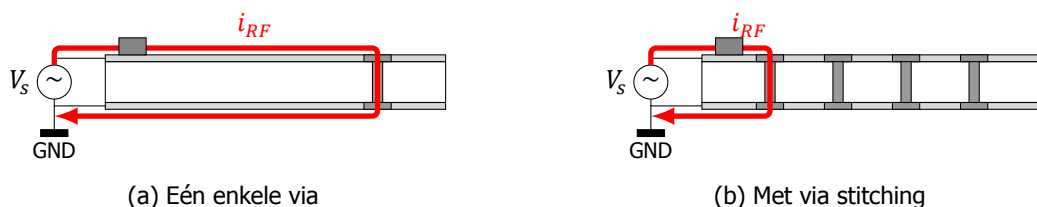
Figuur 4.10: Aarding via één enkel aardvlak en aarding met een steraarde

De verschillende aardvlakken worden op één enkel punt met elkaar verbonden aan de 0V referentie. Een digitaal signaal kan nu enkel in zijn eigen aardvlak een offsetspanning veroorzaken terwijl het potentiaal van de analoge aarde op 0V blijft.

4.11.5. Beperking van lusoppervlak

SMT componenten worden doorgaans bevestigd op de bovenzijde van een printplaat. Sommige IC's hebben een groot aardvlak aan de onderkant dat met via's met de onderzijde van printplaat moet worden verbonden. De beide aardvlakken aan de boven- en onderzijde van de printplaat moeten uiteraard met elkaar verbonden worden.

Het is mogelijk om dit te doen met behulp van één enkele via, zoals geïllustreerd is in fig. 4.11a. Hier wordt een IC aan de bovenzijde van de printplaat gevoed door een spanningsbron V_s . Er loopt een stroom, i_{RF} van de bron via het IC naar het 0V punt onder aan de printplaat. In dit geval kan, afhankelijk van de positie van het component, een grote signallus ontstaan. Een naburig magnetisch veld kan koppelen met deze lus en hierin een spanning opwekken. De grootte van de geïnduceerde spanning is afhankelijk van het lusoppervlak. De geïnduceerde spanning wordt gesuperponeerd op het signaal dat deze lus vormt en leidt tot een ruis.



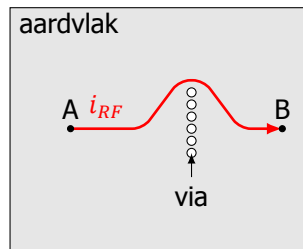
Figuur 4.11: Beperken van het lusoppervlak van de return stroom

Om het lusoppervlak te verkleinen, is het gebruikelijk om de beide aardvlakken met meerdere op een bepaalde afstand van elkaar geplaatste via's te verbinden, dit heet *via stitching* en is geïllustreerd in fig. 4.11b. De afstand tussen de via's wordt gekozen zodat deze bij de operationele frequentie minder dan $\lambda/20$ [30, paragraaf 4.5] bedraagt, dit om te voorkomen dat er resonanties ontstaan. Door veel via's te gebruiken hoeft de stroom, onafhankelijk van de positie van het component op de printplaat, maar een kleinere afstand af te leggen naar het referentiepunt.

Om ongewenste koppeling van signalen te voorkomen, moet het lusoppervlak geminimaliseerd worden. Het is belangrijk om aardvlakken zo veel mogelijk vrij te houden van printsporen, via's (die niet met een ander aardvlak verbonden zijn) en andere dingen die het vlak onderbreken omdat deze voor een groter lusoppervlak kunnen zorgen. In fig. 4.12 is weergegeven hoe een RF-stroom niet het kortste pad kanafleggen door een rij via's dat het aardvlak onderbreekt.

4.11.6. Ontkoppeling

Het is van belang dat de voedingsspanning van een schakeling nagenoeg constant blijft, ongeacht de grootte van de belasting door de afzonderlijke IC's. Echter kunnen IC's die werken met snelle signalen kortstondig hoge stromen trekken, waardoor de uitgangsspanning van de regelaar in kan zakken. Als



Figuur 4.12: Invloed van via's in aardvlak

de uitgangsspanning onder de minimum voedingsspanning van een IC komt, dan kan deze raar gedrag gaan vertonen of uitvallen. Om dit te voorkomen worden bij de voedingspinnen van ieder IC één of meerdere condensatoren geplaatst welke deze stromen kunnen leveren.

Het equivalente circuit van een (SMT) condensator is een ideale condensator in serie met een kleine weerstand (ESR) en spoel (ESL) [31, blz. 13]. Dit equivalente circuit is een serieresonantie schakeling en bij frequenties boven de zelfresonantiefrequentie (SRF), gedraagt de condensator zich als spoel in plaats van een condensator. De SRF van condensatoren met hoge capaciteit ligt lager dan deze van condensatoren met een lagere capaciteit. Om te zorgen voor goede ontkoppeling bij een groot frequentiebereik, worden meerdere condensatoren met verschillende waarden parallel gezet.

Om de inductantie en daarmee de impedantie bij hoge frequentie van het printspoor zo laag mogelijk te houden, moet een ontkoppelcondensator zo dicht mogelijk bij een voedingspin van het IC worden geplaatst, dus ℓ moet zo klein mogelijk zijn in fig. 4.13a. De condensator moet met een lage impedantie met de aarde verbonden worden, dit wordt gedaan door één of meerdere via's naar een onderliggend aardvlak dicht bij de condensator te plaatsen. Tevens moet de voedingsaansluiting zo uitgevoerd worden dat de stroom uit de voedingspin via de condensator moet lopen. De condensator in fig. 4.13b is onjuist aangesloten en de condensator in fig. 4.13a is juist aangesloten.

4.12. Printontwerp zender

De layout van de bovenste en onderste koperlaag van de zender is gegeven in respectievelijk fig. 4.15 en fig. 4.16. De layout van de onderste koperlaag moet van bovenaf gezien worden, dus als men door de printplaat heen zou kijken, dit is tevens het gebruikelijke gezichtspunt van waaruit een ontwerp in een CAD programma getekend wordt.

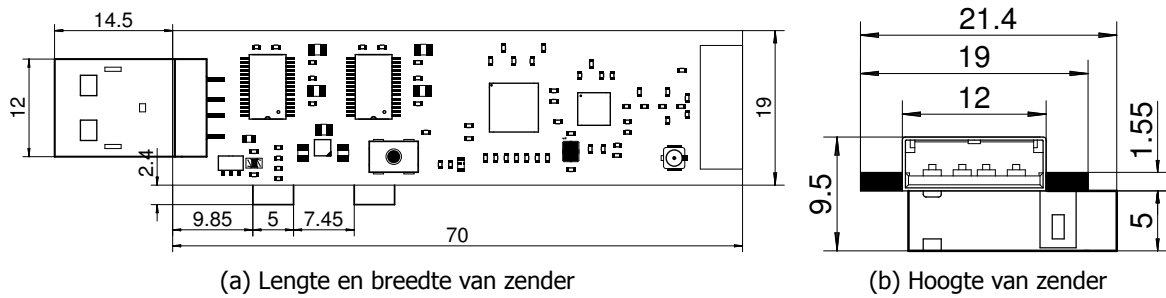
4.12.1. Afmetingen en plaatsing componenten

De lengte en breedte van de zendmodule zijn gegeven in fig. 4.14a, de hoogte is gegeven in fig. 4.14b. De zender is, exclusief USB connector, 70 mm lang, inclusief USB connector wordt dit 84,5 mm. De hoogte van de printplaat, inclusief USB- en audio-connectoren, is 9,5 mm. Met het voorgaande wordt aan eis [PvE 4.7] voldaan. Bij gebruik van digitale audio via de USB worden omliggende poorten niet geblokkeerd door ingestoken audio-jacks, er wordt dan ook aan eis [PvE 2.9] voldaan.

Alle componenten, met uitzondering van de audio-connectoren x1 en x2 en de DC blocking condensatoren c5 t/m c8 (zie fig. 4.16-II), worden op de bovenzijde van de printplaat bevestigd. Bij massaproductie zullen c5 t/m c8 handmatig moeten worden gesoldeerd, of worden vastgelijmd zodat



Figuur 4.13: Juiste en onjuiste ont koppeling van een voedingspin



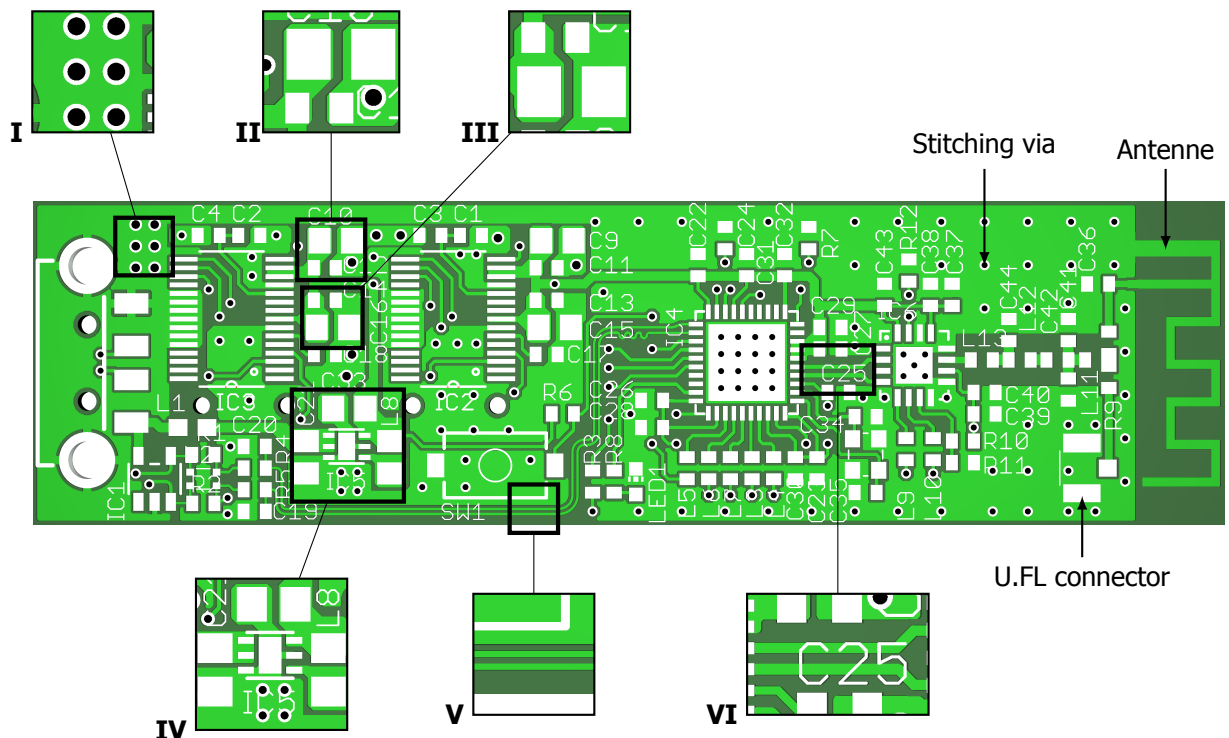
Figuur 4.14: Afmetingen van de zender

ze in een reflow oven gesoldeerd kunnen worden. De audio-connectoren zullen met de hand moeten worden gesoldeerd omdat deze niet bestand zijn tegen reflow solderen.

De CC8531 wordt geprogrammeerd via connector J1 op de onderkant van de printplaat. De ruimte op de onderzijde van de printplaat is erg beperkt, er is daarom gekozen om geen fysieke connector te plaatsen. In plaats daarvan zijn enkel acht soldeereilanden gebruikt. In een productieomgeving kan dan met geveerde testpennen het IC geprogrammeerd worden.

4.12.2. Opdeling in functieblokken

In paragraaf 4.11.4 zijn de voordelen van een steraarde beschreven. In de layout van de zender is om deze redenen een steraarde gebruikt. Er is onderscheid gemaakt tussen analoge aarde (AGND), digitale aarde (DGND) en RF-aarde (RFGND), welke ieder een eigen aardvlak hebben en samenkomen in het punt in fig. 4.15-I. Het zou beter zijn om de drie aardvlakken direct bij de voeding in fig. 4.16-IV met elkaar te verbinden, helaas was dit door ruimtegebrek niet mogelijk.



Figuur 4.15: Zender bovenkant

De PCM1861 ADC's zijn uitgerust met voedingpinnen voor AVDD, DVDD en IOVDD, voor respectievelijk analoge voeding, digitale voeding, en voeding voor de I/O pinnen. De voeding voor de I/O pinnen kan desgewenst vastgelegd worden op 1.8V. Zo kan de PCM1861, werkend op een voedingspanning van 3.3V, communiceren met IC's die op een 1.8V voedingspanning werken, zonder hierbij hun I/O

pinnen te beschadigen. Omdat alle door ons gebruikte IC's op een voedingsspanning van 3,3V werken, is gekozen om IOVDD te verbinden met DVDD.

De digitale en analoge voedingspinnen zijn ieder afzonderlijk ontkoppeld met een 100 nF en een 10 µF condensator naar respectievelijk DGND (C9 en C11) in fig. 4.15-II en AGND (C13 en C15) in fig. 4.15-III. De condensatoren zijn met meerdere via's naar de onderliggende aardvlakken verbonden zoals beschreven is in paragraaf 4.11.6. In fig. 4.16 zijn de locaties van de drie aardvlakken AGND, DGND en RFGND gegeven.

4.12.3. Layout voedingscircuit

De layout van de buck-regelaar TPS62291 is gegeven in fig. 4.15-IV. Deze layout is gebaseerd op de layout die beschreven wordt in het gegevensblad [10, blz. 17] van de TPS62291. De 10 µF in- en uitgangscapacitors C21 en C33 en de 4,7 µH spoel L8, zijn zo dicht mogelijk bij het IC geplaatst om zo de inductantie van de printsporen te beperken en ongewenste spanningspieken op de uitgang te voorkomen.

Onder het IC is de ingangscapaciteit C21 met de aarde verbonden en deze aarde is met vier via's naar het aardvlak eronder verbonden. In het gegevensblad [10] wordt aangeraden om het punt onder de TPS62291 als steraarde te gebruiken.

De spanningsregelaar is tussen beide audioconnectoren in op de andere zijde van de printplaat geplaatst. De buck-regelaar zou kunnen storen op het ontvangen audio signaal, echter de TPS62291 schakelt op een frequentie van 2,25 MHz, dit is ver boven het frequentiebereik van het audiosignaal (max. ongeveer 20 kHz) en zal dus verwijderd worden door het ingangfilter van de PCM1861.

4.12.4. Breedte van printsporen

Het printspoor dat de 5V spanning, VBUS, van de USB-poort met de ingang van de spanningsregelaar TPS62291 verbindt en de 3,3V voedingslijn dat de uitgang van de spanningsregelaar verbindt met de voedingspinnen van de verschillende IC's, zijn breed (22 mils) uitgevoerd. Dit is zo gedaan omdat deze spanningsbus de stroom voor de gehele schakeling moet vervoeren en dus een zo laag mogelijke impedantie moet hebben om verliezen te beperken. In het ideale geval was hier een power plane voor gebruikt in het geval dat vier lagen gebruikt zouden worden.

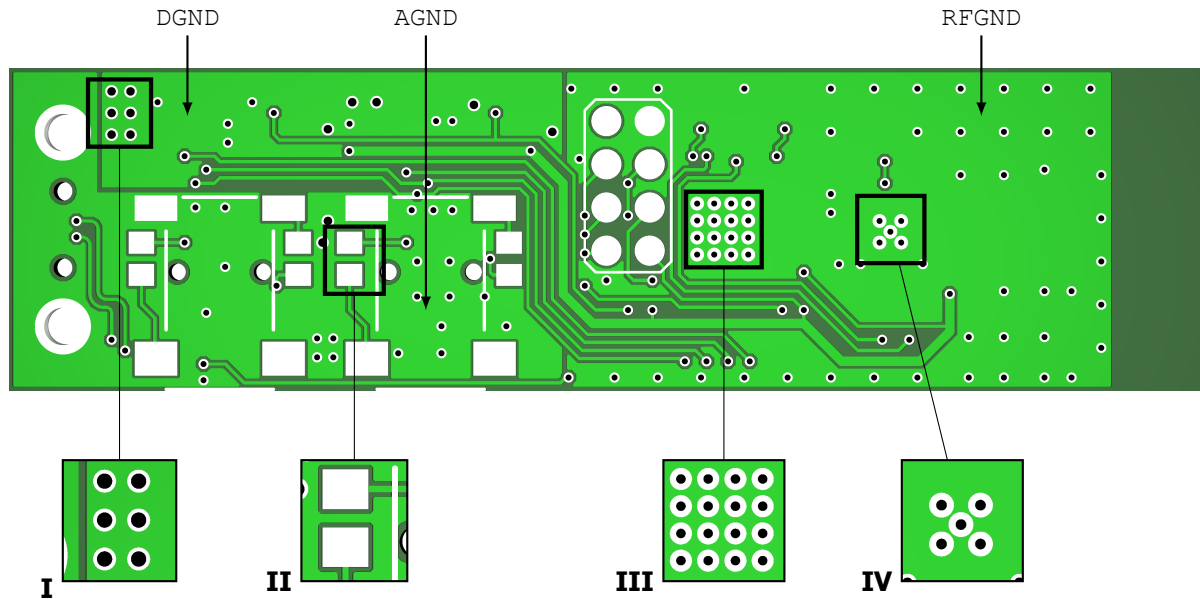
Communicatie via USB geschiedt via de twee differentiele signalen D+ en D-, waarbij het signaal gegeven wordt door het verschil van D+ en D- te nemen. Als de afstand tussen beide signaallijnen klein is, dan zullen zij nagenoeg dezelfde ruis uit de omgeving ontvangen. Deze gecorrigeerde ruis kan verwijderd worden door het verschil van beide signalen te nemen. Hier ligt het grote voordeel van het gebruik van een differentieel signaal. Het cruciale punt hier is dat beide signalen zo dicht mogelijk bij elkaar moeten liggen, er is dan ook gekozen om de signalen D+ en D- zo dicht mogelijk naast elkaar te routen bij gebruik van de minimale spoorbreedte van 6 mils.

Printsporen die hoogfrequente signalen vervoeren moeten zo breed en kort mogelijk worden gemaakt omdat anders hun impedantie op 2,4 GHz te hoog wordt. De breedte van deze printsporen kan het beste gelijk worden genomen aan de breedte van het soldeereiland dat ermee verbonden is.

4.12.5. RF-gedeelte

Het hoogfrequent- ofwel RF-gedeelte van de layout van de zender bevat een aantal punten waar extra aandacht aan moet worden besteed. In paragraaf 4.11.1 is beschreven dat digitale signalen relatief veel ruis produceren. Dit gegeven is van belang bij het routen van signalen in de buurt van de onversterkte antennesignalen RF_N en RF_P tussen de CC8531 en de C2590. Bij het verzenden van data door de CC8531 worden de signalen RF_N en RF_P versterkt door de geïntegreerde power amplifier (PA) van de C2590, die de antenne aanstuurt. De signalen RF_N en RF_P zijn nog vrij zwak en zijn daardoor gevoelig voor ruis. Het is dan ook van belang om geen digitale signalen onder of vlak naast RF_N en RF_P in fig. 4.15-VI te routen en bij voorkeur ook niet onder de feedline tussen de C2590 en de antenne.

In het hoogfrequente deel van het printontwerp van zowel de zender als de ontvanger is op zowel de onder- als de bovenkant een aardvlak aangebracht. Dit zorgt voor een laag-impedantie pad naar aarde bij hoge frequenties. De aarde-aansluiting van de CC853x (fig. 4.16-III) en de C2590 (fig. 4.16-IV) wordt gevormd door een soldeereiland aan de onderkant van de chip, dit vlak is met een aantal via's verbonden met het RFGND-vlak aan de onderzijde van de printplaat.



Figuur 4.16: Zender onderkant, van bovenaf gezien

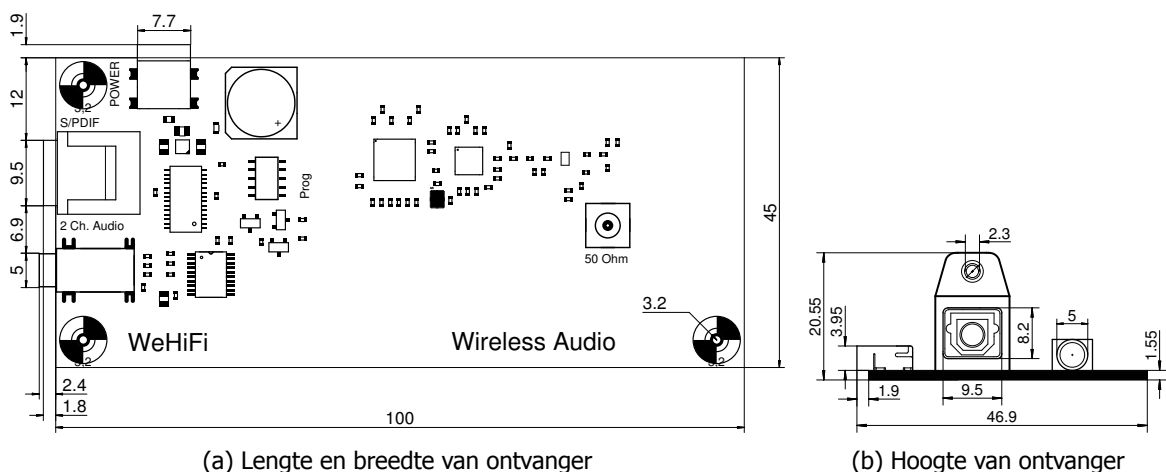
De aardvlakken aan de boven- en onderzijde van de printplaat zijn met elkaar verbonden met behulp van *stitching via's*, die op een afstand van 100 mil's ofwel $2,54 \text{ mm} \approx \lambda/50 < \lambda/20$ van elkaar zijn geplaatst, zie hiervoor paragraaf 4.11.5.

4.13. Printontwerp ontvanger

In fig. 4.18 en fig. 4.19 is de layout van respectievelijk de bovenste- en onderste koperlaag van de printplaat van de ontvanger gegeven.

4.13.1. Afmetingen en plaatsing componenten

De lengte en breedte van de printplaat van de ontvanger zijn gegeven in fig. 4.17a. De ontvanger is inclusief Mini-USB connector 46,9 mm breed en inclusief audio jack 102,4 mm lang. De hoogte van de ontvanger is gegeven in fig. 4.17b en is 19 mm. Met deze afmetingen voldoet de ontvanger aan eis [PvE 4.8].



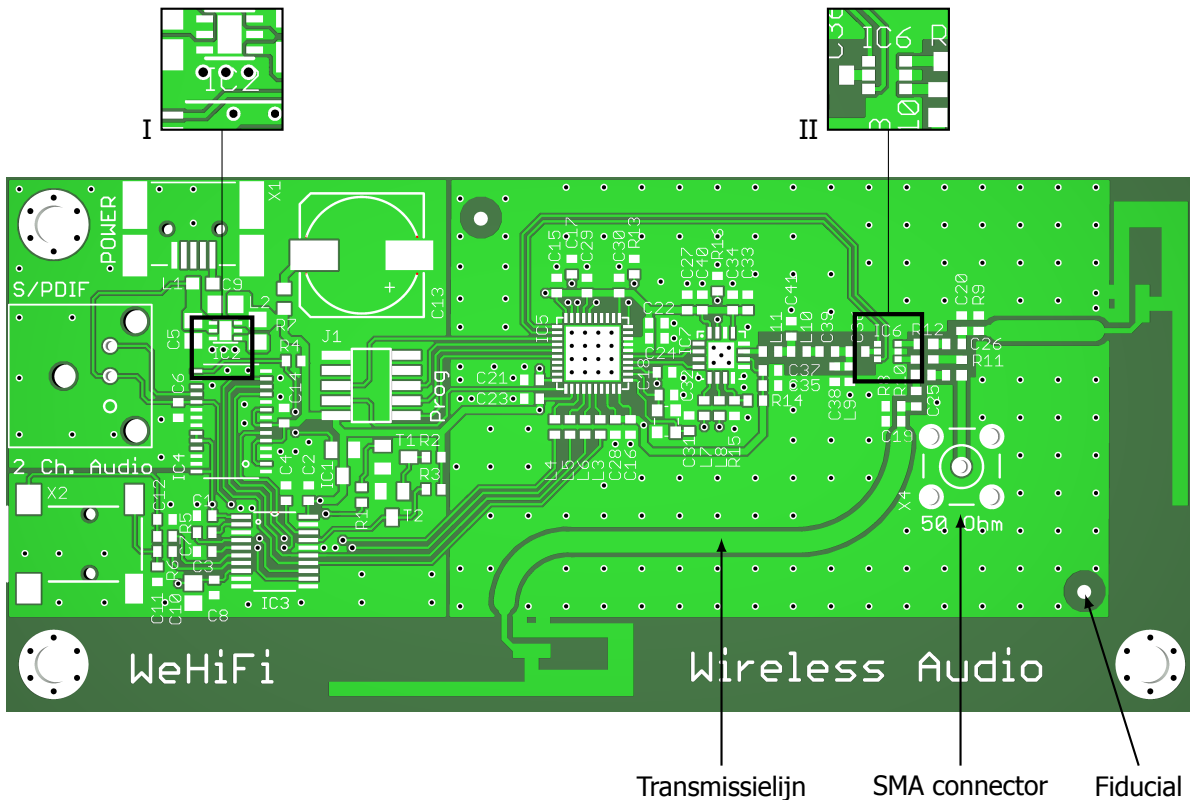
Figuur 4.17: Afmetingen van de ontvanger

Op de printplaat van de ontvanger zijn drie M3 montage gaten geplaatst. Er is geen vierde montagegat in de rechter bovenhoek geplaatst omdat deze dan te dicht bij de antenne in de buurt zou

zitten. Er zijn twee zogenaamde *fiducials* geplaatst op de printplaat, dit zijn twee stippen waarmee het soldeerpastastencil (zie paragraaf 4.14) kan worden uitgelijnd.

4.13.2. Opdeling in functieblokken

Het printontwerp van de ontvanger is opgedeeld in een laagfrequent gedeelte en een hoogfrequent (RF) gedeelte, dit is duidelijk te zien in fig. 4.18. Er is onderscheid gemaakt tussen AGND, DGND en RFGND, zoals is aangegeven in fig. 4.19. De drie aardvlakken komen samen bij de TPS62291 in het punt fig. 4.15-I, de steraarde van de schakeling.



Figuur 4.18: Ontvanger bovenzijde

4.13.3. RF-Gedeelte

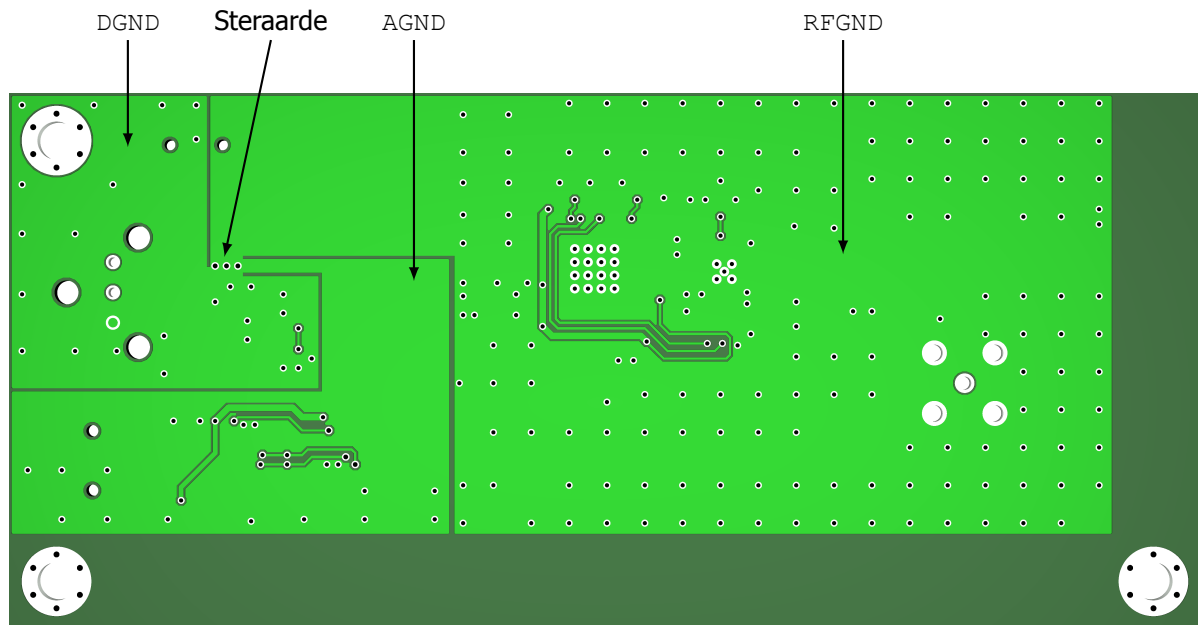
De layout van het RF-gedeelte voor de antenneswitch, is nagenoeg gelijk aan dat op de zender, zie hiervoor paragraaf 4.12.5. De antenneswitch is te zien in fig. 4.18-II. Na de antenneswitch is een aantal driewegs 0402 footprints geplaatst, hiermee kunnen met $0\ \Omega$ weerstanden de antennes aangesloten worden op de antenneswitch, of kan één van de antennes aangesloten worden op de SMA connector.

In het RF-gedeelte van de printplaat is opnieuw zowel onder als boven een aardvlak aangebracht die met *stitching via's* met elkaar verbonden zijn, dit is duidelijk te zien in fig. 4.19. Er is geprobeerd om zowel onder als boven op de printplaat het aardvlak zo uniform mogelijk te houden. Het was echter onvermijdelijk dat een aantal printsporen aan de onderkant van de printplaat het aardvlak moesten doorkruisen.

4.14. Assemblage van de printplaten

Nadat het printontwerp van de zender en ontvanger afgerond was, is van beide ontwerpen samen een paneel gemaakt, dit is weergegeven in fig. 4.20b. De twee ontwerpen zijn met *breakaway tabs* met elkaar verbonden. Na het monteren van de componenten kunnen de printplaten van het paneel gescheiden worden door deze tabs bij de *mouse bites* (een rij van kleine boorgaten) af te breken.

De meeste condensatoren en weerstanden zijn in 0402 formaat. Dit formaat is met de hand te solderen, maar dat duurt vrij lang. De CC853x en de CC2590 hebben een QFN behuizing met een

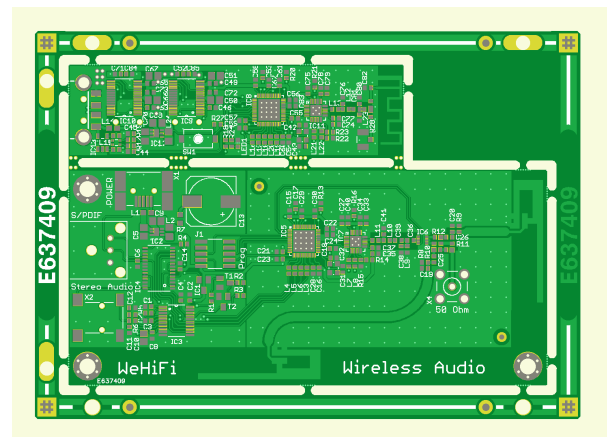


Figuur 4.19: Ontvanger onderkant, van bovenaf gezien

aardvlak aan de onderkant. Dit aardvlak is niet met een soldeerbout bereikbaar en kan het beste op de printplaat gesoldeerd worden met behulp van een *reflow oven*. Voor het solderen met een reflow oven moet soldeerpaste op de printplaat worden aangebracht. Bij de CC853x, de CC2590 en de TPS62291 is in de datasheet aangegeven op welke plaatsen en hoeveel van deze soldeerpaste moet worden aangebracht. Het is niet mogelijk om dit zó precies met de hand te doen, daarom is bij Eurocircuits een soldeerpastastencil besteld, zie fig. 4.20a.



(a) Soldeerpaste stencil



(b) Paneel

Figuur 4.20: Soldeerpastastencil en gepaneliseerde ontwerpen

Na aanbrengen van de soldeerpaste met behulp van het stencil, kunnen de componenten met een *pick and place* machine op de printplaat worden gezet. Na plaatsen van de componenten kan het paneel in zijn geheel in de reflow worden gesoldeerd. Componenten met een plastic behuizing zoals de S/PDIF-connector en de audio jacks, worden met de hand gesoldeerd omdat deze niet bestand zijn tegen reflow solderen.

De *pick and place* machine, reflow oven en andere apparatuur die nodig was om de printplaten te assembleren waren aanwezig en beschikbaar bij de TU Delft, hiermee is aan eis [PvE 5.4] voldaan.

Tabel 4.9: Kosten prototype (excl. 21 % BTW)

	Prijs (€)
Componenten	80,30
CC Debugger	42,72
Printplaten	116,01
Soldeerpastastencil	39,32
Totaal	274,95

4.15. Kosten

4.15.1. Kosten Prototype

Het prototype moest bestaan uit één zender en twee ontvangers, maar uiteindelijk is er één zender en één ontvanger geproduceerd in verband met tijdsbeperkingen. Er zijn wel genoeg onderdelen besteld voor twee zenders en ontvangers met het oog op het maken van twee zenders en twee ontvangers. De kosten die gemaakt zijn voor het prototype staan in tabel 4.9. Uit de tabel volgt dat de totale kosten voor het produceren van twee zenders en twee ontvangers lager zijn dan €300. Dit betekent dat de totale kosten van het prototype ook lager liggen dan €300, hiermee is aan eis [PvE 5.2] voldaan.

4.15.2. Kosten bij massaproductie

In tabel 4.10 is een prijslijst gegeven voor het produceren van 1000 systemen van één zender met twee ontvangers. De aantallen en prijzen in de tabel zijn gebaseerd op volledig bestuikte printplaten, dus printplaten geconfigureerd voor zowel digitale- als analoge input en output. De prijs van één systeem is €47,03.

Tabel 4.10: Prijslijst voor massaproductie van 1000 systemen bestaande uit één zender en twee ontvangers

Type	Waarde	Package	Leverancier	Prijs p.st. €	Aantal	Totaal €
Weerstand	0 Ω	0402	Farnell	0,0003	17000	5,10
Weerstand	33 Ω	0402	Farnell	0,0060	2000	12,00
Weerstand	39 Ω	0402	Farnell	0,0060	1000	6,00
Weerstand	470 Ω	0402	Farnell	0,0030	4000	12,00
Weerstand	4.3 kΩ	0402	Farnell	0,0050	6000	30,00
Weerstand	56 kΩ	0402	Farnell	0,0050	3000	15,00
Weerstand	10 kΩ	0402	Farnell	0,0050	7000	35,00
Weerstand	100 kΩ	0402	Farnell	0,0050	2000	10,00
Weerstand	1.5 kΩ	0402	Farnell	0,0050	1000	5,00
Condensator	0.1 μF	0402	Farnell	0,0006	40000	24,00
Condensator	10 μF	0805	Farnell	0,0380	16000	608,00
Condensator	18 pF	0402	Farnell	0,0040	3000	12,00
Condensator	1 nF	0402	Farnell	0,0180	9000	162,00
Condensator	1 μF	0402	Farnell	0,0120	14000	168,00
Condensator	2.2 μF	0402	Farnell	0,0186	8000	148,80
Condensator	220 pF	0403	Farnell	0,0100	3000	30,00
Condensator	27 pF	0402	Farnell	0,0060	3000	18,00
Condensator	27 pF	0402	Farnell	0,0040	6000	24,00
Condensator	47 pF	0402	Farnell	0,0090	2000	18,00
Condensator	0.3 pF	0402	Farnell	0,0420	3000	126,00
Condensator	0.4 pF	0402	Farnell	0,0238	3000	71,40
Condensator	1.2 pF	0402	Farnell	0,0190	3000	57,00
Condensator	1.5 μF	G	Farnell	0,1940	2000	388,00
Spoel	2.7 nH	0402	Farnell	0,1110	3000	333,00
Spoel	2.0 nH	0402	Farnell	0,1140	3000	342,00
Spoel	4.7 μH	0805	Farnell	0,2820	3000	846,00
Spoel	6.8 nH	0402	Farnell	0,0644	19000	1223,60
Spoel	0.15 Ω, 2 A	0603	Farnell	0,1260	3000	378,00
LED	Blauwe led	0603	Farnell	0,0753	1000	75,30
Kristal	48 MHz	2.5X2.0	Farnell	0,0661	3000	198,30
TVS diode array	824011	SOT23-5	Farnell	0,5520	1000	552,00
Transistor	BC847	SOT23	Farnell	0,0150	4000	60,00
Audio jack	1503-02	1503-02	Farnell	1,6800	4000	6720,00
Mini-USB connector	MUSB	Mini-USB SMT	Farnell	0,3650	2000	730,00
USB plug	USB Plus SMT	CON-USB-ALP	Farnell	1,1100	1000	1110,00
S/PDIF transmitter	GP1FAV50TK0F	GP1FAV50TK0F	Farnell	0,3600	2000	720,00
Voltage supervisor	TLV803S	SOT23	Farnell	0,2800	2000	560,00
SMT header	PROG/DEBUG	1.27 mm header	Farnell	0,7260	2000	1452,00
Common mode choke	DLW21S	DLW21S	Farnell	0,2800	1000	280,00
Drukschakelaar	Reset	Tact switch SMT	Farnell	0,7130	1000	713,00
Antenneswitch	AS214-92LF	SC-70	Farnell	0,3250	2000	650,00
Digital audio interface	DIT4096	TSSOP28	TI	1,5200	2000	3040,00
Buck-regelaar	TPS62291	SON-6	TI	0,8000	3000	2400,00
Range extender	CC2590	VQFN16	TI	1,5500	3000	4650,00
Audio chip	CC8530	VQFN40	TI	2,8000	2000	5600,00
Audio chip	CC8531	VQFN40	TI	2,9500	1000	2950,00
ADC	PCM1861	TSSOP30	TI	1,9300	2000	3860,00
DAC	PCM5100	TSSOP20	TI	1,0500	2000	2100,00
PCB's zender			Eurocircuits	0,6390	1000	639,30
PCB's ontvanger			Eurocircuits	1,4322	2000	2864,38
Totaal (excl. 21% BTW) €						47032,18
Prijs per systeem €						47,03

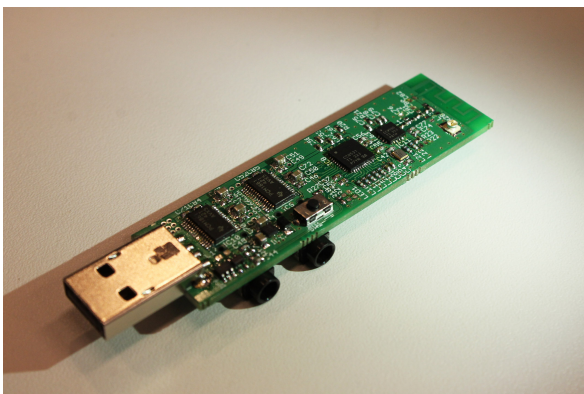
5

Resultaten

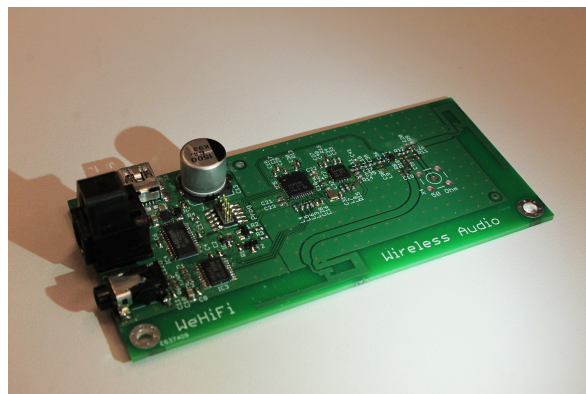
Het ontwerpproces heeft geleid tot het ontwerp van een systeem voor het draadloos oversturen van audiosignalen, bestaande uit één zender en één tot maximaal vier ontvangers. De zender kan óf een analogoog inputsignaal accepteren middels één of twee 3,5 mm-audiojacks óf digitale audio accepteren middels een USB-verbinding naar een pc (getest onder windows XP, windows 7 en fedora 20). De ontvanger levert zowel een analogoog uitgangssignaal middels een 3,5 mm-audiojack als een digitaal S/PDIF-uitgangssignaal middels een TOSLINK-aansluiting. Het prototype bestaat uit één zender en één ontvanger, zie fig. 5.1, waarbij de zender kan worden (her)geprogrammeerd om de keuze tussen analoge en digitale input te veranderen.

Het maximale bereik dat we hebben gehaald met het prototype is een afstand van ongeveer 2 m tussen de zender en de ontvanger. Hierbij waren de positionering en orientatie van de zender en ontvanger erg gevoelig voor veranderingen (beide moesten goed op hun plaats worden gehouden) en was de verbinding dus verre van stabiel. Op een afstand van ongeveer 30 cm tussen de zender en ontvanger was verbinding wel stabiel: op deze afstand was het gewoon mogelijk meer dan een uur muziek te luisteren zonder een onderbreking van het audiosignaal.

Met een korte afstand (ongeveer 20 cm) tussen de zender en ontvanger hebben wij vijf personen naar hun eigen muziek laten luisteren – via, en niet via ons systeem. Geen van al deze testpersonen kon kwaliteitsverlies opmerken tussen de twee situaties. Bij het uitschakelen van de spanning van de ontvanger was er echter wel in enkele gevallen een nare ‘plop’ te horen bij aangesloten luidsprekers.



(a) Foto van de zender



(b) Foto van de ontvanger

Figuur 5.1: Foto's van het prototype

6

Discussie

6.1. Bereik

Zoals bij de resultaten in hoofdstuk 5 te lezen is, was het behaalde bereik verre van de gewenste 15 m. Voor het verbeteren van ons systeem zou er gekeken moeten worden wat voor verbeteringen er doorgevoerd kunnen worden om een beter bereik te creëren. Hiervoor zouden er metingen gedaan moeten worden van het RF-signaal op de diverse plekken op zowel de zender als ontvanger om te kijken of de antenneversterker wel het gewenste vermogen op de uitgang zet, de transmissielijn voldoet aan de verwachte karakteristiek en/of dat er een ander soort antenne op de PCB's moet worden geplaatst.

Bij het plaatsen van de antennes in de PCB-layout van de ontvanger waren we uitgegaan van een afstand van minimaal $\frac{1}{2}\lambda$ tussen de twee antennes. Na het maken van het prototype ontdekten Niels en Frits echter dat de ideale afstand tussen de twee antennes gelijk is aan $0,4\lambda$, om de kans te maximaliseren dat er met één van de twee antennes een goed signaal wordt opgepikt.

Naast een andere ideale afstand tussen de antennes bij de ontvanger, hadden er ook nog enkele dingen beter gekund bij de transmissielijnen naar deze twee antennes. Bij het ontwerp zijn we ervan uitgegaan dat de transmissielijn goed gematched zou zijn de op de antenne en er dus geen compensatie nodig zou moeten zijn tussen de transmissielijn en de antenne. Dit matchen is echter puur theoretisch gedaan bij het ontwerpproces op basis van de verwachte karakteristieke impedanties. Het is echter aannemelijk dat de daadwerkelijke karakteristieke impedanties hiervan afwijken en er dus wel compensatie benodigd is tussen de antenne en de transmissielijn. Een mogelijke invloedsfactor hierop is ook dat we minder ruimte hebben aangehouden tussen de transmissielijn en het aardvlak op de bovenkant van de PCB, dan de ruimte die wordt aangehouden in veel referentieontwerpen. Als verbetering op het ontwerp zien wij dus ook meer ruimte tussen de transmissielijn en het aardvlak, en een mogelijkheid tot een compensatienetwerk tussen de transmissielijn en de antenne.

6.2. Algemene verbeteringen

Na het bouwen van het prototype bleken er diverse elementen niet te werken als gewenst. Op basis van deze bevindingen raden wij de volgende verbeteringen aan.

- De huidige zender moet worden hergeprogrammeerd om te wisselen tussen digitale input via USB en analoge input, doordat de CC85xx niet zowel USB-ondersteuning kan bieden als luisteren naar de I²S-input. Indien een aparte chip zou worden gebruikt voor de USB-ondersteuning, die het geluidssignaal omzet naar I²S, zou het mogelijk zijn een schakelaar op de zender te plaatsen om te schakelen tussen audio-input via USB en analoge audio-input.
- Met de huidige implementatie van de CC85xx worden bij het programmeren de ontvangers gekoppeld aan de zender door middel van het identificatienummer van de CC8531 van de zender. Indien in het systeem de zender of een ontvanger kapot gaat, is het daardoor voor de gebruiker niet mogelijk de kapotte onderdelen makkelijk te vervangen. De CC85xx biedt ondersteuning om twee chips binnen bereik binnen bereik van elkaar te koppelen door middel van op de IC aangesloten drukknoppen. Bij de zender is er wel een knop aangesloten op de CC8531 die

geprogrammeerd kan worden om hiervoor gebruikt te worden, maar bij de ontvanger is hier geen rekening mee gehouden. Het is een goede verbetering ook op de ontvanger een knop aan te sluiten op de CC85x0 om het koppelen van zenders en ontvangers mogelijk te maken voor gebruikers.

- Bij de implementatie van de PCM5100 bij de ontvanger was een transistorschakeling ontworpen om 'poppen' van een aangesloten luidspreker te voorkomen, maar dat bleek niet te werken. Dit is geen probleem als de versterker van de luidspreker de 'plop' wegfiltert, maar lang niet alle versterkers filteren daarop. De oorzaak van dit probleem bleek te liggen aan de implementatie van de spanningsomvormer [paragraaf 4.2.2]: op het moment dat de spanning op de 5V-lijn lager is dan de spanning op de 3,3V-lijn, zal er stroom terugvloeien, waardoor de spanning op de 5V-lijn minimaal even hoog zal zijn als de spanning op de 3,3V-lijn. Een oplossing zou zijn om een schakeling te maken die meet of de spanning op de 5V-lijn onder de 4V komt en op basis daarvan de demping aanstuurt.
- Bij de aansluiting om de CC85xx te programmeren (zowel bij de zender als bij de ontvanger) was de aansluiting voor signaal V_{Sense} niet doorverbonden met de 3,3V-lijn, wat wel had moeten. De CC Debugger gebruikt dit signaal om de aanwezige voedingsspanning van de IC te meten en te controleren of de CC85xx is voorzien van een goede voedingsspanning. Wij hebben met de hand dit signaal moeten doorverbinden met de voedingsspanning zodat het mogelijk was deze IC's te programmeren. Daarnaast is pin 9 hardwarematig met de voedingsspanning verbonden, waardoor de ontvanger niet extern gevoed kan worden bij het programmeren. Beter zou zijn geweest om 3,3V via een jumper met pin 9 van de connector te verbinden, zodat gekozen kan worden tussen externe en interne voeding.
- Op de zender is een status-LED aan de CC8531 aangesloten, dit is niet gedaan op de ontvanger. Het bleek toch wel handig om enige indicatie te hebben van de toestand van de ontvanger, dus zou het beter zijn geweest als een LED geplaatst was. Naast een status-LED aangesloten op de CC85x0 om de verbindingstatus van de ontvanger te bekijken, zou het voor antennetests ook interessant zijn om een indicatieled aan te sluiten op het stuursignaal van de antenneswitch. Er kan dan met een makkelijke methode gekeken worden welke van de twee antennes op dat moment gebruikt wordt om het signaal te ontvangen.
- In het stencil dat gebruikt is om de soldeerpaste op de PCB's aan te brengen, zaten geen gaten voor een montageraam. Hierdoor was het niet mogelijk het stencil goed strak op de PCB te bevestigen, maar hebben wij met tape het stencil bevestigd. Dit resulteerde erin dat er een kleine ruimte zat tussen de PCB en het stencil waarin bij het aanbrengen van de soldeerpaste ongewenst soldeerpaste terecht kwam. Na het bakken van de PCB in de oven gaf dit her en der op de chip kortsluitingen door een overschot aan soldeerpaste, wat wij naderhand handmatig hebben moeten herstellen. We weten niet of het ontbreken van de gaten voor het montageraam een fout is van eurocircuits of dat wij het ergens expliciet hadden moeten aangeven, maar we raden eenieder aan om hier goed op te letten bij het bestellen van een PCB met stencil.

6.3. Connectoren

Voor alle connecties op de zender en ontvanger zijn er keuzes gemaakt. Dit zijn veelal keuzes waarmee we tevreden zijn, maar met name qua connectoren om de antennes te testen had er het een en ander verbeterd kunnen worden. In deze paragraaf noemen we de verbeterpunten op die connectoren betreffen, alsmede een suggestie voor connectoren om het systeem te verbeteren.

- De USB connector op de zender valt voor een deel over het uiteinde van de printplaat heen. Bij het ontwerp van de printplaat is de connector echter een fractie van een millimeter te ver naar binnen geplaatst. Het resultaat is dat de connector niet over de rand van de printplaat heen valt en dat hier een stukje af moest worden geveild. Bij een volgende revisie moet de connector verder naar de rand toe worden geplaatst.
- Op de printplaat van de zender is een 50 Ω U.FL connector geplaatst om metingen te kunnen doen aan de antenne. De gebruikte meetapparatuur (een network analyzer) wordt echter aangesloten via een 50 Ω SMA-connector. Het zou beter zijn geweest om een zijwaartse SMA-connector te

gebruiken, welke aan de zijkant over de printplaat heen wordt geschoven. De meetapparatuur kan hier dan zonder verloopkabel op worden aangesloten.

- Op de ontvanger is een footprint voor een SMB-connector geplaatst omdat deze connectoren al op voorraad waren. De meetapparatuur is echter gekalibreerd voor SMA-connectoren. Om een correcte meting uit te voeren moest dus een SMA-connector op de print worden gesoldeerd. Het probleem is dat de signaalpin van een SMA-connector dikker is dan die van een SMB-connector, waardoor deze niet in de footprint paste. De SMA-connector kon wel bovenop de printplaat worden gesoldeerd, dit was echter mechanisch veel minder stevig.
- De ADC's van de zender bieden de mogelijkheid om meerdere analoge ingangen aan te sluiten en met behulp van een stuursignaal te schakelen tussen deze ingangen. Omdat het idee is om de ontvangers in te bouwen in luisprekers met ingebouwde versterkers, kan het zeer nuttig zijn hiervan gebruik te maken. De zender zou dan in hifi-systemen de huidige plek van de versterker innemen, waarop mensen zowel een televisie, een cd/dvd-speler als een radiotuner aansluiten. De aansturing voor de `PCM1861` om te schakelen tussen de inputs zou dan het beste kunnen gebeuren door een extra IC waarop zowel knoppen als een infrarood-ontvanger kunnen worden aangesloten. In die situatie kan het namelijk mogelijk zijn zowel knoppen op de zender te hebben om te schakelen tussen de inputsignalen alsmede daarvoor gebruik te maken van een afstandsbediening.
- Op de printplaat van de zender is een U.FL connector geplaatst die kan worden doorverbonden met de antenne. De apparatuur die gebruikt wordt om metingen aan de antenne te doen is uitgerust met een SMA-connector. Om metingen te doen aan de zender moest een U.FL naar SMA-converterkabel worden besteld. Bij het bestellen van deze kabel is er per ongeluk een besteld met een *reverse polarity* SMA-connector. Deze connector kon niet op de meetapparatuur worden aangesloten en er moest een andere kabel besteld worden.

6.4. Printontwerp

Ondanks de beperkte kennis die wij bij aanvang van het project hadden over het ontwerpen van PCB's, hebben we een werkend prototype weten te maken. Uiteraard gaat niet alles in één keer goed en dus zijn er nog enkele verbeterpunten waar we bij het ontwerp geen rekening mee hadden gehouden.

- Bij de zender is de afstand van de antenne tot de rand van de PCB zeer klein. Bij het losmaken van de zender uit de geleverde printplaat breekt de PCB bijna door de koperlaag van de antenne heen. Het zou goed zijn om iets meer marge aan te houden tussen de antenne en de rand van de PCB.
- Op zowel de printplaat van de ontvanger, als die van de zender is het 3,3V voedingsspoor een aantal keer met een via naar de andere zijde van de printplaat gebracht. Dit is echter met maar één enkele via gedaan. De zender en ontvanger trekken ieder maximaal een stroom van ongeveer 100 mA, deze stroom loopt dus ook door deze enkele via. Beter zou zijn geweest om het voedingsspoor met meerdere parallele via's naar de andere zijde van de printplaat te brengen.
- Bij het ontwerpproces hebben we de zender en de ontvanger in aparte eagle-bestanden ontworpen. Bij het samenvoegen van de PCB-layouts naar een enkel bestand zijn door de software alle componenten hernummerd (in de ontwerpen van de zender en ontvanger kwamen eerst dezelfde nummers voor). Pas toen de PCB's geleverd werden, merkten we op dat de componentnummering op de PCB's niet overeenkwam met de componentlijsten die we hadden gemaakt. Dit had als nadeel dat er bij het plaatsen van de componenten op de PCB niet simpelweg kon worden gekeken naar de nummering op de PCB, maar dat er een apart blad met de layout en de componentwaardes gebruikt moest worden.

7

Conclusie

7.1. Eisen vanuit het beoogde gebruik

Het systeem werkt in bijna alle opzichten zoals bedoeld. Een punt van aandacht is dat bij de zendmodule niet makkelijk gewisseld kan worden tussen de digitale en de analoge ingang. Dit kan namelijk alleen door de CC85xx opnieuw te programmeren, iets dat niet door de eindgebruiker gedaan zal worden.

Het systeem kan niet direct op een versterkeruitgang aangesloten worden, omdat deze uitgangen boven 2,1 V komen. Verder is de zendmodule nog iets te hoog om geen naastliggende USB-poort te blokkeren.

- ~ Het systeem werkt als vervanging van een bekabelde audio-verbinding voor muziek- en entertainmentinstallaties.
- ✓ Het systeem bestaat uit minimaal twee modules: één zender, één of meerdere ontvangers.
- ✓ Er is geen kabelverbinding tussen de zender en ontvanger nodig voor gebruik.
- ✓ Het systeem kan ongemoduleerde, analoge elektrische audiosignalen met een RMS-spanning tot 2,1 V als ingangssignaal accepteren.
- ✓ Het systeem kan ongemoduleerde, analoge elektrische audiosignalen met een RMS-spanning niet hoger dan 2,1 V aanbieden aan een uitgang.
- ~ Het systeem kan digitale audio als ingangssignaal accepteren, via een USB-aansluiting.
- ✓ Het systeem kan een S/PDIF-signaal aanbieden via TOSLINK.
- ✓ Het analoge ingangssignaal wordt aangeboden via twee stereo 3,5 mm audio jacks.
- ✗ De zender moet in een USB-poort gebruikt kunnen worden, zonder omliggende poorten te blokkeren.
- ✓ Het systeem hoeft niet te worden geconfigureerd voordat het gebruikt kan worden.
- ✓ Er is geen merkbaar kwaliteitsverlies bij gebruik van het systeem.

7.2. Eisen vanuit de ecologische situering van het systeem in de omgeving

De modules werken op de vereiste frequentie en onder het maximum zendvermogen. Er zijn geen metingen verricht met betrekking tot elektromagnetische emissies op andere frequenties.

- ✓ De draadloze transmissie moet plaatsvinden in de internationaal vrije 2,4 GHz band.
- ✓ Het zendvermogen mag niet meer zijn dan 100 mW EIRP zijn.

- ? De modules moeten voldoen aan R&TTE 1999/5/EC, ETSI EN 300 440, ETSI EN 301 489. Het prototype hoeft nog niet aan deze eisen te voldoen.
- ✓ Alle gebruikte onderdelen moeten voldoen aan de Nederlandse RoHS-richtlijn.

7.3. Gebruikskennmerken

Het bereik van het systeem valt met 2 m ver beneden het doel. Het is daarnaast door tijdbeperving niet gelukt om een meting van de SNR te verrichten. Wel is het systeem meerdere uren op korte afstand gebruikt, zonder dat er een onderbreking in het geluid optrad.

- ✓ De zender moet minimaal vier audiokanalen ondersteunen.
- ✓ De ontvanger moet uit het signaal minimaal twee audiokanalen kunnen filteren en ondersteunen.
- ✓ De digitale ingangs- en uitgangssignalen moeten minimaal een bemonsteringsfrequentie hebben van 48 kHz en 16 bit kwantisatie.
- ✓ Er kunnen minstens vier ontvangers gebruikt worden in het systeem.
- ✓ De modules moeten werken op een voedingsspanning van $(5,0 \pm 0,5)$ V.
- ✓ De voeding gebeurt door middel van een USB-aansluiting, de modules moeten voldoen aan de USB-standaard.
- ✓ Eis 2.9 limiteert de breedte en dikte van de zender en de zender moet een handzame lengte hebben om als USB-stick te worden aangesloten op een computer. Zodoende zijn de maximale afmetingen voor de printplaat met componenten erop 19 mm breed, 10 mm dik en 100 mm lang. Het eerste prototype hoeft nog niet aan deze afmetingen te voldoen.
- ✓ De ontvanger moet ingebouwd kunnen worden in luidsprekers van diverse formaten. De maximale afmetingen voor de printplaat met componenten erop is daarom 7,5 cm breed, 15 cm lang en 2 cm dik.
- ? Het systeem werkt correct als a) de SNR, bij aanbieden van een sinusvormig signaal met een frequentie tussen 30 Hz en 20 kHz en maximale amplitude, ten minste 85 dB bedraagt b) bij gebruik van de digitale in- en uitgang, het uitgangssignaal identiek is aan het ingangssignaal c) er maximaal 1 onderbreking in het audiosignaal van maximaal 1 s is per uur.
- ✗ Het systeem moet binnenshuis correct werken tot minimaal 15 m onder voorwaarde dat er zich geen voorwerpen direct tussen de zender en ontvanger bevinden.

7.4. Productie-eisen

Het prototype bestond uit één zenderbordje en slechts één ontvangerbordje, de overige doelen zijn behaald.

- ✗ Er moeten als prototype minimaal twee ontvangerbordjes en één zenderbordje worden geproduceerd.
- ✓ De totale kosten voor het prototype (inclusief componenten) mogen niet meer bedragen dan €300 exclusief BTW.
- ✓ De productiekosten per systeem (één zender, twee ontvangers) mogen niet hoger zijn dan €50 exclusief BTW.
- ✓ De componenten moeten met behulp van enkel de faciliteiten beschikbaar aan de TU Delft op de printplaat bevestigd kunnen worden.
- ✓ Het prototype moet vóór 13 juni 2014 geproduceerd zijn.

7.5. Liquidatie-eisen

Met uitzondering van de TOSLINK connector zijn alle componenten door verhitting te verwijderen.

- ~ De componenten moeten door middel van verhitten weer van de printplaat gescheiden kunnen worden.

8

Reflectie

Terugkijkend op het project constateren we dat een aantal aspecten niet optimaal zijn aangepakt. Vooral eerst had er meer communicatie vóór de officiële startdatum van het project plaats moeten vinden. Er was dan eerder een afspraak onze begeleider mogelijk geweest, om een en ander te verduidelijken. Helaas was dit lastig vanwege de late definitieve groepsindeling en verschillende tentamens die de groepsleden nog moesten afleggen.

De afspraken over wanneer wat precies klaar moest zijn waren vrij los en werden pas gemaakt wanneer absoluut noodzakelijk. Deze afspraken hadden eerder en duidelijker gemaakt moeten worden. Met een duidelijk overzicht is beter bij te houden welke producten, ontwerpen, en beslissingen afhangen van een andere. Daarmee waren een aantal knelpunten in het proces misschien eerder opgemerkt.

Een positief punt, is de communicatie over de implementaties van de verschillende deelsystemen. Alle groepsleden verschaften snel duidelijke informatie over de functies en aansluitmogelijkheden. Hierdoor zijn tussentijds weinig aanpassing nodig geweest aan de ontwerpen.

Een duidelijke tekortkoming is dat we pas het verslag zijn gaan schrijven nadat het prototype daadwerkelijk gemaakt was. Tijdens het ontwerp zijn niet alle gebruikte bronnen en genomen beslissingen goed bijgehouden, wat veel tijd kostte bij het schrijven van het verslag. Het zou veel beter zijn geweest om tijdens het ontwerpen al een concept te schrijven. Daartegenover stond dat het gebruikte systeem – \LaTeX met de TU Delft huisstijl op SVN – vrij goed werkte. Ook hadden de groepsleden hier al ervaring mee opgedaan tijdens het literatuuronderzoek.



Procesverslag

A.1. Verdeling werk

Het werk is tijdens het project vrij organisch verdeeld. Chris was eindverantwoordelijk voor het PCB-ontwerp, waarbij Rens de ontvang-module heeft ontworpen. Lars was verantwoordelijk voor het gebruik en programmeren van de CC85xx IC's. De deelschakelingen zijn door Rens of Lars ontworpen, en daarna door de ander gecontroleerd.

A.2. Verdeling thesis

1 Samenvatting	Rens
2 Inleiding	Rens
3 Programma van eisen	allen
4.1 Systeemoverzicht	Lars
4.2 Voeding van modules	Lars
4.3 Zendmodule	Rens
4.3.3 Firmware CC85xx	Lars
4.4 Antenneversterker	Rens
4.5 Antenneswitch	Rens
4.6 Analoog-digitaalomzetter	Rens
4.7 Digitaal-analoogomzetter	Rens
4.8 S/PDIF-converter	Rens
4.9 Circuit	Lars
4.10 Materiaalkeuze printplaat	Chris
4.11 Aandachtspunten printontwerp	Chris
4.12 Printontwerp zender	Chris
4.13 Printontwerp ontvanger	Chris
4.14 Assemblage van de printplaten	Chris
4.15 Kosten	Chris
5 Resultaten	Rens
6 Discussie	Chris & Rens
7 Conclusie	Rens & Lars
8 Reflectie	Lars

Bibliografie

- [1] *CC85xx Family User's Guide*, Texas Instruments, fw1.4.1 ed. (2012).
- [2] *Digital audio interface - part 3: Consumer applications*, <http://www.nhzjj.com/asp/admin/editor/newsfile/201016154710894.pdf> (2006).
- [3] *Universal serial bus 3.1 specification*, http://www.usb.org/developers/docs/usb_31_031114.zip (2013).
- [4] JBL, *Jbl wireless speakers*, <http://www.jbl.com/estore/jbl/us/shop/Wireless/cat70007>.
- [5] Bose, *Bose soundlink (bluetooth)*, <http://www.bose.nl/NL/nl/home-and-personal-audio/bluetooth-ipod-speakers/bluetooth-speakers/soundlink-bluetooth-speaker-iii>.
- [6] *Advanced audio distribution profile specification*, https://www.bluetooth.org/docman/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=260859&vId=290074 (2012).
- [7] M. Engjom, *Application note AN032*, <http://www.ti.com/lit/an/swra060/swra060.pdf> (2005).
- [8] C. Perkins, O. Hodson, and V. Hardman, *A survey of packet loss recovery techniques for streaming audio*, *IEEE Network* **12**, 40 (1998).
- [9] L. W. Couch, II, *Digital and Analog Communication Systems International Version* (Pearson Education, Inc., 2007).
- [10] *1-A Step Down Converter in 2 x 2 SON Package*, Texas Instruments (2008).
- [11] G. GBS Elektronik, *Choosing the correct usb cable for your mca527*, http://www.gbs-elektronik.de/fileadmin/download/manuals/TN_Choosing_USB_Cable.pdf (2012).
- [12] *3-V to 17-V 2-A Step-Down Converter in 3x3 QFN Package*, Texas Instruments (2013).
- [13] *3-17V 1A Step-Down Converter in 3x3 QFN Package*, Texas Instruments (2013).
- [14] *3-17V 0.5A Step-Down Converter with DCS-Control*, Texas Instruments (2013).
- [15] *3-MHz 1.6A Step Down Converter in 2x2 SON Package*, Texas Instruments (2011).
- [16] *1.2A High Efficient Step Down Converter with Snooze Mode*, Texas Instruments (2013).
- [17] *nRF24Z1 2.4 GHz wireless audio streamer*, Nordic Semiconductor (2010).
- [18] *XInC2 Datasheet*, Eleven Engineering (2007).
- [19] *I2s bus specification*, <https://sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf> (1986).
- [20] Texas Instruments, *Inductors on peripheral lines*, http://e2e.ti.com/support/wireless_connectivity/f/155/p/41401/145148.aspx#145148 (2010).
- [21] *CC Debugger User's Guide*, Texas Instruments (2014).
- [22] *PurePath Wireless Configurator Manual*, Texas Instruments, 1st ed. (2013).

- [23] S. W. Smith, *The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing* (California Technical Pub, 1997).
- [24] *2VRMS DirectPath, 112/106/100dB Audio Stereo DAC with 32-bit, 384kHz PCM Interface*, Texas Instruments (2012).
- [25] *96kHz Digital Audio Transmitter*, Texas Instruments (2003).
- [26] *Small Size 2.4 GHz PCB antenna* (2006).
- [27] *2.4 GHz Inverted F Antenna*, Texas Instruments (2007).
- [28] *Richtlijn 2002/95/eg van het europees parlement en de raad van 27 januari 2003 betreffende beperking van het gebruik van bepaalde gevaarlijke stoffen in elektrische en elektronische apparatuur*, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0095:nl:HTML> (2003).
- [29] T. H. Hubing, T. P. van Doren, and J. L. Drewniak, *Identifying and quantifying printed circuit board inductance*, in *Proceedings of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility* (Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), Chicago, IL, 1994) pp. 205–208.
- [30] M. I. Montrose, *EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple* (Wiley-IEEE Press, 1999).
- [31] A. P. Alexander Weiler, *High-speed layout guidelines*, Texas Instruments Application , 1 (2006).