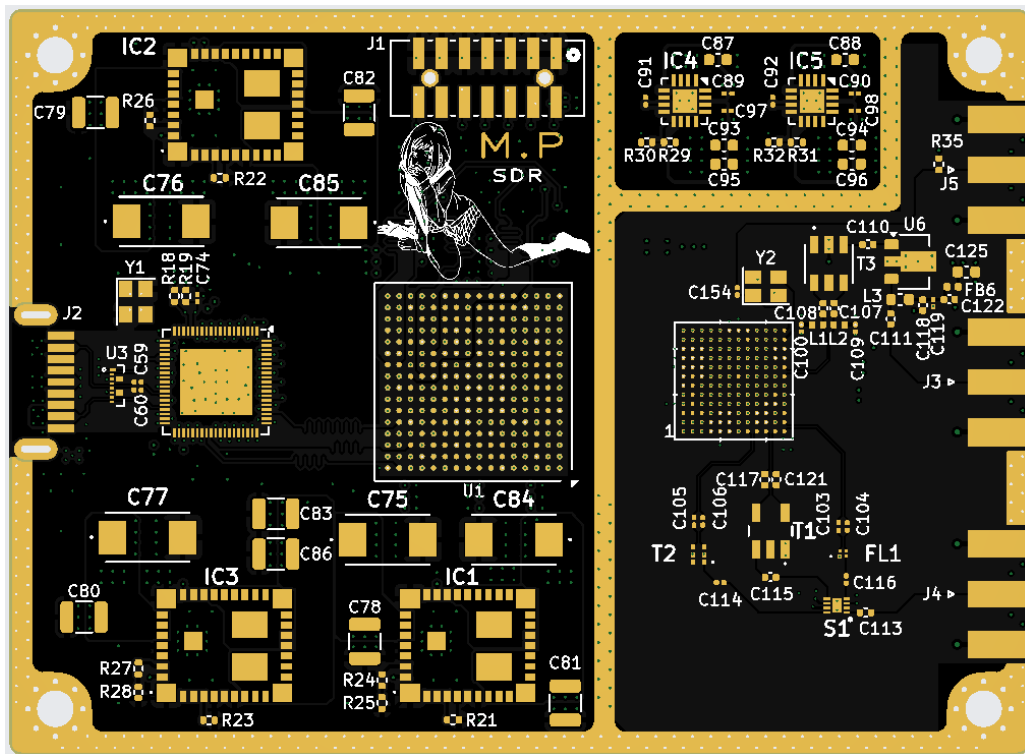


Elektronica ontwerp en opbouw, van idee tot SDR.



Mille Poels

Mentor: M. Van Minsel

6 Industriële Wetenschappen

Schooljaar 2023-2024

Elektronica ontwerp en opbouw, van idee tot SDR.

Mille Poels

Don Bosco Haacht

6 Industriële Wetenschappen

Mentor: M. Van Minsel

Schooljaar 2023-2024

Voorwoord

Voor u ligt mijn scriptie ter afronding van mijn studie Industriële Wetenschappen in het secundair onderwijs. Deze scriptie is het eindresultaat van een proces dat een heel schooljaar geduurd heeft.

Over de laatste paar jaar leerden we tijdens de lessen elektronica de werking van verschillende elektronische componenten. Wat we echter niet leerden, is hoe je deze componenten combineert tot een coherent geheel. De GIP taak was dan ook een mooie gelegenheid om dat allemaal is uit te zoeken.

Ik zou graag mijn mentor willen bedanken en zeker ook mijn ouders ☺.

Mille Poels
18 mei 2024

Inhoudsopgave

1	Inleiding	8
2	Wat is een SDR?	9
2.1	Traditionele radio	9
2.2	Wat is een Software Defined Radio?	9
3	Hardware	10
3.1	Opbouw van een printplaat	10
3.1.1	Lagen	10
3.1.2	Sporen	10
3.1.3	Vias	10
3.2	IC selectie en hun werking	11
3.2.1	<i>Radio Frequency</i> (RF) Transceiver	11
3.2.2	<i>BaseBand Processor</i> (BBP)	12
3.2.3	(USB) Interface IC	12
3.3	Ontwerpproces	13
3.3.1	Kies componenten	13
3.3.2	Maak een elektrisch aansluitschema	13
3.3.3	Kies een fabrikant en aantal lagen	14
3.3.4	Maak een fysieke indeling	14
3.3.5	Verbind de componenten	14
3.3.6	Klaarmaken voor productie	15
3.4	Secties	16
3.4.1	Power	16
3.4.1.1	Power plane	16
3.4.1.2	Ground planes	17
3.4.1.3	Buck converters	18
3.4.1.4	Low-dropout regulators	18
3.4.2	USB	19
3.4.3	FPGA	20
3.4.3.1	Flash	20
3.4.3.2	JTAG	20
3.4.4	RF circuit	21
3.4.4.1	RX-Circuit (Ontvangen)	21
3.4.4.2	TX-Circuit (Uitzenden)	23
4	Conclusie	24

1 Inleiding

Elektronica heeft op veel manieren ons leven veranderd. Van de manier waarop we communiceren tot hoe we werken, winkelen en zelfs ontspannen. Het is niet overdreven om te zeggen dat elektronica nu een integraal onderdeel van ons dagelijks leven is. Het leek mij dan ook een nuttige vaardigheid om mijn eigen elektronica te kunnen ontwerpen en produceren.

Het elektronische deel van elektronica bestaat zo goed als altijd uit een printplaat waarop componenten bevestigd zijn. Dat is dan ook het doel: een printplaat ontwerpen en die laten produceren en assembleren. Verder schrijf ik de nodige software om de verschillende componenten met elkaar te doen communiceren. (*In deze scriptie bespreek ik uitsluitend de hardware*)

Omdat ik al lang een *Software Defined Radio* (SDR) wilde, besloot ik dat maar te maken. Achteraf gezien was dat toch wel een redelijk complexe zaak voor een eerste project.

Qua werkwijze heb ik een *top-down approach* gebruikt. Dat houdt in dat je bij een hoofdprobleem start (in mijn geval: een SDR maken) en dat in verschillende "sub"problemen opdeelt. En die vervolgens oplossen of nog is opdelen als nodig. Het internet is hiervoor je beste vriend. Alle informatie heb ik online gevonden. Omdat die niet altijd kwaliteitsvol is, ben ik zeer veel uren bezig geweest om de juiste info met een hoge standaard te vinden.

Hou er rekening mee dat veel informatie in deze scriptie zeer gesimplificeerd is om lezen voor velen mogelijk te maken.

2 Wat is een SDR?

In deze sectie wordt het concept en implementatie van een SDR uitgelegd en vergeleken met traditionele radio technologie.

2.1 Traditionele radio

Een radio is een apparaat dat dient om draadloos informatie uit te zenden of op te vangen door middel van radiogolven. De meeste radio's zijn enkel bruikbaar voor slechts één protocol op een bepaalde frequentie bv: Bluetooth op 2.4GHz. Hierdoor is er voor elk protocol verschillende hardware nodig. Met andere woorden het is volledig opgebouwd uit *Application Specific Integrated Circuits* (ASIC)s. ASICs zijn een type *Integrated Circuits* (IC)s dat een hoge prestatie en efficiëntie bieden, in ruil zijn ze "*Application Specific*" en dus voor slechts één applicatie bruikbaar.

2.2 Wat is een Software Defined Radio?

Een SDR is een radio dat zo veel mogelijk "*Application Specific*" componenten van een radio in software implementeert. Hierdoor is hij niet gebonden aan protocol en frequentie. Helaas is er "*No such thing as a free lunch*". Zaken zoals filters en demodulators die voordien met passieve componenten en ASICs werden geïmplementeerd, moeten nu met software gesimuleerd worden. Dit vergt zeer veel rekenkracht en is een groot pijnpunt in efficiëntie.

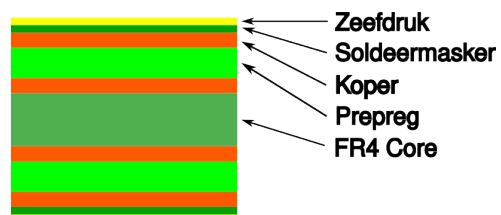
3 Hardware

Om zelf elektronica te maken, is het ontwerpen van een printplaat nodig. Om hiermee te kunnen starten, is dan weer eerst een basiskennis nodig van de fysieke opbouw van een printplaat. Verder moet je de geschikte componenten kiezen en definiëren hoe ze met elkaar verbonden moeten worden. Al deze zaken worden uitgelegd in deze sectie.

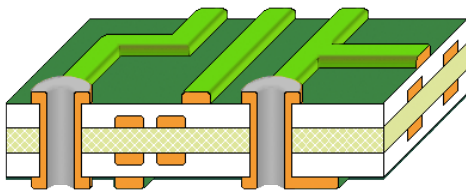
3.1 Opbouw van een printplaat

3.1.1 Lagen

Een printplaat bestaat uit afwisselende lagen van koper en isolatiemateriaal die aan elkaar gelamineerd zijn met hitte en lijm. In de koperlagen wordt door middel van een chemisch proces sporenpatronen geëtst. Deze sporen zorgen voor een elektrische verbinding tussen componenten. Omdat het aantal lagen koper de complexiteit en mogelijkheid van een printplaat bepaalt spreekt men alleen van de koperlagen als het gaat over het aantal lagen van een printplaat (figuur 1 is bijvoorbeeld een 4-laags printplaat). Voor isolatiemateriaal wordt meestal FR4 gebruikt. FR4 bestaat uit geweven glasvezel en epoxyhars. Zowel de Core als Prepreg (zie figuur 1) zijn isolators en bestaan uit FR4. De Core geeft de printplaat zijn stijfheid en Prepreg werkt als een soort lijm. Nadat het koper en isolatie aan elkaar gelamineerd zijn, wordt er een dun laagje soldeermasker aangebracht op de buitenste koperlagen. Dit wordt gedaan om kortsluitingen en oxidatie te voorkomen. Kleine openingen worden in het soldeermasker gelaten en bedekt met geleidend materiaal dat niet (snel) oxideert zoals nikkel, goud of een legering van metalen. Deze openingen werken als contact punten om componenten op te solderen. Als laatste wordt er bovenop het soldeermasker aanwijzers gezeefdrukt om aan te duiden welke component waar geplaatst moeten worden.



Figuur 1: 4-laags printplaat



Figuur 2: 4-laags printplaat

3.1.2 Sporen

Sporen zijn koperen draden die een elektrische verbinding maken tussen twee of meer punten van een laag. Ze transporteren signalen of stroom.

3.1.3 Vias

Vias maken een verticale elektrische verbinding tussen 2 of meer lagen van een printplaat. Ze transporteren net zoals sporen signalen of stroom. Een via wordt gemaakt door een gat te boren in de printplaat en vervolgens de binnenkant van dat gat te bedekken met een dun laagje koper.

3.2 IC selectie en hun werking

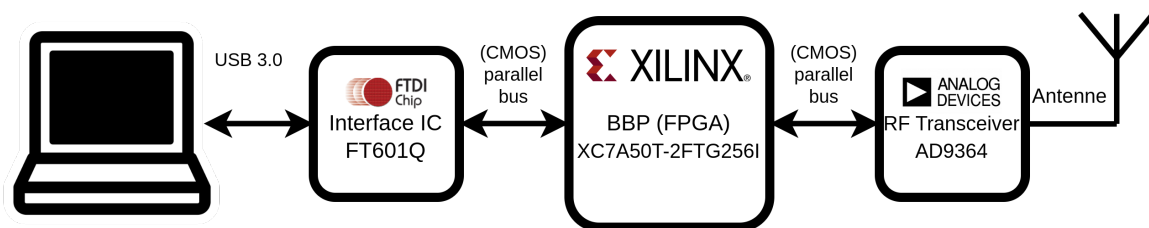
Integrated Circuits (IC)s ook wel gekend als microchips, zijn een samenstelling van verschillende elektronische componenten op een enkel stuk halfgeleider materiaal (vaak Silicium). IC's kunnen sterk variëren in functie en prijs. Verder zijn ze tegenwoordig in bijna elk elektrisch toestel van enige complexiteit aanwezig. Om IC's voor de SDR te selecteren, is het eerst belangrijk om alle nodige functies/specificaties concreet te bepalen. De SDR moet zeker:

- Via USB met een (Linux) computer communiceren.
- Tussen 100 MHz - 2400 MHz opereren.
- Uitzenden en ontvangen.

De keuzemogelijkheden voor IC's waren nog veel te ruim. Na het uitvoeren van een literatuurstudie, waren er een aantal type hoofdcomponenten die steeds terugkeerden in reeds bestaande, werkende ontwerpen. Deze 3 hoofdcomponenten zijn:

- *Radio Frequency* (RF) Transceiver
- *BaseBand Processor* (BBP)
- (USB 3.0) Interface IC

Ieder hoofdcomponent wordt in onderstaand deel uitgelegd.



Figuur 3: Hoofdcomponenten verbindingsdiagram

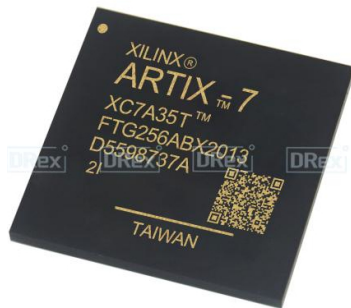
3.2.1 *Radio Frequency* (RF) Transceiver

De naam zegt het zelf, deze chip is een combinatie van een radiozender en ontvanger. De meeste RF Transceivers op de markt zijn ASICs *i.e.* gemaakt voor slechts één protocol. Ze zijn dus niet bruikbaar voor een SDR. Om aan de vereisten te voldoen hebben we een gespecialiseerde IC nodig. Na lang zoeken koos ik voor de AD9364 Agile Transceiver van Analog Devices [1]. Deze chip kan tussen 70 MHz en 6.0 GHz opereren met een bandbreedte tot 56 MHz. De werking van zo een chip is redelijk complex. Het komt er op neer dat je RF-signalen kan definiëren *i.e.* frequency, amplitude, golfvorm etc... Die de chip vervolgens synthesized via een geïntegreerde *Digital to Analog Converter* (DAC). Het resulterende RF-signaal voer je af naar een antenne om uit te zenden. Bij het ontvangen worden RF-signalen gedecodeerd met een



Figuur 4: AD9364 Transceiver

Analog to Digital Converter (ADC) naar digitale data. In essentie is deze IC een brug tussen de analoge RF en de digitale wereld. En bovenal, hij is relatief betaalbaar (Ik had liever een nieuwere versie genomen, maar die zijn dat niet ☺).



Figuur 5: XC7A35T-2FTG256C

3.2.2 BaseBand Processor (BBP)

Een BBP is een component dat RF-data voor en van de RF transceiver verwerkt. Er zijn meerdere soorten IC's dat de taak van BBP kunnen aannemen. De twee meest gebruikte voor SDR's zijn *General Purpose Processors* (GPP)s en *Field-Programmable Gate Arrays* (FPGA)s. CPU's en GPU's vallen onder de categorie van GPPs. Beide CPU's en GPU's komen veel voor in hedendaagse elektronica en zijn makkelijk te programmeren. Aan de andere kant zijn FPGA's configureerbaar op Logic gate

level (Beeld je een groot breadboard in, waar je Logic gates op kan monteren om een schakeling te maken). Ze worden vaak gebruikt in toepassingen waar flexibiliteit, snelheid en parallelle verwerkingsmogelijkheden vereist zijn, zoals PLC's. Ik koos (net zoals andere SDR's) voor een hybride model. Waarbij een FPGA op de printplaat staat en als een soort lijm werkt tussen de RF Transceiver en de Interface IC. Hierbij wordt de CPU van een externe computer gebruikt voor verdere verwerking. De FPGA dat hiervoor gebruikt wordt is de XC7A50T-2FTG256I van Xilinx [2].

3.2.3 (USB) Interface IC

Een interface IC regelt de communicatie van en naar externe apparaten. Hiervoor koos ik de FT601Q USB 3.0 IC van FTDI [3]. Deze chip regelt de datastroom tussen het USB-apparaat (de HOST) en de FPGA.



Figuur 6: FT601Q

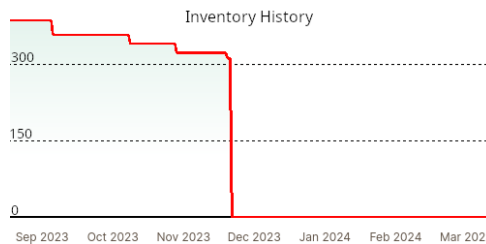
3.3 Ontwerpproces

In het onderstaande deel wordt er stap voor stap het standaard ontwerpproces uitgelegd.

3.3.1 Kies componenten

Zoals in subsectie 3.2 al werd uitgelegd, is het belangrijk om eerst zorgvuldig te zoeken naar hoofdcomponenten. Deze componenten hebben de grootste invloed op de functie en prijs van het eindproduct. Vervolgens kies je standaard componenten waar de hoofdcomponenten op rekenen om te kunnen werken. Onderdelen zoals: condensatoren, klok kristallen, power regulators, weerstanden, connectors etc... Bij het selecteren van componenten is het belangrijk om niet alleen naar de prijs te kijken. Zaken zoals beschikbaarheid, footprint (de grootte), maximum waarden, veroudering, produceerbaarheid, leadtime etc... zijn te overwegen. Verder (als je van plan bent om de componenten te laten solderen door een fabrikant) kan het nuttig zijn om onderdelen te kiezen die bij hen in stock zijn. Om je een idee te geven hoe belangrijk het is om deftig onderzoek te doen naar componenten: mijn eerste ontwerp was gebaseerd op de LMS7002M RF Transceiver van Lime microsystems. Nadat mijn schema's volledig af waren had ik door dat: 1) hij volledig was uitverkocht (zie figuur 7) en 2) de contactpinnen een diameter van 0.27 mm hadden en slechts 0.2 mm van elkaar verwijderd waren. Dit dreef de prijs van de printplaat sterk omhoog omdat ik veel fijnere sporen moest leggen. Ik had dus geen keuze en moest helemaal opnieuw beginnen. Allemaal omdat ik niet genoeg onderzoek had gedaan.

Opmerking: Heel gestandaardiseerde (meestal passieve) componenten zoals bijvoorbeeld: condensatoren en weerstanden kunnen later in het ontwerpproces gekozen worden (Vaak een kwestie van merk en prijs).



Figuur 7: LMS7002M stock [4]

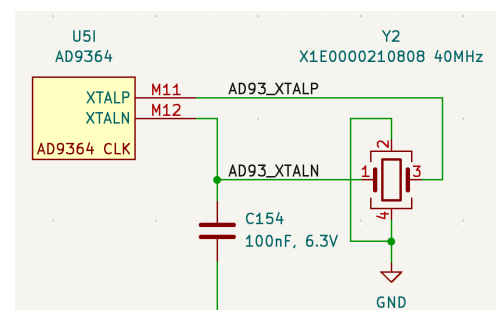


Figuur 8: LMS7002M

3.3.2 Maak een elektrisch aansluitschema

Nadat de componenten gekozen zijn moet je definiëren hoe ze met elkaar verbonden worden. Dit wordt gedaan in PCB design software. Ik gebruik Kicad omdat het *Free and open-source software* (FOSS) is. Alle componenten hebben een datasheet waar (hopelijk) alle informatie in staat dat nodig is om het te integreren in je project. Het is ook altijd handig als je de aansluitschema's van development boards vindt om te gebruiken als referentie.

(Zie bijlagen voor de volledige aansluitschema's)



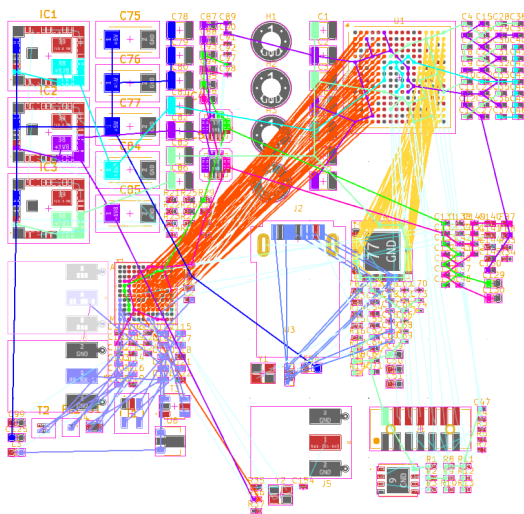
Figuur 9: Aansluitschema van een kristal oscillator aan de AD9364

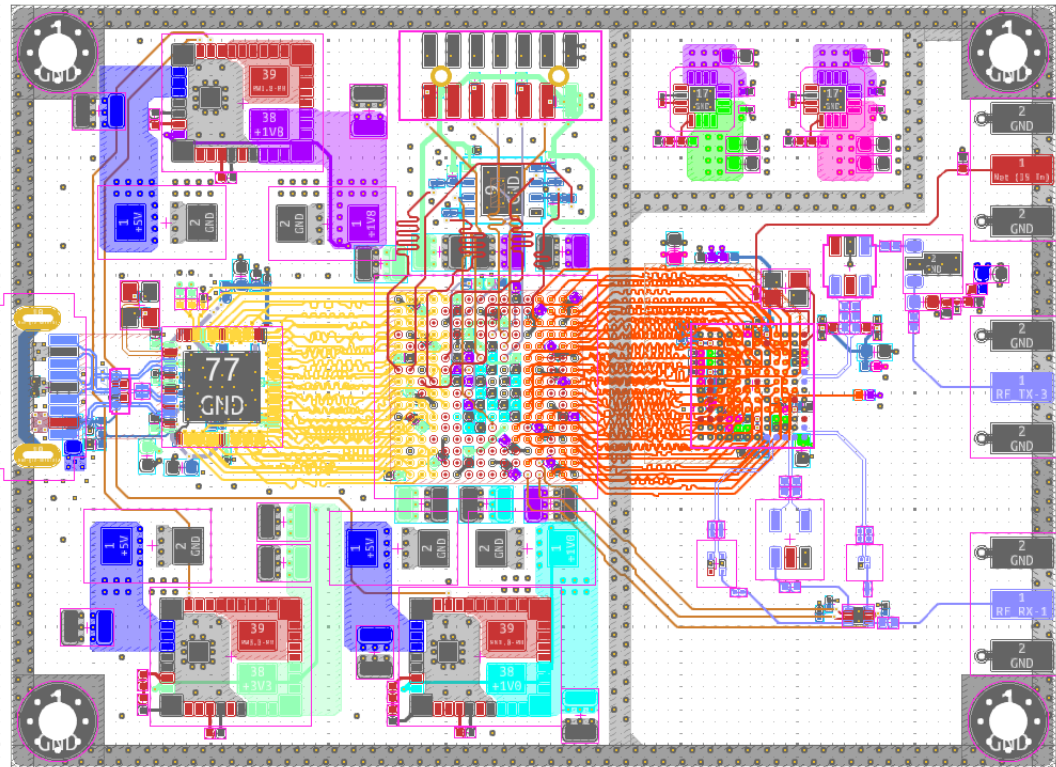
3.3.3 Kies een fabrikant en aantal lagen

Het kiezen van een fabrikant is een belangrijke keuze die gemaakt moet worden voordat je aan het fysieke ontwerp kan beginnen. Hoe eerder in het ontwerpproces je deze keuze maakt hoe beter. Elke fabrikant geeft zijn capaciteiten aan op hun website. Zaken zoals het maximum aantal lagen, minimum via diameter, minimum ruimte tussen sporen, koper diktes en nog veel meer. Om productiefouten te voorkomen worden de minimumwaarden ingevoegd in de PCB design software. Bij het overschrijden van een waarde zal die dan een error geven. Nadat je een fabrikant hebt gevonden, moet je nog beslissen hoeveel lagen je nodig hebt. Ik koos voor JLCPCB, een fabrikant gebaseerd in Chenzen China en een printplaat met 8 lagen.

3.3.4 Maak een fysieke indeling

Na het maken van een aansluitschema en invoegen van de printplaatpecificaties, importeer je alle componenten in een PCB-editor. Met deze software maak je het fysiek ontwerp van de printplaat. Op figuur 10 kan je zien hoe de geïmporteerde footprints (contactpunten van de componenten) er uitzien in de PCB-editor. De lijnen laten zien wat met elkaar verbonden moet worden ook wel het "Ratsnest" genoemd. Nu moet je alle componenten op een logische manier plaatsen. Bij mijn ontwerp staan er componenten aan beide zijden van de printplaat. Dit is nodig voor grote *Ball Grid Array* (BGA) packages zoals de FPGA en AD9364. Bij zulke componenten dienen er fysiek dichtbij condensatoren geplaatst te worden om spanningsdalingen te voorkomen. Op figuur 11 zijn alle onderdelen op een logische manier geordend.





Figuur 12: printplaat ontwerp

3.3.6 Klaarmaken voor productie

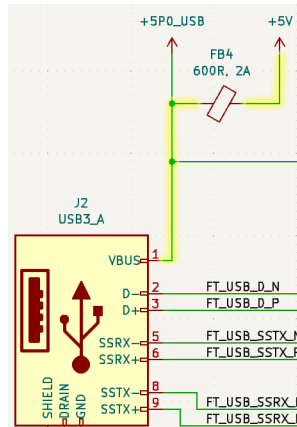
Als het ontwerp van de printplaat klaar is en de *Design Rules Checker* (DRC) geen errors geeft, moet je nog de fabricagebestanden genereren die interpreteerbaar zijn door je fabrikant. In de elektronica-industrie zijn Gerber files hiervoor de standaard. Als je de printplaat (net zoals mij) ook wilt laten assembleren moet je nog de nodige *Bill Of Materials* (BOM) en positionering (POS) files doorsturen. Zo weet de fabrikant welke componenten ze waar moeten plaatsen.

3.4 Secties

In de onderstaande tekst worden secties van het voltooide ontwerp apart uitgelegd.

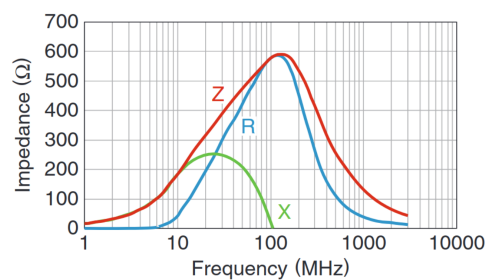
3.4.1 Power

Elke component heeft spanning nodig om te kunnen werken. USB 3.0 levert een nominale spanning van 5V. Aangezien zo goed als alle componenten niet op 5V werken, moet deze nog omgevormd worden. Spanning wordt in het systeem gebracht door de USB-connector dat via een Ferrite bead met de 5V-rail verbonden is (zie figuur 13). Ferrite beads filteren ruis door hoge frequentie (AC) energie om te zetten in warmte (zie figuur 14).



Figuur 13: USB power connectie

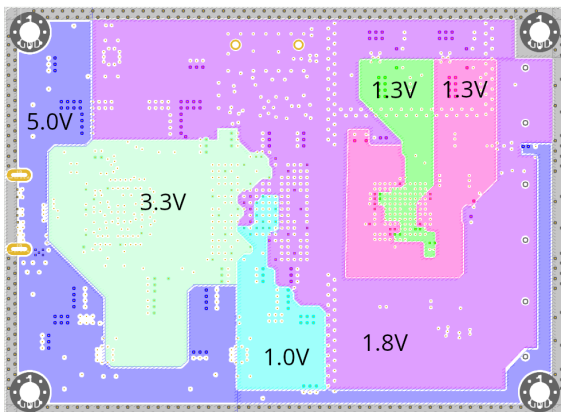
MPZ2012S601AT000



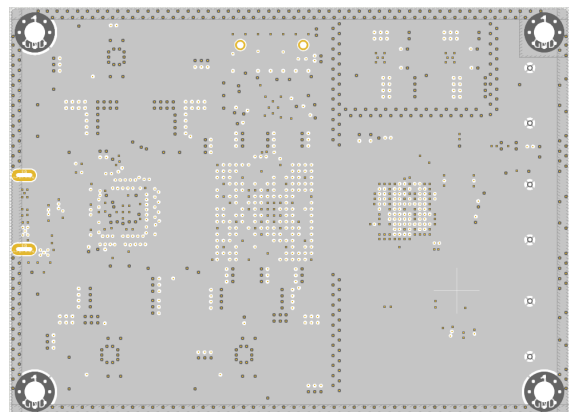
Figuur 14: Ferrite Impedantie Frequentie curve [5]

3.4.1.1 Power plane

Één van de 8 lagen wordt als power plane gebruikt (zie figuur 15). Een power plane is een vlak koper op een bepaalde spanning. Hij wordt altijd rechtstreeks naast een ground plane geplaatst om zo, met lage impedantie, stroom te leveren aan verschillende componenten op het bord.



Figuur 15: Power plane



Figuur 16: Ground plane

3.4.1.2 Ground planes

Er worden drie lagen volledig gebruikt als ground (zie figuur 16). Ground planes zorgen voor:

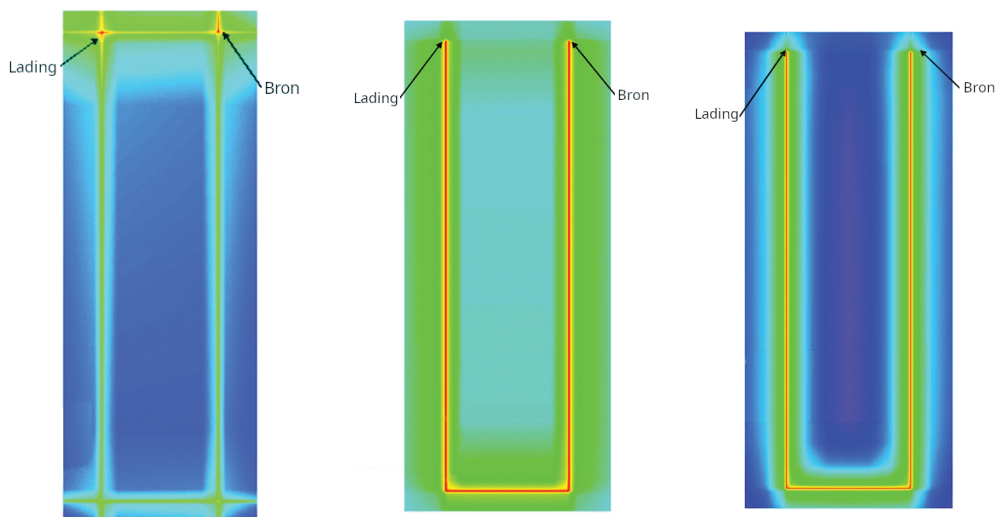
- Goed gedefinieerde impedantie.
- *ElectroMagnetic Interference* (EMI) afscherming en onderdrukking.
- Return path (terugkeerweg) voor stroom. Een signaal dat via een spoor naar een component vloeit, moet ook nog terug komen (wet van Kirchhoff). De heenweg is het spoor, maar wat is de terugweg? Het antwoord is de weg met de laagste impedantie. De karakteristieke impedantie wordt beschreven met de volgende formule.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + i2\pi fL}{G + i2\pi fC}} \quad (1)$$

Bij lage frequenties zijn de reactieve componenten (L inductantie en C capacitantie) te verwaarlozen. Hierbij heeft de kortste weg de laagste impedantie. Echter naarmate de frequentie stijgt zal er steeds meer terugkeerstroom zo dicht mogelijk bij zijn respectievelijk spoor vloeien. Dit komt doordat de impedantie daar het laagst is. Dit is te verklaren met de bovenstaande formule. Omdat bij hoge frequenties de reactieve waarden veel meer invloed hebben. En aangezien de inductantie (L) zal verkleinen en de Capacitantie (C) zal vergroten naarmate de afstand tussen de twee geleiders verkleint.

Om dit duidelijk te maken wordt in de volgende figuren op 3 verschillende frequenties stroom door hetzelfde spoor gelaten. Het spoort verbindt de bron met de lading en ligt boven een ground plane. Zowel de lading als de bron zijn rechtstreeks met de ground plane verbonden. De kleur geeft de stroomdichtheid weer. Bij figuur 17 neemt de meeste stroom de kortste weg terug naar de bron. Echter bij 1 MHz (figuur 19) vloeit alle terugkeer stroom rechtstreeks onder het heen spoor.

(Meer informatie zie referentie [6])

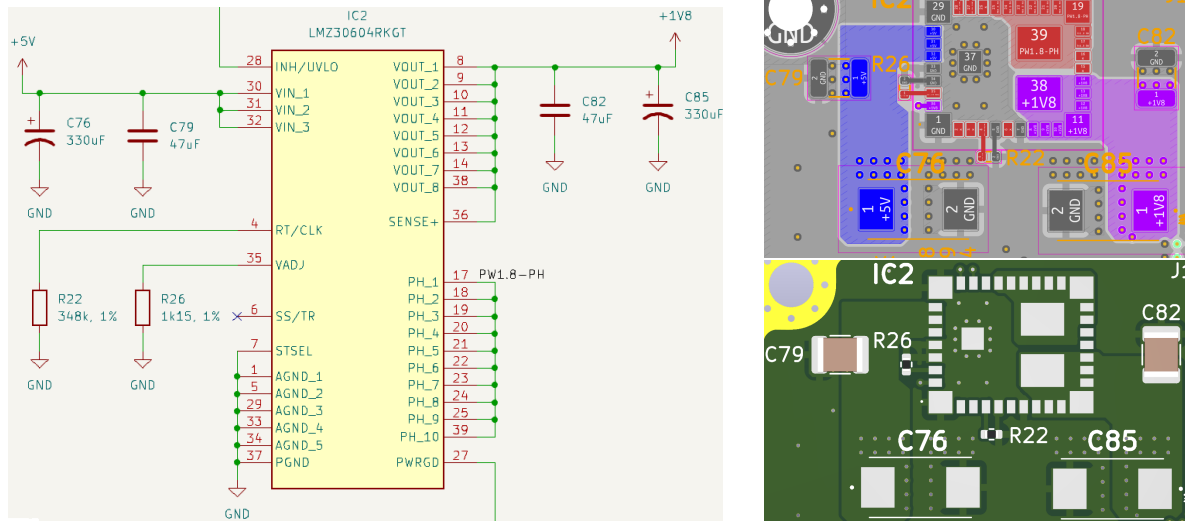


Figuur 17: 1.0 kHz signaal Figuur 18: 50 kHz signaal Figuur 19: 1 MHz signaal

Voor hoge frequentie signalen is het dus noodzakelijk om een lage impedantie terugkeerweg te maken!

3.4.1.3 Buck converters

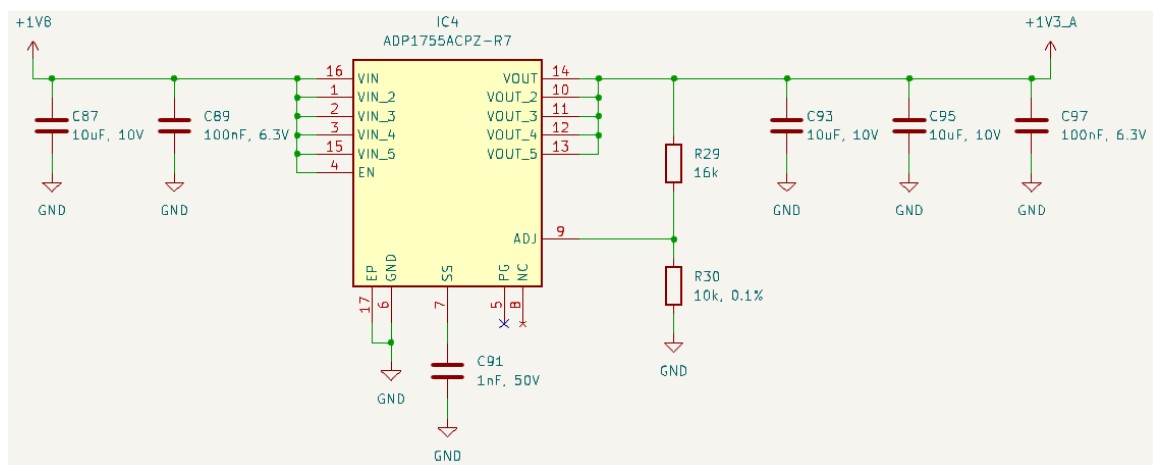
Een buck converter of step-down converter is een DC-DC omvormer die spanning uitsluitend verlaagt. Het is een klasse van schakelende voedingen. Schakelende voedingen (zoals buck converters) bieden een hoge efficiëntie waardoor ze nuttig zijn voor het omvormen van de hoofdvoedingsspanning. Ik gebruik drie LMZ30604RKGT [7] buck converters voor 5V om te vormen naar 1.0V, 1.8V en 3.3V.



Figuur 20: LMZ30604RKGT (5V->1.8V) aansluitschema en fysieke indeling

3.4.1.4 Low-dropout regulators

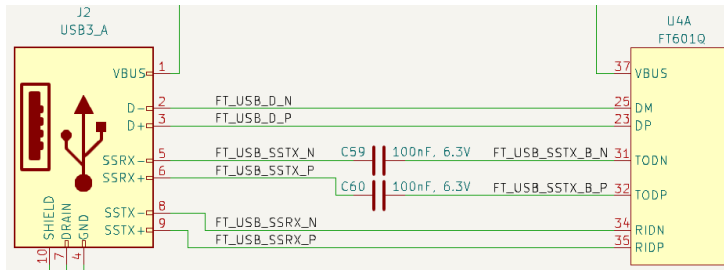
Een low-dropout regulator (LDO) is een DC lineaire spanningsregelaar die (in tegenstelling tot een geschakelde voeding) geen schakelruis heeft. Verder zijn ze compacter en goedkoper. Het nadeel is wel dat ze overbodig veel hitte genereren om te kunnen werken. Hierdoor ligt hun efficiëntie veel lager dan die van een schakelende voeding. Ik gebruik twee ADP1755's [8] dat beide 1.8V naar 1.3V reguleren. Ik gebruik LDO's omdat de AD9364 RF Transceiver een zo laag mogelijke rimpelspanning nodig heeft. Deze spanningen worden gebruikt voor synthesizers, *Phase-locked loops* (PLL) en nog heel wat andere sensitieve zaken.



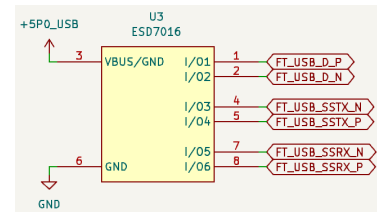
Figuur 21: ADP1755 aansluitschema

3.4.2 USB

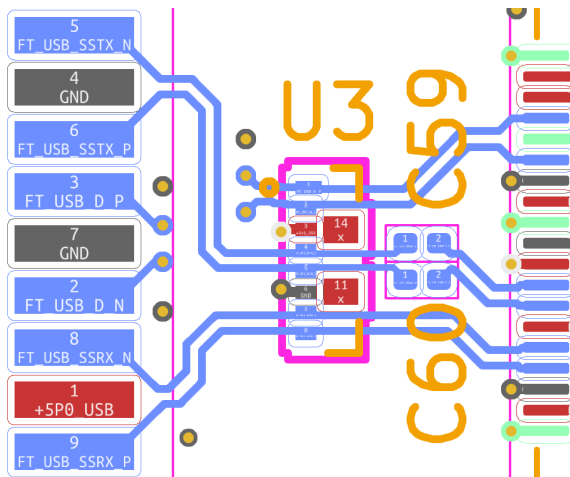
De SDR communiceert met externe apparaten via een USB-connector die doorverbonden is met de FT601Q IC (zie figuur 22). De sporen tussen de connector en de FT601Q zijn verbonden met de ESD7016 dat de gevoelige datalines beschermt tegen *ElectroStatic Discharge* (ESD) pieken (zie figuur 23).



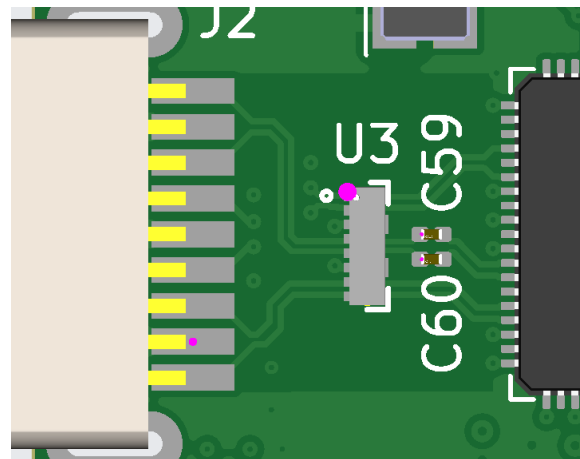
Figuur 22: USB-connector aansluitschema



Figuur 23: ESD7016 aansluitschema



Figuur 24: USB PCB editor



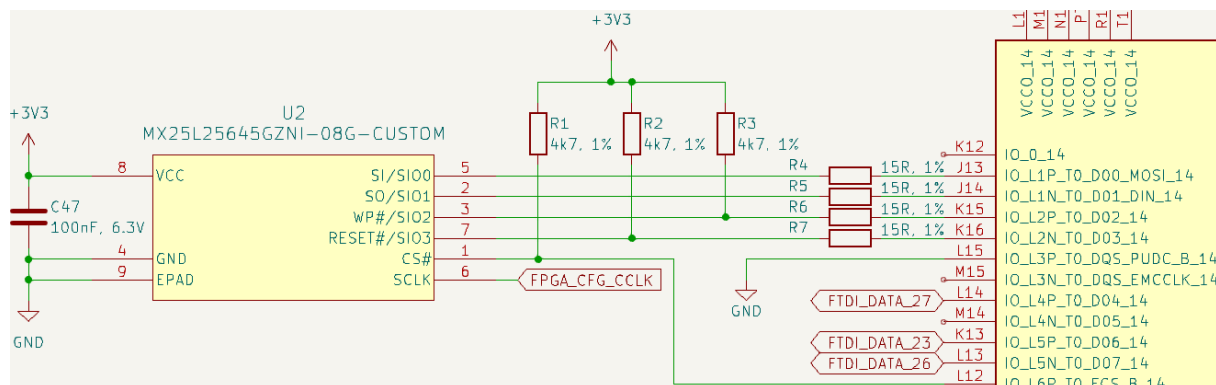
Figuur 25: USB 3D image

3.4.3 FPGA

De FPGA is het hart van mijn SDR. Hij staat recht in het midden van de printplaat en regelt alle communicatie. FPGA's bezitten heel veel connectie pinnen en hebben verschillende spanningen nodig om te kunnen werken (die van mij gebruikt er 3). Dit maakt printplaten met een FPGA een stuk complexer dan die met een standaard microprocessor.

3.4.3.1 Flash

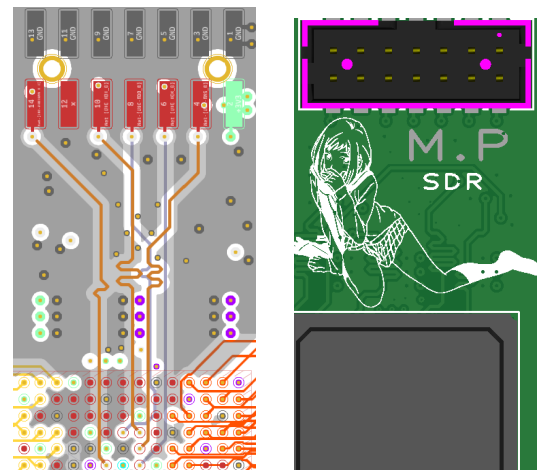
FPGA's verliezen hun configuratie als de spanning uitvalt. Hierdoor moeten ze elke keer bij het opstarten opnieuw geconfigureerd worden. De configuratie wordt bijgehouden in extern flash geheugen. Hiervoor gebruik ik de MX25L25645G IC [9], dat via *Serial Peripheral Interface* (SPI) verbonden is met de FPGA (zie figuur 26).



Figuur 26: MX25L25645G aansluitschema

3.4.3.2 JTAG

Joint Test Action Group (JTAG) is de industrie standaard voor het programmeren, debuggen en "boundary scannen" van componenten. JTAG wordt gebruikt om de FPGA te configureren en te testen. Om via JTAG te kunnen communiceren gebruik ik een USB naar JTAG programmeerkabel. Deze kabel wordt verbonden met een permanente JTAG-connector dat op de printplaat staat (zie figuur 27).



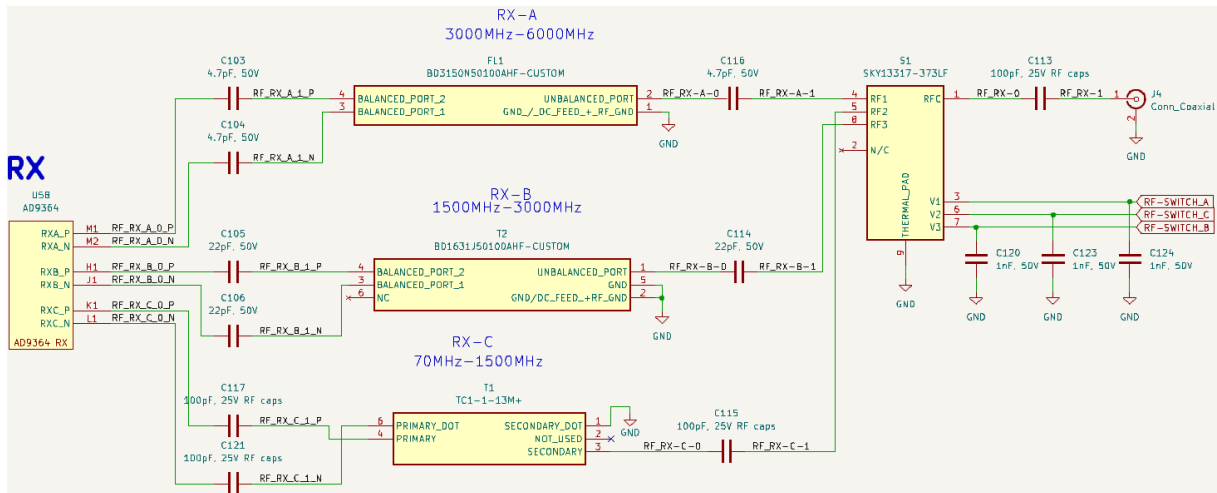
Figuur 27: JTAG-connector

3.4.4 RF circuit

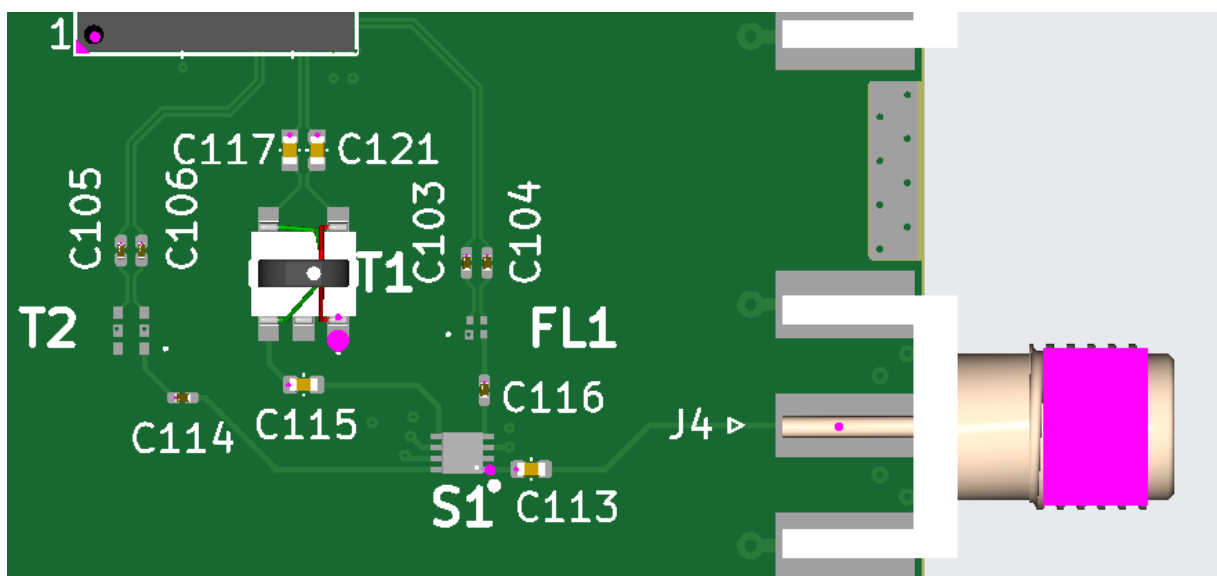
Beeld je in dat je een koperen paal in de lucht houdt waarin een inductiespanning wordt opgewekt door invallende elektromagnetische straling. Die inductie spanning decodeer je vervolgens naar het geluid van je favoriete radiozender. Met andere woorden een antenne verbonden aan een RF-circuit. Het is dan ook niet moeilijk om voor te stellen dat RF-circuits heel gevoelig zijn aan EMI en ruis. Daarom worden ze zo veel mogelijk gescheiden van het digitale deel.

3.4.4.1 RX-Circuit (Ontvangen)

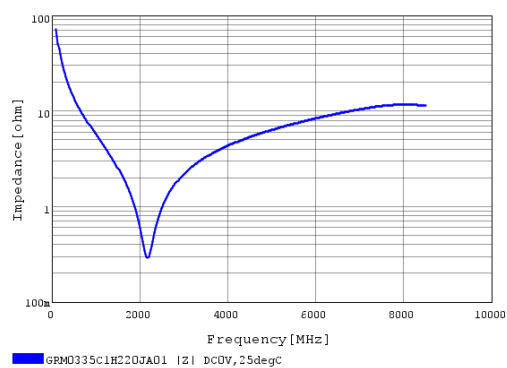
Het RX-Circuit dient radiosignalen afkomstig van de antenne te filteren en af te voeren naar de RF IC. De antenne wordt verbonden aan een SMA-connector J4 (zie rechts op figuur 28). De opgevangen signalen worden omgeleid naar een RF-schakelaar (S1 SKY13317 [10]). De RF-schakelaar leidt de signalen door naar één van de drie transmissie paden (A, B of C). Elk pad is geoptimaliseerd voor een bepaalde bandbreedte. De condensatoren dat tussen elk component staan blokkeren DC stroom en werken als bandfilter (zie figuur 30). Omdat de RF IC een differentieel signaal verwacht (twee draden) moeten we het enkelzijdig signaal nog transformeren. Dit wordt gedaan met een *balancing unit* (balun). Elk signaal pad heeft een verschillende balun specifiek voor hun bandbreedte. T1 (TC1-1-13M) is bijvoorbeeld geoptimaliseerd voor frequenties onder 1500MHz (zie figuur 31).



Figuur 28: RX aansluitschema



Figuur 29: RX-Circuit realisatie



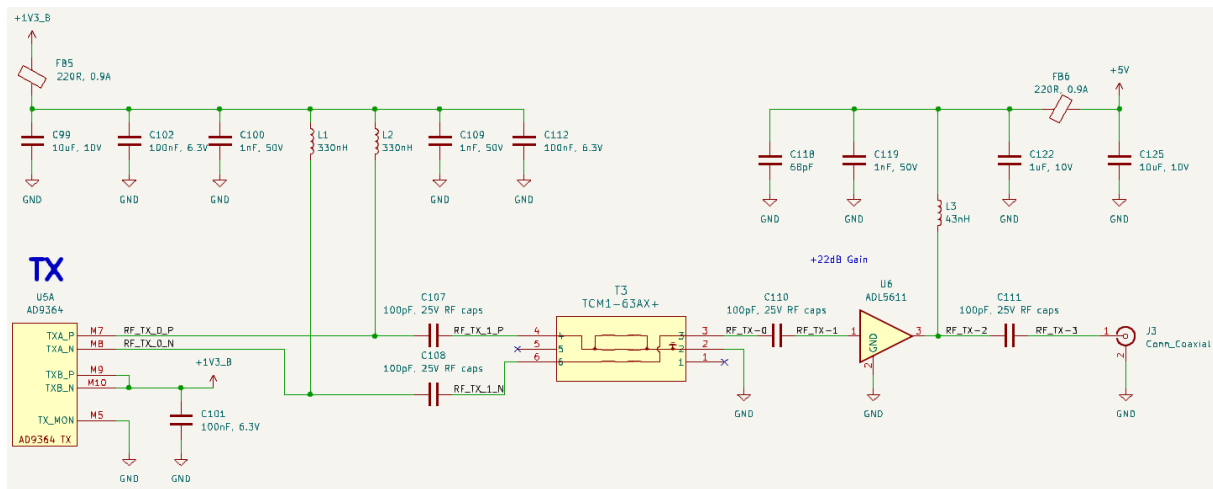
Figuur 30: 22pF condensator Impedantie/Frequency curve [11]



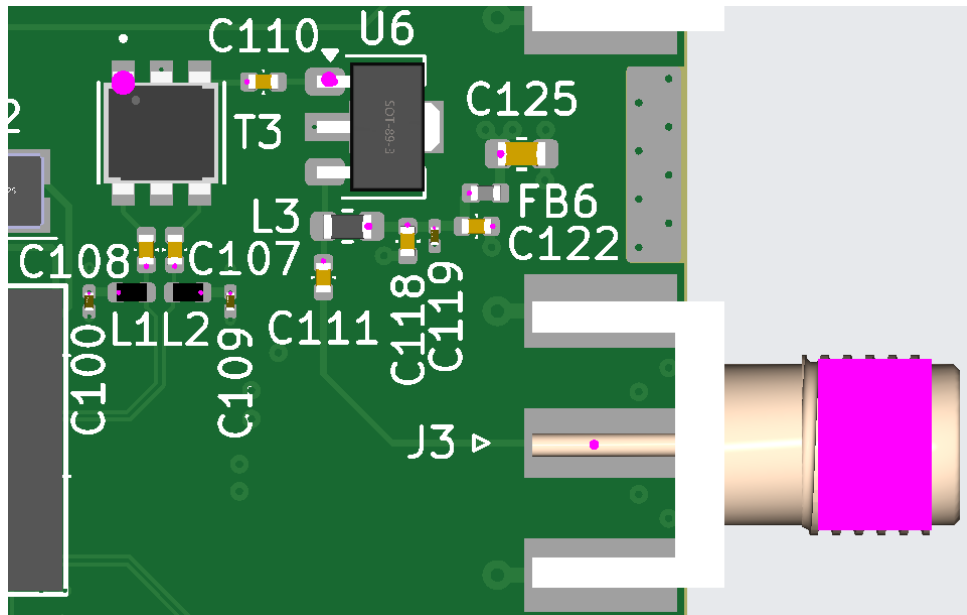
Figuur 31: TC1-1-13M insertieverlies curve [12]

3.4.4.2 TX-Circuit (Uitzenden)

Het TX-Circuit versterkt radiosignalen afkomstig van de RF IC en voert ze af naar de antenne om uitgezonden te worden. Allereerst wordt er een DC-bias op de twee differentiële TX pinnen (M7 en M8) gezet met een bias tee (zie figuur 32). Een bias tee brengt een DC-spanning aan op de signaallijn door gebruik te maken van twee spoelen (L1 en L2). Deze spoelen laten DC door en houden AC RF-signalen tegen. Verder worden er condensatoren (C107 en C108) gebruikt om DC stroom uit de balun (T3) te houden. Nadat het differentiële signaal is getransformeerd naar een enkelzijdig signaal, wordt het versterkt door de ADL5611 [13] (U6). De ADL5611 krijgt zijn stroom van een tweede bias tee. De versterkte RF signalen worden vervolgens naar een SMA-connector J3 geleid om uitgezonden te worden.



Figuur 32: TX aansluitschema



Figuur 33: TX-Circuit realisatie

4 Conclusie

Ik heb ontdekt dat het aannemen van grote projecten een effectieve manier is om nieuwe dingen te leren. Dit was veruit het grootste project dat ik ooit ondernomen heb. Door dit project heb ik een inzicht gekregen in de elektronica-industrie en wat zich daar speelt.

fin

Referenties

- [1] Analog Devices. *AD9364 RF Agile Transceiver datasheet*, 18 Februari 2014. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9364.pdf>.
- [2] Xilinx. *XC7A50T-2FTG256I FPGA datasheet*, 10 Februari 2022. https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds181_Artix_7_Data_Sheet.
- [3] FTDI. *FT601Q-B USB3.0 Super-Speed to 32 bits Sync FIFO datasheet*, 3 November 2017. https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT600Q-FT601Q%20IC%20Datasheet.pdf.
- [4] Octopart. *Octopart Lime Microsystems LMS7002M*. <https://octopart.com/lms7002m-lime+microsystems-50982632>.
- [5] TDK. *MPZ2012S601AT000 Ferrite Bead datasheet*, 24 Maart 2019. https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/emc/emc/beads/catalog/beads_commercial_power_mpz2012_en.pdf.
- [6] Analog Devices. *Successful PCB grounding with mixed-signal chips follow the path of least impedance*. 15 Oktober 2012. <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/successful-pcb-grounding-with-mixedsignal-chips--follow-the-path-of-least-impedance.html>.
- [7] Texas Instruments. *2.95V to 6V, 4A Step-Down Power Module*, April 2018. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmz30604.pdf>.
- [8] Analog Devices. *1.2 A, Low VIN , Low Dropout Linear Regulator datasheet*. (ADP1755), 19 November 2008. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP1754_1755.pdf.
- [9] Macronix. *MX25L25645G 3V, 256M-BIT [x 1/x 2/x 4]CMOS MXSMIO (SERIAL MULTI I/O) FLASH MEMORY datasheet*, 25 November 2022. <https://www.mx.com.tw/Lists/Datasheet/Attachments/8906/MX25L25645G,%203V,%20256Mb,%20v2.0.pdf>.
- [10] SkyWorks. *SKY13317-373LF 20 MHz to 6.0 GHz RF switch*, 5 December 2022. https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Products/301-400/SKY13317-373LF_200914L.pdf.
- [11] Murata. *GRM0335C1H220JA01D Murata Sim Surfing*, 23 April 2024. <https://ds.murata.co.jp/simsurfing/mlcc.html?lcid=en-us&partnumber=GRM0335C1H220JA01>.
- [12] Mini-Circuits. *TC1-1-13M+ 1:1 CORE and WIRE Transformer 4.5 - 3000 MHz 50Ω datasheet*, 12 April 2021. <https://www.minicircuits.com/pdfs/TC1-1-13M+.pdf>.
- [13] Analog Devices. *ADL5611 30 MHz to 6 GHz RF/IF Gain Block datasheet*, 9 Mei 2013. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5611.pdf>.