

Ontwikkeling van elektronische sensoren voor het meten van magnetische velden om de blootstelling in deomgeving van hoogspanningslijnen te monitoren

Eindrapport

DEPARTEMENT OMGEVING

# Ontwikkeling van elektronische sensoren voor het meten van magnetische velden om de blootstelling in de omgeving van hoogspanningslijnen te monitoren

Dit rapport bespreekt de studie van een 50 Hz magnetisch veld sensor, die kan worden ingezet bij de continue monitoring van hoogspanningslijnen. In dit rapport is de volledige uitwerking van idee naar prototype naar afgewerkt product opgenomen van de onderzoekende partij (Universiteit Gent - WAVES/IMEC).

Dit rapport bevat de mening van de auteur(s) en niet noodzakelijk die van de Vlaamse Overheid.

# **COLOFON**

# Verantwoordelijke uitgever Peter Cabus Departement Omgeving Vlaams Planbureau voor Omgeving Koning Albert II-laan 20 bus 8, 1000 Brussel vpo.omgeving@vlaanderen.be www.omgevingvlaanderen.be

Een uitgave van het Departement Omgeving, Vlaams Planbureau voor Omgeving vpo.omgeving@vlaanderen.be

# Auteurs

Kenneth Deprez – Universiteit Gent, waves - IMEC Tom Van de Steene– Universiteit Gent, waves - IMEC Leen Verloock – Universiteit Gent, waves - IMEC Wout Joseph – Universiteit Gent, waves - IMEC

Publicatiedatum 19/02/2024

**Depotnummer** D/2024/3241/111

# Wijze van citeren

**Deprez K., Van de Steene T., Verloock L. & Joseph W.**, (2024), Ontwikkeling van elektronische sensoren voor het meten van magnetische velden om de blootstelling in de omgeving van hoogspanningslijnen te monitoren. Studie in opdracht van het Departement Omgeving.

### PARTNERS



waves



omgevingvlaanderen.be

# MANAGEMENTSAMENVATTING

Dit rapport bespreekt de studie van een 50 Hz magnetisch veld sensor, die kan worden ingezet bij de continue monitoring van hoogspanningslijnen. In dit rapport is de volledige uitwerking van idee naar prototype naar afgewerkt product opgenomen van de onderzoekende partij (Universiteit Gent - WAVES/IMEC).

Er is gekozen voor een sensor met een zelfontworpen filtering, een 16-bits ADC en een microcontroller met mobiel internetmogelijkheden. Als magnetisch sensor-element wordt een commercieel beschikbare variant (MC858) gebruikt, wat na onderzoek goedkoper bleek uit te zijn dan een eigen ontwerp. De sensor filtert via hardware alle signalen tussen 10 Hz en 300 Hz en heeft bovendien nog een bijkomende softwarefiltering voor 50 Hz signalen. Het bereik van de  $0.4\mu$ T sensor gaat tussen  $0.01 \mu$ T en 70  $\mu$ T, met een theoretische stapgrootte van 2 nT (voor de  $0.4 \mu$ T sensor). Voor de 100  $\mu$ T sensor gaat het bereik van  $0.1 \mu$ T tot 421  $\mu$ T, met een theoretische stapgrootte van 13 nT.

Het rapport focust zich hierbij vooral op de 0.4  $\mu$ T sensor, maar gelijkaardige redeneringen en conclusies zijn getrokken voor de 100  $\mu$ T. Er is een bijkomend onderzoek uitgevoerd naar een gecombineerde sensor. Deze gecombineerde sensor zorgt voor een daling van de kostprijs en zorgt ervoor dat beide sensoren zich nu op 1 PCB bevinden en dus de hardware (ADC, microcontroller en spoelen) kan worden gedeeld.

Na de verificatie en kalibratie en de lange termijn testen kan er dan ook geconcludeerd worden dat de onderzoekende partij een sensor heeft kunnen ontwikkelen die accuraat, langdurig lage magnetisch velden van een 50 Hz bron (i.e. hoogspanningslijn) kan opmeten.

# **INHOUDSTAFEL**

1	Inleiding	5		
2	Ontwerpen van een elektronische sensorunit voor het meten van magnetische velder	ı 5		
2.1	Fase 1A: ontwerp van ELF spoelen	5		
2.1.1	Specificaties	5		
2.1.2	Ontwerp	6		
2.1.3	Simulaties	6		
2.1.4	Fabricatie	7		
2.1.5	Metingen	7		
2.1.6	Kostprijs	8		
2.1.7	Conclusie	9		
2.2	Fase 1B: Studie van bestaande sensoren	9		
2.2.1	EHP-50	9		
2.2.2	ELT-400	10		
2.2.3	NFA30M	10		
2.2.4	Extech 480823 EMF/ELF sensor	10		
2.2.5	Tenmars TM-190	10		
2.2.6	Tenmars TM-191	10		
2.2.7	Tenmars TM-192D & LATNEX MG-2000TD	11		
2.2.8	Conclusie	11		
2.3	Fase 2: Ontwerp van circuit + PCB	11		
2.3.1	Vereisten	11		
2.3.2	Exploratie en design	12		
2.3.3	Verificatie en kalibratie	14		
2.3.4	Verdere exploratie ELF sensor	14		
2.3.5	Triaxiaal design	16		
2.3.6	Software filtering	17		
2.4	Fase 3: Bouw van sensorbox	17		
2.4.1	Testen van de sensor	17		
3	Testen van de box, sensoren en Thingsboard MQTT-protocol	23		
3.1	Samenstellen van de box	23		
3.2	Testen van de box	25		
4	Gecombineerde sensor	26		
5	Conclusie	28		
Referenties				

# **1** INLEIDING

Dit rapport beschrijft een tweedelig project omtrent een onderzoek naar een elektronische sensorunit voor het meten van magnetische velden, afkomstig van hoogspanningslijnen. Hoogspanningslijnen zijn een cruciaal onderdeel van het moderne elektriciteitsnetwerk. Echter brengen ze ook een mogelijke blootstelling aan elektromagnetische velden met zich mee. Nauwkeurig deze velden opmeten is dus cruciaal om de veiligheid en het welzijn in de buurt van deze infrastructuur te monitoren. Dit rapport presenteert als eerste een analyse naar het ontwerp van een 50Hz magnetische spoel. Een spoel kan een elektromagnetisch veld meten en vertoont een specifiek verloop in de aanwezigheid van een elektromagnetisch veld. Onder invloed van een veld wordt dus een spanning opgewekt.

Het tweede deel van dit onderzoek betreft een sensor die de spanning opgewekt door de spoel kan omzetten naar een veldwaarde. Hierbij is het van belang om dit zo accuraat mogelijk te doen, zonder daarbij de praktische haalbaarheid en de kostprijs uit het oog te verliezen. Dit rapport beschrijft de stappen die ondernomen zijn om zo een sensor te ontwikkelen, de werking en technische specificaties van de finale sensor.

Door het gebruik van de sensor is het de bedoeling om een fijnmazig monitoringsnetwerk uit te rollen dat kan helpen aan een dieper begrip van de magnetische velden rond hoogspanningslijnen en aan de ontwikkeling van effectieve maatregelen om de blootstelling aan deze velden te beheren en uiteindelijk ook te minimaliseren.

# 2 ONTWERPEN VAN EEN ELEKTRONISCHE SENSORUNIT VOOR HET METEN VAN MAGNETISCHE VELDEN

# 2.1 FASE 1A: ONTWERP VAN ELF SPOELEN

Het doel van fase 1A is het onderzoeken van de mogelijkheid om zelf de magnetische sensoren (spoelen) te ontwerpen en te produceren voor gebruik in de sensorunit. De haalbaarheid, rekening houdend met de geldende vereisten, wordt ingeschat en finaal wordt de geschatte kostprijs bepaald.

# 2.1.1 Specificaties

De belangrijkste specificatie van de spoelen voor deze toepassing is de sensitiviteit, uitgedrukt in mV/ $\mu$ T. Verder gelden ook geometrische randvoorwaarden, die garanderen dat de spoelen in een compacte box passen.

Spoel specificaties		
Vorm	cirkel	
Diameter cirkel	100	mm
Winding diameter	0.254	mm
Gewicht koper	135	g
Gevoeligheid	0.01	μΤ
Maximum veld	655	μΤ
Aantal windingen	316	

Tabel 1 Eigenschappen van de spoelen volgens het eerste eigen ontwerp.

### 2.1.1.1 Sensitiviteit

De sensitiviteit bepaalt hoe groot de 50 Hz spanning ter hoogte van de connector van de spoel is voor een gegeven 50 Hz magnetisch veld, en wordt voornamelijk bepaald door het aantal windingen en de oppervlakte van de windingen. De minimale sensitiviteit hangt af van de gewenste nauwkeurigheid (in  $\mu$ T) en de minimale stap (in mV) van de ADC (analoog naar digitaal converter). Voor een meetnauwkeurigheid van 0.01  $\mu$ T en een minimale stap van 0.0078 mV, hebben we een sensitiviteit nodig van 0.78 mV/ $\mu$ T, ofwel 0.078 V/G.

De waarde van 0.78 mV/ $\mu$ T zal als uitgangspunt voor het eerste ontwerp dienen. De sensitiviteit moet uiteindelijk samen gezien worden met een eventuele versterking verder in het circuit, en kan binnen een zeker bereik aangepast worden in een volgende versie van het ontwerp.

# 2.1.1.2 Geometrie

De belangrijkste beperkingen op de geometrie worden bepaald door de afmetingen van de sensorbox. Hiervoor gaan we uit van een maximale afmeting van de spoelen van 10 cm. Net zoals de sensitiviteit, kan deze waarde in een volgend ontwerp aangepast worden indien dit een grote invloed blijkt te hebben in positieve of negatieve zin.

### 2.1.1.3 Overige

In tweede instantie zijn ook de inductiviteit van de spoel en de totale hoeveelheid koper van belang. De inductiviteit bepaalt welk parallelle capaciteit nodig is voor de spoel. Deze hebben een invloed op de resonantiefrequentie en het filterend vermogen bij andere frequenties. De totale hoeveelheid koper kan de prijs ook doen oplopen, en moet dus beperkt worden om rendabel te blijven.

# 2.1.2 Ontwerp

Bij de lage frequentie van 50 Hz, kan het ontwerp van de spoel zo goed als volledig bepaald worden aan de hand van gekende formules. Hierna volgen simulaties en metingen om dit te bevestigen.

Het eerste ontwerp bestaat uit een ronde spoel van 316 windingen. Deze zorgen voor de gewenste sensitiviteit. De diameter van de windingen bedraagt 0.25 mm, wat net werkbaar is, voor een voldoende lage weerstand zorgt, maar ook de totale hoeveelheid koper beperkt houdt.

# 2.1.3 Simulaties

Op voorhand werd een computermodel van de spoel gesimuleerd om de beoogde geïnduceerde spanning (proportioneel met de sensitiviteit voor een gegeven magnetisch veld) te bevestigen (links). Ook de mogelijkheid om het magnetisch veld onafhankelijk van de polarisatie op te meten met 3 loodrecht geplaatste spoelen, werd via simulaties bevestigd (rechts).



Figuur 1: (links) Simulatie in COMSOL van de geïnduceerde spanning in de spoel voor een 50 Hz magnetisch veld. (rechts) Simulatie voor variërende polarisatie van het magnetisch veld.



### 2.1.4 Fabricatie

Figuur 2: Uitvoering van het eerste ontwerp van de spoelen.

De windingen van de spoel worden gewikkeld om een houder (bobijn). Deze wordt ge-3d-print. De windingen zullen een gezamenlijke dwarsdoorsnede hebben van 8 mm x 4 mm. De spoel wordt verbonden met een BNC-connector in functie van de aansluiting op het circuit en metingen.

### 2.1.5 Metingen

De spoel werd getest aan de hand van metingen van het magnetisch veld van de voedingskabel van een gloeilamp, aangezien deze een behoorlijk constante weerstand heeft. Hierdoor is ook de stroom constant, en bijgevolg het magnetisch veld bij 50 Hz. De metingen in Figuur 3 toonden aan dat het magnetisch veld bij 50 Hz opgemeten wordt en zichtbaar is, zowel in het tijdsdomein (links) als in het frequentiespectrum (rechts).

Hoewel de 50-Hz component de meest dominante is, zit een groot deel van de energie van het signaal vervat in hogere frequentiecomponenten en ruis. Dit kan opgelost worden aan de hand van zowel hardware als software. Een parallelle capaciteit kan reeds het grootste deel van de hogere frequenties onderdrukken. In het circuit op het PCB zijn ook nog filters opgenomen zoals beschreven in Sectie 2.3.

De vooropgestelde sensitiviteit is echter nog steeds lager dan deze van de meest performante commercieel beschikbare spoelen (Sectie 2.3). Door ruis die zijn oorzaak vindt voorbij de spoel in het elektrisch circuit, zal dit een negatieve invloed hebben op de signaal/ruis verhouding (SNR). Hoewel het ontwerp kan aangepast worden, zal met eenvoudige technieken niet de sensitiviteit van de commerciële spoelen kunnen behaald worden. Een versterkende stap op het PCB vlak na de spoel, zou echter wel het gewenste effect van hogere SNR kunnen hebben.



Figuur 3: Meting van 50 Hz magnetisch veld met de zelfontworpen spoelen. (links) Tijdssignaal. (rechts) Frequentiespectrum. De meting wordt getoond door de blauwe waarden, een gefilterde versie is te zien in oranje.

# 2.1.6 Kostprijs

Vooraleer verder te gaan met een volgende iteratie, wordt voor het huidige ontwerp een raming gemaakt van de kostprijs. De grootteorde van deze inschatting zal niet aanzienlijk wijzigen bij een volgende iteratie. De inschatting geldt per spoel. Zowel voor dit ontwerp als de commerciële spoelen geldt dat er drie spoelen nodig zijn per sensorbox.

De belangrijkste componenten van de kostprijs zijn opgenomen in Tabel 2Tabel 2 Inschatting van de kostprijs per spoel voor het eigen ontwerp.. Hoewel de materiaalkosten op zich meevallen, is het totale proces behoorlijk arbeidsintensief, gezien er veel verschillende stappen nodig zijn om tot de afgewerkte spoel te komen.

Onderdeel	Prijs (Eur)
Geïsoleerde koperdraad AWG 30	5.00
BNC Connector	5.00
3D printen houder: printuren + materiaal	40.00
Werkuren	75.00
- printen houder + afwerking	
- wikkelen spoel	
- solderen	
- testen + kalibreren	
Totaal	125.00

Tabel 2 Inschatting van de kostprijs per spoel voor het eigen ontwerp.

# 2.1.7 Conclusie

De metingen suggereren dat met de juiste aanpassingen aan het elektrisch circuit en huidig ontwerp, de spoelen kunnen voldoen aan de meetvereisten. Echter geldt dus ook dat niet de meest sensitieve variant van de commerciële spoelen hoeft gebruikt te worden, waardoor de geschatte kostprijs hiervan bij benadering eerder 100 euro per spoel zal bedragen.

Aangezien dit minder is dan de geschatte kostprijs van de zelfontworpen spoelen, wordt beslist om met aan te kopen spoelen verder te werken. Dit zal vooral ook het productieproces van de sensoren vereenvoudigen en versnellen.

# 2.2 FASE 1B: STUDIE VAN BESTAANDE SENSOREN

Als eerste optie werd gekeken om een commercieel beschikbare sensor te gebruiken in dit project. Dit gaf een snelle beschikbaarheid als voordeel. In Tabel 3 wordt een overzicht getoond van de beschikbare sensoren op het moment van de start van het onderzoek. Alle sensoren uit de tabel worden verder in detail besproken.

Model	Frequentie bereik	Assen	Magnetische veld sterkte	Elektrische veld sterkte	Andere features
EHP-50	1 Hz – 400 kHz	3	0.3 nT – 10 mT	5 mV/m – 100	Loggen van data
				kV/m	tot 36 uur
ELT-400	1 Hz – 400 kHz	3	1 nT – 320 µT OR	100 V/m OR 50	Vergelijking tov
			10 µT – 80 mT	kV/m	standaarden op
					toestel zelf
NFA30M	16 Hz – 30 kHz	3	1 nT – 20 μT	0.1 – 2000 V/m	Max hold, loggen
					van data tot meer
					dan 48 uur,
					bijgeleverde
					software
Extech	30 Hz – 300 Hz	1	0.01 tot 20 µT	/	Handheld device
480823					
EMF/ELF					
Meter					
Tenmars TM-	50/60 Hz	3	0.01 μT – 20 μT OR	1 V/m – 2000	Kan zowel ELF als
190			0.1 μT – 200 μT	V/m	RF meten
Tenmars TM-	30 Hz – 300 Hz	1	0.01 μT – 20 μT OR	/	Handheld device,
191			0.1 μT – 200 μT		max hold functie
Tenmars TM-	30 Hz – 2kHz	3	0.001 μT – 2 μT OR	/	Handheld device,
192D			0.01 μT – 20 μT OR		max hold functie
			0.1 μT – 200 μT		9999 datalogs
LATNEX MG-	30 Hz – 2kHz	3	0.001 μT – 2 μT OR	/	Handheld device,
2000TD			0.01 μT – 20 μT OR		max hold functie
			0.1 μΤ – 200 μΤ		9999 datalogs

Tabel 3: Overzicht van beschikbare ELF sensoren.

# 2.2.1 EHP-50

De EHP-50 [1] is een frequentie selectieve elektrische en magnetische veld meter. De sensor gebruikt FFT (Fast Fourier Transform) code en heeft een bereik van 1 Hz tot 400 kHz. Het is mogelijk om deze sensor uit te lezen met een speciaal ontwikkeld software programma. Ook is het mogelijk om de sensor in een standalone mode te plaatsen, waarbij de sensor tot 24 uur data kan loggen. Echter is het niet mogelijk om deze termijn te verlengen, noch om deze data via een IoT communicatiemodel door te sturen. Tevens is er ook een hoge kostprijs verbonden aan het aankopen van deze sensor. Het zou dus niet praktisch zijn om deze sensor voor een lange termijn monitoringsnetwerk te gebruiken. Door de grote gevoeligheid en groot bereik, zal deze sensor

echter wel gebruikt worden als de "gouden waarde" bij het kalibreren en testen van de andere sensoren.

### 2.2.2 ELT-400

De ELT-400 [2] is een handheld device met een groot frequentiebereik dat kan ingesteld worden in 3 bereiken. Er zijn ook 3 interne assen in de probe, dus het volledige veld wordt opgemeten door middel van de ELT-400. Er is een display voorzien waar de veldwaarden kunnen worden afgelezen. Echter is het niet mogelijk, naar onze kennis, om deze sensor uit te lezen via een computer. Dit in combinatie met de hoge aankoopprijs zorgt ervoor dat we niet met deze sensor zullen werken om een grootschalig monitoringsnetwerk op te stellen. Echter zal deze sensor ook gebruikt worden bij het kalibreren en verifiëren van de andere sensoren als extra check bovenop de EHP-50. Ook kan het gebruikt worden bij de plaatsing van de sensoren om een maximum veld te zoeken.

# 2.2.3 NFA30M

De NFA30M [3] is een triaxiaal handheld device, die tot 48 uur kan opmeten om pieken in EMF vervuiling te vinden. Er is een PC software voorzien die verschillende grafieken en statistische analyses kan uitvoeren. Het grote frequentiebereik (16 Hz – 32 kHz) in combinatie met het meetbereik (1 nT – 19990 nT) maken deze sensor een goede optie om op korte termijn EMF te loggen. Echter is het praktisch onhaalbaar om een framework rond de sensor te maken om deze sensor ook op lange termijn bruikbaar te maken.

### 2.2.4 Extech 480823 EMF/ELF sensor

Deze persoonlijke EMF meter [4] meet in het correcte frequentiebereik met slechts 1 as. Het is echter een handheld device en dus minder geschikt om ergens voor een langere periode te plaatsen. De sensor heeft ook een beperkte nauwkeurigheid en een beperkt meetbereik. Bovendien is er enkel de mogelijkheid om de waarden van het scherm af te lezen en is er geen datalogger functie beschikbaar. Doordat we hier zelf ook geen controle hebben over de meter en geen idee hebben van de levensgarantie van de fabrikant, hebben we beslist om hier ook geen framewerk rond te bouwen om wel een datalogger te ontwikkelen.

### 2.2.5 Tenmars TM-190

Deze persoonlijke EMF meter [5] meet in het correcte frequentiebereik met 3 assen. Naast ELF kan deze sensor ook RF opmeten. Dit device omvat dus in principe 3 metingen in 1 toestel, dat ook allemaal tegelijk op het display worden getoond: magnetisch veld (ELF), elektrisch veld (ELF), elektrisch veld (RF). Er is echter ook geen mogelijkheid voorzien om de gemeten data te loggen. Ook moet de resolutie handmatig aangepast worden indien nodig. Dit zou dus betekenen dat we ook hier een volledig framewerk zouden moeten bouwen om de data log functie en de resolutiefunctie te kunnen veranderen. Aangezien dit geen eenvoudige aanpassingen zijn, werd er beslist om niet met deze meter verder te gaan.

### 2.2.6 Tenmars TM-191

Deze EMF meter [6] meet in het correcte frequentiebereik met slechts 1 as. Dit device is uitgerust met een (max) hold functie, waardoor de data kan worden bewaard voor een korte periode of over een langere periode het maximum kan weerhouden worden. Echter is hier opnieuw enkel een display voorzien en geen communicatiepoort, dus hebben we ook deze sensor niet verder onderzocht.

# 2.2.7 Tenmars TM-192D & LATNEX MG-2000TD

Deze persoonlijke EMF meters [7] meten in het correcte frequentiebereik met 3 assen. Deze sensoren zijn dezelfde, enkel uitgebracht onder een verschillende merknaam. Deze sensor heeft in tegenstelling tot de voorgaande sensoren wel de mogelijkheid om data te loggen. Er is zelfs een softwaretoepassing ontwikkeld die communicatie met een pc zou voorzien. Echter is de documentatie hierrond heel beperkt, dus hebben we zonder het toestel aan te kopen niet kunnen achterhalen of het mogelijk is om met een microcontroller (Arduino/raspberry pi) aan te sturen. Ook hebben we geen controle over de leverbaarheid en de prijs van het toestel, noch over het meetbereik en de meetnauwkeurigheid. Deze handheld sensor is dus mogelijks wel interessant, indien de eigen ontwikkelde sensor niet accuraat zou meten.

# 2.2.8 Conclusie

Er is momenteel geen sensor beschikbaar die over een lange periode data kan verzamelen en kan doorsturen naar een server. Verder is er ook weinig transparantie bij de gebruikte materialen en is er geen garantie dat de op vandaag beschikbare sensoren dit ook nog zullen zijn in de (nabije) toekomst. Om een grootschalig monitoringsnetwerk voor 50 Hz magnetische velden op te stellen is dus gekozen om zelf een sensor te maken die een IoT communicatieprotocol bevat.

# 2.3 FASE 2: ONTWERP VAN CIRCUIT + PCB

Zoals naar voren kwam in de vorige oplijsting, is er momenteel geen sensor beschikbaar en werd gekozen om een eigen sensor te ontwikkelen.

# 2.3.1 Vereisten

Het doel van de studie is om magnetische velden te kunnen opmeten, afkomstig van een hoogspanningslijn. Dit magnetisch veld heeft een frequentie van 50 Hz, gelijk aan de frequentie van de Belgische netspanning. De studie toont de nood aan om het magnetisch veld voortdurend te kunnen monitoren om adequate beslissingen te kunnen nemen en de algemene bevolking voldoende te informeren.

De eerste vereiste is dat er data moet kunnen worden gestuurd naar het dataplatform van het Departement Omgeving (Thingsboard via MQTT-protocol). Een tweede vereiste is de levensduur van de sensor. De sensor moet voldoende lang kunnen opmeten, alsook doorheen deze periode leverbaar zijn indien het aantal sensoren uitbreiden. Het moet mogelijk zijn om onafgebroken metingen te kunnen uitvoeren zonder menselijke interventie. Ten derde moet de meetonzekerheid en de betrouwbaarheid voldoende zijn zodat 0.4  $\mu$ T en 100  $\mu$ T zo nauwkeurig mogelijk kunnen worden opgemeten. Doordat dit een verschillende grootteorde van op te meten signaal betreft, is er een verschillende vereiste omtrent de nauwkeurigheid.

Voor de 0.4  $\mu$ T sensor moet er een minimale nauwkeurigheid zijn van 0.004  $\mu$ T, zoals aangegeven in het bestek. Voor de 100  $\mu$ T sensor is een nauwkeurigheid van 0.1  $\mu$ T voldoende. Door de onderzoekende partij werden deze vereisten oorspronkelijk opgevat als twee verschillende sensoren die elk apart getest werden. Nadien zou er gekeken worden of beide sensoren kunnen gecombineerd worden.

De sensor moet bovendien ook de drie orthogonale componenten kunnen opmeten, om een zo goed mogelijke inschatting van het totale veld te maken. De prijs van de sensor moet zoveel als mogelijk beperkt worden. Dit om het mogelijk te maken om een monitoringsnetwerk op te stellen met een groot aantal sensoren. Als laatste vereiste moeten de sensorboxen weerbestendig zijn.

### 2.3.2 Exploratie en design

Er wordt vanuit gegaan dat er abstractie kan worden gemaakt van de gebruikte antenne. Dit houdt in dat we aannemen dat er een antenne zal zijn die met een bepaalde gevoeligheid het magnetisch veld kan omzetten naar een bepaalde spanningswaarde binnen een bepaald frequentiebereik (zie sectie 2.1). Het onderzochte frequentiebereik in dit geval is 10 Hz – 300 Hz.

De sensor zal bestaan uit een banddoorlaatfilter, een analoog naar digitaal converter (ADC), en een microcontroller die de data kan uitlezen, analyseren en doorsturen (Figuur 4).



Figuur 4: Overzicht van de te realiseren sensor

Voor de banddoorlaatfilter werd er een eigen filter gemaakt (RC-keten) en er werd een commercieel beschikbare component (LTC1067) getest. Het voordeel van een commerciële component is dat de eigenschappen hiervan duidelijk zijn aangegeven in de datasheet en dat deze opgebouwd is uit hogere ordes filters. Een hogere orde filter zorgt voor een snellere filtering buiten het vooropgestelde bereik. Een nadeel is de beschikbaarheid, levensduur en prijs. Het voordeel van de RC keten is de eenvoud en beschikbaarheid. Echter is er kennis nodig om dit correct uit te rekenen en is de kans op ongewenste stromen en voltages hoger.

Een andere optie was om een root mean square (RMS)-filter toe te voegen na de banddoorlaatfilter (HMC1020LP4E) om al een eerste RMS-waarde te verzamelen i.p.v. dit volledig in software te doen. Verder was het ook de bedoeling om niet met negatieve spanningswaarden rekening te houden, waardoor er gekozen is om een gelijkrichter toe te voegen of het referentiesignaal aan te passen naar de helft van de voedingsspanning. Na de gelijkrichter kan ook nog een versterking of verzwakking worden toegevoegd zodat het op te meten signaal geschaald kan worden naar het werkingsgebied van de ADC. Negatieve voltages worden vermeden omdat dit vaak niet getolereerd wordt door de te gebruiken componenten en ook complexiteit met zich mee brengt. Tevens zijn er extra componenten nodig om in negatieve spanning te voorzien.

Er is gekozen om in dit project snel over te schakelen naar prototypes wegens de lage kostprijs en de snelle beschikbaarheid. De eigen gemaakte banddoorlaatfilter is echter wel eerst getest via software (<u>www.Circuitlab.com</u>) en dan geverifieerd in hardware.

De verschillende pistes (type banddoorlaatfilter, RMS filter) zijn allemaal op een printed circuit board (PCB) geplaatst via tekensoftware "EAGLE". Onderstaande oplijsting geeft de drie grote denklijnen weer die eerder aan bod kwamen.

### 2.3.2.1 Prototype 1: RMS filter



De RMS filter die gebruikt werd was de HMC1020LP4E. Deze filter is gemaakt in een QFN24 uitvoering. Deze uitvoering zorgt er echter voor dat het moeilijk is om deze component met de hand te kunnen solderen. Ook na toepassing van andere soldeertechnieken was het niet mogelijk om het prototype uitvoerig te kunnen testen. Deze optie is dan ook niet verder onderzocht, aangezien de kostprijs van deze PCB hoger ligt dan de volgende prototypes en de filter ook een kritische component toevoegt aan het ontwerp, zonder veel meerwaarde.

### 2.3.2.2 Prototype 2: eigen banddoorlaatfilter



Dit prototype is het meest "fail-safe" en future proof, doordat de filter opgebouwd is uit weerstanden en capaciteiten. In functie van het mogelijks zwak signaal dat een magnetische spoel aflevert, is ervoor gekozen om reeds een versterking toe te voegen na de hoogdoorlaatfilter. Dit houdt ook in dat mogelijke ruis al deels gefilterd is, waardoor de Signal-to-Noise Ratio (SNR) ook kan worden verbeterd met het toevoegen van een versterking. Ook de operationele versterkers gebruikt voor dit prototype zijn van een generieke aard dus vormen geen probleem naar beschikbaarheid. Echter bleek tijdens de simulaties dat het vooropgestelde circuit niet de gewenste filtering zou teweegbrengen. Er is meteen overgeschakeld naar een tweede orde filtering voor de laagdoorlaatfilter. Deze filter bestaat dus uit een hoogdoorlaatfilter vanaf 10 Hz en een tweede orde laagdoorlaatfilter tot 300 Hz. Dit betekent dat de signalen die hoger zijn dan 300 Hz dubbel zo snel worden verzwakt. Echter, doordat in de simulaties enkel globale componenten kunnen worden gebruikt en niet de specifieke componenten die werden geselecteerd voor het design, worden hier geen simulatiewaarden getoond. Deze filtering werd echter wel getest op een PCB, wat verder wordt getoond.

#### 2.3.2.3 Prototype 3: Aangekochte banddoorlaatfilter



Hier werd gekeken of een aangekochte banddoorlaatfilter (LTC1067), die een hogere order filtering voorziet, beter werkt dan onze eigen gemaakte filter. Hierbij klopt het vooropgestelde frequentiebereik (10 Hz – 300 Hz) niet. Filters in het voorgestelde frequentiebereik (10 Hz – 300 Hz) zijn er niet gevonden door de onderzoekende partij. Er is ook beslist om geen aparte hoog- en laagdoorlaatfilters te bestellen aangezien dit twee kritische componenten aan het systeem zou toevoegen.

In het vervolg van het onderzoek wordt er enkel rekening gehouden met prototype 2. De andere prototypes werden enkel voor de volledigheid in het verslag opgenomen.

In bovenstaande werden enkel de verschillen gerapporteerd. Hieronder wordt de volledige sensor overlopen, alsook de gebruikte componenten.

Als antenne maken we gebruik van een aangekochte cilindrische ELF spoel (MC858, Magnetic Sciences). Deze antenne heeft een bereik van 10 Hz – 400 Hz met een resonantiepiek tussen 30 Hz – 100 Hz. Deze antenne werd gebruikt wegens de beperkte kostprijs in vergelijking met de eigen ontwikkelde spoel en het correcte meetbereik (Sectie 2.1). Vervolgens wordt de operationele versterker bepaald. Deze moet een geschikte bandbreedte hebben en een laag ruis niveau. In deze studie is er gekozen om met de MCP602X reeks te werken.

Als derde wordt ook de ADC bepaald. In de finale versie gebruiken we de MCP3464, een 16-bit delta-sigma ADC met een lage ruis die een samplerate kan halen van 153.6 kilo Samples Per Second (kSPS). Verder is er ook een programmeerbare amplificatie van 0.33x tot 64x. Er kunnen tot 8 kanalen tegelijkertijd uitgelezen worden. De microcontroller in dit project is een Arduino gebaseerde controller. Het exacte type hangt af van het gewenste IoT protocol en moet dus nog niet bepaald zijn tijdens de ontwerpfase. Dit zorgt voor een zekere flexibiliteit tijdens zowel het ontwerpen als tijdens de uitrol (i.e., vrije mogelijkheid om te wisselen van IoT protocol).

# 2.3.3 Verificatie en kalibratie

### 2.3.3.1 Verificatie

Verificatie en kalibratie worden uitgevoerd op de te testen PCB. Dit wordt uitgevoerd door middel van een signaal generator (PSG9080, Joy-it [8]) die een frequentiebereik heeft van 1 nHz tot 80 MHz en een amplitudebereik van 2 mVpp tot 25 Vpp (Vpp; Volt peak-to-peak). Er kunnen twee kanalen tegelijk verbonden worden, die tevens een andere golf kunnen uitsturen. Ook is het mogelijk om de signaal generator via software aan te sturen. Er wordt ook gebruik gemaakt van een digitale oscilloscoop (Picoscope 3406, Pico Technology [9]) om de werking van de individuele filters te kunnen testen. Hierdoor is er geen afhankelijkheid van een mogelijkse verkeerde uitlezing door een ADC of een hardware fout in de PCB.

Ter verificatie wordt er een gekend signaal aangelegd aan het circuit en wordt het circuit onder spanning gezet. Op deze manier propageert het signaal door de hardware en kan het bekeken worden aan de hand van de picoscope. Onder verificatie wordt begrepen dat de werking van de filters wordt getest en de verzwakking/versterking die deze teweeg brengen, alsook naar de correcte plaatsing en werking van het totale bord.

Er worden twee testen uitgevoerd. (1) De eerste test bestaat uit een sweep van 1Hz tot 10 kHz met een vaste amplitude. (2) Bij de 2<sup>de</sup> test wordt er een vaste frequentie ingesteld, waarbij de amplitude gevarieerd wordt. Er wordt hierbij echter nog niet gekeken naar de absolute veldwaarden, enkel naar het verloop (i.e., stijgt de input lineair, moet ook de output lineair stijgen).

### 2.3.3.2 kalibratie

Een kalibratie bestaat uit twee onderdelen. De eerste kalibratie wordt gedaan op de PCB zelf, zonder de aanwezigheid van de magnetische spoelen (i.e., **on-board kalibratie**). M.a.w., het signaal wordt rechtstreeks in de PCB gestuurd, naar analogie met de verificatie. Hierbij wordt een variabel, gekend signaal in het circuit gestuurd. De output wordt aan de hand van de ADC uitgelezen door de microcontroller en bewaard. Na de on-board kalibratie vergelijken we het verkregen signaal met het ingestuurde signaal om een kalibratietabel op te stellen. Als er nu een antenne aan het systeem wordt toegevoegd en de ADC een bepaalde output geeft, dan kunnen we dit omzetten naar de exacte spanning die door de antenne wordt opgemeten. Dit proces brengt dus de verzwakking, ruis en parasitaire componenten in rekening. Aan de hand van een omzettingsfactor kan de verkregen spanning omgezet worden in een veldwaarde, opgemeten in  $\mu$ T (micro Tesla).

De tweede kalibratie waarvan sprake is een **in-lab kalibratie**. Hierbij wordt het volledige systeem gekalibreerd door in de vrije ruimte de sensor (i.e., PCB + antennes) twee rotaties rond zijn as te laten maken terwijl er dichtbij een dominante, stabiele 50 Hz bron aanwezig is. Het verkregen resultaat van de sensor wordt dan vergeleken met de EHP-50, die ook twee rotaties rond zijn as maakt en die beschouwd wordt als gouden standaard. Dit wordt herhaald op minstens 2 afstanden van de dominante bron om verschillende veldsterktes op te meten. De kalibratiefactor die verkregen wordt, wordt in rekening gebracht bij de kalibratietabel. Bijgevolg is de sensor volledig gekalibreerd en klaar om in het veld uitgezet te worden. Daar kan ook nog een bijkomende kalibratie uitgevoerd worden om de omgevingsfactoren (e.g. naast een metalen oppervlak geïnstalleerd, naast een muur geïnstalleerd) in rekening te brengen.

# 2.3.4 Verdere exploratie ELF sensor

Na het solderen van de verschillende prototypes werden reeds enkele testen uitgevoerd, die de globale werking van de PCB en dan specifiek de werking van de filtering getest hebben. Deze testen gaven als conclusie dat de sensor opgemaakt uit de eigen banddoorlaatfilter (prototype 2) de beste piste was. Deze was het eenvoudigste te solderen en bevat het kleinste aantal kritische

componenten. Verder in de tekst zullen we dus ook enkel deze sensor verder behandelen. Dit werd ook besproken op de tussentijdse rapporteringen en werd goedgekeurd door de opdrachtgever. Voorlopig wordt er ook gefocust op een sensor met één vector, aangezien dit eenvoudig uit te breiden is naar een sensor die meerdere vectoren (i.e. triaxiaal) kan opmeten. Vanaf nu worden dan ook resultaten getoond die uiteindelijk hebben geleid tot de finale sensor.



Figuur 5: Huidige PCB van de ELF sensor. (A) BNC connector; (B) Resistoren en capaciteiten; (C) OPAMPs; (D) ADC

De huidige ELF sensor wordt getoond in Figuur 5. Van links naar rechts vinden we de Bayonet Neill–Concelman (BNC) connector terug, die de input van de ELF antenne in het bordje brengt. Daarnaast zien we resistoren en capaciteiten doorheen het bordje. Verder staan er 2 OPAMPs op het bordje om de filtering, gelijkrichting en versterking te voorzien. Als laatste zien we de ADC, die wordt uitgelezen door de microcontroller.

De gekozen filteringwaarden van de actieve, inverterende hoogspanningsfilter zijn de volgende: capaciteit van 0.22 uF, een ingangsweerstand van 75 k $\Omega$  en een feedback weerstand van 150 k $\Omega$ . Dit levert een versterking van het signaal op van -2. Deze waarden zorgen ervoor dat er een kantelfrequentie is van 9.65 Hz (kantelfrequentie = 1 / (2 \*  $\pi$  \* R \* C), met R = ingangsweerstand, C = capaciteit). Voor de laagspanningsfilter kan de kantelfrequentie op eenzelfde manier worden berekend. Hierbij is de weerstandswaarde gelijk aan 50 k $\Omega$  en de capaciteitswaarde 10 nF. Dit komt op een kantelfrequentie van 318.31 Hz, waarbij de versterking afneemt buiten het frequentiebereik met -20 dB per vertienvoudiging van de frequentie.

De verificatie van het systeem toont aan dat het ontworpen circuit frequenties lager dan 10 Hz en hoger dan 300 Hz filtert, zonder een noemenswaardige verzwakking te veroorzaken van het opgemeten signaal (Figuur 6). Harmonische signalen worden hier niet extra gefilterd, deze worden door de software gefilterd. Er is een maximum vast te stellen bij 50 Hz. Hieruit werd afgeleid dat de 1 vector PCB adequaat 50 Hz magnetisch veld kan opmeten, waardoor deze werd uitgebreid naar een triaxiaal ontwerp.



Figuur 6: Frequentie respons van prototype 2.

### 2.3.5 Triaxiaal design

De triaxiale sensor (Figuur 7) bestaat uit drie keer de individuele sensor zoals hierboven beschreven. Na het solderen viel het echter op dat er een te hoge ruis op het bordje aanwezig was, waardoor de lagere veldwaarden niet correct werden waargenomen. Dit had als gevolg dat de vereiste gevoeligheid van de sensor (zie Sectie 2.3.1) niet gehaald werd. Om die reden werd de gelijkrichting uit het circuit gehaald. In plaats hiervan werd er een nieuwe referentiewaarde ingevoerd, die de helft is van de voedingsspanning (3.3 V). Hierdoor halveert het bereik van de sensor (i.e. van 0 V tot 3.3 V i.p.v. -3.3 V tot 3.3 V), maar kunnen we de ruis onderdrukken door niet rond 0 V te werken en wel rond het middelpunt van het bereik van de ADC. De PCB is te zien in Figuur 7 terwijl de belangrijkste componenten opgenomen zijn in het onderstaande schema. Hierbij werd na iedere stap ook steeds een meetpunt voorzien, zodat de filtering eenvoudig kon worden getest. Ook kon op die manier, mits het toevoegen van een bijkomend circuit naast het bord, nog meer functionaliteiten worden getest die nodig zouden zijn op het finale design.



Figuur 7: Triaxiale ELF sensor, eerste ontwerp

Het onderstaande schema toont de belangrijkste componenten van de triaxiale sensor. De resistoren en capaciteiten (R en C) die gebruikt werden worden hier niet getoond. De volledige Bill Of Material (BOM) werd bezorgd aan de opdrachtgever. Voor zowel de 0.4  $\mu$ T als de 100  $\mu$ T sensor worden dezelfde componenten gebruikt als in het schema, enkel de weerstanden en capaciteiten zijn aangepast om een grote verzwakking/versterking te creëren. Aangezien deze sensoren dezelfde hardware gebruiken, zou het ook moeten mogelijk zijn om beide sensoren te combineren op 1 PCB. Echter moet er hier dan wel nagedacht worden over overspanningsbeveiliging, aangezien de sensor die 100  $\mu$ T kan opmeten een veel hoger spanningsbereik heeft.

Deze sensor (i.e. focus op 0.4  $\mu$ T sensor) werd aan de hand van de voorgaande beschreven verificatie methodes getest. De volgende stap in het onderzoek is om een volledige sensor box te bouwen en de sensor te kalibreren en dan uitvoerig te testen.



### 2.3.6 Software filtering

Bovenop de verbeterde hardware, werd ook een nieuwe versie van de software geïmplementeerd in Arduino. In plaats van de ADC uit te lezen en een gemiddelde waarde te rapporteren, werd er ook in de software aan filtering gedaan, door middel van een fourieranalyse (Figuur 8). Het inkomend signaal wordt door middel van een cosinus en sinus omzetting vergeleken met een vooraf ingesteld signaal op 50 Hz. Hierbij wordt ervoor gezorgd dat het vooraf opgestelde signaal een veelvoud is van 4 (e.g. sinus signaal van 20 waarden om de volledige golf te beschrijven). Dit is zo gedaan zodat er slechts 1 golf moet worden opgeslagen aangezien de cosinus en sinus zo steeds in verhouding zijn. Dit is zo gekozen aangezien er slechts een beperkt (werk)geheugen beschikbaar is op de microcontroller. Deze filtering zorgt er ook voor dat er eventuele harmonische signalen binnen het filterbereik (10 Hz – 300 Hz) bijkomend gefilterd worden.

Bij de aparte vectoren wordt steeds gewerkt met het volledige signaal. Echter, als de vectoren worden gecombineerd wordt voor het totale veld wordt enkel de RMS waarde bewaard.

De volledige code werd bezorgd aan de opdrachtgever.



Figuur 8: Software filtering door middel van fourier analyse.

# 2.4 FASE 3: BOUW VAN SENSORBOX

### 2.4.1 Testen van de sensor

In Sectie 2.3 is er aangetoond dat het ontworpen circuit een 50 Hz bron kan opmeten en dat de filtering correct werkt. Verder is er ook een manier gevonden om de ruis te beperken in de hardware. De uitkomst van het onderzoek is dus een triaxiale 0.4  $\mu$ T sensor. In deze sectie bespreken we het ontwerp van de volledige sensor box en zal deze sensor box worden gekalibreerd en getest in verschillende situaties. Er is primair voorkeur gegeven aan de 0.4  $\mu$ T sensor aangezien plaatsen met lagere veldwaarden makkelijker te bereiken zijn. De getoonde principes zijn echter ook geldig voor de 100  $\mu$ T box.

Tot op heden is er steeds abstractie gemaakt van de verzwakking en versterking in de sensor, aangezien die kan gefinetuned worden aan de hand van de resistoren en capaciteiten. Echter, doordat nu de keuzes voor de ADC en OPAMPS gemaakt zijn, kunnen de resistoren en capaciteiten ook bepaald worden. Deze worden zo gekozen dat het bereik van de ADC optimaal gebruikt wordt binnen de verwachtingen van de opdrachtgever. Het minimum te meten veld was 0.1  $\mu$ T, met een

stapgrootte van maximaal 4 nT. De stapgrootte wordt gedefinieerd als de wijziging in veldwaarde als de ADC output 1 bit groter of kleiner wordt.

Als eerste stap is er beslist om het signaal van de antenne te verdubbelen bij de ingang. Dit is gekozen aan de hand van de reactiviteit van de spoelen (MC858). Indien we deze ingangsspanning verdubbelen, dan wordt het volledige bereik van de ADC gebruikt (3.3 V), zonder dat er een software versterking moet worden toegevoegd. De gebruikte ADC is een 16-bit versie, wat inhoudt dat er 32768 bits beschikbaar zijn (helft van de bits zijn voorzien voor negatieve spanning, die hier niet gebruikt worden). Door de reactiviteit van de spoelen te gebruiken, kan worden berekend welke verandering in magnetisch veld een verandering van 1 bit teweeg zal brengen. De reactiviteit van de spoelen wordt door de producent van de spoelen mee geleverd. Voor de huidige parameters, bedraagt die minimale stapgrootte 2 nT, rekening houdend met de verdubbeling van de ingangsspanning. Het theoretisch maximaal magnetisch veld dat kan worden opgemeten is dus 70  $\mu$ T.

$$1 \ bit = \frac{3300 \ mV}{32768} = 0.101 \ mV \tag{1}$$

$$F(uT) = \frac{mV}{reactiviteit \ spoelen} = \frac{0.101 \ mV}{47.04} = 0.002 \ uT \tag{2}$$

Eenzelfde berekening kan ook worden gemaakt voor de 100  $\mu$ T sensor. Echter is er nu geen verdubbeling van het signaal, maar een verzwakking met een factor drie. Dit zorgt ervoor dat in verhouding, als er 1.5 volt ingangsspanning wordt aangelegd, bij de 0.4  $\mu$ T sensor een signaal van 3 V wordt opgemeten, terwijl bij de 100  $\mu$ T sensor een signaal van 0.5 V wordt opgemeten. Indien we hiermee rekening houden, dan is de nieuwe stapgrootte 0.013  $\mu$ T en het maximaal op te meten veld 421  $\mu$ T.

### 2.4.1.1 On-board kalibratie

Figuur 9 toont de opgemeten spanning versus de ingestuurde spanning. Dit is het resultaat van een on-board kalibratie. De drie vectoren werden sequentieel gemeten. De verkregen output van de sensor wordt uitgezet ten opzichte van het ingestuurde signaal. Zoals verwacht, is het signaal verdubbeld. Op basis van deze grafiek kan er aan de hand van interpolatie een kalibratietabel opgesteld worden. Indien er meerdere sensoren gemaakt worden, kan er een algemene kalibratietabel opgesteld worden. De afvlakking die te zien is vanaf 1600 mV (y-as), is te verwachten aangezien er dan saturatie optreedt.

### 2.4.1.2 In-lab kalibratie

De in-lab kalibratie gebeurt aan de hand van een stabiele, 50 Hz bron. Figuur 10 toont de meetopstelling, waarbij we de bron herkennen als een hittelamp van 1800 W en een opgedraaide bobijn van 20 meter om het magnetische veld te versterken. Verder zien we ook een sensor die op een driepikkel staat. De driepikkel op zijn beurt staat op een draaiplatform.



Figuur 9: On-board kalibratie triaxiale sensor.

Voor de kalibratie roteren we de sensor twee keer, eenmaal met de klok mee en de tweede maal tegen de klok in. De rotatie gebeurt aan een snelheid van 2 graden per seconde, dus de volledige rotatie duurt 6 minuten. De rotatie wordt uitgevoerd om de plaats afhankelijkheid van de spoelen te verminderen. Door de fysieke parameters van de spoelen zitten deze echter niet volledige centraal in het ontwerp, waardoor er tijdens een rotatie een maximale afwijking is van 6 cm. Figuur 9 toont een voorbeeld van een resultaat van een kalibratie. Hierbij is het patroon van de twee rotaties zichtbaar. Bovendien is er ook een patroon zichtbaar dat iedere halve draai terugkomt. Wordt Xpeak beschouwd in de figuur, dan wordt er vastgesteld dat er op tijden ±50 s en ±140 s een maximum optreedt, terwijl er op tijden ±90 s en ±170 s een minimum wordt vastgesteld. Dit is te verwachten aangezien de uitlijning van deze minima en maxima overeenkomen met een rotatie van 180 graden en dus met een optimale of slechte positionering t.o.v. de bron. In dit resultaat is ook de plaats afhankelijkheid te zien, aangezien de maxima en minima niet dezelfde sterkte hebben naargelang de spoel zich dichter of verder van de bron bevindt. Voorts wordt er ook vastgesteld dat Xpeak en Ypeak tegenovergestelde maxima en minima vertonen, wat ook wordt verwacht door de plaatsing van de spoelen.

Dit resultaat (6 minuten gemiddelde, Figuur 11) wordt dan vergeleken met het resultaat van de EHP-50, die dezelfde rotatie ondergaat en die als gouden standaard wordt beschouwd. Dit wordt op minstens 2 verschillende afstanden van de bron uitgevoerd. Het verschil tussen beide systemen wordt als kalibratiefactor in rekening gebracht in het sensorsysteem. Er wordt een klein verschil verwacht tussen de verschillende kalibratiefactoren van de verschillende sensoren uit eenzelfde batch (e.g., variatie van waarde componenten, meer/minder soldeer, reactiviteit spoelen, plaatsing spoelen). Echter, bij kalibratiefactoren minder dan 1.5% bedraagt. Dit leidt dus tot de conclusie dat er een algemene kalibratiefactor kan worden ingesteld, die tevens geldig is over het volledige frequentiebereik van de sensor.



Figuur 10: In-lab kalibratie meetsetup. (A) EHP-50; (B) dominante 50 Hz bron; (C) hittelamp, verbruiker; (D) Eigen spoelen + sensor; (E) draaitafel





### 2.4.1.3 In-field testing

#### Zonnepanelen omvormer

De eerste test werd uitgevoerd aan een omvormer van zonnepanelen in de woning van een lid van de onderzoeksgroep. Deze locatie werd gekozen wegens het te verwachten variërend magnetisch veld (i.e., meer zon, meer omzetting, groter magnetisch veld). Op Figuur 12 is de opstelling getoond. Een omvormer (type R5-5K-S2 [10]), digitale meter en 2 meetsensoren zijn te zien: onze eigen sensor die verbonden is met de MC858 spoelen en de EHP-50 die als gouden standaard dient. Doordat de afstand van de bron t.o.v. de beide meetsystemen niet gelijk is, zal ook het opgemeten magnetisch veld niet helemaal gelijk zijn. Echter kan er wel een conclusie worden gemaakt omtrent het verloop van het magnetisch veld.

Figuur 13 toont dit verloop. Hierin wordt duidelijk hetzelfde patroon vastgesteld bij de eigen sensor (bovenste grafiek) t.o.v. de EHP-50 (onderste grafiek). Na verloop van tijd is er een kleine afwijking vast te stellen aangezien beide systemen een andere tijdsaanduiding gebruiken en deze in de figuur niet gesynchroniseerd is. Hierdoor is het praktisch niet haalbaar om beide grafieken over elkaar te leggen en een kwantitatieve uitspraak te doen over beide patronen. Indien de opwekkingsgrafiek van de omvormer naast beide figuren wordt gezet, wordt opnieuw ditzelfde

patroon vastgesteld. Dit toont dus aan dat onze sensor variaties in magnetisch veld op eenzelfde manier kan vaststellen als commercieel beschikbaar meetmateriaal.



Figuur 12: Testopstelling aan omvormer zonnepanelen en digitale meter. Test gelijktijdig uitgevoerd met eigen sensor (MC858) en EHP-50.



Figuur 13: Overzicht van testmeting aan omvormer zonnepanelen. Hetzelfde verloop kan worden vastgesteld tussen de eigen sensor en de EHP-50. Bij de eigen sensor worden zowel de piek waarden per as getoond als het totale veld (RMS).

#### Hoogspanningslijn

Vorige test toonde aan dat beide sensoren dezelfde variatie vertonen, en dus beide kunnen gebruikt worden om magnetisch veld op te meten en de gekalibreerde sensor te evalueren. Hiervoor is er een sensor geïnstalleerd op de bovenste verdieping van een huis onder een hoogspanningslijn (Figuur 14). Beide sensoren (onze eigen 0.4  $\mu$ T sensor en EHP-50) werden naast elkaar geïnstalleerd



met een tussenafstand van 10 cm om interferentie tegen te gaan. Doordat de afstand t.o.v. de bron nu voldoende groot is (± 17 m), is een verplaatsing tussen de sensoren van 10 cm verwaarloosbaar.

Figuur 14: Testopstelling onder hoogspanningslijn in Hulste. (A) hoogspanningslijnen; (B) positie van sensor, binnen in het huis op de bovenste verdieping.

Figuur 15 toont het verloop van het magnetisch veld onder de hoogspanningslijn tussen 14/04/2023 en 19/04/2023. Het magnetisch veld varieert tussen 0.10  $\mu$ T en 1.06  $\mu$ T. Indien de EHP-50 vergeleken wordt met de eigen ontwikkelde sensor, wordt vastgesteld dat er een gemiddelde variatie is van 6.2%. Deze variatie neemt ook toe naarmate de tijd toeneemt, aangezien beide systemen een eigen klok gebruiken en dit licht gedesynchroniseerd kan geraken. Rekening houdend met de gerapporteerde onzekerheid van de EHP-50, die 5% bedraagt, is dit een zeer goed resultaat. Hieruit kan worden afgeleid dat de gemaakte sensor accuraat 50 Hz magnetisch veld kan opmeten afkomstig van hoogspanningslijnen. Het prototype kan nu worden omgezet naar een sensor box die voor een lange tijd zelfstandig kan magnetisch veld opmeten.



Figuur 15: Resultaat van meting onder hoogspanningslijn van 14/04/2023 tot en met 19/04/2023. De batterij duur van de EHP-50 is beperkt tot 1 dag.

# 3 TESTEN VAN DE BOX, SENSOREN EN THINGSBOARD MQTT-PROTOCOL

# 3.1 SAMENSTELLEN VAN DE BOX

De huidige sensor is momenteel enkel getest als prototype. De drie spoelen waren bevestigd in een 3d geprinte houder om de orthogonaliteit te kunnen garanderen, maar er was nog geen plaats voorzien op de 3d print voor de PCB. Op de PCB was er ook nog geen plaats voorzien voor de microcontroller, aangezien dit flexibiliteit in de weg stond. Nu er aangetoond is dat de sensor werkt, worden de laatste parameters dan ook beslist.

Om het mogelijk te maken dat de sensor buiten kan worden geplaatst is er een waterdicht omhulsel gezocht. Dit werd gevonden met de FIBOX PCM 150/100G [11], met afmetingen 180 x 130 x 100 mm. Deze box heeft een IP 66 en een IP67 rating en is volledig elektrisch geïsoleerd. Er zijn ook boorgaten voorzien met een specifieke omtrek, zodat er een kabel connector in de box kan worden geplaatst, zonder hierbij de IP ratings te veranderen. Binnen in de box zijn er ook bevestigingsgaten voorzien, waarmee de 3d print, waarop de spoelen en de PCB worden geplaatst, ook rekening houdt.

De 3d print (Figuur 14) zorgt voor de orthogonaliteit van de spoelen en houdt tevens de PCB stevig op zijn plaats, door middel van plastieken schroeven. De 3d print wordt dan via kleine "pootjes" in de box geklikt, zodat deze niet meer kan bewegen. De spoelen worden door middel van klemming vastgehouden, aangezien hun houder net iets kleiner is dan de spoelen. Dit systeem werd getest op bruuske bewegingen (i.e. sterke wind nabootsen). Dit systeem is echter niet getest op impact (i.e. val van een sensor), dit moet dan ook te allen tijde vermeden worden.



Figuur 16: 3D print voor de ELF sensor. Er zijn 3 houders voorzien voor de magnetische spoelen alsook 4 gaten waarmee de PCB kan worden vastgeschroefd.

De PCB zelf werd ook opnieuw hertekend, zodat de gekozen microcontroller kan worden bevestigd in de PCB. De technische informatie betreffende de PCB werd bezorgd aan de opdrachtgever. Er werd gekozen via een mobiele internetverbinding data door te sturen. Hiervoor werd de Arduino MKR NB 1500 geselecteerd, met een uBlox SARA-R410M-02B als connectiviteitschip. De microcontroller kan zowel via GPRS, LTE-M en NB-IoT netwerken communiceren. Deze technieken kunnen dan ook gebruikt worden in grote delen van Azië, Europe, Noord- en Zuid-Amerika. De software code werd bezorgd aan de opdrachtgever.

Het volledige systeem is te zien in Figuur 17. De relevante delen zijn hierop ook aangeduid. De RF antenne voor de mobiele communicatie is hierboven niet besproken aangezien deze niet relevant is voor het systeem (W3554B0140T, Pulse Electronics). De software code, die hiervoor extra geprogrammeerd is, werd bezorgd aan de opdrachtgever.



Figuur 17: Overzicht van het volledige systeem. Enkel de waterdichte USB connector ontbreekt. (A) 3 magnetische spoelen; (B) RF antenne; (C) Arduino MKR NB 1500; (D) ELF sensor PCB; (E) 3D print; (F) waterdichte box (Fibox).

# 3.2 TESTEN VAN DE BOX

De volledige sensor is klaar om op grotere schaal getest te worden. Hiervoor worden relevante locaties gezocht onder hoogspanningslijnen. Een eerste sensor is reeds geplaatst bij een dubbele hoogspanningslijn te Eeklo. Dit betreft een industriële omgeving. Figuur 18 toont de resultaten van deze sensor. Deze sensor is reeds actief sinds 29/08/2023. De sensor stuurt iedere 5 seconden een gemiddelde veldwaarde door. De sensor meet een veld tussen 0.23  $\mu$ T en 1.93  $\mu$ T. De gemiddelde veldwaarde gedurende de hele periode is 0.86  $\mu$ T. Dit toont aan dat de sensor de veranderingen in het magnetisch veld kan waarnemen alsook voor een langere periode kan actief zijn. Er is op dit moment nog geen analyse gemaakt van het patroon van het magnetisch veld. Dit toont dan ook aan dat de sensor volledig operationeel is, de spoelen accuraat magnetisch veld kunnen opmeten en de data vlot binnenkomt op het MQTT-thingsboard. Op het thingsboard worden de inkomende waarden dan ook omgezet naar  $\mu$ T waarden. Door op deze manier te werken is er ook een hogere flexibiliteit omtrent de kalibratiefactor indien die zou veranderen naarmate de sensor ouder wordt.

Door het klein aantal bewerkingen die nog moeten uitgevoerd worden bij de assemblage van de sensor, is het dan ook gemakkelijk om vlot meerdere sensoren te fabriceren. De kalibratiestappen zijn ook duidelijk beschreven, en nemen niet toe in complexiteit, enkel in tijdsduur.



Figuur 18: Meetresultaten te Eeklo voor 1 week data. De getoonde data is gegroepeerd per 30 min.

De getoonde resultaten zijn in dit rapport enkel voor de 0.4  $\mu$ T sensorbox. Een sensorbox die accuraat 100  $\mu$ T velden kan opmeten, is ook getest en gefabriceerd door de opdrachtnemer. Echter, aangezien alle uitgevoerde stappen en conclusies dezelfde zijn, werden deze resultaten niet in het rapport opgenomen. De BOM van deze sensor werd bezorgd aan de opdrachtgever.

Echter, door de grote gelijkenis tussen beide sensoren is er beslist om nog een bijkomend onderzoek uit te voeren omtrent het combineren van beide sensoren op 1 PCB. Dit heeft als voordeel dat alle (dure) hardware (spoelen en microcontroller) kunnen worden gedeeld. Hierdoor is de sensor zelf wel iets duurder doordat beide sensoren nu op 1 PCB worden geplaatst, maar dit is een stuk goedkoper dan twee sensoren naast elkaar te moeten plaatsen.

# 4 GECOMBINEERDE SENSOR

De grootste uitdaging bij de gecombineerde sensor is het verschil in spanningswaarden en dus overspanningsbeveiliging. Dit is opgelost door in de feedback lus van het hoogdoorlaatfilter twee zener diodes te plaatsen, die ervoor zorgen dat de golf niet groter kan worden dan 3.3 V, in beide richtingen. Doordat de spanning beperkt wordt tot maximaal de ingangsspanning (afhankelijk van de gekozen zenerdiode), is het circuit beschermd tegen hoge spanningspieken. Bovendien herstelt deze zenerdiode zichzelf, waardoor deze niet stuk gaat bij een te hoge spanning (onder normale omstandigheden). Doordat dit in de feedback lus van de hoogdoorlaatfilter gebeurt, kan de initiële versterking/verzwakking van de lus toch nog plaats vinden en blijft de sensor binnen het werkingsgebied van de ADC actief. Er is geen verschil opgemerkt in het ruisniveau tussen de enkelvoudige sensor en de gecombineerde sensor.

Deze sensor werd op dezelfde wijze gekalibreerd als de enkelvoudige sensor. Echter, is er nu gekalibreerd voor de twee bereiken. Figuur 19 toont deze kalibratie.

In Figuur 19 is te zien dat de kalibratiecurve stagneert bij een bepaalde spanningswaarde voor de lage veldwaarden. Dit werd ook eerder al vastgesteld bij de enkelvoudige sensor. Afhankelijk van de

zenerdiode is deze spanning dus ook in te stellen, indien er in de toekomst nog een aanpassing dient te gebeuren aan het bereik van de ADC.



Figuur 19: Overzicht on-board kalibratie gecombineerde sensor. LUT\_X\_low, LUT\_Y\_low en LUT\_Z\_low is de kalibratie van het systeem dat accuraat rond  $0.4\mu$ T kan meten. LUT\_X\_high, LUT\_Y\_high, LUT\_Z\_high is het resultaat van het deel dat 100  $\mu$ T accuraat kan opmeten.

De gecombineerde sensor werd ook reeds getest in een real-life scenario, waarbij de resultaten opnieuw gelijkaardig zijn aan die van de enkelvoudige sensor. Als eerste werd er opnieuw een test gedaan aan de omvormer van zonnepanelen. In Figuur 20 wordt de EHP50 gebruikt als controle en worden beide assen van de eigen sensor getoond. Er moet echter voorzichtig worden omgesprongen met de resultaten van het hoge bereik, aangezien de gevoeligheid van deze een stuk lager is en dus mogelijks minder accuraat. Dit is ook te zien indien er in detail wordt gekeken. Het veld "springt" tussen verschillende waarden door de lagere nauwkeurigheid. Het veld werd hier genormaliseerd omdat er op een korte afstand is gemeten van de omvormer en de plaatsing van de spoelen t.o.v. de omvormer een invloed heeft op het veld.



Figuur 20: Test bij omvormer zonnepanelen. EHP50 als controle, MC858\_low is het gedeelte van de sensor die accuraat rond 0.4  $\mu$ T kan meten, MC858\_high is het gedeelte van de sensor die accuraat rond 100  $\mu$ T kan meten.

Er werd ook een meting uitgevoerd onder een hoogspanningslijn. De gecombineerde sensor werd naast de enkelvoudige sensor geplaatst die reeds in Eeklo geplaatst werd. De EHP50 is niet opgenomen als controle, maar de enkelvoudige sensor werd reeds gevalideerd t.o.v. de EHP50. Dit houdt dus in dat de enkelvoudige sensor als controle toestel werd gebruikt voor de gecombineerde sensor. Figuur 21 toont het resultaat van deze meting. Hierbij is de gekalibreerde gecombineerde sensor gebruikt, dus hier kunnen de realistische veldwaarden wel worden vergeleken (i.e., tussen de enkelvoudige sensor en het gedeelte van de gecombineerde sensor dat lage velden kan meten). De keuze wordt hier gemaakt om specifiek de lage lus van het systeem te gebruiken, aangezien er in de praktijk wordt vanuit gegaan dat enkel de waardes van de hoge lus zullen worden gerapporteerd als het magnetisch veld hoger is dan 50 μT. Er is opnieuw een tijdsverschuiving in de resultaten, doordat er een verschil is in het aantal samples en de sensoren niet gesynchroniseerd zijn t.o.v. elkaar. Het resultaat van de ELF\_L\_0001 is dus als het ware een beetje ingedrukt t.o.v. de gecombineerde sensor. In de toekomst worden deze verlopen gelijkgesteld aan elkaar. Beide grafieken vertonen eenzelfde verloop, met maximale veldwaardes van 3.13  $\mu$ T en 3.31  $\mu$ T voor de gecombineerde sensor en de enkelvoudige sensor respectievelijk. De gemiddelde waardes over het volledige verloop zijn 1.31 µT en 1.37 µT, wat een verschil is van slechts 4.5 %. Echter, doordat het verschil constant is, kan er in een volgend stadium een meting uitgevoerd worden met de EHP50 probe die de kalibratiefactor van de systemen kan aanpassen naar de realistische omstandigheden waarin de sensoren worden geplaatst (bv. metalen oppervlak dichtbij, rotatie van de assen).



Figuur 21: Lange termijn test onder een hoogspanningslijn te Eeklo.

Doordat de opgemeten magnetische veldwaarden relatief laag waren (< 3  $\mu$ T), kan er nog geen conclusie gemaakt worden omtrent de hogere veldwaarden. In een volgende update van dit rapport zal daarom ook de validatie van de gecombineerde sensor in een omgeving met hogere veldwaarden (> 50  $\mu$ T) besproken worden.

# **5 CONCLUSIE**

Dit rapport bespreekt de studie van een 50 Hz magnetisch veld sensor, die kan worden ingezet bij de continue monitoring van hoogspanningslijnen. In dit rapport is de volledige uitwerking van idee naar prototype naar afgewerkt product opgenomen van de onderzoekende partij (Universiteit Gent - WAVES/IMEC). Er zijn verschillende mogelijkheden onderzocht, zowel op het gebied van de magnetische spoelen als op het gebied van de gebruikte componenten. Deze verschillende mogelijkheden zijn ook gerapporteerd, zowel in het verslag als tijdens de maandelijkse overleg momenten.

Uiteindelijk is er gekozen voor een sensor met een zelf ontworpen filtering, een 16-bits ADC en een microcontroller met mobiel internet mogelijkheden. Als magnetisch sensor-element wordt een commercieel beschikbare variant gebruikt, wat na onderzoek goedkoper bleek uit te komen dan een eigen ontwerp. De sensor filtert via hardware alle signalen tussen 10 Hz en 300 Hz en heeft bovendien nog een bijkomend softwarefiltering voor 50 Hz signalen. Het bereik van de 0.4  $\mu$ T sensor gaat tussen 0.01  $\mu$ T en 70  $\mu$ T, met een theoretische stapgrootte van 2 nT. Voor de 100  $\mu$ T sensor gaat het bereik van 0.1  $\mu$ T tot 421  $\mu$ T, met een theoretische stapgrootte van 13 nT.

Het rapport focust zich hierbij vooral op de 0.4  $\mu$ T sensor, maar gelijkaardige redeneringen en conclusies zijn getrokken voor de 100  $\mu$ T. Er is een bijkomend onderzoek uitgevoerd naar een gecombineerde sensor. Deze gecombineerde sensor zorgt voor een daling van de kostprijs en zorgt ervoor dat beide sensoren zich nu op 1 PCB bevinden en dus de hardware (ADC, microcontroller en spoelen) kunnen worden gedeeld.

Na de verificatie en kalibratie en de lange-termijn testen kan er dan ook geconcludeerd worden dat de onderzoekende partij een sensor heeft kunnen ontwikkelen die accuraat, langdurig magnetisch veld van een 50 Hz bron (i.e. hoogspanningslijn) kan opmeten.

Als toekomstig werk moeten de gecombineerde sensor en de 100  $\mu$ T sensor nog in een omgeving geplaatst worden met hogere veldwaarden (> 50  $\mu$ T), zodat hier de werking ook kan worden geverifieerd.

# REFERENTIES

- Narda, "SRM-3006 Selective Radiation Meterfor electromagnetic fields up to 6 GHz," pp. 1– 8, 2013.
- [2] N. STS, "Safety Evaluation Within a Magnetic Field Environment," *Exposure*, pp. 1–8, 2006.
- [3] N. F. Analyser and D. Logger, "Made in Germany NFA-SERIES 3D NF Analyser with Data Logger."
- [4] "EMF / ELF Meter," pp. 480823–480823, 2008.
- [5] M. E. M. F. Meter, "Tm-190," pp. 1–20.
- [6] A. Indonesia, "Magnetic Field Meter AMTAST EM-191."
- [7] "TRIAXIAL ELF Magnetic Field Meter."
- [8] "JT PSG9080," p. 85432000, 2021.
- [9] "PicoScope 3000 Series."
- [10] SAJ, "SAJ R5 5K S2 omvormer datasheet,", " https://eco-tronic.eu/nl/mono/345-saj-r5-5k-s2-1-fase-omvormer.html", pp. 6–7.
- [11] G. Pcm, "Pcm 150/100 g."