

2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: energie

## Masterthesis

Onderzoek naar een oplossing voor EMC-problemen bij GIS-  
hoogspanningsonderstations

PROMOTOR :

Prof. ir. Aniceta DEXTERS

PROMOTOR :

dr. ir. Johan RIMEZ

**Bjarne Van Hooff**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



2021 • 2022

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen  
master in de industriële wetenschappen: energie

## Masterthesis

Onderzoek naar een oplossing voor EMC-problemen bij GIS-  
hoogspanningsonderstations

**PROMOTOR :**

Prof. ir. Aniceta DEXTERS

**PROMOTOR :**

dr. ir. Johan RIMEZ

**Bjarne Van Hooff**

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie



**KU LEUVEN**



## Woord vooraf

Deze masterthesis zal mijn laatste werk zijn binnen de gemeenschappelijke opleiding industriële ingenieurswetenschappen van de UHasselt & KU Leuven. Aan dit onderwerp zijn heel wat beslissingen en ervaringen voorafgegaan die ik graag zou willen delen. Ik was al snel geïnteresseerd in wetenschap en techniek. Vooral hoe de theorie in de praktijk wordt omgezet om problemen op te lossen. Hierdoor was mijn keuze snel gemaakt om industrieel ingenieur te worden. Door het opleidingsonderdeel “Power Systems” groeide mijn interesse voor het hoogspanningsnet enorm. Toen ik dus de kans kreeg om bij Elia group nv mijn masterproef te doen, was ik heel enthousiast. Voor al deze steun, inzichten en mogelijkheden om mijn opleiding tot een goed einde te brengen wil ik toch graag een aantal personen bedanken.

Ten eerste wil ik Elia en in het bijzonder Dr. ir. Johan Rimez bedanken voor de mogelijkheid om mijn masterproef in samenwerking met jullie te kunnen uitvoeren. Daarnaast wil ik Dr. ir. Johan Rimez ook bedanken voor de steun en persoonlijke begeleiding tijdens de masterproef. Vervolgens ook UHasselt en KU Leuven voor de mogelijkheid van deze masterproef en de hele opleiding. Verder wil ik Prof. ir. Annick Dexters (KULeuven) heel erg graag bedanken voor de ondersteuning van de masterproef en de kennis en inspiratie die ik heb opgedaan tijdens de lessen van onder andere “Power Systems”. Dan zou ik ook graag Prof. dr. Jeroen Lievens willen bedanken voor de ondersteuning bij de verslaggeving.

Tot slot zou ik ook heel graag mijn broer, ouders en vrienden willen bedanken voor de steun en adviezen tijdens de volledige opleiding. Dankzij hen ben ik nu hier geraakt.

Bjarne Van Hooff,  
30 januari 2022



# Inhoudsopgave

Woord vooraf .....	1
Inhoudsopgave .....	3
Lijst van tabellen.....	5
Lijst van figuren .....	7
Verklarende woordenlijst.....	11
Abstract .....	13
Abstract in English .....	15
<b>1. Inleiding.....</b>	<b>17</b>
1.1.    Situering .....	17
1.2.    Probleemstelling.....	18
1.3.    Doelstellingen.....	19
1.4.    Materiaal & Methode .....	20
1.5.    Inhoud .....	22
<b>2. Literatuurstudie .....</b>	<b>23</b>
2.1.    Inleiding .....	23
2.2.    Hoogspanningsonderstations.....	23
2.2.1.    Achterliggende informatie .....	23
2.2.2.    Vergelijking tussen AIS en GIS .....	26
2.2.3.    Verband met de praktijk.....	28
2.3.    Elektromagnetische compatibiliteit (EMC).....	30
2.3.1.    Wat is EMC?.....	30
2.3.2.    Technische verdieping.....	33
2.3.3.    Antennegedrag.....	42
2.4.    EMC oplossen .....	43
<b>3. De aanpak van de analyse .....</b>	<b>49</b>
3.1.    DoE-analyse .....	49
3.2.    Parameters en grenzen .....	55
3.2.1.    Bepaling parameters .....	55
3.2.2.    Bepaling Grenzen .....	57

3.3. Testprocedure .....	61
<b>4. Analyse en bespreking van de resultaten .....</b>	<b>65</b>
4.1. Analyse voor het aantal keer dat het ledje aangaat .....	65
4.2. Analyse voor de geïnduceerde spanning .....	68
4.3. DoE zonder uitschieters.....	82
4.4. Conclusies .....	85
<b>5. Verbeteringen voor de proefopstelling en oplossing van het EMC-probleem .....</b>	<b>87</b>
5.1. Verbeterpunten en toekomstige onderzoeksmogelijkheden voor de proefopstelling .....	87
5.1.1. Verbeterpunten .....	87
5.1.2. Toekomstige onderzoeksmogelijkheden.....	88
5.2. Oplossing van het EMC probleem .....	89
5.2.1. Mogelijke oplossingen.....	89
5.2.2. Resultaten ferrietkernen .....	91
5.2.3. Resultaten afscherming.....	101
5.2.4. Conclusies.....	102
<b>6. Besluit.....</b>	<b>103</b>
Referentielijst .....	105
Bijlagen .....	109
Bijlage A: Overzicht van de literatuurstudie (p. 21 ) .....	109
Bijlage B: Alle resultaten van de grensbepaling (afstand tot spoel) .....	110
Bijlage C: Alle resultaten met betrekking tot consistentie.....	112
Bijlage D: Extra figuren van Design Expert 13 .....	114
Bijlage E: Effecten zonder transformatie.....	119

## Lijst van tabellen

Tabel 1: Vergelijking AIS en GIS.....	26
Tabel 2: Klassen van de Europese norm EN61000-6-5.....	30
Tabel 3: primaire constanten van de TL theorie .....	35
Tabel 4: Overzicht afschermingsmethoden.....	45
Tabel 5: gegevens boxplot van de geïnduceerde spanning .....	70
Tabel 6: significantie van de factoren .....	73
Tabel 7: overzicht van significante effecten.....	78
Tabel 8: test op lineariteit .....	83
Tabel 9: Fit gegevens van het nieuwe model .....	84
Tabel 10: overzichtstabel van het nieuwe model .....	84
Tabel 11: resultaten ferrietkern rond 1 winding.....	92
Tabel 12: resultaten ferrietkern rond 2 windingen.....	94
Tabel 13: resultaten voor common mode methode 2 .....	95
Tabel 14: resultaten 2 ferrietkernen rond 1 winding.....	96
Tabel 15: samenvattende tabel van resultaten van de ferrietkernen .....	99
Tabel 16: resultaten met afscherming .....	101





## Lijst van figuren

Figuur 1: Globaal overzicht van Elia group nv .....	17
Figuur 2: schematische voorstelling van discontinuïteit bij een GIS-onderstation.....	19
Figuur 3: Metalen omkadering/plaat aan buitenmuur van een GIS-installatie .....	19
Figuur 4: Schematische schets van de ontlading bij een GIS-installatie .....	19
Figuur 5: De Wimshurstgenerator.....	20
Figuur 6: Ontladingsbollen .....	21
Figuur 7: Leidse flessen .....	21
Figuur 8: Het volledig elektrisch schema.....	21
Figuur 9: Het elektrische circuit in praktijk .....	21
Figuur 10: 500 kV ondergronds (GIS)onderstation Shin-Toyosu.....	24
Figuur 11: Een hoogspanningsonderstation.....	24
Figuur 12: Belangrijke componenten van een GIS-installatie en hun functie.....	25
Figuur 13: schakelmannoeuvre bij schakelaar met dempende weerstanden .....	28
Figuur 14: Schematisch overzicht van een GIS-Installatie.....	29
Figuur 15: communicatietoestellen .....	29
Figuur 16: Railbeveiliging .....	29
Figuur 17: De koppelingsmechanismen .....	31
Figuur 18: Capacitieve koppeling .....	32
Figuur 19: inductieve koppeling .....	32
Figuur 20: Basisprincipe transmissielijn .....	34
Figuur 21: enkele transmissielijnen.....	34
Figuur 22: Lumped-circuit model .....	34
Figuur 23: variaties van het lumped-circuit model .....	36
Figuur 24: lumped-circuit model voor hoogspanning .....	36
Figuur 25: verschil in capacitieve waarde door hoogte .....	36
Figuur 26: transponeren van hoogspanningslijnen.....	37
Figuur 27: Berekening secundaire parameters (deel 1) .....	37
Figuur 28: berekening secundaire parameters (deel 2) .....	38
Figuur 29: vertrekpunt denkexperiment.....	39
Figuur 30: De 3 extreme waarde van de spanningsreflectiecoëfficiënt.....	40
Figuur 31: schematische voorstelling van de golven in een discontinuïteit .....	40
Figuur 32: transiënte golven voorgesteld bij een spanningsgolf .....	41
Figuur 33: Vereenvoudigd circuit voor de ontvangende antenne .....	42
Figuur 34: vereenvoudigd circuit voor de uitzendende antenne .....	43
Figuur 35: verbeterde discontinuïteit .....	44
Figuur 36: dubbelzijdige afscherming .....	45
Figuur 37: voorbeeld van een ferrietkern .....	46
Figuur 38: Impedantie in functie van de frequentie .....	46
Figuur 39: Impedantie in functie van de frequentie .....	46
Figuur 40: Permeabiliteit in functie van de frequentie voor een NiZn ferrietkern .....	47
Figuur 41: lineaire benadering .....	50
Figuur 42: geen goede lineaire benadering.....	50
Figuur 43: schatting van een kwadratisch effect.....	51
Figuur 44: schatting van een kubisch effect.....	51
Figuur 45: boxplot zonder uitschieter .....	51

Figuur 46: boxplot met uitschieter .....	51
Figuur 47: geen interactie tussen de factoren .....	52
Figuur 48: zwakke interactie tussen de factoren .....	53
Figuur 49: sterke interactie tussen de factoren .....	53
Figuur 50: berekening van een interactie .....	54
Figuur 51: goede samenhang tussen voorspellingen en de metingen.....	54
Figuur 52: belangrijk effect niet meegenomen in het model.....	55
Figuur 53: Oriëntatie spoel 1 (bovenaanzicht).....	56
Figuur 54: oriëntatie/hoogte spoel (zijaanzicht).....	56
Figuur 55: Voorbeeld grensbepaling .....	59
Figuur 56: De verschillende testsituaties .....	60
Figuur 57: overzicht instellingen .....	60
Figuur 58: opstelling van een CP .....	61
Figuur 59: DC-bron en oscilloscoop.....	62
Figuur 60: plaats van de probes .....	62
Figuur 61: voorbeeld van een gemeten signaal .....	63
Figuur 62: testen op hoge luchtvochtigheid.....	65
Figuur 63: overzicht van responsies bij aantal keer dat het ledje aangaat.....	66
Figuur 64: Boxplot over aantal keer dat de LED aangaat .....	67
Figuur 65: controle op lineariteit .....	67
Figuur 66: controle op consistent gedrag voor geïnduceerde spanning.....	68
Figuur 67: responsies voor de geïnduceerde spanning.....	69
Figuur 68: Plaats van slijtage .....	70
Figuur 69: slijtage van testopstelling.....	70
Figuur 70: boxplot voor de geïnduceerde spanning.....	70
Figuur 71: controle op lineariteit met Design Expert 13 .....	71
Figuur 72: effecten voor de geïnduceerde spanning .....	72
Figuur 73: normal probability plot .....	73
Figuur 74: kolomdiagram van gesorteerde effecten.....	74
Figuur 75: de hoofdeffecten.....	74
Figuur 76: de hoofdeffecten (2) .....	75
Figuur 77: BD interactie.....	75
Figuur 78: CD interactie.....	76
Figuur 79: BE interactie .....	76
Figuur 80: AD interactie.....	77
Figuur 81: De responsfunctie voor de geïnduceerde spanning .....	78
Figuur 82: responsfunctie voor geïnduceerde spanning met werkelijke waarden.....	78
Figuur 83: Fit gegevens na transformatie .....	79
Figuur 84: Fit gegevens voor transformatie .....	80
Figuur 85: Residuen vs voorspellingen .....	80
Figuur 86: Residuen vs volgorde .....	81
Figuur 87: Voorspellingen vs gemeten waarden (responsies) .....	81
Figuur 88: aangepaste lijst met responsies .....	82
Figuur 89: boxplot met aangepaste responsies .....	83
Figuur 90: normal probability plot met aangepaste waarden .....	84
Figuur 91: vonk bij koppeling van de leidse flessen .....	87
Figuur 92: ferrietkernen op de GIL.....	90
Figuur 93: ferrietkern rond 1 winding.....	92

Figuur 94: ferrietkern rond 2 windingen .....	94
Figuur 95: ferrietkern voor common mode .....	95
Figuur 96: 2 ferrietkernen rond 1 winding .....	96
Figuur 97: ferrietkern rond 3 windingen .....	97
Figuur 98: ferrietkern rond 4 windingen .....	97
Figuur 99: 3 ferrietkernen rond 1 winding .....	98
Figuur 100: 4 ferrietkernen rond 1 winding .....	98
Figuur 101: de afscherming van de spoel.....	101



## Verklarende woordenlijst

TSO: Transmission System Operator

AIS: Air Insulated Switchgear

GIS: Gas insulated switchgear

SF6: zwavelhexafluoride

EMC: elektromagnetische compatibiliteit

EMP: elektromagnetische puls

EMI: elektromagnetische interferentie

DoE: Design of experiments

VFTO: Very Fast transient overvoltages

GIL: Gas Insulated Line

AIL: Air Insulated Line

AF: antennefactor

TAF: transmissieantennefactor

CP: Centrum



## Abstract

Elia Group, de Belgische Transmissienetbeheerder, ervaart ernstige EMC-problemen in enkele van de meest strategische GIS-onderstations. Vonken die ontstaan bij schakelmannoeuvres veroorzaken storingen in communicatie- en meetapparatuur met verkeerde controleacties en beschadigingen als gevolg. Deze masterproef richt zich op het verwerven van kennis en inzicht om een mogelijke oplossing te vinden.

Een eerste stap betreft het consistentere maken van de experimentuitkomsten van een bestaande testopstelling op basis van het karakteriseren ervan volgens *Design of Experiments*. Dit is een gestructureerde manier om testen te analyseren gebaseerd op statistiek. Het consistentere maken gebeurt op basis van de hieruit verworven kennis en is een iteratief proces. In een tweede stap worden ferrietkernen getest als mogelijke oplossing. Ten slotte wordt een diepgaande literatuurstudie uitgevoerd over ferrietkernen die geplaatst worden op de fasegeleiders zelf en niet op de verbindingsdraden van het meetsysteem.

De DoE-analyse toonde aan dat de testopstelling al voldoende consistent was. Uit de tweede stap blijkt dat de ferrietkernen de storing niet volledig kunnen verhinderen. Afscherming nagebootst met aluminiumfolie doet dit wel. Meer testen met dit alternatief zijn wel aangeraden voor verder onderzoek. Vervolgens blijkt uit de diepgaande literatuurstudie dat de ferrietkernen rond fasegeleiders het effect dempen met 30 % afhankelijk van het aantal ferrietkernen. Door verzadiging is deze optie niet geschikt als oplossing.





## Abstract in English

Elia Group, the Belgian Transmission System Operator, is experiencing serious EMC problems in some of its most strategic GIS substations. Sparks generated during switching manoeuvres cause malfunctions in communication and measuring equipment, resulting in incorrect control actions and damage. This master thesis focuses on gaining knowledge and insight to find a possible solution.

A first step is to make the experiment results of an existing test setup more consistent by characterising it according to Design of Experiments. This is a structured way of analysing tests based on statistics. Making it more consistent is done based on the knowledge gained from this and is an iterative process. In a second step, ferrite cores are tested as a possible solution. Finally, an in-depth literature study is carried out on ferrite cores placed on the phase conductors themselves and not on the connecting wires of the measuring system.

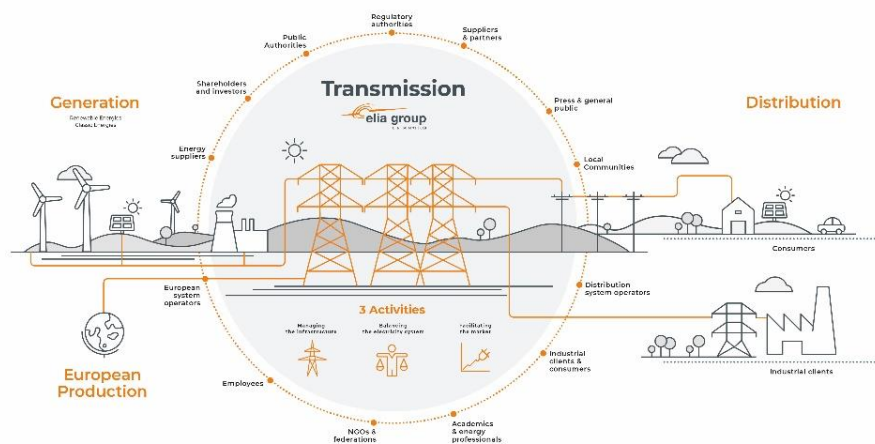
The DoE analysis showed that the test setup was already sufficiently consistent. The second step showed that the ferrite cores could not completely prevent interference. Shielding imitated by aluminium foil does prevent interference. More tests with this alternative are recommended for further research. Next, the in-depth literature study shows that the ferrite cores around phase conductors attenuate the effect by 30 %, depending on the number of ferrite cores. Due to saturation, this option is not suitable as a solution.



# 1. Inleiding

## 1.1. Situering

Deze masterthesis wordt uitgevoerd in samenwerking met Elia group nv. Elia group nv is een bedrijf dat elektriciteit via het hoogspanningsnet van producent naar consument transporteert (EN: TSO – Transmission System Operator). Elia is actief in België en het noordoosten van Duitsland en voorziet zo ongeveer 30 miljoen eindgebruikers van elektrische energie[1]. Dit maakt dat Elia ook cruciaal is voor de economie in deze regio's. Elia is een belangrijke partner in het zo veilig en efficiënt mogelijk realiseren van de energietransitie. Hierdoor is Elia steeds op zoek naar nieuwe technologieën en samenwerkingen met universiteiten om hun doelen te behalen[1]. Deze masterproef is één van die samenwerkingen tussen Elia en de gezamenlijke ingenieursopleiding van UHasselt & KULeuven. Figuur 1 schets Elia group nv in het elektriciteitslandschap.



Figuur 1: Globaal overzicht van Elia group nv [1]

Elia heeft heel wat taken en verantwoordelijkheden. Hiervoor is goede infrastructuur noodzakelijk. Behalve de herkenbare hoogspanningslijnen en -pylonen in het landschap, beschikt Elia ook over hoogspanningsonderstations en -cabines. De hoogspanningslijnen en -pylonen dienen enkel voor het transport van de elektriciteit. Het regelen, meten, beveiligen en schakelen van de lijnen en apparatuur gebeurt in de hoogspanningsonderstations en -cabines. Dit zijn fundamentele bouwblokken van het hoogspanningsnet die de elektriciteit naar de juiste spanning transformeren en daarna verdelen[2].

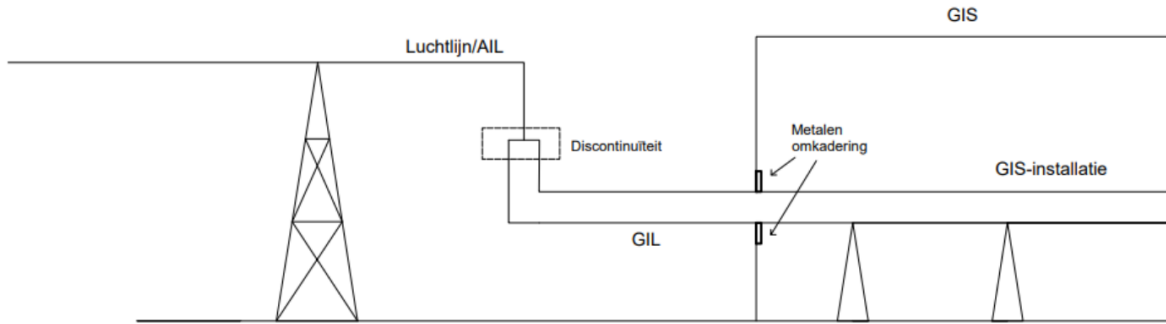
Een speciaal type installatie, zijn de GIS-installaties (Gas Insulated Switchgear). Deze installaties maken gebruik van SF<sub>6</sub>-gas of zwavelhexafluoride om het schakelmateriaal te isoleren, dit in tegenstelling tot AIS-installaties die de omgevingslucht als isolatiemedium gebruikt. Gebruik van SF<sub>6</sub>-gas verhoogt de flexibiliteit van de installatie en verkleint de benodigde afmetingen. Hierdoor kunnen deze installaties ook gemakkelijker ondergronds of binnenshuis geplaatst worden[2].

Elia ervaart ernstige EMC-problemen (elektromagnetische compatibiliteit) in enkele van de meest strategische hoogspanningsonderstations, vooral bij GIS-installaties. EMC is het in staat zijn om naar wens te functioneren in een elektromagnetische omgeving. Door een elektromagnetische puls (EMP) kan er elektromagnetische interferentie (EMI) ontstaan die zorgt dat apparatuur in de elektromagnetische omgeving niet meer naar wens functioneert[3].

## 1.2. Probleemstelling

Een vonk veroorzaakt een EMP die op zijn beurt storingen op communicatie- en meetapparatuur van het onderstation veroorzaakt. De bedrading van deze apparatuur gedraagt zich als een antenne die de energie van de EMP omzet naar ongewenste spanningen en stromen, vooral als die bedrading niet correct is afgeschermd. Hierdoor kunnen EMP's ervoor zorgen dat elektronica ongewenst gedrag vertoont. Wat het gevolg kan zijn van dat ongewenst gedrag staat beschreven in [4]. In dit verslag staat dat er regelmatig problemen zijn met de branddetectielus in bepaalde hoogspanningsonderstations. Dit kan leiden tot schade aan de elektronische kaarten van bijvoorbeeld de branddetectie.

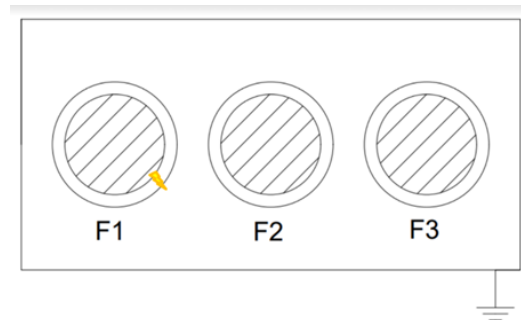
De oorzaak van de vonk is het schakelen van vermogensschakelaars of scheiders in een hoogspanningsonderstation. Door het schakelen wordt er een transiënte spanningsgolf aangelegd op de fasegeleiders. Deze transporteren de golf tot aan een discontinuïteit, zie Figuur 2. Aan deze discontinuïteit splitst de golf in twee delen. Het eerste deel wordt doorgegeven aan het volgende stuk van het net en het tweede deel wordt gereflecteerd aan deze discontinuïteit. Een overgang in type bekabeling is een discontinuïteit. Hierdoor veranderen de geleidende eigenschappen [5]. Een discontinuïteit kan een eindaansluiting (in- en uitgaande kabels die verbonden worden met elkaar), kabeldoorgang (van bijvoorbeeld een ondergrondse kabel naar een kabel geïsoleerd door gas) of een muurdoorgang (doorgang van kabels door een muur) zijn. Dit laatste komt vaak voor aangezien GIS-installaties veel binnenshuis zijn geplaatst. Een deel van de transiënte spanningsgolf dat gereflecteerd wordt, veroorzaakt een vonk aan een metalen omkadering[5]. De literatuurstudie verduidelijkt hoe dit gebeurt. Figuur 3 en figuur 4 verduidelijken dit fenomeen bij een muurdoorgang van een GIS-installatie.



Figuur 2: schematische voorstelling van discontinuïteit bij een GIS-onderstation [5, p. 16]



Figuur 3: Metalen omkadering/plaat aan buitenmuur van een GIS-installatie [5, p. 20]



Figuur 4: Schematische schets van de ontlading bij een GIS-installatie [5, p. 20]

Elia kan het EMC probleem oplossen door alle vermogenskabels en niet afgeschermd bedienings- en signalisatiekabels van afscherming te voorzien en dan te aarden. Dit kan gemakkelijk voor nieuwe onderstations, maar niet voor bestaande onderstations. Hiervoor is het verwijderen van de oude kabels nodig om daarna alles te vernieuwen[2]. Dit is een dure en tijdrovende oplossing. Het is dus van groot belang een alternatieve oplossing te vinden.

Een tweede probleem is dat een bestaande testopstelling (demonstratiemodel) bij gelijkblijvende omstandigheden niet op dezelfde wijze lijkt te reageren. Dit betekent dat de testen niet betrouwbaar zijn. Hierdoor is het moeilijk om oplossingen voor het originele probleem te vinden. Daarnaast zijn de parameters die dit onvoorspelbaar gedrag bepalen nog niet goed gekend.

### 1.3. Doelstellingen

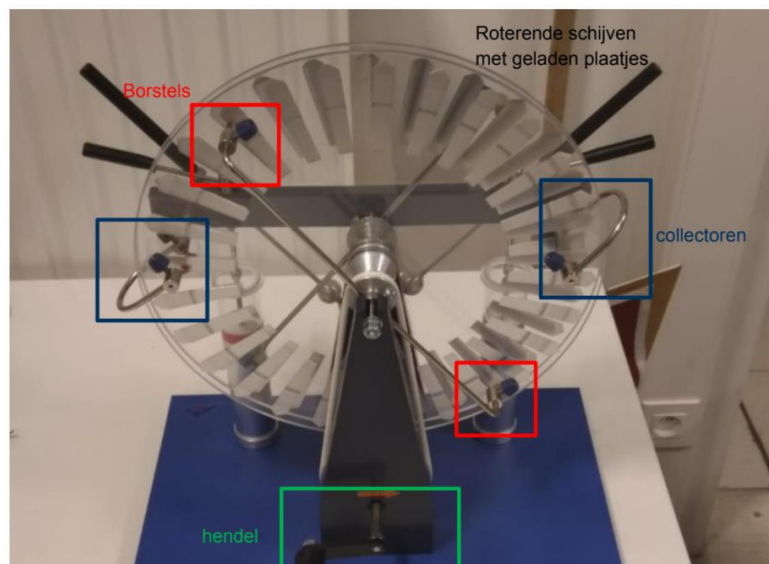
Deze masterthesis richt zich op het verwerven van kennis en inzicht om een mogelijke oplossing te vinden voor het EMC-probleem van Elia dat in vorig onderzoek [5] is aangetoond. Deze masterproef focust voor de oplossing in eerste instantie op ferrietkernen. Het doel van de testen is te bewijzen dat de ferrietkernen de storing volledig kunnen wegwerken. Hiervoor is een testopstelling nodig die consistent werkt. Als de storing niet volledig weggewerkt is, moet een andere oplossing gezocht worden.

## 1.4. Materiaal & Methode [5]

Tijdens deze masterproef zijn twee stappen nodig om de doelstelling te behalen.

De eerste stap is het bouwen van een testopstelling die consistent reageert bij gelijkblijvende omstandigheden. Dit is een relatief complexe opdracht doordat er nog te weinig geweten is over de parameters die het gedrag van de opstelling bepalen. Een analyse op basis van Design of Experiments (DoE) karakteriseert de testopstelling. Dit is een gestructureerde manier om testen te analyseren gebaseerd op statistiek. Het softwarepakket Design expert 13 is gebruikt om de analyse te versnellen. Daarnaast geven de literatuurstudie en eigen ervaringen/metingen met de testopstelling ondersteuning. Deze analyse zorgt voor de nodige inzichten om de oorzaak van het inconsistent gedrag te vinden en om zo de testopstelling te verbeteren. Meer informatie over de DoE-analyse volgt in een ander hoofdstuk. Het analyseren en verbeteren is een iteratief proces tot er een consistente testopstelling overblijft.

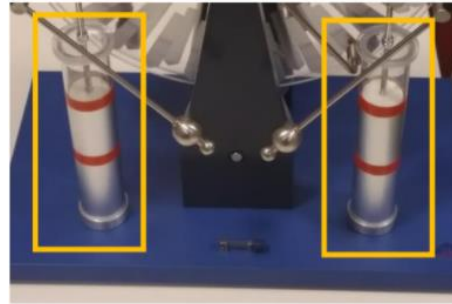
De testopstelling uit een vorig onderzoek [5] is het vertrekpunt voor deze stap. De testopstelling bestaat uit drie belangrijke delen. Ten eerste bevat het model een Wimshurstgenerator (zie Figuur 5, Figuur 6 & Figuur 7) die zorgt voor een vonk die dus de EMP nabootst bij een GIS-installatie. Verder is er ook nog een elektrisch circuit (Figuur 8 & Figuur 9). Dit circuit bestaat uit een spoel die de EMP opvangt, een optocoupler die voor de galvanische scheiding zorgt en een secundair circuit dat het ongewenst EMC gedrag toonbaar maakt aan de hand van een LED. Het is de bedoeling dat de LED brandt als er een vonk in de buurt is.



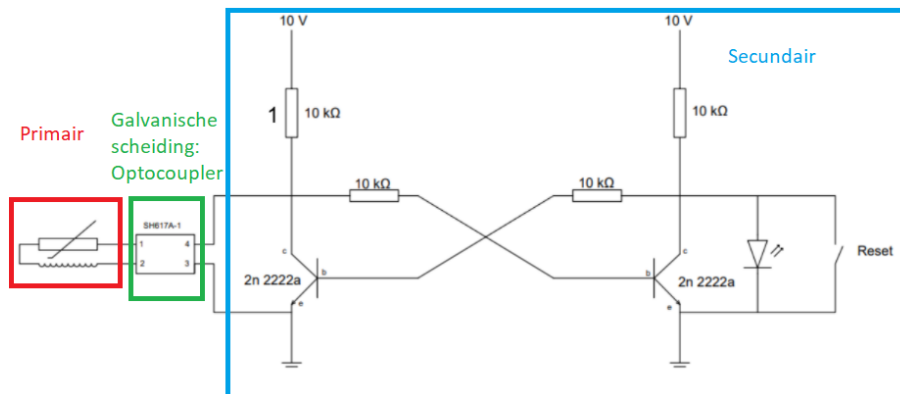
Figuur 5: De Wimshurstgenerator [5, p. 20]



Figuur 6: Ontladingsbollen [5, p. 24]



Figuur 7: Leidse flessen [5, p. 24]



Figuur 8: Het volledig elektrisch schema [5, p. 30]



Figuur 9: Het elektrische circuit in praktijk

De tweede stap is het testen van de mogelijke oplossingen voor het EMC-probleem. Dit zijn in eerste instantie ferrietkernen. Bij deze testen zijn de ferrietkernen op gevoelige draden gemonteerd (de spoel in de testopstelling). De ferrietkernen kunnen de storingen op deze draden verminderen of zelfs elimineren[6]. De bedoeling is dat de ferrietkernen de storing volledig tegenhoudt. Een test bestaat uit 100 metingen. Deze 100 metingen bestaan uit het genereren van een vonk met de Wimhurstgenerator en te controleren of de LED van het elektrisch circuit is aangegaan. De testen worden ook in verschillende omstandigheden uitgevoerd op basis van enkele parameters. Deze testen richten zich op het principe dat de storing bij de ontvanger van EMC



wordt verhinderd omdat een ferrietkern op de spoel is geplaatst. De literatuurstudie bestudeert hoe de storing onderdrukt kan worden. Dit betekent in de praktijk dat de ferrietkern bij de meet- en communicatieapparatuur gemonteerd is. De voorwaarde is dat de LED nu 0 keer aangaat. Als de ferrietkernen niet voldoen, wordt er een andere oplossing gezocht uitgaande van de bevindingen van de literatuurstudie.

## 1.5. Inhoud

Dit hoofdstuk beschrijft het onderwerp van deze masterthesis. De rest van de masterthesis geeft duiding bij de stappen die genomen zijn en de resultaten die gevonden zijn. Als eerste volgt de literatuurstudie in hoofdstuk 2 zodat het probleem duidelijk is en er al enkele oplossingen naar voor geschoven kunnen worden. Hoofdstuk 3 geeft een uitgebreide uitleg over de DoE-analyse in. Vervolgens bespreekt hoofdstuk 4 de uitgevoerde testen en analyse. De de testen in verband met de oplossing van het EMC-probleem volgen in hoofdstuk 5. Tot slot vat hoofdstuk 6 de belangrijkste besluiten samen.

## 2. Literatuurstudie<sup>1</sup>

### 2.1. Inleiding

Dit onderdeel vat de belangrijkste informatie die uit de literatuurstudie is voortgekomen samen. Dit deel begint met informatie over hoogspanningsonderstations. Daarna volgt een technische verdieping over EMC. Tot slot mogelijke oplossingen van het EMC-probleem.

### 2.2. Hoogspanningsonderstations

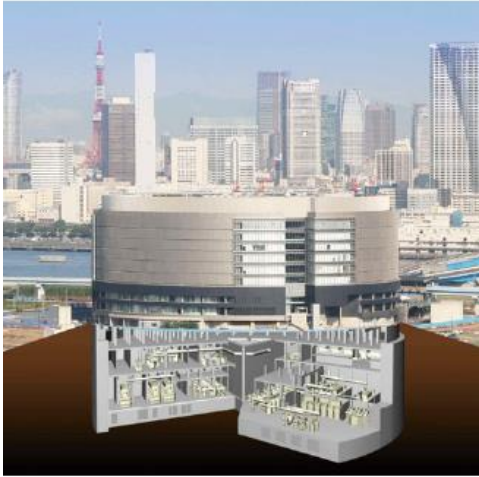
Dit deel legt uit wat een hoogspanningsonderstation is. Vervolgens komt een vergelijking tussen de verschillende onderstations. Omdat het probleem vooral optreedt bij GIS-installaties, gaat de focus daarna naar deze installaties en het verband met de praktijk. Het bestuderen van de structuur van deze installaties helpt om het probleem beter te begrijpen. Hierdoor is het ook makkelijker om het probleem op te lossen.

#### 2.2.1. Achterliggende informatie

Hoogspanningsonderstations zijn fundamentele bouwblokken van het hoogspanningsnet die de elektriciteit naar de juiste spanning transformeren en daarna verdelen via hoogspanningslijnen naar de klanten. Het regelen, meten, beveiligen en schakelen van de lijnen en apparatuur gebeurt ook in de hoogspanningsonderstations[2]. De meeste onderstations zijn in open lucht geplaatst en hebben een gemiddelde oppervlakte van 1 km<sup>2</sup> [7]. Deze oppervlakte is een gemiddelde van over heel de wereld. In België zijn er een groter aantal onderstations met een kleinere omvang. Dit resulteert dan ook in kleinere oppervlakten. Figuur 11 schetst een beeld van een onderstation. Dit is een openlucht geïsoleerd onderstation (AIS). Figuur 10 geeft een voorbeeld van een ondergronds GIS-onderstation (500 kV) in Tokyo.

---

<sup>1</sup> Er is een overzicht van de literatuurstudie te vinden in de bijlage.

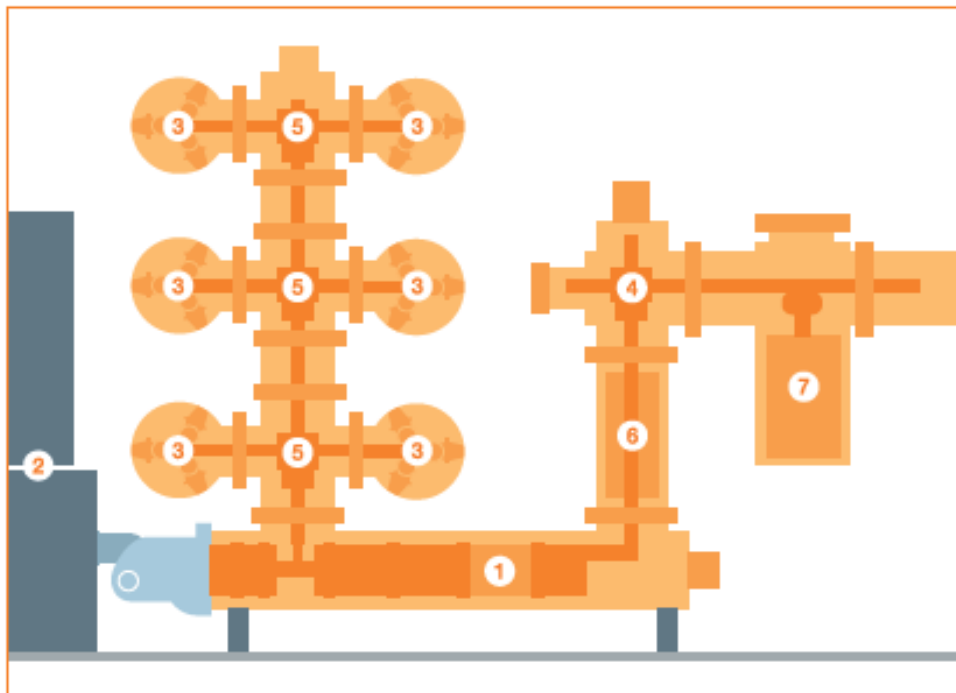


Figuur 10: 500 kV ondergronds (GIS)onderstation Shin-Toyosu [7, p. 423]



Figuur 11: Een hoogspanningsonderstation [9]

Het EMC-probleem komt vooral voor bij GIS-installaties. Dit zijn onderstations waarbij de apparatuur geïsoleerd worden door SF<sub>6</sub>-gas. Dit betekent dat de apparatuur korter bij elkaar kan staan en dus gemakkelijker in een gebouw geïnstalleerd kan worden[10]. Dit betekent ook dat het van buitenaf niet zichtbaar is. Dat is een van de redenen voor het plaatsen van een GIS-installatie. Deze onderstations moeten ook in de omgeving passen en de geluidsemisies mogen de richtlijnen niet overschrijden[11]. Figuur 12 toont de belangrijkste componenten van een GIS-installatie en hun functie.



**1 Vermogenschakelaar**

Functie: stroom onderbreken (te vergelijken met een zekering)

**2 Bedieningskast**

Functie: verzamelen van signalen van de toestellen + bediening ervan mogelijk maken

**3 Rall**

Functie: stroom geleiden

**4 Kabelscheider en -aarder**

Functie: kabel loskoppelen van het Elia-netwerk + aarden van de kabel om er veilig mee te werken

**5 Rallscheider**

Functie: stroomweg kiezen/bepalen

**6 Stroomtransformator**

Functie: meten van stroom

**7 Spanningstransformator**

Functie: meten van de spanning

Figuur 12: Belangrijke componenten van een GIS-installatie en hun functie [9, p. 15]

## 2.2.2. Vergelijking tussen AIS en GIS

Nu dat er al wat meer geweten is over onderstations kan er een vergelijking gemaakt worden tussen openluchtgeïsoleerde onderstations (AIS) en gasgeïsoleerde onderstations (GIS). Tabel 1 geeft een bondige vergelijking tussen deze onderstations.

Tabel 1: Vergelijking AIS en GIS [11, p. 3]

<b>Algemene beoordeling van de eigenschappen van AIS- en GIS-schakelinstallaties t.a.v. thema's van maatschappelijk belang (TenneT, 2012)</b>		
<b>Thema</b>	<b>AIS</b>	<b>GIS</b>
Continuïteit van de elektriciteitsvoorziening	"Best in class"	Langere hersteltijd levert iets groter risico, m.n. bij calamiteiten
Veiligheid	Geen problemen/verschillen zolang men zich bij werkzaamheden aan de veiligheidsvoorschriften houdt	
Milieu	"Best in class"	Bevat 24 keer meer schadelijk SF <sub>6</sub> -gas dan AIS; in beginsel showstopper
Techniek	Beide technieken zijn bekend en betrouwbaar	
Toekomstbestendigheid	Renovaties en aanpassingen relatief eenvoudig en goedkoop uit te voeren	Aanpassingen complex. Beschikbaarheid en kosten van onderdelen op termijn onzeker door gebondenheid aan oorspr. leverancier
Grondbeslag	Groter oppervlak nodig dan GIS, (maar dat is pas nadelig bij extreem ruimtegebrek)	Geringer oppervlak dan AIS (ca. 50%). Wel moet 10-15% extra ruimte worden gereserveerd om vervanging t.z.t. mogelijk te maken
Kosten (bij 380kV-station in standaard situatie)	Meest efficiënte oplossing	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15-20% hogere aanlegkosten dan AIS (lagere grondkosten GIS bieden onvoldoende compensatie)</li> <li>• Na aanleg groot kostenrisico i.v.m. leveranciersgebondenheid (de ervaring is dat de kosten op langere termijn veel hoger zijn)</li> </ul>
Inpassing in omgeving	Verschijningsvorm verschilt: inpassing situatieafhankelijk	
	Open station met brede opstelling van schakelcomponenten in de buitenlucht	Dicht station met gehele schakelinstallatie opgenomen in een gebouw
Regelgeving/vergunningen	Geen specifieke verschillen	

In Tabel 1 [12] staan vijf aspecten die belangrijk zijn in deze vergelijking. Deze aspecten zijn:

- SF6,
- leveranciersafhankelijk,
- kosten,
- grondbeslag en
- verschijningsvorm.

Het eerste aspect is SF6. Dit is een broeikasgas dat ongeveer 23 000 keer sterker is dan koolstofdioxide. Daardoor is de GIS-installatie 24 keer meer schadelijk dan een AIS. Dit is uiteraard een groot nadeel voor GIS-installaties [12].

Het volgende aspect is de leveranciersafhankelijkheid. Onderstations gaan 50 tot 60 jaar mee. Dit betekent dat het onderhoud van deze installaties heel belangrijk is en zeker als ze bijna op het einde van hun levensduur zijn. Dat betekent ook dat er onderdelen beschikbaar moeten zijn voor vervangingen. Leveranciers van die onderdelen gaan op een gegeven moment stoppen met die onderdelen te leveren. In veel gevallen is dat voordat de levensduur van die onderdelen beëindigd is. Voor GIS-installaties is dat een probleem aangezien de componenten van andere leveranciers niet zomaar passen. Bij AIS-installaties zijn de onderdelen wel fabrikant-onafhankelijk en is er geen probleem als dat specifieke onderdeel niet meer beschikbaar is[12].

Het derde aspect zijn de kosten. Uit Tabel 1 blijkt dat er 2 belangrijke nadelen zijn voor GIS-installaties. Ten eerste zijn de kosten om een GIS-installatie aan te leggen 15-20 % duurder. Ten tweede heeft een vervanging van een onderdeel of een renovatie van een onderstation grotere kosten in vergelijking met een AIS-installatie door de leveranciersafhankelijkheid[12].

Het vierde aspect is het grondbeslag. Dit is wel een belangrijk voordeel voor een GIS-systeem. Door de apparatuur te isoleren met SF6-gas verkleint het grondbeslag met 10-15 %. Voor de aanleg van een nieuw GIS-systeem is wel ruimte naast de originele installatie noodzakelijk. Deze ruimte moet op voorhand gereserveerd zijn. Bij een AIS-systeem is dat niet nodig, omdat hier veld per veld vervangen kan worden[12].

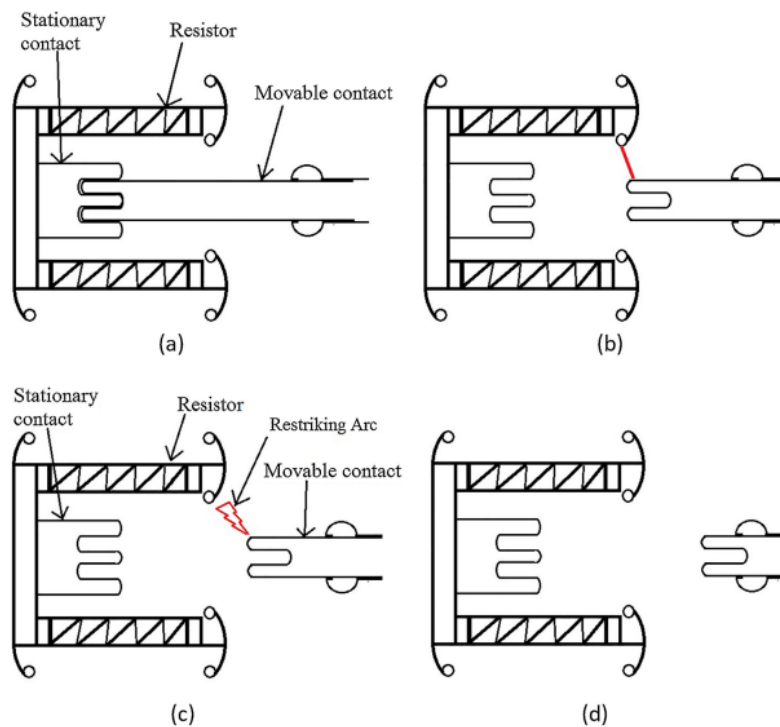
Het laatste aspect is de verschijningsvorm. AIS-systemen zijn open met veel metalen onderdelen en een technische uitstraling. Een GIS-installatie is bijna volledig omsloten door gebouwen. Dit geeft meer een industriële uitstraling. Wat gewenst is ligt aan de omgeving (stedelijk of landschappelijk) en de omwonenden[11]–[13].

Door Tabel 1 kan er besloten worden dat GIS-installaties grote nadelen hebben. Wat de geschiktste oplossing is hangt af van situatie tot situatie. Dit wordt beslist door een samenwerking van de verschillende partijen (TSO, gemeente/stad, omwonenden, ...). TSO's proberen meestal AIS-systemen te plaatsen omdat deze voordeliger zijn, maar soms gaat het niet anders[12].

### 2.2.3. Verband met de praktijk

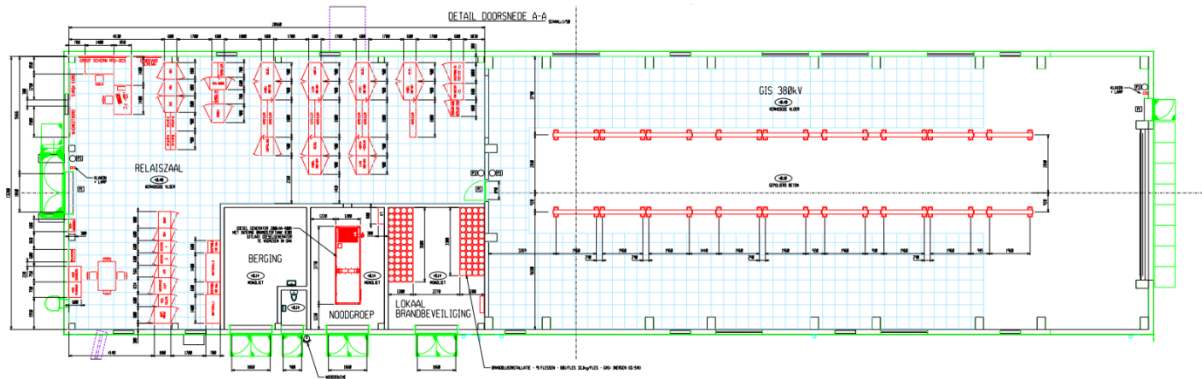
Het probleem dat Elia nu ervaart is ook al door andere gelijkaardige bedrijven ondervonden. Hier zijn ook al onderzoeken naar gedaan. In [14] zijn er testen gedaan op een werkelijke GIS-installatie en in [5] zijn de problemen aangetoond met behulp van dezelfde testopstelling.

In [14] stellen M.A. Haseeb en M. Joy Thomas vast dat er door het schakelen zeer snelle transiënte overspanningen (EN: VFTO – Very Fast transient overvoltages) ontstaan. Deze veroorzaken op hun beurt ongewenst gedrag in beveiligings- en besturingscircuits. Verder is er vastgesteld dat de meeste frequenties van de VFTO's in de range van 800 Hz tot 15 MHz liggen. De voorgestelde oplossing zijn dempende weerstanden aan de schakelaar. Figuur 13 toont de werking van deze schakelaar [14].



Figuur 13: schakelmannoeuvre bij schakelaar met dempende weerstanden [14, p. 7]

In [5] is een testopstelling gebruikt om het probleem aan te tonen. Een vonk die opgewekt is door een Wimhurstgenerator vervangt de elektromagnetische puls die in de onderstations ongewenst gedrag veroorzaakt. Verder vervangt de opto-coupler de gevoelige elektronica en duidt de LED aan wanneer er ongewenst gedrag is. Zoals eerder al vermeld, doet het probleem zich vooral voor in GIS-installaties. Figuur 14 toont een schematisch overzicht van een GIS-installatie.



Figuur 14: Schematisch overzicht van een GIS-Installatie [4, p. 5]

Een GIS-installatie bevat 2 delen. Het deel rechts op de figuur is het primaire circuit. Dit is waar de hoogspanningslijnen, vermogensschakelaars, meettransformatoren,... zitten. Figuur 12 geeft hier een beter inzicht voor. Het linkse deel van de figuur is de relaiszaal. Deze zaal bestaat uit communicatie-, meet-, regel- en beveiligingsapparatuur. Deze toestellen zijn nodig voor het veilig bedienen van het onderstation. Ten eerste gebeuren er stroom- en spanningsmetingen om te kijken of de niveaus nog voldoende zijn. Daarna gaan deze resultaten via de communicatietoestellen naar de beveiligingen. Deze beveiliging zijn zeer belangrijk. Daarom zijn er nog andere apparaten die controleren dat de beveiligingen correct werken. Als alles gecontroleerd is, sturen de communicatietoestellen de nodige informatie via glasvezel naar de operator die in de dispatching of controlezaal zit. De dispatching is verantwoordelijk voor het bedienen van de schakelaars en relais[5]. Figuur 15 en Figuur 16 tonen kasten van in de relaiszaal.



Figuur 15: communicatietoestellen [4, p. 5]



Figuur 16: Railbeveiliging [4, p. 5]



## 2.3. Elektromagnetische compatibiliteit (EMC)

De focus van dit deel ligt op de technische basis van het probleem, namelijk elektromagnetische compatibiliteit (EMC). Het eerste deel legt uit wat EMC precies is. Daarna volgt het ‘transmission line model’ en het ontstaan van transiënte golven. Deze transiënte golven komen aan bij een discontinuïteit. Het volgende onderdeel legt uit wat een discontinuïteit juist is. Het laatste onderdeel beschrijft hoe er ongewenste spanningen in de bedrading van de elektronica ontstaan. Dit heeft te maken met het antennegedrag van de bedrading.

### 2.3.1. Wat is EMC?

“Het internationaal elektromechanisch comité (IEC) definieert EMC als de bekwaamheid van een apparaat, uitrusting of een systeem om naar behoren te functioneren in zijn elektromagnetische omgeving zonder het introduceren van elektromagnetische storingen naar iets in die omgeving” [15]. De term EMC staat voor het niet uitzenden van storingen die andere toestellen of installaties in die omgeving zou kunnen verstoren[5]. Bij elk EMC probleem zijn er 3 onderdelen. Deze onderdelen zijn de bron, het slachtoffer en de koppeling tussen de eerste twee. De bron genereert elektromagnetische energie en zendt die uit naar de omgeving. Een andere naam voor dit fenomeen zijn emissies (EN: emissions). Bij geleiding verspreidt de storing zich via de geleider. De waarschijnlijkheid dat elektrische apparaten ongewenst gedrag vertonen, is de gevoeligheid (EN: susceptibility). Het tegengestelde van gevoeligheid is immuniteit (EN: immunity)[15].

Alle elektrische apparaten worden getest op emissies en immuniteit. Als deze voldoen aan de standaarden, dan mogen ze verkocht worden op de markt[15]. In [5] staat dat de Europese norm EN61000-6-5 hier meer duidelijkheid over geeft. Deze norm heeft 4 klassen opgericht om toestellen en installaties op een elektrische site, zoals een onderstation, onder te verdelen. Deze klassen geven aan wat het niveau is van de immuniteit en wat de impact is op het toestel. Tabel 2 geeft een overzicht van deze klassen.

Tabel 2: Klassen van de Europese norm EN61000-6-5 [5]

	Toepassingsgebied	Gevolgen
A	In omgevingen met permanente storingen	Alles blijft correct werken
B	Bij korte storingen waar geen extra tussenkomst is gewenst	Nadien werkt alles nog correct
C	Bij korte storingen waar wel een extra tussenkomst is gewenst (bv. een reset)	Nadien werkt alles nog correct
D	Werking van toestel wordt verstoord	Blijvende schade

Een toestel dat onderhevig is aan een permanente storing die geen gevolgen hebben, zit in klasse A. Belangrijk om op te merken is dat de klasse van een toestel of installatie niet enkel afhankelijk is van hoe het gemaakt is (fabricage van het toestel). Hoe beter beschermt tegen storingen, hoe

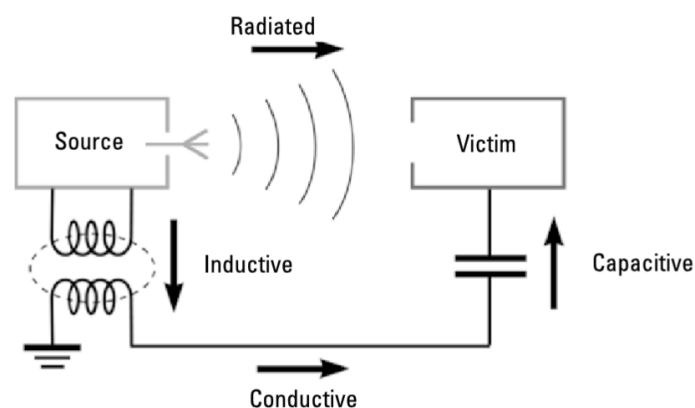
hoger de klasse is. De klasse is ook afhankelijk van het niveau van de storing. Hetzelfde toestel kan in verschillende klasse zitten als er bijvoorbeeld in één situatie meer storende bronnen zijn dan in de andere situatie. Een goed voorbeeld is het vliegtuig. De apparatuur van een vliegtuig moet altijd blijven werken. Toestellen van klasse A zijn dus vereist. Als één iemand een smartphone en laptop bij heeft is er geen probleem voor de apparatuur van het vliegtuig en blijft alles werken. Als iedereen smartphones en laptops gebruikt is de storing hoger en is het mogelijk dat de voorziene bescherming niet meer voldoende is. Dan zit de apparatuur van het vliegtuig niet meer in klasse A. Daarom moeten elektrische apparaten zoals een smartphone op vliegtuigstand gezet worden[5].

Elektromagnetische velden penetreren vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. Er zijn ook materialen waar EM velden normaal niet in kunnen. Door openingen en gaten in dat materiaal lukt dat toch. Om dit te reduceren moet het gat kleiner zijn dan de golflengte van het EM signaal. De vuistregel is dat het gat kleiner moet zijn dan  $\lambda/20$ . Zo een gaten zijn natuurlijk niet makkelijk te vermijden. Kortom elektromagnetische velden kunnen dus overal en alles penetreren[15].

Vervolgens zijn er 4 koppelingsmechanismen en deze koppelingsmechanismen zijn[15], [17]:

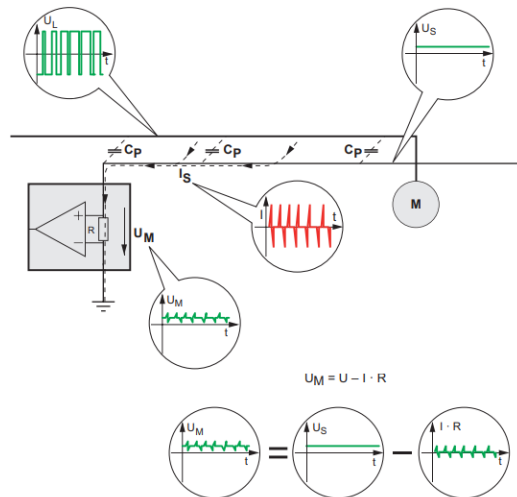
- geleiding,
- capacitieve koppeling,
- inductieve koppeling (of magnetisch) en
- straling.

Figuur 17 geeft een overzicht van de 4 koppelingsmechanismen.



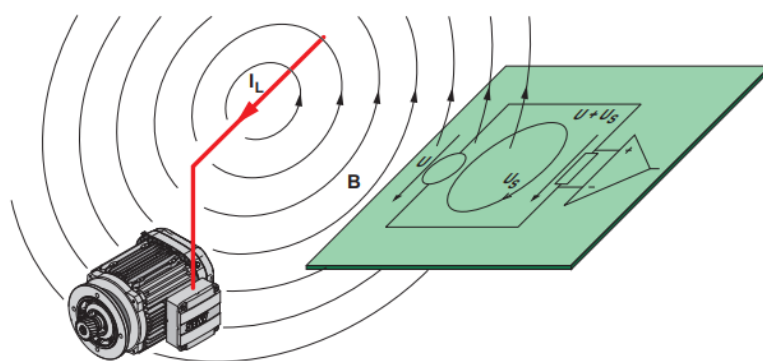
Figuur 17: De koppelingsmechanismen [15, p. 64]

Vervolgens is het belangrijk te weten wat voor soort koppelingsmechanisme de storing veroorzaakt. Geleiding als koppelingsmechanisme is onmogelijk, want de bron is een vonk. Daarentegen ontstaat de vonk wel door transiënte golven bij discontinuïteiten die veroorzaakt zijn door schakelmannoeuvres. Het verhinderen van het ontstaan van deze transiënte golven kan het probleem dus ook oplossen. Capacitieve koppeling zou de vonk kunnen veroorzaken, want de GIL en het omhulsel zijn twee parallelle geleiders[18]. Figuur 18 toont aan hoe dit koppelingsmechanisme werkt.



Figuur 18: Capacitieve koppeling [29, p. 8]

Deze koppeling ontstaat wanneer twee geleiders naast elkaar liggen en onderling een parasitaire capaciteit hebben. Deze capaciteit is aangegeven door  $C_p$ . Bij een verandering in de spanning in één van de geleiders vloeit er een stroom ( $I_s$ ) via de capaciteit naar de andere geleider. De stroom ( $I_s$ ) veroorzaakt dan een storing[18]. Doordat een vonk het EMC-probleem in het onderstation veroorzaakt is ook dit niet het koppelingsmechanisme tussen de zender en ontvanger. Daarnaast is dit ook niet het koppelingsmechanisme tussen de GIL en het omhulsel, want de spanning op de GIL is geen constant wisselende spanning. Het schakelmannoeuvre zorgt voor een plotse spanningsverandering met een piekstroom tot gevolg. Deze piekstroom zorgt voor een inductieve koppeling tussen de GIL en het omhulsel. Dit koppelingsmechanisme zorgt niet voor de storing, maar ligt wel aan de basis van de storing. Figuur 19 toont het principe van inductieve koppeling.



234441739

- $I_L$  Current in the motor cable
- $B$  Magnetic field
- $U_S$  Interference voltage

Figuur 19: inductieve koppeling [29, p. 7]

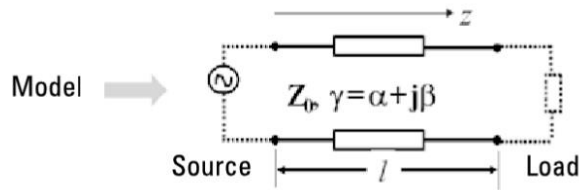
Voor inductieve koppeling is er een stroomvoerende geleider nodig die een magnetisch veld opwekt en een spanning/stroom induceert in een geleidende lus, geleider of spoel. Hoe groter de stroom, oppervlakte van de lus en frequentie, hoe groter de geïnduceerde spanning is in deze lus. Vervolgens heeft de afstand tussen de fasegeleiders en de apparatuur ook een invloed. Hoe groter de afstand, hoe moeilijker de koppeling. Naast de afstand kan ook een goede oriëntatie de storing voorkomen. Om storing te voorkomen, moet de lus evenwijdig liggen met de veldlijnen zodat deze niet door de lus gaan[18].

Tot slot is er nog de straling. Bij deze manier zijn er elektromagnetische golven die door geleiders of kabellussen verzonden en ontvangen kunnen worden[18]. Deze golven kunnen ook door vonken ontstaan. Het verzenden en ontvangen van deze golven is gebaseerd op antennegedrag dat beschreven is in sectie 2.3.3. Dit is het meest logische koppelmechanisme voor het EMC-probleem dat is vastgesteld.

Het koppelingsmechanisme via straling is het belangrijkste aangezien dit het mechanisme is dat de problemen veroorzaakt in de GIS-installaties. Elektromagnetische straling kan schadelijk zijn voor de gezondheid, maar tot nu toe zijn er geen bewijzen dat elektromagnetische straling schadelijk is als de normen niet overschreden worden[19]. De Vlaamse regering heeft op 19 november 2010 een besluit goedgekeurd dat de normen voor elektromagnetische straling van vast opgestelde zendantennes vastlegt. De normen gelden voor straling met een frequentie tussen 10 MHz en 10 GHz. Deze normen zijn opgenomen in VLAREM II[20]. Deze normen gelden enkel voor vast opgestelde zendantennes. Het vastgestelde probleem in GIS-onderstations hoort hier ook bij.

### 2.3.2. Technische verdieping

Transmissielijnen verplaatsen elektrische energie en communicatiesignalen van het ene punt naar het andere[15]. Op hoge frequenties zijn dit EM golven. Die EM golven verplaatsen zich in de vorm van spannings- en stroomgolven[15], [21]. Het basisprincipe blijft wel altijd hetzelfde en dat zijn 2 parallelle lijnen die een bron met een belasting verbinden. Figuur 20 verduidelijkt dit principe. Voorbeelden hiervan zijn een radioantenne en een radio-ontvanger of de netspanning en een koelkast [15]. Daarnaast bestaan er 3 grote groepen in transmissielijnen[22]. De eerste groep zijn tweedraadse lijnen. Tweedraadse lijnen gedragen zich als laagdoorlaatfilters met cut-off frequenties van enkele honderden MHz. Cut-off frequenties zijn eigenlijk de grens vanaf wanneer de sterkte van het signaal begint af te nemen [23]. De tweede groep zijn de coaxiale lijnen. Deze lijnen zijn ook laagdoorlaatfilters, maar hebben cut-off frequenties van enkele GHz. Tot slot behoren de microstriplijnen en de optische golfgeleiders tot de laatste groep. Deze groep gedraagt zich anders aangezien zij als hoogdoorlaatfilter werken[15]. Figuur 21 toont een voorbeeld van de coaxiale en de microstrip lijnen.



Figuur 20: Basisprincipe transmissielijn [14, p. 78]

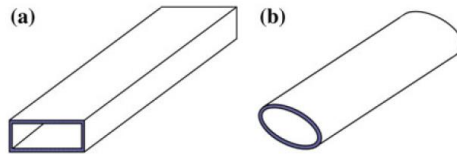


Fig. 2.2 Typical single-conductor transmission line. a Rectangle waveguide and b circular waveguide

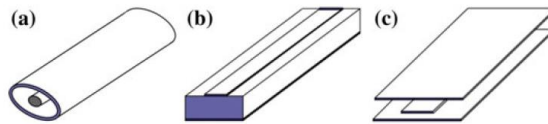


Fig. 2.3 Typical double-/multi-conductor transmission lines. a Coaxial line; b microstrip line; and c stripline

Figuur 21: enkele transmissielijnen [23, p. 27]

Transmissielijnen gedragen zich als een fysisch systeem met verschillende parameters [15]. Het modelleren of wiskundig beschrijven van het gedrag van dat fysische systeem kan op twee manieren gebeuren, namelijk met Maxwell of Kirchhoff. Deze thesis werkt enkel de modellering met behulp van Kirchhoff uit. Voor meer informatie over de manier met behulp van Maxwell is het aangeraden bron [15] te raadplegen. Kirchhoff veronderstelt wel dat het een circuitmodel met vaste elementen (EN: lumped element circuit model) is. In realiteit is dat niet zo doordat de lijnen veel langer zijn dan de golflengte ( $\lambda$ ). Dit kan opgelost worden door naar een stukje van de transmissielijn te kijken met een lengte van  $\Delta z$ . Om aan de voorwaarde te voldoen met  $\Delta z$  wel veel kleiner zijn dan de golflengte ( $\ll \lambda$ ) [24]. Figuur 22 toont het nieuwe circuit.



Transmission line segment: (a) of length  $\Delta z$ ; and (b) lumped-element model.

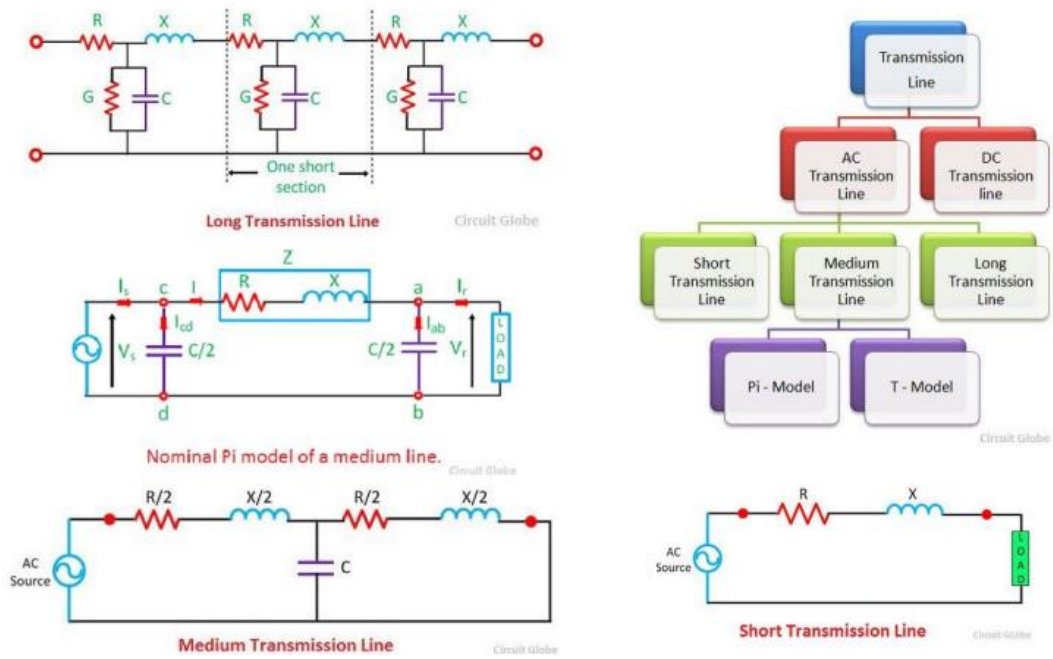
Figuur 22: Lumped-circuit model [25]

In Figuur 22 zijn 4 belangrijke parameters te zien. Deze gelden voor elk stukje  $\Delta z$  en worden de primaire constanten genoemd [15], [25], [26]. Tabel 3 geeft een overzicht van deze parameters. Al deze parameters zijn gespecificeerd per eenheid van lengte.

Tabel 3: primaire constanten van de TL theorie [23, p. 69]

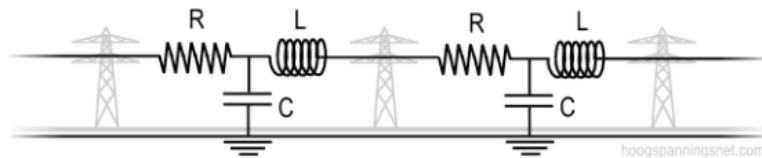
Constant	Meaning	Units
$R$	Ohmic resistance of the conductors	Ohms per meter
$L$	Inductance associated with the magnetic field around the conductors	Henries per meter
$C$	Capacitance associated with the electric field in the dielectric medium separating the conductors	Farads per meter
$G$	Conductivity of the dielectric material separating the conductors	Siemens per meter

Hier stellen  $R$  en  $G$  de verliezen op de transmissielijn voor.  $R$  zorgt voor de ohmse verliezen.  $G$  beschrijft daarentegen het verlies in het diëlektricum. Dit komt door de geleiding in het diëlektricum en van diëlektrische relaxatie. Diëlektrische relaxatieverliezen ontstaan door de beweging van ladingscentra die een vervorming in de moleculaire structuur/rooster van het diëlektricum veroorzaken. De periodieke variatie van het elektrisch veld bepaald de hoeveelheid energie die van het elektromagnetisch veld wordt omgezet naar mechanische trillingen [25]. Verder beschrijven  $L$  en  $C$  respectievelijk de magnetische en elektrische energieopslag [15], [25]. Transmissielijnen kunnen in veel vormen voorkomen. Zo zijn er ook heel lange en heel korte transmissielijnen. Het transmissielijnmodel is ontwikkeld voor heel lange lijnen, maar na onderzoek is ontdekt dat deze theorie ook voor korte lijnen geldt zolang de frequentie hoog genoeg is [26]. Daarom zijn er variaties ontwikkeld voor het circuitmodel met vaste elementen. Figuur 23 toont deze verschillende modellen.

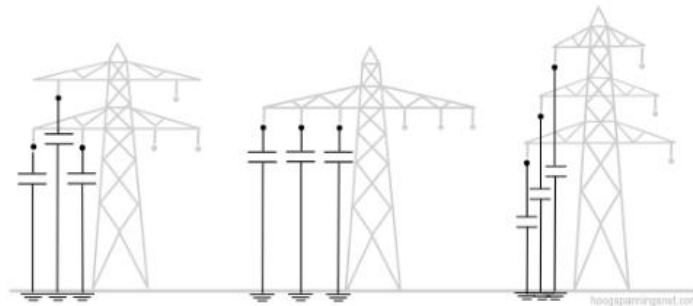


Figuur 23: variaties van het lumped-circuit model [2]

Deze theorie kan een probleem in het hoogspanningsnet verklaren en oplossen. Hoogspanningslijnen zijn heel lange geleiders. Dit kan zorgen voor een onevenwicht in de primaire parameters. Figuur 24 en Figuur 25 verduidelijken dit.

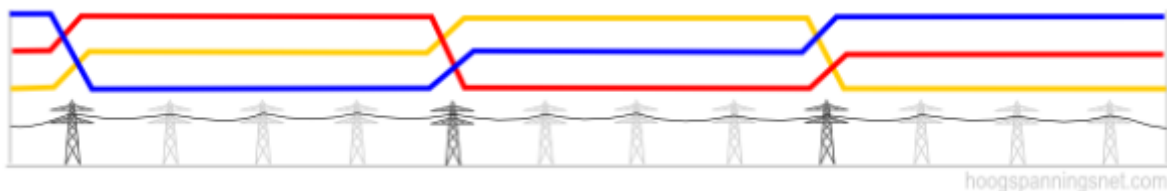


Figuur 24: lumped-circuit model voor hoogspanning [27]



Figuur 25: verschil in capacatieve waarde door hoogte [27]

Afhankelijk van het soort mast bevinden de lijnen zich op verschillende hoogtes. Dit betekent dat alle lijnen een verschillende capaciteve waarde (C) hebben. Als de lijnen niet lang zijn is dat niet zo een groot probleem. Wanneer de lijnen wel lang zijn, kunnen er grote verschillen ontstaan in impedantie van de verschillende fasegeleiders. Hoe groter de impedantie, hoe groter de “tegenstand” van die lijn tegen stroomdoorgang. Als een lijn een veel grotere impedantie heeft, dan moeten de andere twee lijnen een grotere stroom geleiden. Dat verschil kan bijvoorbeeld oplopen tot 100 A. Dit maakt het heel lastig voor beveiligings- en meetapparatuur en zorgt voor een beperkte transportcapaciteit. De limiet van één lijn is ook de limiet van heel de verbinding[27]. De oplossing hiervoor is het transponeren van de lijnen. Dit is het wisselen van de lijnen na bepaalde afstanden zodat alle lijnen ongeveer een zelfde hoeveelheid van boven als beneden hangen[2], [27]. Tegenwoordig zijn er ook andere oplossingen, namelijk compensatiespoelen en condensatorbanken die zich in de onderstations bevinden[27]. Figuur 26 verduidelijkt het transponeren van hoogspanningslijnen.



Figuur 26: transponeren van hoogspanningslijnen [27]


Deze primaire parameters (R, L, C & G van tabel 3) zijn niet zo gemakkelijk te gebruiken. Daarom zijn er ook secundaire parameters opgesteld[15]. Om deze parameters te bepalen, zijn de wetten van Kirchoff nodig. Door deze wetten is het mogelijk om een vergelijking voor de spanning en de stroom van het lumped-circuit model op te stellen. Door deze vergelijkingen te delen door  $\Delta z$  en dan de limiet voor  $\Delta z$  te nemen naar nul, ontstaan de telegraafvergelijkingen[24]. Figuur 27 verduidelijkt deze berekening.

$$V(z) - I(z)R\Delta z - I(z)j\omega L\Delta z - V(z + \Delta z) = 0$$

$$I(z) - V(z + \Delta z)G\Delta z - V(z + \Delta z)j\omega C\Delta z - I(z + \Delta z) = 0$$

Divide by  $\Delta z$  and take limit  $\Delta z \rightarrow 0$ :

$$\frac{\partial V(z)}{\partial z} = -(R + j\omega L)I(z)$$

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} = -(G + j\omega C)V(z)$$


Figuur 27: Berekening secundaire parameters (deel 1) [24]

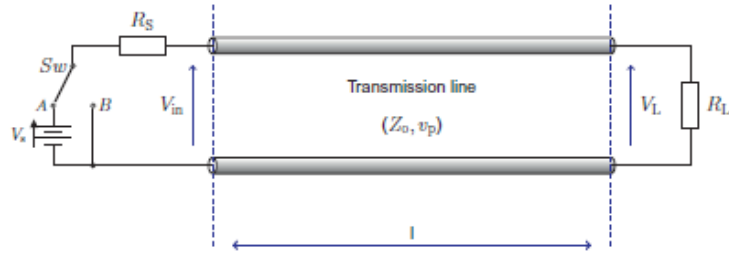


Verder uitwerken van deze vergelijkingen geeft twee exponentiële vergelijkingen met elk twee delen. Deze delen stellen een spannings- en stroom golf voor. Eén voorwaartse spanningsgolf met een amplitude  $V^+$  en één spanningsgolf in tegengestelde richting met amplitude  $V^-$ . Dit geldt ook voor de vergelijking van de stroom. Hieruit blijkt dus dat er spannings- en stroomgolven door de transmissielijn gaan. Een nieuwe (secundaire) parameter komt in deze twee vergelijkingen voor. Deze parameter heeft het symbool gamma ( $\gamma$ ) en noemt de golfvoortplantingsconstante (EN: propagation constant). Deze parameter heeft een reëel en imaginair deel. Het reële deel ( $\alpha$ ) is de dempingscoëfficiënt en het imaginaire deel ( $\beta$ ) is de faseverschuivingscoëfficiënt[24], [25]. De eenheden van de coëfficiënten zijn respectievelijk dB/km en rad/km. Daarnaast is er ook een vergelijking voor de golfvoortplantingscoëfficiënt met enkel de primaire parameters. Figuur 28 toont deze vergelijkingen.

$$\begin{aligned}
 V(z) &= V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \\
 I(z) &= I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \\
 \gamma &= \alpha + j\beta \\
 &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}
 \end{aligned}$$

Figuur 28: berekening secundaire parameters (deel 2) [24]

Vervolgens is er nog een tweede secundaire parameter, namelijk de karakteristieke impedantie die wordt voorgesteld door  $Z_0$ . Het volgende gedachte-experiment verduidelijkt de betekenis van deze parameter. Figuur 29 beschrijft het startpunt van dit gedachte-experiment. Dit schema is een transmissielijnmodel met een schakelaar aan de kant van de bron. De schakelaar start initieel in positie B. In veronderstelling dat na het schakelen de schakelaar onmiddellijk in positie A is op tijdstip  $t = 0$ , dan zal er een stroom beginnen vloeien. Aangezien de elektrische energie zich in een medium voorplant, beweegt de spannings- en stroomgolf op een eindige snelheid. Daardoor is het onmogelijk dat op tijdstip  $t = 0$  de golven al tot aan de andere kant van de transmissielijn geraakt zijn. Dat betekent dat er een eindige stroom is, waardoor er een eindige impedantie moet zijn. Hieruit volgt dus ook dat er een eindige spanning staat over de transmissielijn. Deze impedantie van de transmissielijn is ook gekend als de karakteristieke impedantie. Deze impedantie is onafhankelijk van de fysieke lengte en de grootte van de last[26]. Deze parameter is de verhouding van de spanning ten opzichte van de stroom op een bepaald punt van de oneindig lange homogene transmissielijn[15]. Formule 1 [15] geeft de formule voor de karakteristieke impedantie weer.



Figuur 29: vertrekpunt denkexperiment [24, p. 54]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

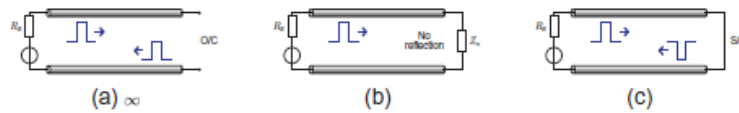
Uit Figuur 28 blijkt dat er golven naar de belasting gingen en ook golven van de last naar de bron gingen. Dit kan enkel als de last (een gedeelte van) de golven reflecteert. De reden waarom dit gebeurt, is omdat de karakteristieke impedantie van de transmissielijn en de impedantie van de last niet hetzelfde zijn. Elke verandering in impedantie is een discontinuïteit en bij elke discontinuïteit reflecteert een gedeelte terug naar de bron. Hierdoor interfereren de voorwaartse ( $V_+$ ) en gereflecteerde ( $V_-$ ) golven op de transmissielijn en vormen ze maxima (zelfde fase) en minima (tegengestelde fase). Bij spanningsmaxima zijn er stroomminima en omgekeerd. De spanningsreflectiecoëfficiënt ( $\Gamma$  of  $\rho$ ) beschrijft hoeveel de last terug reflecteert[15]. Formule 2 geeft de formule voor de spanningsreflectiecoëfficiënt weer.

$$\Gamma = \rho = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2)$$

In deze formule staat  $Z$  voor de impedantie van de last en  $Z_0$  voor de impedantie van de transmissielijn. Er bestaan 3 extreme waarde voor de spanningsreflectiecoëfficiënt[26]. Figuur 30 geeft een overzicht van deze drie extreme waarden en een schematische voorstelling voor elke waarde.

**Table 2.1** Reflection Coefficient Extremes

Load	$\Gamma_L$	Reflected Pulse
Open circuit ( $Z_L = \infty$ )	1	Same amplitude, same polarity as the incident pulse
Matched ( $Z_L = Z_0$ )	0	No reflected pulse
Short circuit ( $Z_L = 0$ )	-1	Same amplitude but opposite polarity to incident pulse

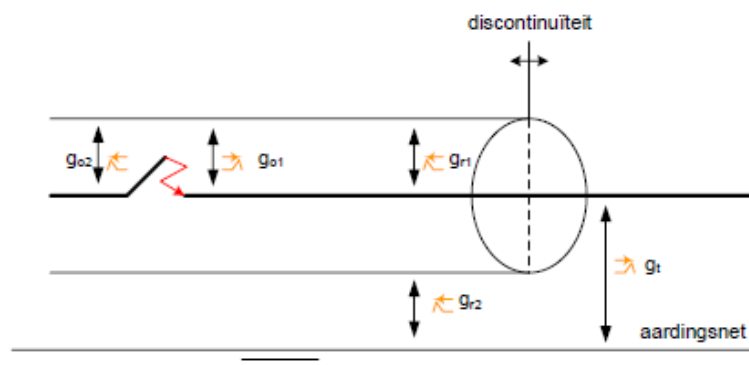


**FIGURE 2.4**

Incident and reflected pulses with extreme load values. (a) Open circuit ( $Z_L = \infty$ ). (b) Matched ( $Z_L = Z_0$ ). (c) Short circuit ( $Z_L = 0$ ).

*Figuur 30: De 3 extreme waarde van de spanningsreflectiecoëfficiënt [23, p. 58]*

Wanneer de impedantie van de last en de transmissielijn hetzelfde is, is het een “matched TL”. Dit is het ideale geval, maar heel moeilijk te behalen. De andere twee extremen zijn een open circuit en een kortsluiting. Deze laatste twee reflecteren alles van de voorwaartse golf. Dit is helemaal niet de bedoeling en wordt best vermeden. In de praktijk zijn er heel wat discontinuïteiten. In GIS-onderstations komt dit vooral voor wanneer de geïsoleerde lijnen terug naar buiten gebracht worden. Dan verandert de impedantie van de lijn helemaal omdat het van gas-geïsoleerd naar openlucht-geïsoleerd gaat. Dit gebeurt ook als de verbinding als een ondergrondse kabel vertrekt. Volgens [5] is de overgang naar openlucht het meest impactvol. Dit wil zeggen dat hier de impedantie het hardst verandert. Figuur 2 geeft een schematische voorstelling van deze toepassing. Figuur 31 zoomt in op de discontinuïteit om te verduidelijken welke golven hier nu precies ontstaan.



*Figuur 31: schematische voorstelling van de golven in een discontinuïteit [5, p. 19]*

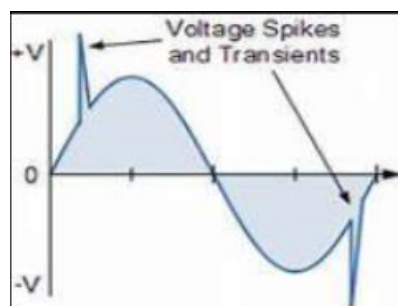
In zijn 5 golven te zien. De eerste golf ( $g_{02}$ ) is een gereflecteerde golf. Doordat de schakelaar open gaat, ontstaat er eigenlijk een open circuit. Dat is één van de extremen van Figuur 30. Deze golf is de volledig gereflecteerd met dezelfde amplitude en fase/polariteit. De tweede golf ( $G_{01}$ ) is de voorwaartse golf (EN: incident pulse). Deze is er als de schakelaar dicht is. De derde golf ( $G_{R1}$ ) is

een gereflecteerde golf. Deze is ontstaan door het verschil in impedantie in de lijn bij de discontinuïteit. De vierde golf ( $G_t$ ) is het deel van de eerste golf ( $G_{o1}$ ) dat niet gereflecteerd is, dus het deel dat is doorgegeven. Deze golf is gekend als de transmissiegolf. De laatste golf ( $G_{r2}$ ) is ook een gereflecteerde golf, maar deze komt terug over het omhulsel van de gas-geïsoleerde lijn (GIL). Dit is een hoog frequente transiënte golf en ontstaat door een inductieve koppeling (zie Figuur 19) met de teruggekaatste golf ( $G_{r1}$ ) op de GIL en het omhulsel.

Deze geïnduceerde spanning/stroom zorgt voor een potentiaalverschil tussen het omhulsel en de metalen omkadering van Figuur 3. Als de spanning op het omhulsel hoog genoeg is, kan er een vonk ontstaan. Deze vonk/ontlading ontstaat tussen de metalen omkadering die geaard is, maar tijdelijk op een ander potentiaal staat, en het omhulsel van de GIL. Zo ontstaan er ongewenste elektromagnetische golven die de apparatuur in de buurt kunnen beïnvloeden. De metalen omkadering zit rond de GIL waar deze het GIS-onderstation binnenkomt[5]. Figuur 3 toont een foto van de metalen omkadering. Figuur 4 geeft een vereenvoudigde voorstelling van de ontlading.

Op figuur 4 zijn de drie fasen te zien. Die drie fasen zijn allemaal een GIL. Het vlak is de omkadering en is geaard[5]. De vonk kan alleen voorkomen door de transiënte golven die zorgen voor een tijdelijk potentiaalverschil tussen het omhulsel en de omkadering. Dit tijdelijk potentiaalverschil kan enkel ontstaan doordat de spanningsgolf heel snel beweegt, want de omkadering en het omhulsel zijn beide geaard. Doordat de looppengte van waar de spanning geïnduceerd wordt tot aan de omkadering via de aarde veel langer is dan via het omhulsel ontstaat er heel even een potentiaalverschil.

Transiënte golven (EN: VFTO = very fast transient overvoltages) ontstaan door het schakelen van scheidings of vermogensschakelaars. Deze transiënte golven hebben een zeer snelle stijgtijd, zie Figuur 32. Deze tijd zit in het bereik van enkele microseconden met piekspanningsniveaus tot 2 p.u. [28]. Deze VFTO's hebben frequentie van enkele MHz tot enkele honderden MHz[29]. In de lijnen zelf veroorzaken deze transiënte golven geen problemen, maar wel bij discontinuïteiten. schets de transiënte golven in perspectief met de spanninggolven die door de transmissielijn lopen.

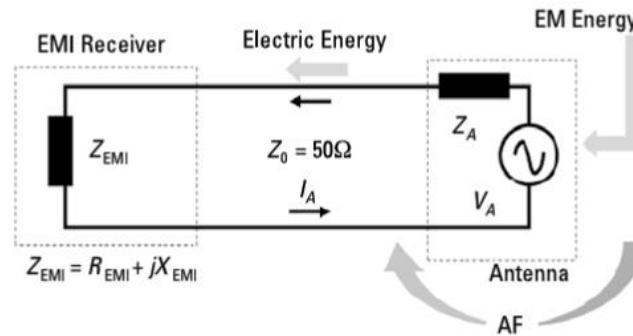


*Figuur 32: transiënte golven voorgesteld bij een spanningsgolf [25, p. 94]*

### 2.3.3. Antennegedrag

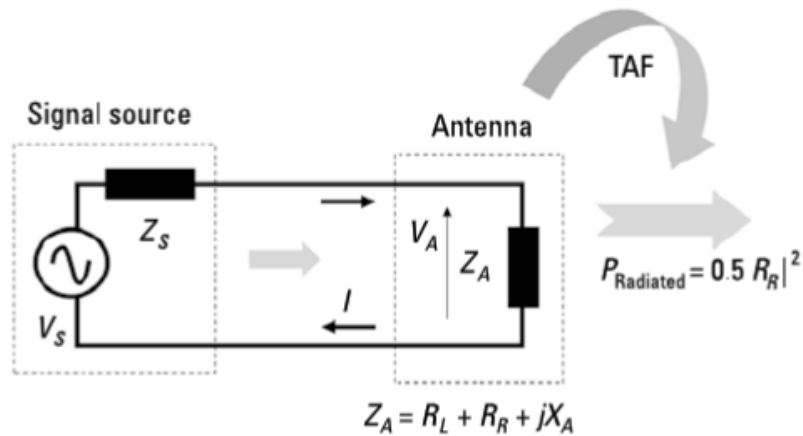
Uit vorig deel blijkt dat er vonken kunnen ontstaan in GIS-onderstations door het schakelen van lastscheiders of vermogensschakelaars. Deze vonken zijn EM pulsen die de elektronica in de relaiszaal (zie Figuur 14) kunnen beïnvloeden. Dit komt doordat de bedrading van deze apparatuur zich als antennes gedragen. Dit deel legt uit wat dit gedrag inhoudt.

Een antenne zet spanningen en stromen om naar stralingsenergie (EM velden) en omgekeerd afhankelijk van de toepassing. In het geval van deze toepassing zet de antenne de EM puls om naar elektrische stromen en spanningen. Voor EMC antennes zijn er twee belangrijke parameters. De antennefactor (AF) is voor de antenne die de emissie (EM puls) ontvangt en de transmissieantennefactor (TAF) is voor de uitzendende antenne[15]. Figuur 33 toont een vereenvoudigd model voor de antenne die de EM puls omzet naar spanningen en stromen.



Figuur 33: Vereenvoudigd circuit voor de ontvangende antenne [15, p. 109]

Uit blijkt dat de antenne zelf de bron is in het circuit. Dit komt doordat in de antenne spanningen en stromen ontstaan. De wet van Faraday-Lenz kan deze spanningen en stromen uitleggen. Een elektrische geleider in een magnetisch veld induceert spanningen en stromen als er een wisselend magnetisch veld aanwezig is[30]. De parameter AF is verhouding van de spanning die geïnduceerd is t.o.v. het elektrische veld. Dit betekent dat antennes met kleinere waarden voor AF gevoeliger zijn. Verder hangt de gevoeligheid ook af van de frequentie. Hoe hoger, hoe gevoeliger[15]. Figuur 34 toont het vereenvoudigd circuit voor de uitzendende antenne. Net zoals het circuit van de ontvangende antenne lijkt dit schema ook op het vereenvoudigd model van een transmissielijn. Daarnaast hangt de hoeveelheid uitgezonden EM energie af van de reflectiecoëfficiënt. Vervolgens is TAF gedefinieerd als de verhouding tussen de sterkte van het elektrisch veld en de afstand t.o.v. van de uitzendende antenne.



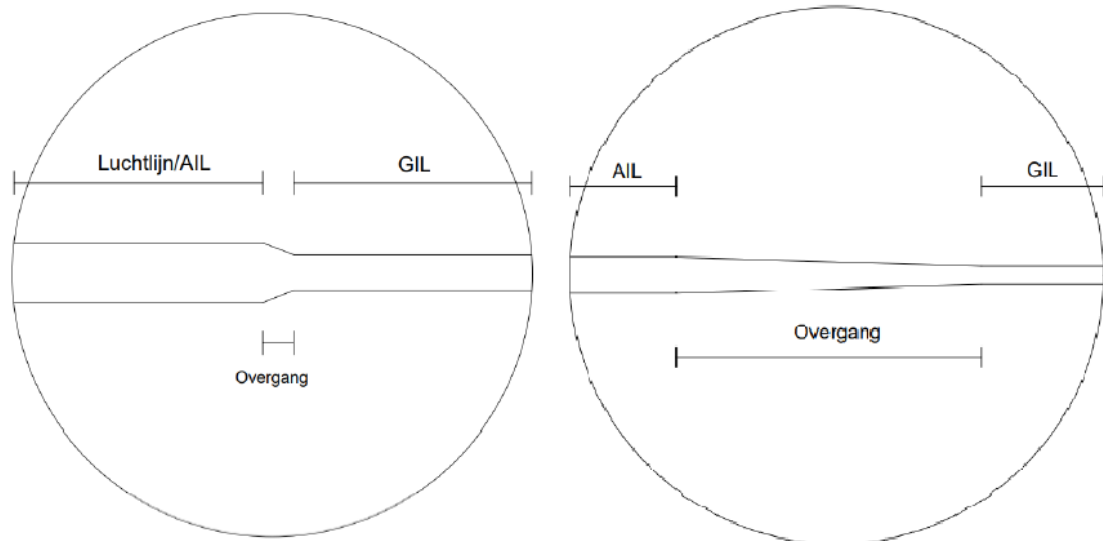
Figuur 34: vereenvoudigd circuit voor de uitzendende antenne [15, p. 110]

De vonken die een gevolg zijn van die transiënte golven kunnen dus problemen veroorzaken bij de elektronica. Elia heeft zelf metingen gedaan en daaruit bleek dat zo een vonk in een GIS-onderstation spanningen tot 200 V kon induceren op een branddetectiekaart met schade tot gevolg[4]. Goede afscherming en aarding kunnen dit voorkomen. Elia stelt voor om ferrietkernen te gebruiken[4]. Volgend hoofdstuk beschrijft hoe deze schade voorkomen kan worden.

## 2.4. EMC oplossen

In het vorig deel is uitgelegd hoe het probleem precies ontstaat. Dit deel bespreekt vooral hoe het probleem opgelost kan worden. De masterproef richt zich vooral op ferrietkernen/ferrietringen. Dit is de manier die aan Elia werd voorgesteld om dit probleem aan te pakken[4].

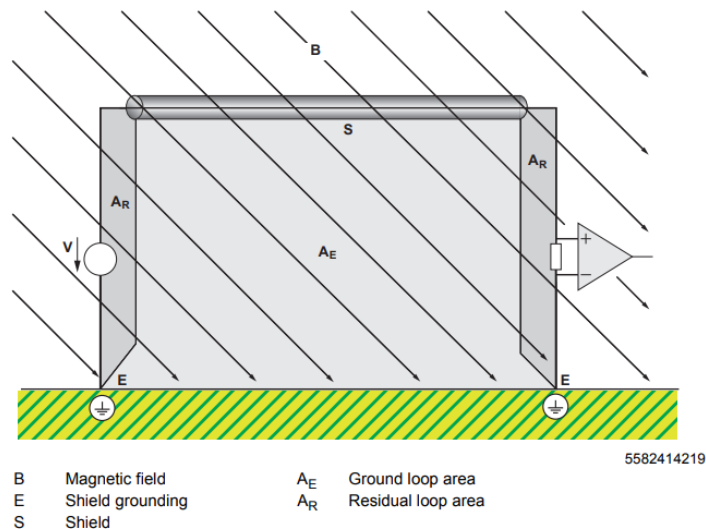
Figuur 17 toonde al de 4 koppelmechanisme. Om een goede koppeling te hebben is er een zender, een ontvanger en een koppelingsmechanisme nodig. Om de koppeling te verbreken, kan een van deze drie aangepakt worden. De overgang van de discontinuïteiten verzachten zoals voorgesteld in [5] is een mogelijkheid om de storing te beperken. Deze methode verkleint de kracht van de zender omdat er een kleiner deel van de transiënte golf wordt gereflecteerd. Dit komt omdat de overgang naar een AIL geleidelijk aan gebeurt. Figuur 35 verduidelijkt deze mogelijkheid. Dit alternatief is ook heel duur en kan alleen dienen voor nieuwe onderstations. Hierdoor is dit ook geen goede oplossing.



*Figuur 35: verbeterde discontinuïteit [4, p. 45]*

Verder zijn er drie manieren om deze storingen op te lossen. Ten eerste is er verbinden van alle elektrisch geleidende delen verbinden met de aarding ('equipotential bonding'). Deze verbinding moet een zo laag mogelijk weerstand hebben om de stroom zo goed mogelijk af te leiden [18]. Een laag resistieve verbinding tussen het omhulsel van de fasegeleider en de omkadering bij de muurdoorgang van kan de vonk voorkomen. Deze optie is niet uitgevoerd omdat er een speciale verflaag op het omhulsel zit. Deze moet dan weg gehaald worden om een goede verbinding te krijgen. Dit is niet ideaal en daarom niet gekozen als oplossing.

Ten tweede is er afschermen. Dit principe steunt op het voorkomen dat de ontvanger een storing ziet. Het voorkomen van de storing door afscherming is altijd beter dan het nadien op te lossen, maar ook duurder. Hiervoor kunnen de geleiders van de bron of de ontvanger ingepakt worden. Het afschermen van de fasegeleiders of de geleiders van de communicatie- en meetapparatuur is dus mogelijk. Voor het afschermen van een elektromagnetische velden is een dubbelzijdige afscherming nodig. Dat betekent dat de kabel aan de 2 uiteinden geaard moet zijn. Een enkelzijdige afscherming geeft niet voldoende bescherming tegen magnetische velden. Hierbij is belangrijk dat alle onderdelen afgeschermd zijn. Figuur 36 toont hoe een dubbelzijdige afscherming eruit ziet. Vervolgens toont Tabel 4 een overzicht van enkele afschermingsmethoden.



Figuur 36: dubbelzijdige afscherming [29, p. 32]

Tabel 4: Overzicht afschermingsmethoden [29, p. 29]

Cable type	Property
<b>Single conductors</b>	Single conductors offer no EMC protection. The EMC behavior can be optimized by jointly routing supply and return cables while keeping a large distance to neighboring conductors.
<b>Shielded single conductors</b>	Shielded single conductors are not common in industrial environments. They are mainly used to transmit HF broadband signals (coaxial cables). By using the shield as return conductor, useful signals are fed back into the shield system, which causes asymmetrical interference currents, especially in multi-conductor systems. In addition, such conductors have high conductor capacitances, which result in high recharging currents.
<b>Twisted pair wire</b>	Twisted pair cables offer good protection against magnetic interference fields. However, they do not offer protection against electric fields.
<b>Multi-core cables</b>	These cables, e.g. plastic sheath cables, offer good protection against magnetic interference fields. However, they do not offer protection against electric fields. The minimal distance between the cores in the cable leads to maximum coupling effects between the cores. Signal transmission can be critical if signals of several electric circuits are routed through one cable. Especially critical is signal transmission when the signals belong to different conductor groups.
<b>Shielded cables</b>	Shielded cables, when installed correctly, offer good protection against magnetic and electric fields. The properties of different shield types are discussed in chapter "Shield types" (page 65).
<b>Hybrid cables</b>	As hybrid cables bundle signals of varying sensitivity in one cable, their structure is usually complex, and component manufacturers specify them for individual applications. When using hybrid cables, you must always observe the approvals of the respective component manufacturer.
<b>Optical waveguide</b>	From an EMC perspective, signal transmission via optical waveguides is ideal. Neither EMI fields nor equipotential bonding affect the signal quality. This is why optical waveguides are perfectly suited for extreme EMI environments and for transmitting sensitive signals between areas with poor equipotential bonding.

Tabel 4 toont een aantal mogelijkheden om een kabel af te schermen. Een dubbelzijdige afscherming ('shielded cables') zijn het efficiëntste voor deze toepassing. Als er voor deze oplossing gekozen wordt, betekent dit dat alle kabels (fasegeleiders en/of signalisatiekabels van apparatuur) vervangen moet worden. Dit is een hele dure en omslachtige manier. Deze masterproef zoekt andere alternatieven omwille van deze reden.



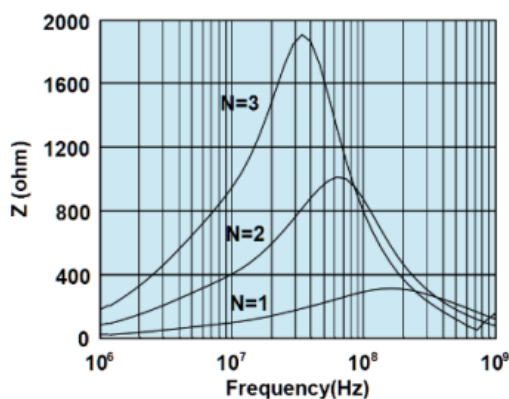
Er is ook een andere manier om afscherming te gebruiken. Dit is verstoren van de koppeling door kabelschermen te gebruiken. Hier zijn drie mogelijkheden, namelijk een kabel, een vermaasd net of een volledig dicht scherm. Het doel is steeds hetzelfde. De afscherming moet de elektromagnetische golven opvangen en de geïnduceerde stroom afvoeren via de aarding. Deze afscherming kan rond de bron, de ontvanger of er tussenin geplaatst worden. Een mogelijk oplossing zijn speciale EMP-filterende kasten[31].

Ten derde is er filteren. Dit is het verwijderen van de storing als deze al is ontstaan bij de ontvanger. Een van die manieren is het gebruik maken van ferrietkernen. Figuur 37 toont een voorbeeld van een ferrietkern.

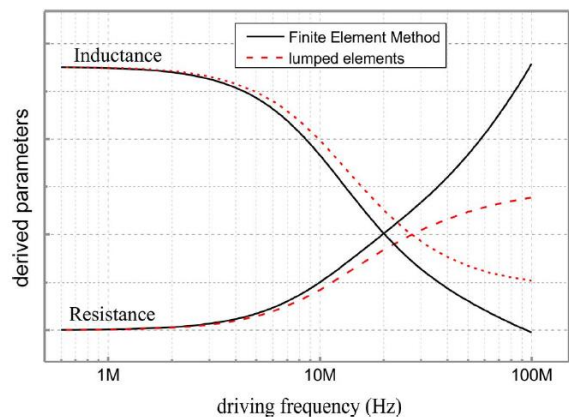


Figuur 37: voorbeeld van een ferrietkern [14, p. 5]

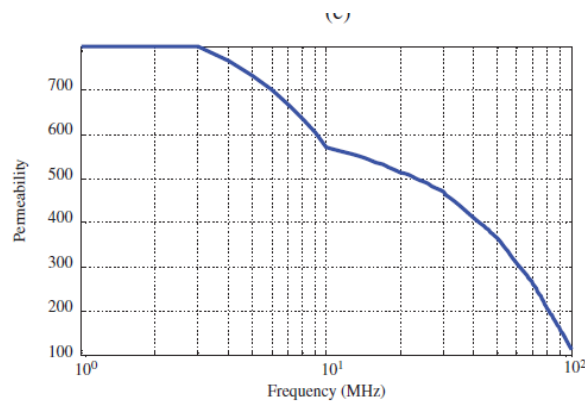
Ferrietkernen zijn ferromagnetische ringen en gedragen zich als een laagdoorlaatfilter. Bij hoge frequenties is het equivalent van de ferrietkern een ohmse weerstand en een inductieve reactantie in serie. Doordat het magnetiseren tijd nodig heeft en de fluxdichtheid nait op de veldsterkte ontstaan er verliezen. Deze verliezen worden geabsorbeerd door de ferrietkernen en omgezet in warmte[33], [34]. De karakteristieke weerstand (damping) hangt af van de frequentie[4], [29], [33] en de permeabiliteit[29], [33]. Hoe groter de permeabiliteit, hoe beter het dempend effect. Figuur 38 en Figuur 39 tonen dat de impedantie afhankelijk is van de frequentie. Figuur 40 toont dat de permeabiliteit afhankelijk is van de frequentie.



Figuur 38: Impedantie in functie van de frequentie [14, p. 5]



Figuur 39: Impedantie in functie van de frequentie [6, p. 2]



Figuur 40: Permeabiliteit in functie van de frequentie voor een NiZn ferrietkern [27, p. 9]

Figuur 38 toont ook aan dat het aantal windingen rond de kern een effect hebben op de impedantie.  $N$  stelt het aantal windingen voor[4]. Uit [31] volgt ook dat bij meer windingen de impedantie sneller afneemt als de frequentie toeneemt. Vervolgens hebben de dimensies van de ringen ook een effect op het dempend effect. Hierdoor heeft het vergroten van de diameter hetzelfde effect als meerdere ringen plaatsen[29]. Volgens [33] kunnen beter MnZn ferrietringen gebruikt worden omdat deze ringen een beter dempend effect hebben.

Tot slot is er een interessante paper [6] gevonden die een andere methode toegepast om ferrietkernen te gebruiken. Volgens [6] kunnen ferrietkernen de storing bij de zender verhinderen door deze rond de fasegeleiders te plaatsen en niet bij de meet- en communicatieapparatuur. Dit is een innovatieve manier en daarom is er nog weinig over gekend. Deze methode krijgt om deze reden extra aandacht. Een diepgaande literatuurstudie kan aantonen of dit ook een mogelijke oplossing is voor het EMC-probleem. Sectie 5.2.1 bespreekt de verkregen inzichten door deze diepgaande literatuurstudie.



### 3. De aanpak van de analyse

Zoals in de inleiding al beschreven staat, zijn de materialen, doelen en grote lijnen van het onderzoek al bekend. Dit hoofdstuk geeft de nodige details voor de analyse van de meetgegevens.

#### 3.1. DoE-analyse [36]

DoE staat voor 'Design of Experiments'. Deze analyse is een statistisch gereedschap dat resultaten van eenvoudige experimenten kan omvormen tot proceskennis. DoE haalt op een gestructureerde manier zo veel mogelijk betrouwbare informatie uit slechts enkele testen.

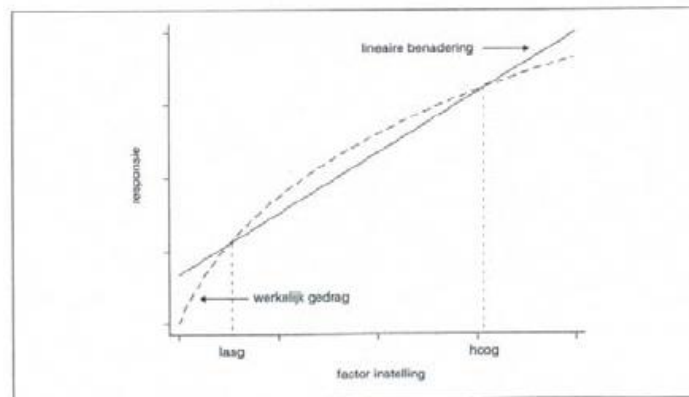
Eén van de toepassingen van de DoE-analyse is om de oorzaken (factoren) die voor variatie/inconsistentie zorgen op te sporen. Om deze oorzaken te kunnen aanpakken, bestaan er 3 verschillende methodes. De eerste methode is de oorzaak volledig wegnemen, ook wel conditionering genoemd. Dit is niet altijd mogelijk. In de onderstations kan dit door de vonk te voorkomen. Hoe dit aangepakt moet worden, is onduidelijk. De tweede methode is het proces te corrigeren. Deze methode heeft vooral betrekking op processen die iets produceren. Dit is dus ook geen goede methode voor deze masterproef. De derde en laatste methode is het proces ongevoelig of robuust maken. De bedoeling in deze masterproef is dat de ferrietkernen de oorzaken tegenwerken zodat het geïnfekteerde meet- of communicatieapparaat robuust is.

Verder zijn er enkele belangrijke conclusies/resultaten af te leiden uit de analyse. Ten eerste bepaalt de analyse de invloed/gevoeligheid van de factoren op de respons, ook wel effect genoemd. De respons is de uitkomst van de test. In deze masterproef is dat het aantal keer dat de LED aangaat en de geïnduceerde spanning in de spoel. Daarnaast bepaalt de analyse een p-waarde die soortgelijk is aan het effect. Enkel de parameters met een p-waarde boven een bepaalde grens zijn significant. Deze grens ligt vaak op 0,05 en dat is ook het geval voor deze masterproef. De andere parameters zijn verwaarloosbaar en komen niet in het nog op te stellen model voor. Dit model voorspelt wat de respons van bepaalde instellingen is. Een volgende resultaat dat de analyse duidelijk maakt is de relatie tussen de verschillende parameters. Er kunnen bijvoorbeeld 2 parameters bij zijn die afhankelijk van elkaar zijn. Aan de hand van deze kennis is het dus mogelijk het proces makkelijk te regelen.

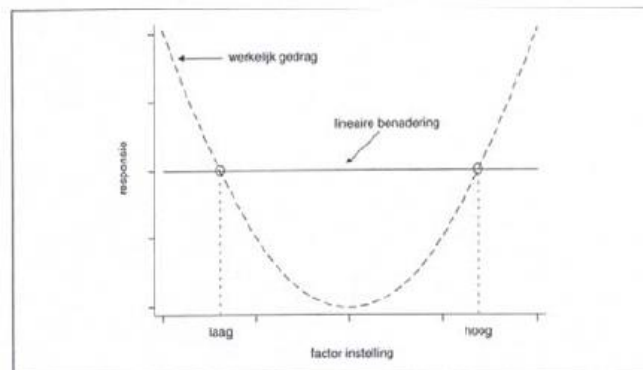
In dit vakgebied zijn er een aantal specifieke begrippen. Zo worden parameters factoren genoemd, resultaten zijn responsies en de verschillende instellingen van 1 factor zijn niveaus. De onderste instelling is de ondergrens en de bovenste is de bovengrens. Het volgende voorbeeld verduidelijkt, deze termen. Wanneer een kanon een kogel afschiet vanaf de grond, vliegt de kogel 60 m ver. Wanneer dit kanon op een muur van 10 m staat, vliegt de kogel 185 m ver. De responsies zijn dus 60 en 185 m. De factor is de hoogte van het kanon. Er zijn 2 niveaus, de ondergrens (0 m) en de bovengrens (10 m). Al de responsies waar de niveaus op de onder- of bovengrens ingesteld zijn, zijn designpunten (afgekort DP). In tegenstelling tot designpunten zijn er ook centrumpunten (afgekort CP). Dit zijn de responsies waarvan alle niveaus in het midden liggen. In dit voorbeeld is dat dus op 5 m hoogte. Ook de soorten experimenten hebben een afkorting. Een experiment met 2

niveaus en 3 factoren met 3 centrumpunten heeft de afkorting “ $2^3$ -experiment met 3 CP”. Dit heeft ook te maken met het aantal verschillende testen er zijn bij een  $2^3$ -experiment, namelijk 8 (=  $2^3$ ).

Het voorbeeld van de vorige alinea heeft 2 niveaus per factor. Bij deze experimenten is de verwachting/voorwaarde dat het resultaat ongeveer lineair is. Het is dus belangrijk te controleren of het in werkelijkheid ook effectief lineair is. Dit is makkelijk te controleren als er centrumpunten zijn. Figuur 41 en Figuur 42 verduidelijken dit.

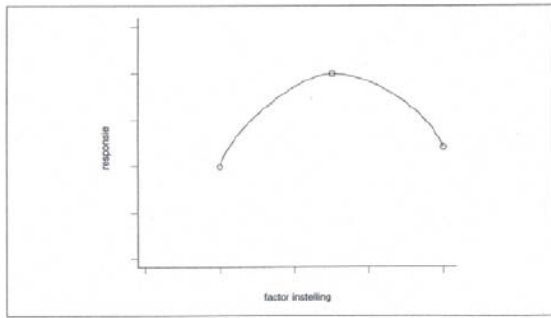


Figuur 41: lineaire benadering [36, p. 10]

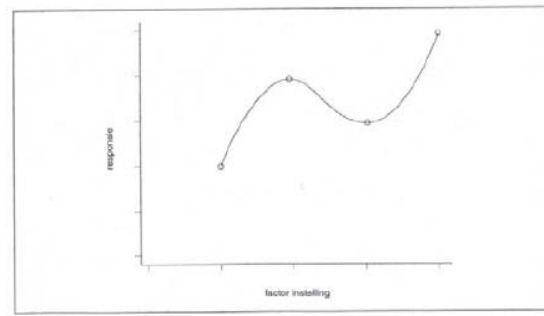


Figuur 42: geen goede lineaire benadering [36, p. 11]

Figuur 41 toont een heel goede benadering, ook al is het resultaat niet lineair. De afstand tussen de benadering en het resultaat in het midden van de grenzen is klein. In tegenstelling tot Figuur 42, in deze figuur is deze afstand veel te groot. Dit betekent dat de conclusies die genomen worden in geval van Figuur 42 een verkeerd beeld kunnen geven. Het is mogelijk om toch een accurate analyse te doen, maar dan zijn er meer niveaus nodig. Met 3 niveaus kan een kwadratisch effect gecontroleerd worden en met 4 niveaus een kubisch effect. Figuur 43 en Figuur 44 geven een voorbeeld van een schatting van dergelijke effecten.



Figuur 43: schatting van een kwadratisch effect [36, p. 9]



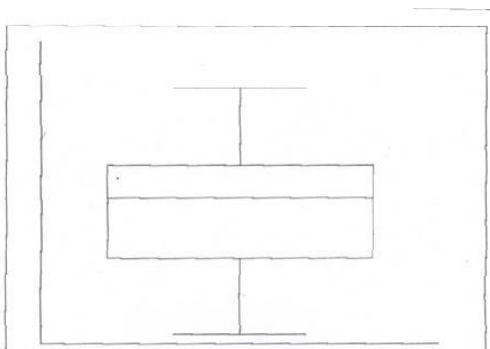
Figuur 44: schatting van een kubisch effect [36, p. 10]

In de masterthesis is er altijd uitgegaan van een lineair verband en dus is er steeds gebruik gemaakt van 2 niveaus. Het bepalen van deze niveaus volgt in een volgende sectie.

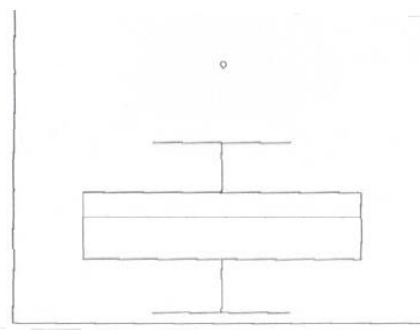
Verder bestaat de DoE-analyse uit 7 stappen. Deze stappen zijn:

1. Screening van de data,
2. Analyse van de respons,
  - 2.1. Toets op lineariteit
  - 2.2. Berekening van de effecten
3. Tabellen en grafieken van de effecten,
4. Opstellen van een responsfunctie,
5. Analyse van de residuen,
6. Bepalen van een acceptabele instelling en
7. verificatieproeven.

De eerste stap is de screening van de data en controleert op uitschieters. Uitschieters zijn waarden die ver weg liggen van de rest van de gemeten data. Dat kan wijzen op meetfouten, procesverstoringen, ... Er zijn 2 manieren om uitschieters op te sporen. Ten eerste op basis van de barcodegrafiek en ten tweede op basis van de boxplot. Voor deze masterproef is er gekozen voor de boxplot. Figuur 45 en Figuur 46 tonen een boxplot met en zonder een uitschieter.



Figuur 45: boxplot zonder uitschieter [36, p. 34]

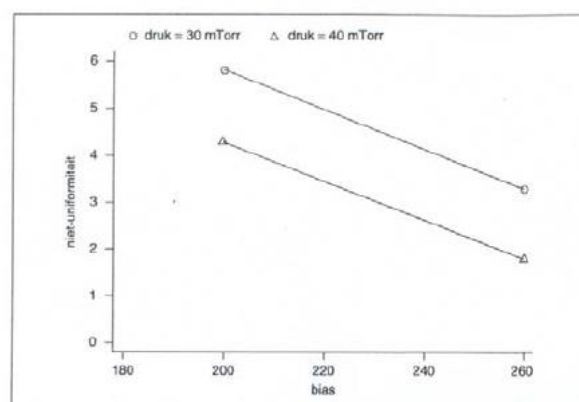


Figuur 46: boxplot met uitschieter [36, p. 35]

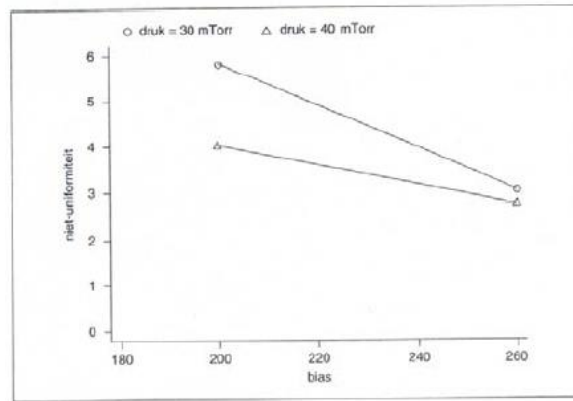
De belangrijkste waarden van de boxplot zijn de aangrenzende waarden omdat deze de goede waarden van de uitschieters onderscheidt. De oorzaak van uitschieter kan vanalles zijn. Er kan een meetfout gemaakt zijn of de respons is gewoon niet lineair binnen dat gebied. Hieruit volgt dan dat de conclusie over die waarden niet 100% te betrouwen is. Hier moet dan rekening mee gehouden worden bij de besluiten.

De tweede stap is de analyse van de respons. Deze stap bevat twee onderliggende stappen. Ten eerste de toets op lineariteit en ten tweede de berekening van de effecten. De toets op lineariteit komt eigenlijk neer op het principe dat getoond is in Figuur 41 en Figuur 42. Dat wil zeggen dat het gemiddelde van de designpunten ongeveer gelijk moet zijn aan het gemiddelde van de centripunten. Hiervoor is een f-test en een t-toets gebruikt (zie statistiek). De f-test bepaalt of er een t-toets met een gelijke of ongelijke variantie nodig is. Als de t-toets aangeeft dat de gemiddelden niet ongeveer gelijk zijn, dan is de voorwaarde voor het  $2^n$ -experiment niet voldaan. Dat betekent dat het geen zin heeft om de analyse verder te zetten aangezien de resultaten een verkeerd beeld geven. Het tweede onderdeel van deze stap is de berekening van het effect. De cursus die gebruikt is voor deze info is niet openbaar beschikbaar. Voor meer informatie over de berekeningen kan het internet geraadpleegd worden. Design of Experiments is een internationaal geaccepteerde analyse waardoor er voldoende ondersteuning te vinden is zoals [37]. De diepgaande info in de berekeningen biedt geen meerwaarde voor de masterproef. Het is voldoende te weten dat deze waarde via een lineaire regressie berekend kan worden.

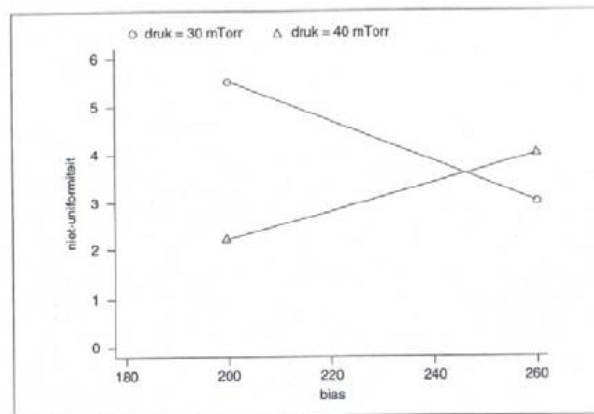
De derde stap zijn de tabellen en grafieken van de effecten. De tabellen hebben als doel de significante factoren te bepalen. De controle met de p-waarde is één mogelijkheid. Daarnaast kan er ook gewerkt worden met de kwadratensommen. Ook hierover is er veel te vinden op het internet. De significante factoren komen voor in de responsfunctie van stap 4. De grafieken geven een visueel overzicht van de effecten en wat de interactie tussen twee factoren is. Een interactie tussen twee factoren betekent dat die twee factoren afhankelijk zijn van elkaar. Als één factor verandert, verandert ook het effect van de andere factor. Figuur 47, Figuur 48 en Figuur 49 geven de drie mogelijkheden van een interactie tussen 2 factoren. In dit voorbeeld gaat het om de bias en de druk met de responsie op de verticale as.



Figuur 47: geen interactie tussen de factoren [36, p. 17]



Figuur 48: zwakke interactie tussen de factoren [36, p. 17]

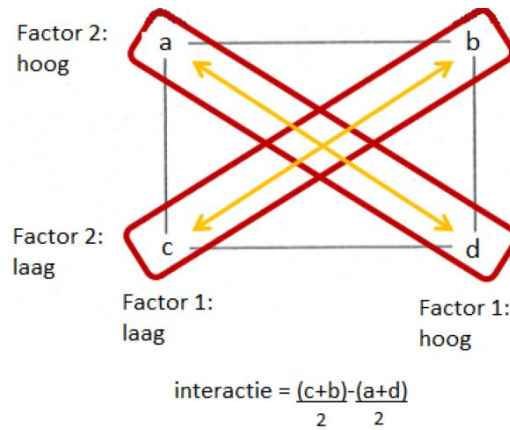


Figuur 49: sterke interactie tussen de factoren [36, p. 17]

Enkel bij Figuur 48 of Figuur 49 is er een interactie omdat de lijnen vroeg of laat elkaar snijden. Als er een interactie is, is de ene factor afhankelijk van een andere. Bij Figuur 47 is er geen interactie, bij Figuur 48 is er een zwakke interactie en bij Figuur 49 is er een sterke interactie. Uit Figuur 49 blijkt dat de respons daalt bij een lage druk en een stijging in bias. Als de druk hoog is, dan stijgt de respons. Het effect van een verandering in bias hangt dus af van de druk. Door in de analyse rekening te houden met interacties, is er meer inzicht in het proces verkregen en worden deze effecten niet over het hoofd gezien. Bij factor-voor-factor experimenten zouden deze interacties niet zichtbaar zijn en kunnen fouten niet vermeden worden. Dit zijn experimenten waar 1 factor verandert terwijl de andere allemaal constant blijven.

Hierna komt het opstellen van de responsfunctie. Enkel de effecten die in de vorige stappen als significant zijn beschouwd, worden opgenomen in de responsfunctie. Deze functie is een lineaire functie. Daarom was het belangrijk zeker te zijn dat het verband ongeveer lineair is. Formule 3 geeft weer hoe deze functie opgesteld wordt. Wanneer het niveau van een van de effecten op het laagste niveau is ingesteld, dan moet er een min worden toegevoegd voor de effecten in de formule. Deze functie kan dan voorspellen welke respons er komt bij bepaalde instellingen. Het hoofdeffect kan berekend worden door de respons van de ondergrens van de respons van de bovengrens af te trekken. Figuur 50 toont hoe een interactie berekend kan worden. De letters a tot en met d stellen de respons voor.

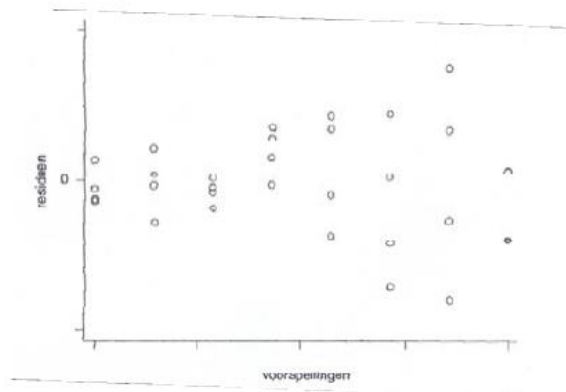




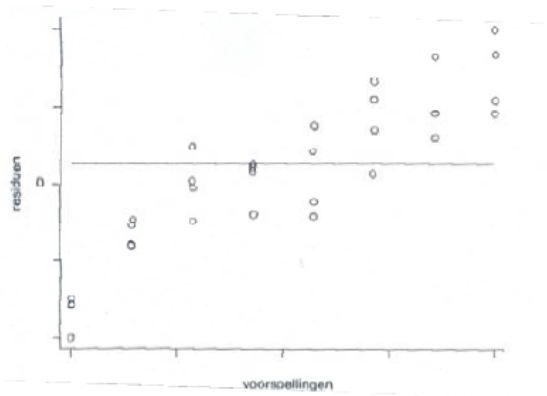
*Figuur 50: berekening van een interactie*

$$\text{Respons} = \text{gemiddelde} + \text{hoofdeffecten}/2 + \text{interacties}/2 \quad (3)$$

De volgende stap is de analyse van de residuen. Deze stap is een controle van de betrouwbaarheid van de responsfunctie. Een residu is het verschil tussen de respons die gemeten is en de voorspelling ervan. Er zijn verschillende manieren om dit te bepalen. Een van die manieren is een spreidingsdiagram van de residuen ten opzichte van de voorspelling, zoals weergegeven in Figuur 51 en Figuur 52.



*Figuur 51: goede samenhang tussen voorspellingen en de metingen [36, p. 38]*



*Figuur 52: belangrijk effect niet meegenomen in het model [36, p. 38]*

Bij Figuur 51 is er geen verband tussen de meetresultaten en de voorspellingen want de residuen staan willekeurig op de plot. Op Figuur 52 is er wel duidelijk een verband te zien. Dit betekent dat er een belangrijk effect niet is meegenomen. Er zijn ook nog andere manieren om dit te testen. Een van die andere manieren is de trendplot van de residuen. Dit heeft te maken met de volgorde waarin de experimenten zijn uitgevoerd. Daarnaast kan het ook met een barcodegrafiek of een histogram van de residuen.

De laatste twee stappen zijn niet heel belangrijk voor deze masterproef. Het bepalen van een acceptabele instelling is bedoeld voor processen waar een bepaald resultaat nodig is. Bijvoorbeeld als de reactietijd de respons is. Dan kan met de functie van stap 4 de juiste instelling bepaald worden zodat de reactiesnelheid op de gewenste respons uitkomt. Stap 7 is de controle op die instelling.

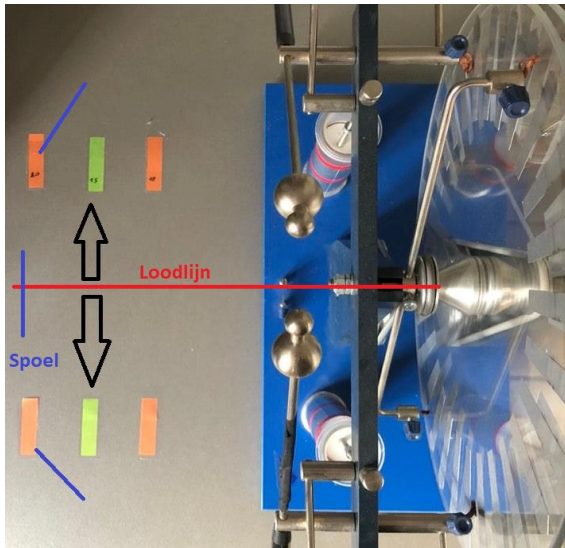
### 3.2. Parameters en grenzen

Om testen te kunnen uitvoeren zijn er parameters en grenzen nodig. Het is geen makkelijk of duidelijk proces. Veel testen uitvoeren voor een goede inschatting is dus de boodschap. Dit onderdeel beschrijft hoe dit is aangepakt.

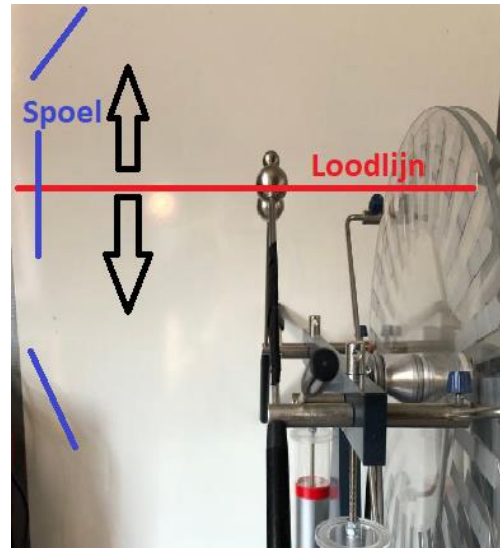
#### 3.2.1. Bepaling parameters

Door middel van brainstorming na de literatuurstudie en enkele metingen was het mogelijk een aantal parameters te bepalen. Belangrijk bij het bepalen van een parameter is dat het makkelijk controleerbaar en definieerbaar is. Definieerbaar slaat op de grenzen die daarna bepaald worden. Bijvoorbeeld een spoel met 65 windingen of met 90 windingen. Een mogelijke parameter was de oriëntatie van de spoel. Dit is een parameter die invloed zou kunnen hebben, maar moeilijk is om te controleren en definiëren. De hoek t.o.v. de vonk is hier belangrijk, maar is moeilijk te meten. Ook de afstand t.o.v. de loodlijn behoort bij de oriëntatie. Dit is makkelijk aan te passen en te

meten, maar hierdoor kan de hoek wijzigen afhankelijk van de gekozen referentie. De keuze van het referentiepunt is dus cruciaal. Figuur 53 en Figuur 54 verduidelijken de mogelijkheden in verband met de oriëntatie. Uit dit voorbeeld blijkt dat het niet altijd makkelijk is aan beide voorwaarden te voldoen van een goede parameter voor de DoE-analyse. Hierdoor is besloten de oriëntatie niet mee te nemen als parameter. Alle testen zijn uitgevoerd met de spoel loodrecht op de loodlijn. Dit wil zeggen dat de loodlijn door het midden van de spoel gaat en dus geen windingen snijdt.



Figuur 53: Oriëntatie spoel 1 (bovenaanzicht)



Figuur 54: oriëntatie/hogte spoel (zijaanzicht)

Na het brainstormen zijn er 5 parameters bepaald terwijl er rekening gehouden is met de 2 voorwaarden.

- De eerste parameter is het aantal windingen van de spoel. De verwachting bij meerdere windingen is dat de geïnduceerde spanning groter is en dus de LED meer zal aangaan.
- De tweede is de diameter van de spoel. Deze parameter heeft invloed op de oppervlakte die de spoel beslaat. Een grotere spoel vangt dan meer van de elektromagnetische golven op. Daarom wordt er verwacht dat een grotere spoel de LED vaker doet aangaan.
- De derde parameter is de luchtvochtigheid. Bij een hogere luchtvochtigheid zou de vonk sneller kunnen overslaan en daardoor minder sterk zijn. Dit zou betekenen dat de LED minder snel moet aangaan bij hogere luchtvochtigheid.
- Vervolgens is er ook nog de afstand tussen de ontladingsbollen. Hoe groter de afstand, hoe moeilijker de vonk overslaat en dus sterker is. Dit is het omgekeerde principe van de vorige parameter. De LED moet dus meer aangaan bij een grotere afstand.
- Tot slot is er ook nog de afstand tussen de vonk en de spoel. Hoe groter de afstand, hoe meer de elektromagnetische golven afzwakken. Daarom wordt verwacht dat de LED minder zal aangaan bij een grotere afstand.

Het is ook belangrijk de link met de praktijk te leggen tijdens deze testen. Voor de eerste parameter geldt dan dat de elektronica met meer of langere bedrading gevoeliger is voor de vonk. Als er geweten is welke apparaten het gevoeligste zijn, kunnen deze als eerste beschermd worden. Deze link geldt ook voor de grootte van de spoel. Bij de luchtvochtigheid zou er dan opgelet moeten worden op bijvoorbeeld regenachtige dagen. Hier moet wel opgemerkt worden dat de luchtvochtigheidssensor (TechnoLine WL 1030) geen professionele sensor is en dat er geen klimatiseringskamer is gebruikt tijdens de testen. Er zal dus voorzichtig omgegaan moeten worden met de conclusies met betrekking tot de luchtvochtigheid. In de praktijk is de luchtvochtigheid ook niet te handhaven. Verder is er de afstand tussen de ontladingsbollen. Dit is in de praktijk niet te bepalen, omdat dit elke keer anders kan zijn. Een link leggen is dan ook moeilijk. Tot slot is er de afstand tot de spoel. Daarnaast kan deze afstand ook als bescherming dienen als de verwachting klopt.

### 3.2.2. Bepaling Grenzen

Om de grenzen op een gestructureerde manier te bepalen, zijn eerst de maxima en minima gezocht. Dit geeft al een gebied waarin de grenzen kunnen liggen. Hierna kunnen de grenzen van de parameters die gemakkelijk te bepalen zijn eerst vast gelegd worden. De andere grenzen zijn dan afhankelijk van de reeds bepaalde grenzen. Om deze grenzen te bepalen is er een meer empirische methode gebruikt. Dit onderdeel bespreekt nu parameter voor parameter de bepaling van de grenzen.

De eerste parameter is de afstand tussen de ontladingsbollen. Het maximum en minimum hangt af van hoe ver de ontladingsbollen van elkaar gezet kunnen worden. Het minimum is uiteraard 0 cm, maar dit is niet praktisch. Een aantal testen met de Wimshurstgenerator voor verschillende afstanden tussen de afstandsballen toonde al snel aan dat bij 6 cm heel snel gedraaid moest worden om een vonk te maken. Hieruit volgt dat het maximum op 5,5 cm is gezet. Dit maximum is dan ook vast gezet als de bovengrens. Dan is er nog een ondergrens nodig. Uit die verschillende testen volgde dat 1 cm een goede optie is. Als 1 cm de ondergrens is, is het centrumpunt moeilijk in te stellen aangezien dit 3,75 cm zou zijn. Omwille van deze reden is er geopteerd om de grenzen en het centrumpunt op 1,5 cm, 3,5 cm en 5,5 cm te leggen.

Door de voorgaande masterthesis was er al een proefopstelling en dus ook al een spoel. Om het simpel te houden en een referentiepunt te hebben, is besloten deze spoel te behouden. Hierdoor lag één van de grenzen van onder andere het aantal windingen al vast, namelijk 65 windingen. Na deze beslissing zijn ook weer testen uitgevoerd om uit te zoeken tot welke afstand deze spoel de storing kan opvangen. Uit deze testen kon geconcludeerd worden dat die afstand relatief klein was. Dit is dan ook de reden om 65 windingen als ondergrens te kiezen. Omdat er geen beperkingen waren voor het aantal windingen was er gekozen voor een verdubbeling. Dit zou als gevolg hebben dat het centrumpunt een halve winding zou hebben. Dat is heel moeilijk om te maken. Daarom is de bovengrens aangepast naar 125 windingen. Hieruit volgt dat het centrumpunt 95 windingen bevat.

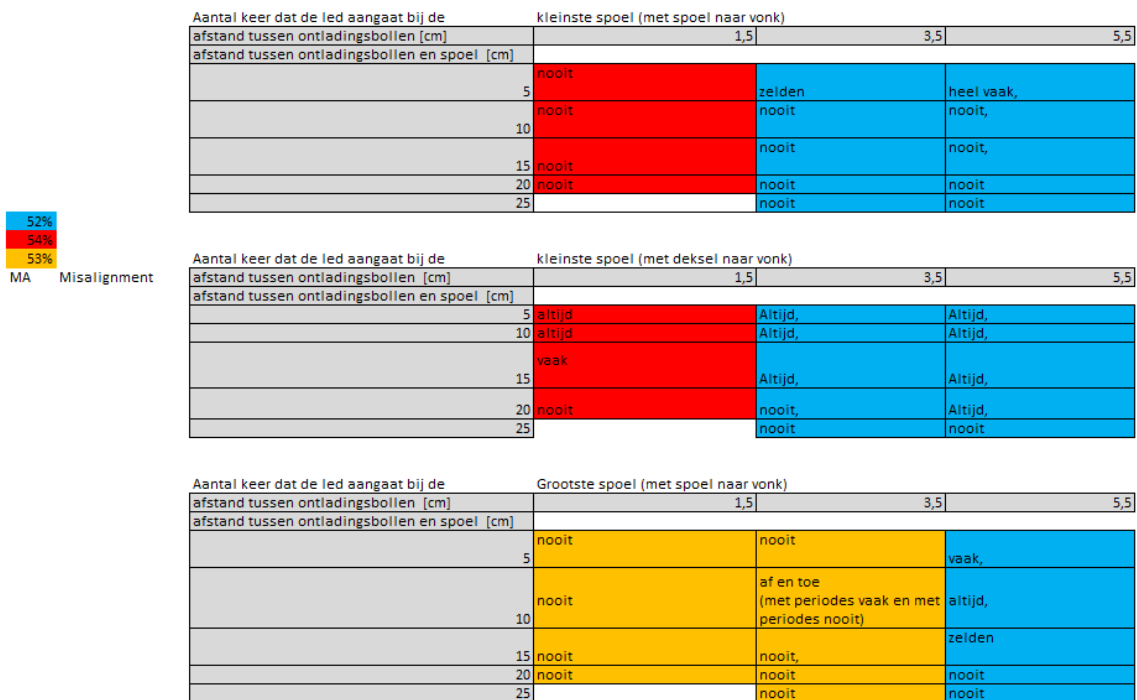
Ook de diameter van de spoel kon overgenomen worden van de voorgaande masterthesis. Omwille van dezelfde reden als bij het aantal windingen is 5,5 cm als ondergrens genomen. Vervolgens zijn hier ook geen beperkingen in het maximum. Een verdubbeling zou dus kunnen, maar zou niet meer goed handelbaar zijn tijdens de testen. Daarom is gekozen voor 8,5 cm als bovengrens zodat het centrumpunt 7,16 cm betreft. Dit is niet makkelijk in te stellen en ook niet het midden tussen de onder en bovengrens. Waarom dan deze waarde? Het gaat niet om de diameter van de spoel, maar om de oppervlakte die de spoel omvat. De oppervlakte van het centrumpunt is dan 161 cm<sup>2</sup>. Dit ligt net in het midden van 95 cm<sup>2</sup> en 227 cm<sup>2</sup>.

De luchtvochtigheid is geen simpele parameter en is ook niet echt te handhaven aangezien er geen klimatiseringsruimte ter beschikking is. Volgens Philips [38] is de ideale luchtvochtigheid tussen 40 en 60 %. De grenzen kunnen dus best hiertussen liggen. Om te controleren hoe dit in de ruimte is waar al het materiaal staat, is een vochtigheidsmeter gebruikt. Na enkele dagen op regelmatige basis vaststellingen te doen omtrent de vochtigheid, kan besloten worden dat de luchtvochtigheid tussen die waarden schommelt. Hierdoor is besloten om de grenzen/niveaus te leggen op 45 %, 50 % en 55 % en elke grens mag  $\pm 1$  % afwijken tijdens de testen. Aangezien er geen klimatiseringskamer beschikbaar is, hangen de testen af van de omgeving op dat moment. Door een venster open te zetten of een waterkoker te gebruiken is die omgeving wel te beïnvloeden.

Tot slot is er ook nog de afstand van de ontladingsbollen tot de spoel. Deze is sterk afhankelijk van de andere parameters. Om het maximum of de grenzen te zoeken is dus een gestructureerde aanpak nodig tijdens het uitvoeren van een aantal testen. Voor deze testen zijn er verschillende afstanden vastgelegd. Bij elke afstand zijn bij de omstandigheden zoals de spoel en de luchtvochtigheid testen gedaan en vervolgens bijgehouden hoe vaak de led aangaat. Het resultaat van deze testen is niet nauwkeurig omdat het aantal in woorden is uitgedrukt, bijvoorbeeld vaak. Daarnaast is de spoel met de hand vastgehouden en dus is de afstand tijdens de testen niet exact hetzelfde. Hier is de nauwkeurigheid nog niet belangrijk aangezien er slechts een goede inschatting nodig is. Figuur 55 toont een voorbeeld van hoe deze grens<sup>2</sup> bepaald is.

---

<sup>2</sup> Alle resultaten van de grensbepaling zijn te vinden in bijlage B.



Figuur 55: Voorbeeld grensbepaling

Figuur 55 duidt aan dat alle andere parameters zijn meegenomen. De afstand tussen de ontladingsbollen staat bovenaan in de tabellen, de afstand tot de spoel naast de tabellen, de luchtvochtigheid in kleur en tenslotte een tabel per soort spoel. Hierbij is belangrijk op te merken dat het aantal keer dat de LED aangaat niet bij alle omstandigheden of spoelen is uitgetest. Er zijn wel voldoende testen gedaan om een grens te kunnen bepalen.

Daarnaast is een deel van de oriëntatie van de spoel wel meegenomen. Zo zijn er metingen met het deksel naar de vonk gericht en metingen met de spoel naar de vonk gericht. Figuur 9 toont het deksel links op de figuur en de spoel rechts. Deze verschillende oriëntaties geven andere resultaten. Dit verschil is in 90 % van de gevallen heel groot. Bij de ene oriëntatie gaat de LED altijd aan en met de andere oriëntatie gaat diezelfde LED niet meer aan. Dit is voorlopig onverklaarbaar met de huidige kennis en ervaring. Een mogelijke verklaring zou de opto-coupler kunnen zijn. Deze bestaat uit een diode (LED) en een schakelaar. Een diode laat de stroom maar in één richting door. De oriëntatie heeft dus waarschijnlijk invloed op de richting van de geïnduceerde stroom waardoor de opto-coupler altijd of nooit schakelt. De testen worden ook altijd gedaan met de spoel recht voor de vonk zoals uitgelegd in 3.2.1.

Tijdens dit onderzoek is ontdekt dat als de spoel er niet recht voor staat er andere resultaten kunnen uitkomen. De oriëntatie van de spoel is dus wel een interessante parameter. Dit kan nog verder onderzocht worden in een later stadium.

Hieruit volgt dat er 5 factoren zijn met 2 niveaus. Om DoE te kunnen toepassen, is er dus een 2<sup>5</sup>-experiment nodig. Dit heeft als gevolg dat er 32 verschillende testsituaties zijn. Figuur 56 stelt deze verschillende testsituaties voor. Voor elke situatie is er een combinatie van 1'en en -1'en. Die verwijzen naar het niveau van die factor. De ondergrens is gelijk aan -1 en de bovengrens aan 1. Figuur 57 geeft een overzicht van deze verschillende instellingen.

	1	2	3	4	5
run	Afstand tussen ontladingsbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel
1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1
7	-1	1	1	-1	-1
8	1	1	1	-1	-1
9	-1	-1	-1	1	-1
10	1	-1	-1	1	-1
11	-1	1	-1	1	-1
12	1	1	-1	1	-1
13	-1	-1	1	1	-1
14	1	-1	1	1	-1
15	-1	1	1	1	-1
16	1	1	1	1	-1
17	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	-1	1
20	1	1	-1	-1	1
21	-1	-1	1	-1	1
22	1	-1	1	-1	1
23	-1	1	1	-1	1
24	1	1	1	-1	1
25	-1	-1	-1	1	1
26	1	-1	-1	1	1
27	-1	1	-1	1	1
28	1	1	-1	1	1
29	-1	-1	1	1	1
30	1	-1	1	1	1
31	-1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1

Figuur 56: De verschillende testsituaties

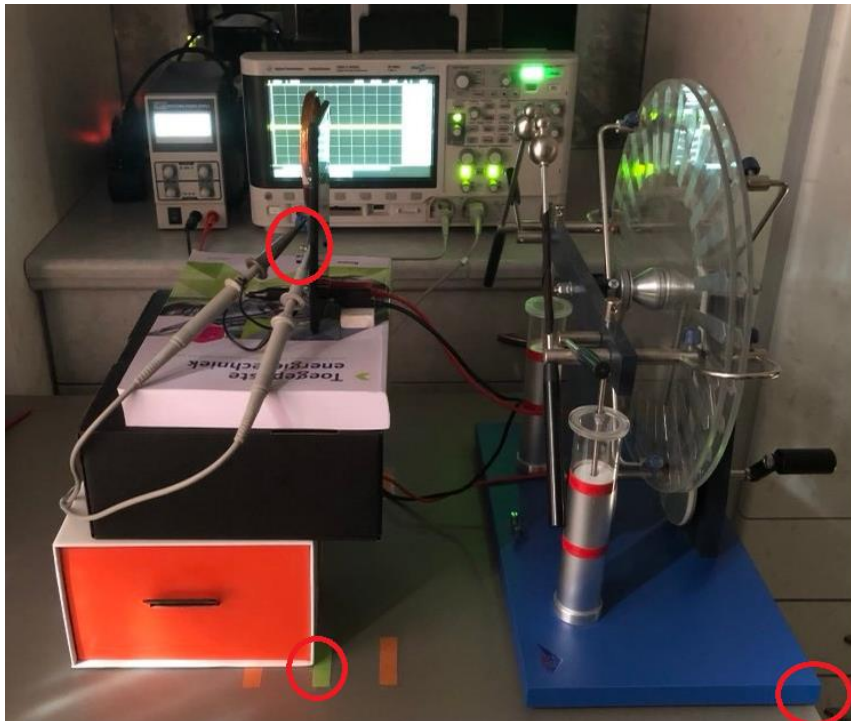
			oppervlakte spoel [cm <sup>2</sup> ] (95; 161; 227)		
	Afstand tussen ontladingsbollen [cm]	aantal windingen [/]	diameter [cm]	luchtvochtigheid [% ± 1%]	afstand tot spoel [cm]
laag (-1)	1,5	65	5,5	45	10
CP (0)	3,5	95	7,16	50	15
Hoog (1)	5,5	125	8,5	55	20

Figuur 57: overzicht instellingen

### 3.3. Testprocedure

De inleiding gaf al een kleine uitleg over het materiaal en de methode van de masterproef. Hoe één test exact verloopt, is nog niet besproken. Deze sectie gaat hier dieper op in.

Voor deze masterproef zijn er 32 testsituaties met 5 verschillende factoren. Daarnaast zijn er ook nog enkele standaardinstellingen zoals de hoogte van de spoel. Figuur 58 toont hoe een opstelling van een CP eruitziet. De hoogte van de spoel blijft altijd hetzelfde in de testen. De oriëntatie van de spoel is wel een aantal keer gewijzigd om te zien wat het effect is. Zo bleek uit het bepalen van de grenzen dat er een verschil is in deze oriëntaties. Vaak bleek dat als de opstelling goed werkte met het deksel naar de vonk gericht (zoals nu op Figuur 58 te zien is), dat de opstelling niet goed werkt met de spoel naar de vonk of andersom.



*Figuur 58: opstelling van een CP*

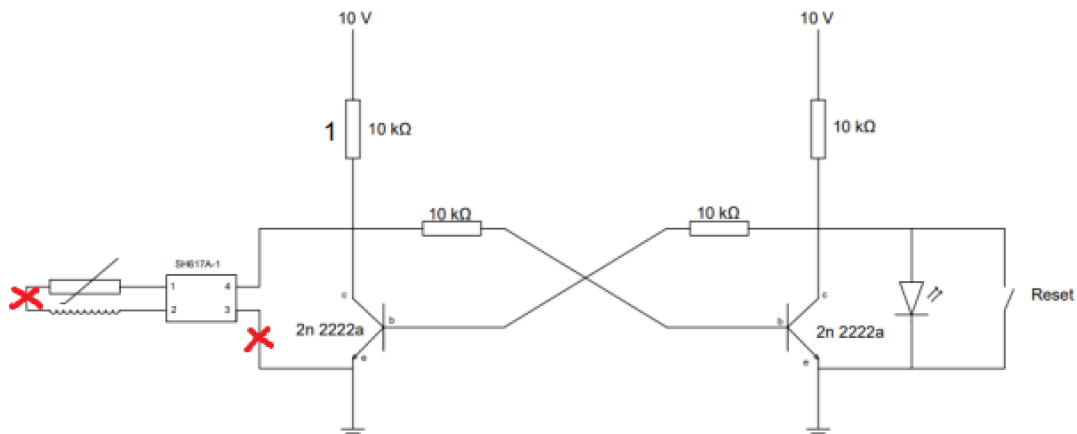
Op Figuur 58 zijn een aantal rode cirkels te zien. De cirkel rechtsonder laat zien dat de Wimshurstgenerator gelijk staat met het einde van de tafel. Dit maakt het mogelijk de testen elke keer opnieuw op dezelfde manier uit te voeren. De tweede cirkel onderaan laat enkele markeringen zien waar de spoel gelijk mee gezet moet worden. De gele markering is voor het centrumpunt de andere twee voor de onder- en bovengrens. Door deze markeringen was het niet nodig deze afstand elke keer opnieuw te meten. De afstand tussen de ontladingsbollen daarentegen, moest bij wijziging wel telkens gemeten worden. De verschillende spoelen zijn op voorhand gemaakt, dus deze hadden ook geen controle nodig bij een wijziging. De luchtvochtigheid is constant gemeten door een luchtvochtigheidsmeter (TechnoLine WL 1030).



Naast het aantal keer dat de LED is aangegaan, is ook de geïnduceerde spanning gemeten als een tweede responsie. Om de geïnduceerde spanning te kunnen aflezen, zijn de instellingen van de oscilloscoop wel belangrijk om zo op het juiste moment te kunnen triggeren. De derde en laatste cirkel verwijst naar hoe de geïnduceerde spanning gemeten is en hoe de probes bevestigd zijn. Voor deze metingen is een oscilloscoop gebruikt van Agilent technologies van producttype DSO-X 2002A. Als DC-bron is een bron van Velleman van producttype LABPS6005SM gebruikt. Het is ook belangrijk dat de massa van de bron en de oscilloscoop met elkaar verbonden zijn. Figuur 59 toont deze toestellen. Figuur 60 toont waar de probes bevestigd zijn in een elektrisch schema.



Figuur 59: DC-bron en oscilloscoop



Figuur 60: plaats van de probes [5, p. 30]

De probe links op Figuur 60 is de probe die de geïnduceerde spanning meet in de spoel. Het doel van de andere probe is om beter te kunnen triggeren. De geïnduceerde spanning is moeilijk te voorspellen waardoor een goed instelling van de oscilloscoop ook moeilijk te vinden is. De spanning aan de andere kant van de opto-coupler is volgens eerste verwachtingen constant na het schakelen. Daarom werd er getriggerd op een stijgende flank die boven de 1 V uitkwam. Na

enkele metingen bleek dat deze spanning helemaal niet constant was. Hierdoor triggerde de spoel niet goed. Figuur 61 toont een voorbeeld van de gemeten spanningen. De gele spanning is de geïnduceerde spanning en de groene is de spanning na de opto-coupler. Deze is duidelijk niet constant en volgt grosso modo het gedrag van de geïnduceerde spanning. Hierdoor is de instelling aangepast naar een trigger op een pulse van 1 V in amplitude gedurende 25 ns. De gevoeligheid is aanpasbaar door de tijd of amplitude te veranderen. Met deze instelling verliepen de testen vlot. Na bijna elke vonk volgde een trigger.



*Figuur 61: voorbeeld van een gemeten signaal*

Als alles klaar staat, kan de test beginnen. De test is in dit geval heel kort. Het doel is een vonk te creëren door aan de Wimshurstgenerator te draaien. Vervolgens triggert de oscilloscoop en kan het resultaat genoteerd worden. De geïnduceerde spanning staat rechts op het scherm van de oscilloscoop zoals te zien is op Figuur 61. De geïnduceerde spanning en het aantal keer dat de LED is aangegaan is wel apart gemeten. De oscilloscoop beïnvloed namelijk het systeem bij het meten waardoor het aantal keer dat het ledje aangaat minder betrouwbaar is.



## 4. Analyse en bespreking van de resultaten

### 4.1. Analyse voor het aantal keer dat het ledje aangaat

In de inleiding zijn drie stappen besproken die nodig zijn om deze masterproef tot een goed einde te brengen. De eerste stap is het bouwen van een testopstelling die consistent reageert bij gelijkblijvende omstandigheden. Om dit te kunnen doen, is het belangrijk te weten waar het inconsistente gedrag precies voorkomt. Hiervoor zijn enkele testen nodig en kan DoE ondersteuning bieden. Het consistent maken en analyseren is dus een iteratief proces. Figuur 62 toont de testen bij een hoge luchtvochtigheid.

run	Afstand tussen ontladingsbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel	uitkomst		
						4/feb	6/feb	11/feb
9	-1	-1	-1	1	-1	100	100	
10	1	-1	-1	1	-1	100	100	
11	-1	1	-1	1	-1		0	0
12	1	1	-1	1	-1		18	1
13	-1	-1	1	1	-1	100	100	
14	1	-1	1	1	-1	100	100	
15	-1	1	1	1	-1	0	0	
16	1	1	1	1	-1	0	0	
25	-1	-1	-1	1	1	0	0	
26	1	-1	-1	1	1	100	100	
27	-1	1	-1	1	1		0	0
28	1	1	-1	1	1		0	0
29	-1	-1	1	1	1	0	0	
30	1	-1	1	1	1	100	100	
31	-1	1	1	1	1	0	0	
32	1	1	1	1	1	0	0	

*Figuur 62: testen op hoge luchtvochtigheid*

Hieruit blijkt dat er geen inconsistent gedrag waar te nemen is bij dezelfde omstandigheden. Voor elke run zijn er 100 testen uitgevoerd. De responsie is het aantal keer dat de LED is aangegaan. Uit Figuur 62 blijkt dat er al zes situaties geschikt zijn om de ferrietkernen te testen, want deze situaties hebben elke keer een responsie van 100. De verwachting was dat de testopstelling inconsistent zou zijn. Deze inschatting was fout omdat de testen om een globaal beeld over de testopstelling te krijgen snel en onnauwkeurig zijn uitgevoerd. Op die momenten stond de spoel niet vast, maar werd deze vastgehouden. Hierdoor kan de afstand tussen de spoel en de ontladingsbollen veranderen tussen elke test. Uit de analyse die verder in dit verslag staat geschreven, blijkt ook dat deze afstand een grote invloed heeft op het resultaat. Daarnaast zijn de responsies bij een lage luchtvochtigheid ook consistent<sup>3</sup>. Verder is het ook belangrijk om op te merken dat de spoelen in het begin niet goed werkten. Dit kwam doordat de koperdraad die gebruikt is een laklaag heeft. Deze moet eerst verwijderd worden bij de contacten van het elektrische circuit (zie Figuur 9).

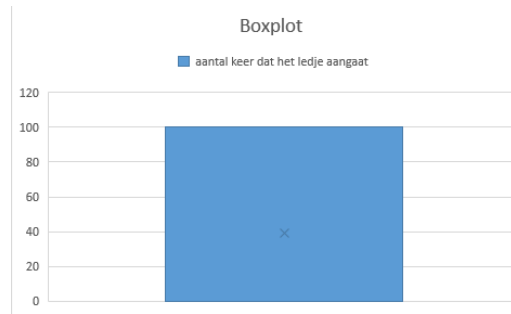
<sup>3</sup> Alle resultaten met betrekking tot de consistentie staan in bijlage C.

Nu dat er een consistent systeem is, kan stap 2 starten. De tweede stap is de analyse van deze metingen zodat er meer inzicht is over het systeem en zijn parameters. Deze analyse is de “Design of Experiments” methode die beschreven is in sectie 3.1 DoE-analyse. Figuur 63 geeft het overzicht van de responsies die gebruikt zijn.

run	Afstand tussen ontladingsbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel	uitkomst
1	-1	-1	-1	-1	-1	100
2	1	-1	-1	-1	-1	100
3	-1	1	-1	-1	-1	0
4	1	1	-1	-1	-1	30
5	-1	-1	1	-1	-1	100
6	1	-1	1	-1	-1	100
7	-1	1	1	-1	-1	0
8	1	1	1	-1	-1	0
9	-1	-1	-1	1	-1	100
10	1	-1	-1	1	-1	100
11	-1	1	-1	1	-1	0
12	1	1	-1	1	-1	18
13	-1	-1	1	1	-1	100
14	1	-1	1	1	-1	100
15	-1	1	1	1	-1	0
16	1	1	1	1	-1	0
17	-1	-1	-1	-1	1	0
18	1	-1	-1	-1	1	100
19	-1	1	-1	-1	1	0
20	1	1	-1	-1	1	0
21	-1	-1	1	-1	1	0
22	1	-1	1	-1	1	100
23	-1	1	1	-1	1	0
24	1	1	1	-1	1	0
25	-1	-1	-1	1	1	0
26	1	-1	-1	1	1	100
27	-1	1	-1	1	1	0
28	1	1	-1	1	1	0
29	-1	-1	1	1	1	0
30	1	-1	1	1	1	100
31	-1	1	1	1	1	0
32	1	1	1	1	1	0
33	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0

*Figuur 63: overzicht van responsies bij aantal keer dat het ledje aangaat*

Hier valt op dat er heel vaak 100 of 0 gescoord is. Dit is geen normaal verdeeld resultaat. Het is dus niet zeker dat de analyse met deze waarden mogelijk is. In sectie 3.1 staan de 7 stappen van een DoE-analyse waarvan de eerste twee stappen controleren of resultaat betrouwbaar is. De eerste daarvan is een screening van de responsies om uitschieters te identificeren. Een van de manieren was het maken van een boxplot. De tweede stap was kijken naar de lineariteit. Dit was een voorwaarde voor een  $2^5$ -experiment. Figuur 64 toont de boxplot van deze responsies.



Figuur 64: Boxplot over aantal keer dat de LED aangaat

Dit is geen goed resultaat. Figuur 64 lijkt niet eens op een boxplot zoals Figuur 45. Voor de controle op lineariteit is er een f-test en een t-test nodig. Deze zijn uitgevoerd met de standaardfunctie in Excell. Eerst wordt de f-test gedaan, die bepaalt of de varianties gelijk of ongelijk zijn. Dit is belangrijk omdat er 2 soorten t-testen zijn. Eentje voor gelijke varianties en eentje voor ongelijke varianties. Figuur 65 toont de procedure voor de controle op lineariteit voor de responsies van het aantal keer dat de LED aangaat.

Procedure:		
<b>1. Nagaan of varianties verschillen m.b.v. f-test</b>		
F-toets: twee steekproeven voor varianties		
	<i>DP</i>	<i>CP</i>
Gemiddelde	37,03225806	0
Variantie	2290,365591	0
Waarnemingen	31	2
Vrijheidsgraden	30	1
F	65535	
P(F<=f) eenzijdig	#DELING.DOOR.0!	
Kritisch gebied van F-toets: eenzijdig	250,0951482	
Conclusie: De hypothese is of de varianties gelijk zijn. Aangezien de p-waarde < 0,05 kan deze hypothese verworpen worden. Er moet een t-test met ongelijke varianties uitgevoerd worden		
<b>2. t-test met ongelijke varianties</b>		
T-toets: twee steekproeven met ongelijke varianties		
	<i>Variabele 1</i>	<i>Variabele 2</i>
Gemiddelde	39	0
Variantie	2340,387097	0
Waarnemingen	32	3
Schatting van verschil tussen gemiddelden	0	
Vrijheidsgraden	31	
T- statistische gegevens	4,560324518	
P(T<=t) eenzijdig	3,77093E-05	
Kritiek gebied van T-toets: eenzijdig	1,695518783	
P(T<=t) tweezijdig	7,54186E-05	
Kritiek gebied van T-toets: tweezijdig	2,039513446	
nulhypothese: het gemiddelde van de CP is gelijk aan het gemiddelde van de DP → $\mu_{CP} = \mu_{DP}$ Aangezien de P-waarde kleiner is dan 0.05, klopt de nulhypothese niet $\mu_{CP} = \mu_{DP}$ → <b>NIET OK!</b>		

Figuur 65: controle op lineariteit

Ook hier is een slecht resultaat waar te nemen. De f-test geeft een fout voor delen door nul en bij de t-test moet de hypothese verworpen worden. Kortom een analyse met de responsies voor het aantal keer dat de LED aangaat is niet mogelijk met twee niveaus. Extra niveaus maken het mogelijk om kwadratische of kubische verbanden te analyseren. Doordat er ook vaak 100 en 0 voorkomt in deze responsies is een andere responsie nodig om te evalueren, namelijk de geïnduceerde spanning in de spoel.

## 4.2. Analyse voor de geïnduceerde spanning

Een nieuwe responsie betekent ook opnieuw starten met de analyse. Ten eerste is een testopstelling nodig die consistent reageert bij gelijkblijvende omstandigheden. Deze testen duren iets langer en daarom zijn niet alle situaties opnieuw gecontroleerd op consistent gedrag. Er zijn wel voldoende testen gedaan om een betrouwbaar besluit te kunnen nemen. Een test voor de geïnduceerde spanning bestaat uit 10 metingen waarvan het gemiddelde genomen wordt. Figuur 66 toont enkele responsies<sup>4</sup>.

run							Geïnduceerde spanning								
	1	2	3	4	5	uitkomst	responsie	eenheid	datum	responsie	eenheid	datum	responsie	eenheid	datum
	Afstand tussen ontladingsbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel										
1	-1	-1	-1	-1	-1	100	320,9	mV	19/feb	1,2	V	12/mrt	352,0	mV	12/mrt
2	1	-1	-1	-1	-1	100	706,0	mV	27/feb	1,4	V	12/mrt	530,0	mV	12/mrt
3	-1	1	-1	-1	-1	0	349,8	mV	2/mrt	698,0	mV	12/mrt			
4	1	1	-1	-1	-1	30	273,6	mV	2/mrt	992,0	mV	12/mrt	366,0	mV	12/mrt
5	-1	-1	1	-1	-1	100	884,0	mV	27/feb	684,0	mV	12/mrt	534,0	mV	12/mrt
6	1	-1	1	-1	-1	100	793,7	mV	27/feb	841,1	mV	14/mrt			

Figuur 66: controle op consistent gedrag voor geïnduceerde spanning

Voor deze voorbeelden is er minstens 1 herhaling. Hieruit is vast te stellen dat het niet helemaal consistent is. Bijvoorbeeld bij run 6 en run 1 poging 1 en 3 is er wel consistent gedrag. Bij run 1 poging 1 en 2 en run 3 is er geen consistent gedrag. Het is wel moeilijk te bepalen wat de variantie is van een bepaalde situatie. Daarnaast zijn er ook enkele waarden in het vet aangeduid. Deze waarde wijken hard af met de vorige waarde. Er is hier ook geen verklaring voor. Daarom zijn deze extreme waarden zijn niet meegenomen in de analyse. Om een betrouwbare analyse uit te voeren, is er een consistent systeem nodig. Dit is niet echt het geval, maar het doel van deze analyse in deze masterproef is om een goede inschatting te krijgen. Daarnaast is EMC vanzelf niet consistent in de praktijk. Het is dus niet nodig om heel exact en consistent te werk te gaan.

Daarom is besloten een grote variantie te accepteren en de extreme waarden niet mee te tellen. Het bepalen van een geschikte variantie is moeilijk doordat er relatief weinig testen gedaan zijn die niet consistent zijn. In deze masterproef is de variantie momenteel 150 mV boven en onder het gemiddelde van de gemeten waarden. Dit is een schatting en het is dus niet noodzakelijk dit als een strikte grens te beschouwen. De volgende stap is de analyse. Figuur 67 toont een overzicht van de responsies die gebruikt zijn voor de analyse.

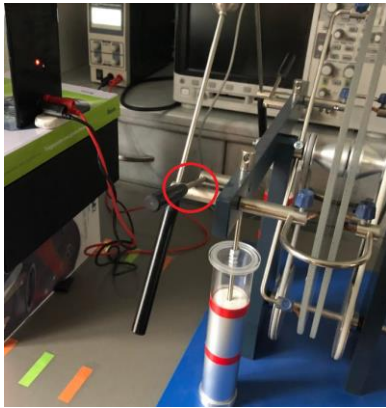
<sup>4</sup> Alle resultaten met betrekking tot consistent gedrag staan in bijlage Cs

run	Afstand tussen ontladingsbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel	uitkomst	responsie	eenheid
1	-1	-1	-1	-1	-1	100	320,9	mV
2	1	-1	-1	-1	-1	100	706	mV
3	-1	1	-1	-1	-1	0	349,8	mV
4	1	1	-1	-1	-1	30	273,6	mV
5	-1	-1	1	-1	-1	100	884	mV
6	1	-1	1	-1	-1	100	793,7	mV
7	-1	1	1	-1	-1	0	432,4	mV
8	1	1	1	-1	-1	0	482,4	mV
9	-1	-1	-1	1	-1	100	432,2	mV
10	1	-1	-1	1	-1	100	547,2	mV
11	-1	1	-1	1	-1	0	651,3	mV
12	1	1	-1	1	-1	18	688,5	mV
13	-1	-1	1	1	-1	100	283,1	mV
14	1	-1	1	1	-1	100	251	mV
15	-1	1	1	1	-1	0	406,8	mV
16	1	1	1	1	-1	0	269,5	mV
17	-1	-1	-1	-1	1	0	193,1	mV
18	1	-1	-1	-1	1	100	374,2	mV
19	-1	1	-1	-1	1	0	163,6	mV
20	1	1	-1	-1	1	0	176	mV
21	-1	-1	1	1	-1	0	400,1	mV
22	1	-1	1	-1	1	100	298,9	mV
23	-1	1	1	-1	1	0	259	mV
24	1	1	1	1	-1	0	316,6	mV
25	-1	-1	-1	1	1	0	256,4	mV
26	1	-1	-1	1	1	100	292,8	mV
27	-1	1	-1	1	1	0	385,1	mV
28	1	1	-1	1	1	0	384,7	mV
29	-1	-1	1	1	1	0	183,3	mV
30	1	-1	1	1	1	100	178,6	mV
31	-1	1	1	1	1	0	265,5	mV
32	1	1	1	1	1	0	240	mV
33	0	0	0	0	0	0	310,6	mV
34	0	0	0	0	0	0	365	mV
35	0	0	0	0	0	0	581,5	mV
36	0	0	0	0	0	0	440,1	mV
37	0	0	0	0	0	0	284	mV

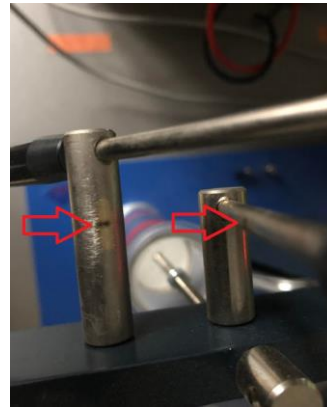
*Figuur 67: responsies voor de geïnduceerde spanning*

Deze resultaten zien er veel beter uit. Er zijn geen exact dezelfde waarden en ze lijken afhankelijk te zijn van de factoren. De kleinste waarde is 163,6 mV en de grootste is 884 mV. De analyse start zoals de vorige keer bij een screening van de responsies met een boxplot. Figuur 70 en Tabel 5 tonen de nieuwe boxplot en de bijhorende gegevens. Daarnaast is er ook slijtage opgemerkt aan de Wimshurstgenerator. Door veel testen uit te voeren ontstaat er slijtage bij de borstels en bij de overgangen om de Leidse flessen aan te koppelen. Figuur 68 en Figuur 69 tonen de slijtage op de Wimshurstgenerator. Hier ontstaan ook steeds kleine vonkjes. Daardoor vormt er zich een oxidatielaag die het ontladen van de vonk moeilijker kan maken. Dit is opgelost door de oxidatielaag te verwijderen met schuurpapier.





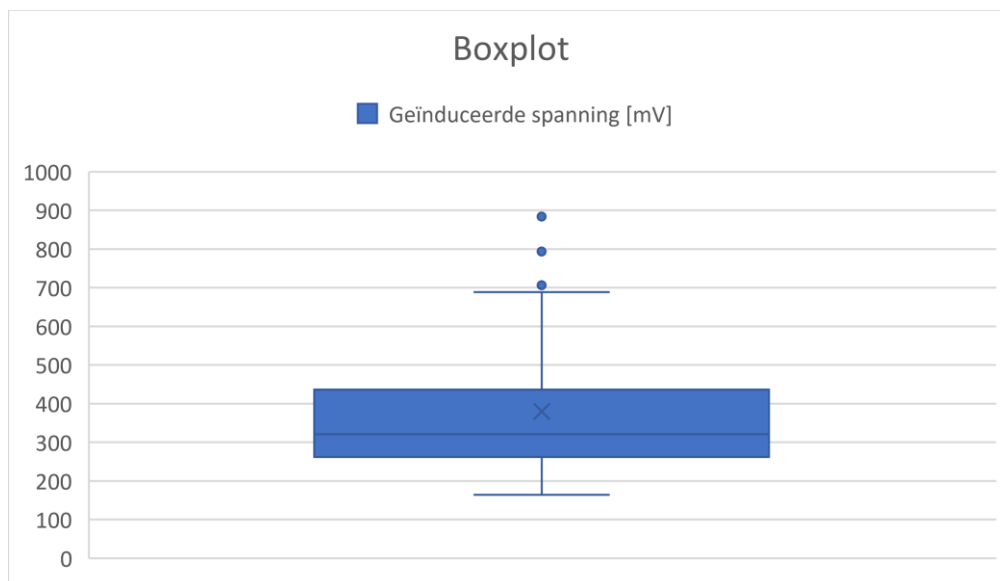
Figuur 68: Plaats van slijtage



Figuur 69: slijtage van testopstelling

Tabel 5: gegevens boxplot van de geïnduceerde spanning

Min	Q1	Mediaan	Q3	Max	Gemiddelde	IQR	Bovenste limiet	Onderste limiet
163,6	262,25	320,9	436,25	884	380,0135135	174	697,25	1,25



Figuur 70: boxplot voor de geïnduceerde spanning

Deze boxplot ziet er wel goed uit. Hier valt op dat er 3 uitschieters zijn. Dan is het belangrijk na te gaan of er iets verkeerd is gegaan tijdens die metingen. Dit zijn de waarden van run 2, 5 en 6. Volgens de notities die genomen zijn is er niets fout gegaan. De reden dat deze waarden toch uitschieters zijn kan liggen aan het feit dat bij Figuur 66 besloten is een grote variantie te accepteren. Deze responsies zijn gemiddelden, maar bij deze drie waren de 10 metingen zelf ook niet helemaal consistent. De reden voor deze inconsistentie is onbekend. Omdat er in de praktijk

dan ook geen perfect consistent gedrag is, blijven de uitschieters onveranderd. Hierna volgt wel een vergelijking als de uitschieters aangepast zijn. Het is geen probleem om uitschieters mee te nemen in de analyse. Het heeft wel gevolgen. In dit geval zal de responsfunctie geen goede inschatting kunnen maken voor waarden groter dan de bovenste limiet van Tabel 5. Voor deze masterproef is dit geen probleem aangezien de responsfunctie niet zo belangrijk is.

De volgende stap van het stappenplan van de DoE-analyse is de analyse van de respons. Het eerste onderdeel daarvan is de controle op lineariteit. Om wat tijd te besparen bij deze berekeningen is er gebruik gemaakt van een software, namelijk Design Expert 13. Figuur 71 toont de controle op lineariteit van Design Expert 13.

Term	Adjusted F-value	Model p-value	
Model	20,98	< 0.0001	significant
Curvature	2,13	0,1554	
Lack of Fit	0,5284	0,8569	

Curvature Term

Curvature appears **insignificant**. Consider removing the curvature term to simplify the analysis.

*Figuur 71: controle op lineariteit met Design Expert 13*

Op Figuur 71 is duidelijk te zien dat de p-waarde van 'curvature' groter is dan de vooropgestelde 0,05. Deze waarde is standaard. 'Curvature' slaat op de boog die de curve maakt zoals op Figuur 41 te zien is. Dat betekent dat de responsies ongeveer lineair zijn en de voorwaarde dus voldaan is. Vervolgens zijn de berekeningen van de effecten gedaan. Figuur 72 toont een overzicht van de factoren met het bijhorende gestandaardiseerde effect en zijn kwadratensom.

Term	Stdized Eff...	Sum of Squar...	% Contribution
Intercept			
A-Afstand ...ingsbollen	-0,00151902	1,84594E-05	0,386661
B-aantal windingen	0,00112697	1,01605E-05	0,212827
C-diameter spoel	0,00131246	1,37804E-05	0,288652
D-luchtvochtigheid	0,00156968	1,97111E-05	0,412879
E-afstand tot spoel	0,0143444	0,0016461	34,4801
AB	0,00266321	5,67416E-05	1,18854
AC	0,00406611	0,000132266	2,77052
AD	0,00261329	5,46344E-05	1,1444
AE	-0,00110616	9,78874E-06	0,20504
BC	-0,00110586	9,78339E-06	0,204928
BD	-0,00954323	0,000728586	15,2613
BE	-0,00129086	1,33307E-05	0,279231
CD	0,0132723	0,00140923	29,5184
CE	-0,00122114	1,19294E-05	0,249879
DE	-0,00231297	4,27986E-05	0,896483
ABC	-0,00370632	0,000109895	2,30191
ABD	-0,00039112	1,2238E-06	0,0256344
ABE	-0,00142198	1,61761E-05	0,338834
ACD	-0,000369412	1,09172E-06	0,0228677
ACE	7,28536E-05	4,24612E-08	0,000889415
ADE	5,17563E-05	2,14297E-08	0,000448878
BCD	0,000815783	5,32402E-06	0,11152
BCE	-0,00179632	2,5814E-05	0,540715
BDE	-0,000722005	4,17033E-06	0,0873539
CDE	-0,000419691	1,40912E-06	0,0295163
ABCD	0,00389937	0,000121641	2,54796
ABCE	-0,00042761	1,46281E-06	0,0306407
ABDE	0,000712303	4,059E-06	0,085022
ACDE	-0,0017376	2,41542E-05	0,505946
BCDE	0,00113182	1,02481E-05	0,214662
ABCDE	-0,000221593	3,92826E-07	0,00822835
Curvature	-0,00284387	6,47008E-05	1,35526
Lack of Fit		0	0
Pure Error		0,000204936	4,29269

Process Order: Modified Auto Select...

<span style="color: green;">m</span>	The term will be included in the model.
<span style="color: blue;">e</span>	The term will not be included in the model.
<span style="color: orange;">⚠</span>	Indicates the term is aliased with another term, or was not estimated in the Fit Summary calculations. Including the term in the model is not recommended.
<span style="color: green;">🔒</span>	A user-forced term. Automatic model selection will always produce a model that includes this term.
<span style="color: grey;">🔒</span>	Indicates that the term is required to be in the model by the program.

Figuur 72: effecten voor de geïnduceerde spanning<sup>5</sup>

De berekening van de effecten bij een DoE-analyse gebeurt via gestandaardiseerde effecten (2<sup>e</sup> kolom) of met een kwadratensom (3<sup>e</sup> kolom). Hoe groter het getal hoe meer invloed die factor heeft. Om dit makkelijker te maken is het ook in een percentage gezet in de 4<sup>e</sup> kolom. Uit Figuur 72 blijkt dat hoofdfactor E (= afstand tot de spoel) en interacties BD en CD het meeste invloed hebben. Hun invloedpercentages zijn respectievelijk 34,48 %, 15,26 % en 29,52%. Dit geeft een totaal van 79,26 %. De responsie is dus voor 79,26 % bepaald door deze drie factoren. Deze drie factoren moeten dan zeker in het model zitten dat de testresultaten beschrijft. Alle factoren die zijn meegenomen, hebben de aanduiding ‘m’ gekregen. De hoofdfactoren B, C en D lijken niet relevant omdat ze samen nog geen 1 % van het resultaat beïnvloeden. Deze factoren zijn geselecteerd door een regel. Deze regel is ook gekend als de hiërarchie. De regel is dat alle onderliggende factoren meegenomen worden. Dit betekent dat elk effect dat een interactie vormt ook in het model moet gestoken worden. Dat is in dit geval voor interacties BD en CD de hoofdfactoren B, C en D.

<sup>5</sup> Voor deze resultaten is er al een transformatie gedaan (zie verder). In Bijlage E staat een tabel waar nog geen transformatie gedaan is. Dit geeft een duidelijker beeld van de invloed van de factoren.

De volgende stap zijn de tabellen en de grafieken. Design Expert 13 genereert vooral grafieken. Bij een handmatige berekening met Excel zijn er meer tabellen. De tabellen van deze stap zijn vooral een hulpmiddel voor de berekening van de significantie van de factoren. Tabel 6 vat de factoren die in het model zitten samen en toont de bijhorende significantie.

Tabel 6: significantie van de factoren

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<b>Model</b>	0,0038	6	0,0006	20,98	< 0.0001	significant
B-aantal windingen	0,0000	1	0,0000	0,3342	0,5677	
C-diameter spoel	0,0000	1	0,0000	0,4532	0,5061	
D-luchtvochtigheid	0,0000	1	0,0000	0,6482	0,4273	
E-afstand tot spoel	0,0016	1	0,0016	54,14	< 0.0001	
BD	0,0007	1	0,0007	23,96	< 0.0001	
CD	0,0014	1	0,0014	46,35	< 0.0001	
Curvature	0,0001	1	0,0001	2,13	0,1554	

Alle effecten waarvan de p-waarde kleiner is dan 0,05 zijn significant. Ook hier zijn E, BD en CD de significantie effecten. Deze p-waarden zijn zelfs kleiner dan 0,0001. Wat ook nog opvalt is dat het model ook significant is. Deze p-waarde is ook kleiner dan 0,05. Volgende figuren tonen allemaal de significantie van de effecten. Figuur 73 is een normal probability plot en Figuur 74 toont de effecten van groot naar klein in de vorm van een kolomdiagram.

**1/Sqrt(Geïnduceerde spanning)**

Warning! Pure error terms not shown

Shapiro-Wilk test

W-value = 0,926

p-value = 0,070

A: Afstand tussen ontladingsbollen

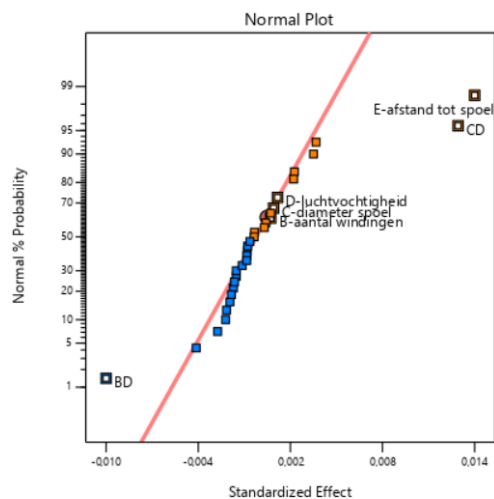
B: aantal windingen

C: diameter spoel

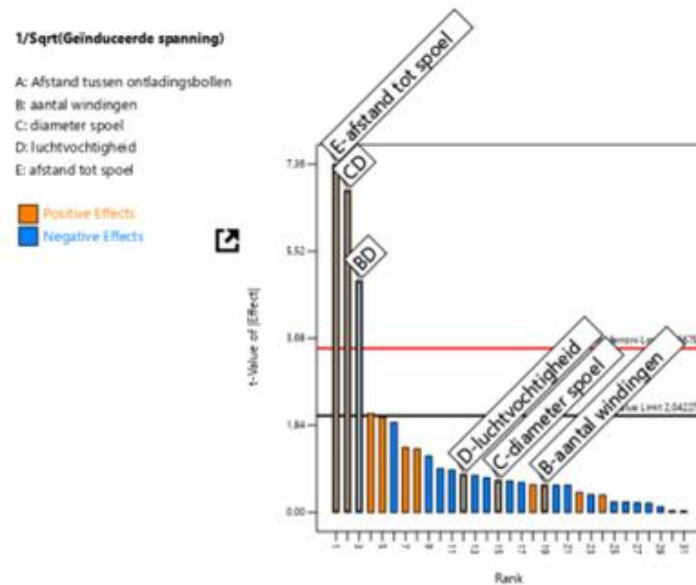
D: luchtvochtigheid

E: afstand tot spoel

Positive Effects  
Negative Effects

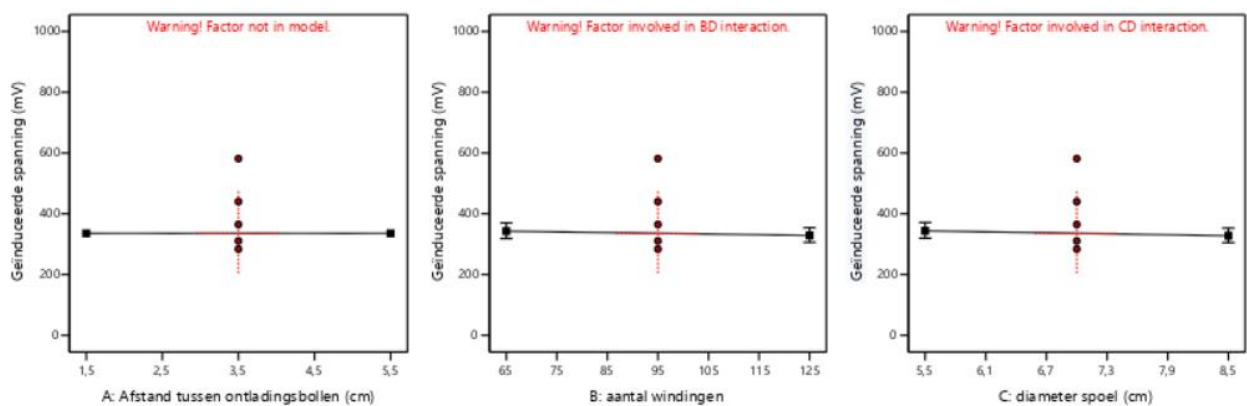


Figuur 73: normal probability plot

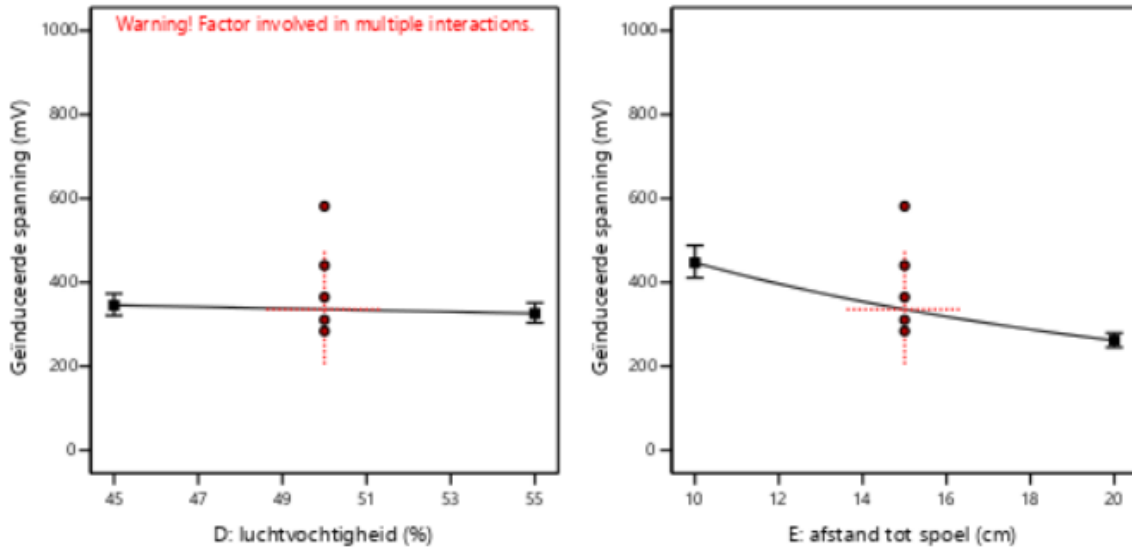


Figuur 74: kolomdiagram van gesorteerde effecten

De significante effecten zijn makkelijk te onderscheiden van de andere. Bij de normal probability plot liggen deze veel verder van de diagonaal af. Bij het kolomdiagram steken ze ver boven de andere effecten uit. Deze grafiek toont aan dat slechts een kleine hoeveelheid parameters het grootste deel van de invloed omvat. Uit deze grafieken blijkt ook dat er twee verschillende soorten effecten zijn. Positieve effecten zorgen dat de responsie groter is als die factor hoger is ingesteld. Voor een negatief effect is dat net andersom. De afstand tot de spoel is bijvoorbeeld een negatief effect. Als de afstand tot de spoel toeneemt, zal de geïnduceerde spanning kleiner worden. Het minteken in Figuur 72 duidt ook op negatieve effecten. Deze resultaten hebben wel al een transformatie ondergaan. Om de positieve en negatieve effecten te bepalen kan er best naar de resultaten van voor de transformatie gekeken worden. Verder zijn er nog grafieken gegenereerd. Figuur 75 en Figuur 76 tonen de hoofdeffecten.

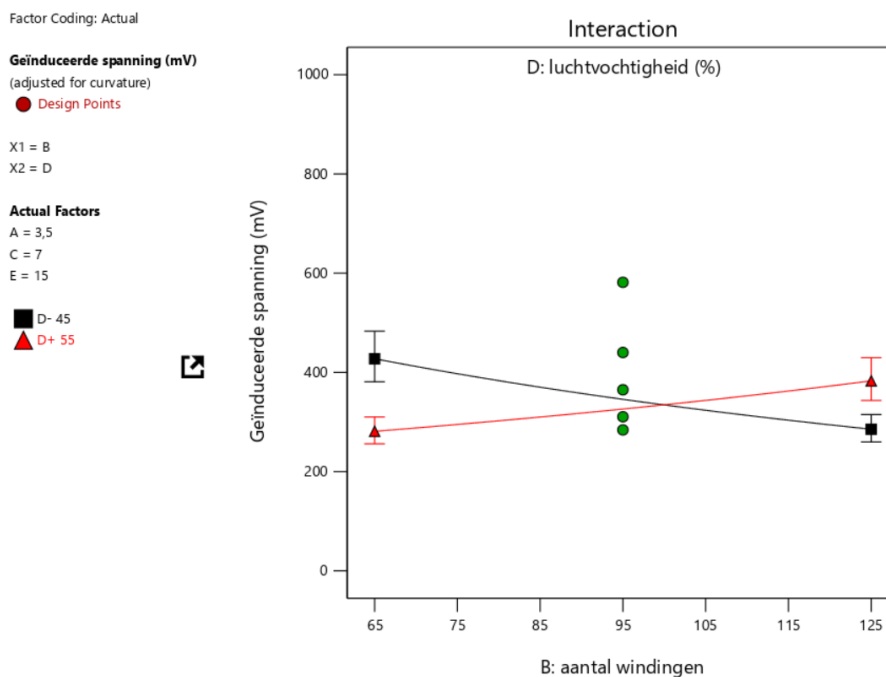


Figuur 75: de hoofdeffecten

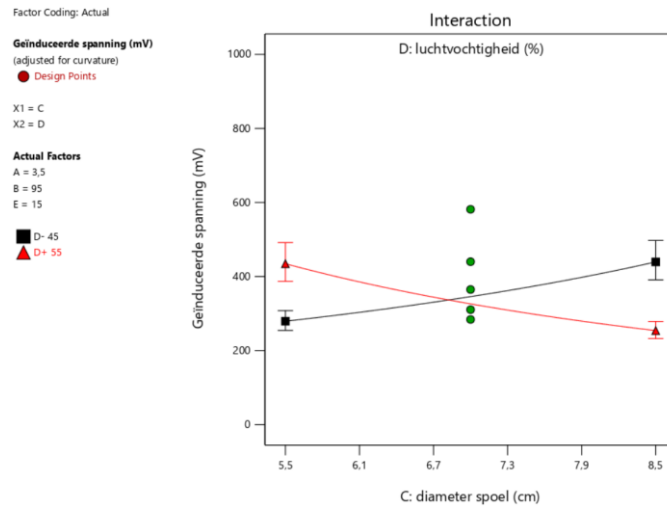


Figuur 76: de hoofdeffecten (2)

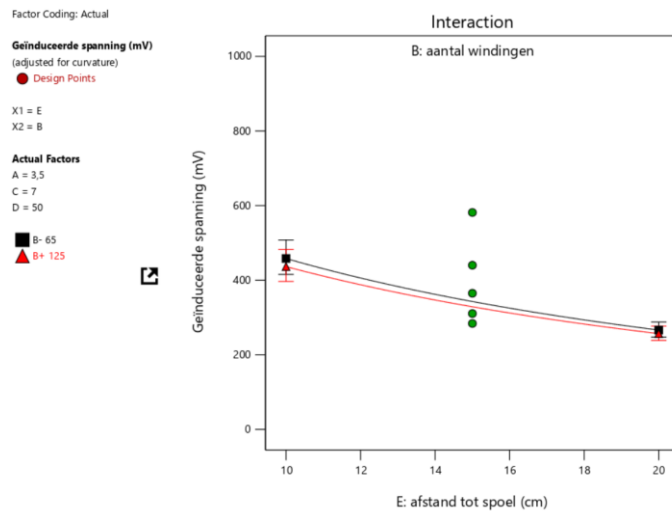
Uit deze figuren blijkt dat enkel het effect van E een grote verandering doormaakt. Dit is logisch, want dit heeft te maken met de significantie. Uit Figuur 75, Figuur 76 en Tabel 6 bleek dat van de hoofdeffecten enkel E significant was. Dit komt hier dus terug. Hier kwamen ook twee belangrijke effecten naar voor, namelijk BD en CD. Dan is het interessant om deze interactie eens te plotten. Voor deze effecten is een sterke interactie verwacht. De andere effecten zijn niet significant en dus is de verwachting voor het resultaat van deze interacties is vergelijkbaar met Figuur 47 of Figuur 48. Figuur 77, Figuur 78, Figuur 79 en Figuur 80 tonen enkele geplote interacties.



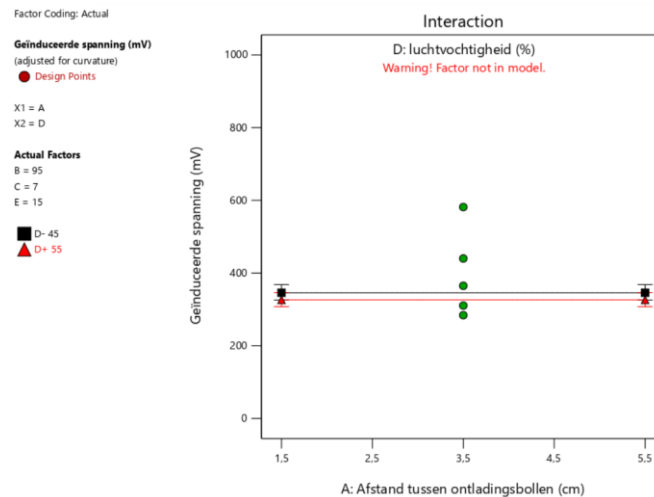
Figuur 77: BD interactie



Figuur 78: CD interactie



Figuur 79: BE interactie



Figuur 80: AD interactie

Zoals in sectie 3.1 is uitgelegd, zijn er 3 verschillende uitkomsten. De uitkomst voor Figuur 77 en Figuur 78 komt overeen met Figuur 49 wat duidt op een sterke interacties. Wat logisch is aangezien deze effecten significant zijn. De verwachting van de andere effecten is correct. Al de andere curves op de plot zijn evenwijdig wat aanduidt dat er geen interactie tussen de hoofdfactoren is. Al de figuren<sup>6</sup> die in deze stap getoond zijn, ondersteunen 1 besluit. De effecten van E, BD en CD zijn het belangrijkste. Van deze effecten is E de grootste met een bijdrage van 34,48 %. Vervolgens kan er ook vastgesteld worden voor welke parameters een hoge instelling nodig is om een lage geïnduceerde spanning te krijgen. Dat zijn namelijk de parameters met negatieve effecten.

De volgende stap in het stappenplan van de DoE-analyse is het opstellen van een responsfunctie. Dit is niet het belangrijkste deel van de DoE-analyse voor deze masterproef aangezien dit enkel van toepassing is op de testopstelling en dus niet op de praktijk. Dat betekent niet dat het nutteloos is om deze stap te doen. Met deze responsfunctie kan er meer inzicht in de testopstelling gekregen. Enkel de significante effecten worden meegenomen in de responsfunctie. Tabel 7 geeft een overzicht van alle effecten die zijn meegenomen.

<sup>6</sup> Met Design Expert 13 zijn er nog veel meer figuren te maken. De geïnteresseerde lezer kan extra figuren terugvinden in bijlage E.



Tabel 7: overzicht van significante effecten

### Coefficients in Terms of Coded Factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0,0554	1	0,0010	0,0534	0,0574	
B-aantal windingen	0,0006	1	0,0010	-0,0014	0,0026	1,0000
C-diameter spoel	0,0007	1	0,0010	-0,0013	0,0026	1,0000
D-luchtvochtigheid	0,0008	1	0,0010	-0,0012	0,0028	1,0000
E-afstand tot spoel	0,0072	1	0,0010	0,0052	0,0092	1,0000
BD	-0,0048	1	0,0010	-0,0068	-0,0028	1,0000
CD	0,0066	1	0,0010	0,0046	0,0086	1,0000
Ctr Pt 1	-0,0039	1	0,0027			

In Tabel 7 staan buiten de significante factoren ook de bijhorende geschatte coëfficiënten. Deze coëfficiënten stellen de verwachte verandering voor bij eenheidsverandering van die factor terwijl de andere gelijk blijven. Deze coëfficiënten zijn belangrijk, want deze zijn deel van de responsfunctie. Formule 3 beschrijft de opbouw van de responsfunctie. Figuur 81 toont de responsfunctie voor de geïnduceerde spanning. Figuur 82 geeft een tweede vorm met de werkelijke waarden.

### Final Equation in Terms of Coded Factors

1/Sqrt(Geïnduceerde spanning)	=
+0,0554	
+0,0006 * B	
+0,0007 * C	
+0,0008 * D	
+0,0072 * E	
-0,0048 * BD	
+0,0066 * CD	

Figuur 81: De responsfunctie voor de geïnduceerde spanning

### Final Equation in Terms of Actual Factors

1/Sqrt(Geïnduceerde spanning)	=
+0,179754	
+0,001609 * aantal windingen	
-0,043803 * diameter spoel	
-0,003015 * luchtvochtigheid	
+0,001434 * afstand tot spoel	
-0,000032 * aantal windingen * luchtvochtigheid	
+0,000885 * diameter spoel * luchtvochtigheid	

Figuur 82: responsfunctie voor geïnduceerde spanning met werkelijke waarden

Bovenstaande figuren tonen dus de responsfunctie die beide op hetzelfde uitkomen. Figuur 81 is de responsfunctie met gecodeerde waarden. Dit betekent dat op de plaats van de factoren het niveau ingevuld moet worden. Voor deze masterproef is dat 1 of -1. Figuur 82 daarentegen werkt met de werkelijke waarden. Dat zijn de echte instellingen die in het begin gekozen zijn. Voor de afstand tot de spoel (E) is dat 10 cm of 20 cm. Belangrijk om op te merken is dat er niet gewoon geïnduceerde spanning staat als uitkomst. Dit heeft te maken met de volgende stap van het stappenplan.

De stap die hierna komt is een controle of de responsfunctie/het model een goede fit is en dat het model alle significantie effecten heeft meegenomen. Een analyse die daarbij hoort is de box-cox analyse. Hieruit volgt of een transformatie aangeraden is. Volgens Design Expert 13 was dit het geval voor deze masterproef. Een transformatie betekent dat er met de originele responsies een bewerking wordt voorgesteld zodat het model een betere fit geeft. De transformatie die aangeraden was, is een inverse vierkantswortel. Formule 4 beschrijft de transformatie. Daarnaast zijn alle getoonde resultaten van dit hoofdstuk de resultaten nadat de transformatie is uitgevoerd. Door deze transformatie is het verband van de responsies beter lineair, maar als er een verband gelegd moet worden met de praktijk moeten de gegevens van voor de transformatie gebruikt worden. De responsfunctie zoals figuur 82 kan bijvoorbeeld gebruikt worden om de geïnduceerde spanning te voorspellen. Dit kan ook met waarde die niet als niveau gekozen zijn als er rekening gehouden wordt dat de uitkomst minder betrouwbaar is omdat het model niet voor dit bereik is opgesteld.

$$\text{nieuw resultaat} = 1/\sqrt{\text{Geïnduceerde spanning}} \quad (4)$$

Design Expert 13 voorziet ook enkele getallen die het model beschrijven. Deze kunnen gemakkelijk gebruikt worden om modellen te vergelijken. Figuur 83 en Figuur 84 tonen de fit gegevens voor en na de transformatie. De belangrijkste getallen van deze figuren staan in de rechter kolom. De R<sup>2</sup>-waarde moet zo kort mogelijk bij 1 zijn. De adjusted R<sup>2</sup>-waarde en de Predicted R<sup>2</sup>-waarde zijn ook belangrijk. Het verschil tussen deze twee mag niet groter dan 0,2 zijn om een goede fit te hebben. Dan is er ook nog een 'Adeq Precision'-waarde. Dit is een verhouding van het signaal t.o.v. de ruis. Een waarde groter dan 4 is gewenst voor de 'Adeq Precision'-waarde.

### Fit Statistics

<b>Std. Dev.</b>	0,0055	<b>R<sup>2</sup></b>	0,8128
<b>Mean</b>	0,0549	<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>	0,7740
<b>C.V. %</b>	10,05	<b>Predicted R<sup>2</sup></b>	0,6965
		<b>Adeq Precision</b>	15,1048

*Figuur 83: Fit gegevens na transformatie*

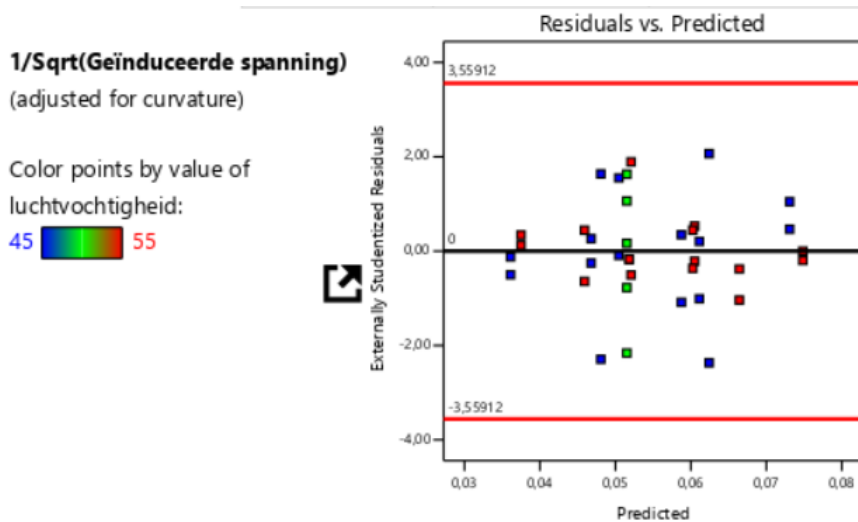
### Fit Statistics

<b>Std. Dev.</b>	103,68	<b>R<sup>2</sup></b>	0,7265
<b>Mean</b>	381,66	<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>	0,6700
<b>C.V. %</b>	27,16	<b>Predicted R<sup>2</sup></b>	0,5558
		<b>Adeq Precision</b>	12,1445

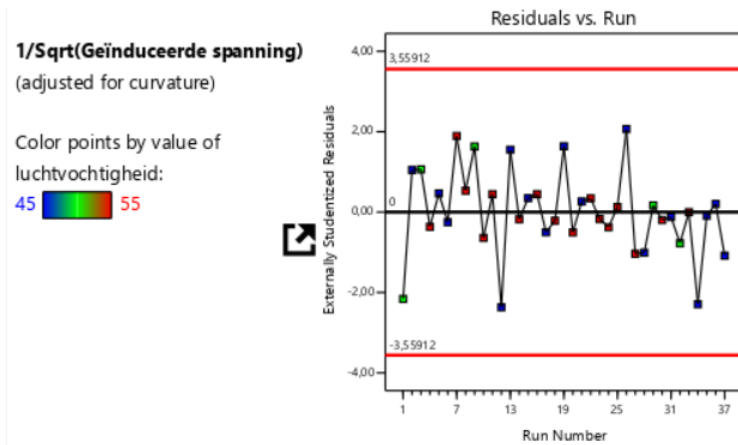
*Figuur 84: Fit gegevens voor transformatie*

Ten eerste is het verschil voor en na de transformatie duidelijk te merken. Na de transformatie zijn alle waarden gestegen. Het model is dus beter geworden. R<sup>2</sup>-waarde is na de transformatie gestegen naar 0,8128. De 'Predicted R<sup>2</sup>-waarde' voor de transformatie is een beetje aan de lage kant, maar deze is met ongeveer 14% gestegen. Verder is de 'Adeq Precision'-waarde van 12,14 naar 15,10 gestegen. De transformatie was dus zeker zinvol.

De fit gegevens zijn moeilijk te bekomen met Excel. Dit is dus een extra voordeel van de software. Met Excel is er meestal enkel een analyse van de residuen uitgevoerd. Residuen zijn het verschil tussen de gemeten waarden en de voorspelde waarde van de responsfunctie. Deze analyse bestaat uit 3 figuren. De eerste twee figuren controleren of er verbanden niet meegenomen zijn. Figuur 85 toont een plot van de residuen t.o.v. de voorspelde waarde en Figuur 86 toont een plot van de residuen t.o.v. de volgorde waarin de testen zijn uitgevoerd.



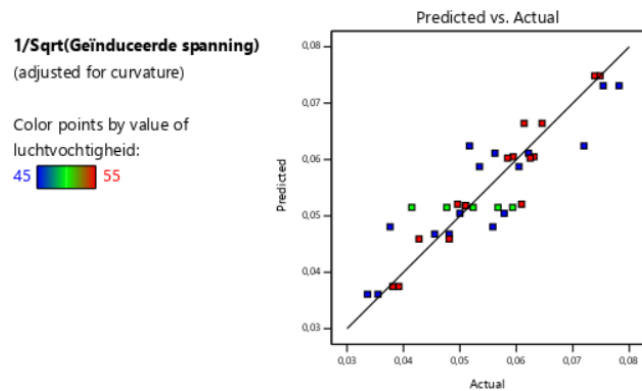
*Figuur 85: Residuen vs voorspellingen*



*Figuur 86: Residuen vs volgorde*

Uit de plots kan besloten worden dat er geen eenduidig verband/systematiek is voor de residuen. De punten op de plots staan willekeurig. Er is dus geen samenhang tussen voorspellingen en residuen. Dit betekent dat het model voldoet.

Dit wil ook zeggen dat de belangrijkste factoren zijn meegenomen in het model. De derde figuur is een grafiek waar het model en de gemeten waarden (responsies) samen op geplot zijn. Figuur 87 toont geeft grafiek weer.



*Figuur 87: Voorspellingen vs gemeten waarden (responsies)*

Uit Figuur 87 blijkt dat het model en de responsies niet perfect overeen komen. Er zijn enkele afwijkingen die te wijten zijn aan de variantie van de testopstelling. Het model geeft wel een goede inschatting voor de responsies en voldoet dus om een goede inschatting te maken.

Tot slot zijn er ook nog stap 6 en 7 van het stappenplan. Dit is het bepalen van een acceptabele instelling en de verificatieproeven. Deze stappen zijn er voor als er bijvoorbeeld een gewenst resultaat is van 500 mV. Dan moet er dus een goede instelling gezocht worden die daarna gecontroleerd wordt met enkele testen.

### 4.3. DoE zonder uitschieters

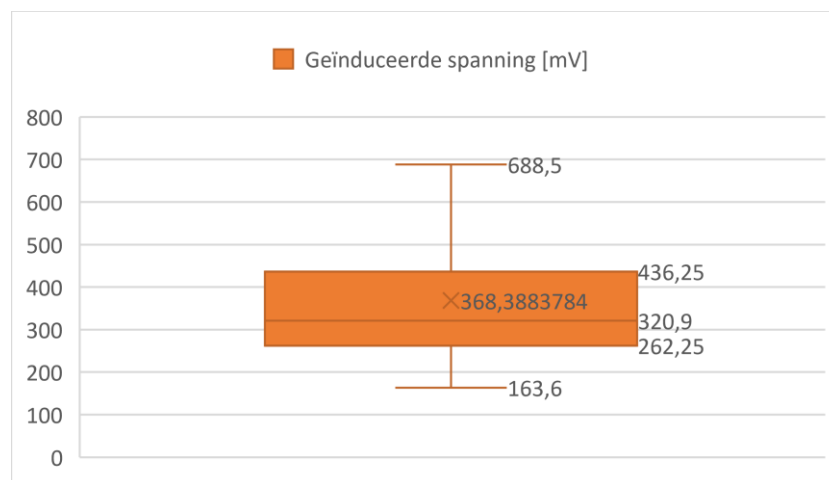
In vorig onderdeel zijn voor run 2, 5 en 6 uitschieters waargenomen. Normaal volgen er dan meerdere testen bij deze situaties. Deze zijn ook gedaan (zie Figuur 66). Daaruit bleek dat het niet altijd consistent was. In deze sectie zijn er enkele responsies aangepast op basis van enkele academische veronderstellingen zodat de invloed van (het gedrag van) deze uitschieters kan bepaald worden. Figuur 88 toont de nieuwe lijst met de aangepaste waarden.

Std	Run	Factor 1 A:Afstand tusse... cm	Factor 2 B:aantal winding...	Factor 3 C:diameter spoel cm	Factor 4 D:luchtvochtighe... %	Factor 5 E:afstand tot sp... cm	Response 1 Geïnduceerde s... mV
1	19	1,5	65	5,5	45	10	320,9
2	34	5,5	65	5,5	45	10	618
3	37	1,5	125	5,5	45	10	349,8
4	15	5,5	125	5,5	45	10	273,6
5	17	1,5	65	8,5	45	10	685,57
6	31	5,5	65	8,5	45	10	650
7	21	1,5	125	8,5	45	10	432,4
8	6	5,5	125	8,5	45	10	482,4
9	11	1,5	65	5,5	55	10	432,2
10	10	5,5	65	5,5	55	10	547,2
11	22	1,5	125	5,5	55	10	651,3
12	25	5,5	125	5,5	55	10	688,5
13	18	1,5	65	8,5	55	10	283,1
14	8	5,5	65	8,5	55	10	251
15	20	1,5	125	8,5	55	10	406,8
16	7	5,5	125	8,5	55	10	269,5
17	26	1,5	65	5,5	45	20	193,1
18	12	5,5	65	5,5	45	20	374,2
19	2	1,5	125	5,5	45	20	163,6
20	5	5,5	125	5,5	45	20	176
21	35	1,5	65	8,5	45	20	400,1
22	13	5,5	65	8,5	45	20	298,9
23	36	1,5	125	8,5	45	20	259
24	28	5,5	125	8,5	45	20	316,6
25	16	1,5	65	5,5	55	20	256,4
26	4	5,5	65	5,5	55	20	292,8
27	14	1,5	125	5,5	55	20	385,1
28	23	5,5	125	5,5	55	20	384,7
29	30	1,5	65	8,5	55	20	183,3
30	33	5,5	65	8,5	55	20	178,6
31	27	1,5	125	8,5	55	20	265,5
32	24	5,5	125	8,5	55	20	240
33	3	3,5	95	7	50	15	310,6
34	29	3,5	95	7	50	15	365
35	1	3,5	95	7	50	15	581,5
36	32	3,5	95	7	50	15	440,1
37	9	3,5	95	7	50	15	284

Figuur 88: aangepaste lijst met responsies

Van al deze waarden zijn er dus maar 3 waarden aangepast. Dat zijn de waarden van run 2, 5 en 6. Voor run 2 zijn er 3 testen uitgevoerd waarvan 2 betrouwbare metingen. De nieuwe waarde is een gemiddelde van deze 2 responsies. Voor run 5 zijn er ook 3 testen gedaan. De tweede test kwam

uit op 684 mV, maar maakte een plotse verandering in responsies mee tijdens de 10 metingen. In het begin zaten die metingen rond de 800 mV en op het einde rond de 500 mV. Het is mogelijk dat 684 mV een goede schatting kan zijn. Daarnaast is ook gekeken naar een combinatie van de eerste en derde test zonder de metingen die onverklaarbaar hoog zijn. Dit kwam uit op 685,57 mV. De tweede test was dus een goede schatting, maar 685,57 mV is gebruikt voor de analyse. Bij run 6 zijn er maar 2 testen gedaan waarvan de 10 metingen binnen 1 test voor beide testen niet zo consistent zijn verlopen. Bij deze metingen zijn wel 2 getallen naar vorgekomen waarvan een gemiddelde waarschijnlijk wel een goede voorspelling zou zijn. Deze getallen zijn 540 mV en 760 mV en het gemiddelde hiervan is 650 mV. Figuur 89 toont de nieuwe boxplot met de aangepaste responsies.



Figuur 89: boxplot met aangepaste responsies

Na een aanpassing van de waarden zijn er geen uitschieters meer over. Nu volgt er een overzicht van de belangrijkste delen van de analyse met de aangepaste waarden. Vervolgens komt er een vergelijking tussen deze twee resultaten om te kijken of er grote verschillen zijn. Om een goede vergelijking te maken is hier ook de inverse vierkantsworteltransformatie gedaan. De software “Design Expert 13” raden deze transformatie ook opnieuw aan. Tabel 8 toont de test op lineariteit van de nieuwe responsies. Tabel 9 geeft weer hoe goed het nieuwe model overeen komt met de responsies. Figuur 90 is de normal probability plot van de nieuwe responsies. En tot slot geeft Tabel 10 een overzicht van het nieuwe model.

Tabel 8: test op lineariteit

Term	Adjusted F-value	Model p-value	
Model	20,52	< 0.0001	significant
Curvature	2,70	0,1110	
Lack of Fit	0,4814	0,8860	

Tabel 9: Fit gegevens van het nieuwe model

### Fit Statistics

<b>Std. Dev.</b>	0,0053		<b>R<sup>2</sup></b>	0,8093
<b>Mean</b>	0,0552		<b>Adjusted R<sup>2</sup></b>	0,7699
<b>C.V. %</b>	9,65		<b>Predicted R<sup>2</sup></b>	0,6912
			<b>Adeq Precision</b>	14,8153

#### 1/Sqrt(Geïnduceerde spanning)

Warning! Pure error terms not shown

Shapiro-Wilk test

W-value = 0,926

p-value = 0,069

A: Afstand tussen ontladingsbollen

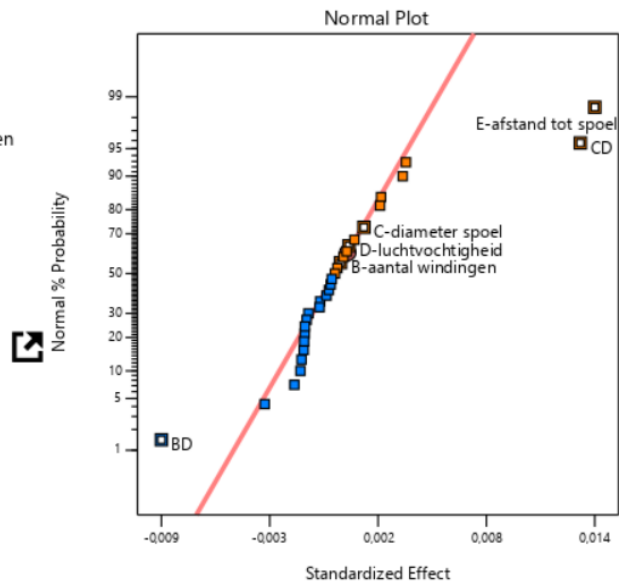
B: aantal windingen

C: diameter spoel

D: luchtvochtigheid

E: afstand tot spoel

■ Positive Effects  
■ Negative Effects



Figuur 90: normal probability plot met aangepaste waarden

Tabel 10: overzichtstabel van het nieuwe model

### Coefficients in Terms of Coded Factors

Factor	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	0,0557	1	0,0009	0,0538	0,0576	
B-aantal windingen	0,0002	1	0,0009	-0,0017	0,0021	1,0000
C-diameter spoel	0,0008	1	0,0009	-0,0011	0,0028	1,0000
D-luchtvochtigheid	0,0004	1	0,0009	-0,0015	0,0024	1,0000
E-afstand tot spoel	0,0068	1	0,0009	0,0049	0,0088	1,0000
BD	-0,0044	1	0,0009	-0,0064	-0,0025	1,0000
CD	0,0065	1	0,0009	0,0045	0,0084	1,0000
Ctr Pt 1	-0,0042	1	0,0026			

Ten eerste blijkt dat het model voldoet voor de lineariteit. De p-waarde van het model is veel kleiner dan 0,05 en die van de boog van de curve is groter. Ten tweede valt op dat in vergelijking met Figuur 83 dit model iets minder goed is. Ten derde is de normal probability plot vergelijkbaar met Figuur 73. Dit betekent dat dezelfde factoren significant zijn, namelijk E, BD en CD. Ten vierde zijn dezelfde factoren meegenomen in het model. En volgens

Tabel 10 zijn de significante factoren in dezelfde grootteorde als de significante factoren van Tabel 7. Kortom, zijn beide modellen heel gelijkaardig. Het aanpassen van de uitschieters heeft dus weinig invloed gehad. Hierdoor zijn de resultaten van de vorige analyse betrouwbaar genoeg om een goede inschatting te maken over de effecten van de parameters.

#### 4.4. Conclusies

In dit hoofdstuk is de analyse uitgevoerd. Hier kunnen enkele besluiten genomen worden. Consistent gedrag is nodig om een zeer nauwkeurige analyse te kunnen doen. Dit is ook het geval voor de testen waarbij het aantal keer dat de LED aangaat de responsie is. De verwachting was wel dat het inconsistent was. Dit is te verklaren door de onnauwkeurige testen die op voorhand gedaan zijn, want de afstand is een belangrijke factor. Doordat er geen normale verdeling was in de responsies, waren de boxplot en de test op lineariteit niet goed. Hierdoor kon er niet verder gewerkt worden met deze responsies.

De andere responsie was de geïnduceerde spanning. Hier is het gedrag niet zo consistent als bij het aantal keer dat de LED aangaat. Het is ook moeilijk te bepalen wat een aanvaardbare variantie is. Omdat er voor deze masterproef enkel een goede inschatting nodig is, is er een grote variantie geaccepteerd. Dit gaf een boxplot met 3 uitschieters en een geslaagde test op lineariteit. Om te kijken of de uitschieters en eventueel inconsistent gedrag veel invloed hebben op het resultaat is er ook nog een andere analyse gedaan. Bij deze analyse zijn de uitschieters aangepast op basis van enkele argumenten. Hieruit volgde dat de uitschieters niet veel invloed hebben. Beide analyses geven aan dat de hoofdfactor E en de interacties BD en CD het meest significant zijn. Dit komt ook terug in de grafieken van de effecten van de hoofdfactoren en de interacties. Hier kan rekening mee gehouden worden in de praktijk. Al is dit moeilijk voor de interacties. De afstand tot de spoel of hoofdfactor E is makkelijker toe te passen.

Vervolgens is de responsfunctie van beide analyses bijna hetzelfde. Enkel de grootte van de effecten is anders, maar wel vergelijkbaar. Om het model beter te doen fitten, is er wel een transformatie aangeraden. De transformatie die is toegepast, is de inverse vierkantwortel. Daarna zijn er analyses uitgevoerd met de residuen. Hieruit bleek dat de modellen van de testopstelling goed zijn en er dus een goede inschatting gemaakt kan worden over het effect van de parameters. Het is ook wel noodzakelijk om kritisch te reflecteren. Zo geven de resultaten aan dat alleen E, BD en CD significant zijn. Deze effecten zijn het grootst, maar misschien is het bereik van de andere parameters te klein gekozen. Zo is de luchtvochtigheid bijvoorbeeld tussen 45% en 55% gekozen, maar het effect is misschien helemaal anders bij 25% of bij 85%. Er is dus nog ruimte voor verbetering of uitbreiding.





## 5. Verbeteringen voor de proefopstelling en oplossing van het EMC-probleem

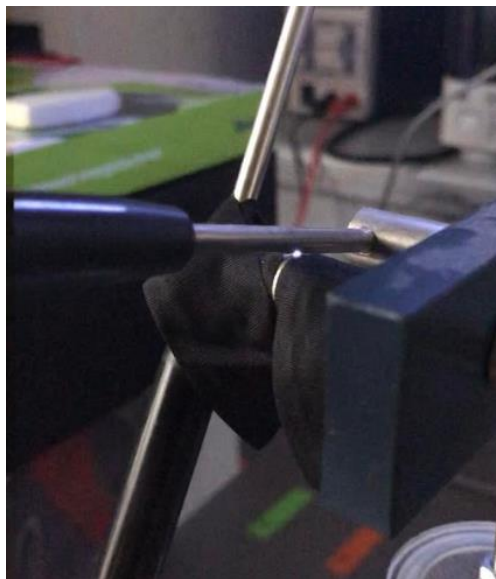
Dit hoofdstuk is onderverdeeld in 2 delen. Het eerste deel gaat over enkele verbeterpunten van de testopstelling. Het tweede deel gaat over de oplossing van het EMC-probleem.

### 5.1. Verbeterpunten en toekomstige onderzoeksmogelijkheden voor de proefopstelling

#### 5.1.1. Verbeterpunten

Het doel van dit deel is om enkele verbeterpunten aan te kaarten met betrekking tot de testopstelling. Dit zorgt voor betrouwbaardere resultaten in toekomstige onderzoeken. De volgende punten geven de verbeteringen aan.

- Ten eerste het verlagen van de drempelspanning van de optocoupler waardoor de optocoupler sneller schakelt bij vonken waardoor de LED sneller aangaat. Hierdoor wordt de testopstelling gevoeliger.
- Ten tweede afscherming gebruiken bij de koppeling van de leidse flessen en de borstels van de Wimhurstgenerator om voor minder ruis te zorgen. Figuur 91 toont een vonk bij de koppeling van de leidse flessen. Een nieuwe opstelling waar de leidse flessen niet afgekoppeld kunnen worden is nog beter.



*Figuur 91: vonk bij koppeling van de leidse flessen*

- Ten derde een vaste opstelling gebruiken. Hierdoor staat de spoel steeds op exact dezelfde plaats.
- Ten vierde het gebruiken van een professionele testomgeving, met name de luchtvochtigheidsmeter en een klimatiseringskamer.

### 5.1.2. Toekomstige onderzoeksmogelijkheden

In de conclusie van hoofdstuk 4 is er vastgesteld dat een kritische reflectie belangrijk is. Deze sectie gaat hier dieper op in. Er zijn namelijk nog een aantal dingen die nog meer aandacht verdienen.

Zoals in die conclusie vermeld is, is het bereik van de parameters een keuze die belangrijke gevolgen kan hebben. Als de range te klein gekozen is, kan het dat belangrijke verbanden niet zichtbaar zijn. Daarom zou het verstandig zijn om een nieuwe analyse te doen met een grotere range voor alle parameters. Voor de luchtvochtigheid en de parameters van de spoel is dit makkelijk omdat deze niet op het maximum of minimum van de testopstelling bepaald is. De afstand tussen de ontladingsbollen of de afstand tussen de spoel en de vonk is wel gebaseerd op de limieten van de testopstelling zelf. Om deze range te vergroten is er dus een andere opstelling nodig die dit aankan. Om de range van de vorige twee parameters te vergroten is er een grotere vonk nodig. Dit kan behaald worden door de capaciteit van de leidse flessen te vergroten. Dit onderzoek toont aan of een vergroting van de range een verandering van gedrag veroorzaakt.

Vervolgens is het altijd beter om meer metingen te doen. Hierdoor is het makkelijker onregelmatigheden te identificeren. De analyse zou dan nog betrouwbaarder zijn. Daarnaast zou het herhalen van de metingen ook een beter inzicht geven in de consistentie van de testen. In deze masterproeven zijn er maar een beperkt aantal herhalingen gedaan wegens een beperkte tijd. Het doel van dit verdere onderzoek is eerder verificatie dan een zoektocht naar nieuwe inzichten.

Tijdens deze masterproef zijn ook enkele onregelmatigheden vastgesteld. Één van die onregelmatigheden was de oriëntatie van de spoel. Sectie 3.2.2 Bepaling Grenzen toonde aan dat er een verschil is tussen een test waarbij de spoel naar de vonk gericht is en een test waarbij het deksel naar de vonk is gericht. Een mogelijke verklaring voor dit gedrag is de optocoupler. Een optocoupler bestaat uit een LED. Dit is een diode en een diode laat maar langs één richting de stroom door. Uit de testen bleek ook dat er een heel groot verschil was tussen de twee mogelijkheden. De reden voor dit verschil zou de richting van de stroom kunnen zijn. Dit kan verder onderzocht worden. Een verder onderzoek naar deze theorie is dus aangeraden om het probleem in de praktijk op te lossen. Als de richting van de geïnduceerde stroom beheersbaar is, kan dit eventueel gebruikt worden om deze steeds in de tegengestelde richting van de optocoupler te sturen. Hierdoor schakelt de optocoupler nooit vanwege geïnduceerde spanningen en stromen.

Sectie 3.2.1 Bepaling parameters toonde dat de oriëntatie van de spoel ook nog andere mogelijkheden heeft. Dit was niet makkelijk en is daarom niet meegenomen. Figuur 53 en Figuur 54 tonen de verschillende mogelijkheden. Een verder onderzoek naar het verband tussen de oriëntatie en de storing geeft een belangrijk inzicht voor de praktijk. Helaas is de oriëntatie in de

praktijk niet volledig te bepalen aangezien er niet voorspeld kan worden waar de vonk exact zal overslaan.

Vervolgens is in deze masterproef maar een beperkt aantal herhalingen uitgevoerd voor de verschillende situaties doordat de tijd beperkt is. Hierdoor is het ook moeilijk een verband te zien in het eventueel inconsistent gedrag. Uit de testen die gedaan zijn, blijkt dat de LED heel consistent reageert en de geïnduceerde spanning varieert. Voor de geïnduceerde spanning is het ook nog niet duidelijk wat een acceptabele variantie is. Één van de doelen van dit onderzoek is dus een acceptabele variantie te bepalen. Daarnaast onderzoekt dit onderzoek ook de inconsistentie van de testopstelling per uur of per dag bij gelijkblijvende omstandigheden. Dit onderzoek zou wel meer inzicht kunnen geven over het EMC-probleem in de onderstations. Van zodra het duidelijk is wanneer er inconsistent gedrag voorkomt en wat dat gedrag veroorzaakt, kan er constructief gewerkt worden aan een oplossing.

Tot slot is er nog een onderzoek dat belangrijk is om het probleem in de onderstations uit te schakelen. Hiervoor zijn dan ook testen in de onderstations zelf nodig. Dit onderzoek begint met metingen van elektromagnetische storingen. Uit deze testen blijkt wat de grootteorde is van de storingen en waar de storing het grootste is. Dan kunnen de testen opnieuw gedaan worden na het toevoegen van ferrietkernen of een alternatief. Uit deze resultaten blijkt dan of de ferrietkernen in de onderstations ook helpen. Dit onderzoek kan best pas opgestart worden nadat de werking van de oplossing bevestigd is.

## 5.2. Oplossing van het EMC probleem

Dit deel bespreekt mogelijke oplossingen voor het EMC probleem. In deze masterproef ligt de focus op ferrietkernen. Daarom is er een diepgaande literatuurstudie uitgevoerd over ferrietkernen rond fasegeleiders. Daarnaast zijn er ook nog andere oplossingen onderzocht. Vervolgens toont dit deel de resultaten van de ferrietkernen en een afscherming bij de testopstelling.

### 5.2.1. Mogelijke oplossingen

Sectie 2.4 heeft al een aantal methodes aangehaald om het probleem aan te pakken. Er zijn 3 methodes, namelijk filteren, equipotential bonding en shielding. Equipotential bonding is het verbinden van alle elektrisch geleidende delen met de aarde via laag resistieve verbindingen[18]. In deze toepassing kan het omhulsel van de fasegeleider en de omkadering van de muurdoorgang verbonden worden om de stroom af te voeren. Deze methode is niet gekozen omdat de verf van het omhulsel van de GIL een goede verbinding lastig maakt.

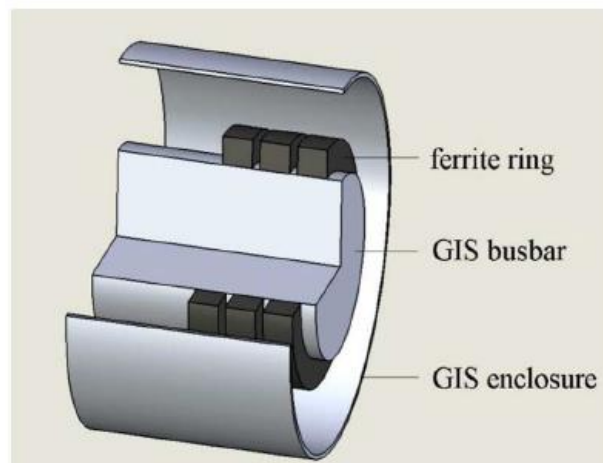
Daarnaast is het ook mogelijk de storing te beperken door middel van filteren en shielding. Deze methode kunnen op de 3 onderdelen van de koppeling inspelen, namelijk de zender, de ontvanger en de koppeling zelf. Afschermd kabels gebruiken voor de zender of ontvanger is te duur en omslachtig omdat dit heel lang duurt om te vervangen. Daarom is er een alternatief nodig. De resterende mogelijkheden zijn:

- Kabelschermen,
- filteren aan de ontvanger,
- en filteren aan de zender.

Een kabelschermer heeft meerdere vormen. Één van die vormen is een volledig scherm dat voor of rondom het te beschermen apparaat staat. In [31] is een EMP filterende kast beschreven die gebaseerd is op dit principe. Hierbij is belangrijk op te merken dat ook de kabels die buiten deze kasten liggen dan afgeschermd moeten worden. Sectie 5.2.3 van de masterproef toont de resultaten voor het gebruik van afscherming. Bij deze testen is de EMP filterende kast nagebootst met behulp van aluminiumfolie. Daarnaast kan de bron ook omkaderd worden met een kabelschermer.

Als de storing niet te voorkomen is door shielding, dan moet het zoveel mogelijk beperkt worden met behulp van filtering. Ferrietkernen zijn een voorbeeld van filters. Het gebruik van ferrietkernen komt vooral voor in elektronische circuits. De ferrietkernen reageren in deze toepassing als een laagdoorlaatfilter. Deze implementatie is ook aan Elia aangeraden. Sectie 5.2.2 van de masterproef geeft de resultaten van de testen met ferrietkernen aan de ontvanger weer.

In een GIS-onderstation kan de implementatie ook anders. In [6] zijn de ferrietkernen op de GIL geplaatst. Figuur 92 verduidelijkt deze toepassing. Het verschil is dat de ferrietkernen in dit geval interne oscillaties dempen in tegenstelling tot het dempen van EMI. In dit geval gedraagt de ferrietkern zich als een transformator zonder last. Hierdoor ontstaan wervelstroom- en hysteresisverliezen[6]. Het nadeel is dat ferrietkernen in verzadiging kunnen gaan bij gebruik van hoge frequenties. Wanneer de ferrietkern in verzadiging gaat, verliest de kern zijn filtervermogen [33].



*Figuur 92: ferrietkernen op de GIL [6, p. 2]*

Uit verder onderzoek van ondermeer He J. [6] kunnen nog enkele conclusie getrokken worden. Ten eerste is vastgesteld dat de ferrietkernen effect hebben op de VFTO's (very fast transient overvoltages). Volgens [35] kunnen ferrietkernen een demping tot 30 % van de VFTO's veroorzaken. Het effect van de demping hangt af van het aantal ferrietkernen, de grootte en de permeabiliteit. Hoe groter de permeabiliteit, hoe beter de demping. Daarnaast is de toename van het effect ongeveer lineair met het aantal ferrietkernen die gemonteerd zijn op de fasegeleider[39].

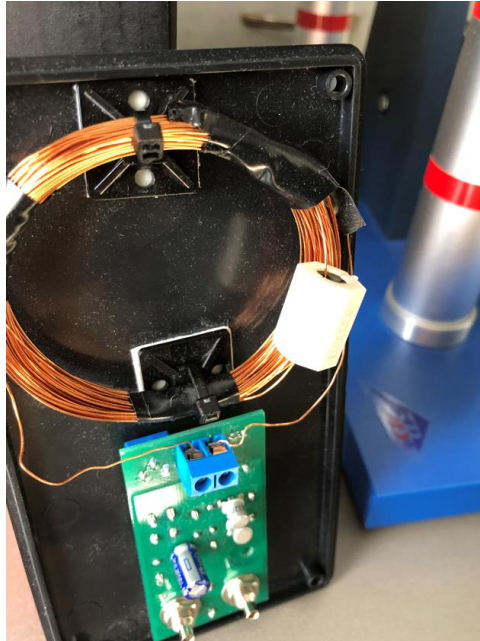
Het aantal ferrietkernen die nodig zijn om de storing te verhinderen, hangt af van het soort ferrietkernen. Uit een simulatie van [6] toont aan dat volgens de theorie 5 ferrietkernen met een permeabiliteit van 1000 nodig om van 2,0 per unit naar de limiet van 1,2 per unit te zakken als de ferrietringen niet in verzadiging gaan. Het is onduidelijk wat de basis is voor de eenheid “per unit”. Uit een aantal onderzoeken, zoals [35], [39], blijkt dat er verzadiging optreedt bij deze ferrietkernen. Het ontwerp van de ferrietkernen wordt hierdoor complexer. Vervolgens maakt het de ferrietkernen als oplossing minder interessant en robuust [39]. Tot slot, zijn ferrietkernen ook in een 252 kV GIS-onderstation getest als de ringen in verzadiging gaan. In deze condities zijn 40 ferrietringen nodig om de overspanning van 1,45 per unit tot 1,2 per unit te reduceren. Dit is niet praktisch [6] en daardoor geen goede oplossing voor het EMC-probleem.

De conclusie is dat het niet makkelijk is het probleem aan te pakken zonder grote kosten te maken of een nieuwe inrichting van het onderstation moet gebeuren. Dit is de reden van het voorstel van de ferrietkernen te plaatsen bij de ontvanger. Als deze ferrietkernen bij de ontvanger toch niet voldoende afscherming bieden, zijn er andere oplossingen nodig zoals RLC ketens [5], [31] of een spiraalvormige dempende rail [35].

#### 5.2.2. Resultaten ferrietkernen

Bij deze testen is de spoel dus in dezelfde omstandigheden geplaatst als run 1. Dit houdt in dat de kleinste spoel genomen is op de kortste afstand tussen de spoel en de vonk. De spoel is naar de vonk gericht en de ontladingsbollen staan op 1,5 cm van elkaar af. Verder zijn hier ook 100 testen gedaan voor het aantal keer dat de LED aangaat. Daarnaast zijn er weer telkens 10 metingen gedaan met de oscilloscoop om de geïnduceerde spanning te meten.

Er zijn verschillende manieren om een ferrietkern te bevestigen. Bij de eerste test is de ferrietkern rond 1 draad of winding gemonteerd. Dit is de eenvoudigste manier. Figuur 93 toont hoe de ferrietkern gemonteerd is. In Tabel 11 staan de resultaten van de testen waarbij de ferrietkern rond 1 winding is gemonteerd. Op deze manier is het makkelijk de nieuwe resultaten te vergelijken.



*Figuur 93: ferriekern rond 1 winding*

Tabel 11: resultaten ferriekern rond 1 winding

1 winding	Zonder ferriekern	Met ferriekern	Verandering [%]
Aantal keer dat het ledje aangaat [/]	100	22	78
	100	19	81
Gemiddelde	100	20,5	79,5
Gemiddelde geïnduceerde spanning [mV]	842,2	519,5	36,969
	426,9	375,3	12,087
Gemiddelde	625,55	447,4	28,479

Uit Tabel 11 blijkt dat een ferriekern rond één winding het effect niet volledig wegwerkt. Bij het aantal keer dat het ledje aangaat is er een gemiddelde verandering van 79,5% te zien. Dit is wel een grote verandering en op basis van dit zijn ferriekernen dus wel nuttig. De volgende metingen gaan over de geïnduceerde spanning. Deze resultaten zijn moeilijker te interpreteren omdat er een spreiding is op de metingen. Deze was groot genomen omdat er slechts een goede inschatting nodig was. Dit maakt het niet makkelijk om een correcte conclusie te nemen. Uit de resultaten blijkt dat de verandering wel groter is dan de geaccepteerde variantie. De verandering is dus veroorzaakt door de ferriekern.

Ten eerste is er een groot verschil tussen de twee metingen van de geïnduceerde spanning op te merken als er geen ferriekern is gemonteerd. De tweede meting heeft een geïnduceerde spanning van ongeveer de helft van de eerste meting. Bij Figuur 66 zijn er ook rare waarden vastgesteld. Hier zijn heel hoge waarden als extreme waarden gezien. De waarde van meting 1 zou dus een extreme waarde kunnen zijn. Er is ook een andere theorie. Het is mogelijk dat er twee niveaus zijn van gemeten waarden afhankelijk van de oriëntatie. Dit zou te maken kunnen hebben met de

richting van de stroom. Zoals eerder is vastgesteld bij Figuur 55 heeft de oriëntatie een invloed op het gedrag. Dit zou kunnen betekenen dat als de stroom goed staat zodat de optocoupler deze doorlaat dat er hoge gemeten worden. Als die optocoupler de meerderheid van de stroom dan niet doorlaat, bevat het resultaat lage waarden. Er is ook al vastgesteld dat de richting van de stroom niet vasthangt met 1 oriëntatie en kan variëren in de tijd. Bijlage C legt dit verder uit.

Bij run 1 van Figuur 66 is er rond de 350 mV en de 1,2 V gemeten. Het lage niveau zit dan rond de 350 mV en het hoge niveau rond de 1,2 V. Bij andere runs zijn er ook hoge en lage waarden gemeten. Bij de meting van Tabel 11 is 426,9 mV dan van het lage niveau en 842,2 mV van het hoge niveau. Het lage niveau komt hier overeen en ligt binnen de spreiding. De metingen van 1,2 V zijn ook niet consistent in responsie. Dit kan duiden op een foute meting en dus een mogelijke verklaring. De exacte verklaring is niet duidelijk. Om deze reden is er steeds een referentiemeting gedaan zodat het effect van de ferrietkern op een correcte manier te bepalen is.

Verder blijkt uit Tabel 11 dat over het algemeen de ferrietkern wel degelijk een effect heeft. De ferrietkern veroorzaakt een daling van ongeveer 37% bij de eerste meting en een daling van ongeveer 12 % bij de tweede meting. Het percentage van de tweede meting is gezakt ten opzichte van de eerste en is ongeveer een derde van de eerste meting. In gemeten waarde stelt die 12 % niet zo heel veel voor, namelijk 51,6 mV. Deze waarde is niet groter dan de geaccepteerde variantie van ongeveer variantie 150 mV. Het is dus niet duidelijk of de ferrietkern bij de tweede meting heeft gewerkt. De gemiddelde verandering ligt dan rond de 28,5 %. Uit het gemiddelde van deze resultaten blijkt dat de ferrietkern wel degelijk een goed effect heeft.

Er blijft wel nog een deel van de storing over. Het effect van de ferrietkern rond 1 winding is dus nog niet voldoende om het probleem volledig weg te werken. Daarom zijn er meer testen nodig om andere manieren uit te testen. In [4] staat dat meerdere windingen een beter effect zouden hebben. Volgende testen kunnen dit bewijzen. Figuur 94 toont de montage van de ferrietkern rond 2 windingen en Tabel 12 geeft de resultaten.





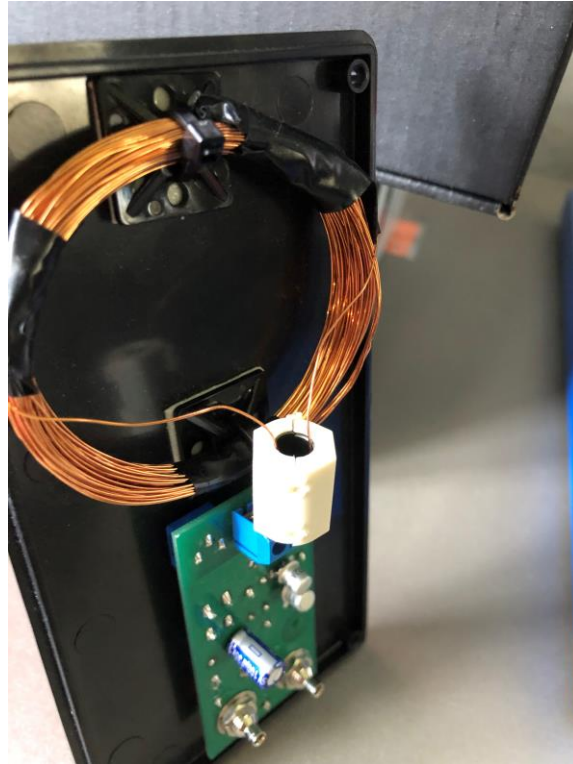
*Figuur 94: ferrietkern rond 2 windingen*

Tabel 12: resultaten ferrietkern rond 2 windingen

2 windingen	Zonder ferrietkern	Met ferrietkern	Verandering [%]
Aantal keer dat het ledje aangaat [/]	100	100	0
	100	100	0
Gemiddelde	100	100	0
Gemiddelde geïnduceerde spanning [mV]	842,2	534,8	35,113
	426,9	443,8	-3,959
Gemiddelde	625,55	489,3	21,781

Bij deze nieuwe manier is dus dezelfde test uitgevoerd, maar dan met 2 windingen door de ferrietkern. Globaal gezien is dit absoluut geen verbetering ten opzichte van de vorige manier. Tabel 12 toont dat de ferrietkern helemaal geen effect heeft op het aantal keer dat de LED aangaat en dit voor beide metingen. Dit is heel raar aangezien er wel een effect was bij 1 winding door de ferrietkern. Voor de metingen van de geïnduceerde spanning komt er een bekend patroon voor. Er is een groot verschil bij de eerste meting en een klein verschil bij meting 2. De stijging van gemeten waarde van meting 2 geeft aan dat de ferrietkern geen effect heeft gehad in deze meting of toch minder dan de spreiding van de metingen. Kortom deze manier van monteren is niet beter dan de vorige. De reden voor de slechte werking voor deze methode is onbekend.

Een volgende manier van monteren heeft te maken met common mode. Hier is geen uitleg over gegeven in de literatuurstudie, maar enkele bronnen zoals [5], [15] geven meer uitleg over common en differential mode. Bij deze manier van monteren moet de start en het einde van de spoel door de ferrietkern gaan. Figuur 95 toont de montage van de ferrietkern en Tabel 13 de resultaten.



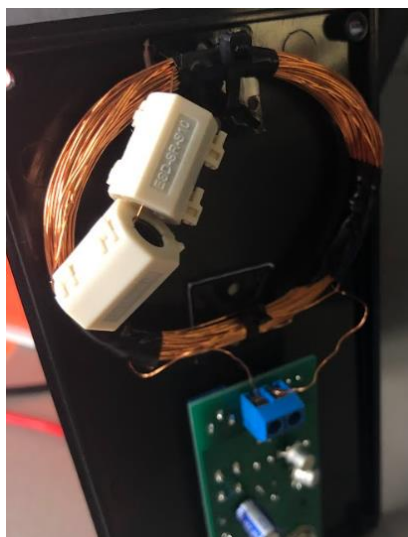
*Figuur 95: ferrietkern voor common mode*

Tabel 13: resultaten voor common mode methode

Common mode methode	Zonder ferrietkern	Met ferrietkern	Verandering [%]
Aantal keer dat het ledje aangaat [/]	100	100	0
	100	100	0
Gemiddelde	100	100	0
Gemiddelde geïnduceerde spanning [mV]	842,2	549,1	33,378
	426,9	383,7	10,119
Gemiddelde	625,55	466,4	25,442

Ook Tabel 13 geeft een tegengesteld beeld. Het effect op het aantal keer dat de LED aangaat is onbestaande. Terwijl het effect op de geïnduceerde spanning toch significant is. De ferrietkern heeft enkel een effect gehad op de geïnduceerde spanning. Deze is gemiddeld gedaald met ongeveer 25,5 %. Hier valt ook op dat het effect bij meting 2 weer lager is dan bij meting 1. Het verschil in gemeten waarde voor meting 2 is maar 42,6 mV. Dit is nog minder dan de eerste keer. Dit resultaat ligt dus ook nog binnen de spreiding. Het effect bij meting 2 is dus verwaarloosbaar. De conclusie is dat de ferrietkern enkel bij meting 1 van de geïnduceerde spanning heeft gewerkt.

De resultaten van deze testen zijn verrassend. Het effect is minimaal. Er is nog een andere manier om het effect mogelijks te verhogen. Dit houdt in om meer dan 1 ferrietkern te gebruiken. Figuur 96 toont daarom de montage van 2 ferrietkernen in plaats van 1. Tabel 14 geeft de resultaten van deze manier weer.



*Figuur 96: 2 ferrietkernen rond 1 winding*

Tabel 14: resultaten 2 ferrietkernen rond 1 winding

2 ferrietkernen rond 1 winding	Zonder ferrietkern	Met ferrietkern	Verandering [%]
Aantal keer dat het ledje aangaat [/]	100	7	93
	100	30	70
Gemiddelde	100	18,5	81,5
<hr/>			
Gemiddelde geïnduceerde spanning [mV]	842,2	573,5	30,417
	426,9	538,75	-18,060
Gemiddelde	625,55	547,8	12,429

Tabel 14 geeft een totaal verschillend beeld dan de twee vorige manieren. Hieruit blijkt dat voor het aantal keer dat het ledje aangaat en de geïnduceerde spanning er een daling is in storing. De verandering voor het aantal keer dat de LED aangaat is zelfs heel groot. De gemiddelde verandering is dan ook 81,5 %. Verder is er niet veel verschil met de eerste meting voor het plaatsen van 1 ferrietkern. Hier was er een verandering van 79,5 %. Één ferrietkern is dus efficiënter vergeleken met de kosten voor beide opties. De resultaten van de geïnduceerde spanning zijn vergelijkbaar met de vorige. Bij meting 1 is er weer een grotere verandering dan bij meting 2. Daarnaast valt ook op dat de gemeten waarde groter is dan de initiële waarde. Die verandering van -18,06 % is ook relatief groot en zoekt al de grens op van de geaccepteerde variantie. Over het algemeen hebben de 2 ferrietkernen wel een effect. Vooral op het aantal keer dat de LED aangaat en in meting 1 van de geïnduceerde spanning.

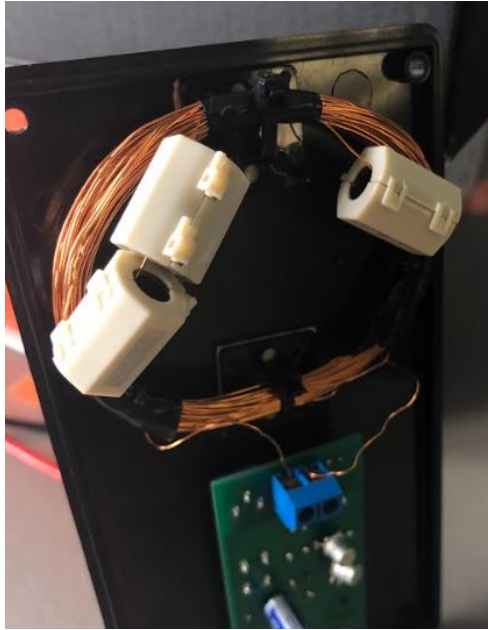
Er zijn nog testen uitgevoerd, aangezien de resultaten verrassend zijn. Hier is/zijn de ferrietkern(en) nog anders gemonteerd. Figuur 97-100 tonen deze verschillende manieren. Om deze resultaten beter met elkaar te kunnen vergelijken en om verbanden te zoeken is er een samenvattende tabel gemaakt. Tabel 15 vat alle resultaten van alle testen met betrekking tot ferrietkernen samen. Aan de hand van deze tabel is het makkelijker een goed besluit te formuleren.



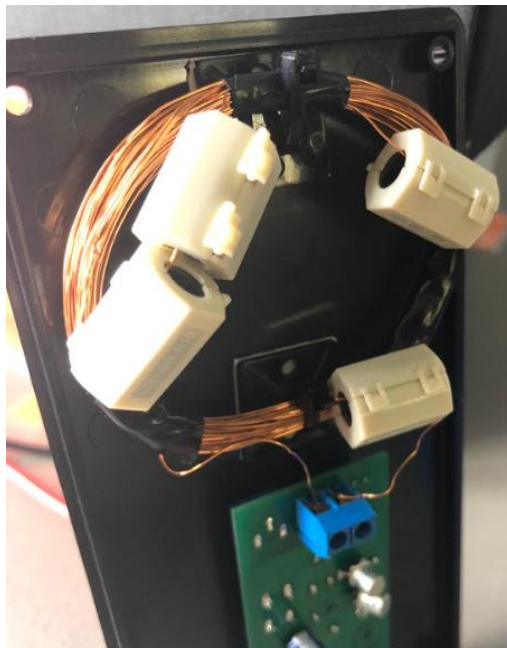
*Figuur 97: ferrietkern rond 3 windingen*



*Figuur 98: ferrietkern rond 4 windingen*



*Figuur 99: 3 ferrietkernen rond 1 winding*



*Figuur 100: 4 ferrietkernen rond 1 winding*

Tabel 15: samenvattende tabel van resultaten van de ferrietkernen

Montagemogelijkheden	aantal keer dat ledje aangaat [/]						Geïnduceerde spanning [mV]					
	meting 1	procentueel verschil met origineel [%]	meting 2	procentueel verschil met origineel [%]	Gemiddelde	procentueel verschil met origineel gemiddelde [%]	meting 1	procentueel verschil met origineel [%]	meting 2	procentueel verschil met origineel [%]	Gemiddelde	procentueel verschil met origineel gemiddelde [%]
<b>origineel (zonder ferrietkern)</b>	<b>100</b>		<b>100</b>		<b>100</b>		<b>824,2</b>		<b>426,9</b>		<b>625,55</b>	
common mode 2	100	0	100	0	100	0	549,1	33,378	383,7	10,119	466,4	25,442
rond 1 winding	22	78	19	81	20,5	79,5	519,5	36,969	375,3	12,087	447,4	28,479
rond 2 windingen	100	0	100	0	100	0	534,8	35,113	443,8	-3,959	489,3	21,781
rond 3 windingen	100	0	100	0	100	0	534,1	35,198	494,2	-15,765	514,15	17,808
rond 4 windingen	38	62	59	41	48,5	51,5	517,7	37,188	447,7	-4,872	482,7	22,836
2 ferrietkernen	7	93	30	70	18,5	81,5	573,5	30,417	504	-18,060	538,75	13,876
3 ferrietkernen	7	93	25	75	16	84	528,3	35,901	470,9	-10,307	499,6	20,134
4 ferrietkernen	14	86	0	100	7	93	626,7	23,963	468,9	-9,838	547,8	12,429

Tabel 15 toont dat het effect van de ferrietkernen in het algemeen niet zo is als verwacht. Ten eerste is het resultaat voor het aantal keer dat de LED aangaat bij 3 montage mogelijkheden 2 keer nul. De ferrietkern heeft dus helemaal geen effect gehad bij deze montage mogelijkheden. De optie waar 1 ferrietkern rond 1 winding gemonteerd is, heeft wel een groot effect. Het gemiddelde effect van de 2 metingen is 79,5 %. Verder is er enkel een verbetering van effect als er meerdere ferrietkernen geplaatst zijn. Dit effect stijgt volgens de gemiddeldes ongeveer lineair, want het gemiddelde effect van 4 ferrietkernen is 93 % en is het grootste. De optie met 2 of 3 ferrietkernen heeft een gemiddeld effect van respectievelijk 81,5 % en 84 %. Dit lineair gedrag klopt wel niet als er enkel naar meting 1 of 2 gekeken wordt. Bij meting 1 heeft de laatste optie een kleiner effect dan 2 of 3 ferrietkernen. Bij meting 2 is het effect van 1 ferrietkern groter dan het effect van 2 of 3 ferrietkernen. Dit duidt dus op inconsistentie. Ook hier is het gedrag dus niet constant. Verder hebben meer windingen geen verbeterd effect tot gevolg. Enkel de metingen voor 1 en 4 windingen hebben de storing afgezwakt. Van deze metingen was het effect van 1 winding ook steeds groter. Dit is vreemd en momenteel is daar geen verklaring voor. Daarnaast is het effect van de common mode meting ook niet beter dan die van 1 winding. Kortom is het effect voor het aantal keer dat de LED aangaat niet zo goed. Enkel bij de ferrietkern(en) rond 1 winding is er wel een groot effect.

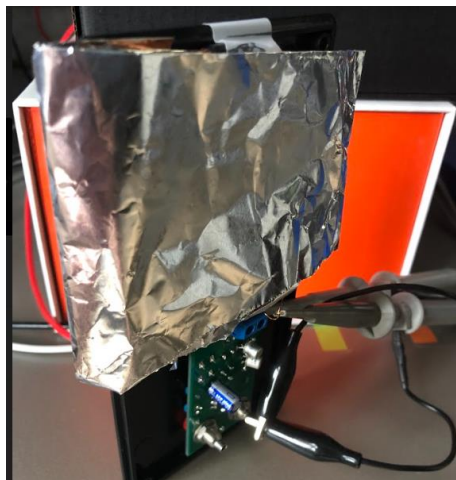
Ten tweede geven de metingen voor de geïnduceerde spanning enkele opmerkelijke inzichten. Zo is er te zien dat er tussen meting 1 en 2 altijd een groot verschil is vast te stellen. Dit heeft te maken met de referentiemeting. Bij meting 2 is deze bijna de helft. Het effect bij meting 2 is ook steeds veel kleiner dan bij meting 1. Dit is misschien nog te verwachten aangezien de referentiewaarde ook veel kleiner is, maar het effectieve effect is kleiner dan de spreiding van de meetwaarden. Daarom is er ook 6 keer een negatief effect waargenomen. De verzwakking van de storing bij meting 2 is dus verwaarloosbaar. Hierdoor geven de gemiddeldes voor de geïnduceerde spanning een verkeerd beeld. Bij de resultaten van de eerste meting is er nog iets op te merken. Het effect bij elke optie schommelt rond de 30 %. Het kleinste effect is gemeten bij de optie met 4 ferrietkernen en dat effect is een verzwakking van 33,963 %. Dit is heel tegenstrijdig tegen de resultaten van hoe vaak de LED aangaat. Hier gaf deze optie het beste resultaat. Vervolgens is het grootste effect bij de geïnduceerde spanning gemeten bij de optie waar 4 windingen door 1 ferrietkern gaan. Dit effect is een verzwakking van 37,188 %. Ook dit is verrassend, want deze optie gaf bij het aantal keer dat de LED aangaat ook geen goed resultaat. Verder liggen de resultaten van meting 1 allemaal net boven 500 mV en die van meting 2 er onder. Een mogelijke verklaring is dat ferrietkernen de storing tot aan 500 mV kunnen verzwakken. Alles wat daaronder zit ondervindt geen effect meer van de ferrietkernen. Hierdoor is er bij meting 2 geen effect waar te nemen. Dit kan ook een verklaring zijn waarom het effect bij meting 1 steeds rond de 30 % schommelt. Als 1 ferrietkern rond 1 winding de storing al kan verzwakken tot 500 mV dan hebben de andere opties geen bijkomend effect meer. Dit kan getest worden door een grotere referentiewaarde te gebruiken.

Samengevat hebben de ferrietkernen niet het gewenste resultaat. Ze verzwakken de storing slechts in enkele metingen en ook niet altijd consistent. Het gedrag is onvoorspelbaar. Daarom kan er beter een andere oplossing gezocht worden.



### 5.2.3. Resultaten afscherming

Eén van die andere alternatieven is volledig afschermen van de apparatuur. In de literatuurstudie is een EMP-filterende kast en kabelschem voorgegesteld als alternatief. Dit alternatief is gebaseerd op het volledig afschermen van gevoelige apparatuur inclusief de in- en uitgaande kabels. Omdat deze kasten niet ter beschikking zijn tijdens het onderzoek, is er een soortgelijke situatie gecreëerd. Door aluminiumfolie rond de spoel te maken in de testopstelling is deze kast nagebootst. Figuur 101 toont hoe de spoel is afgeschermd aan de hand van aluminiumfolie. Voor dit alternatief is er maar 1 test uitgevoerd.



*Figuur 101: de afscherming van de spoel*

Tabel 16: resultaten met afscherming

Afscherming	Zonder afscherming	Met afscherming	Verandering [%]
Aantal keer dat het ledje aangaat [/]	100	0	100
Gemiddelde geïnduceerde spanning [mV]	508,9	393,9	22,598

Uit de resultaten blijkt dat de afscherming over het algemeen beter werkt. De verandering voor het aantal keer dat het ledje aangaat is 100 %. Dit betekent dat de optocoupler niet meer schakelt door een vonk. Als dit gedrag consistent is, is dit een heel goede oplossing voor in de onderstations. De afscherming voor de gemeten, geïnduceerde spanning is daarentegen minder effectief. De verandering in gemeten spanning is ongeveer 22,6 %. Na de afscherming is er nog steeds een spanning van 393,9 mV te meten. Dit percentage is vergelijkbaar met het gemiddelde percentage bij de ferrietkernen. Daar was het effect wel niet consistent. De geïnduceerde spanning is wel kleiner dan de gemiddelde gemeten waarden bij de ferrietkernen. Bij de apparatuur met een optocoupler is de geïnduceerde spanning ook niet zo een probleem, wel het ongewild schakelen van de optocoupler. Dat is met deze methode volledig opgelost. Er is wel maar één test gedaan en dus kunnen de resultaten nog wat afwijken. Als verder onderzoek uitwijst dat afscherming een consistent resultaat geeft, dan is afscherming een geschikte oplossing voor het EMC-probleem.



#### 5.2.4. Conclusies

In dit hoofdstuk zijn er een aantal dingen besproken. Ten eerste besprak dit hoofdstuk de verbeterpunten van de testopstelling. Deze verbeterpunten waren niet noodzakelijk voor deze masterproef aangezien de karakterisatie en het testen van de ferrietkernen kon gebeuren met de huidige opstelling. In het onderdeel van verbeterpunten zijn 5 mogelijkheden gegeven. De drempelspanning van de optocoupler was één van de punten. Verder is om nauwkeuriger te werken professioneel materiaal (een vaste opstelling en een klimatiseringskamer) aangeraden. Dit verhoogt de betrouwbaarheid van de metingen.

Vervolgens zijn er ook enkel voorstellen gedaan voor toekomstig onderzoek. Veel van die onderzoeken hebben geen nut als het gaat over het EMC-probleem dat is besproken in de inleiding. Het belangrijkste onderzoek voor dit probleem zijn testen in een echt onderstation. Deze testen zullen veel meer inzicht geven over het EMC-probleem en de mogelijke oplossing, maar de vonk ontstaat niet bij elk schakelmannoeuvre. Dit vermoedelijk de testen. Nog andere voorbeelden van toekomstig onderzoek zijn het uitvoeren van meerdere testen om meer inzicht te krijgen in de consistentie en het testen van de invloed van de oriëntatie.

Ten derde ging het over de resultaten van de ferrietkernen. Deze zijn helemaal niet wat er verwacht was. De verzwakking van de storing was niet altijd consistent en bij heel wat montagevarianten kleiner dan de geaccepteerde variantie. Daarnaast was het effect soms zelfs kleiner dan de spreiding waardoor er een negatief effect waar te nemen is. De resultaten van het aantal keer dat de LED aangaat en van de geïnduceerde spanning spreken elkaar ook tegen. Bijvoorbeeld bij de meting van 4 ferrietkernen is er een verzwakking van 93 % voor het aantal keer dat het ledje aangaat en voor de geïnduceerde spanning maximaal 23,963 %. Om deze redenen is er besloten dat de ferrietkernen niet voldoen om het EMC-probleem op te lossen.

Daarom is er verder gezocht. Het alternatief dat nog is voorgesteld is een volledige afscherming van de meet- en regelapparatuur of de bron in het onderstation. In de testopstelling is dit gedaan aan de hand van aluminiumfolie. Door een beperkte tijd zijn er niet veel testen gedaan. Uit de resultaten die er zijn, is vast te stellen dat deze manier effectiever is dan de ferrietkernen. De gemeten, geïnduceerde spanning is kleiner dan die bij de ferrietkernen. Dit verschil is wel klein. Het belangrijkste is dat het schakelen van de optocoupler wel elke keer voorkomen is. Hier kan ook nog verder onderzoek gedaan worden.

## 6. Besluit

Deze masterproef heeft 3 doelen. Het eerste doel is het verbeteren van de testopstelling zodat het gedrag consistent is. De bedoeling was dit te doen aan de hand van een iteratief proces met een analyse op basis van DoE. Tijdens deze analyse was het ook belangrijk om te bepalen welke parameters belangrijk zijn en te identificeren wat het inconsistent gedrag veroorzaakt. Het tweede doel was het zoeken van een oplossing voor het EMC-probleem. Het derde doel was een diepgaande studie over ferrietkernen rond de fasegeleiders. Hoofdstuk 2 en 3 geven een duidelijker beeld van de situatie in de onderstations en de methode die gebruikt is voor de analyse.

Hoofdstuk 4 en 5 bespreken de analyse, de resultaten en enkele verbeteringen en toekomstige onderzoeken. Hoofdstuk 4 begon met het controleren van consistent gedrag voor het aantal keer dat de LED aangaat. Dit was heel verrassend, want het gedrag was consistent. Er waren dus geen verbeteringen nodig om de werking van de ferrietkernen en de alternatieven te testen. Daarnaast is er ook nog het karakteriseren van de testopstelling aan de hand van de DoE-analyse. Hoofdstuk 3 legt deze analyse uit. Tijdens de analyse zijn er heel wat interessante conclusies vastgesteld. De belangrijkste conclusie is dat hoofdeffect E of de afstand tussen de vonk en de spoel het grootste effect heeft op het resultaat. Daarnaast zijn de interacties BD en CD het meest significant. Deze 3 factoren hebben samen een invloed van 79,26 %. Vervolgens is ook ontdekt dat de oriëntatie een grote invloed heeft op het resultaat. Ten eerste is het resultaat verschillend als de spoel er schuin voor gehouden wordt in plaats van recht ervoor. Hiervoor is voorlopig nog geen verklaring. Ten tweede kan het resultaat verschillend zijn als de spoel omgedraaid is. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de richting van de geïnduceerde stroom en de optocoupler. Een toekomstig onderzoek kan hier meer duidelijkheid over bieden. Doel 1 is geslaagd, al zijn er nog een aantal onduidelijkheden die nog verder onderzoek vereisen. Een voorbeeld is de oriëntatie van de spoel.

Het tweede doel is het zoeken van een oplossing voor het EMC-probleem. Dit is vooral aangepakt in hoofdstuk 5. De focus lag op ferrietkernen. In hoofdstuk 5 zijn dan ook verschillende montage-mogelijkheden getest voor de 2 responsies. Tabel 15 vat de resultaten samen van deze testen. Hieruit bleek dat ferrietkernen geen betrouwbare oplossing zijn. Het resultaat is niet consistent voor beide responsies. Een voorbeeld is het effect van 1 winding door 1 ferrietkern dat opeens verdwijnt als er 2 windingen door de ferrietkern gaan of de verschillende verminderingen van de geïnduceerde spanning. Dit tweede zou ook te maken kunnen hebben met de oriëntatie van de spoel. Daarnaast is het mogelijk dat voor deze responsies de verzwakking een limiet heeft. Doordat het effect van de ferrietkernen zo onvoorspelbaar is, is het beter een andere oplossing te zoeken.

Dat alternatief is een EMP-filterende kast/kabelscherm voor de gevoelige apparatuur. Dit is nagebootst met behulp van aluminiumfolie. Hier is er maar 1 test uitgevoerd door beperkte tijd. Een toekomstig onderzoek kan de voorlopige resultaten verifiëren. Uit deze testen blijkt dat de geïnduceerde spanning nog steeds niet helemaal geëlimineerd is. De verandering is wel vergelijkbaar en het gemiddelde van de effectieve waarde is ook lager dan de gemiddeldes bij de ferrietkernen. Daarnaast is het ongewenst schakelen van de optocoupler wel voorkomen. Hierdoor is een afscherming een goede oplossing voor de apparatuur met optocouplers. Het tweede doel is dus ook geslaagd. Het heeft enkel bevestiging nodig.

Sectie 5.2.1 besprak de literatuurstudie over de alternatieve manier om ferrietkernen te gebruiken. Deze literatuurstudie toonde aan dat ferrietkernen op de fasegeleiders wel effectief de storing kunnen verminderen. Deze vermindering gaat tot 30 %. Dit is afhankelijk van het aantal ringen en de grootte daarvan. Vervolgens heeft de permeabiliteit ook een invloed. Een grotere permeabiliteit zorgt voor een grotere demping. In de case die bestudeerd is waren 5 ferrietkernen voldoende om de storing tegen te werken. Hier werd de verzadiging niet in rekening gebracht. Wanneer dit wel werd gedaan, bleek dat er 40 ferrietkernen nodig waren. Dit aantal is niet praktisch en daarvoor ook geen goede oplossing voor het probleem. Dit leidde het onderzoek terug naar de drie basis oplossingen van een EMC-probleem, namelijk schielding, filtering en equipotential bonding. Equipotential bonding is omwille van de verf op het omhusel van de GIL niet gekozen. De andere twee zijn onderzocht in sectie 5.2.2 en 5.2.3.

Tot slot zijn er ook enkele aanbevelingen gedaan voor verbeteringen en toekomstige onderzoeken. Deze zijn te vinden in hoofdstuk 5. Er zijn een vijftal verbeterpunten aangekaart. De belangrijkste zijn het gebruiken van professioneel materiaal en het afschermen van bepaalde delen om de ruis te verminderen. Bijvoorbeeld een professionele luchtvochtigheidssensor en een klimatiseringskamer. Met deze apparatuur zijn de omstandigheden beter te controleren en zullen de resultaten preciezer zijn. Vervolgens zijn er ook een aantal voorstellen gedaan voor verder onderzoek. Enkele voorbeelden zijn het herhalen van de testen zodat er meer gecontroleerd worden op de consistentie. Daarnaast kan de range van parameters vergroot worden om te kijken wat de invloed is. Vervolgens is het testen van de invloed op de oriëntatie ook een interessant onderzoek.

## Referentielijst

- [1] Elia group nv, "About the company," Oct. 03, 2021. <https://www.elia.be/en/company> (accessed Oct. 16, 2021).
- [2] Prof. ir. Annick Dexters, *Power systems [cursus]*, 1st ed., vol. 1. Diepenbeek: Gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen UHasselt & KULeuven, 2020.
- [3] EUROLAB laboratory services, "Wat is EMC," 2021. [Online]. <https://www.emctestleri.com/nl/sss/emc-nedir#page> (accessed Oct. 16, 2021).
- [4] D. Empain, "Elia\_Van Maerlant-overspanningsmeting op branddetectie lus Voorbereid voor Elia," Linkebeek, Jul. 2021.
- [5] M. de Ridder, "Analyse van EMC-effecten bij schakelen op hoogspanning," eindwerk, KULeuven, Gent, 2020.
- [6] J. He, Y. Guan, W. Liu, W. Chen, and Z. Li, "Design Optimization of Ferrite Rings for VFTO Mitigation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1181–1186, Jun. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2502458.
- [7] B. L. Agba, F. Sacuto, M. Au, F. Labeau, and F. Gagnon, "Wireless Networks Wireless Communications for Power Substations: RF Characterization and Modeling," online, Jun. 2018.
- [8] T. Krieg and J. Finn, "CIGRE Green Books Substations International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B3: Substations," Adelaide, 2019.
- [9] B. Jansen *et al.*, *Phase to phase*, 1st ed., vol. 1. Phase to Phase, 2011. Accessed: Nov. 24, 2021. [Online]. Available: [https://phasetophase.nl/boek/boek\\_1\\_2.html#\\_2.4.6](https://phasetophase.nl/boek/boek_1_2.html#_2.4.6)
- [10] Elia group nv, "380KV-NET: ruggengraat van het hoogspanningsnet," *infopanelen open wervendag*. 2019.
- [11] TenneT TSO and Liander, "Werken aan hoogspanning Een nieuw transformatorstation in de Haarlemmermeer," Arnhem, Jan. 2021. [Online]. Available: [www.liander.nl/haarlemmermeer](http://www.liander.nl/haarlemmermeer).
- [12] TenneT TSO, "Hoogspannings-station Breukelen Schakelinstallatiekeuze," Arnhem, Jul. 2012.
- [13] W. Labos and P. Grossmann, "Case study: 80 kA Gas Insulated Substation Bergen Switching Station; New Jersey," in *2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Apr. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/TDC.2014.6863502.
- [14] M. A. Haseeb and M. J. Thomas, "Disconnecter switching induced transient voltage and radiated fields in a 1100 kV gas insulated substation," *Electric Power Systems Research*, vol. 161, pp. 86–94, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.04.001.
- [15] S. Levent, *A practical guide to EMC engineering*, 1st ed., vol. 1. Norwood: Artech House, 2017.
- [16] IEC, "77A/398/FDIS FINAL DRAFT INTERNATIONAL STANDARD PROJET FINAL DE NORME INTERNATIONALE Project number Numéro de projet," Geneva, Aug. 2002.
- [17] J. Hoeffelman, "Sources of disturbances," Brussel, Dec. 2007.

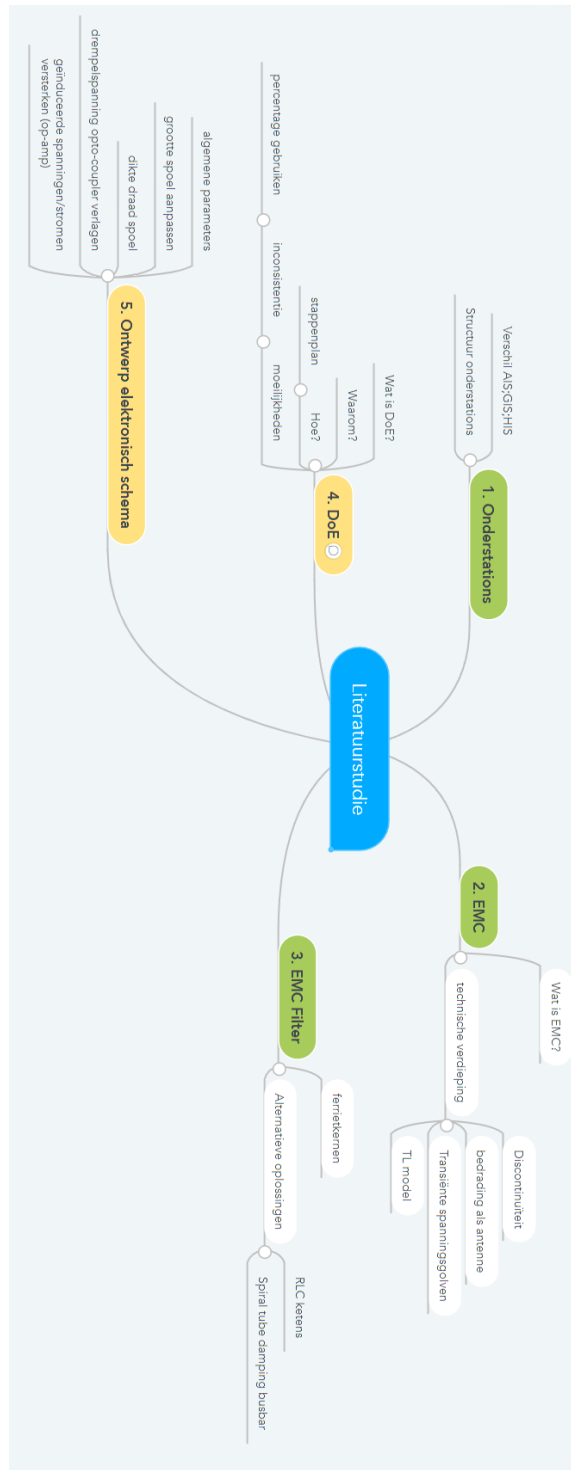
- [18] SEW-EURODRIVE, "Drive Technology \ Drive Automation \ System Integration \ Services," Bruchsal, Germany, Apr. 2013.
- [19] Vlaanderen, "Vlaanderen - elektromagnetische straling.," [Online]. <https://www.vlaanderen.be/elektromagnetische-straling> (accessed Nov. 24, 2021).
- [20] Vlaanderen, "omgeving Vlaanderen – normen zendantennes.," [Online]. <https://omgeving.vlaanderen.be/normen-zendantennes> (accessed Nov. 24, 2021).
- [21] K. L. Smith, "Transmission line theory overview," vol. 1. EMViso, Oct. 20, 2020. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=EgqniE\\_wW90](https://www.youtube.com/watch?v=EgqniE_wW90) (Accessed: Nov. 27, 2021.)
- [22] D. Su, S. Xie, F. Dai, Y. Liu, and Y. Jia, *Theory and Methods of Quantification Design on System-Level Electromagnetic Compatibility*, 1st ed., vol. 1. Signapore: Springer, 2019.
- [23] V. Muthukrishnan, "Cutoff Frequency: What is it? Formula And How To Find it," Jul. 18, 2021. [Online]. [https://www.electrical4u.com/cutoff-frequency/#:~:text=What%20is%20Cutoff%20Frequency%3F,-Cutoff%20frequency%20\(also&text=The%20cutoff%20frequency%20or%20corner,the%20power%20in%20the%20passband.](https://www.electrical4u.com/cutoff-frequency/#:~:text=What%20is%20Cutoff%20Frequency%3F,-Cutoff%20frequency%20(also&text=The%20cutoff%20frequency%20or%20corner,the%20power%20in%20the%20passband.) (accessed Feb. 06, 2022).
- [24] B. Smolders, "Transmission lines, introduction web lecture (TU Eindhoven)," 1, Aug. 05, 2015. [Online]. <https://www.youtube.com/watch?v=sVBFdYgBre4> (accessed Nov. 27, 2021).
- [25] M. Steer, "Transmission line theory," Mar. 22, 2021. [Online]. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical\\_Engineering/Electronics/Microwave\\_and\\_RF\\_Design\\_II\\_-\\_Transmission\\_Lines\\_\(Steer\)/02%3A\\_Chapter\\_2/2.02%3A\\_Section\\_2-](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Electrical_Engineering/Electronics/Microwave_and_RF_Design_II_-_Transmission_Lines_(Steer)/02%3A_Chapter_2/2.02%3A_Section_2-) (accessed Nov. 27, 2021).
- [26] C. Poole and I. Darwazeh, "Transmission line theory," in *Microwave Active Circuit Analysis and Design*, Elsevier, 2016, pp. 51–88. doi: 10.1016/b978-0-12-407823-9.00002-0.
- [27] hoogspanningsnet, "Hoogspanningsnet.com - Wisselmast," 2006. [Online]. <https://www.hoogspanningsnet.com/techniek/wisselmast/> (accessed Nov. 27, 2021).
- [28] D. Parnell, "An Introduction to Gas Insulated Electrical Substations Credit: 3 PDH."
- [29] S. Shahabi and A. Gholami, "Mitigation of switching-induced transient electromagnetic interference on control cable using Ni-Zn ferrite rings over cable sheath in gas-insulated substations," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 8, no. SUPL.1, 2013, doi: 10.1002/tee.21912.
- [30] K. Stockman, "ELEKTRICITEIT Deel 3: elektromagnetisme," Kortrijk, 2019.
- [31] V. Gurevich, "Protection of Substation Equipment Against EM Threats 72," Mar. 2017. [Online]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ubhasselt/detail.action?docID=4783904>. (accessed Nov. 27, 2021).
- [32] R. A. Almenweer, Y. Su, and X. Wu, "Comparison between suppressing approaches of very fast transient over voltages in gas insulated substation," in *Journal of Physics: Conference Series*, Sep. 2019, vol. 1303, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1303/1/012113.

- [33] M. Majidi, H. Javadi, and M. Manbachi, "A novel algorithm for frequency dependent modeling of ferrite ring and its optimum design to study VFTO behaviors within GIS," *Frontiers in Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 90–100, Mar. 2014, doi: 10.1007/s11708-013-0286-2.
- [34] Conrad, "Ferrietkernen." [Online]. <https://www.conrad.be/nl/o/ferriet-kernen-1021027.html> (accessed May 25, 2022).
- [35] R. A. Almenweer, S. Yixin, and W. Xixiu, "Numerical analysis of a spiral tube damping busbar to suppress VFTO in 1000 kV GIS," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 23, Dec. 2019, doi: 10.3390/app9235076.
- [36] R. de Weale, *Design of experiments (DoE) [cursus]*, 1st ed., vol. 1. Diepenbeek: UHasselt, 2021.
- [37] T. T. Allen, *Introduction to Engineering Statistics and Six Sigma*. Londen: Springer, 2006.
- [38] Philips, "Luchtvochtigheid in huis," 2022. [Online]. <https://www.philips.nl/c-m-ho/luchtzuiveraar-en-luchtbevochtiger/luchtvochtigheid-in-huis#:~:text=De%20ideale%20luchtvochtigheid%20in%20huis,voelt%20allereerst%20hard%20en%20overvelend.> (accessed Feb. 01, 2022).
- [39] S. Burow, G. U. Riechert, W. Köhler, and S. Tenbohlen, "New mitigation methods for transient overvoltages in gas insulated substations," 2012.



# Bijlagen

## Bijlage A: Overzicht van de literatuurstudie (p. 21)<sup>7</sup>



<sup>7</sup> De in geel aangeduide delen komen niet voor in het hoofdstuk Literatuurstudie. Deze zijn behandeld in een ander hoofdstuk.



## Bijlage B: Alle resultaten van de grensbepaling (afstand tot spoel)

### Dag 1:

grensbepaling van afstand tot spoel				
47%				
48%	kleinste spoel (met spoel naar vonk)	1,5	3,5	5,5
53%		5	altijd	altijd
		10	altijd	altijd
		15	heel weinig	heel vaak
		20	niet	soms
	kleinste spoel (met deksel naar vonk)	1,5	3,5	5,5
		5	niet	niet
		10	niet	niet
		15	niet	niet
		20	niet	niet

### Dag 2:

Aantal keer dat de led aangaat bij de	kleinste spoel (met spoel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]			5,5
5	nooit bij misalignments wel	zelden, wel bij MA	heel vaak, MA altijd
10	nooit bij misalignments soms	nooit, kort bij wel MA, andere nooit	nooit, MA kort bij altijd de andere nooit
15	nooit	nooit, kort bij soms wel MA, andere nooit	nooit, MA kort bij altijd de andere nooit
20	nooit	nooit	nooit
25	nooit	nooit	nooit

52%  
54%  
53%  
MA Misalignment

Aantal keer dat de led aangaat bij de	kleinste spoel (met deksel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]			5,5
5	altijd, ook misalignments	Altijd, ook MA	Altijd, ook MA
10	altijd, ook misalignments	Altijd, ook MA	Altijd, ook MA
15	vaak als je van 20 komt even moeilijk en dan bijna altijd	Altijd, ook MA	Altijd, ook MA
20	nooit	nooit, MA wel (iets korter naar het midden)	Altijd, ook MA
25	nooit	nooit	nooit

Aantal keer dat de led aangaat bij de	Grootste spoel (met spoel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]			5,5
5	nooit bij misalignments wel	nooit, wel bij misalignments af en toe (met periodes vaak en met periodes nooit)	vaak, MA altijd
10	nooit bij misalignments kort bij mij	enkel bij misalignment kort bij mij	altijd, MA kort bij altijd, andere nooit
15	nooit	nooit, enkel bij misalignments kort bij mij	zelden MA kort bij altijd, andere nooit
20	nooit	nooit	nooit
25	nooit	nooit	nooit

Aantal keer dat de led aangaat bij de		Grootste spoel (met deksel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5	5,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]				
5	nooit bij misalignments wel	nooit	MA kort bij altijd, andere vaak	soms, MA altijd
10	nooit bij misalignments kort bij mij	nooit	MA kort bij altijd, andere nooit	nooit, MA kort bij altijd de andere nooit
15	nooit	nooit		nooit, MA kort bij altijd de andere nooit
20	nooit	nooit		nooit
25		nooit		nooit

Aantal keer dat de led aangaat bij de		middelste spoel (met spoel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5	5,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]				
5	altijd, ook misalignments	Altijd, ook misalignments		Als midden van spoel ten hoogte van vonk is dan nooit als onderkant spoel ter hoogte van vonk is dan altijd MA altijd
10	altijd, ook misalignments	Altijd, ook misalignments		Altijd, MA altijd
15	vaak, soms bij misalignments	Altijd, ook misalignments		Altijd, MA altijd
20	nooit, zelden bij misalignments	Altijd, ook misalignments		Altijd, MA altijd
25		nooit tot 23 regelmatig		soms tot regelmatig, MA altijd

Aantal keer dat de led aangaat bij de		middelste spoel (met deksel naar vonk)		
afstand tussen ontladingsbollen [cm]		1,5	3,5	5,5
afstand tussen ontladingsbollen en spoel [cm]				
5	nooit bij misalignments vaak	nooit, wel misalignments		nooit, wel misalignments
10	nooit, bij misalignments vaak kort bij mij	nooit, wel misalignments kort b		nooit, wel misalignments kort bij mij
15	nooit, heel zelden bij misalignments	nooit		nooit, wel misalignments kort bij mij
20	nooit	nooit		nooit
25		nooit		nooit

Het aantal keer dat de LED is aangegaan is niet genoteerd. Daarom kunnen er geen exacte waarden gegeven worden. Om de woorden meer betekenis te geven, is er een inschatting gemaakt in procent.

- Altijd = 100 %
- Heel vaak = 90-95 %
- Vaak = 80 %
- Regelmatig = 70 %
- Soms = 50 %
- Af en toe = 40 %
- Weinig = 20 %
- Zelden = 10 %
- Nooit = 0 %

## Bijlage C: Alle resultaten met betrekking tot consistentie

Bij hoge luchtvochtigheid:

run	Afstand tussen ontlading sbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel	uitkomst		
						4/feb	6/feb	11/feb
9	-1	-1	-1	1	-1	100	100	
10	1	-1	-1	1	-1	100	100	
11	-1	1	-1	1	-1		0	0
12	1	1	-1	1	-1		18	1
13	-1	-1	1	1	-1	100	100	
14	1	-1	1	1	-1	100	100	
15	-1	1	1	1	-1	0	0	
16	1	1	1	1	-1	0	0	
25	-1	-1	-1	1	1	0	0	
26	1	-1	-1	1	1	100	100	
27	-1	1	-1	1	1		0	0
28	1	1	-1	1	1		0	0
29	-1	-1	1	1	1	0	0	
30	1	-1	1	1	1	100	100	
31	-1	1	1	1	1	0	0	
32	1	1	1	1	1	0	0	

Bij lage luchtvochtigheid:

run	Afstand tussen ontlading sbollen	aantal windingen	oppervlakte spoel	luchtvochtigheid	afstand tot spoel	uitkomst							
						5/feb	6/feb	9/feb	9/feb	11/feb	11/feb	12/feb	
1	-1	-1	-1	-1	-1	100		100					
2	1	-1	-1	-1	-1	100		100					
3	-1	1	-1	-1	-1		0	0					
4	1	1	-1	-1	-1		30	0					
5	-1	-1	1	-1	-1	100		0					
6	1	-1	1	-1	-1	100		100					
7	-1	1	1	-1	-1	0		0					
8	1	1	1	-1	-1	0		8	17				
17	-1	-1	-1	-1	1		0			0			
18	1	-1	-1	-1	1		100			100			
19	-1	1	-1	-1	1		0			0	0		
20	1	1	-1	-1	1		0			0			
21	-1	-1	1	-1	1		0			0			
22	1	-1	1	-1	1		100					100	
23	-1	1	1	-1	1		0						0
24	1	1	1	-1	1	0	0						0

De vakjes die blauw gearceerd zijn, zijn gemeten met een andere oriëntatie. De witte vakjes zijn gemeten met het deksel naar de vonk en de blauwe met de spoel. In Figuur 55 was er ook al een verschil opgemerkt. Hier is dat verschil opnieuw waargenomen, want de blauwe metingen zijn eerst met de normale oriëntatie uitgevoerd. Bij deze metingen waren er steeds 0 responsies. Hieruit blijkt dat de richting van de stroom niet vasthangt met een bepaalde oriëntatie. Deze richting hangt dus van moment tot moment af.

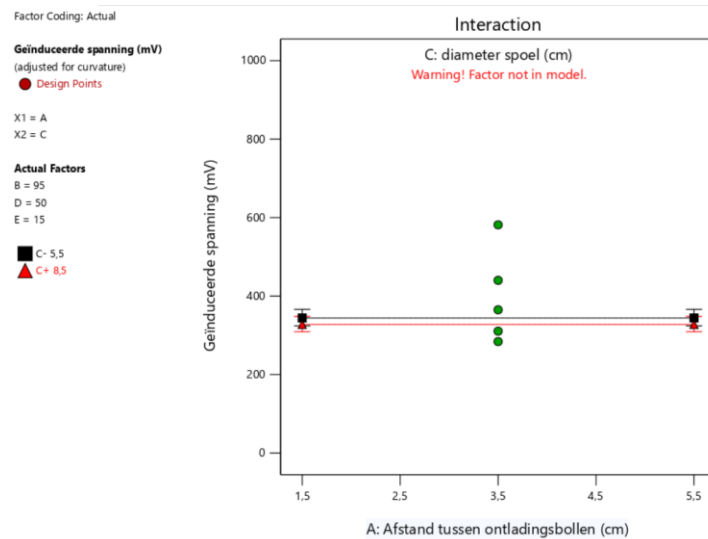
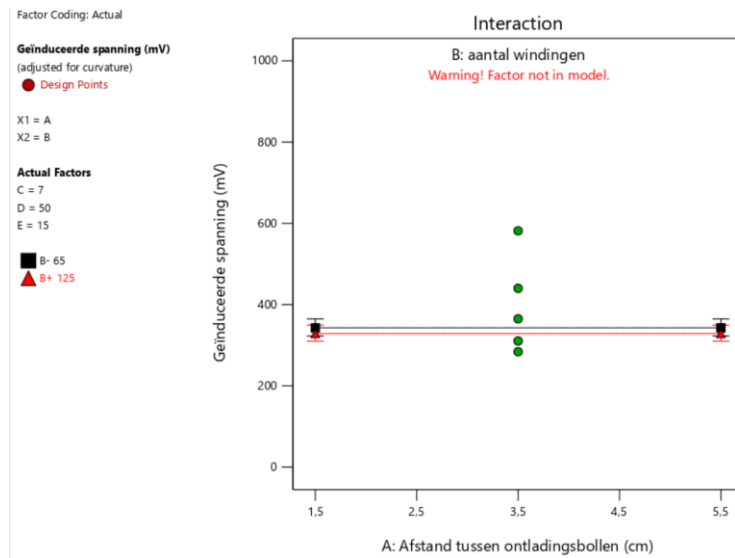
Voor de geïnduceerde spanning:

run	1 afstand tussen ontlading bolle en	2 aantal winding en	3 oppervl akte spoel	4 luchtvoc htigheid	5 afstand tot spoel	uitkoms t	Geïnduceerde spanning								
							responsi e	eenheid	datum	responsie	eenheid	datum	responsi e	eenheid	datum
1	-1	-1	-1	-1	-1	100	320,9	mV	19/feb	1,216	V	12/mrt	352	mV	12/mrt
2	1	-1	-1	-1	-1	100	706	mV	27/feb	1,41	V	12/mrt	530	mV	12/mrt
3	-1	1	-1	-1	-1	0	349,8	mV	2/mrt	698	mV	12/mrt			
4	1	1	-1	-1	-1	30	273,6	mV	2/mrt	992	mV	12/mrt	366	mV	12/mrt
5	-1	-1	1	-1	-1	100	884	mV	27/feb	684	mV	12/mrt	534	mV	12/mrt
6	1	-1	1	-1	-1	100	793,7	mV	27/feb	841,1	mV	14/mrt			
7	-1	1	1	-1	-1	0	432,4	mV	24/feb						
8	1	1	1	-1	-1	0	482,4	mV	27/feb						
9	-1	-1	-1	1	-1	100	432,2	mV	20/feb						
10	1	-1	-1	-1	-1	100	547,2	mV	20/feb						
11	-1	1	-1	1	-1	0	651,3	mV	20/feb						
12	1	1	-1	1	-1	18	688,5	mV	20/feb						
13	-1	-1	1	1	-1	100	283,1	mV	20/feb						
14	1	-1	1	1	-1	100	251	mV	20/feb						
15	-1	1	1	1	-1	0	406,8	mV	22/feb						
16	1	1	1	1	-1	0	269,5	mV	22/feb						
17	-1	-1	-1	-1	1	0	193,1	mV	19/feb						
18	1	-1	-1	-1	1	100	374,2	mV	27/feb						
19	-1	1	-1	-1	1	0	163,6	mV	2/mrt						
20	1	1	-1	-1	1	0	176	mV	2/mrt						
21	-1	-1	1	-1	1	0	400,1	mV	27/feb	339,5	mV	14/mrt			
22	1	-1	1	-1	1	100	298,9	mV	27/feb						
23	-1	1	1	-1	1	0	259	mV	24/feb						
24	1	1	1	-1	1	0	316,6	mV	27/feb						
25	-1	-1	-1	-1	1	0	256,4	mV	20/feb						
26	1	-1	-1	1	1	100	292,8	mV	20/feb						
27	-1	1	-1	1	1	0	385,1	mV	20/feb						
28	1	1	-1	1	1	0	384,7	mV	20/feb						
29	-1	-1	1	1	1	0	183,3	mV	20/feb						
30	1	-1	1	1	1	100	178,6	mV	20/feb						
31	-1	1	1	1	1	0	265,5	mV	22/feb						
32	1	1	1	1	1	0	240	mV	22/feb						
33	0	0	0	0	0	0	675,5	mV	16/feb						
34	0	0	0	0	0	0	310,6	mV	19/feb						
35	0	0	0	0	0	0	365	mV	20/feb						
36	0	0	0	0	0		936	mV	12/mrt						
37	0	0	0	0	0		581,5	mV	18/mrt						
38	0	0	0	0	0		440,1	mV	2/mrt						
39	0	0	0	0	0		284	mV	16/mrt						

Buiten de 6 situaties die als voorbeeld gebruikt zijn in het verslag, kan er gekeken worden naar de CP en run 21. Bij de meting van run 21 waren er enkele grote uitschieters. Hiervoor is dan een controle uitgevoerd. Door de controle kan besloten worden dat het gemiddelde niet is beïnvloed door de uitschieters.

## Bijlage D: Extra figuren van Design Expert 13

Eerst komen de overige interacties.



Factor Coding: Actual

Geïnduceerde spanning (mV)  
(adjusted for curvature)

● Design Points

X1 = A  
X2 = E

Actual Factors

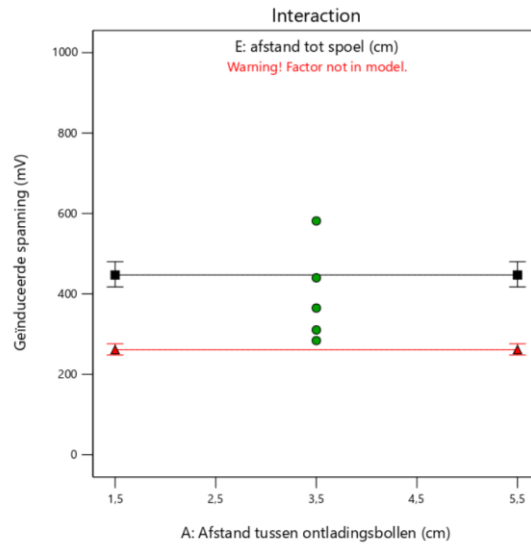
B = 95

C = 7

D = 50

■ E- 10

▲ E+ 20



Factor Coding: Actual

Geïnduceerde spanning (mV)  
(adjusted for curvature)

● Design Points

X1 = B

X2 = C

Actual Factors

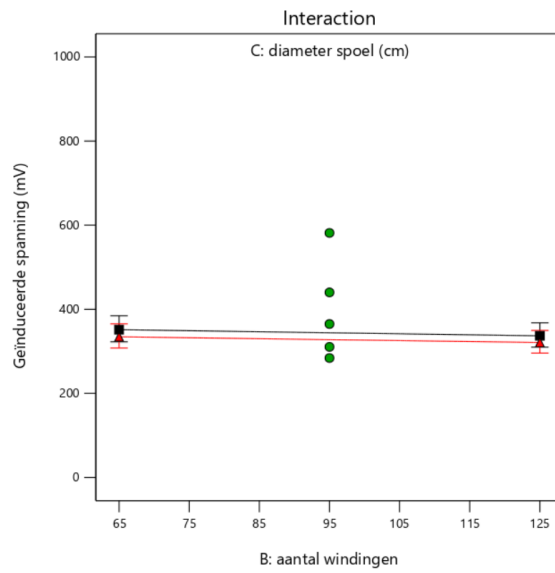
A = 3,5

D = 50

E = 15

■ C- 5,5

▲ C+ 8,5



Factor Coding: Actual

Geïnduceerde spanning (mV)  
(adjusted for curvature)

● Design Points

X1 = E

X2 = C

Actual Factors

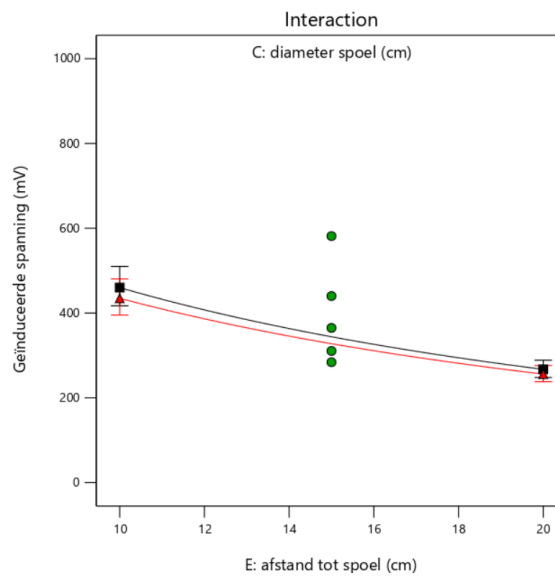
A = 3,5

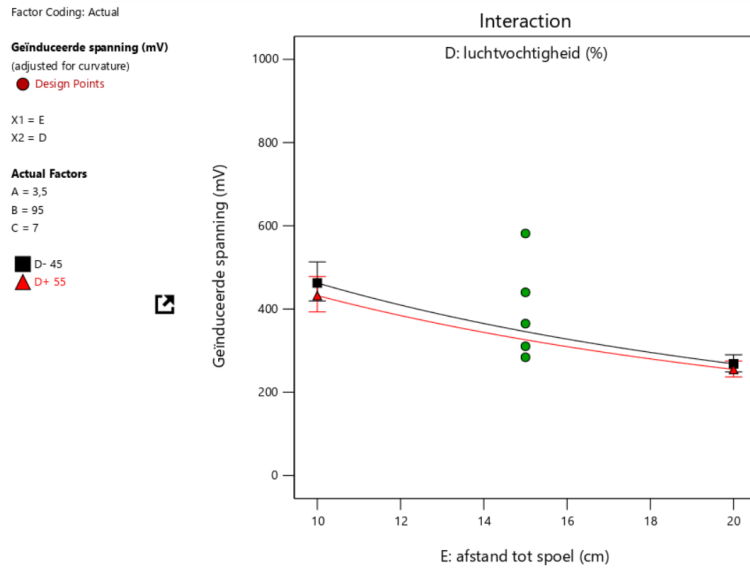
B = 95

D = 50

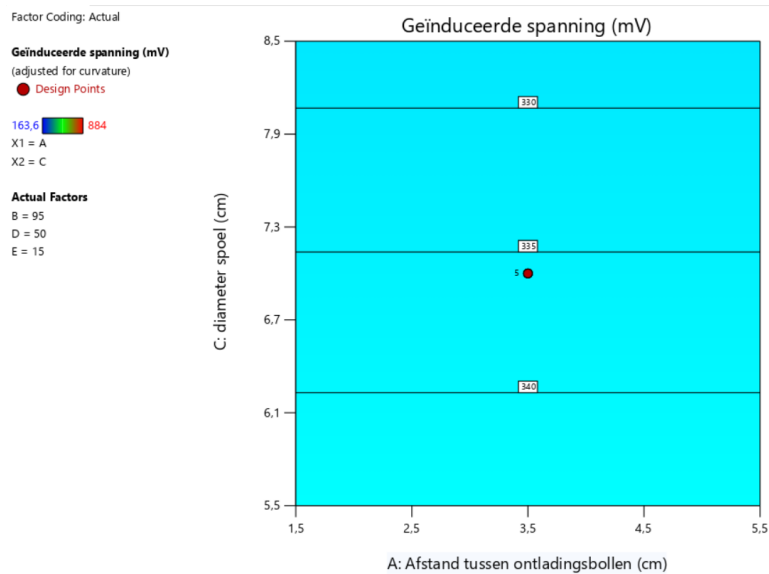
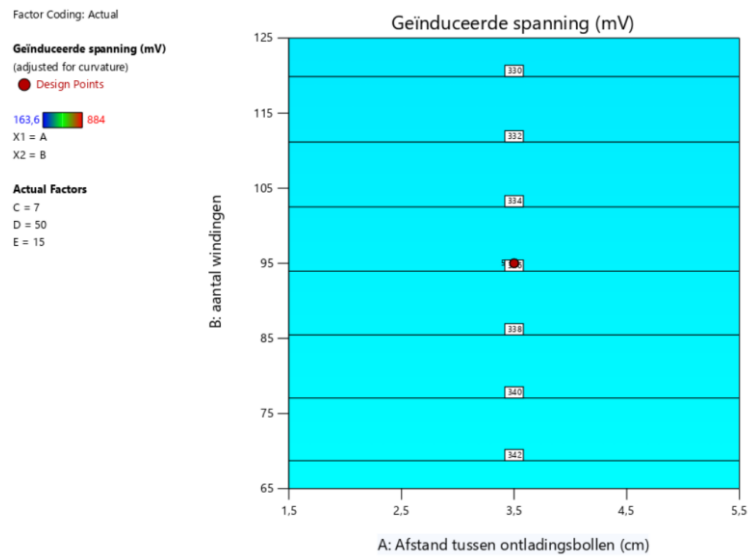
■ C- 5,5

▲ C+ 8,5





Dan zijn er ook nog de contourplots. Deze zetten de geïnduceerde spanning uit in functie van twee factoren.



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6 884

X1 = A

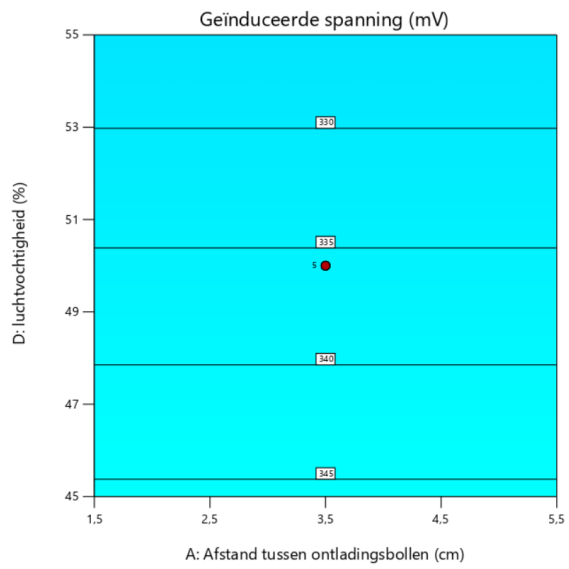
X2 = D

**Actual Factors**

B = 95

C = 7

E = 15



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6 884

X1 = A

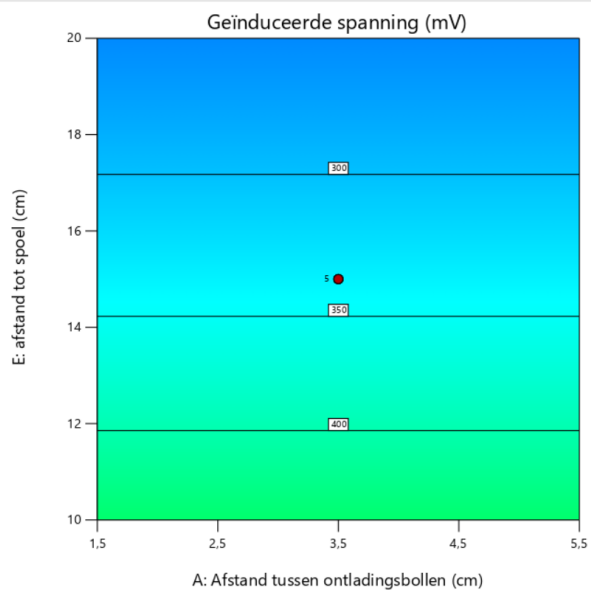
X2 = E

**Actual Factors**

B = 95

C = 7

D = 50



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6 884

X1 = B

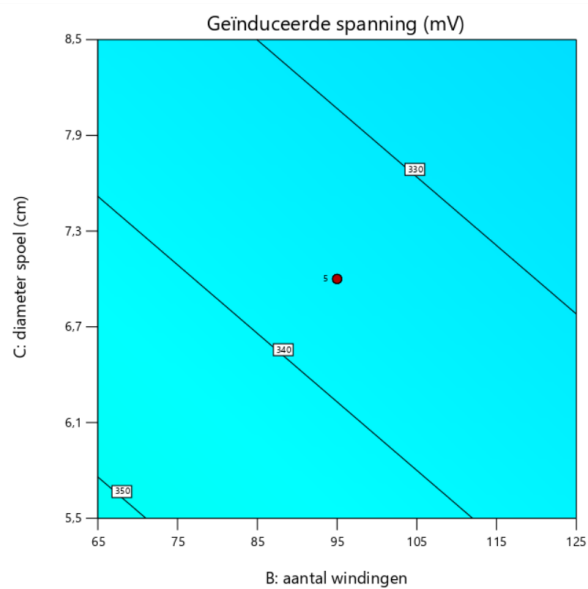
X2 = C

**Actual Factors**

A = 3,5

D = 50

E = 15





Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6  884

X1 = B

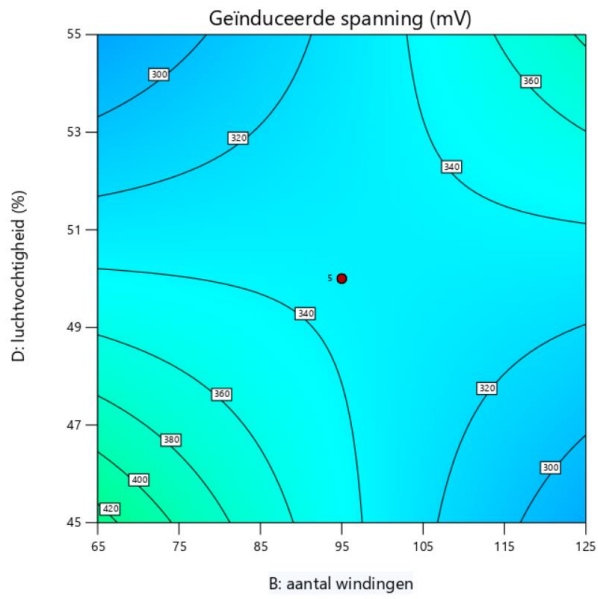
X2 = D

**Actual Factors**

A = 3,5

C = 7

E = 15



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6  884

X1 = B

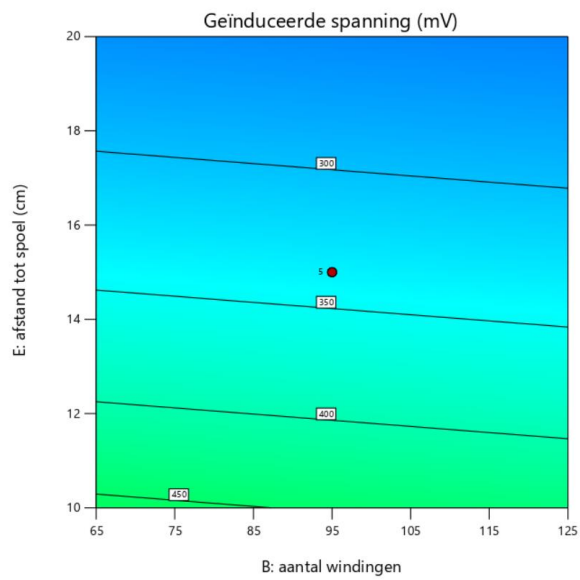
X2 = E

**Actual Factors**

A = 3,5

C = 7

D = 50



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6  884

X1 = C

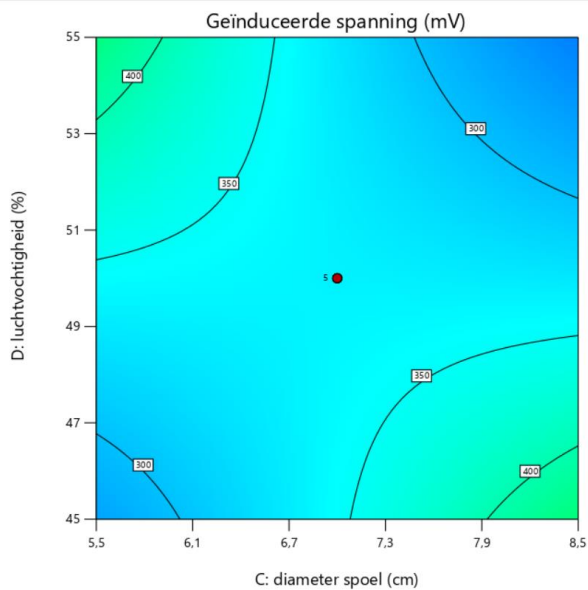
X2 = D

**Actual Factors**

A = 3,5

B = 95

E = 15



Factor Coding: Actual

**Geïnduceerde spanning (mV)**

(adjusted for curvature)

● Design Points

163,6 884

X1 = C

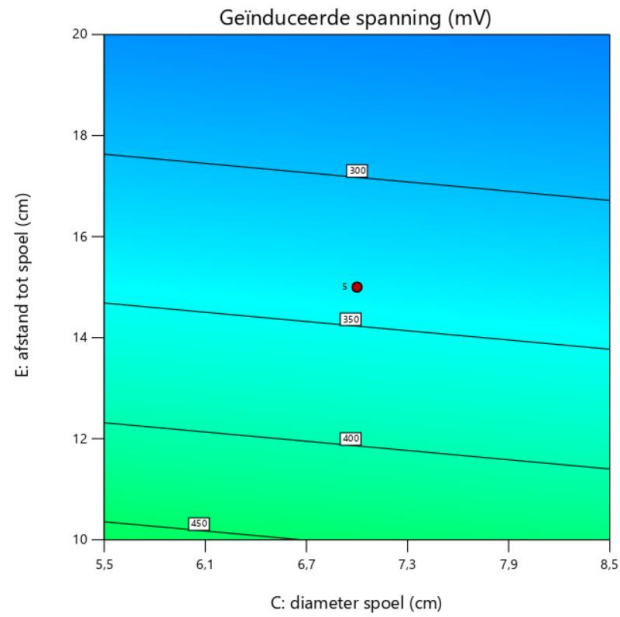
X2 = E

**Actual Factors**

A = 3,5

B = 95

D = 50



## Bijlage E: Effecten zonder transformatie

Term	Stdized Eff...	Sum of Squar...	% Contribution
Intercept			
e A-Afstand ...ingsbollen	25,4438	5179,08	0,453857
e B-aantal windingen	-40,6687	13231,6	1,15952
e C-diameter spoel	-15,6562	1960,95	0,171843
e D-luchtvochtigheid	-44,2687	15677,8	1,37389
e E-afstand tot spoel	-212,781	362207	31,7412
e AB	-35,7188	10206,6	0,894435
e AC	-60,8813	29652,2	2,5985
e AD	-26,8688	5775,44	0,506117
e AE	-5,98125	286,203	0,0250807
e BC	-34,3938	9463,44	0,829307
e BD	149,019	177653	15,5682
e BE	42,3063	14318,6	1,25477
e CD	-179,394	257457	22,5617
e CE	5,16875	213,728	0,0187296
e DE	44,8813	16114,6	1,41217
e ABC	57,3563	26317,9	2,30631
e ABD	5,64375	254,815	0,0223302
e ABE	27,2812	5954,13	0,521777
e ACD	12,4062	1231,32	0,107904
e ACE	22,9688	4220,51	0,369855
e ADE	8,85625	627,465	0,0549865
e BCD	-2,50625	50,2503	0,00440357
e BCE	37,8063	11434,5	1,00204
e BDE	-59,6063	28423,2	2,49081
e CDE	76,9813	47408,9	4,15457
e ABCD	-58,7812	27641,9	2,42233
e ABCE	-14,4188	1663,2	0,145751
e ABDE	-11,6063	1077,64	0,0944366
e ACDE	8,95625	641,715	0,0562353
e BCDE	-20,1563	3250,2	0,284823
e ABCDE	19,8438	3150,2	0,27606
Curvature	12,3925	1228,59	0,107665
Lack of Fit		0	0
Pure Error		57152,9	5,00847

Process Order:

Mean

Auto Select...

m	The term will be included in the model.
e	The term will not be included in the model.
⚠	Indicates the term is aliased with another term, or was not estimated in the Fit Summary calculations. Including the term in the model is not recommended.
🔒	A user-forced term. Automatic model selection will always produce a model that includes this term.
🔒	Indicates that the term is required to be in the model by the program.

Bij deze resultaten is het duidelijker wat de invloed van 1 factor precies is.