2014

Technische Universiteit Delft Deeltjesoptica

Auteur: Christiaan Schinkel Studentnummer: 10016066

Verslag van afstudeerstage HHS



HOOGSPANNINGSOPSTELLING VOOR HET NANO APERTURE ION SOURCE PROJECT





Voorwoord

De afstudeerscriptie en de verdediging daarvan is een kroon op de opleiding Technische Natuurkunde aan de Haagse Hogeschool. Althans, zo denk ik erover. Juist daarom is het belangrijk dat de stageplaats een uitdagende en inspirerende omgeving biedt en dat de begeleiders van zowel de stageplaats als van de Haagse Hogeschool professioneel en gemotiveerd ondersteuning bieden en dat er intelligente en vriendelijke collega's zijn die je kunnen helpen. Al deze ingrediënten hebben bijgedragen aan het (hopelijk) succesvol afronden van mijn afstuderen en daarom zou ik graag mijn dank willen uitspreken jegens:

mv. Buning, mv. Vloemans, eerste en tweede afstudeercoach vanuit de Haagse Hogeschool Kees Hagen, Diederik Morsink en Leon van Kouwen, de stagebegeleiders vanuit de TU Delft Han van der Linden, elektrotechnicus bij de Dienst Technische Ondersteuning van de TU Delft

Deze mensen hebben mij begeleid door de afstudeerstage en ik heb veel aan ze te danken.





Samenvatting

In het kader van de afstudeerstage voor de opleiding Technische Natuurkunde aan de Haagse Hogeschool is er een opdracht uitgevoerd bij de onderzoeksgroep Charged Particle Optics aan de TU Delft. De opdracht is een onderdeel van het mini-NAIS project en beslaat het ontwerpen, opbouwen en testen van de elektronica en schrijven van een programma voor de aansturing ervan.

Het mini-NAIS project ontwikkelt een proefopstelling waarbij een nieuwe ionenbron kan worden getest. Tegenwoordig wordt in het bedrijfsleven voor Focussed Ion Beam machines een Ga ionenbron gebruikt. Een groot nadeel hieraan is dat Ga het sample vervuilt. In deze nieuwe ionenbron kunnen ionen worden gemaakt van bijvoorbeeld He, Ar of O₂. In de chip staat een biasspanning waardoor een sterk elektrisch veld ontstaat dat de ionen uit de onderkant van de chip trekt waarna ze vervolgens in een ionen optisch systeem worden getrokken. De ionen optica zorgt ervoor dat de bundel ionen wordt gefocusseerd en dat deze kan worden afgebogen.

Een Focussed Ion Beam systeem wordt bijvoorbeeld gebruikt voor nano-machining, maar het systeem kan ook worden gebruikt om een afbeelding van een sample te maken. Hierbij worden de ionen op het sample gericht waar ze botsen met het materiaal. Bij deze botsingen komen secundaire elektronen vrij en deze kunnen worden gedetecteerd. Dit signaal kan worden gekoppeld aan de positie van de ionenbundel en op deze manier kan een afbeelding worden gemaakt uit de grijswaarden van het signaal van de secundaire elektronen detector.

De opdracht van deze afstudeerstage is het ontwerpen en het opbouwen van de elektronica voor de mini-NAIS en het schrijven van de software om de elektronica aan te sturen en om afbeeldingen te maken uit de gemeten data. Aangezien er verschillende hoogspanningen nodig zijn moet er op worden toegezien dat de opstelling veilig is.

De opstelling is ontworpen en de belangrijkste onderdelen zijn:

-drie hoogspanningsbronnen

-een nieuw ontworpen circuit waarmee de biasspanning over de chip wordt geregeld en gemeten

-een nieuw ontworpen kast van isolerend materiaal waarin de lokale aarde is opgetild tot -9 kV -een NI DAQ kaart waarmee de aansturing wordt geregeld en het signaal van de secundaire elektronen detector zal worden gemeten

-een versterker die de aansturingen van de NI DAQ kaart 20x versterkt

-een circuit dat de versterkers beschermt als er elektrostatische doorslag plaats vindt. -een nieuw geprogrammeerde VI die de NI DAQ kaart aanstuurt en afbeeldingen kan maken

De elektronica is getest, deze is veilig en functioneert. De aansturing waarmee de bundel wordt afgebogen heeft een instabiliteit van 10 ± 5 mV terwijl de eis 2 mV is. Dit betekent dat de beoogde pixelbreedte van 10 nm niet kan worden gehaald met de opstelling zoals deze nu is. Het VI stuurt de elektronica aan, kan afbeeldingen maken en is getriggerd. Wegens tijdgebrek zijn niet alle gewenste functies in het VI geïntegreerd.





Inhoud

1	INLEIDING	5
	1.1 TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT – TECHNISCHE NATUURWETENSCHAPPEN	5
	1.1.1 Charged Particle Optics	5
	1.2 HET NANO APERTURE ION SOURCE PROJECT	5
	1.2.1 De NAIS 1.0	6
	1.2.2 De mini-NAIS	6
	1.3 OPDRACHTOMSCHRIJVING	6
2	WERKING VAN DE MINI-NAIS	7
	2.1 MODEL VAN DE MINI-NAIS LENSSTAPEL	7
	2.2 ELEKTRONEN EN IONEN OPTICA	8
	2.2.1 Voorbeeld van een elektrostatische Einzellens	8
	2.2.2 Afbuigen van geladen deeltjes	9
	2.3 OVERZICHT VAN DE WERKING VAN DE MINI-NAIS	11
	2.4 OVERZICHT VAN DE SPANNINGEN, SIGNALEN, EN SOFTWARESPECIFICATIES VOOR DE MINI-NAIS.	15
	Specificaties van de software	15
3	WERKWIJZE EN BEPALING VAN DE OPSTELLINGSAPPARATUUR	17
	3.1 TOTAALONTWERP VAN DE ELEKTRONICA VOOR DE MINI-NAIS	17
	3.1.1 Statische hoogspanningen	19
	3.1.2 Data acquisitie – National Instruments	20
	3.1.3 Spanningsversterker	21
	3.1.4 Veiligheidsonderbreking geïsoleerde kast	23
	3.1.5 Circuit voor het regelen van de Biasspanning	23
	3.2 WERKING VAN HET LABVIEW PROGRAMMA	25
	3.2.1 Graphical User Interface	20
	3.2.2 WEIKING VAILINE VI	27
	5.5 CIRCUIT VOOR HET METEN VAN WISSELSFANNING OF EEN GELIJKSFANNING	2)
4	RESULTATEN	32
	4.1 HOOGSPANNING DOORSLAG TEST	32
	4.1.1 Geïsoleerde kast	33
	4.1.2 Zeven-polige stekker naar de SEM	33
	4.2 TESTEN VAN DE SIGNALEN EN HET VI	35
	4.3 TESTEN VAN DE SIGNALEN EN HET VI MET DE HOOGSPANNINGSVOEDINGEN AAN	40
5	CONCLUSIE	41
6	LITERATUUR	42





1 INLEIDING

1.1 Technische Universiteit Delft – Technische Natuurwetenschappen

De faculteit Technische Natuurwetenschappen, afgekort TNW, is de grootste faculteit van de Technische Universiteit Delft (TUD). De faculteit richt zich op het vinden van innovatieve oplossingen voor maatschappelijke problemen. Daarbij staat het ontwikkelen van fundamentele kennis voor technische ontwikkelingen die breed in de maatschappij toegepast kunnen worden voorop.

1.1.1 Charged Particle Optics

Charged Particle Optics, afgekort CPO, in het Nederlands geladen deeltjes optica, is een onderzoeksgroep binnen de faculteit TNW onder leiding van Prof. dr. ir. Pieter Kruit en valt onder de afdeling Imaging Physics. De groep houdt zich bezig met manieren om bundels elektronen, positronen en ionen te manipuleren. De groep ambieert verbeterde instrumenten en methodes te ontwikkelen om microscopische structuren te creëren en te bekijken, zelfs tot nanometer schaal. Er worden innovatieve elektronen- en ionenbundel instrumenten ontworpen, verbeterd en gebouwd voor de volgende generatie halfgeleiderproducten en voor de fabricage van nanostructuren.

1.2 Het Nano Aperture Ion Source project

Focussed Ion Beam machines, afgekort FIB's, ofwel gefocusseerde ionenbundel machines worden gebruikt voor machinale bewerking op nanoschaal. De bundel is zo energetisch dat er materiaal kan worden verwijderd of juist geplaatst in een vooraf bepaald patroon. Voorbeelden van toepassingen zijn het voorbehandelingen van microchips, het maken van prototypes in de

nanotechnologie, het maken van extreem fijne doorsneden in de orde van 100 nm dik of er kunnen afbeeldingen worden gemaakt van het bestraalde sample.

Het maken van afbeeldingen van het bestraalde sample werkt als volgt: Wanneer de ionenbundel op het sample terecht komt botsen de ionen tegen het sample aan. Tijdens deze botsing komen secundaire elektronen vrij en deze kunnen worden gemeten met een detector: De secundaire elektronendetector. Het signaal van de secundaire elektronendetector kan worden omgezet in een grijswaarde. Als de ionenbundel dan over het sample "scant" kan van elke plek op het sample een grijswaarde worden bepaald. Door elke grijswaarde te koppelen aan de positie van de ionenbundel kan een afbeelding worden gemaakt.

In het bedrijfsmilieu is het gebruikelijk een vloeibaar metaal ionenbron (meestal gallium) te gebruiken voor ionenbrontechnologie. Met deze bron wordt een hoge intensiteit galliumionen geproduceerd met een spot grootte <10 nm.

Hoewel het galliumionensysteem zeer successol is zit er een groot nadeel aan. Het gallium blijft geregeld achter in het bestraalde oppervlak. Dat is ongewenst aangezien



Figuur 1: Schematische voorstelling van de NAIS. Afbeelding afkomstig van ir. L van Kouwen.

gallium een dotering vormt. Het zou de voorkeur hebben ionenbronnen te gebruiken met





bijvoorbeeld He, Xe, Ar, of O₂, en dat is precies hetgene dat met dit project wordt ontwikkeld. In 2001 is dit idee gelanceerd en zijn de eerste berekeningen gedaan en er wordt al sinds 2010 gewerkt aan de Nano Aperture Ion Source, afgekort NAIS. In Figuur 1 is een schematische weergave van de NAIS te zien. Van bovenaf wordt een elektronenbundel door de apertuur in een chip gestuurd. In de chip lopen kanaaltjes waardoor een gas wordt aangevoerd waarvan de atomen geen lading hebben. Wanneer de elektronen botsen met de gasatomen raken de gasatomen geïoniseerd. Met behulp van een elektrisch veld worden de geïoniseerde gasatomen uit de chip getrokken waarna ze vervolgens in een ionen optisch systeem worden gestuurd naar het sample.

1.2.1 De NAIS 1.0

De NAIS opstelling bestaat al en werkt, er zijn echter wat nadelen en problemen in de opstelling. De NAIS 1.0 is bij een dual-beam SEM systeem ingebouwd. Een dualbeam SEM is een opstelling waarin zowel een SEM (Scanning Electron Microscope) als een FIB zijn ingebouwd. Het idee van zo'n machine is dat er met de SEM naar het sample kan worden gekeken en dat vervolgens zonder het sample te hoeven verplaatsen er materiaal van het sample kan worden weggehaald of aangebracht met de FIB. Bij deze machine is de gallium FIB bron verwijderd en vervangen door de NAIS bron. De NAIS 1.0 heeft een eigen elektronenbron in de kolom zitten wat er meteen voor zorgt dat er een zeer hoog vacuüm nodig is (10⁻¹⁰ mbar). Als er dus binnen de kolom iets moet worden aangepast dan staat de opstelling daarna weer een paar dagen vacuüm te pompen. Het verwisselen van de chip is daar een goed voorbeeld van. De NAIS 1.0 is ontworpen om zeer gunstige specificaties te behalen zoals bijvoorbeeld een pixelbreedte in de orde van 5 nm. Dat betekent automatisch dat het systeem complexer wordt, zo lopen bijvoorbeeld de hoogspanningen in deze opstelling op tot 30 kV. Met deze opstelling is het niet eenvoudig gebleken om bijvoorbeeld de broneigenschappen te bepalen bij verschillende configuraties. Momenteel staat dit systeem in de Verenigde Staten bij het bedrijf FEI. In samenwerking met FEI wordt er gewerkt aan oplossingen voor de problemen en fouten om het systeem te verbeteren. Aangezien er in dit stadium de vraag is ontstaan veel verkennende metingen te kunnen doen is daarom besloten een nieuwe opstelling te ontwikkelen, de mini-NAIS.

1.2.2 De mini-NAIS

De mini-NAIS is geen complete vacuüm kolom maar zal slechts bestaan uit een lensstapel die in een SEM gaat. De elektronenbundel van de SEM zal worden gebruikt om elektronen in de chip te schieten. De mini-NAIS is zo ontworpen dat de hoogspanningen in de orde van 5-10 kV zijn. Voor de mini-NAIS worden onder andere nieuwe chips ontwikkeld, de lensstapel is opnieuw ontworpen en er moet een andere elektronica opstelling worden ontworpen en gebouwd.

1.3 Opdrachtomschrijving

Het hoofddoel van de opdracht is om de elektronische hardware en de software voor de mini-NAIS te ontwerpen, op te bouwen en te testen. Alle hardware moet worden opgebouwd tot een werkend geheel in een mobiele opstelling. Er wordt gewerkt met hoogspanningen dus moet de opstelling veilig worden gemaakt. Er moet rekening worden gehouden met elektrostatische doorslag, sommige hardware zal hiertegen beschermd moeten worden. De software moet zowel de hardware aansturen als een beeld vormen uit het meetsignaal van de secundaire elektronen detector.





2 WERKING VAN DE MINI-NAIS

De mini-NAIS is zo ontworpen dat de opstelling relatief eenvoudig en snel kan worden opgebouwd. De lensstapel komt in de sampleruimte van de SEM.

De SEM die voor dit project wordt gebruikt is zo opgebouwd dat er verschillende vacuümruimtes zijn. Bovenin de machine zit de elektronenbron, hier heerst altijd een druk in de orde van 10^{-10} mbar. Als dit vacuüm verbroken wordt dan duurt het enkele dagen om weer op deze einddruk te komen. Onder deze ruimte zit een voorvacuümruimte waarin zich het elektronen-optische lenzenstelsel bevindt. De druk hier is altijd in de orde van 10^{-8} mbar. Hieronder bevindt zich de sampleruimte. In deze ruimte heerst tijdens het gebruik van de microscoop een druk tussen 10^{-5} mbar en 10^{-7} mbar. Dit hangt bijvoorbeeld af van de uitgassing van een sample. Zodra de deur van de sampleruimte open moet wordt de voorvacuümruimte van de sampleruimte afgesloten met een klep en wordt de sampleruimte belucht. Het vacuümpompen van de sampleruimte duurt enkele minuten. Het is dus een groot voordeel dat de mini-NAIS in deze ruimte wordt geïnstalleerd. Als bijvoorbeeld de chip moet worden vervangen dan kan dit relatief snel worden gedaan.

2.1 Model van de mini-NAIS lensstapel

In Figuur 2 is een model van de mini-NAIS lensstapel te zien.

De diameter is 34,00 mm en de hoogte is 21,05 mm (excl. schroefkop). Het lichtgele element is de chiphouder met daarin de chip, het groene element. Van bovenaf wordt hier een bundel elektronen op de chip gefocusseerd precies in de apertuur van de chip. Vervolgens worden de gemaakte ionen uit de chip getrokken door de extractor, het bovenste rode element. Het blauwe element is een lens die ervoor zorgt dat de bundel wordt gefocusseerd en het grijze element is de quadrupool die wordt gebruikt om de ionenbundel af te buigen. De werking van een quadrupool wordt later behandeld in paragraaf 2.2.2. Het onderste rode element is de coverelektrode. Deze zorgt ervoor dat buiten de kolom het veld altijd constant is.



Figuur 2 Model van de mini-NAIS lensstapel. De diameter is 34,00 mm en de hoogte is 21,05 mm (excl. schroefkop). De quadrupool (grijs) bestaat in deze tekening nog uit één geheel. Dit wordt later gescheiden tot vier losse polen. Tekening afkomstig van ir. D. W. Morsink





2.2 Elektronen en ionen optica

De nadruk bij deze opdracht ligt bij de elektronica van het project. Het is echter belangrijk om het project en de opstelling goed te begrijpen zodat duidelijk wordt waar de eisen van de elektronica vandaan komen. Een goed begrip van het project is niet mogelijk zonder ons eerst te buigen over elektronen en ionenoptica.

Er zijn twee belangrijke methoden om geladen deeltjes te sturen. Dit kan met een magnetisch veld of met een elektrisch veld. Uit deze methoden volgen respectievelijk de elektromagnetische lens en de elektrostatische lens. In de NAIS opstelling wordt geen gebruik gemaakt van magnetische lenzen en deze zullen verder niet worden besproken.

2.2.1 Voorbeeld van een elektrostatische Einzellens

Om enigszins begrip te krijgen over de werking van een elektrostatische lens zal een voorbeeld worden besproken en uitgelegd. Zie Figuur 3. Dit is een schematische doorsnede van een elektrostatische Einzellens. De horizontale gekleurde lijnen zijn equipotentiaallijnen, de verticale roze lijnen zijn verschillende paden van elektronen.

De Einzellens bestaat uit drie elektroden waarbij de bovenste (A) en de onderste (C) elektrode een potentiaal van 0 V hebben. De potentiaal op de middelste (B) elektrode kan positief of negatief worden gekozen, afhankelijk van welke lenseigenschappen er gewenst zijn. In dit voorbeeld wordt gekozen voor een vertragende elektronenlens voor elektronen met een energie van 5 keV. Dat betekent dat de bron op een potentiaal van -5 kV moet staan. De middelste elektrode moet een negatieve potentiaal krijgen. Er wordt gekozen voor -4 kV.

Men moet beseffen dat de krachtenvector die op het elektron werkt tegengesteld is aan de richting van het elektrisch veld en dat deze krachten een groter effect zullen hebben op de impuls van het elektron wanneer de impuls klein is, m.a.w. een langzaam bewegend elektron ondervindt een sterker lenseffect dan een snel bewegend elektron.

Wanneer de elektronen het elektrisch veld betreden bij gebied 1 bewegen ze relatief snel. In de Z-richting worden de elektronen afgeremd en in de r-richting bewegen de elektronen van de optische as af. Er is dus



Figuur 3 Schematische weergave van een Einzellens. De gekleurde lijnen zijn equipotentiaallijnen, de roze lijnen zijn verschillende paden die de geladen deeltjes zouden kunnen afleggen. Afbeelding door Yan Ren, MSc.

1000 Warn terretere





sprake van een relatief zwakke negatieve lenswerking. De krachtencomponent in de Z-richting neemt toe en de snelheid van het elektron neemt af tot in gebied 2. Vanaf hier wordt het elektron nog steeds afgeremd, maar staat de kracht op het elektron in de r-richting naar de optische as gericht. Vanaf gebied 2 is dus sprake van positieve lenswerking. Naarmate het elektron verder richting gebied 3 beweegt neemt zijn snelheid af en neemt de positieve lenswerking toe. Vanaf gebied 3 stopt het elektron met vertragen in de Z-richting maar blijft de relatief sterke positieve lenswerking. Het elektron gaat hier op zijn traagst en ondervindt zeer sterke positieve lenswerking. Richting gebied 3 versnelt het elektron in de Z-richting en neemt het positieve lenseffect af. In gebied 4 is de krachtencomponent in de r-richting 0. Daarna zal de r-component een toenemende kracht in de r-richting krijgen van de optische as af. In gebied 5 heeft het elektron zijn oorspronkelijke energie van 5 keV en beweegt hij relatief snel zodat de negatieve lenswerking in gebied 5 relatief weinig effect heeft.

We hebben gezien dat er eerst gebieden waren met relatief zwakke negatieve lenswerking gevolgd door relatief sterke positieve lenswerking, vervolgens opnieuw relatief sterke positieve lenswerking en relatief zwakke negatieve lenswerking. Deze lens zal in zijn geheel dus positief zijn en dat strookt ook met de roze elektronenbanen in de figuur.

2.2.2 Afbuigen van geladen deeltjes

Wanneer men geladen deeltjes wil laten afbuigen dan kan men dit doen met bijvoorbeeld een quadrupool. Een quadrupool bestaat uit vier polen waartussen een elektrisch veld wordt aangelegd. In Figuur 4 is een model te zien van de quadrupool die wordt gebruikt in de mini-NAIS.



Figuur 4 Tekeningen van de quadrupool van de mini-NAIS. Originele tekeningen door ir. D. W. Morsink. De quadrupool wordt hier vanaf de onderkant bekeken. De afstand tussen de polen begint klein en loopt op. Gemiddeld zijn de quadrupolen 6 mm van elkaar verwijderd.

De quadrupool wordt voor meerdere doeleinden gebruikt. Bijvoorbeeld om met de te buigen bundel te scannen. Voor de afbuiging van deeltjes door de quadrupool geldt vergelijking 1.





$\alpha = \frac{EL}{2\Phi}$			1 (bron 1)	
Waarin:	α:	Hoek van afbuiging	[rad]	
	<i>E</i> :	Elektrisch veld	[V/m]	
	L:	Lengte van de quadrupool	[m]	
	$\phi_{:}$	Versnelspanning van de deeltjes	ĪVĪ	

De breedte van de apertuur van de quadrupool van de mini-NAIS loopt op vanaf boven gezien, en is gemiddeld *b*=6 mm. De lengte van de quadrupool *L*=10 mm en de energie van de deeltjes is 5 keV dus Φ = 5 kV. Het sample bevindt zich op een afstand Δz =15 mm van de quadrupool en de maximale en minimale spanning op de polen is 200 V respectievelijk -200 V. De breedte van het oppervlak dat kan worden gescand wordt dan gegeven door vergelijking 2.

Maximale breedte scanoppervlak =
$$\frac{\Delta V_L}{\Phi} \cdot \Delta z = \frac{\frac{200--200}{6} \cdot 10}{\frac{5000}{5000}} \cdot 15 = 2 mm$$
 2

De quadrupool wordt niet alleen gebruikt om te scannen maar ook als stigmator. Astigmatisme is het effect dat optreedt wanneer de brandpuntsafstand voor deeltjes in de x-richting niet hetzelfde is als in de y-richting. Het principe is in een voorbeeld bij een lens (voor licht) weergegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Voorbeeld van astigmatisme bij een lens (voor licht). Het groene optische pad heeft een grotere brandpuntsafstand dan het paarse optische pad. In dit geval wordt dat veroorzaakt doordat de lens niet rond is maar ovaal.

Om dit effect tegen te gaan wordt de quadrupool dus ook gebruikt als stigmator. Er worden statische spanningen aangebracht op de vier polen waardoor er een elektrisch veld ontstaat dat de bundelvorm vervormt. Het principe van deze stigmator wordt duidelijk als men naar Figuur 6 kijkt.







Figuur 6 Schematische tekening van een quadrupool die wordt gebruikt als stigmator. Er zijn twee situaties weergegeven waarbij de spanningen zijn geïnverteerd. Originele afbeelding afkomstig van bron 5.

De scanspanningen en de stigmatorspanningen kunnen bij elkaar worden opgeteld volgens het superpositiebeginsel. Dit geldt ook voor de elektrische velden en dus voor de afbuiging van de deeltjes.

Wanneer men een nauwkeuriger veld wil aanleggen om bijvoorbeeld lensaberraties te corrigeren dan is de quadrupool niet goed genoeg. Hoe meer polen er worden gebruikt hoe nauwkeuriger het elektrische veld kan worden vormgegeven. In de NAIS 1.0 wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt van acht polen, een octopool. Het nadeel is dat er dan extra signalen moeten worden berekend en gerealiseerd waardoor het systeem complexer en duurder wordt.

2.3 Overzicht van de werking van de mini-NAIS

Om te begrijpen waarom de benodigde signalen hun waarde en hun stabiliteit nodig hebben is het belangrijk om de opstelling en het doel van de opstelling te behandelen. In Figuur 7 is een schematisch overzicht weergegeven van de mini-NAIS opstelling.







Figuur 7 Schematisch overzicht van de mini-NAIS opstelling. Verios is de naam van de elektronenmicroscoop waarin de mini-NAIS zal worden getest. Originele afbeelding afkomstig van ir. D. W. Morsink.

De optische kolom is getekend vanaf het punt waar de elektronenbundel uit de SEM komt. De elektronen hebben een energie van 5 keV en de bundel heeft een stroom van 100 nA. Om de gasatomen te ioniseren moeten de elektronen een energie hebben in de orde van 1000 eV. De elektronen moeten dus worden afgeremd. Dit gebeurt doordat de chip op een spanning van -4 kV t.o.v. de aarde staat.

In Figuur 8 is een schematische doorsnede te zien van de apertuur van de chip.







Figuur 8 Schematische weergave van de apertuur van de NAIS chip. De membranen zijn geleidend.

De elektronen en de gasatomen komen elkaar tegen en zullen in sommige gevallen botsen. Bij een botsing kan het atoom geïoniseerd worden. De verkregen ionen worden uit de chip getrokken door een elektrisch veld aan te leggen tussen het bovenste membraan en het onderste membraan. Als de potentiaal op het bovenste membraan 1,0 V is t.o.v. de potentiaal op het onderste membraan dan staat er een veld van:

$$\frac{1.0}{100 \cdot 10^{-9}} = 10 \text{ kV/mm}$$

Als wordt aangenomen dat het aantal ionisaties per tijdseenheid constant is dan moet de stroom ionen constant zijn. Wanneer de spanning tussen de membranen niet stabiel is zal de ionenstroom ook niet stabiel zijn. Er is voor de stabiliteit van deze spanning nog geen eis opgesteld omdat de effecten van ruis op deze spanning nog niet zijn onderzocht.

Onder de chip zit de extractor. De ionen worden versneld tot 5 keV wat betekent dat de extractor op een spanning van -9 kV moet staan t.o.v. de aarde. De optische kolom bestaat uit een vertragende Einzellens en een quadrupool. Daarbij is de extractor het eerste lenselement gevolgd door de lenselektrode en vervolgens dient de quadrupool als derde lenselement. De ionen komen aan met een energie van 5 keV vanaf de extractor naar de lens waarbij ze worden afgeremd tot een energie van 1 keV. Vervolgens worden de ionen weer versneld tot 5 keV en wordt bij de quadrupool de bundel afgebogen. De lens moet dus een potentiaal hebben van -5 kV en de quadrupool moet een gemiddelde potentiaal hebben van -9 kV.

De nauwkeurigheid van de spanningen op de quadrupool zijn bepalend voor de pixelbreedte waarmee het systeem plaatjes kan maken. De benodigde nauwkeurigheid kan worden bepaald met vergelijking 4

....

Maximale breedte scanoppervlak =
$$\frac{\frac{\Delta V}{b}L}{\Delta} \cdot \Delta z$$

4





Stel dat er een plaatje moet worden gemaakt met een pixelbreedte van 10 nm. Dan kan de grootte van het spanningsverschil om één pixel op te schuiven worden bepaald:

$$\Delta R = \frac{\frac{\Delta V}{b}L}{\phi} \Delta z = \Delta V \frac{L\Delta z}{b\phi}$$
5

$$\Delta V = \Delta R \frac{b\Phi}{L\Delta z} = 10 \cdot 10^{-6} \frac{6 \cdot 5000}{10 \cdot 15} = 0,002 \text{ V}$$

Deze waarde wordt gekozen als eis om de spanningen op de quadrupool te regelen. Dit betekent automatisch dat de ruis en storing kleiner moet zijn dan deze 2 mV.

Onder de quadrupool bevindt zich de coverelektrode. Deze zorgt ervoor dat het wisselende elektrische veld van de quadrupool wordt afgeschermd. De bundel komt uit de lensstapel en komt aan op het sample. Om ervoor te zorgen dat de bundel zonder af te remmen aankomt op het sample staat op het sample ook een spanning van -9 kV t.o.v. de aarde.

De resolutie van een FIB systeem hangt af van de spot grootte. Bij gallium FIB machines kan een spot grootte worden gehaald in de orde van 10 nm. Deze waarde wordt door meerdere factoren bepaald maar de chromatische aberraties van het optische systeem zijn degenen die het meest bijdragen. Wanneer de energiespreiding van de bundel hoog is zullen de chromatische aberraties meer bijdragen aan de grootte van de spot. Samengevat betekent dit dat de energiespreiding van de ionenbundel grote invloed heeft op de resolutie van een FIB systeem.

Voor een gallium ionenbron systeem is de energiespreiding typisch in de orde van 5 eV. Het streven is om bij de mini-NAIS de resolutie en dus de spot grootte beter te krijgen dan bij dit soort systemen. Dat betekent dat de energiespreiding moet worden beperkt waar mogelijk. De twee belangrijkste oorzaken van de energiespreiding zijn de chip-biasspanning en de stabiliteit van de hoogspanningen op de chip en op het sample. De chip-biasspanning zal in de orde van 0,3 V tot 1,0 V worden ingesteld.

Stel dat er een atoom aan de bovenkant van de chip wordt geïoniseerd en vervolgens door het elektrische veld van de chip beweegt. Het ion heeft dan onderaan de chip een energie van 0,3 eV terwijl een atoom dat aan de onderkant van de chip wordt geïoniseerd zich op dezelfde positie bevindt en nog een energie heeft van $kT \approx 0,04$ eV. De energiespreiding afkomstig van de chip-biasspanning is dus gelijk aan de chip-biasspanning.

Stel dat bij de hoogspanningen van de chip, de lens en het sample overal een rimpelspanning V_{rimpel} aanwezig is. Bij de chip geldt dan simpelweg dat de potentiaal waarbij de atomen worden geïoniseerd verspreid is over V_{rimpel} . V_{rimpel} op de lenselektrode zou voor de energiespreiding niet van belang zijn aangezien het ion afremt tot deze potentiaal maar vervolgens weer versnelt tot de potentiaal van het sample. V_{rimpel} van het sample zal dan dus wel van belang zijn, de potentiaal waarbij de ionen landen zal over V_{rimpel} verspreid zijn.

De totale energiespreiding is nu:

 $U_{spreiding} \approx V_{bias} + V_{rimpel chip} + V_{rimpel sample}$





Bij de realisatie van de hoogspanningsbronnen dient dus rekening te worden gehouden met de stabiliteit van de bronnen. Deze moeten zo stabiel mogelijk zijn, maar in ieder geval niet hoger dan in de orde van de chip-biasspanning. De eis wordt gekozen: $V_{rimpel} < 0.5 V_{piekpiek}$.

2.4 Overzicht van de spanningen, signalen, en softwarespecificaties voor de mini-NAIS

Nu de lensstapel is ontworpen en de spanningen en signalen bekend zijn kan een overzicht worden gemaakt.

De volgende signalen zijn nodig:

- 1 Chip: -4 kV gelijkspanning met een maximale rimpel van 0,5 V_{pp} (piek-piek).
- 2 Chip-bias: Dezelfde spanning als de chip plus een relatief kleine gelijkspanning: De biasspanning. De biasspanning moet kunnen worden ingesteld tussen 0 V en 5 V. Er is nog niet onderzocht of berekend hoe stabiel deze spanning moet zijn, voorlopig is de doelstelling om de ruis/storing en de instelnauwkeurigheid kleiner te houden dan 0,05 V.
- 3 Extractor: -9 kV gelijkspanning met een maximale rimpel van 0,5 V_{pp}. Dit signaal wordt ook gebruikt voor de coverelektrode en voor het sample.
- 4 Lens: -5 kV gelijkspanning met een maximale rimpel van 0,5 V_{pp}.
- 5 Deflector: Er is voorlopig gekozen een quadrupool te gebruiken om de ionenbundel af te buigen. Er moet rekening mee worden gehouden dat in de toekomst een octopool wordt gebruikt. De vier spanningen op de quadrupool moeten met de computer worden aangestuurd. Deze spanningen moeten een bereik hebben tussen -9 kV -200 V en -9 kV+200 V met een maximale relatieve onnauwkeurigheid van 2 mV.

Naast het genereren van de juiste aansturingen moet ook het signaal van de secundaire elektronen detector worden ingelezen en verwerkt tot een beeld. De doelstelling is om elke seconde een plaatje van 1000x1000 pixels te kunnen maken en er moet dus worden ingelezen met een frequentie van 1 MSa/s (Mega Sample per seconde).

Specificaties van de software

Er wordt gebruik gemaakt van National Instruments Labview. Er moet een programma worden geschreven dat de quadrupool spanningen uitstuurt en het signaal van de secundaire elektronen detector inleest. De uitsturing van de spanningen voor de quadrupool moet beschikken over de volgende opties:

- 1 Mogelijkheid om handmatig statische spanningen uit te sturen om kanalen te testen.
- 2 Scanning voltages genereren. Er moet een lineair oplopend signaal worden gegenereerd waarvan de frequentie en spanning instelbaar zijn. Dit signaal wordt gebruikt om de bundel te bewegen in de x-richting. Er wordt een zelfde soort signaal gebruikt om de bundel te bewegen in de y-richting. De frequentie van deze signalen moet kunnen oplopen tot 1 kHz (1000 keer oplopen tot de eindspanning per seconde)
- 3 Door de uitstuursignalen te combineren met het secundaire elektronen detector signaal moet een contrastbeeld worden gegenereerd.
- 4 De pixelbreedte, de sampletijd per pixel en het scanbereik moeten onafhankelijk van elkaar kunnen worden ingesteld.
- 5 De bundel moet kunnen worden verschoven zodat een ander oppervlak kan worden gescand. Dat houdt in dat er een offset spanning moet kunnen worden aangebracht.
- 6 Om astigmatisme te kunnen corrigeren moet er een stigmatoroptie worden geprogrammeerd om de vorm van de bundel te veranderen. Dit gebeurt met een offsetspanning.





- 7 De gemaakte plaatjes moeten kunnen worden opgeslagen
- 8 De Graphical User Interface (GUI) moet handig en overzichtelijk zijn.
- 9 Er moet voldoende commentaar bij de code komen zodat anderen verder kunnen werken aan het programma
- 10 De NI kaart moet altijd optimaal worden gebruikt, d.w.z. zo snel mogelijk samplen en altijd de beschikbare bits optimaal gebruiken. Het programma moet zo compact mogelijk worden geprogrammeerd zodat het snel werkt.





3 WERKWIJZE EN BEPALING VAN DE OPSTELLINGSAPPARATUUR

Er zijn een aantal onderdelen nodig om de elektronica opstelling te bouwen. Zo zijn er drie hoogspanningen nodig met een zekere stabiliteit, er is een data acquisitiekaart (DAQ-kaart) nodig en er is een versterker nodig om de spanning van de DAQ-kaart te versterken. Gedurende de uitvoering van de opdracht is een totaalontwerp tot stand gekomen. Dit totaalontwerp zal worden besproken en vervolgens zullen de losse onderdelen worden toegelicht.

3.1 Totaalontwerp van de elektronica voor de mini-NAIS

Omdat de spanningen op de quadrupoolsignalen onderling zo stabiel mogelijk moeten zijn wordt er gekozen om de aansturingen van deze signalen te "aarden" op -9 kV. Als de hoogspanningsbron dan instabiel blijkt dan worden alle quadrupoolsignalen opgetild waardoor de spanning tussen de quadrupoolsignalen onderling niet verandert.

Om dit te realiseren wordt er een kast ontworpen met een isolerende wand van 12 mm dik PVC waarin de DAQ-kaart en de versterkers komen te staan. Het ontwerp van de kast is bijgevoegd als bijlage 1. Er wordt m.b.v. een 1:1 vermogenstransformator netspanning verkregen die galvanisch is gescheiden van de aarde. Buiten de kast wordt een hoogspanningsvoeding gebruikt om -9 kV te leveren. Deze wordt de kast in geleid en in de kast wordt de nul van de galvanisch gescheiden netvoeding met de -9 kV verbonden. Binnen de kast worden alle apparaten en behuizingen aangesloten (geaard) op de -9 kV aansluiting.

Het totaalontwerp voor de elektronica opstelling is schematisch weergegeven in Figuur 9.







Figuur 9 Schematisch overzicht van de elektronica voor de mini-NAIS.





3.1.1 Statische hoogspanningen

Er zijn voor de mini-NAIS drie statische hoogspanningen nodig, -4 kV, -5 kV en -9 kV. Deze spanningen mogen een rimpel (=instabiliteit) hebben kleiner dan 0,5 V_{pp} (= $V_{piek-piek}$). Om dit te bereiken kunnen verschillende keuzes gemaakt worden. Er is reeds de beschikking over meerdere hoogspanningsvoedingen van het model FUG HCN35 12500, een hoogspanningsbron die een spanning tot 12,5 kV en een stroom tot 2,5 mA kan leveren. Er worden vier mogelijkheden bekeken:

- 1 Er worden drie FUG HCN35 12500 hoogspanningsbronnen gebruikt. Volgens de specificaties is de maximale rimpel 1,25 V_{pp} en de typische rimpel 0,6 V_{pp} . Deze optie is het eenvoudigst en het goedkoopst en als blijkt dat hij niet voldoet kan er voor een andere optie worden gekozen.
- 2 Er wordt één FUG HCN35 12500 hoogspanningsbron gebruikt. Vervolgens wordt er een spanningsdeler gemaakt waarbij de rimpel ook gedeeld wordt. Deze optie is goedkoop en relatief eenvoudig. Het nadeel is vooral dat de spanningen niet meer onafhankelijk van elkaar kunnen worden aangepast zonder te moeten solderen mocht dat in een later stadium nodig blijken.
- 3 Er worden drie nieuwe hoogspanningsbronnen gekocht met de juiste specificaties. De applied kilovolts model LS010P&N hoogspanningsbron levert maximaal 10 kV met een rimpel <10 mV_{pp}. De bron kostte in januari 2013 €820,- excl. btw. per stuk.
- 4 Er wordt één nieuwe hoogspanningsbron met de juiste specificaties gekocht en vervolgens wordt er een spanningsdeler gemaakt.

Een van de opties om de hoogspanningen -4 kV, -5 kV en -9 kV te verkrijgen is door één bron te gebruiken en vervolgens een spanningsdeler te maken. Het elektrisch circuit hiervan is te zien in Figuur 10.



Figuur 10 Elektrisch schema spanningsdeler. Met $R1 = 20 \text{ M}\Omega$, $R2 = 80 \text{ M}\Omega$, $R3 = 20 \text{ M}\Omega$, $R4 = 80 \text{ M}\Omega$, V1 = -10 kV, V2 = -9 kV, V3 = -5 kV en V4 = -4 kV

De weerstanden zijn zo gekozen dat er een stroom gaat lopen van 50 μ A bij een spanning van 10 kV. Het voordeel van deze optie is dat er slechts één hoogspanningsvoeding nodig is en dat de ruis/storing ook wordt gedeeld. Het nadeel is dat er geen flexibiliteit is om de spanningen *V2, V3* of *V4* aan te passen.

Als blijkt dat een voeding niet stabiel genoeg is kan worden gekozen voor een laagdoorlaatfilter. Het elektrisch schema is te zien in Figuur 11.







Figuur 11 Elektrisch schema van het gebruikte laagdoorlaatfilter.

De afsnijfrequentie van dit filter is:

$$f_{cut} = \frac{1}{2\pi RC} = 15,9$$
 Hz. 8

Er wordt een FUG HCN 35 12500 hoogspanningsbron ingesteld op 100 V. Het signaal is gemeten met filter en zonder filter. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1: Signaal en ruis/storing gemeten voor het laagdoorlaatfilter en na het laagdoorlaatfilter.

<i>V_{signaal}</i> voor filter	100,2 V
<i>V_{rimpel}</i> voor filter	$160 \mathrm{mV}_{\mathrm{pp}}$
<i>V_{signaal}</i> na filter	104,6 V
<i>V_{rimpel}</i> na filter	55 mV_{pp}

Uit de meetresultaten uit Tabel 1 blijkt dat het filter functioneert. De rimpel is gedempt met een factor 0,34. Het filter is dus geschikt om te gebruiken om de hoogspanningsbron stabieler te maken en er kan zo nodig een nog beter resultaat worden behaald door de capaciteit of de weerstand te verhogen.

Op basis van de verzamelde informatie is de keuze gemaakt om optie 1 uit te voeren. Er worden drie FUG HCN35 12500 bronnen gebruikt om de hoogspanningen te realiseren. Deze keuze is gemaakt vanwege de volgende argumenten:

-Dit is de goedkoopste optie.

-Dit is de snelste optie. (geen levertijd)

-De spanningen zijn onafhankelijk van elkaar te wijzigen.

-De stabiliteit van de bronnen is in dezelfde orde als van de eis. Er hoeven dus geen grote compromissen te worden gedaan.

-Het is mogelijk om de bronnen stabieler te maken met behulp van een laagdoorlaatfilter mocht dat nodig blijken.

-Het is mogelijk om in een later stadium van het project de bronnen te vervangen door betere alternatieven zoals bijvoorbeeld de applied kilovolts model LS010P&N.

3.1.2 Data acquisitie – National Instruments

De spanningen voor de quadrupool moeten worden gerefereerd aan -9 kV. De DAQ-kaart kan dus niet direct op de computer worden aangesloten. Hiervoor wordt een fiber-optisch USB verlengsnoer gebruikt. Het USB signaal wordt omgezet naar een optisch signaal. Via een glasvezel komt dit signaal aan bij het ontvangstkastje waar het signaal weer wordt omgezet en





naar een USB poort wordt geleid. De glasvezelkabel is isolerend en de ontvanger kan op de lokale "aarde" van -9 kV worden aangesloten. De National Instruments kaart (vanaf nu NI-kaart) moet tenminste een samplefrequentie van 1 MSa/s (megasample per seconde) hebben en heeft minstens vier analoge uitgangen nodig. Er is een NI USB 6353 Multifunction DAQ NI-kaart beschikbaar. Deze beschikt over 4 analoge outputs, 32 analoge inputs, 8 digitale outputs en 32 digitale inputs. De maximale samplefrequentie is 1,25 MSa/s. De resolutie van de analoge poorten is 16 bits. De minimale en maximale spanning op de outputs zijn -10 V respectievelijk +10 V. Aangezien er spanningen nodig zijn tussen -200 V en 200 V is er een spanningsversterker nodig.

3.1.3 Spanningsversterker

Er is een versterker nodig die de inputspanning kan versterken met een versterkingsfactor x20. Er is zo'n versterker beschikbaar echter dit is geen standaardversterker maar een zelfgebouwde versterker. Er is dus geen literatuur beschikbaar over deze apparatuur. De eigenschappen van de versterker worden eerst bepaald voordat er wordt besloten de versterker te gebruiken.

De volgende vragen moeten worden beantwoord:

- 1 Wat is de RC-tijd van de versterker?
- 2 Wat is de slew-rate van de versterker?
- 3 Hoeveel ruis/storing produceert de versterker?

Om vraag 1 te beantwoorden wordt er een impuls aangeboden (blokgolf van 1 Hz) met een amplitude van 0,1 V. De versterker zal direct de output verhogen van -2,0 V tot 2,0 V. De impulsresponsie van de versterker is te zien op de foto in Figuur 12. Er vallen meteen twee dingen op. Er zit een knik in de impulsresponsie die men niet zou verwachten bij een emachtsfunctie en er lijkt een vertraging van ongeveer 500 ns in de output te zitten. De knik is niet relevant voor de toepassing en kan worden genegeerd. De RC-tijd wordt vastgesteld op 4 ± 1 µs. De vertraging van 500 ns is vergeleken met de RC-tijd niet relevant en kan worden genegeerd.

 Pk-Pk(1): 213mV
 Pk-Pk(1): 213mV

 Pk-Pk(1): 213mV
 Pk-Pk(1): 213mV

 Source
 Clear

 Yerod
 Peak-Peak

Om vraag 2 te beantwoorden wordt er een impuls aangeboden (blokgolf van 1

Figuur 12; Foto waarop de impulsresponsie van de zelfbouw versterker is te zien. Het ingangssignaal (blokgolf) is ook te zien.

Hz) met een amplitude van 10 V. De versterker moet nu van -200 V naar +200 V de snelheid waarmee dit wordt behaald zal begrensd worden door de slewrate. De slewrate wordt afgelezen en wordt vastgesteld op $7,5\pm0,2$ V/µs.

Om de ruiseigenschappen van de versterker vast te stellen wordt eerst de uitgang gemeten wanneer de ingang is kortgesloten met aarde. De uitgang zou dan bij een ideale versterker 0 V zijn. Bij deze versterker wordt een ruis/storing gemeten van ongeveer 400 mV_{pp}. Aangezien dit een opvallend hoge waarde is bestaat het vermoeden dat de afscherming van de elektronica niet





voldoende is. Om dit te testen wordt de versterker in zijn geheel ingepakt in aluminiumfolie. Dit is te zien in Figuur 13. Het aluminiumfolie wordt aangesloten op de aarde. Er wordt nu een ruis gemeten $<5 \text{ mV}_{pp}$. Wanneer de output een maximale spanning van 200 V levert blijft de ruis kleiner dan 5 mV_{pp}. De eis voor de ruis op de uitgang is 2 mV en dit wordt niet gehaald.

Op basis van de bepaalde eigenschappen wordt er voor gekozen de versterker te gebruiken voor de elektronica opstelling van de mini-NAIS. Het is echter belangrijk dat er een goed afgeschermde behuizing voor de versterker wordt gebouwd zodat de ruis/storing laag is. Het feit dat de

ruis/storing in dat geval nog steeds te hoog is wordt voorlopig geaccepteerd en mocht dit in een later stadium van het project een probleem vormen dan zal er moeten worden gekozen voor



is n Figuur 13: De zelfbouw versterker is ingepakt in geaard aluminiumfolie om ruis en storing van buiten af te

een alternatief. De RC-tijd en de slewrate zijn in principe te hoog, maar als er in de software rekening mee wordt gehouden dan is dit geen probleem.

schermen

Als de versterker gebruikt wordt in de elektronica opstelling en er slaat een hoogspanning door naar een van de outputs van de versterker dan zou de versterker kapot kunnen gaan. Daarom wordt er een beveiligingscircuit ontworpen en gemaakt. Het elektrisch schema is te zien in Figuur 14.



Figuur 14 Beveiligingscircuit dat de versterkers beschermt wanneer er doorslag plaatsvindt.

R1=1,0 k Ω , R2=100 k Ω en er is een zenerdiode die begint te geleiden bij 190 V en bij 210 V een kortsluiting vormt. R2 zorgt ervoor dat bij een ontlading de stroom begrenst wordt. Bij een spanning van 10 kV is de stroom 0,10 A. R1 zorgt ervoor dat wanneer er doorslag is en de zenerdiode een kortsluiting is dat de stroom dan door de zenerdiode naar de lokale aarde loopt en niet via de weerstand de versterker in.





3.1.4 Veiligheidsonderbreking geïsoleerde kast

De apparatuur in de geïsoleerde kast staat op -9 kV wanneer de opstelling wordt gebruikt. Als de voorplaat niet op de kast gemonteerd is kan men dus bijvoorbeeld de behuizing van de NI-kaart pakken en een schok van 9 kV krijgen. Om dit soort gevaarlijke situaties te voorkomen is er een beveiliging ingebouwd zodat alle hoogspanningen automatisch uitschakelen als de voorplaat niet op de kast gemonteerd is. Het schema is te zien in Figuur 15.



Figuur 15 Elektrisch schema van de veiligheidsonderbreking van de geïsoleerde kast

De vier schakelaars zitten op de wand van de kast gelijmd en worden ingedrukt als de voorplaat op de kast wordt gemonteerd. Als allevier de schakelaars worden ingedrukt komt er 24 V van de voeding op het relais te staan en wordt de netvoeding doorgeschakeld zodat de hoogspanningsbronnen aan kunnen gaan. Als het circuit onderbroken wordt vallen de voedingen weer uit.

3.1.5 Circuit voor het regelen van de Biasspanning

Er is voor de chip in de mini-NAIS een regelbare spanning nodig die een spanningsverschil aanbrengt tussen de metalen membranen van de chip waartussen de gasatomen zich bevinden. De chip staat op een spanning van -4 kV en er moet dus een veilige oplossing komen. De spanning moet tussen 0 V en 5 V kunnen worden gevarieerd en dit moet worden gemeten.

Er wordt voor gekozen een circuit te maken en dit te "aarden" op -4 kV. Het elektrisch schema is te zien in Figuur 16.







Figuur 16: Elektrisch schema van de Biasspanningsregelaar met $R1 = 80 \text{ k}\Omega$, $R2 = 101 \text{ k}\Omega$, $R3 = 1022 \text{ k}\Omega$ en $R4 = 9,00 \text{ M}\Omega$.

R1 en R2 delen de spanning van de 9 V blokbatterij. Door aan de variabele weerstand te draaien kunnen de schakelaars aan worden gezet (draaischakelaar) en wordt de spanning gevarieerd vanaf 0 V tot 9 $\cdot \frac{101}{80+101} = 5$ V. R3 en R4 vormen een spanningsdeler:

$$V_{gemeten} = V_{bias} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 0,102 \cdot V_{bias}$$

De spanningsmeter heeft een bereik van -1,999 V en +1,999 V. De spanningsmeter kan zo worden geconfigureerd dat de komma een decimaal naar links schuift. Dit in combinatie met de spanningsdeler levert een juiste waarde op en er kunnen nu spanningen worden gemeten tussen -19,99 V en +19,99 V.

Om het circuit veilig, ruis- en storingsarm te maken is er voor gekozen om een dubbele behuizing te gebruiken. De binnenste behuizing is van kunststof en bevat de elektronica, de as van de variabele weerstand steekt door de behuizing en is ook gemaakt van kunststof. Het voltmetertje is in de kunststofbehuizing gelijmd. Dit doosje is in zijn geheel in een geaard metalen doosje geplaatst zodat storing van buitenaf grotendeels wordt afgeschermd. Het asje steekt ook door deze behuizing heen en om de spanning af te kunnen lezen is er een raampje in gezaagd dat is afgeschermd met plexiglas. In Figuur 17 is een foto van bovenaf genomen van het circuit en de behuizing.







Figuur 17 Foto van bovenaf. Alle elektronica in het binnenste doosje staat op hoogspanning. Het asje van de variabele weerstand is isolerend en zodanig lang dat er geen doorslag zal plaatsvinden. De metalen behuizing behoedt de gebruiker ervoor in de buurt van de hoogspanning te komen en schermt zo veel mogelijk ruis van buitenaf af.

Bij dit circuit is het belangrijk te weten hoe stabiel de biasspanning is en hoe nauwkeurig deze kan worden afgelezen. Dit is onderzocht door de aansluiting waarop -4 kV moet worden aangesloten kort te sluiten aan de aarde en door de uitgang van de -4 kV + Bias op de oscilloscoop aan te sluiten. De spanning is ingesteld door de variabele weerstand te verdraaien en de spanning af te lezen op het ingebouwde spanningsmetertje. De resultaten zijn te zien in Tabel 2.

Tabel 2 Metingen aan de biasspanningsregelaar. De spanning is ingesteld aan de hand van het ingebouwde spanningsmetertje. Deze spanning is gemeten met de oscilloscoop en er is gemeten hoeveel ruis/storing er op het signaal zat.

Ingestelde waarde:	Gemeten gelijkspanning: ($\pm 0,001$ V)	Ruis/storing: (\pm 0,2 mV)
Uit	0,000 V	1,5 mV _{pp}
0,00 V	0,000 V	1,5 mV _{pp}
0,01 V	0,012 V	1,6 mV _{pp}
0,10 V	0,108 V	1,4 mV _{pp}
0,25 V	0,251 V	1,4 mV _{pp}
1,00 V	1,008 V	1,4 mV _{pp}
4,93 V	4,943 V	1,4 mV _{pp}

Het spanningsmetertje heeft een afwijking kleiner dan 0,01 V of kleiner dan 1% van de gemeten waarde, dit is acceptabel. De gemeten ruis/storing is minder dan 1 mV_{pp} en dat is acceptabel.

3.2 Werking van het Labview programma

Het hoofddoel van het labview programma is om de quadrupoolsignalen uit te sturen en een grijswaardenafbeelding te maken van het signaal van de secundaire elektronendetector. Dit is gelukt, de overige mogelijkheden die het programma moet krijgen bleken niet haalbaar binnen de stageperiode.





3.2.1 Graphical User Interface

Het programma, vanaf nu VI (virtual Instrument) genoemd, wordt gebruikt via de Graphical User Interface (GUI). In Figuur 18 is de GUI te zien. Bij elk nummer zal worden uitgelegd wat de functie is.



Figuur 18 Graphical User Interface van het VI (Virtual Instrument).





- 1 Programma modus. Er kan worden gekozen voor "Static voltage test mode" om de afzonderlijke outputs te testen of er kan worden gekozen voor "scanning mode" waarbij de scanspanningen worden uitgestuurd en het mogelijk wordt om een afbeelding te maken.
- 2 Resolutie. Hier kan worden ingesteld hoeveel pixels hoog en breed de afbeelding moet krijgen.
- 3 Scanning amplitude. Hier wordt de maximale spanning van de outputs ingesteld. In een later stadium zal dit direct gaan afhangen van de mate waarin wordt ingezoomd op een bepaalde positie van het sample. Tot die tijd wordt er handmatig een spanning ingevoerd.
- 4 In de "Static voltage test mode" kunnen afzonderlijke outputs worden getest. Bij deze balken kan de statische spanning op elk van de 4 outputs worden geregeld tussen -10 V en +10 V.
- 5 Stopknop.
- 6 Errorscherm. Als er foutmeldingen zijn worden deze hier automatisch weergegeven.
- 7 Uitleesmodus. Hier kan worden gekozen wat er moet worden uitgelezen. Zo kan een afzonderlijke output worden gemeten, deze spanning verschijnt dan als functie van tijd in de grafiek bij nummer 8. Het uitlezen kan helemaal worden stop gezet of het signaal van de secundaire elektronen detector wordt gelezen en hier wordt een afbeelding van gemaakt.
- 8 Als een output wordt gemeten als functie van tijd dan wordt die meting in deze grafiek weergegeven.
- 9 Dit is het grijswaardenscherm waar de afbeelding van het sample op wordt weergegeven.

3.2.2 Werking van het VI

Om een indruk te geven hoe het VI is geprogrammeerd wordt het blokschema van het VI doorgenomen. In Figuur 19 is het blokschema weergegeven. De genummerde onderdelen/gedeelten van het VI zullen worden doorgenomen:

- 1 Wanneer het programma in "Scanning mode" staat wordt hier gezorgd dat wanneer er een outputkanaal wordt uitgelezen dat er dan 5 perioden van dit signaal achter elkaar worden gemeten. De vorm van het signaal is dan herkenbaar en de meting is overzichtelijk.
- 2 subVI waarin de scansignalen worden berekend.
- 3 De DAQ assistant vormt de brug tussen het programma en de hardware. Hier wordt van tevoren ingesteld hoe de hardware moet worden bestuurd en deze subVI zorgt er dan voor dat dit gebeurt. Zaken als triggering moeten hier ook worden geregeld.
- 4 subVI imaging. Binnen deze subVI wordt het signaal van de secundaire elektronen detector uitgelezen en wordt er een afbeelding berekend.
- 5 Wanneer "imaging" uit staat kunnen individuele kanalen worden gemeten. In de cases 0 t/m 3 worden de outputs 1 t/m 4 gemeten. Doordat dit in verschillende cases gebeurt hoeft de snelheid van de DAQ kaart niet gedeeld te worden door verschillende inputs.

DE HAAGSE HOGESCHOOL





Figuur 19 Blokschema van het VI voor de mini-NAIS elektronica opstelling





3.3 Circuit voor het meten van wisselspanning op een gelijkspanning

Aangezien er bij een oscilloscoop slechts 300 V mag worden aangesloten is het nodig om wisselspanning te kunnen meten waarbij gelijkspanning niet wordt meegemeten. Met zo'n circuit kan bijvoorbeeld de instabiliteit van een hoogspanningsbron worden gemeten. Een ontwerp voor een dergelijk circuit bestaat al (bron 2) en is opnieuw gemaakt. Het elektrisch schema is te zien in Figuur 20.



Figuur 20: Elektrisch schema van het circuit waarmee wisselspanning op een gelijkspanning kan worden gemeten. *R1* = 56 k Ω , *R2* = 56 k Ω , *R3* = 1 G Ω , *R4* = 1120 Ω , *R5* = 1,0 M Ω , *R6* = 1,0 M Ω , *C1* = 1,0 nF, *C2* = 100 nF, *C3* ≈ 100 pF. Dit circuit komt uit bron 2, pagina 14 en is daarna aangepast voor deze toepassing.

R3 is een bleederweerstand om C1 leeg te laten lopen na het uitschakelen. R3 is 1,0 GΩ en kan worden beschouwd als een open verbinding. R1 en R2 kunnen vanaf nu als één weerstand worden gezien. R6 is de inwendige weerstand van de oscilloscoop, 1,0 MΩ. C3 is de parasitaire capaciteit van de kabels, typisch 100 pF per meter kabel en de inwendige capaciteit van de oscilloscoop, 14 pF. Er is een korte kabel gebruikt (±50 cm), geschat wordt dat C3 100 pF is. R5 is een bleederweerstand om C2 te ontladen en heeft een waarde van 1,0 MΩ. Bij een frequentie van 10 Hz is de impedantie van C2 ≈ 160 kΩ. Er wordt gekozen om R5 t.o.v. C2 te verwaarlozen aangezien zulke lage frequenties geen rol zullen spelen bij deze toepassing. Deze redenering geldt ook voor R6. C3 is een factor 1000 kleiner dan C2 maar zal wel een rol gaan spelen wanneer niet meer geldt $Z_{R4} \ll Z_{C3}$. Dit geldt tot ongeveer 140 kHz. Er wordt dus voor gekozen C2 ook te verwaarlozen. Het schema dat overblijft is te zien in Figuur 21, dit schema is representatief tussen ~10 Hz en ~140 kHz.







Figuur 21: Vereenvoudigd rekenschema rimpelmeetcircuit. Dit schema is geldig tussen 10 Hz en 140 kHz met $R1 = 112 \text{ k}\Omega$, $R2 = 1120 \Omega$, C1 = 1 nF, C2 = 100 nF

Bij het zien van dit vereenvoudigde schema wordt meteen duidelijk dat er een spanningsdeler is gemaakt die voor elke frequentie gelijk is terwijl gelijkspanning niet door C1 kan. De overdracht wordt:

$$H = \frac{Z_{out}}{Z_{in}} = \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}{R_1 + R_2 + \frac{C_1 + C_2}{j\omega C_1 C_2}} \qquad \cdot \frac{R_1 + R_2 - \frac{C_1 + C_2}{j\omega C_1 C_2}}{R_1 + R_2 - \frac{C_1 + C_2}{j\omega C_1 C_2}}$$

$$H = \frac{R_1 R_2 + R_2^2 + \frac{C_1 + C_2}{\omega^2 C_1 C_2^2} - j(\frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{\omega C_1 C_2})}{(R_1 + R_2)^2 + \frac{(C_1 + C_2)^2}{\omega^2 C_1^2 C_2^2}}$$

$$10$$

De overdracht van het circuit is gemeten door een functiegenerator op de ingang aan te sluiten en de oscilloscoop op de uitgang. De resultaten en de theoretische overdracht zijn weergegeven in Figuur 22.



Overdracht AC meetcircuit

Figuur 22: Theoretische en gemeten overdracht van het circuit om wisselspanning te meten zonder gelijkspanning.





In Figuur 22 is te zien dat in het gebied van 10 Hz tot 140 kHz de theoretische overdracht en de werkelijke overdracht minder dan 3 dB afwijken. Het circuit is dus goed bruikbaar.

Om te voorkomen dat er storing wordt opgevangen wordt het circuit in een geaard afgesloten metalen doosje gebouwd.





4 RESULTATEN

Nadat alle onderdelen zijn besteld en geleverd is de hele opstelling opgebouwd in een 19 inch rek. In Figuur 23 is een foto van de opstelling te zien.



Figuur 23 Foto van de elektronica opstelling voor de mini-NAIS

Allereerst zal de opstelling worden gecontroleerd op veiligheid. Als dit is gebeurd en de opstelling is veilig dan zullen de signalen en het VI worden getest.

4.1 Hoogspanning doorslag test

De opstelling moet worden getest of deze voldoende geïsoleerd is. Dit wordt gedaan met een hoogspannings isolatie tester: Danbridge Denmark 30 kV non-destructive insulation tester type JP 30A. Dit apparaat kan een hoogspanning leveren tot maximaal 30 kV maar beperkt de stroom tot maximaal 100 μ A zodat er weinig tot geen schade aan het geteste apparaat ontstaat. Op het apparaat zit ook een luidspreker, als er een (kleine) ontlading is dan hoort men een tik.





4.1.1 Geïsoleerde kast

Vooraf wordt bij alle apparaten en hun behuizingen gecontroleerd of ze geaard zijn. Dit wordt bij de apparaten buiten de kast gecontroleerd met de "echte" aarde en binnen de kast wordt er gecontroleerd of alles in verbinding staat met de "opgetilde" aarde. Alle aansluitingen kloppen en er kan worden getest. De hoogspanningsvoeding wordt afgekoppeld omdat hier een bleederweerstand in zit waar stroom door kan weglekken. De spanning wordt langzaam omhoog gebracht tot 12 kV en er is geen sprake van doorslag of kruipstroom.

4.1.2 Zeven-polige stekker naar de SEM

De hoogspanningen moeten worden doorgevoerd naar het vacuüm van de SEM en hiervoor wordt een zeven-polige stekker gebruikt. In Figuur 24 is een foto te zien van deze doorvoer.



Figuur 24 Zeven-polige stekker om hoogspanningen door te voeren naar de vacuümruimte van de SEM

De stekker moet, wanneer deze juist gemonteerd is, 12 kV onderling spanningsverschil kunnen isoleren zonder doorslag. Nadat de stekker is gemonteerd wordt dit getest. In Tabel 3 is te zien welk signaal waar op de stekker is aangesloten.

Nummer:	Naam:	Spanning:
1:	Quadrupool 1	-9 kV±200 V
2:	Quadrupool 2	-9 kV±200 V
3:	Chip	-4 kV
4:	Chip Bias	-4 kV + Bias
5:	Quadrupool 3	-9 kV±200 V
6:	Quadrupool 4	-9 kV±200 V
7:	Extractor	-9 kV

Tabel 3 Signaalconfiguratie op de zeven-polige stekker

Telkens wordt één kabel aangesloten op de hoogspanningstester en worden alle andere signalen kort gesloten met de aarde. Als er nu doorslag plaats vindt tussen twee kabelkernen dan wordt dit ook opgemerkt. Dit wordt vervolgens met alle kabels uitgevoerd. De resultaten staan in Tabel 4.





Kabel:	Goed bij:	Doorslag bij:	Lekstroom (µA):
Quadrupool 1	10 kV	11 kV	0,00
Quadrupool 2	12 kV	-	0,00
Quadrupool 3	12 kV	-	1,6
Quadrupool 4	500 V	1 kV	-
Extractor	12 kV	-	0,03
Chip	12 kV	-	0,06
Chip Bias	12 kV	-	0,04

In Tabel 4 is te zien dat er in de stekker een defect is. De stekker wordt gedemonteerd en er wordt gezocht naar de plek waar de doorslag plaats vindt. Deze plek is gevonden en is te zien in Figuur 25 en Figuur 26.



Figuur 25 De zeven-polige stekker bleek niet goed. Na demontage werd het defect gevonden, er is duidelijk een blauwe plasmaboog te zien rond de kabel van quadrupool 4



Figuur 26 Het defect in de zeven-polige stekker is gevonden. De hele stekker moet opnieuw worden gemonteerd





De kabel is waarschijnlijk kapot geknipt tijdens het strippen van de aardmantel. De kabel kan niet goed gerepareerd worden en de complete stekker wordt opnieuw gemonteerd. De stekker is daarna opnieuw getest, de resultaten staan in Tabel 5.

Kabel:	Goed bij:	Doorslag bij:	Lekstroom (µA):
Quadrupool 1	12 kV	-	3,2
Quadrupool 2	12 kV	-	0,6
Quadrupool 3	12 kV	-	1,6
Quadrupool 4	12 kV	-	1,6
Extractor	12 kV	-	2,6
Chip	12 kV	-	2,2
Chip Bias	12 kV	-	0,4

Tabel 5 Hoogspanning doorslag test poging 2

De stekker lijkt nu goed te zijn afgezien van de lekstromen. Idealiter zou er geen lekstroom moeten zijn. Het vermoeden bestaat dat de lekstroom er is doordat de kabels vies zijn van bijvoorbeeld vette vingers. De stekker wordt inclusief kabel in een bekerglas met ethanol geplaatst en dit wordt in een trilbad geplaatst. Een trilbad is een waterreservoir waarin ultrasone trillingen al het vuil van een voorwerp los kunnen trillen. Het trilbad wordt 30 minuten aangezet en vervolgens wordt de stekker eruit gehaald en te drogen gelegd. De hoogspanning doorslag test wordt nog eens uitgevoerd. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.

Kabel: Goed bij: Doorslag bij: Lekstroom (µA): Quadrupool 1 12 kV 0,0 -0,0 Quadrupool 2 12 kV -12 kV 0,0 Quadrupool 3 -Quadrupool 4 12 kV 0,0 -Extractor 12 kV 0,0 -12 kV 0,0 Chip -12 kV Chip Bias 0,0 -

Tabel 6 Hoogspanning doorslag test poging 3

Het "schoon trillen" lijkt te hebben geholpen want zoals in Tabel 6 is te zien worden er geen lekstromen meer gemeten. De stekker is nu klaar voor gebruik.

De spanning voor de lens van -5 kV is nog niet op een stekker aangesloten. Wanneer in een later stadium de opstelling wordt gebruikt zal er een andere zeven-polige stekker worden gebruikt om ook dit signaal door te voeren. Momenteel is echter nog niet bekend welke signalen er op de andere zes doorvoeren moet worden aangesloten.

4.2 Testen van de signalen en het VI

Nu er is vastgesteld dat de opstelling veilig is en dat er geen doorslag plaats vindt kunnen de signalen worden gecontroleerd. De signalen worden eerst gemeten met de oscilloscoop zonder dat de hoogspanningsbronnen aan staan, de bron wordt zelfs kortgesloten met de aarde zodat de ruis/storing op het signaal kan worden gemeten. Tijdens de eerste poging wordt er geconstateerd dat er een voeding van de versterker defect is, deze wordt vervangen. De resolutie wordt ingesteld op 100x100 en de amplitude van de signalen wordt ingesteld op 0,5 V. De





quadrupoolsignalen zijn gemeten en er zijn foto's van deze metingen te zien in Figuur 27, Figuur 28, Figuur 29 en Figuur 30.



Figuur 27 Quadrupoolsignaal X positief gemeten met de oscilloscoop. Er is duidelijk te zien dat het signaal de tijd krijgt om te dalen tot -10 V, dit moet in verband met de RC-tijd en de slewrate van de versterker waarna het signaal weer lineair stijgt



Figuur 28 Quadrupoolsignaal X negatief gemeten met de oscilloscoop







Figuur 29 Quadrupoolsignaal Y positief gemeten met de oscilloscoop. Wanneer men verder in zou zoomen zou men zien dat het oplopende signaal bestaat uit 100 "traptreden" (resolutie = 100). Tussen elke traptrede zit een kleine vertraging zodat het X signaal kan dalen tot zijn minimum



Figuur 30 Quadrupoolsignaal Y negatief gemeten met de oscilloscoop.

In Figuur 27 t/m Figuur 30 is te zien dat de vorm van de signalen goed is. Om te zien hoeveel storing of ruis er op de signalen zit wordt er ingezoomd. Er is een periodiek signaal te zien met een periode van $8\pm1\,\mu$ s en een spanning van $110\pm10\,\text{mV}_{pp}$. Het is interessant om te weten of dit signaal bij elke versterker exact hetzelfde is of dat het onderling verschilt. Daarom wordt er op het tweede kanaal van de oscilloscoop een tweede output aangesloten. Dit is te zien in Figuur 31.







Figuur 31 Oscilloscoopmeting waarbij twee quadrupoolsignalen op de oscilloscoop zijn aangesloten waarbij is ingezoomd zodat de ruis en storing zichtbaar wordt. De storingssignalen lijken vrijwel helemaal overeen te komen

Zoals in Figuur 31 te zien is lijken de stoorsignalen op beide quadrupoolsignalen vrijwel helemaal overeen te komen. Om dit te checken worden de signalen over elkaar gelegd. Dit is te zien in Figuur 32.



Figuur 32 Oscilloscoopmeting waarbij twee quadrupoolsignalen over elkaar zijn geschoven. De signalen passen perfect over elkaar heen





In Figuur 32 is duidelijk te zien dat het stoorsignaal op beide quadrupoolsignalen perfect overeenkomt. Dat betekent dat dit stoorsignaal geen grote invloed zal hebben op de bundelafbuiging. De dikte van het gemeten signaal in Figuur 32 staat voor de instabiliteit van de spanning tussen de quadrupoolsignalen en juist die instabiliteit moet zo laag mogelijk zijn zodat de bundelafbuiging zo nauwkeurig mogelijk kan worden gerealiseerd. De dikte van deze lijn wordt afgelezen: 10 ± 5 mV.

Aangezien nog niet alle onderdelen van het mini-NAIS project af zijn kunnen er nog geen plaatjes worden gemaakt van samples. Echter het is wel mogelijk om te testen of het VI werkt. Stel dat in plaats van het signaal van de secundaire elektronen detector het signaal X pos wordt gebruikt om een beeld mee te vormen. Elke rij in de x-richting zou dan hetzelfde resultaat moeten opleveren, namelijk een verloop van -10 V naar +10 V. Wanneer het Ypos signaal zou worden aangesloten lopen de rijen in de y-richting van -10 V naar 10 V. Deze twee experimenten worden uitgevoerd en er worden schermafbeeldingen gemaakt. Deze zijn te zien in Figuur 33 en Figuur 34.



Figuur 33 Quadrupoolsignaal Xpos wordt hier aangesloten op de input waar normaal het signaal van de secundaire elektronen detector binnenkomt. De metingen en de stuursignalen zijn perfect getriggerd



Figuur 34 Quadrupoolsignaal Xpos wordt hier aangesloten op de input waar normaal het signaal van de secundaire elektronen detector binnenkomt.





4.3 Testen van de signalen en het VI met de hoogspanningsvoedingen aan

De signalen en het VI zijn uitgebreid getest terwijl de hoogspanningsvoedingen uit stonden. Om zeker te weten dat de apparatuur ook goed werkt als de hoogspanningsbron aan staat moest dit getest worden. Dit is vrijwel op dezelfde manier gedaan als in paragraaf 4.2 met slechts één aanpassing. Tussen het quadrupoolsignaal en de oscilloscoop is het circuit uit paragraaf 3.3 aangesloten. Zo is de oscilloscoop beschermd tegen hoogspanning en kan het quadrupoolsignaal wel worden gemeten. De metingen uit paragraaf 4.2 worden opnieuw gedaan en er wordt vastgesteld dat de scansignalen ook werken met de hoogspanningsbron aan.





5 CONCLUSIE

Het hoofddoel van de opdracht om de elektronische hardware en software voor de mini-NAIS te ontwerpen en op te bouwen is behaald. Alles is opgebouwd tot één werkend geheel en er is aangetoond dat de apparatuur en de software functioneren.

De hoogspanningsbronnen hebben een rimpel (instabiliteit) van maximaal 1,25 V_{pp} en een typische rimpel van 0,6 V_{pp} . Dit is weliswaar slechter dan de eis van 0,5 V_{pp} maar wel acceptabel omdat in een later stadium van het project de bronnen eventueel kunnen worden vervangen door stabielere bronnen.

De Biasspanning kan eenvoudig en veilig worden geregeld en wordt continue gemeten. De afwijking is kleiner dan 0,01 V of kleiner dan 1% van de gemeten waarde en voldoet daarmee aan de eis.

De stabiliteit tussen de quadrupoolsignalen ten opzichte van elkaar is 10 ± 5 mV_{pp} en daarmee voldoen deze signalen niet aan de eis van 2 mV_{pp}. Dit betekent dat een afbeelding met een pixelgrootte van 10 nm niet kan worden behaald met de opstelling zoals deze nu is.

De opstelling is veilig en er is geen sprake van doorslag of lekstroom in de elektronica opstelling. De apparatuur in de opstelling is beschermd tegen doorslag in de lensstapel.

Het VI creëert de juiste quadrupoolsignalen. Het signaal van de secundaire elektronen detector kan worden ingelezen en het inlezen en uitsturen van signalen is getriggerd. Met het programma kunnen afbeeldingen worden gemaakt en kunnen de quadrupoolsignalen individueel worden getest.

Wegens tijdgebrek zijn een aantal eisen aan het VI niet gerealiseerd:

-De sampletijd per pixel kan niet afzonderlijk worden ingesteld.

-Het scanbereik kan wel worden ingesteld, maar als functie van spanning en niet als functie van afstand op het sample

-Astigmatisme kan niet worden gecorrigeerd.

-De gemaakte grijswaardenafbeeldingen kunnen niet worden opgeslagen.





6 LITERATUUR

[1] Prof. Dr. ir. P. Kruit, *Introduction to Charged Particle Optics* (2010)

[2] Dienst Technische Ondersteuning TU Delft, *Modulaire hoogspanningsvoeding gebruikershandleiding versie 1.1* (2004)

[3] Dr. ir Paul Holmes, *Elektrische netwerken* (2003)

Afbeeldingen:

[4] Astigmatische lens,

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Meridional%2BSagittalPlane.png

[5] Elektrostatische quadrupool,

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/11/Paul-Trap.svg/2000px-Paul-Trap.svg.png

Bijlagen:

Bijlage 1, ontwerp van de PVC kast. Ontwerp door ir. D. W. Morsink





Bijlage 1, ontwerp van de PVC kast

Box:



DE HAAGSE HOGESCHOOL



Top:



Afstudeerscriptie Christiaan Schinkel.docx





Sidepanel







Bottom:







Backpanel:







Frontpanel Bottom:







Connector panel:







Connector panel front:



DE HAAGSE HOGESCHOOL



Shelve:



Afstudeerscriptie Christiaan Schinkel.docx