

Algemene instructies voor de experimentele toets

De experimentele toets duurt 5 uur. De opdrachten in de experimentele toets zijn samen 20 punten waard. Succes van Ad en Enno!

Voor aanvang van de toets

- Je mag de enveloppen met de opdrachten niet openen voordat het geluidssignaal gaat dat het begin van de toets aangeeft.
- Het begin en het einde van de toets wordt aangegeven met een geluidssignaal. Elk uur zal de verstreken tijd worden aangegeven. Zo ook een kwartier voor het einde van de toets.

Tijdens de toets

- Er zijn speciale antwoordbladen voor je antwoorden. Noteer je waarnemingen/resultaten/antwoorden in de juiste tabellen, kaders of grafieken op het betreffende antwoordblad (A). Voor elk onderdeel zijn ook lege werkbladen (aangegeven met een W) om berekeningen en/of uitwerkingen te maken. Let er op dat je bladen gebruikt die bij het betreffende onderdeel horen (controleer het nummer in de header van het blad). Zet een kruis door iets dat je hebt opgeschreven maar niet beoordeeld wilt hebben. Gebruik alleen de voorkant van elk blad.
- Wees kort en bondig in je antwoorden. Gebruik waar mogelijk vergelijkingen, logische operatoren en tekeningen om je resultaten te verduidelijken. Vermijd het gebruik van lange zinnen.
- Foutenanalyse is niet vereist tenzij dat expliciet wordt aangegeven. Geef echter antwoorden in het juiste aantal significante cijfers. Verder zal je keuzes moeten maken in het aantal meetpunten en het herhalen van metingen tenzij hier specifieke instructies over gegeven worden.
- Het is vaak mogelijk onderdelen te doen zonder dat je de voorgaande onderdelen opgelost hebt.
- Je mag zonder toestemming je werkgebied niet verlaten. Als je enige hulp nodig hebt (vullen van je drinkfles, kapotte calculator, toilet break etc.) maak je dat kenbaar aan een surveillant door een van de drie vlaggetjes in de houder aan je werkruimte te plaatsen. ("Refill my water bottle, please", "I need to go to the toilet, please", of "I need help, please" in alle andere gevallen.)

Aan het einde van de toets

- Aan het einde van de toets moet je direct stoppen met schrijven.
- Leg voor elk onderdeel de antwoordbladen in de volgende volgorde: Voorblad (cover sheet C), vragen (questions Q), antwoorden (answer sheets A) en werkbladen (worksheets W).
- Stop de algemene instructie (general instructions G) in de overgebleven envelop. Zorg ervoor dat je student code zichtbaar is in het kijkvenster van elke envelop. Lever ook de lege vellen in. Het is niet toegestaan om bladen uit de toetsruimte mee te nemen.
- Stop je schrijfgerei (2 ball point pennen, 1 viltstift, 1 potlood, 1 schaar, 1 liniaal, 2 oordopjes) maar ook de geleverde rekenmachine en je eigen rekenmachine in de doorzichtige zip bag.
- Wacht bij je tafel totdat je envelop is opgehaald. Als alle enveloppen zijn opgehaald zal je gids je naar de uitgang begeleiden. Neem je zip bag mee en geef deze af bij de uitgang. Neem ook je waterfles mee.

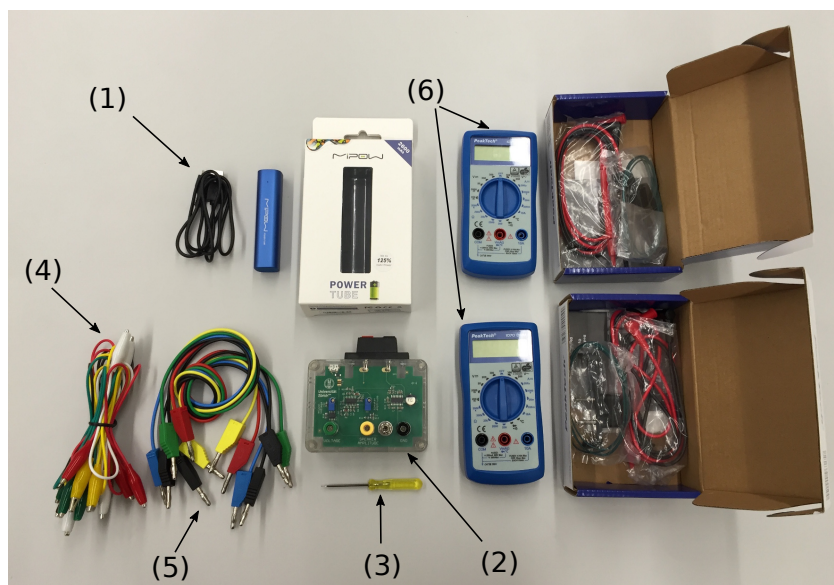
Onderdelen

Experiment E-I:	Electrische geleidbaarheid in twee dimensies	10 punten
Experiment E-II:	Springende korrels - Een model voor fase overgangen en instabiliteit	10 punten

Bij de experimenten E-I en E-II wordt een aantal keren gebruik gemaakt van dezelfde apparatuur: bijvoorbeeld de batterij en de signaal generator.

Opmerking: Als je de onderdelen uit de doos haalt: til de luidspreker niet op aan de plastic cilinder die aan het luidsprekermembraan is bevestigd.

Apparatuur voor beide experimenten

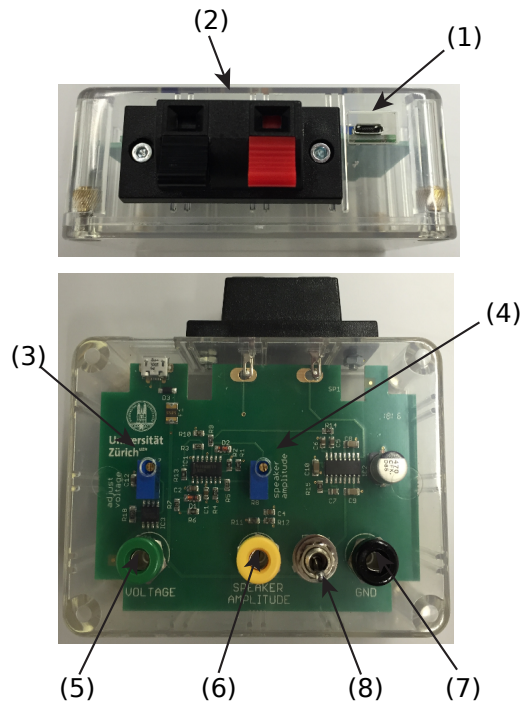


Figuur 1: Apparatuur voor beide experimenten.

1. Batterij, inclusief een USB kabel
2. Instelbare signaalgenerator. Deze wordt gevoed door de batterij.
3. Kleine schroevendraaier
4. Tien kabeltjes met krokodillenbekjes.
5. Zes kabeltjes met 4 mm plug
6. Twee digitale multimeters

Je mag ook gebruik maken van alle andere beschikbare materialen om de experimenten uit te voeren.

Signaalgenerator



Figuur 2.

1. USB aansluiting om de signaal generator te voeden.
2. Luidspreker aansluitingen. (Wordt alleen gebruikt in E-II)
3. Potentiometer om de gelijkspanning aan te passen. (Wordt alleen gebruikt in E-I.)
4. Potentiometer om de amplitude van de luidspreker aan te passen. (Wordt alleen gebruikt in E-II.)
5. Output aansluiting DC spanning. (Wordt alleen gebruikt in E-I.)
6. Monitor output aansluiting voor de luidspreker amplitude aandrijving. (Wordt alleen gebruikt in E-II.)
7. Aansluiting voor 'aarde' (GND, common ground).
8. Schakelaar om de output naar de luidspreker (2) en de monitor output aansluiting (6) AAN of UIT te zetten.

De signaalgenerator wordt door de batterij gevoed, sluit deze daartoe met de USB kabel aan op de USB aansluiting (1).

Opmerking: Er zijn bij de potentiometers (3) en (4) meerdere slagen (turns) nodig om van het begin tot het einde van het bereik te komen. De potentiometers hebben geen mechanische stop aan het einde van het bereik.

Digitale multimeters

De digitale multimeters kunnen voor zowel het meten van de stroom als spanning gebruikt worden. Verbind de twee meetsnoeren altijd met de aansluitingen " $V_{mA\Omega}$ " en "GND" en kies vervolgens current/voltage en het meetbereik door middel van de keuzeschakelaar.

Elektrische geleidbaarheid in twee dimensies (10 punten)

Neem voor het begin van dit experiment de algemene instructies uit de aparte enveloppe door!

Inleiding

Voor het ontwikkelen van de volgende generatie apparatuur gebaseerd op halfgeleidertechnologie zoals computerchips of zonnecellen, zijn onderzoekers op zoek naar materialen met uitstekende transporteigenschappen, bijvoorbeeld een lage soortelijke weerstand. Het meten van deze eigenschappen gebeurt door gebruik te maken van samples met eindige afmetingen, aansluitpunten met een eindige overgangsweerstand (contactweerstand) en door het uit te voeren in een speciale geometrie. Er moet rekening gehouden worden met deze effecten, zodat de werkelijke materiaal eigenschappen bepaald kunnen worden. Bovendien kan een dunne film van het materiaal andere eigenschappen vertonen dan een groter volume van hetzelfde materiaal.

In deze opdracht onderzoeken we het meten van elektrische eigenschappen. We maken gebruik van twee definities:

- **Weerstand R :** De weerstand is een elektrische eigenschap van een sample of apparaat. Het is de grootte die we meten aan een specifiek sample met gegeven afmetingen.
- **Soortelijke weerstand ρ :** De soortelijke weerstand is een materiaal eigenschap welke de waarde van de weerstand bepaalt. Deze is afhankelijk van het materiaal zelf en externe parameters zoals de temperatuur, maar onafhankelijk van de geometrie van het sample.

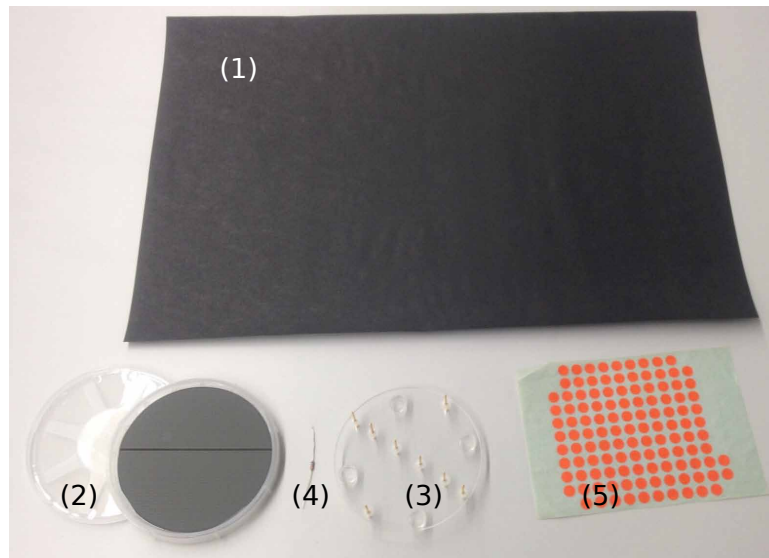
We zullen met name de soortelijke bladweerstand meten. Dit is de soortelijke weerstand gedeeld door de dikte van een zeer dun blad.

We onderzoeken de invloed die de volgende parameters hebben op het meten van de elektrische weerstand van een dunne laag van het materiaal:

- het meetcircuit (de schakeling)
- de geometrie bij het meten
- en de afmetingen van het sample

Een vel geleidend papier en een silicium wafer bedekt met een laagje metaal worden gebruikt als samples.

Lijst van materialen



Figuur 1: Extra materiaal bedoeld voor dit experiment.

1. Geleidend papier bedekt met een laagje grafiet.
2. Een siliciumwafer bedekt met een dunne chroomfilm (opgeborgen in een plastic doosje)
3. Een plexiglasplaat met 8 veerpinnen.
4. Een ohmse weerstand
5. Gekleurde stickers

Belangrijke voorzorgsmaatregelen

- De gegeven siliciumwafer is zeer breekbaar bij een val of een buiging ervan. Raak het glimmend metalen oppervlak niet aan en bekras het niet!

Instructies

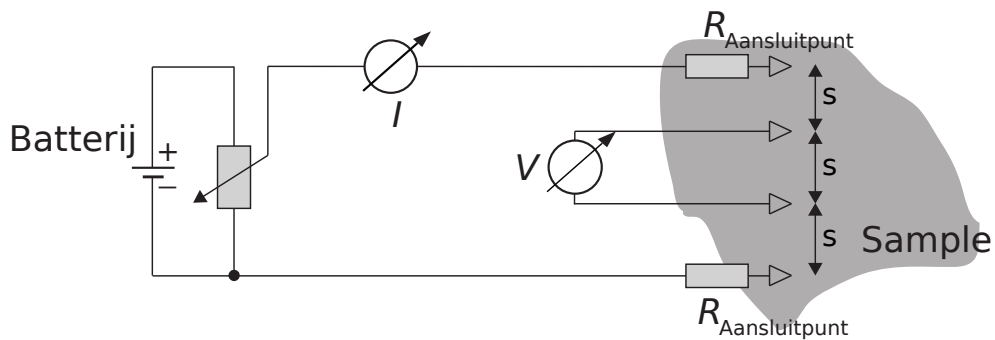
- In het experiment zal de signaalgenerator gebruikt worden als een DC spanningsbron. In deze stand geeft de signaalgenerator een constante spanning tussen het *voltage* aansluitpunt (5) en het *GND* aansluitpunt (7). De nummers verwijzen naar de foto gegeven in de algemene instructies.
- De spanning (bereik: 0 - 5 V) kan worden geregeld door te draaien aan het schroefje van de linker potentiometer aangegeven met *adjust voltage* (3). Gebruik hiervoor de schroevendraaier.
- Zorg ervoor dat gedurende dit experiment op de signaalgenerator de voeding voor de luidspreker ten alle tijde is uitgeschakeld. Doe dit met behulp van de schakelaar (8). Je kunt dit controleren door de spanning te meten tussen het *speaker amplitude* monitor aansluitpunt (6) en het *GND* aansluitpunt (7). Als de voeding voor de luidspreker uit is, is de spanning tussen deze twee uitgangen gelijk aan nul.

Deel A. Vier-puntsmetingen (4PP = Four-point-probe) (1.2 punten)

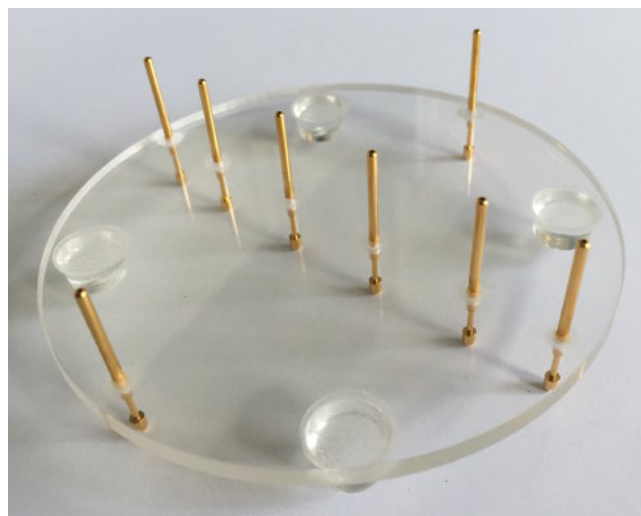
Om de soortelijke weerstand van een sample nauwkeurig te meten, mogen de aansluitpunten die gebruikt worden om de spanning te meten en de aansluitpunten waar de stroom toegevoerd wordt, niet hetzelfde zijn.

Dit wordt de vier-puntsmetingen techniek (4PP) genoemd. De vier aansluitpunten worden zo simpel mogelijk opgesteld in een symmetrische geometrie: De stroom I komt het sample binnen bij één van de buitenste aansluitpunten (ook wel bron genoemd), en passeert alle mogelijke paden door het sample, waarna de stroom het sample verlaat bij het ander aansluitpunt (drain). Tussen deze twee punten in wordt de spanning V over een bepaald padlengte s op het sample gemeten.

Het geheel wordt vrij simpel indien we een symmetrische meetopstelling gebruiken, d.w.z. gelijke afstand s tussen alle aansluitpunten en de aansluitpunten in het midden van het sample, zoals weergegeven in onderstaande schets:



De grafiek van I versus V geeft de $I - V$ -karakteristiek van het sample weer en maakt het mogelijk om de weerstand van een segment van het sample te bepalen. In deze opdracht maken we alleen gebruik van de 4PP-techniek. Om te beginnen, gebruiken we een opstelling die bestaat uit vier van de acht aansluitpunten uit figuur 2 die op gelijke afstand van elkaar op een lijn liggen.



Figuur 2: Een acryl glasplaat voor 4PP-metingen met de vier rubberen voetjes en de acht contactpunten.

Maak gebruik van het volledige blad geleidend papier voor de volgende meting.

Belangrijke hints voor de volgende metingen:

- De lange zijde van het papier dient als referentiezijde. De vier aansluitpunten moeten evenwijdig aan deze zijde worden opgesteld.
- Let op en maak gebruik van de bedekte (zwarte) zijde van het papier en niet de bruine achterkant! Je mag met behulp van gekleurde stickers de goede oriëntatie markeren.
- Controleer of er geen gaten en scheuren zitten in het papier.
- Gebruik voor deze metingen de aansluitpunten die zo dicht mogelijk liggen bij het midden van het sample.
- Druk de glasplaat stevig aan zodat alle aansluitpunten goed contact maken. De plastic voetjes moeten net contact maken met het oppervlak.

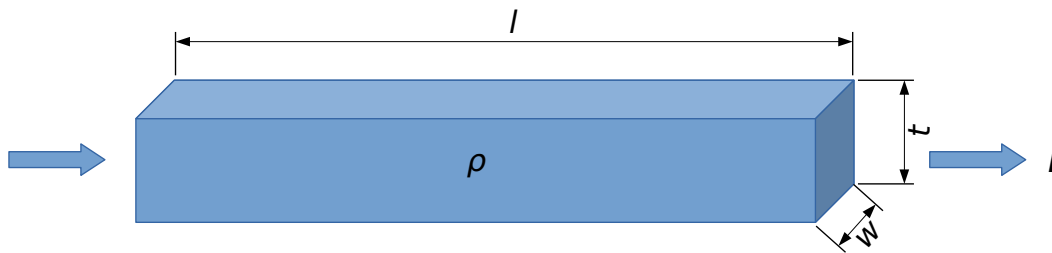
A.1	Vier-puntsmetingen (4PP): Meet de spanning V over een segment met lengte s als functie van de stroomsterkte I door dit segment. Gebruik in totaal tenminste vier waarden, maak een tabel en teken de grafiek van de stroomsterkte I als functie van de spanning V in Grafiek A.1 .	0.6pt
------------	---	-------

A.2	Bepaal de effectieve elektrische weerstand $R = \frac{V}{I}$ van het volledige vel papier die je hebt bepaald uit Grafiek A.1 .	0.2pt
------------	--	-------

A.3	Maak gebruik van Grafiek A.1 om de onzekerheid ΔR van de weerstand R bij de 4PP-meting te bepalen.	0.4pt
------------	---	-------

Deel B. Soortelijke bladweerstand (0.3 punt)

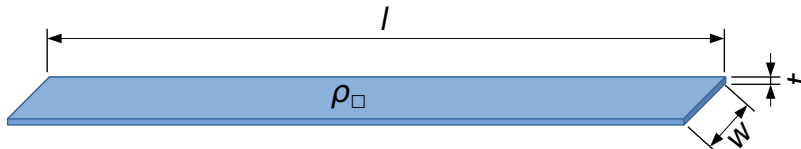
De soortelijke weerstand ρ is een materiaalconstante waarmee de weerstand van een 3D-geleider met gegeven afmetingen en geometrie berekend wordt. We beschouwen hier een staaf met de volgende afmetingen: lengte l , breedte w en dikte t :



De elektrische weerstand R van de bovenstaande massieve geleider wordt gegeven door:

$$R = R_{3D} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \quad (1)$$

Op dezelfde manier kunnen we de weerstand van de 2D-geleider met dikte $t \ll w$ en $t \ll l$ definiëren:



$$R = R_{2D} = \rho_{\square} \cdot \frac{l}{w}, \quad (2)$$

gebruikmakend van de soortelijke bladweerstand $\rho_{\square} \equiv \rho/t$ ("rho vierkant"), uitgedrukt in Ohm: $[\rho_{\square}] = 1 \Omega$.

Belangrijk: Vergelijking 2 is alleen geldig voor een homogene stroomdichtheid en constante potentiaal in de vlakke dwarsdoorsnede van de geleider. Voor het geval van puntachtige contacten op het oppervlak geldt dit niet. Men kan aantonen dat het verband tussen de soortelijke bladweerstand en de weerstand in dat geval gegeven wordt door:

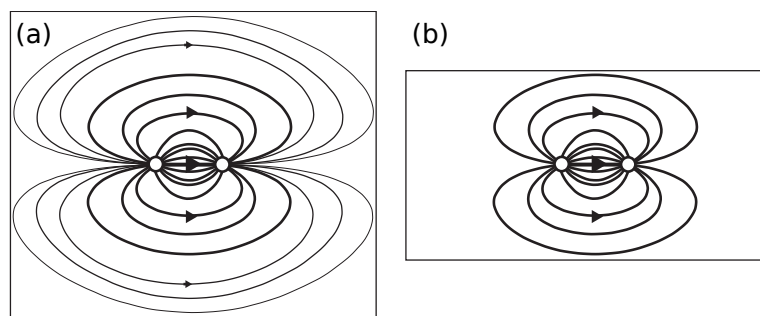
$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot R \quad (3)$$

voor $l, w \gg t$.

- B.1** Bereken de soortelijke bladweerstand $\rho_{\square}$ van het papier met de 4PP-metingen uit deel A. We zullen deze specifieke waarde ρ_{∞} noemen (en de gemeten weerstand van deel A R_{∞}) omdat de afmetingen van het hele blad veel groter zijn dan de afstand tussen de aansluitpunten s : $l, w \gg s$. 0.3pt

Deel C. Metingen voor verschillende afmetingen van het sample (3.2 punten)

Tot nu toe werden de eindige afmetingen van het sample w en l niet in rekening gebracht. Als het sample dunner wordt, kan het minder stroom geleiden als de spanning constant gehouden wordt. Wanneer we een spanning aanbrengen tussen de twee aansluitpunten (witte cirkels), zal er stroom lopen door het sample via alle mogelijke, niet-snijdende paden zoals voorgesteld door de lijnen in de figuur: hoe langer de lijn, hoe kleiner de stroomsterkte zoals aangegeven door de lijndikte. Voor een klein sample (b) en dezelfde aangelegde spanning neemt de totale stroomsterkte af omdat er minder paden mogelijk zijn. De gemeten weerstand neemt dan dus toe.



De soortelijke bladweerstand hangt niet af van de afmetingen van het sample. Dus is er een correctiefactor $f(w/s)$ nodig om de gemeten weerstand om te zetten naar soortelijke weerstand gebruikmakend van vergelijking 3:

$$\rho_{\square} = \frac{\pi}{\ln(2)} \cdot \frac{R(w/s)}{f(w/s)}. \quad (4)$$

Voor een sample lengte $l \gg s$ hangt de factor f alleen af van de verhouding w/s en deze is groter dan 1: $f(w/s) \geq 1$.

Om het eenvoudig te houden zullen we focussen op de afhankelijkheid van de breedte w en ervoor zorgen dat het sample lang genoeg is voor onze metingen. We nemen aan dat de verkregen waarde de correcte waarde $\rho_{\square}$ voor grote afmetingen benadert:

$$R(w/s) = R_{\infty} \cdot f(w/s) \quad \text{with} \quad f(w/s \rightarrow \infty) \rightarrow 1.0. \quad (5)$$

- | | | |
|------------|--|-------|
| C.1 | Meet de weerstand $R(w, s)$ voor 4 waarden van w/s tussen 0,3 en 5,0 met behulp van de 4PP-techniek en schrijf je resultaten in Tabel C.1 . Zorg ervoor dat de lengte van het sample groter is dan 5 maal de afstand tussen de aansluitpunten: $l > 5s$ en dat de lengte l van de samples steeds genomen wordt van dezelfde (lange) zijde van het papier.
Voor elke waarde van w/s : meet de spanning voor 4 verschillende waarden van de stroomsterkte en bereken de gemiddelde weerstand $R(w/s)$ hiermee. Schrijf je resultaten in Tabel C.1 . | 3.0pt |
|------------|--|-------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| C.2 | Bereken $f(w/s)$ voor elk van deze metingen. | 0.2pt |
|------------|--|-------|

Deel D. Geometrische correctie factor: schalingswet (1.9 punten)

Je hebt in deel C gezien dat de gemeten soortelijke weerstand verandert op een bepaalde manier met de verhouding w/s . We kiezen de volgende generieke functie om de meetdata uit deel C te beschrijven:

$$\text{Generieke fit functie: } f(w/s) = 1.0 + a \cdot \left(\frac{w}{s}\right)^b \quad (6)$$

Let op dat voor grote waarden van w/s , $f(w/s)$ gelijk moet zijn aan 1.0.

D.1	Om een curve te fitten gebruikmakend van vergelijking 6 en de $f(w/s)$ -data uit deel C, kies je het meest geschikte grafiekpapier (lineair Grafiek D.1a , semi-logaritmisch Grafiek D.1b , of dubbel-logaritmisch Grafiek D.1c) om je meetdata te tekenen.	1.0pt
------------	---	-------

D.2	Bepaal met behulp van je fit de parameters a en b .	0.9pt
------------	---	-------

Deel E. De siliciumwafer en de van der Pauw-methode (3.4 punten)

In de halfgeleiderindustrie is de kennis van de elektrische soortelijke (blad)weerstand van halfgeleiders en dunne metalen lagen heel belangrijk omdat deze de eigenschappen van een apparaat bepaalt. In het volgende zal je werken met de siliciumwafer. De halfgeleidende wafer is bedekt met een heel dunne film chroom-metaal (op de glanzende zijde).

Open de plastic doos waarin de wafer is opgeborgen (draai in de richting van de pijl RELEASE) en neem de wafer eruit. Wees voorzichtig en laat de wafer niet vallen of breken en raak of bekras het oppervlak van de wafer niet. Voor de metingen moet de wafer op de tafel geplaatst worden met het glanzend oppervlak naar jou toe gericht.

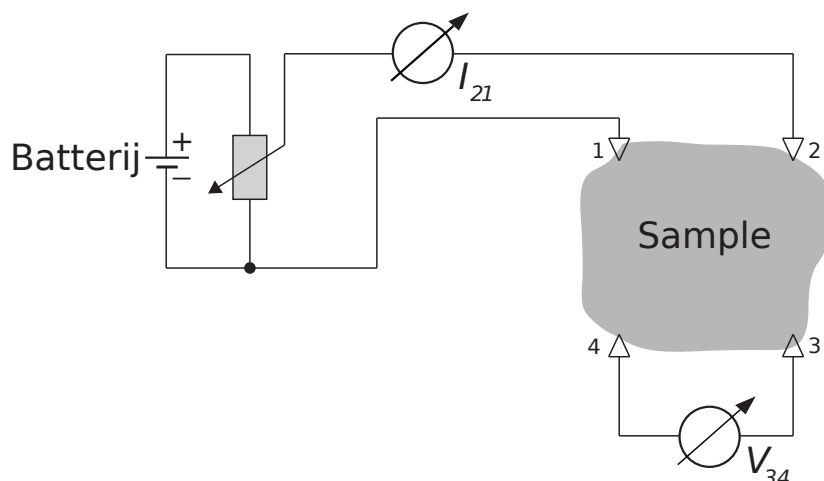
E.1 Gebruik dezelfde 4PP-techniek opstelling als voorheen om de spanning V te meten als functie van de stroomsterkte I . Schrijf het referentienummer van je schijf op het antwoordblad. Je vindt dit nummer op het plastic doosje. 0.4pt

E.2 Teken de meetdata in **grafiek E.2** en bepaal de weerstand R_{4PP} . 0.4pt

E.3 Om de correctie te bepalen voor een cirkelvormig sample zoals de wafer, zullen we de effectieve breedte w van het sample benaderen door de diameter $D = 100 \text{ mm}$ van de wafer. Bereken met dit gegeven de verhouding w/s . Gebruik de fit functie in vergelijking 6 en je parameters a en b om de correctiefactor $f(w/s)$ te bepalen voor de wafermeting. 0.2pt

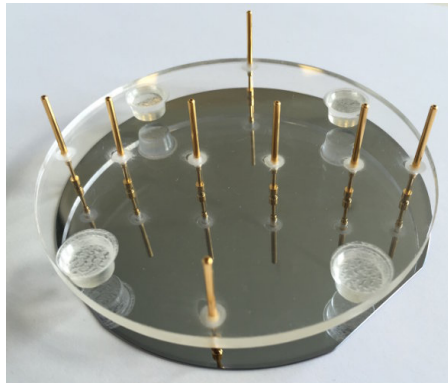
E.4 Bereken de soortelijke bladweerstand (4PP) van de chroomfilm gebruikmakend van vergelijking 4. 0.1pt

Om de soortelijke bladweerstand nauwkeurig te meten zonder geometrische correcties, ontwikkelde ingenieur bij Philips, L.J. van der Pauw een eenvoudig meetschema: de vier aansluitpunten worden op de omtrek gemonteerd van een sample met willekeurige vorm zoals in de figuur (genummerd van 1 tot 4). De stroom loopt door twee naburige aansluitpunten, bijvoorbeeld 1 en 2, en de spanning wordt gemeten tussen 3 en 4. Dit levert een weerstandswaarde $R_{I,V} = R_{21,34}$.



Vanwege symmetrie geldt $R_{21,34} = R_{34,21}$ en $R_{14,23} = R_{23,14}$. Van der Pauw toonde aan dat voor een willekeurig maar eenvoudige vorm van het aangesloten sample (zonder gaten) en puntvormige aansluitpunten de volgende vergelijking geldt:

$$e^{-\pi R_{21,34}/\rho_{\square}} + e^{-\pi R_{14,23}/\rho_{\square}} \equiv 1. \quad (7)$$



Figuur 3: 4PP apparaat op de siliciumwafer bedekt met een metaalfilm. Merk de vlakke afgesneden rand op de rechterkant van de schijf op.

Sluit de vier elastische contacten zodanig aan dat de contacten een vierkant vormen. Verbind twee naburige contacten met de spanningsbron door middel van de ampèremeter en verbind de andere twee elastische contacten met behulp van de voltmeter. Draai het vierkant tot één van de zijden evenwijdig is met de afgesneden rand van de schijf.

E.5	Schets de oriëntatie van de stroomvoerende aansluitpunten en de richting van de vlakke afgesneden rand van de wafer. Meet de spanning V voor minstens 6 verschillende waarden van de stroomsterkte I , met ongeveer gelijke intervallen. Noteer de resultaten in Tabel E.5 .	0.6pt
E.6	Herhaal de procedure voor een opstelling waarbij de stroomvoerende aansluitpunten loodrecht staan op die gekozen in stap 1. Noteer de resultaten in Tabel E.6 .	0.6pt
E.7	Geef alle metingen weer in één grafiek Grafiek E.7 en gebruik daarbij verschillende kleuren en/of symbolen. Bepaal de gemiddelde waarde $\langle R \rangle$ uit de twee curves.	0.5pt
E.8	Vervang alle weerstanden $R_{kl,mn}$ door $\langle R \rangle$, los $\rho_{\square}$ op uit vergelijking 7 en bereken de soortelijke bladweerstand van de chroomfilm.	0.4pt
E.9	Vergelijk de resultaten van de metingen met de lineaire opstelling (E.4) en het resultaat van de van der Pauw-methode (E.8). Geef het verschil tussen de twee metingen als relatieve fout uitgedrukt in procenten.	0.1pt

- | | | |
|-------------|--|-------|
| E.10 | De chroom (Cr) lagen hebben een nominale dikte van 8 nm . Gebruik deze waarde en het eindresultaat van de van der Pauw-methode om de soortelijke weerstand van Cr te berekenen met behulp van vergelijkingen 1 en 2. | 0.1pt |
|-------------|--|-------|

Experiment 1: elektrische geleidbaarheid in twee dimensies (10 punten)

Noteer de cijfers van 0 tot 9 in de volgende tabel:

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Deel A. vierpunts-meter (4PP) metingen(1.2 punten)

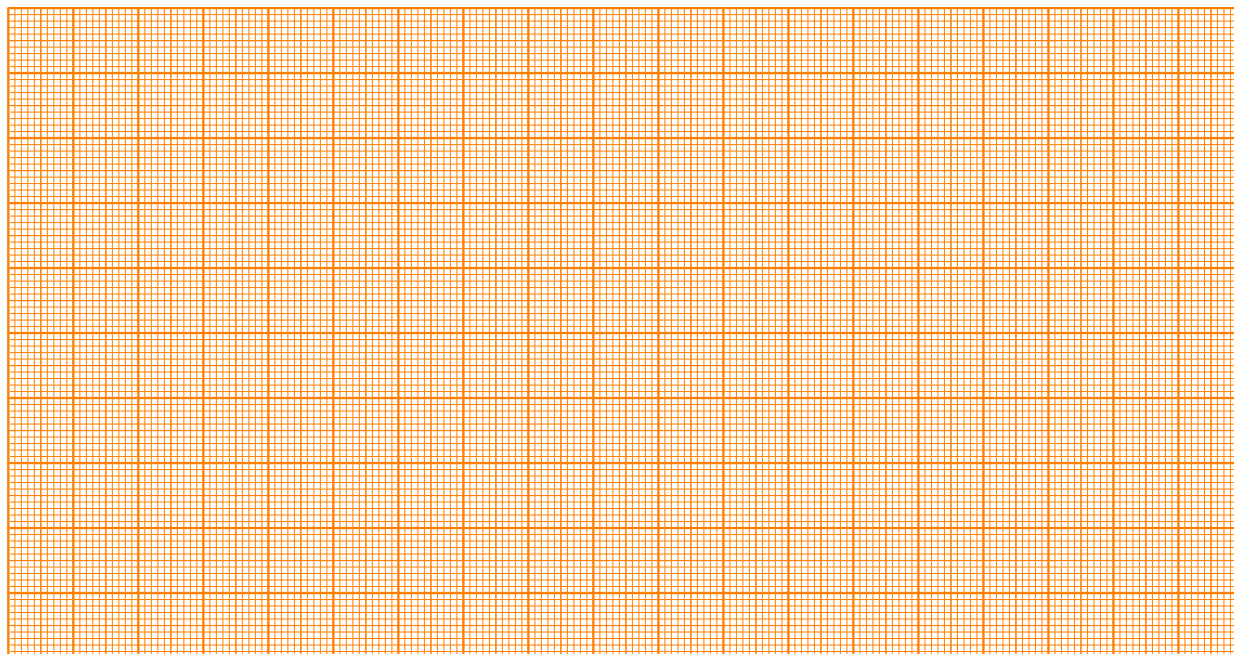
A.1 (0.6 pt)

$s =$

I	V	I	V

Zet je metingen in **Grafiek A.1**.

Grafiek A.1: I vs. V



A.2 (0.2 pt)

$R =$

A.3 (0.4 pt)

$\Delta R =$

Deel B. soortelijke bladweerstand (0.3 punten)

B.1 (0.3 pt)

$\rho_{\square} \equiv \rho_{\infty} =$

Deel C. Metingen voor verschillende afmetingen van het sample (3.2 punten)

C.1 (3 pt)

$$\mathcal{S} =$$
$$\rho_\infty =$$

De lege kolommen kunnen gebruikt worden voor tussenresultaten.

w/s						$R(w/s)$

C.2 (0.2 pt)

Gebruik Tabel **C.1** voor je gegevens.

Deel D. Geometrische correctie factor (1.9 punten)

D.1 (1.0 pt)

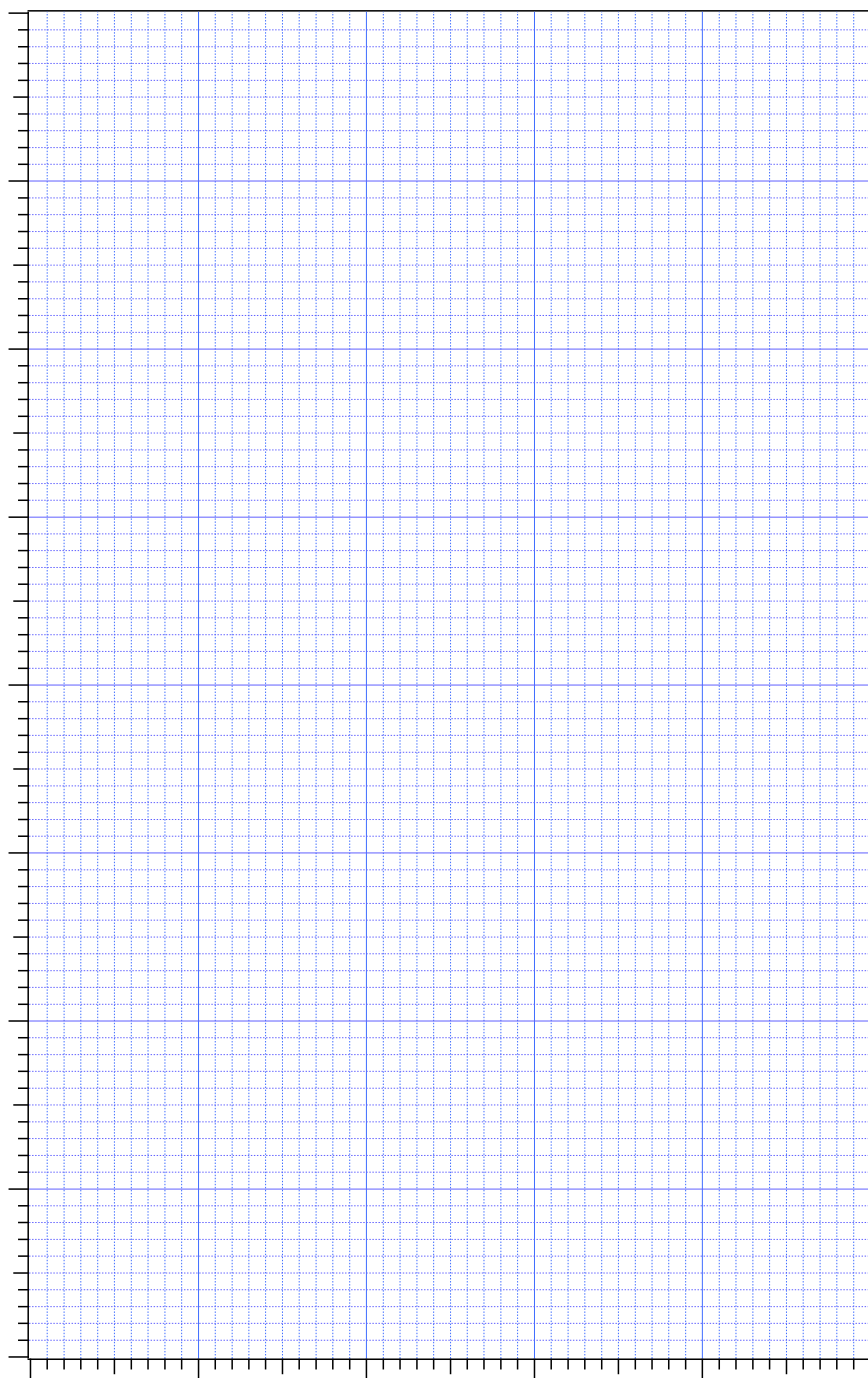
Maak met je metingen een grafiek op het daartoe geëigende grafiekpapier: lineair (Graph **D.1a**), semi-logaritmisch (**D.1b**) **or** dubbel-logaritmisch (**D.1c**) op de volgende pagina's.

D.2 (0.9 pt)

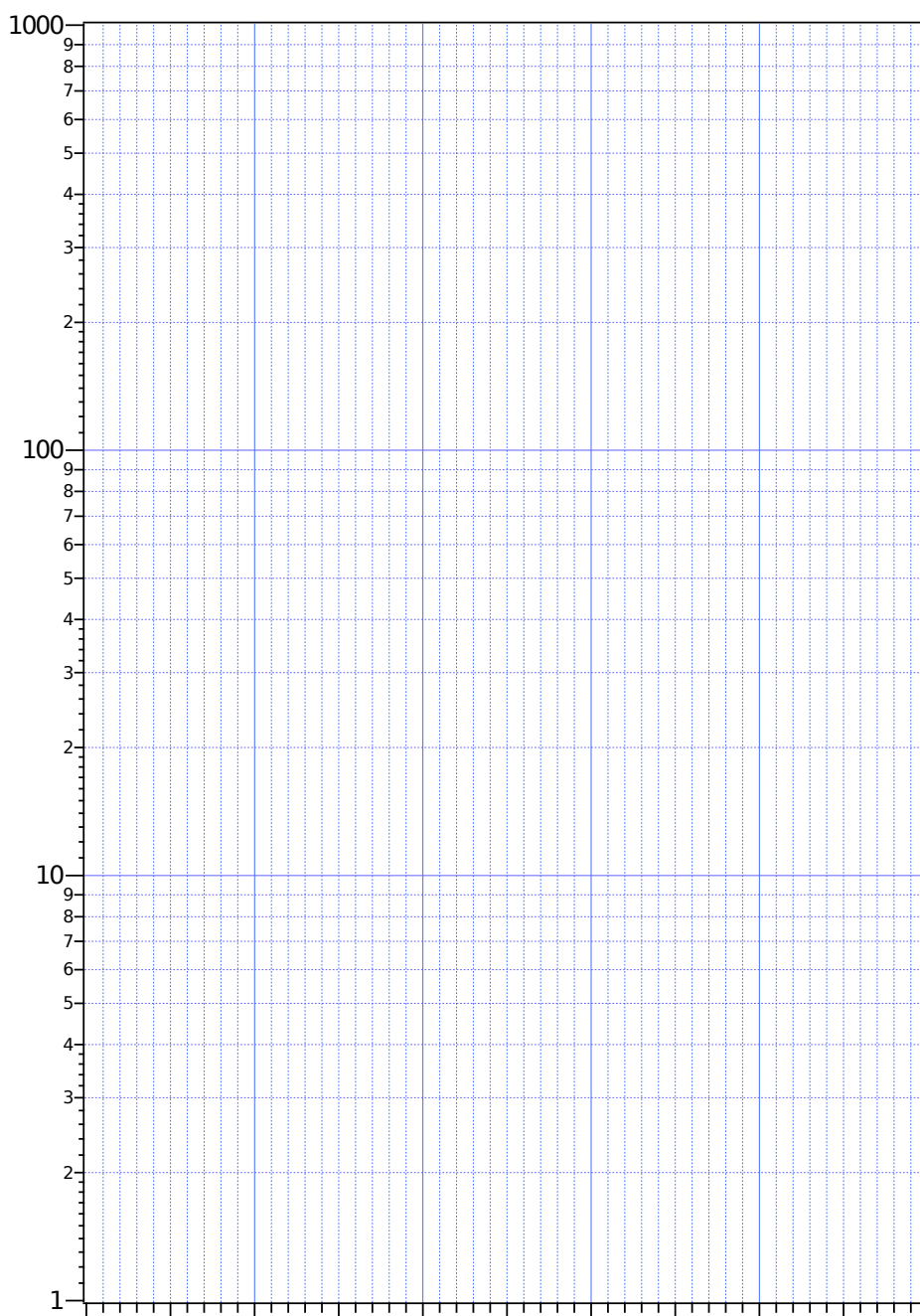
$a =$

$b =$

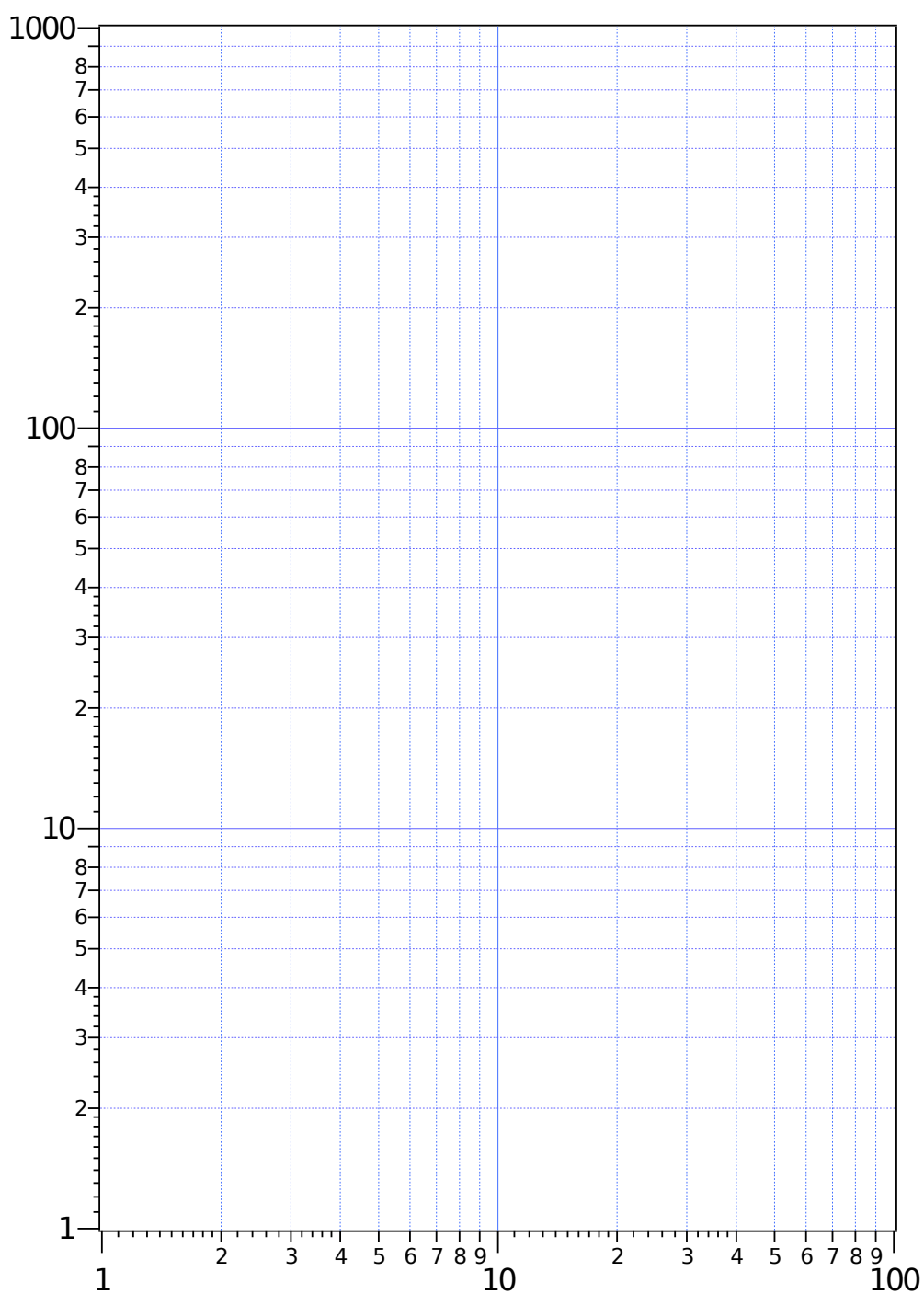
Graph D.1a: lineaire schaal:



Graph D.1b: semi-log schaal:



Graph D.1c: dubbel-log schaal:



Deel F. The silicium wafer en de van der Pauw-methode (3.4 punten)

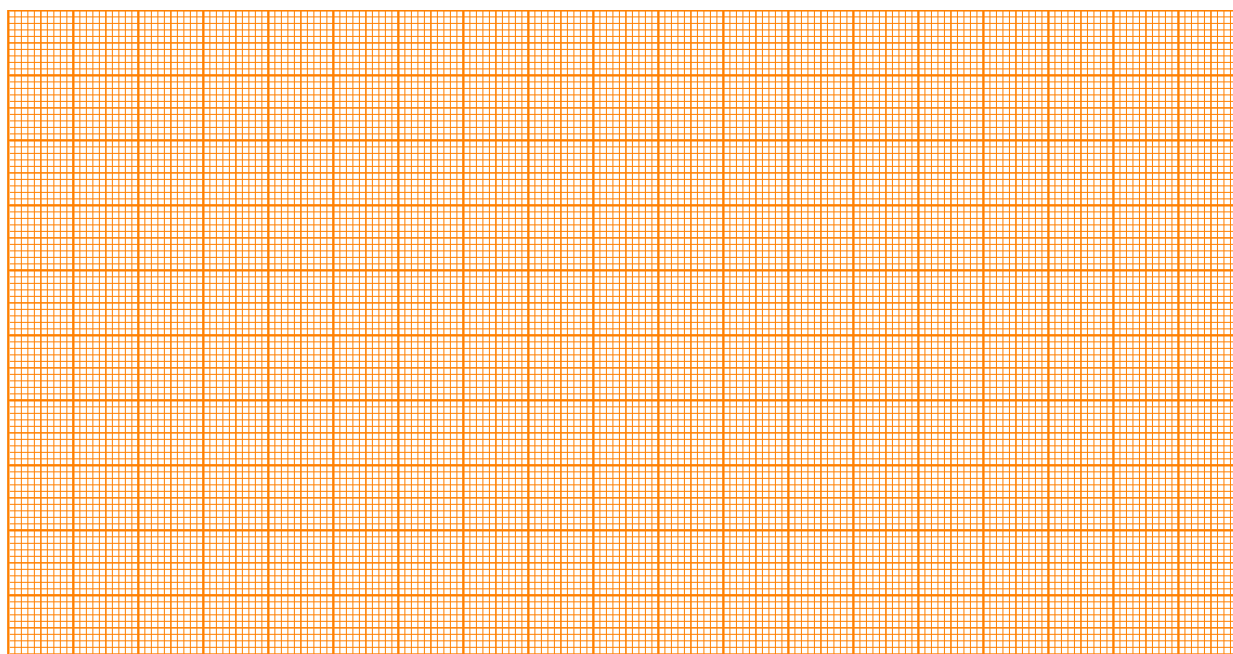
Noteer hier het nummer van je wafer:

E.1 (0.4 pt)

I	V	I	V

E.2 (0.4 pt)

Grafiek E.2: I vs V



$R_{4PP} =$

E.3 (0.2 pt)

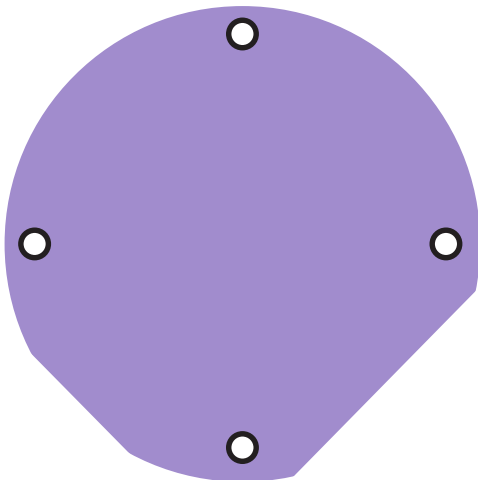
$$w =$$
$$\rightarrow w/s =$$
$$f(w/s) =$$

E.4 (0.1 pt)

 $\rho_{\square}(4\text{PP})$

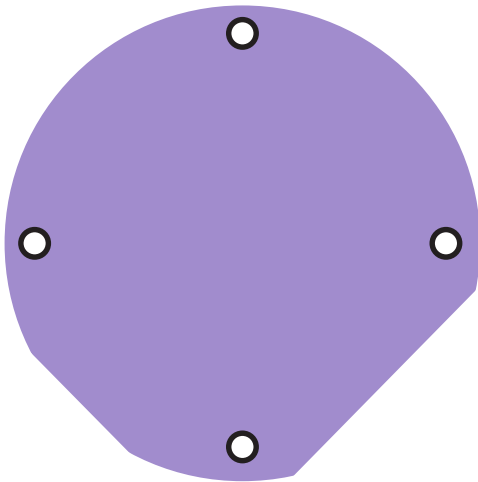
E.5 (0.6 pt)

Schets (richting van de stroom):

[illegible]

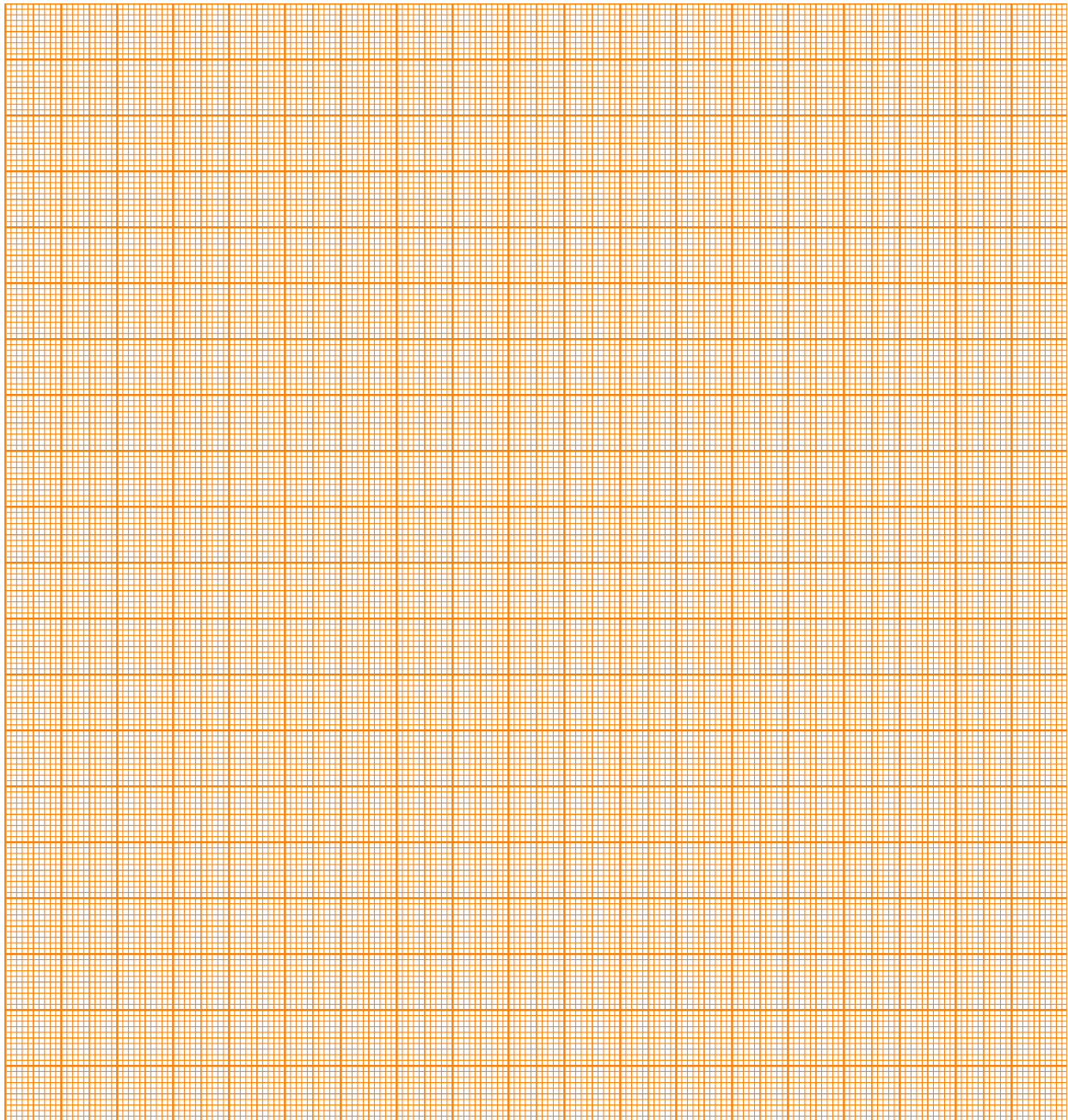
E.6 (0.6 pt)

Schets (richting van de stroom):

[illegible]

E.7 (0.5 pt)

Graph F.7: I vs. V



$\langle R \rangle =$

E.8 (0.4 pt)
Berekening:

$$\rho_{\square}(\text{vdP}) =$$

E.9 (0.1 pt)

$$\frac{\Delta \rho_{\square}}{\rho_{\square}(\text{vdP})} = \quad = \quad \%$$

E.10 (0.1 pt)

soortelijke weerstand van de Cr thin film $\rho =$

Dansende korrels - Een model voor fase-overgangen en instabiliteit (10 punten)

Lees de algemene instructies in de aparte enveloppe voor je met het experiment begint.

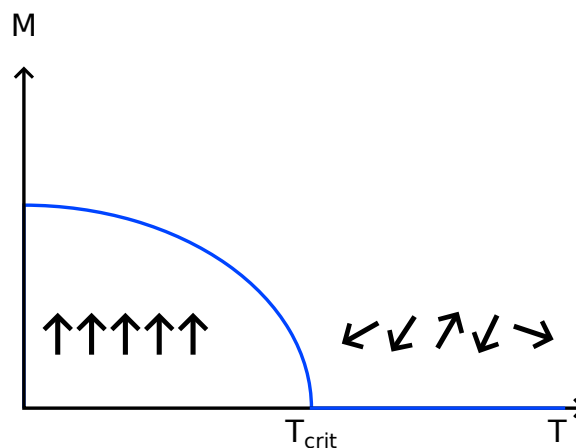
Introductie

Fase-overgangen kom je in het dagelijks leven regelmatig tegen. Water bijvoorbeeld is al bekend als vaste stof, vloeistof en gas. De verschillende fasen zijn gescheiden door fase-overgangen waarin het collectieve gedrag van de moleculen verandert. Zo'n fase-overgang wordt altijd gekenmerkt door een transitie temperatuur waarbij de fase verandert, bijvoorbeeld het vriespunt en kookpunt van water.

Fase-overgangen komen echter vaker voor en ook in andere systemen, zoals magneten of supergeleiders. waarbij onder een transitie temperatuur de macroscopische fase verandert van een paramagneet naar een ferromagneet en een gewone geleider naar een supergeleider.

Al deze overgangen kunnen in algemene zin beschreven worden als we een zogenaamde orde-parameter introduceren. Bij magnetisme is deze orde-parameter geassocieerd met het op één lijn brengen van de magnetische momenten van de atomen met macroscopische magnetisatie.

In de zogenaamde continue fase-overgangen zal de orde-parameter altijd nul zijn boven de kritische temperatuur en zal daaronder continue groter worden, zoals schematisch voor een magneet wordt aangegeven in figuur 1 hieronder. De transitie temperatuur van een continue fase-overgang wordt de kritische temperatuur genoemd. De figuur laat ook schematisch de microscopische orde of wanorde van de individuele magnetische momenten bij een magneet zien. In de ferromagnetische fase richten de individuele magnetische momenten zich gelijk voor macroscopische magnetisatie, terwijl ze alle richtingen opstaan in de paramagnetische fase en macroscopisch geen magnetisatie geven.



Figuur 1: Schematische weergave van de temperatuurafhankelijkheid van een orde-parameter M bij een fase-overgang. Onder de kritische temperatuur T_{crit} groeit de orde-parameter en is ongelijk nul, terwijl deze nul is bij temperaturen boven T_{crit} .

Voor continue fase-overgangen geldt in het algemeen dat de orde-parameter dicht bij een overgang een machtswet volgt, de magnetisatie M wordt bijvoorbeeld onder de kritische temperatuur T_{crit} gegeven

door:

$$M \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, \quad (1)$$

waarin T de temperatuur is. Wat het echter nog mooier maakt, is dat dit gedrag universeel is: de exponent van deze machtswet is gelijk voor veel verschillende soorten fase-overgangen.

Opdracht

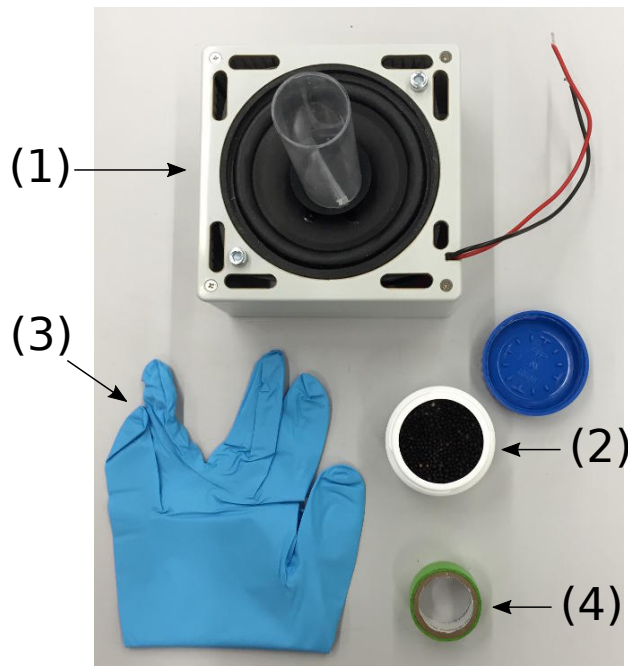
We bestuderen een eenvoudig voorbeeld waarmee sommige eigenschappen van continue fase-overgangen onderzocht kunnen worden, bijvoorbeeld hoe een instabiliteit leidt tot collectief gedrag van de deeltjes en dus tot een fase-overgang en hoe een macroscopische verandering afhangt van een excitatie (gedragsverandering) van de deeltjes.

Bij gewone fase-overgangen wordt de excitatie gewoonlijk bepaald door de temperatuur. In ons voorbeeld wordt de excitatie bepaald door de kinetische energie van de deeltjes die door de luidspreker versneld worden. De macroscopische verandering die overeenkomt met de fase-overgang die we bestuderen bestaat eruit dat de korrels zich sorteren in één helft van een cilinder, die door een lage wand gescheiden is van de andere helft.

Door, uitgaand van de situatie waarin de deeltjes in één helft van de cilinder zitten, de amplitude van de luidspreker te verhogen, zul je zien dat de deeltjes zich uiteindelijk over de twee helften verdelen. Dit komt overeen met het verhogen van de temperatuur boven de kritische temperatuur.

Jouw doel is om de kritische exponent te bepalen van het model van fase-overgang dat we hier bestuderen.

Materiaallijst



Figuur 2: Extra materiaal, nodig voor dit experiment.

1. Luidsprekeropstelling met een plastic cilinder erop gemonteerd
2. Ongeveer 100 papaverzaadjes (in een plastic doosje)
3. Een handschoen
4. Plakband

Belangrijke voorzorgsmaatregelen

- Oefen geen grote zijwaartse krachten uit op de plastic cilinder op de luidspreker. Bedenk dat er geen vervanging is in het geval van kapotte luidsprekermembranen of losgetrokken plastic cilinder.
- Zet de luidspreker steeds uit als deze niet in gebruik is om onnodig leeglopen van de batterij te voorkomen.
- In dit experiment staat een 4 Hz zaagtand signaal op de luidspreker aansluitingen aan de zijkant van de signaalgenerator.
- De amplitude van het zaagtandsignaal kan aangepast worden met de rechterpotentiometer met het label *speaker amplitude* (4). Een gelijkspanning evenredig met amplitude van het signaal staat op de *speaker amplitude* monitor aansluiting (6) (ten opzichte van de *GND* aansluiting (7)). De getallen refereren aan de foto (Figuur 2) die in de algemene instructies staat.
- Het luidsprekermembraan is kwetsbaar. Zorg dat je er geen onnodige kracht op uitoefent, noch horizontaal, noch verticaal.

Deel A. Kritische amplitude bij excitatie (3,3 punten)

Voordat je aan de opdrachten van dit deel begint: verbind de luidspreker met de uiteinden aan de zijkant van de signaalgenerator (let op de polariteit). Stop wat papaverzaadjes (bijvoorbeeld 50) in de cilinder die op de luidspreker zit. Knip een vinger van de handschoen en gebruik die om de cilinder af te sluiten, zodat de zaadjes niet uit de cilinder gaan. Zet de luidspreker aan met de schakelaar en pas de amplitude aan door met de bijgeleverde schroevendraaier de rechter potentiometer genaamd *speaker amplitude* (4) te verdraaien. Observeer hoe de zaadjes zich verdelen bij verschillende amplitudes.

In de eerste opdracht bepaal je de kritische excitatie amplitude van deze overgang. Om dat te doen, moet je het aantal zaden N_1 en N_2 bepalen in de twee compartimenten als functie van de weergegeven amplitude A_D . Kies de compartiment telkens zo, dat $N_1 \leq N_2$. A_D is de spanning gemeten over de monitor output aansluiting voor de luidspreker amplitude aandrijving (6). Deze spanning is evenredig met de amplitude van de zaagtand golfvorm die de luidspreker aandrijft. Doe ten minste 5 metingen per spanning.

Hint:

- Om altijd beweging te hebben in de deeltjes die je bestudeert, onderzoek je alleen amplitudes die overeenkomen met *speaker amplitude voltages* groter dan 0.7 V. Begin met kijken naar het gedrag van het systeem door de spanning langzaam te variëren zonder de korrels te tellen. Het is mogelijk dat sommige korrels aan de bodem plakken door statische elektriciteit. Tel deze niet mee.

A.1	Noteer je metingen van het aantal deeltjes N_1 en N_2 in elke helft van de cilinder voor verschillende amplitudes A_D in Tabel A.1 . Wacht telkens tot een dynamisch evenwicht is bereikt.	1.2pt
------------	---	-------

A.2	Bereken de standaard deviatie van je metingen van N_1 en N_2 en noteer je resultaten in Tabel A.1 . Maak een grafiek van N_1 en N_2 als functie van de weergegeven amplitude A_D in Graph A.2 , met hun onzekerheden.	1.1pt
------------	---	-------

A.3	Bepaal met behulp van je grafiek de kritische weergegeven amplitude $A_{D,crit}$ waarbij $N_1 = N_2$.	1pt
------------	--	-----

Deel B. Calibratie (3,2 punten)

De weergegeven amplitude A_D op de multimeter is evenredig met de spanning die op de luidspreker is gezet. De fysisch interessante grootheid is echter de maximale verplaatsing A van de luidspreker, omdat vooral deze bepaalt hoe sterk de korrels worden geëxciteerd. Daarom moet je de weergegeven amplitude calibreren. Hiervoor kun je van de geleverde apparatuur en materialen gebruiken wat je nodig acht.

B.1	Maak een schets van de opstelling die je gaat gebruiken om de excitatie amplitude te gaan meten. Deze excitatie amplitude is de maximale afgelegde afstand A (in mm) van de luidspreker in één oscillatie periode.	0.5pt
------------	--	-------

B.2	Bepaal de amplitude A in mm voor een geschikt aantal meetpunten, oftewel bepaal de amplitude A als een functie van de weergegeven amplitude A_D . Noteer je resultaten in Tabel B.2 en geef de meetonzekerheden in je metingen aan.	0.8pt
------------	--	-------

B.3 Geef je meetpunten weer in **Grafiek B.3**. Geef ook de meetonzekerheden duidelijk aan. 1.0pt

B.4 Bepaal de parameters van een geschikte fit voor de gevonden curve om zo de calibratiefunctie $A(A_D)$ te vinden. 0.8pt

B.5 Bepaal de kritische excitatie amplitude A_{crit} van de papaverzaadjes. 0.1pt

Onderdeel C. Critische exponent (3,5 punten)

In dit systeem komt de temperatuur overeen met de toegevoerde kinetische energie van de excitatie. Deze energie is evenredig met het kwadraat van de snelheid van de luidspreker, oftewel evenredig met $v^2 = A^2 f^2$, waarbij f de oscillatie frequentie is. We gaan nu deze afhankelijkheid controleren en de exponent b van de machtswet (power-law) bepalen. Deze machtswet bepaalt het gedrag van de orde parameter (zie Eq. 1).

C.1 De onbalans (imbalance) $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ is een goede kandidaat voor een orde parameter van het systeem omdat het nul is boven de kritische amplitude en gelijk aan 1 bij lage excitatie. Bepaal deze orde parameter als een functie van de amplitude A . Noteer je resultaten in de **Tabel C.1**. 1.1pt

C.2 Maak een grafiek van de onbalans $\left| \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right|$ als een functie van $|A_{\text{crit}}^2 - A^2|$ in **Grafiek C.2**. Je kan kiezen voor beide assen logaritmisch (**Grafiek C.2a**) of voor beide assen lineair (**Grafiek C.2b**). Je kan de **Tabel C.1** gebruiken voor je berekeningen voor de tweede optie. De punten in de grafiek liggen mogelijk niet op een rechte lijn, maar een lineaire benadering moet niettemin gedaan worden om met de machtswet de kritische exponent te kunnen bepalen. 1pt

C.3 Bepaal de exponent b en de maak een schatting van de fout in de exponent. 1.4pt

Springende korrels (10 punten)

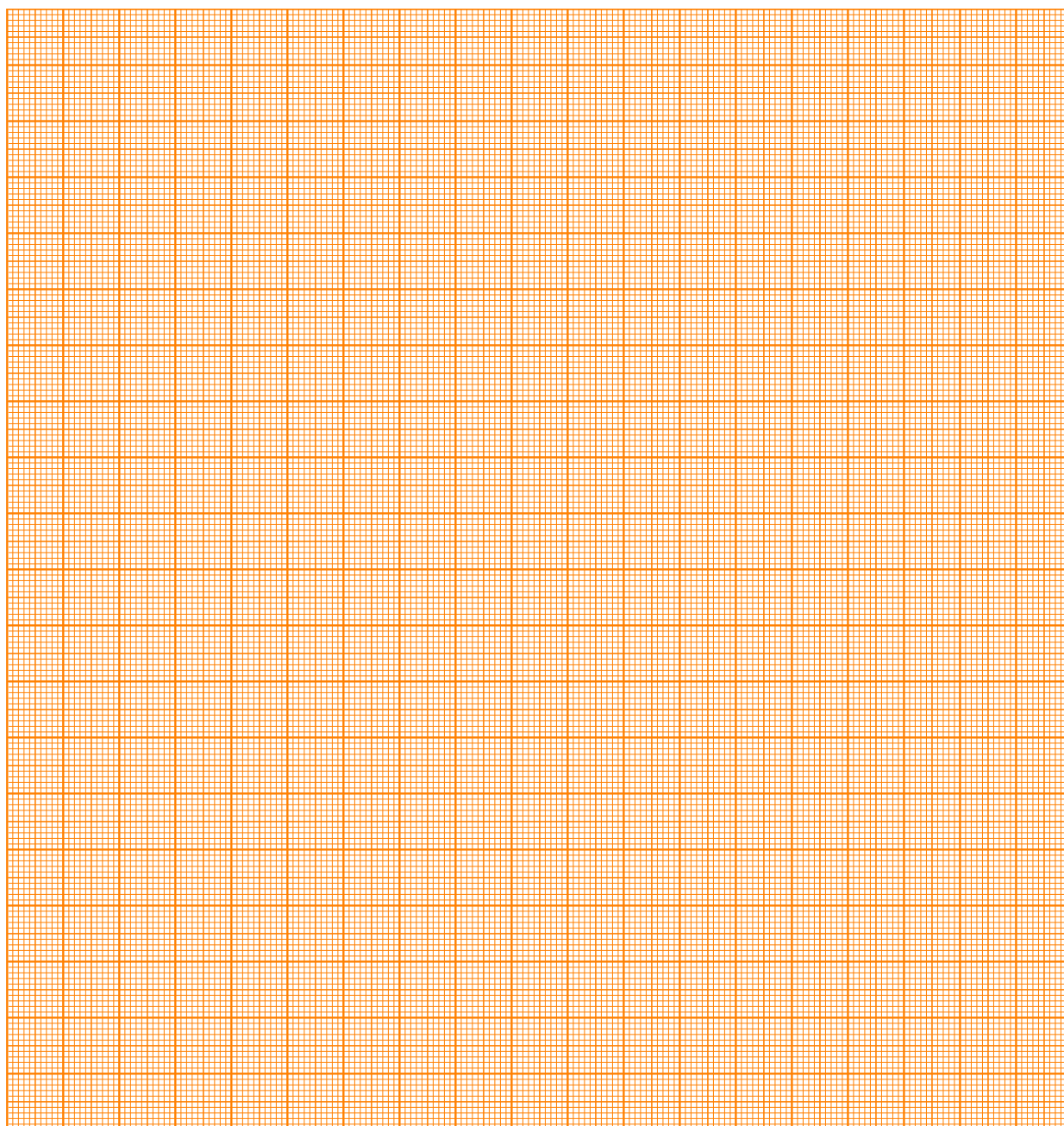
Onderdeel A. Kritische excitatie amplitude (3,3 punten)

A.1 (1.2 pt)

[illegible]

A.2 (1.1 pt)

Grafiek A.2: N_1, N_2 vs. A_D



A.3 (1.0 pt)

$A_{D, \text{crit.}} =$

Onderdeel B. Calibratie (3,2 punten)

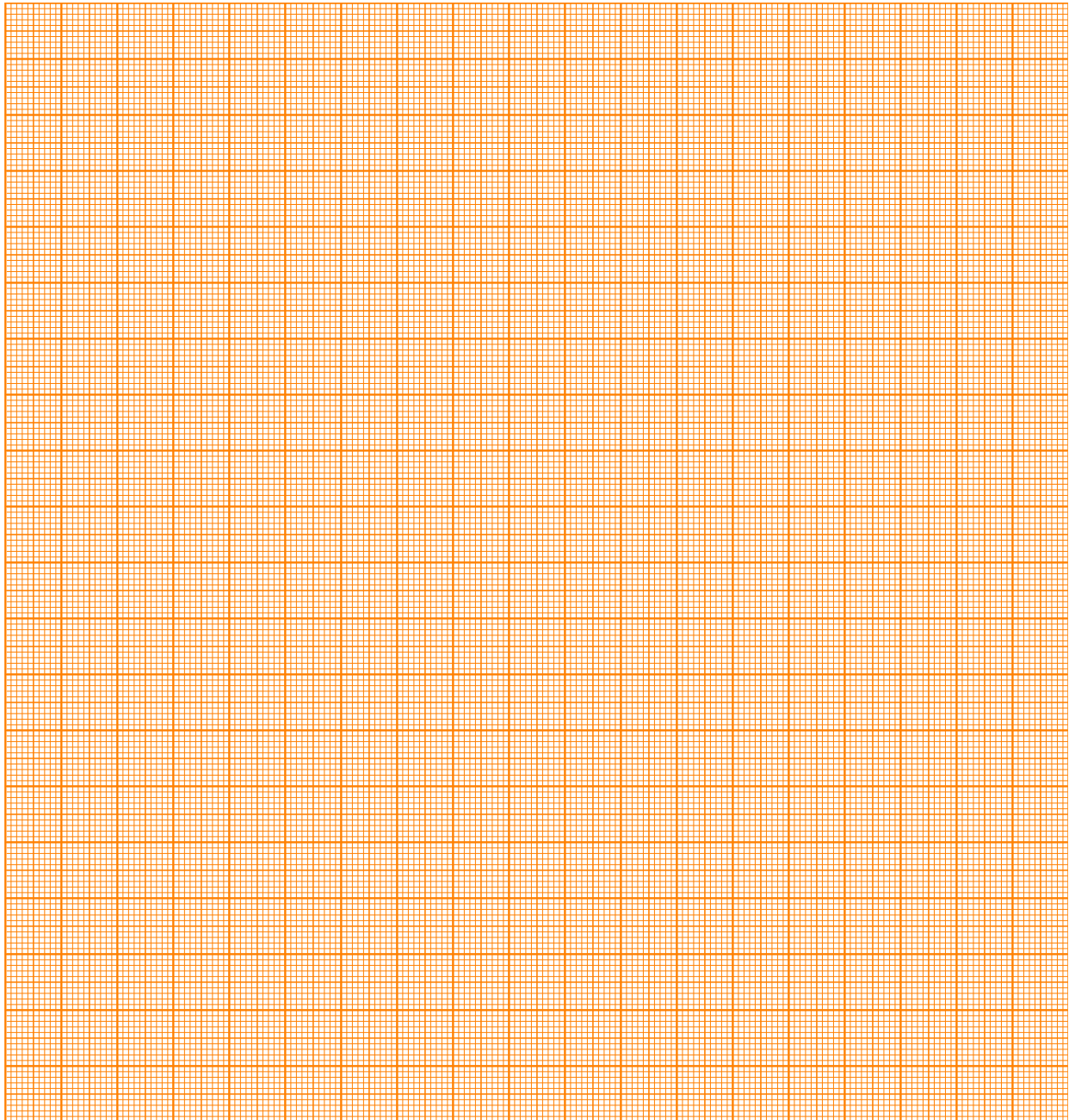
B.1 (0.5 pt)

Schets van de opstelling:

B.2 (0.8 pt)

[illegible]

B.3 (1.0 pt)
Grafiek B.3: A vs. A_D



B.4 (0.8 pt)
Functie $A(A_D)$:

Parameters van de curve:

B.5 (0.1 pt)

$A_{\text{crit.}} =$

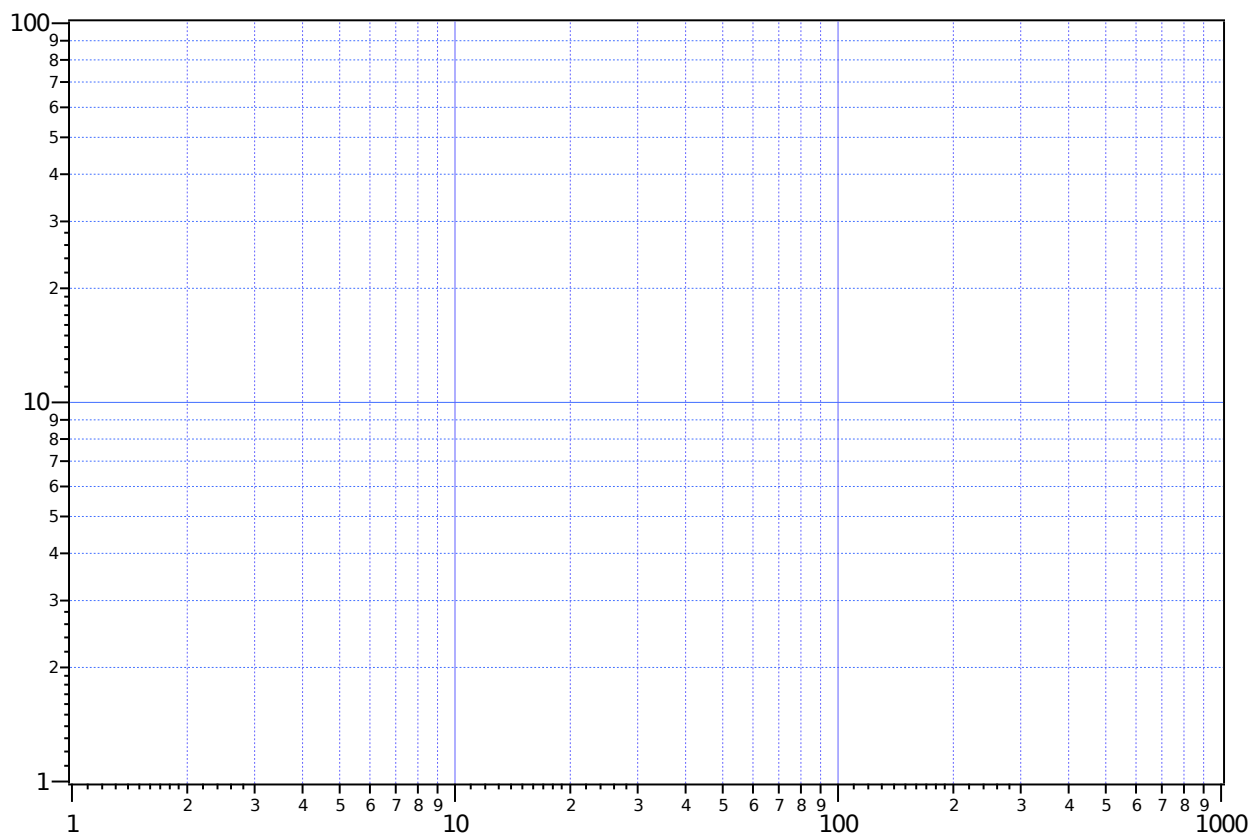
Onderdeel C. Kritische exponent (3,5 punten)

C.1 (1.1 pt)

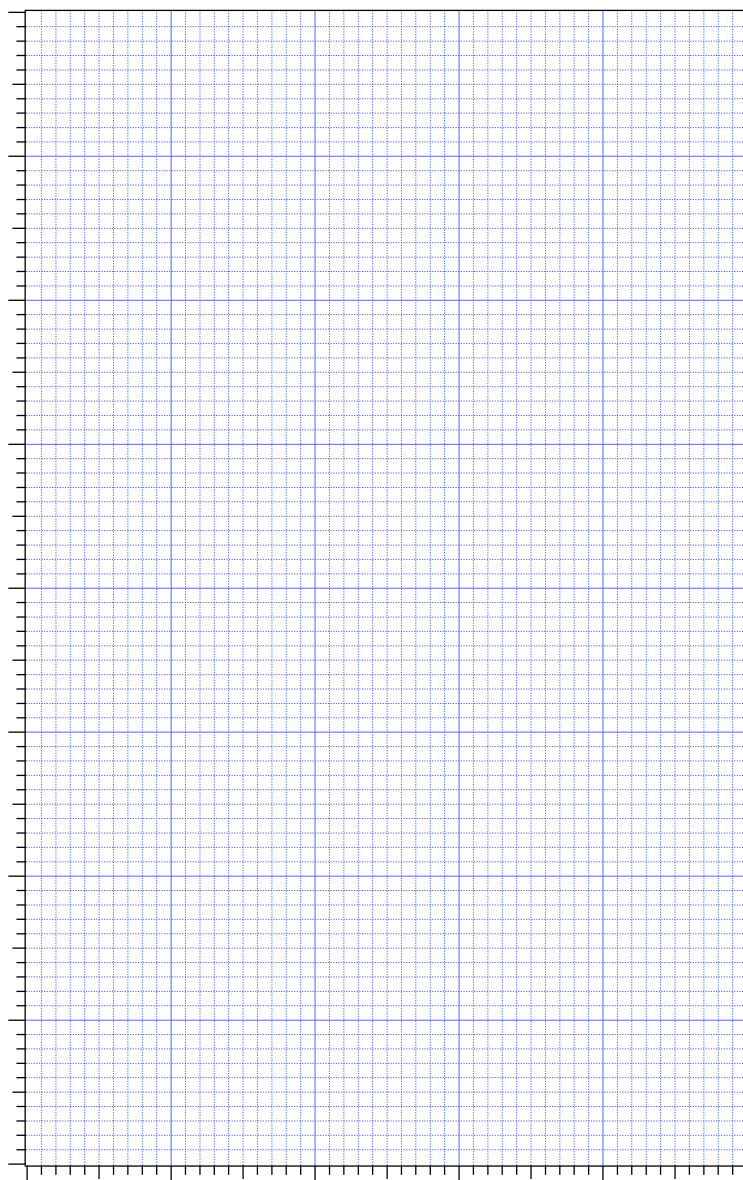
C.2 (1.0 pt)

Geef $\frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$ vs. $|A^2 - A_c^2|$ weer in **Grafiek C.2a** of **Grafiek C.2b**.

Grafiek C.2a dubbel logaritmisch papier



Grafiek C.2b lineair papier



C.3 (1.4 pt)

$b =$

$\Delta b =$