

MASTER

1/f ruismetingen met behulp van de vierpuntsprobe

Tacken, H.T.J.

Award date:
1974

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

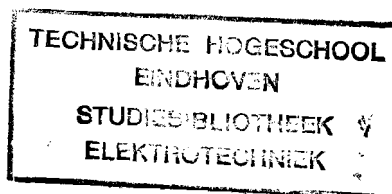
General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

1/f Ruismetingen met behulp van
de vierpuntsprobe

H.Th.J. Tacken



Verslag van het afstudeerwerk verricht
bij de vakgroep EV,
Afdeling der Elektrotechniek,
Technische Hogeschool Eindhoven.

coach: Ir. L.K.J. Vandamme

afstudeerhoogleraar: Prof.Dr. F.N. Hooge

308825

INLEIDING

Een methode om de soortelijke weerstand ρ van halfgeleidermateriaal te bepalen is met behulp van de vierpuntsprobe (4 punten op een lijn).

1/f Ruis zijn fluctuaties in de soortelijke weerstand.

De vraag kan gesteld worden of deze fluctuaties in de soortelijke weerstand ook met behulp van de vierpuntsprobe gemeten kunnen worden met alle voordelen, zoals de geringe invloed van de niet-ohmse metaal-halfgeleiderovergangen, die voor de bepaling van de soortelijke weerstand met de vierpuntsprobe gelden.

Het blijkt echter dat deze niet-ohmse stroomvoerende kontakten grote invloed hebben op het ruisspektrum gemeten op de binnenpunten van de vierpuntsprobe. Gezien de moeilijkheden ten gevolge van deze metaal-halfgeleiderovergangen werd het onderzoek verlegd naar grafietpapier.

Grafietpapier heeft de eigenschap dat er bij stroomdoorgang grote fluctuaties met een 1/f spektrum in de spanning ontstaan.

Bovendien heeft het grafietpapier het voordeel dat er met behulp van zilverpasta gemakkelijk ohmse kontakten van willekeurige vorm op aangebracht kunnen worden.

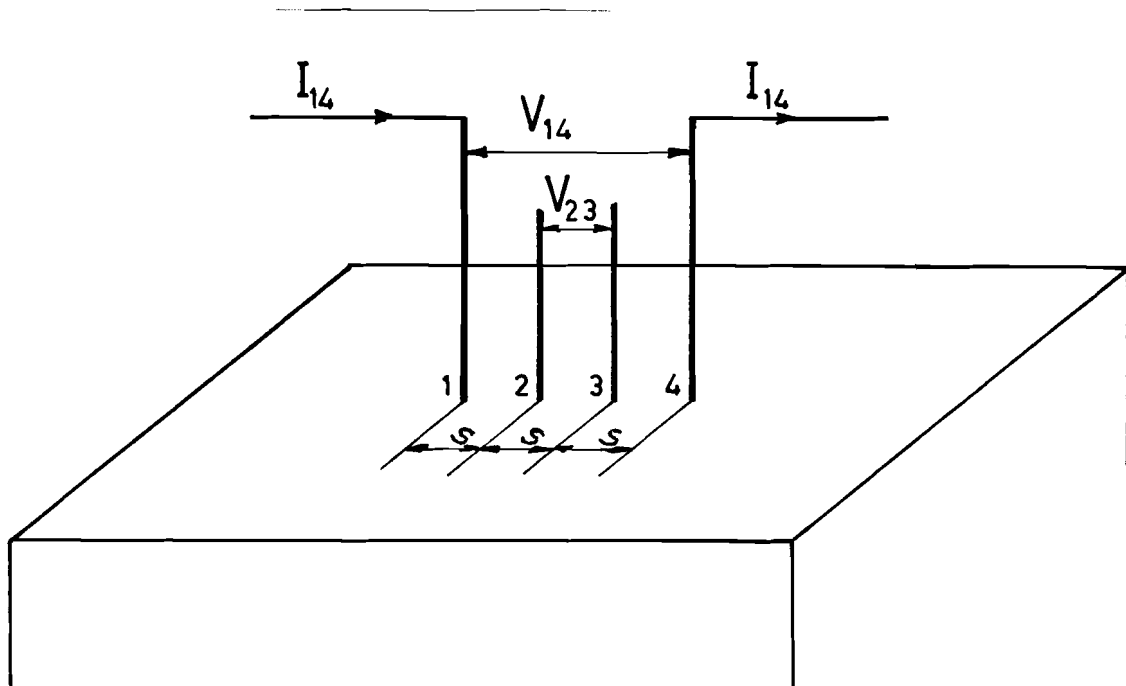
Nagegaan wordt of, zoals in geval van 1/f ruismetingen aan homogene samples van een halfgeleidermateriaal, de ruis uitgedrukt kan worden in een konstante die de ruiseigenschappen van dit grafietpapier weergeeft.

Wanneer echter met puntvormige, niet-stroomvoerende kontakten ruis gemeten wordt blijkt de 1/f ruis niet, zoals aanvankelijk werd aangenomen, afhankelijk te zijn van een oppervlak maar van de stroomdichtheid ter plaatse van de punten.

1. BEPALING VAN DE SOORTELIJKE WEERSTAND MET BEHULP VAN DE VIERPUNTSPROBE

Deze methode bestaat uit het plaatsen van vier wolfram punten op een stuk halfgeleidermateriaal.

Door de buitenpunten 1 en 4 wordt een constante stroom I_{14} gestuurd (figuur 1.1).



figuur 1.1

De soortelijke weerstand is evenredig met de verhouding van V_{23} en I_{14}

$$\rho = k \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (1.1)$$

Deze konstante k hangt af van:

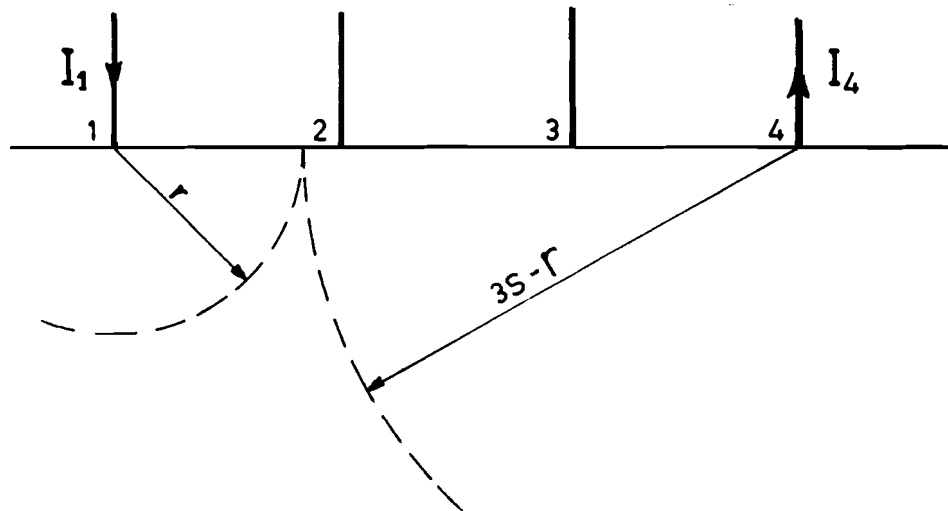
1. De onderlinge afstand s van de punten.
2. De geometrie van het sample en de plaats van de vierpuntsprobe op het sample.

In een bijzonder geval is deze konstante k eenvoudig af te leiden.

Veronderstel dat:

1. de afmetingen van het sample groot zijn ten opzichte van de afstand en diameter van de punten,
2. het halfgeleidermateriaal homogeen is,
3. het oppervlak van de halfgeleider schoon is, zonder oxydehuid.

De spanning over de binnenpunten wordt bepaald met behulp van het superpositie beginsel.



figuur 1.2

Soortelijke weerstand van halfgeleidermateriaal is ρ .

Stel $I_4 = 0$

$$j_1(r) = \frac{I_1}{2\pi r^2} \rightarrow E_1(r) = \frac{\rho I_1}{2\pi r^2}$$

Stel $I_1 = 0$ onderlinge afstand van de punten is s .

$$j_4(r) = \frac{I_4}{2\pi(3s-r)^2} \rightarrow E_4(r) = \frac{\rho I_4}{2\pi(3s-r)^2}$$

De punten liggen op één lijn zodat de totale veldsterkte tussen de punten de som is van de deelresponsies.

$$I_1 = I_4 = I_{14}$$

$$E(r) = E_1(r) + E_2(r) = \frac{\rho I_{14}}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{(3s-r)^2} \right)$$

De gelijkspanning V_{23} over de punten 2 en 3 wordt dan

$$\int_s^{2s} E(r) \, dr$$

dus

$$V_{23} = \frac{\rho I_{14}}{2\pi s}$$

of

$$\rho = 2\pi s \frac{V_{23}}{I_{14}} \quad (1.2)$$

dus

$$k = 2\pi s$$

In de praktijk zijn de afmetingen van het sample meestal niet zodanig dat met deze eenvoudige uitdrukking kan worden volstaan.

Immers bij de bepaling van de 1/f ruiseigenschappen van halfgeleiders maakt men gebruik van een puntkontakt, gevormd tussen twee gekruiste cilindrische staafjes met een diameter van ± 5 mm en een lengte van 1 à 2 cm, of van homogene samples met beperkte afmetingen.

Om toch de ρ van het gebruikte halfgeleidermateriaal te bepalen kan gebruik gemaakt worden van de grafiek op bijlage 1.

Hierop is de korrektiefactor k als functie van de straal r van cilindervormige samples aangegeven (-----).

Deze correctie geldt alleen indien gemeten wordt met een vierpuntsprobe waarvan de puntafstand 1 mm is en de lengte van de cylinder groot is ten opzichte van de puntafstand.

Deze grafiek werd samengesteld aan de hand van een publicatie van Gegenwarth [1].

Tevens is op bijlage 1 de korrektiefactor k als functie van de dikte w van vlakke samples aangegeven (———).

Puntafstand $s = 1$ mm.

Diameterplakjes groot ten opzichte van de puntafstand.

Deze grafiek werd samengesteld uit de publicaties van Swartzendruber [2] en Smits [3].

Het grote voordeel van de bepaling van ρ met behulp van de vierpuntsprobe is dat de "kwaliteit" (niet ohmse metaal-halfgeleiderovergangen) van de stroomvoerende contacten 1 en 4 nagenoeg geen invloed heeft op het resultaat.

Het verband tussen I_{14} en V_{23} is echter wel lineair.

Op bijlage 2 zijn V_{14} en V_{23} als functie van de stroom I_{14} weergegeven.

Puntafstand $s = 1$ mm.

Materiaal: n-type germanium van $\pm 8 \Omega\text{cm}$.

Wanneer blijkt dat het verband tussen I_{14} en V_{23} niet lineair is kan op deze manier geen ρ bepaald worden.

Dit is bijvoorbeeld het geval bij halfgeleiders waarop zich een oxydehuidje bevindt met een grote soortelijke weerstand ten opzichte van de soortelijke weerstand van de bulk (GaAs).

2. 1/f RUIS VAN HOMOGENE SAMPLES EN PUNTKONTAKTEN

F.N. Hooge [4] toonde aan dat de 1/f ruis van homogene samples als volgt beschreven kan worden

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha}{N_{\text{tot}}} \frac{\Delta f}{f} \quad (2.1)$$

Waarin:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle : \text{relatieve spanningsfluctuaties}$$

V : gelijkspanning over het sample

α : een experimenteel bepaalde dimensieloze konstante met een waarde van $2 \cdot 10^{-3}$.

N_{tot} : totaal aantal ladingsdragers in het sample

Δf : bandbreedte

f : frekwentie

Voor puntkontakten geldt

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha \pi^2 R^3}{20 \rho^3 n} \frac{\Delta f}{f} \quad (2.2)$$

Waarin:

ρ : soortelijke weerstand

n : concentratie van de ladingsdragers

V : spanning over het puntkontakt

R : konstriktieweerstand

In het algemeen kan het 1/f ruispektrum dus beschreven worden als volgt:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = C \frac{\Delta f}{f} \quad (2.3)$$

De 1/f ruispanning wordt genormeerd op de gelijkspanning over het homogeen sample of in geval van een puntkontakt de gelijkspanning over het puntkontakt.

Het voordeel van deze schrijfwijze is dat de konstante C onafhankelijk is van de stroom door het sample en dus volledig bepaald wordt door de eigenschappen van het sample.

1/f Ruis wordt veroorzaakt door fluktuaties in het geleidingsvermogen. Daar de totale stroom door deze fluktuerende weerstand vloeit geldt bij ruismeting aan homogene samples en aan puntkontakten tevens dat

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right\rangle$$

Bij de bepaling van α aan homogene samples is een sample nodig waarvan de afmetingen nauwkeurig bekend moeten zijn in verband met de bepaling van N_{tot} ($n \times \text{volume}$).

Een beperkende factor bij deze methode is de grootte van N_{tot} . Indien $N_{\text{tot}} > 10^{13}$ dan wordt de gemeten $\langle \Delta V^2 \rangle$ nagenoeg geheel bepaald door de ruis van de voorversterkers en door de Nyquist ruis van het sample voor stromen die zodanig zijn dat het sample niet overmatig verwarmd wordt [4].

Het is daarom noodzakelijk om bij de bepaling van α van metalen en laag-ohmige halfgeleiders over te gaan tot een andere configuratie namelijk puntkontakten [4].

Bij deze twee meetmethoden heeft men dus samples nodig van bepaalde vorm en met bepaalde afmetingen voorzien van ohmse, weinig ruisende kontakten.

Wanneer het mogelijk blijkt om met behulp van de vierpuntsprobe de ruis-eigenschappen van een halfgeleider te bepalen, met dezelfde reeds genoemde voordelen die gelden voor de bepaling van de soortelijke weerstand, bespaart men een aanzienlijke hoeveelheid tijd en materiaal.

3. 1/f RUISMETINGEN MET BEHULP VAN DE VIERPUNTSPROBE

3.1. Meetopstelling

In figuur 3.1 is het blokschema van de meetopstelling weergegeven. De voeding bestaat uit een set droge batterijen. De spanning is te variëren in stapjes tussen 1,5V en 500V.

In serie met de stroomvoerende punten 1 en 4 is een variabele voor-schakelweerstand R_v opgenomen.

De spanningsfluctuaties gemeten over de middenpunten 2 en 3 wordt via een hoogohmige voorversterker toegevoerd aan een selectieve versterker met een relatieve bandbreedte van 10%.

De uitgangsspanning wordt na kwadratering en middeling op een schrijver geregistreerd.

De versterkte ruisspanning wordt op een oscilloscoop zichtbaar gemaakt om eventuele onregelmatigheden, zoals oversturing van de voorversterker, in het oog te houden.

De spectraallijnen werden gemeten bij 20Hz, 75Hz, 300Hz, 1, 3, 10 en 20kHz.

3.2. Resultaten van 1/f ruismetingen op n-type germanium

De stroom door de buitenpunten 1 en 4 bedroeg telkens 5mA (figuur 3.1)

$$R_v = 0.$$

De gelijkspanning over de punten 2 en 3 was 65mV.

Puntafstand $s = 1 \text{ mm}$.

Hieruit volgt met behulp van formule (1.2) dat de soortelijke weerstand $8,2 \Omega\text{cm}$ bedraagt.

Op bijlage 3 is

$$\frac{1}{\Delta f} \left\langle \left(\frac{\Delta v_{23}}{v_{23}} \right)^2 \right\rangle$$

als funktie van de frequentie uitgezet op dubbel logaritmische schaal.

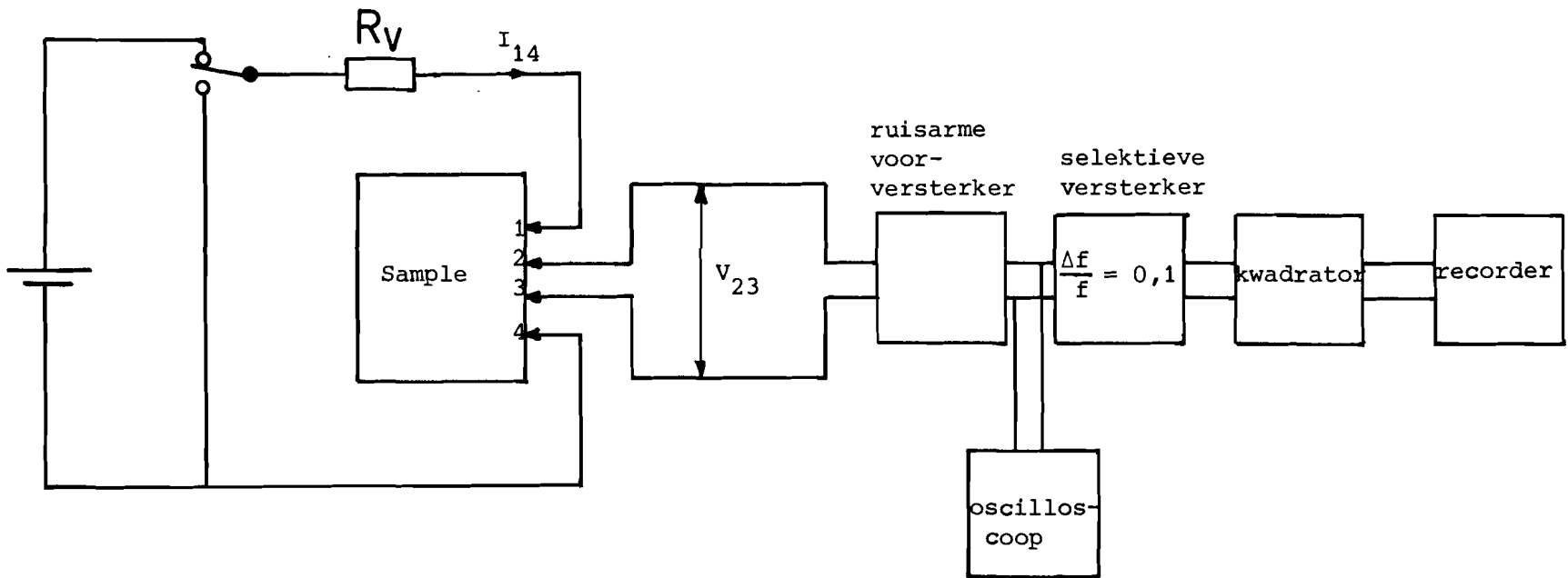
Gemeten werd bij verschillende bewerkingen van het oppervlak

- Gezaagd oppervlak

$$c = 5.10^{-10}$$

- x Oppervlak geschuurd met carborundum 240

$$c = 2,210^{-9}$$



figuur 3.1 Meetopstelling

o geëtst oppervlak

$$c = 1.410^{-8}$$

Uit de grafieken is te konkluderen dat

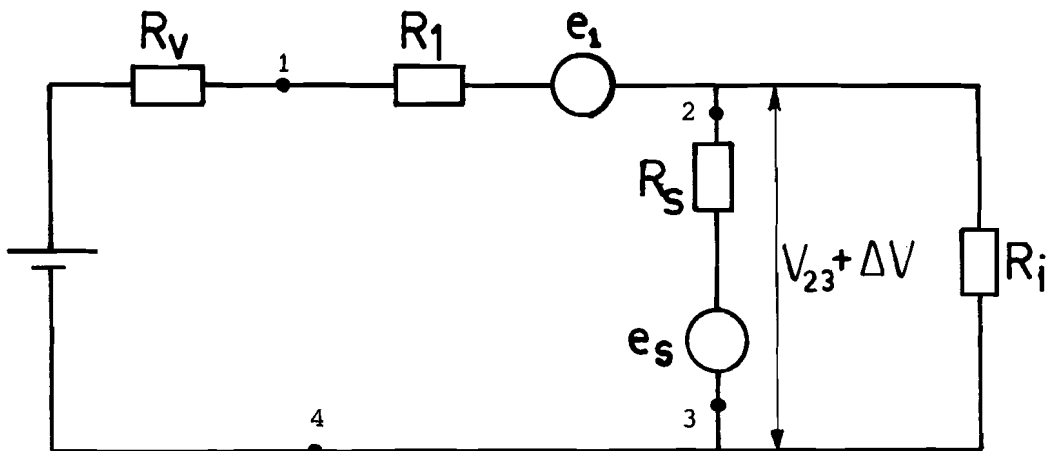
1. de spanningsfluctuaties, gemeten tussen de punten 2 en 3, een $1/f$ spektrum hebben,
2. de hoeveelheid ruis afhankelijk is van de bewerking van het oppervlak.

Een glad oppervlak vertoont meer ruis dan een ruw oppervlak.

De ruis gemeten tussen de punten 2 en 3 is blijkbaar afhankelijk van de ruis die geproduceerd wordt bij de stroomvoerende kontakten 1 en 4.

3.3. Berekening van de invloed van de voorschakelweerstand

De invloed van de ruis van de stroomvoerende kontakten op de ruis tussen de meetpunten 2 en 3 kan men verkleinen wanneer in serie met de kontakten 1 en 4 een voorschakelweerstand R_v opgenomen wordt. Men kan nu onderstaand vervangingsschema opstellen.



figuur 3.2 Vangingingsschema

Hierin is:

R_V : voorschakelweerstand

R_1 : weerstand van de metaal halfgeleider-overgangen

e_1 : ruisspanning over R_1

R_S : weerstand tussen de punten 2 en 3

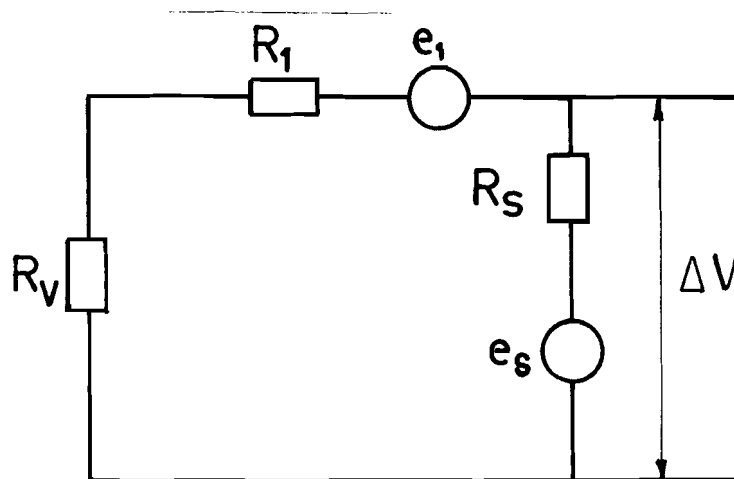
e_s : ruisspanning over R_S

In het vermogensspektrum van deze spanning zijn we geïnteresseerd

R_i : ingangsweerstand van de voorversterker

R_i is zo groot ($100M\Omega$) ten opzichte van R_S dat de invloed ervan in de verdere berekeningen verwaarloosd wordt.

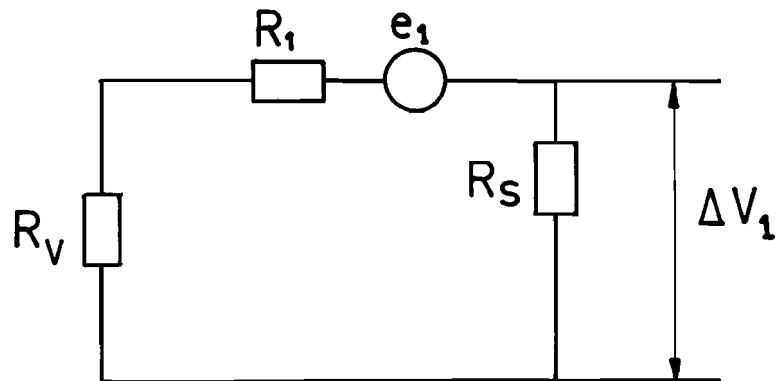
Voor wisselspanningen vormt de batterij een kortsluiting zodat voor de ruisspanningen onderstaand vervangingschema geldt



figuur 3.3 Vervangingschema voor ruisspanningen

ΔV wordt bepaald met behulp van het superpositie beginsel.

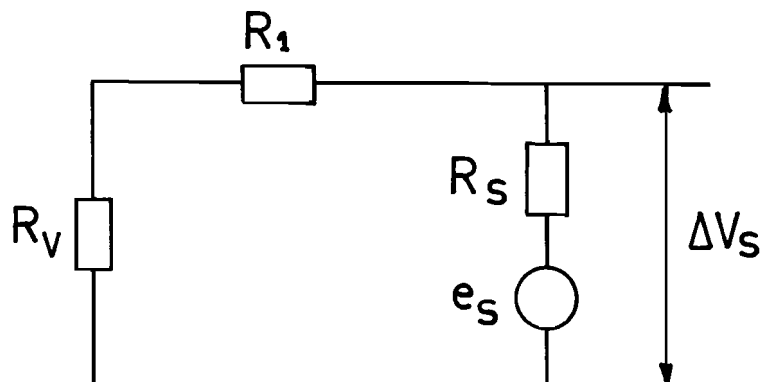
Stel $e_s = 0$



figuur 3.4

$$\Delta V_1 = \frac{R_S}{R_V + R_1 + R_S} e_1 \quad (3.1)$$

$$e_1 = 0$$



figuur 3.5

$$\Delta V_s = \frac{R_1 + R_V}{R_V + R_1 + R_S} e_s \quad (3.2)$$

Stel dat de ruisbronnen e_1 en e_s onafhankelijk zijn dan geldt:

$$\langle \Delta V^2 \rangle = \langle \Delta V_1^2 \rangle + \langle \Delta V_s^2 \rangle \quad (3.3)$$

(3.1) en (3.2) in (3.3)

dan

$$\frac{\langle \Delta V^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle} = \left(\frac{1}{1 + \frac{R_v + R_1}{R_s}} \right)^2 \frac{\langle e_1^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle} + \left(\frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_v + R_1}} \right)^2 \quad (3.4)$$

In het limietgeval voor $R_v \rightarrow \infty$ dan volgt uit (3.4)

$$\frac{\langle \Delta V^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle} = 1$$

Op bijlage 4 is $\frac{\langle \Delta V^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle}$ als functie van $\frac{R_1 + R_v}{R_s}$ uitgezet voor verschillende waarden van

$$\frac{\langle e_1^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle}$$

Hieruit volgt dat wanneer men de voorschakelweerstand zodanig kiest dat $\frac{R_1 + R_v}{R_s}$ groter is van een factor 20 à 30 en als

$$\frac{\langle e_1^2 \rangle}{\langle e_s^2 \rangle} < 100$$

de ruis die tussen de binnenpunten 2 en 3 gemeten wordt nagenoeg geheel afkomstig is van de fluktuerende weerstand tussen deze punten.

3.4. Gevolgen van de voorschakelweerstand op de gemeten ruis

Op bijlage 5 zijn enkele frekwentie spektra uitgezet van de ruis spanning over de binnenpunten 2 en 3 voor verschillende waarden van de voorschakelweerstand.

Stroom door de punten 1 en 4.

Afstand punten $s = 1$ mm.

Materiaal n Ge $8,2 \Omega \text{cm}$.

Geëtst oppervlak.

a. $R_v = 0$ $I_{14} = 1,15 \text{mA}$

1/f spectrum

$$\frac{1}{\Delta f} \left\langle \left(\frac{\Delta V_{23}}{V_{23}} \right)^2 \right\rangle = 1,410^{-8} \frac{1}{f}$$

Meetpunten aangegeven met (x) en verbonden door een getrokken lijn
(————)

b. $R_V = 20k\Omega$ $I_{14} = 1,36mA$

Geen 1/f spektrum

Meetpunten aangegeven met (+) en verbonden door een onderbroken lijn
(— — —)

c. $R_V = 100k\Omega$ $I_{14} = 1,3mA$

Geen 1/f spektrum

Meetpunten aangegeven met (o) en verbonden met een streep-stiplijn
(— · — · — ·)

d. $R_V = 250k\Omega$ $I_{14} = 1,1mA$

Geen 1/f spektrum

Meetpunten aangegeven met (o) en verbonden met een onderbroken lijn
(-----)

e. $R_V = 500k\Omega$ $I_{14} = 1,1mA$

Geen 1/f spektrum

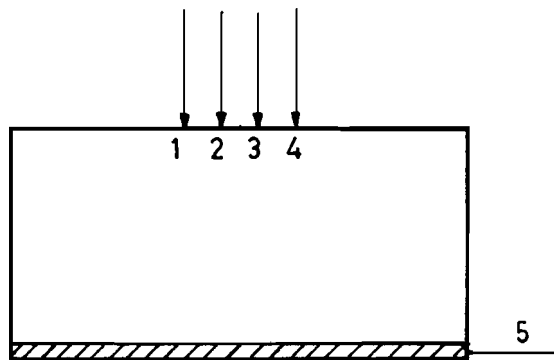
Meetpunten aangegeven met (▲) en verbonden met punten(.....)

Het is voor mij onduidelijk waarom de spektra zo'n vreemd verloop vertonen wanneer de voorschakelweerstand ongelijk aan nul is.

Hieruit volgt wel dat het karakter van de stroomvoerende contacten van grote invloed is op het frekwentiespektrum dat tussen de punten 2 en 3 gemeten wordt.

Om na te gaan welk stroomvoerend punt verantwoordelijk is voor de ruis zoals die gemeten wordt op de punten 2 en 3 werd een vijfde contact op het sample aangebracht met behulp van zilverpasta. Zie figuur 3.6.

De ruis van alle punten ten opzichte van dit vijfde contact werd gemeten onder dezelfde omstandigheden wat stroomdoorgang door de punten betreft bij een voorschakelweerstand van $330\text{k}\Omega$.



figuur 3.6

Situatie 1. Stroom door buitenpunten 1 en 4

$$V_{23} = 14,2\text{mV}$$

$$R_v = 330\text{k}\Omega$$

Op bijlage 6 is $\frac{\langle \Delta V_{23}^2 \rangle}{\Delta f}$ als functie van de frequentie uitgezet (o).

Het spektrum heeft een oplopend karakter.

$$\frac{\langle \Delta V_{23}^2 \rangle}{\Delta f} = 3 \cdot 10^{-11} \text{ bij } 1000 \text{ Hz.}$$

Situatie 2. Stroom van punt 1 naar contact 5

$$I_{15} = 1\text{mA}$$

$$V_{15} = 1,55\text{V}$$

$$R_v = 330\text{k}\Omega$$

Metaal halfgeleider-overgang staat in doorlaatrichting.

Op bijlage 6 is

$$\frac{\langle \Delta V_{15}^2 \rangle}{\Delta f} \text{ uitgezet als functie van de frekwentie } \frac{\langle \Delta V_{15}^2 \rangle}{\Delta f} \sim f^{-1,7}$$

$$\text{bij } 1000\text{Hz} : \frac{\langle \Delta V_{15}^2 \rangle}{\Delta f} = 2 \cdot 10^{-12}$$

Situatie 3. Ruis van de stroompunten 1 en 4

Stroom van 1 naar 4

$$I_{14} = 1\text{mA}$$

$$V_{14} = 44\text{V}$$

$$R_V = 330\text{k}\Omega$$

Punt 1 in doorlaat, punt 2 gesperd

Op bijlage 7 is $\frac{\langle \Delta V_{54}^2 \rangle}{\Delta f}$ uitgezet (●)

Het spektrum heeft nagenoeg een 1/f karakter

$$\text{bij } 1 \text{ kHz } \frac{\langle \Delta V_{14}^2 \rangle}{\Delta f} = 2.510^{-7}$$

Situatie 4. Ruis van stroompunt 4

Stroom van 5 naar 4

Dus metaal halfgeleider-overgang 4 in sper

$$I_{54} = 1\text{mA}$$

$$V_{54} = 40\text{V}$$

Op bijlage 7 is $\frac{\langle \Delta V_{54}^2 \rangle}{\Delta f}$ als functie van de frekwentie uitgezet (x)

Het ruispektrum is nagenoeg gelijk aan dat van situatie 3.

$$\text{Ook hier geldt } \frac{\langle \Delta V_{54}^2 \rangle}{\Delta f} = 2.510^{-7} \text{ bij } 1000\text{Hz.}$$

Dus de ruis die over de punten 1 en 4 (situatie 3) gemeten wordt, wordt volledig bepaald door de ruis, veroorzaakt door die metaal halfgeleider-overgang die in sper staat.

3.5. Konklusie

Wanneer men een spanning toevoert aan de buitenpunten van een vierpunts-probe, gedrukt op een halfgeleider kan men over de binnenpunten ruis meten met een 1/f spektrum.

Deze ruis is echter hoofdzakelijk afkomstig van de stroomvoerende metaal halfgeleider-overgang en wel speciaal van die diode die zich in de sper-toestand bevindt.

De "kwaliteit" en daarmee de ruiseigenschappen van deze sperrende diode is afhankelijk van het soort halfgeleider waarop gemeten wordt, het

4. 1/f RUISMETINGEN AAN GRAFIETPAPIER *4.1. Inleiding

Uit de ruismetingen van een halfgeleider met een vierpuntsprobe volgen twee problemen.

1. Wat zijn de ruiseigenschappen van een metaal-halfgeleiderovergang (niet ohms puntkontakt).
2. Welke grootheden bepalen de hoeveelheid ruis die tussen twee kontakten gemeten kan worden ten gevolge van een stroom door twee elders gelegen (ohmse) kontakten en kan deze ruis, evenals bij puntkontakt-ruis, geschreven worden in de vorm van $\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = C \frac{\Delta f}{f}$.

De ruiseigenschappen van niet-ohmse kontakten worden niet beschouwd.

De nu volgende metingen worden verricht aan grafietpapier omdat:

1. bij stroomdoorgang grafietpapier spanningsfluctuaties vertoont met een 1/f spektrum,
2. het eenvoudig is om met behulp van zilverpasta (Leitsilber no. 200) ohmse kontakten van willekeurige vorm aan te brengen op het papier,
3. het gebruikte grafietpapier een kleine dikte ten opzichte van de andere afmetingen van het papier heeft, zodat men het kan beschouwen als zijnde twee dimensionaal.

* Grafietpapier, ook wel teledeltospapier genoemd, was verkrijgbaar bij Hoffmann Internationaal N.V., Bergscherhoek 3123 en hoogstwaarschijnlijk gefabriceerd door Renken-Belipa GmbH Düren.

Het gebruikte grafietpapier bezit geen metaal coating en heeft een vierkantsweerstand van $\pm 4k\Omega$.

Grafietpapier wordt o.a. gebruikt voor het oplossen van twee dimensionale potentiaalproblemen, en als registratiepapier in een vonkschrijver.

Grafietpapier zonder metaal coating is echter moeilijk verkrijgbaar.

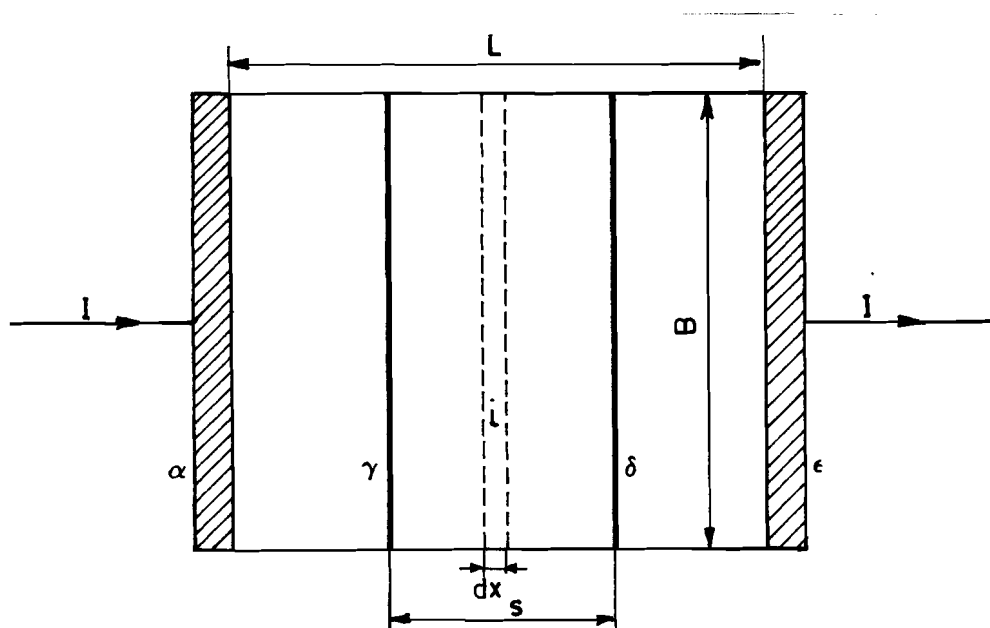
4.2. Beschrijving van de ruis eigenschappen van het grafietpapier in een homogeen veld

Er wordt uitgegaan van een stuk grafietpapier met een lengte L en breedte B aan de uiteinden voorzien van twee lijnvormige kontakten α en ϵ (zie figuur 4.1) .

Deze kontakten worden aangebracht met behulp van zilverpasta.

Door deze kontakten wordt een konstante stroom I gestuurd.

Over twee lijnvormige binnenkontakten γ en δ (afstand s) ontstaat nu ten gevolge van weerstandsfluctuaties een fluctuatie in de spanning waarvan het spektrum bepaald kan worden.



figuur 4.1

Uitgangspunt bij de berekening is formule (2.1) die aangeeft dat de genormeerde fluctuaties in de spanning omgekeerd evenredig zijn met het totaal aantal ladingsdragers in een homogeen sample. Dit totaal aantal ladingsdragers is evenredig met het volume. Dit wordt toegepast op het strookje i (figuur 4.1).

$$\langle (\Delta V_i)^2 \rangle = v_i^2 \frac{\beta}{A_i d} \frac{\Delta f}{f} \quad (4.1)$$

waarin: $V_i = R_i I$ is gelijkspanning over het strookje i .

met $R_i = \frac{\rho dx}{B d}$ weerstand van het strookje

d dikte van het papier

ρ soortelijke weerstand

$\frac{\rho}{d} = R_{\square}$ vierkantsweerstand van het papier

dus

$$V_i = \frac{R_{\square} I}{B} dx \quad (4.2)$$

$A_i = B dx$ oppervlakte van het strookje.

Dit ingevuld in uitdrukking (4.1)

$$\langle \Delta V_i^2 \rangle = \frac{\beta}{d} \frac{R_{\square}^2 I^2}{B^3} dx \frac{\Delta f}{f}$$

Veronderstel dat de strookjes ongekorreleerd ruisen dan wordt de ruis over de contacten γ en δ

$$\langle (\Delta V_{\gamma\delta})^2 \rangle = \int_x^{x+s} \langle (\Delta V_i)^2 \rangle$$

$$\langle (\Delta V_{\gamma\delta})^2 \rangle = \frac{\beta}{d} \frac{I^2 R_{\square}^2}{B^3} s \frac{\Delta f}{f}$$

Uit (4.2) volgt

$$V_{\gamma\delta} = \frac{I R_{\square} s}{B}$$

De op de gelijkspanning genormeerde ruis wordt dan

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V_{\gamma\delta}}{V_{\gamma\delta}} \right)^2 \right\rangle = \frac{\beta}{d} \frac{1}{B s} \frac{\Delta f}{f} \quad (4.3)$$

Dus de relatieve ruis is omgekeerd evenredig met het oppervlak van het papier tussen de lijnvormige contacten γ en δ .

Analoog aan uitdrukking $\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{\alpha}{N_{\text{tot}}} \frac{\Delta f}{f}$ kan uitdrukking (4.3) geschreven worden:

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{A} \frac{\Delta f}{f} \quad (4.4)$$

Wanneer A in mm^2 wordt uitgedrukt stelt C_1 de ruis voor van 1 mm^2 papier ongeacht de vorm van het oppervlak. Dit is in overeenstemming met de theoretische beschouwingen van Dr.-Ing. H.J. Butterweck. Hij toonde aan, aannemende dat de soortelijke weerstand fluktueert, dat de hoeveelheid $1/f$ ruis, gemeten over lijnvormige contacten in een homogeen veld, omgekeerd evenredig is met het oppervlak tussen deze contacten in het twee dimensionale geval [5].

4.2.1. Experimentele bepaling van de ruiseigenschappen van grafietpapier

De konstante C_1 uit uitdrukking (4.4) kan experimenteel bepaald worden door het oppervlak tussen de contacten γ en δ te variëren.

Op bijlage 8 is $\frac{f}{\Delta f} \left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle$ als functie van het oppervlak A tussen de contacten γ en δ uitgezet.

$R_V = 100 \text{ k}\Omega$.

Hieruit volgt dat $C_1 = 1.410^{-7} \text{ mm}^2$.

C_1 en de vierkantsweerstand R_{\square} blijken niet konstant te zijn onder alle omstandigheden. Vermoedelijk zijn deze grootheden afhankelijk van de temperatuur en de vochtigheidsgraad van het grafietpapier. Bovendien is het grafietpapier anisotroop.

C_1 kan variëren van $5 \cdot 10^{-8}$ en $2 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2$ en R_{\square} van 3 tot $6 \text{ k}\Omega$.

Het is hier zinvol om $\langle \Delta V^2 \rangle$ te normeren op de gelijkspanning, over de lijnvormige contacten γ en δ , omdat door de fluktuerende weerstand tussen γ en δ de totale stroom I vloeit.

Hier geldt dus ook dat $\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^2 \right\rangle$

Het is daarom ook slechts toegestaan uitdrukking (4.4) te hanteren wanneer gemeten wordt in een homogeen veld over lijnvormige contacten loodrecht op de veldlijnen.

4.3. Ruis van een twee dimensionale konstriktie

4.3.1. Inleiding

De stroomvoerende contacten 1 en 4 van een vierpuntsprobe vormen met het onderliggende grafietpapier konstriktie-weerstanden.

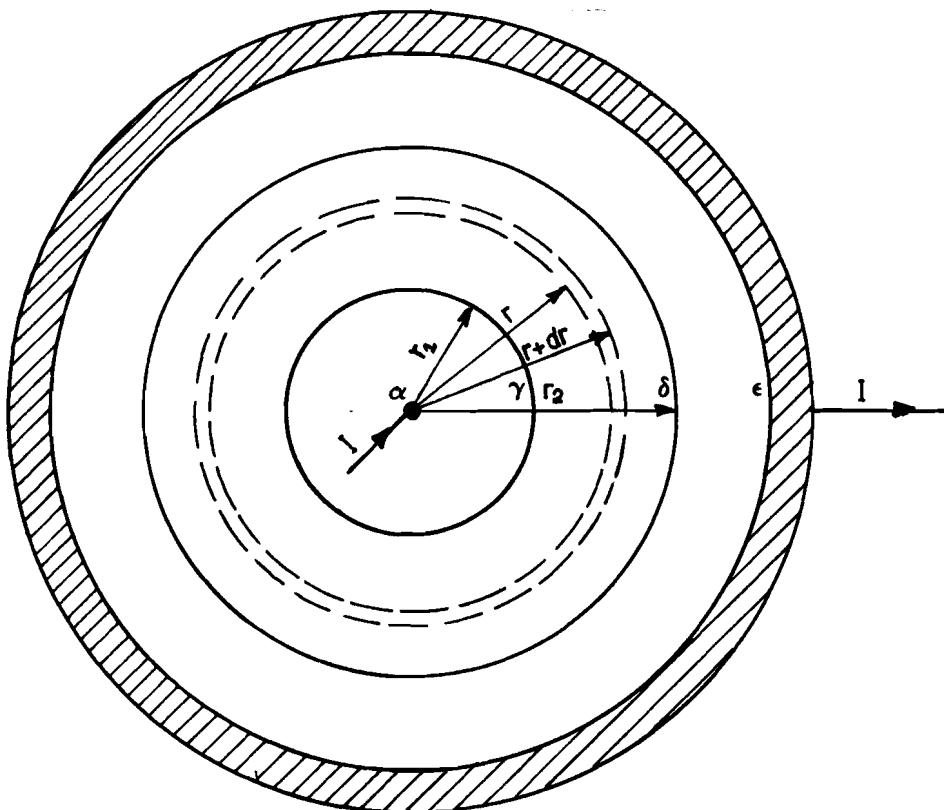
In de direkte omgeving van deze punten is de stroomdichtheid nagenoeg radiaal gericht en dus is uitdrukking (4.4) niet toepasbaar.

Het is echter mogelijk om door middel van een korrektiefactor g de ruiseigenschappen van het grafietpapier in een radiaal veld te beschrijven zodat men in plaats van uitdrukking (4.4) kan stellen

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{A} g \frac{\Delta f}{f} \quad (4.5)$$

4.3.2. Berekening van de ruis van een twee dimensionale konstriktie

Beschouw onderstaande configuratie.



figuur 4.2

Door de cirkelvormige kontakten α en ϵ wordt een konstante stroom I gestuurd.

Over de eveneens cirkelvormige kontakten γ en δ kan men dan spanningsfluctuaties meten met een $1/f$ spectrum.

De kontakten worden met behulp van zilverpasta aangebracht.

Om de korrektiefactor g te bepalen wordt uitgegaan van uitdrukking (4.4) en toegepast op het cirkelvormig gebied tussen r en $r+dr$.

$$\langle (\Delta v_i)^2 \rangle = v_i^2 \frac{C_1}{A_i} \frac{\Delta f}{f} \quad (4.6)$$

met

$$A_i = 2\pi r dr \quad \text{Oppervlakte van het gebiedje tussen } r \text{ en } r+dr.$$

$$v_i = I \frac{R_{\square} dr}{2\pi r} \quad \text{De gelijkspanning over het gebiedje}$$

Dit ingevuld in (4.6)

$$\langle (\Delta v_i)^2 \rangle = \frac{I^2 R_{\square}^2}{(2\pi)^3} C_1 \frac{\Delta f}{f} \frac{1}{r^3} dr$$

Veronderstel dat de gebiedjes ongecorreleerd ruisen dan wordt de totale ruis over de kontakten γ en δ

$$\int_{r_1}^{r_2} \langle (\Delta v_i)^2 \rangle = \langle (\Delta v_{\gamma\delta})^2 \rangle = \frac{I^2 R_{\square}^2}{(2\pi)^3} C_1 \frac{\Delta f}{f} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \quad (4.7)$$

De ruis wordt weer genormeerd op de gelijkspanning over de kontakten γ en δ

$$v_{\gamma\delta} = \int_{r_1}^{r_2} v_i = \frac{I R_{\square}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (4.8)$$

dus

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V \gamma \delta}{V \gamma \delta} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{4\pi} \frac{1}{\left(\ln \frac{r_2}{r_1} \right)^2} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \frac{\Delta f}{f}$$

De oppervlakte A tussen r_1 en r_2 bedraagt $\pi(r_2^2 - r_1^2)$.

Zodat

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V \gamma \delta}{V \gamma \delta} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{A} g(p) \frac{\Delta f}{f} \quad (4.9)$$

met

$$g = \left(\frac{p^2 - 1}{2p \ln p} \right)^2 \quad (4.10)$$

$$p = \frac{r_2}{r_1}$$

Op bijlage 9 is g als functie van p uitgezet.

Door r_1 en r_2 te variëren is het mogelijk om deze functie experimenteel te bepalen, aannemende dat C_1 overal konstant is.

Op bijlage 9 zijn tevens de experimentele resultaten uitgezet voor $C_1 = 6 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2$.

De experimenten komen overeen met het model.

4.3.3. Ruis van de stroomvoerende puntvormige kontakten 1 en 4

De ruis over de stroomvoerende puntvormige kontakten wordt hoofdzakelijk bepaald door de reeds genoemde fluktuerende konstriktie-weerstanden. Deze weerstand wordt hoofdzakelijk bepaald door de straal van het puntvormig contact. In de buurt van zo'n punt is het veld nagenoeg radiaal dus een goede benadering voor de ruis over de stroomvoerende kontakten is uitdrukking (4.7) die afgeleid werd voor een konstriktie. Wanneer $r_1 \ll r_2$ dan geldt voor de ruis over de stroomvoerende kontakten 1 en 4 bij benadering

$$\left\langle \Delta V_{14}^2 \right\rangle = \frac{I^2 R_{\square}^2}{(2\pi)^3} C_1 \frac{\Delta f}{f} \frac{1}{r_1} \quad (4.11)$$

voor $R = 5k\Omega$; $C_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ geldt $\left\langle \left(\frac{\Delta v_{14}}{I_{14}} \right)^2 \right\rangle = 2 \cdot 10^{-9} \frac{1}{r_1^2}$

Op bijlage 10 is $\left\langle \left(\frac{\Delta v_{14}}{I_{14}} \right)^2 \right\rangle$ als functie van straal van de kontakten uitgezet op dubbel logaritmisch papier.

Volgens het model moet de helling -2 zijn.

De experimentele waarden komen hiermee overeen

$$\left\langle \left(\frac{\Delta v_{14}}{I_{14}} \right)^2 \right\rangle = 1.1 \cdot 10^{-9} \frac{1}{r_1^2}$$

5. RUISMETINGEN MET PUNTVORMIGE, NIET-STROOMVOERENDE KONTAKTEN

5.1. Inleiding

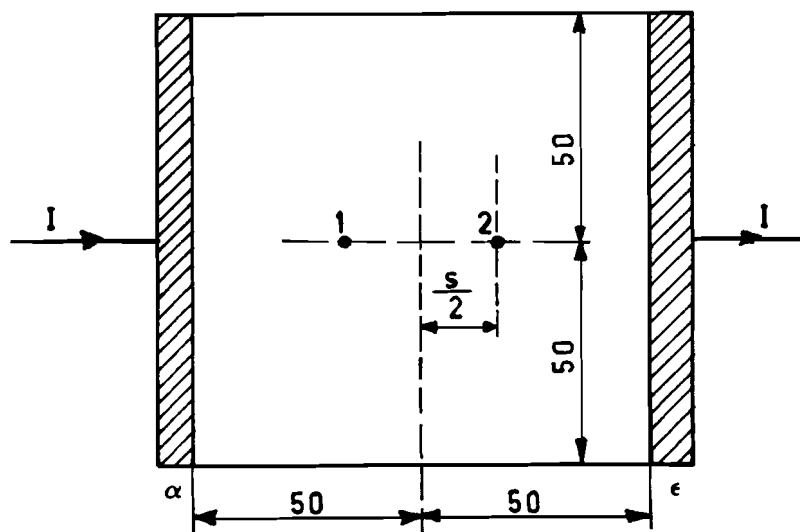
De in het vorige hoofdstuk beschreven experimenten en berekeningen hadden betrekking op de $1/f$ ruis die gemeten werd over stroomvoerende kontakten. Het bleek dat de karakterisering van de ruiseigenschappen van het grafietpapier mogelijk wordt door invoering van de konstante C_1 : de ruis van 1 mm^2 papier.

De situatie wordt echter geheel anders indien met twee niet-stroomvoerende kontakten spanningsfluctuaties gemeten worden.

Deze fluctuaties zijn afkomstig van een konstante stroom die via twee elders gelegen kontakten door een fluktuerende weerstand vloeit.

5.2. Puntvormige kontakten in een homogeen veld

Als eerste wordt de $1/f$ ruis bepaald als functie van de puntafstand s in een homogeen veld. Daartoe wordt een stuk grafietpapier voorzien van twee lijnvormige kontakten die met behulp van zilverpasta worden aangebracht (figuur 5.1).



figuur 5.1

Door de contacten α en ϵ wordt een konstante stroom I van 2,02mA gestuurd.

De voorschakelweerstand is $100k\Omega$.

Om een goed contact te verkrijgen tussen de meetprobes 1 en 2 en het grafietpapier worden met behulp van zilverpasta twee ronde (diameter 0,5 - 1 mm) contacten aangebracht, waarna de probes er op gedrukt worden. De meetprobes worden aangebracht zoals aangegeven in figuur 5.1.

Op bijlage 11 is $\frac{\langle \Delta V_{12}^2 \rangle}{\langle V_{\alpha\epsilon}^2 \rangle}$ uitgezet als functie van de puntafstand s .

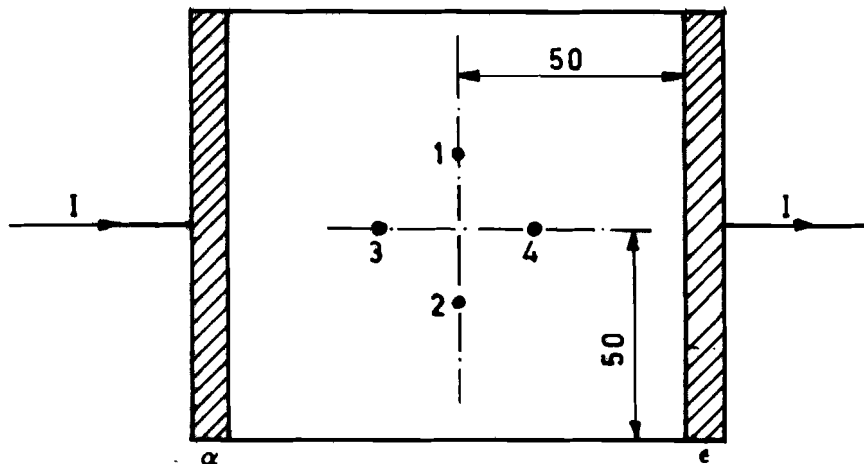
De ruis over de buitencontacten α en ϵ bedroeg

$$2 \cdot 10^{-10}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = 0,1$$

Uit de grafiek volgt dat $\langle \Delta V_{12}^2 \rangle$ onafhankelijk is van de puntafstand voor $s < 70$ mm en gelijk is aan de ruis over de stroomvoerende contacten α en ϵ .

Om na te gaan of de ruis afhankelijk is van de onderlinge positie van de meetprobes op het papier en om een indruk te krijgen van de meetnauwkeurigheid werd vervolgens een opstelling gemaakt zoals in onderstaande figuur 5.2 is aangegeven.



figuur 5.2

Na inspectie bleek dat de grote afwijking bij meting 3 het gevolg waren van een slecht contact van probe 3 met het grafietpapier.

De vijf afwijkende meetpunten

$$\left(\frac{\langle \Delta V_{ij}^2 \rangle}{\langle \Delta V_{\alpha\epsilon}^2 \rangle} > 1,4 \right)$$

bevatten namelijk allemaal kontakt 3 als een van de kontakten waarover gemeten werd.

De geringe meetnauwkeurigheid (faktor 3 à 4) is geen gevolg van de spreiding in kontaktgrootte.

Op bijlage 13 is $\langle \Delta V_{12}^2 \rangle$ als funktie van de breedte van de niet-stroomvoerende kontakten uitgezet. De onderbroken lijn geeft aan de hoeveelheid $1/f$ ruis die men zou vinden wanneer men uitdrukking (4.4) mocht toepassen.

Dus wanneer de ruis tussen de kontakten 1 en 2 omgekeerd evenredig met het oppervlak tussen de kontakten zou zijn.

Men zou dan vinden

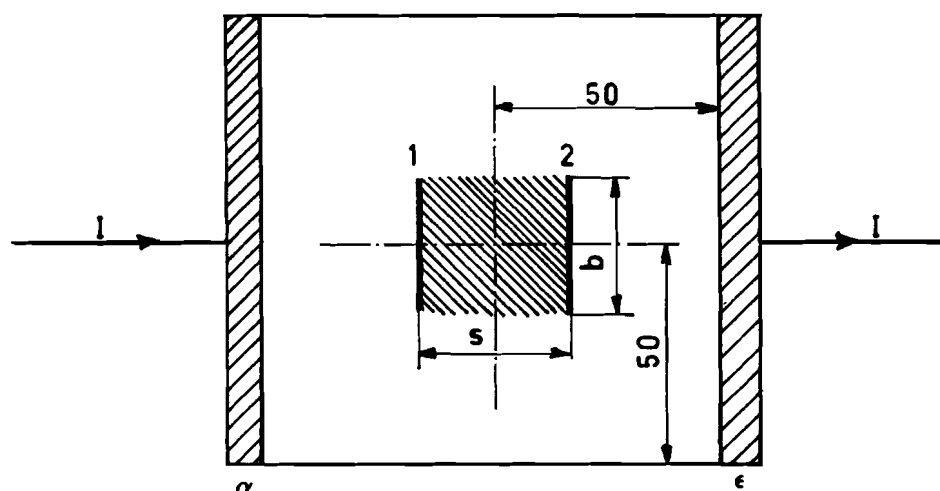
$$\langle \Delta V_{12}^2 \rangle = v_{12}^2 \frac{C_1}{A} \frac{\Delta f}{f}$$

met

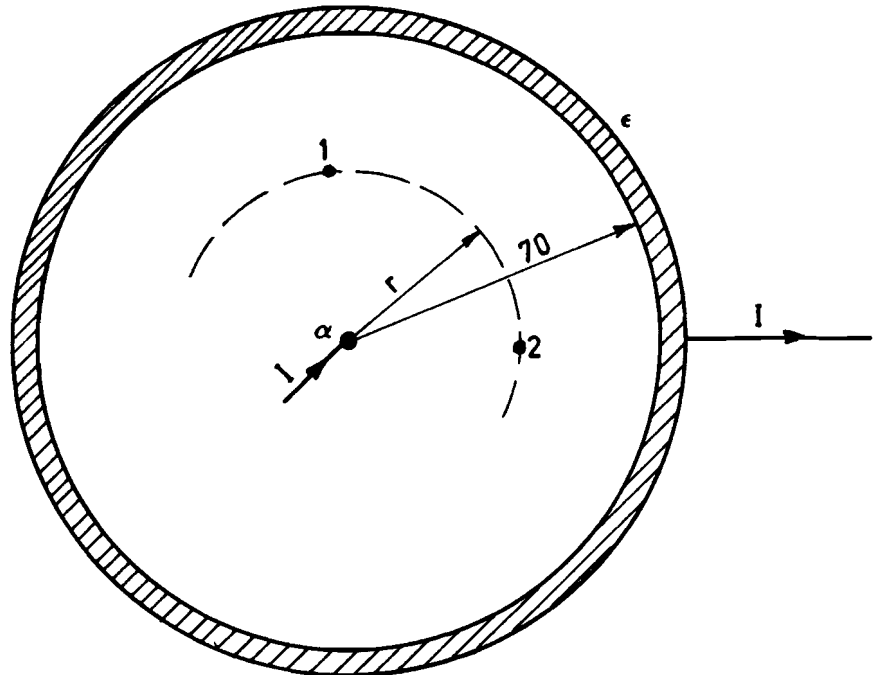
A = bs het oppervlakte van het grafietpapier tussen de kontakten.

Zie figuur 5.3: het gearceerde oppervlak.

s: afstand van de kontakten.



figuur 5.3



figuur 5.4

Uit grafiek bijlage 9 volgt $g(p) = 28$

$$C_1 = 10^{-7} \text{ mm}^2$$

$$\frac{\Delta f}{f} = 0,1$$

dit ingevuld: $\left\langle \left(\frac{\Delta V_{\alpha\epsilon}}{V_{\alpha\epsilon}} \right)^2 \right\rangle = 1,8210^{-11}$

Gemeten werd $\langle \Delta V_{\alpha\epsilon}^2 \rangle = 6,510^{-10}$ en $V_{\alpha\epsilon} = 5,7V$

dus $\left\langle \left(\frac{\Delta V_{\alpha\epsilon}}{V_{\alpha\epsilon}} \right)^2 \right\rangle = 2 \cdot 10^{-11}$

Hetgeen overeenkomt met het theoretisch model.

Metingen

De puntvormige kontakten worden op dezelfde manier als reeds beschreven op het grafietpapier aangebracht.

De meetresultaten zijn weergegeven op bijlage 14.

dit ingevuld:

$$\langle \Delta V_{\alpha r}^2 \rangle = 5,6 \cdot 10^{-10}$$

Gemeten werd voor grote r:

$$\langle \Delta V_{\alpha r}^2 \rangle \approx \left(\langle \Delta V_{\alpha r}^2 \rangle \right)_{\text{konstriktie}} = 6,5 \cdot 10^{-10}$$

Uit 2 volgt dat voor een puntvormig kontakt in een radiaal veld geldt:

$$\langle \Delta V_{1\epsilon}^2 \rangle = 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{1}{r^2}$$

Wanneer de ruis van de konstriktie α en de ruis van een puntvormig kontakt ongecorreleerd zijn dan geldt voor de ruis over de konstriktie en een punt in een radiaal veld

$$\langle \Delta V_{\alpha 1}^2 \rangle = \left(\langle \Delta V_{\alpha 1}^2 \rangle \right)_{\text{konstriktie}} + \langle \Delta V_{1\epsilon}^2 \rangle$$

$$\langle \Delta V_{\alpha 1}^2 \rangle = 6,5 \cdot 10^{-10} + 1,7 \cdot 10^{-8} \frac{1}{r^2} \quad (5.2)$$

Op bijlage 14 is deze uitdrukking uitgezet als functie van r (aangegeven met een stippellijn).

Dit zou het toenemen van de ruis bij kleine r kunnen verklaren.

5.4. Normering

Uit de metingen met puntvormige kontakten in een homogeen veld (5.2) volgt dat normering op de gelijkspanning over de kontakten niet mogelijk is omdat de ruis spanning onafhankelijk is van de gelijkspanning. Deze gelijkspanning wordt zelfs nul indien beide punten op hetzelfde equipotentiaal vlak staan.

Wanneer met puntvormige kontakten 1/f ruis gemeten wordt in een radiaal veld blijkt dat de ruis over de punten omgekeerd evenredig is met r^2 . De enige elektrische grootte die deze afhankelijkheid vertoont is het kwadraat van de stroomdichtheid.

Uit $\langle \Delta V_{12}^2 \rangle$ als functie van de breedte van de niet-stroomvoerende kontakten (bijlage 13) volgt in het gebied waar dit een konstante is:

$$\langle \Delta V_{12}^2 \rangle = 1,5 \cdot 10^{-10}$$

$$I = 2 \text{ mA}$$

afmetingen 100x100 mm

$$\text{dus } C_T = \underline{\underline{3,8 \cdot 10^{-6}}}$$

Radiaal veld:

Uit $\langle \Delta V_{12}^2 \rangle$ als functie van r volgt $\langle \Delta V_{12}^2 \rangle = 4 \cdot 10^{-8} \frac{1}{r^2}$ (bijlage 14)

$$\text{dus } C_T = \frac{f}{\Delta f} \frac{\langle \Delta V_{12}^2 \rangle}{j^2} = 4 \cdot 10^{-8} \cdot 10 \left(\frac{2\pi}{I} \right)^2 = \underline{\underline{3,3 \cdot 10^{-6}}} \quad I = 2,2 \text{ mA}$$

Uit de meetresultaten volgt dat C_T binnen een factor 4 konstant is en varieert van $1,2 \cdot 10^{-6}$ tot $5 \cdot 10^{-6}$.

5.5. Vierpunten op een lijn

Om uitdrukking (5.3) te verifiëren aan vierpunten op één lijn, zoals de opstelling is bij ruismeting met behulp van de vierpuntsprobe, werd de ruis tussen de binnenpunten gemeten als functie van de afstand van deze punten.

Voor de normering van de ruis is de lokale stroomdichtheid nodig.

5.5.1. Berekening stroomdichtheid

Veronderstel de afmetingen van het grafietpapier groot ten opzichte van de afstand van de buitenpunten 1 en 4 (zie figuur 5.5).

Afstand stroomvoerende punten 2p.

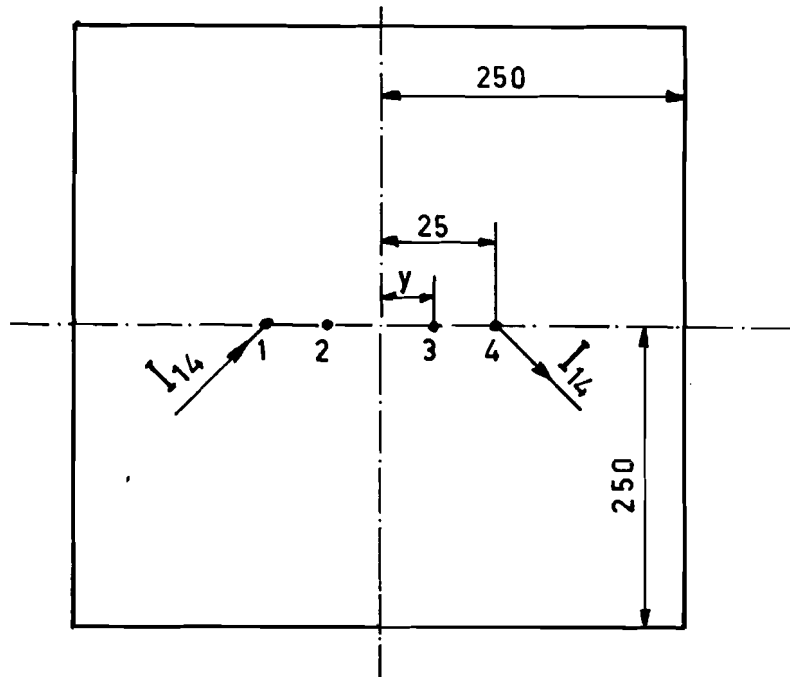
Afstand meetprobes 2y (symmetrisch ten opzichte van $x = 0$).

$$j_1 = \frac{I_{14}}{2\pi r_1} \longrightarrow \left(j_1 \right)_1 = j_1 \cos \phi_1$$

$$j_2 = \frac{I_{14}}{2\pi r_2} \longrightarrow \left(j_2 \right)_1 = j_2 \cos \phi_2$$

Ruismetingen over de punten 2 en 3 als functie van de afstand van deze punten. Daartoe werd een vierkant stuk weerstandspapier genomen met afmetingen 500x500 mm.

De contacten werden aangebracht met behulp van zilverpasta en gerangschikt zoals in onderstaande figuur 5.6 aangegeven is.



figuur 5.6

De stroomvoerende contacten 1 en 4 bevonden zich op een afstand van 50 mm. Er werd een konstante stroom van 0,288mA door de punten 1 en 4 gestuurd.

$$R_v = 1 \text{ M}\Omega.$$

Op bijlage 18 is $\frac{\langle \Delta V_{23}^2 \rangle}{j^2}$ uitgezet als functie van de halve puntafstand y .

Hieruit volgt dat $\frac{\Delta V_{23}^2}{j^2} = 4 \cdot 10^{-7}$ en onafhankelijk van de puntafstand.

$$\frac{\Delta f}{f} = 0,1$$

Met behulp van formule (5.3) volgt nu C_T .

$$C_T = 4 \cdot 10^{-6}$$

Dit is in overeenstemming met de reeds eerder gevonden waarden.

6. KONKLUSIE

Wanneer met puntvormige niet-stroomvoerende kontakten 1/f ruis gemeten wordt is het zinvol om deze ruis te normeren op de lokale stroomdichtheid. De 1/f ruis kan dan beschreven worden door middel van een karakteristieke grootheid C_T in de vorm van

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V}{j} \right)^2 \right\rangle = C_T \frac{\Delta f}{f}$$

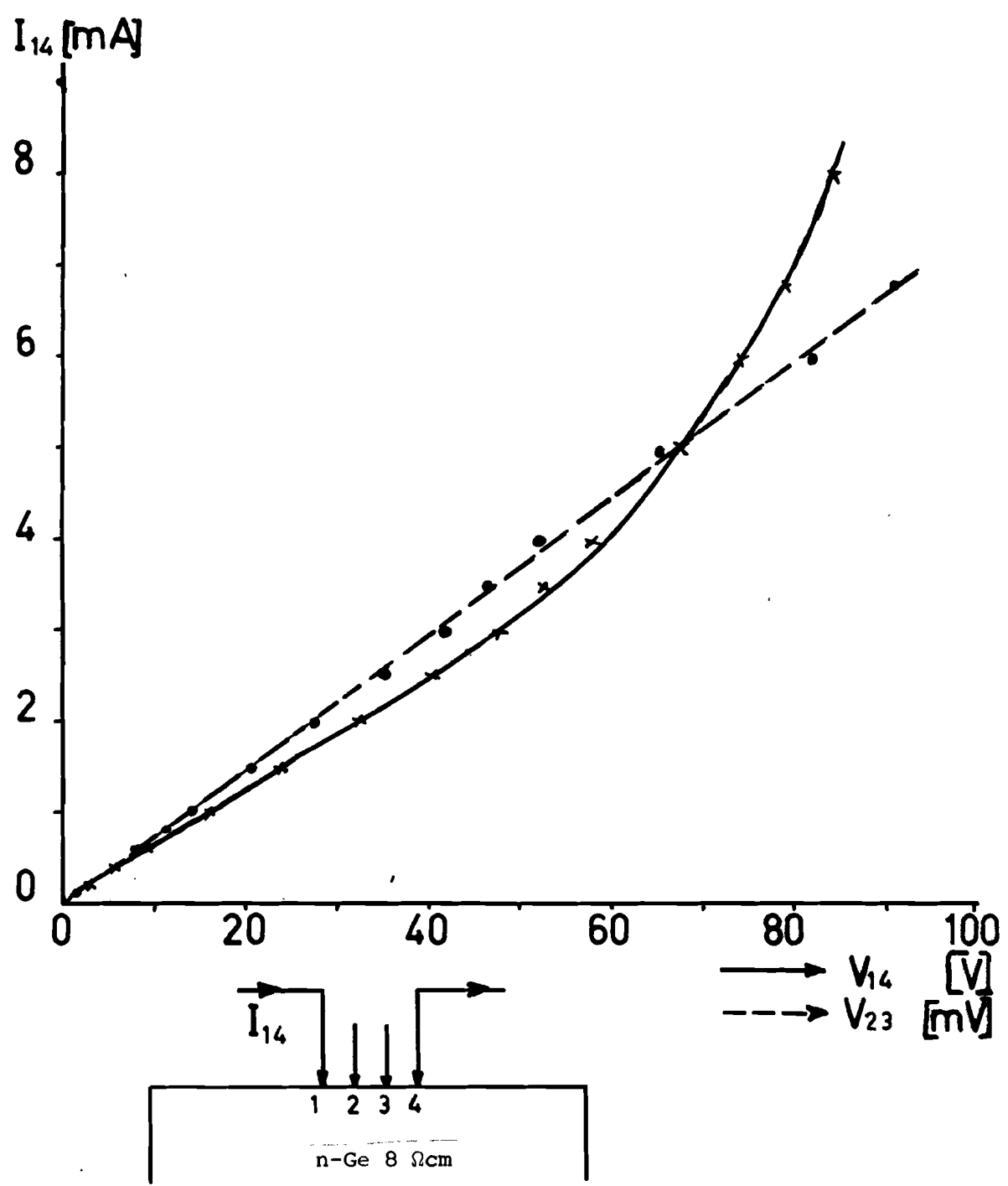
Deze karakteristieke grootheid wordt bepaald door de 1/f ruiseigenschappen van het, in dit geval, als twee dimensionaal beschouwde grafietpapier. Hoe de exacte relatie van C_T met bijvoorbeeld C_1 is werd niet onderzocht.

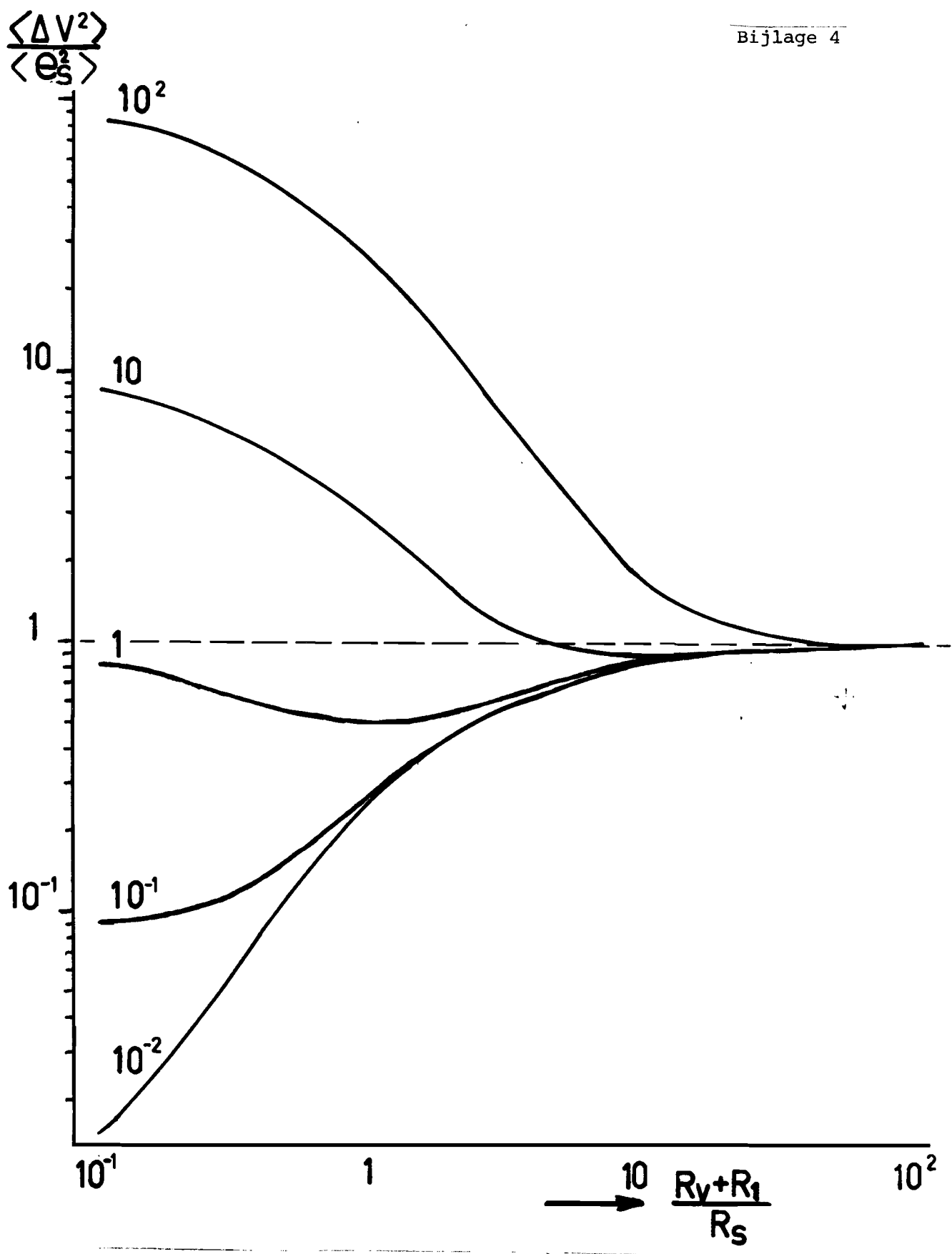
Wanneer blijkt dat de gevonden relatie ook in het drie dimensionale geval toepasbaar is, is het mogelijk om met behulp van de vierpuntsprobe de 1/f ruiseigenschappen van een halfgeleider te bepalen.

Men dient dan echter wel ohmse stroomvoerende kontakten op de halfgeleider aan te brengen.

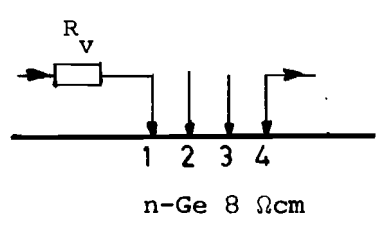
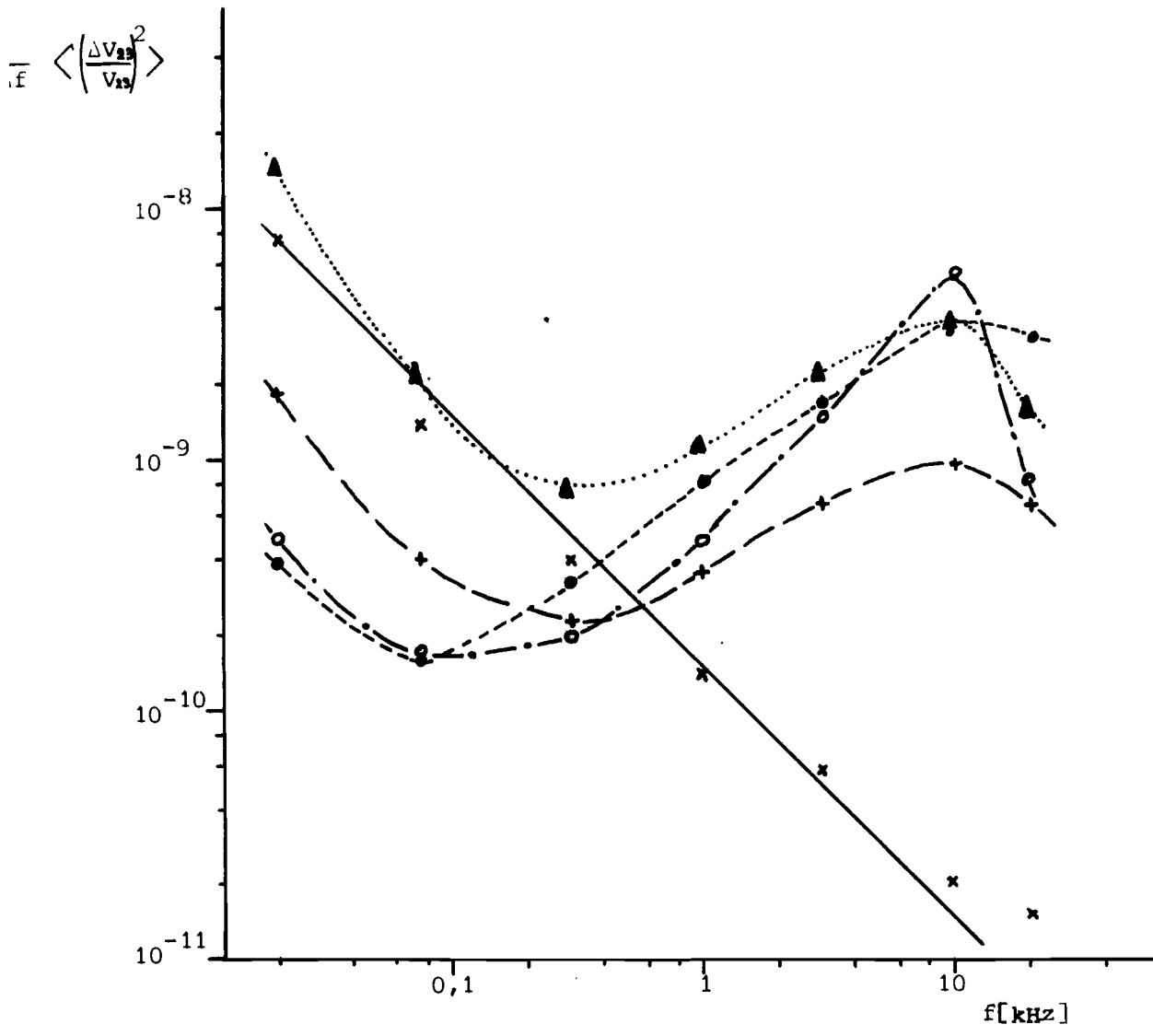
LITTERATUUR

- [1] Helen H. Gegenworth, "Solid state electronics", 1968, Vol. 11, pp. 787-789.
- [2] Lyndon J. Swartzendruber, National Bureau of Standards, Technical Note 199, April 5, 1964.
- [3] F.M. Smits, The Bell System Technical Journal, May 1958, pp. 711-718.
- [4] F.N. Hooge, Physica 60 (1972) pp. 130-144.
- [5] Philips Research Reports

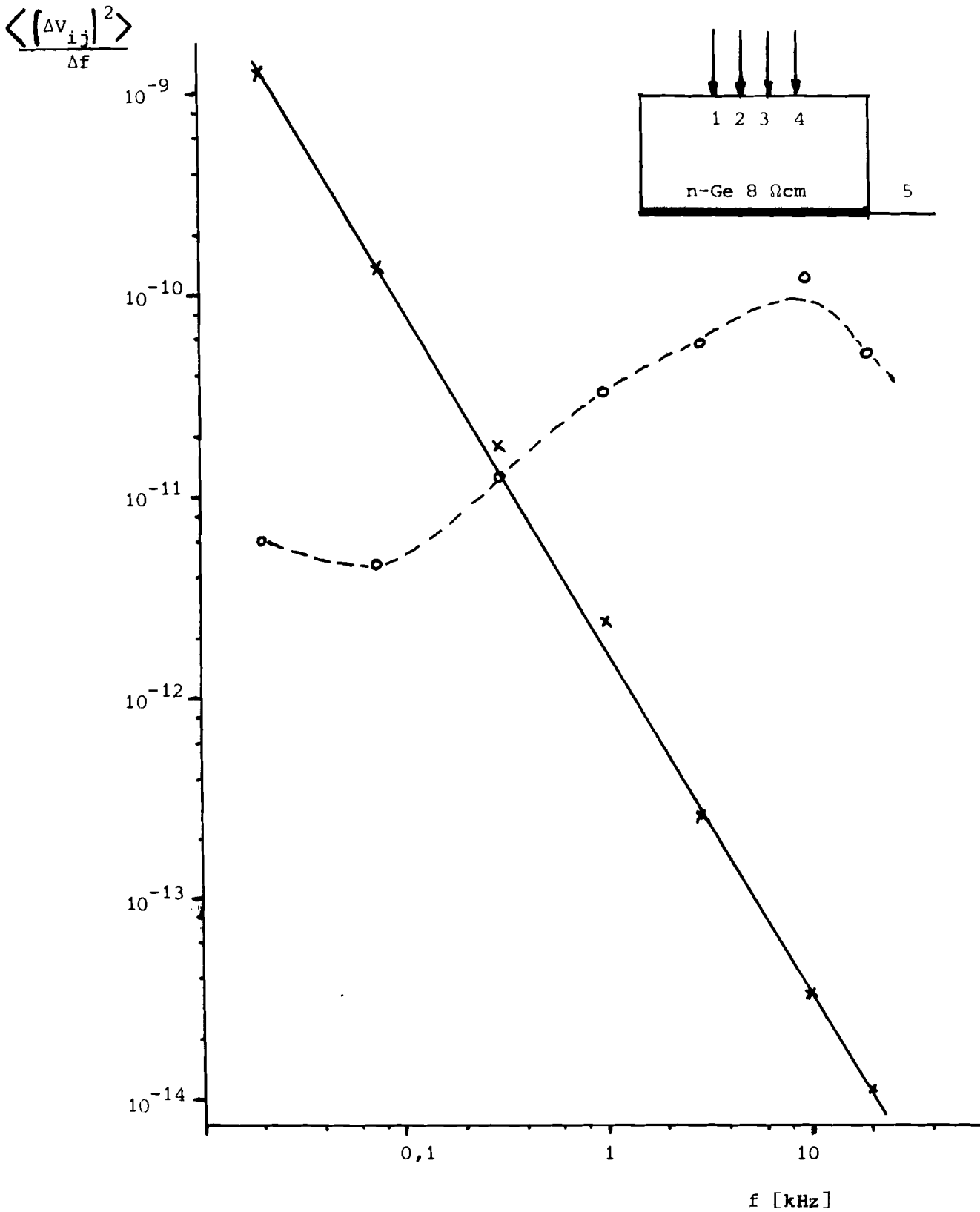




Invloed van de voorschakelweerstand op de gemeten ruis indien vierpunts gemeten wordt en de stroomvoerende contacten niet ruisarm zijn.



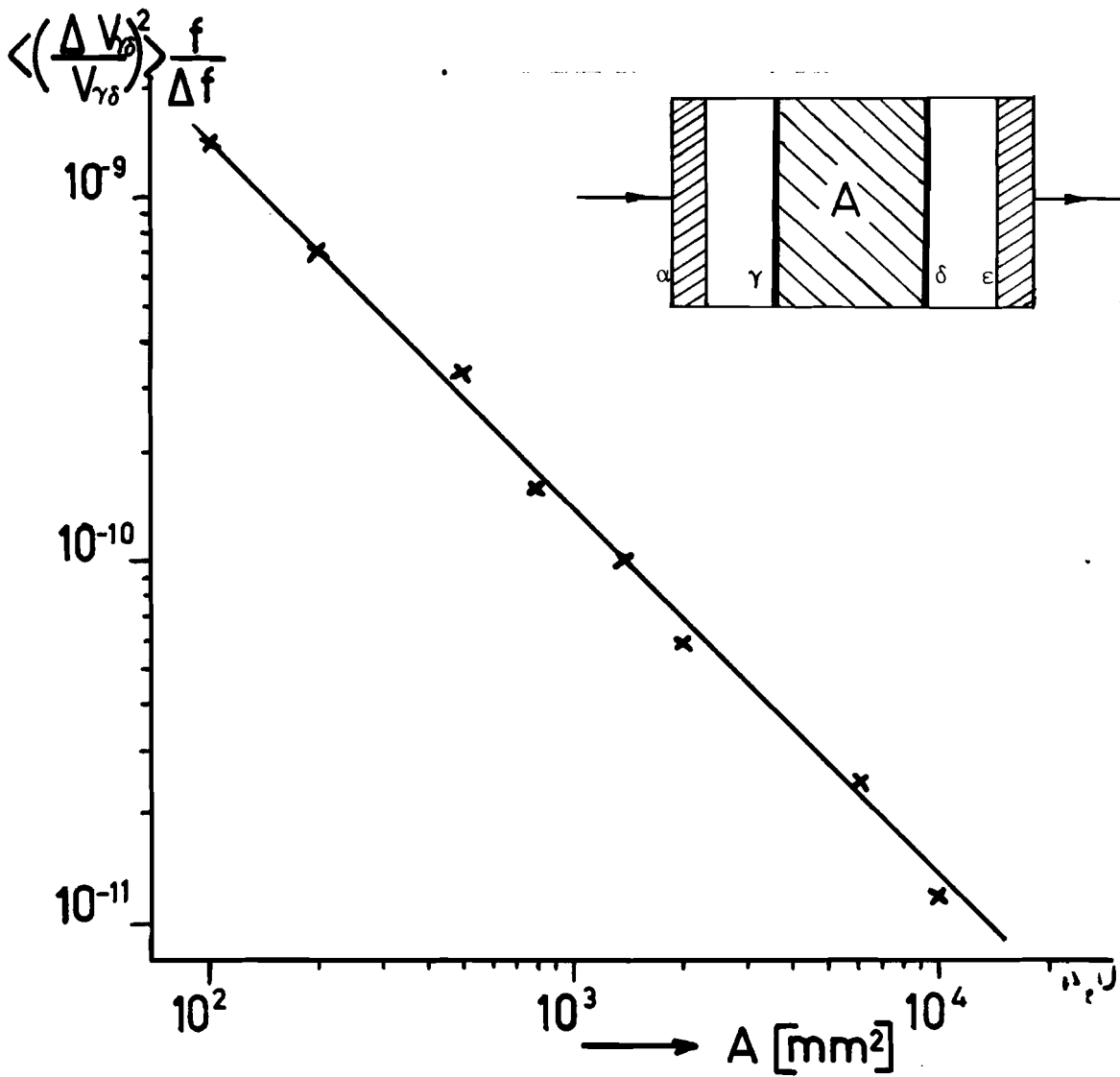
- x $R_V = 0$
- + $R_V = 20 \text{ k}\Omega$
- o $R_V = 100 \text{ k}\Omega$
- $R_V = 250 \text{ k}\Omega$
- ▲ $R_V = 500 \text{ k}\Omega$



$R_V = 330 \text{ k}\Omega$

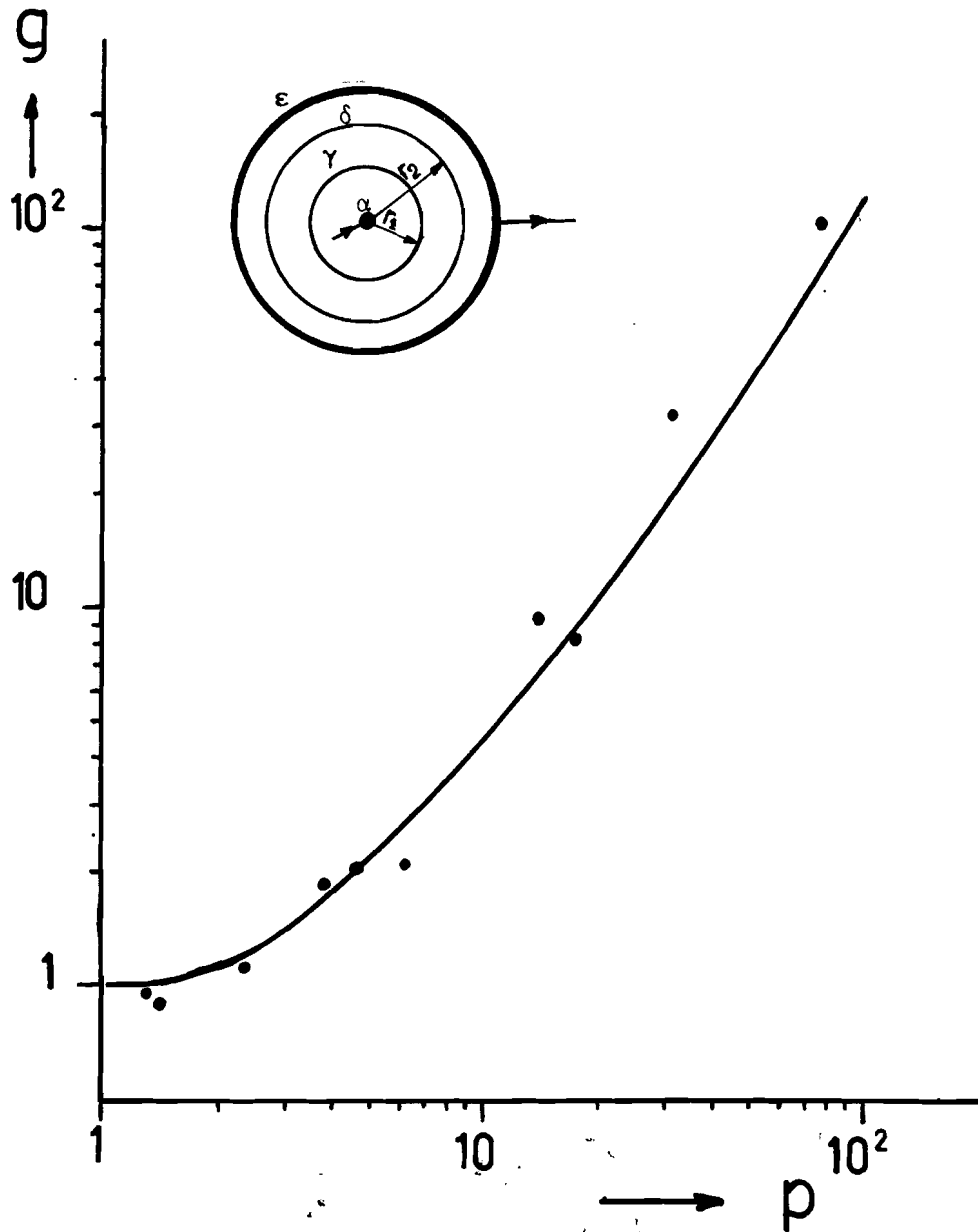
o $\frac{\langle (\Delta V_{23})^2 \rangle}{\Delta f}$ als functie van de frekwentie
Stroom van punt 1 naar punt 4

x $\frac{\langle (\Delta V_{15})^2 \rangle}{\Delta f}$ als functie van de frekwentie
Stroom van punt 1 naar punt 5



Bepaling 1/f ruis eigenschappen van grafietpapier in een homogeen veld gemeten over lijnvormige contacten.

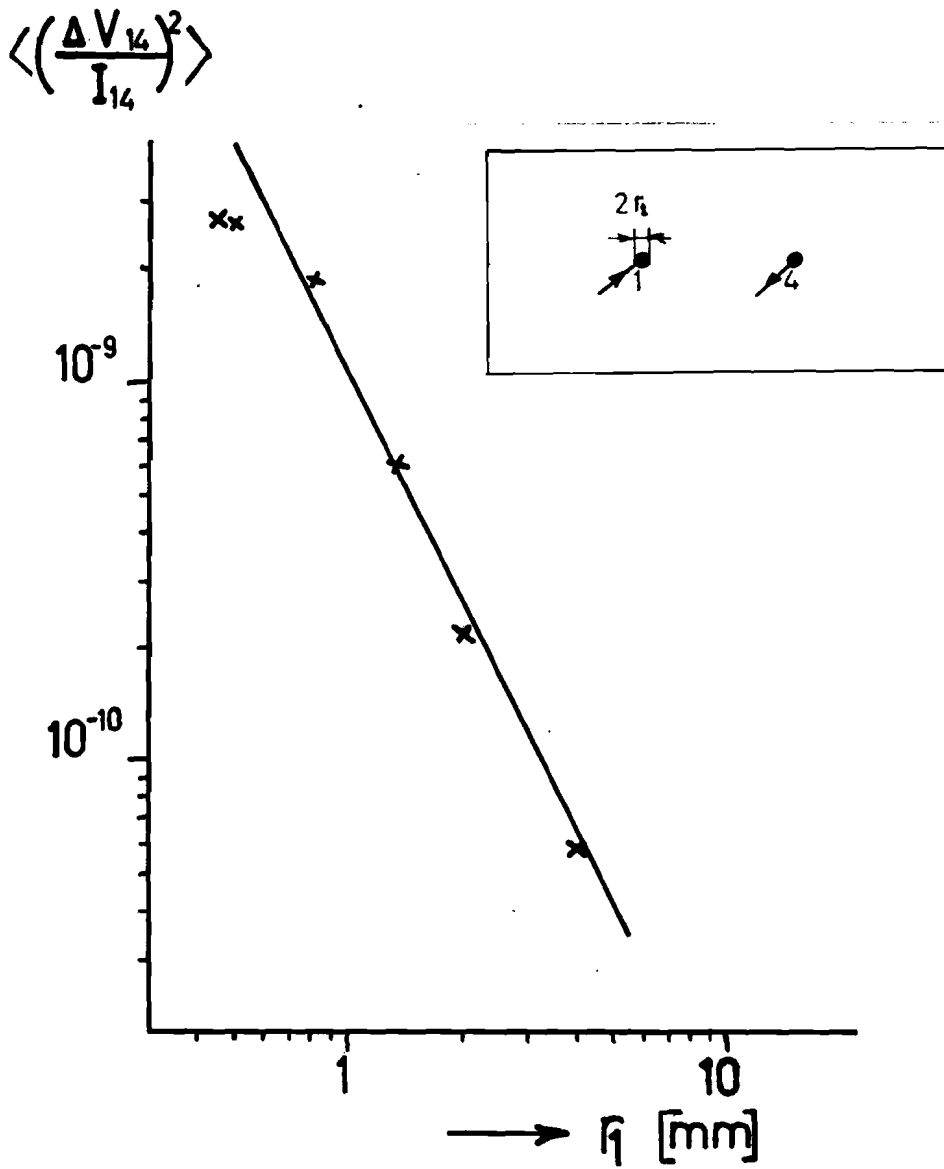
$$\left\langle \left(\frac{\Delta V_{\gamma\delta}}{V_{\gamma\delta}} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{A} \frac{\Delta f}{f} \quad \text{met } C_1 = 1,410^{-7} \text{ mm}^2$$



Beschrijving van de $1/f$ ruis van grafietpapier in een radiaal veld gemeten over cirkelvormige contacten.

$$\left\langle \left(\frac{\Delta v_{\gamma\delta}}{v_{\gamma\delta}} \right)^2 \right\rangle = \frac{C_1}{A} g \frac{\Delta f}{f} \text{ met } g = \left(\frac{p^2 - 1}{2p \ln p} \right)^2$$

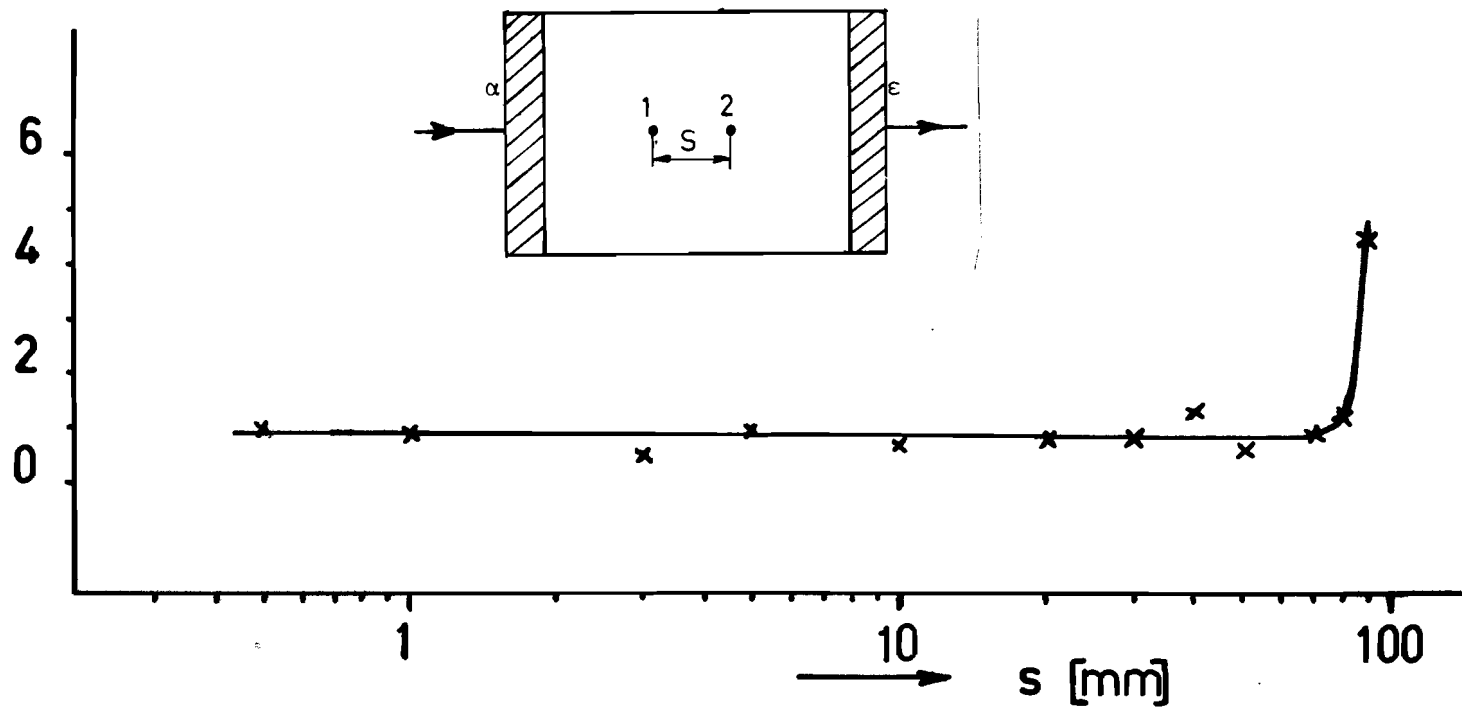
$$p = \frac{r_2}{r_1}$$



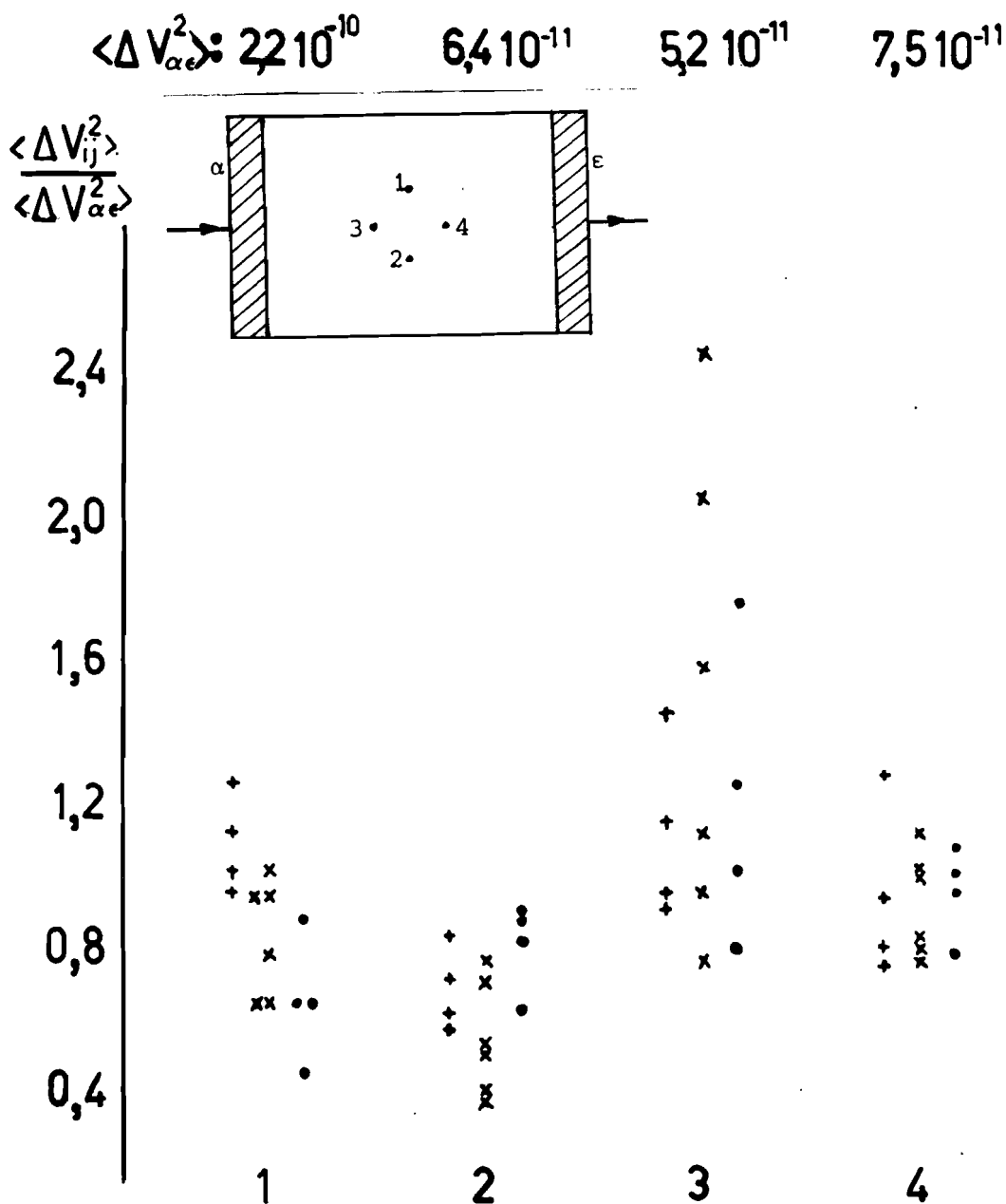
Ruis over de stroomvoerende contacten 1 en 4 als functie van de straal r_1 van deze contacten.

$$\left\langle \left(\frac{\Delta V_{14}}{I_{14}} \right)^2 \right\rangle \sim \frac{1}{r_1^2}$$

$$\frac{\langle \Delta V_{12}^2 \rangle}{\langle \Delta V_{\alpha\epsilon}^2 \rangle}$$



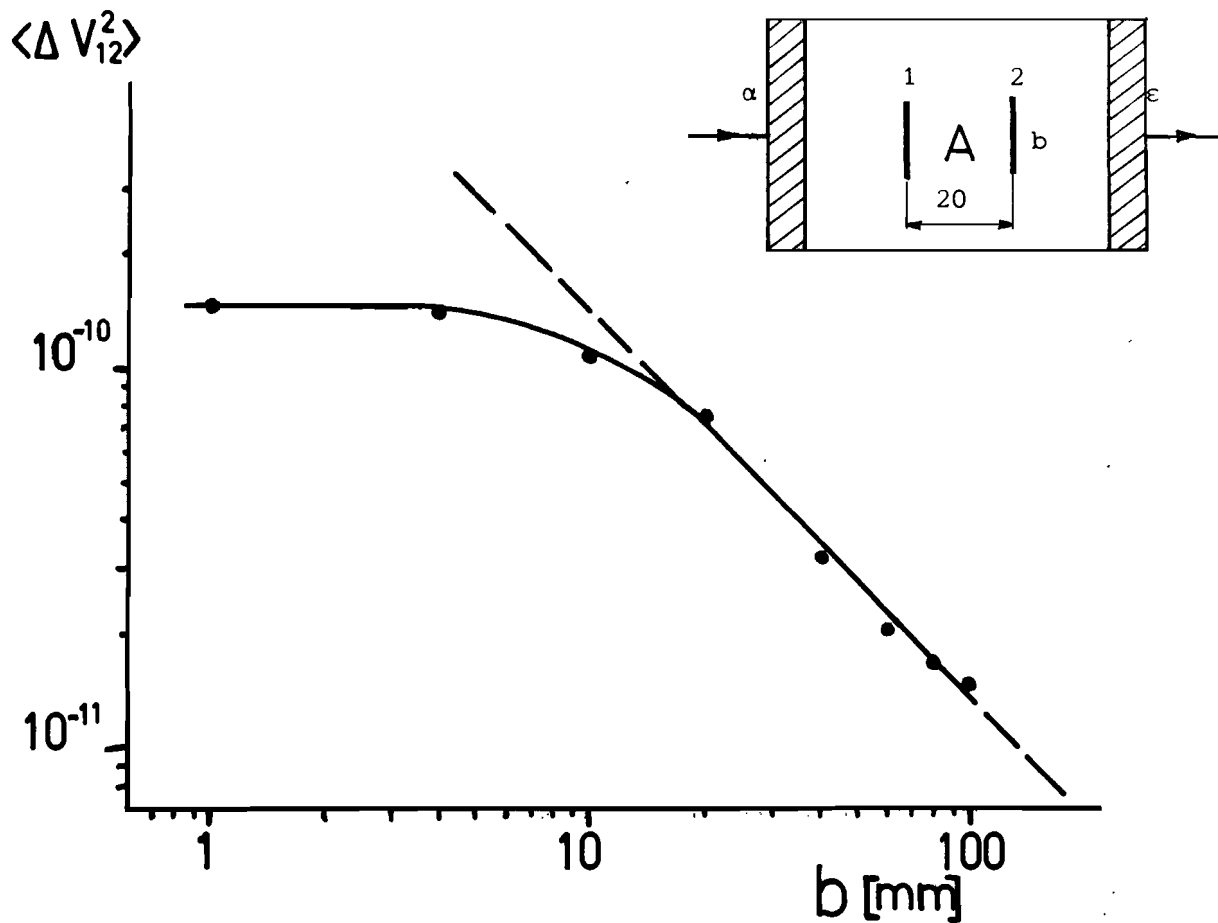
$\frac{\langle (\Delta V_{12})^2 \rangle}{\langle (\Delta V_{\alpha\epsilon})^2 \rangle}$ als functie van de puntafstand s in een homogeen veld.



x $\frac{\langle (\Delta V_{ij})^2 \rangle}{\langle (\Delta V_{\alpha\epsilon})^2 \rangle}$: Relatieve ruis tussen de punten i en j

+ $\frac{\langle (\Delta V_{i\alpha})^2 \rangle}{\langle (\Delta V_{\alpha\epsilon})^2 \rangle}$: Relatieve ruis tussen een punt i en kontakt α

• $\frac{\langle (\Delta V_{i\epsilon})^2 \rangle}{\langle (\Delta V_{\alpha\epsilon})^2 \rangle}$: Relatieve ruis tussen een punt i en kontakt ϵ

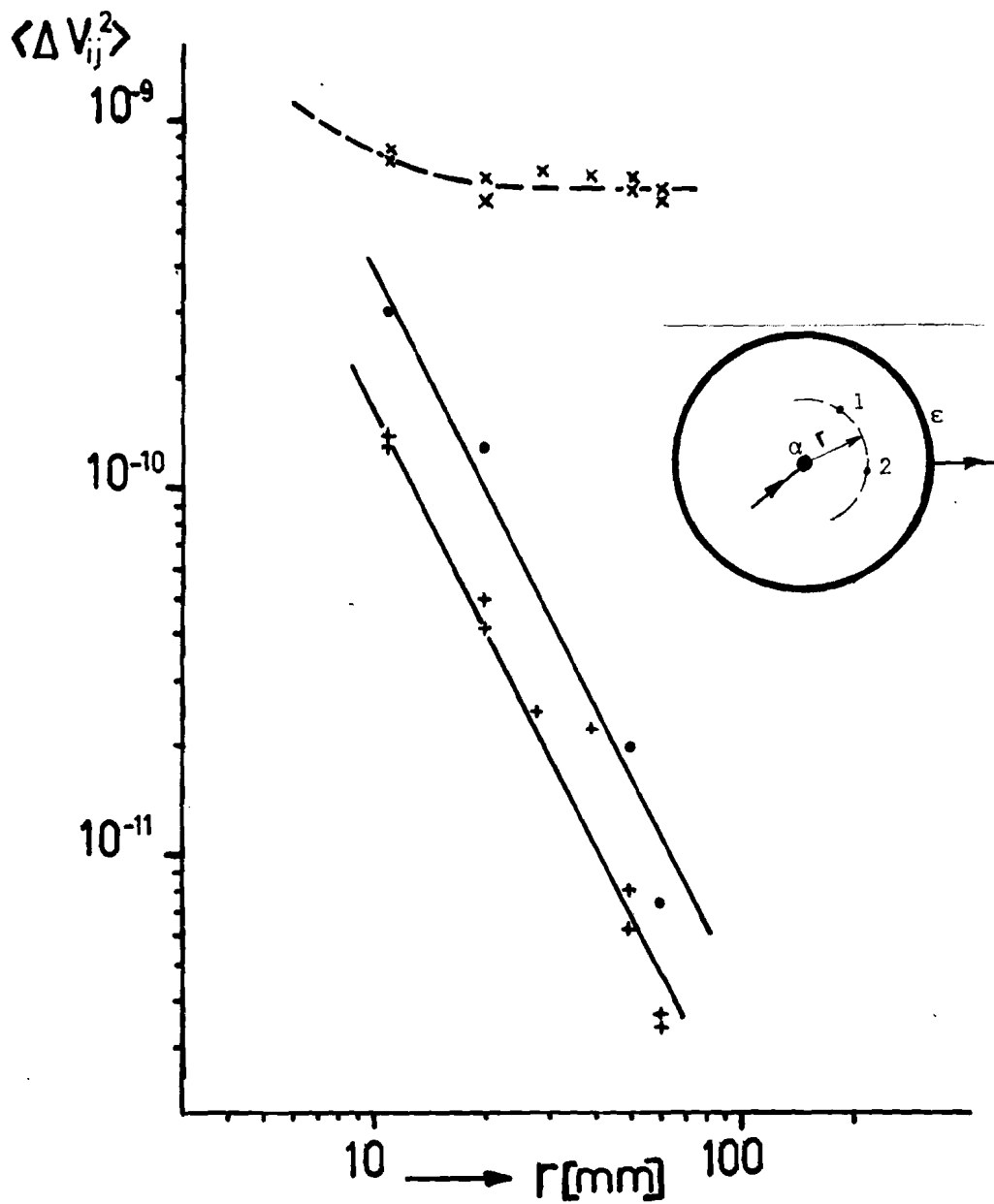


— $\langle (\Delta V_{12})^2 \rangle$ als functie van de contactbreedte b in een homogeen veld

afmetingen 100x100 mm

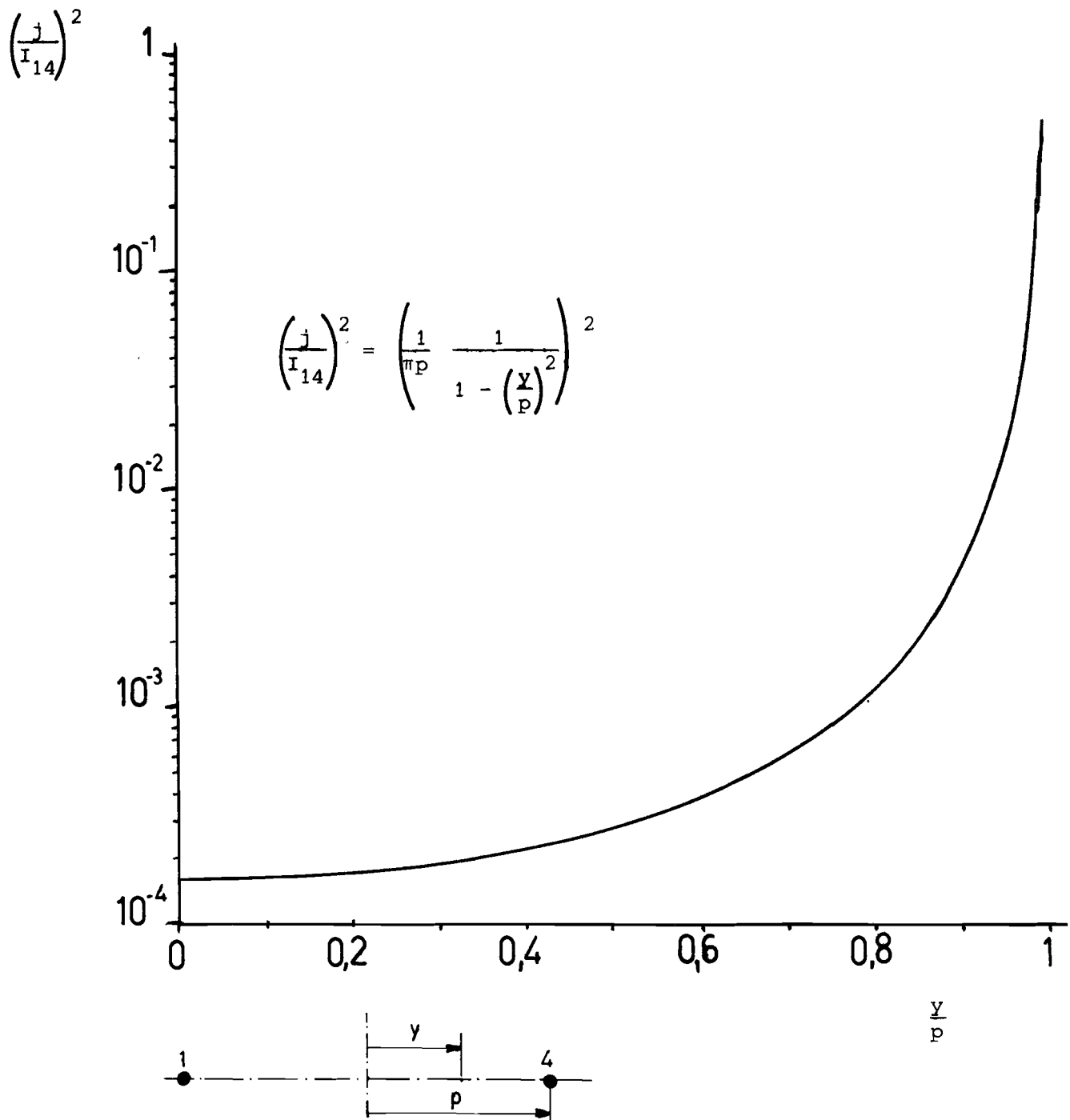
— — — Ruis over de kontakten 1 en 2 wanneer geldt dat

$$\langle (\Delta V_{12})^2 \rangle = v_{12}^2 \frac{C_1}{A} \frac{\Delta f}{f}$$



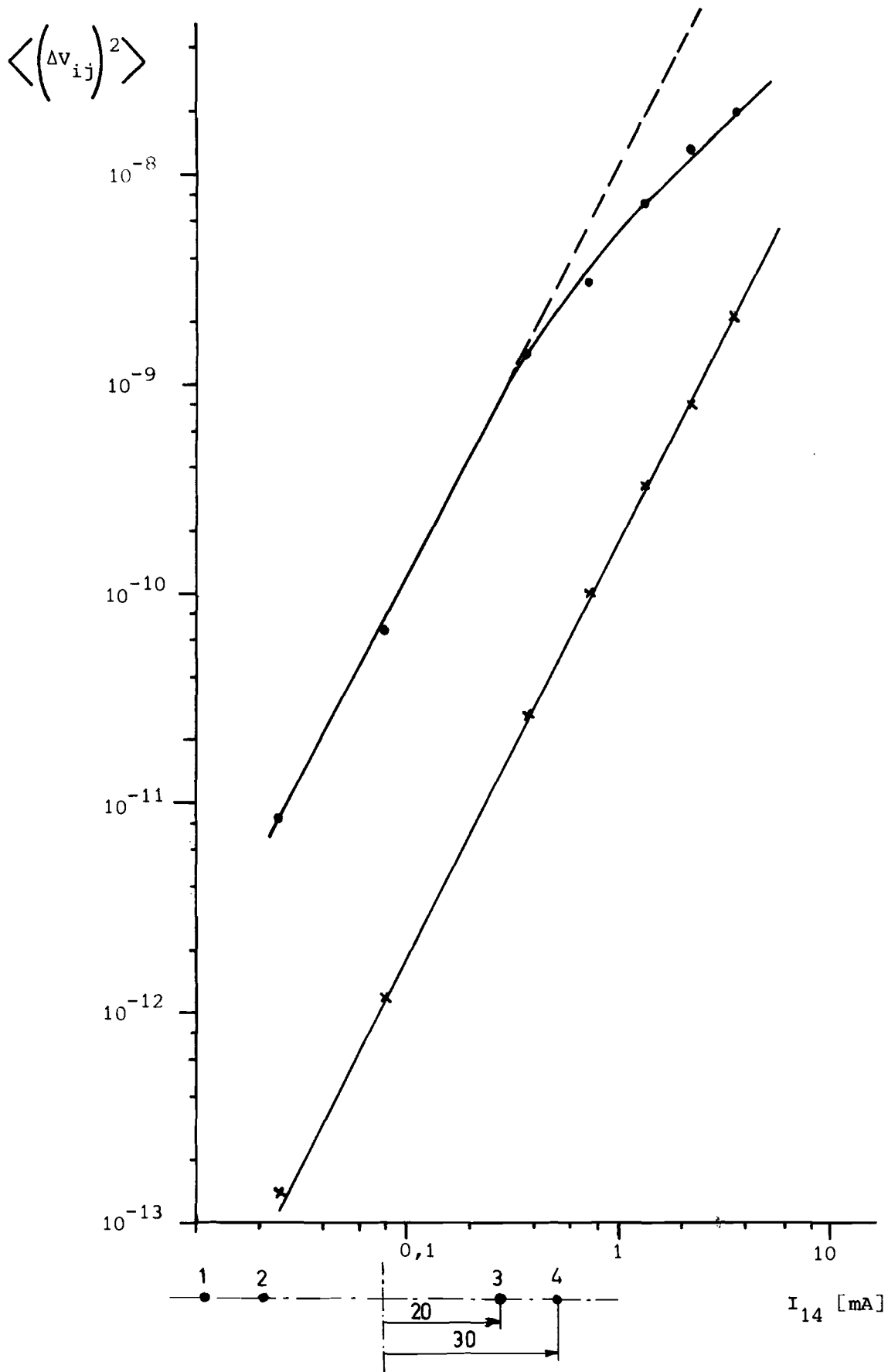
Ruismetingen met puntvormige kontakten in een radiaal veld

- $\langle (\Delta V_{12})^2 \rangle$ als functie van r
- + $\langle (\Delta V_{1\epsilon})^2 \rangle$ als functie van r
- x $\langle (\Delta V_{1\epsilon})^2 \rangle$ als functie van r

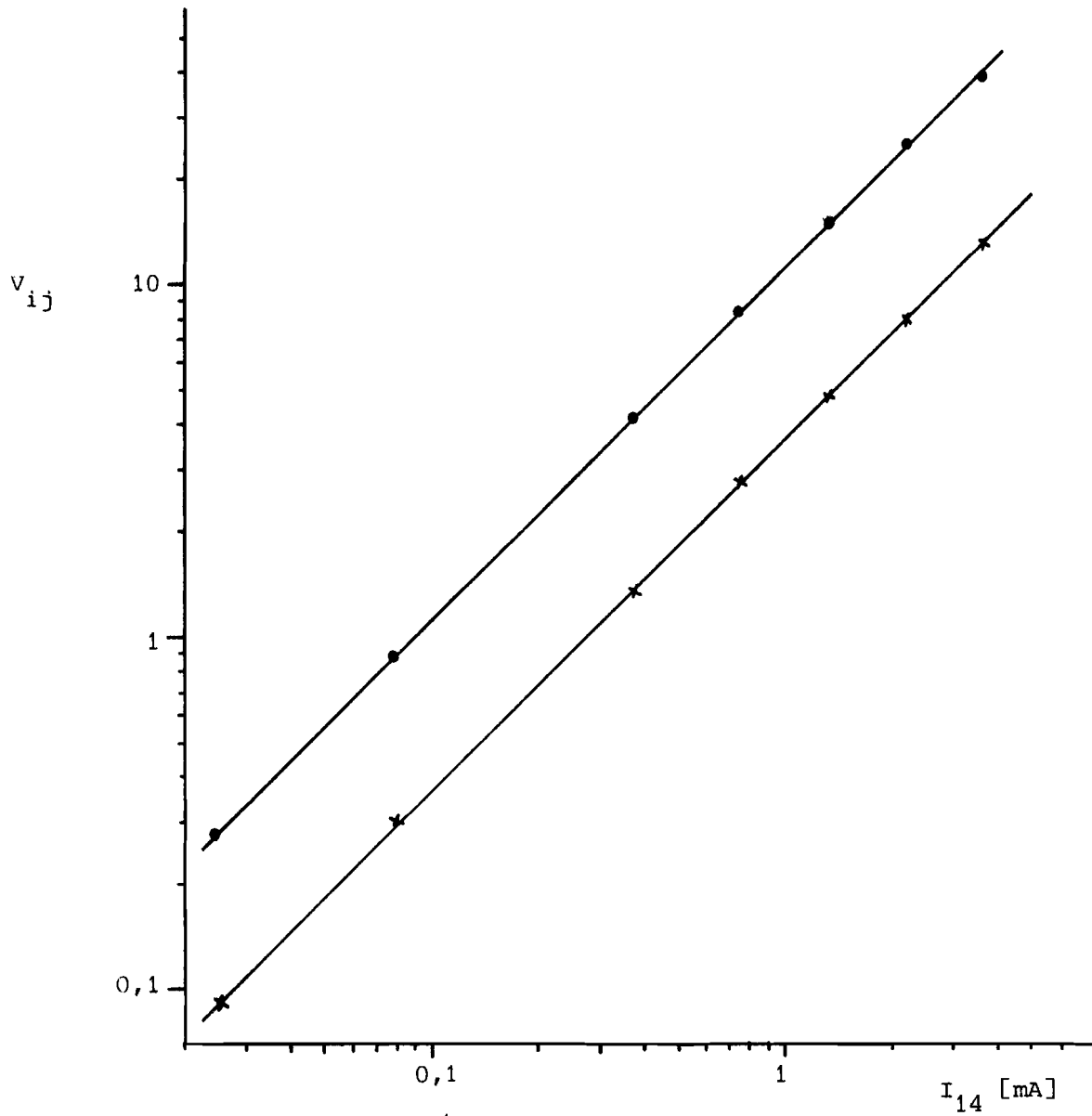


$\left(\frac{j}{I_{14}}\right)^2$ als functie van $\frac{y}{p}$ voor $p = 25$ mm

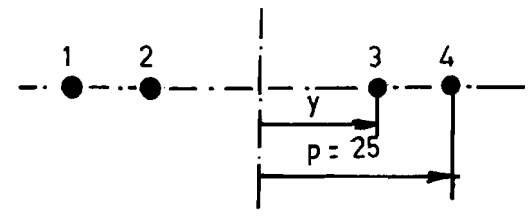
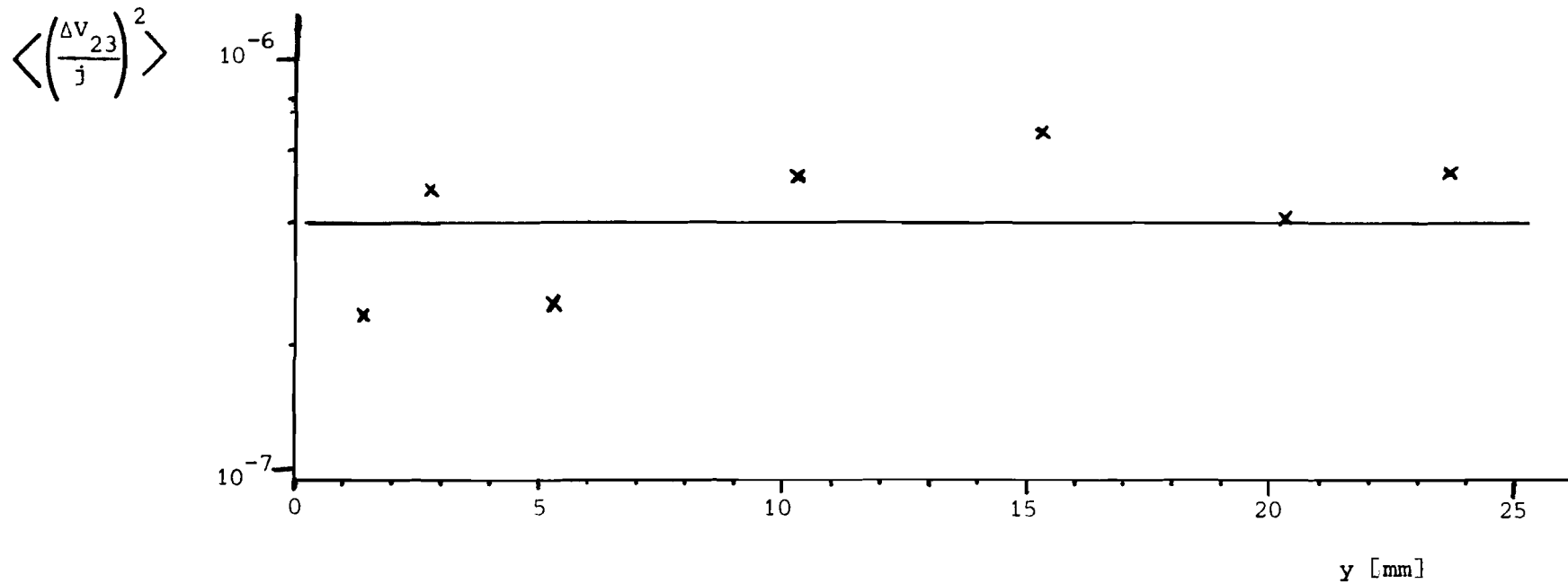
j stroomdichtheid op de verbindingslijn van de punten 1 en 4 in het twee dimensionale geval.



- $\langle (\Delta v_{14})^2 \rangle$ als functie van de stroom door de buitenpunten 1 en 4.
- × $\langle (\Delta v_{23})^2 \rangle$ als functie van de stroom door de buitenpunten 1 en 4.



- V_{14} als functie van de stroom door de buitenpunten 1 en 4.
- x V_{23} als functie van de stroom door de buitenpunten 1 en 4.



De op de lokale stroomdichtheid genormeerde ruis over de meetpunten 2 en 3 als functie van de halve puntafstand y van deze punten.

Stroomvoerende punten 1 en 4 bevinden zich op een afstand van $2p = 50$ mm.