

O 79-04

ET METEN VAN EEN ELEKTRISCH VELD

r. H. Jansen en ing. R.M. Aalten

To 79-04

RIJKSINSTITUUT VOOR VISSERIJONDERZOEK

Haringkade 1 — Postbus 68 — IJmuiden — Tel. (02550) 1 91 31

Afdeling: Technisch Onderzoek

Rapport: TO 79-04
HET METEN VAN EEN ELEKTRISCH VELD

Auteur: ir. H. Jansen en ing. R.M. Aalten

Project: 7-7035

Projectleider: ir. H. Jansen

Datum van verschijnen: juni 1979

Inhoud: Summary

- I Inleiding
- II Het bepalen van de veldsterkte
- III Schematische voorstelling van de meetopstelling
- IV Het meten van de differentiespanning
- V Meten met een meetinrichting met differentie-
ingang
- VI Meetprocedure en controle op fouten

DIT RAPPORT MAG NIET GECITEERD WORDEN ZONDER TOESTEMMING VAN DE
DIRECTEUR VAN HET R.I.V.O.

5892622

SUMMARY

In measuring electric fields in a medium one can easily make faults because of high common-mode signals.

Figure 2 shows the electric diagram according which measuring is taken place.

Measuring according figures 3, 4, 6, 7 and 8 can lead to different results.

Table I gives the inaccuracy in %.

Measuring according figure 8 with an extra probe contact mid-between the two contacts is the most accurate method.

I. INLEIDING

Voor allerlei doeleinden, b.v. bij het bestuderen van reacties van vis in een elektrisch veld, kan het nodig zijn de elektrische veldsterkte te weten. Bij het bepalen van deze veldsterkte is gebleken dat er gemakkelijk fouten gemaakt kunnen worden.

In dit rapport worden de achtergronden van deze fouten belicht en wordt een methode aangegeven om een elektrisch veld nauwkeurig te bepalen.

II HET BEPALEN VAN DE VELDSTERKTE

Een elektrisch veld kan eenvoudig bepaald worden door het spanningsverschil tussen twee punten te meten. Men vindt dan de gemiddelde veldsterkte in het gebied tussen deze twee punten door dit spanningsverschil te delen door de afstand tussen deze punten.

Als de sterkte van het elektrische veld anders dan blok- of sinusvormig van de tijd afhangt, zal het alleen met behulp van een oscilloscoop gemeten kunnen worden.

Het spanningsverschil zou men kunnen bepalen door met behulp van één probekontakt achtereenvolgens de spanning in de twee punten te meten en dan deze spanningen van elkaar af te trekken.

Het verschil is over het algemeen erg klein ten opzichte van de absolute spanning, soms zelfs kleiner dan de afleesnauwkeurigheid.

Ook is de afstand tussen beide meetplaatsen moeilijk nauwkeurig te bepalen. Men zal dus met behulp van twee probekontakten het spanningsverschil direkt moeten meten.

Hierbij kan het common-mode signaal (de absolute spanning) een grote fout in de te meten waarde introduceren.

III SCHEMATISCHE VOORSTELLING VAN DE MEETOPSTELLING

Stel dat twee punten A en B respektievelijk een spanning U_A en U_B ten opzichte van aarde hebben.

Het verschil

$$U_d = U_B - U_A \quad (1)$$

is een maat voor de gemiddelde veldsterkte tussen A en B en moet derhalve nauwkeurig gemeten worden.

Het common-mode signaal

$$U_c = \frac{U_A + U_B}{2} \quad (2)$$

mag zijn invloed niet laten gelden bij het meten van U_d .

De spanningen in de punten A en B worden gemeten met behulp van een probe: bolvormige uiteinden aan geïsoleerde geleiders die op een vaste afstand van elkaar contact maken met het medium. Alle kontakten, zoals elektrodes en probekontakten, hebben een weerstand ten opzichte van hun omgeving en van elkaar.

Om een inzicht te krijgen in de grootte van die weerstanden wordt er om ieder kontakt (straal r_0) een bol gekonstrueerd met een straal r_1 , zodanig dat de bollen elkaar niet snijden en de kleinste $\frac{r_1}{r_0}$ zo groot mogelijk is (figuur 1).

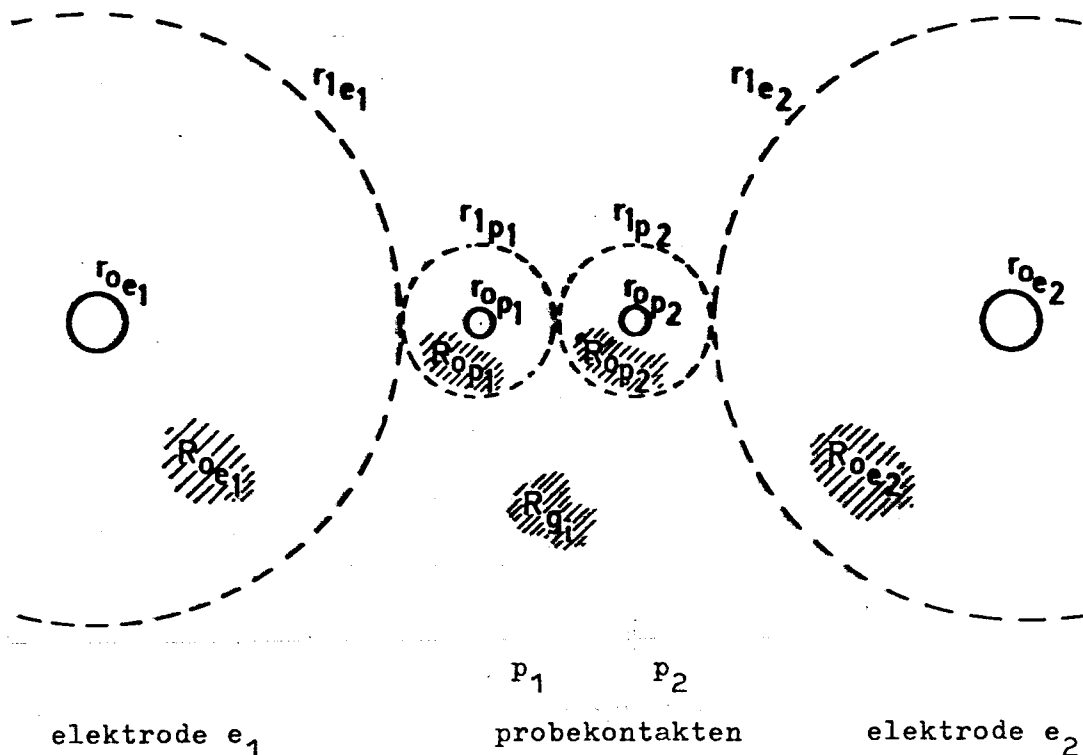


Fig. 1 Elektrodes en probekontakten.

Een weerstand kan nu opgesplitst worden in een deel R_o tussen het kontakt en zijn bol, de "eigen weerstand", met

$$R_o = \frac{\rho}{4\pi} \left\{ \frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_1} \right\}$$

waarin ρ de soortelijke weerstand van het medium is, en een geometrieafhankelijk deel R_g tussen de bollen onderling. Over het algemeen is de werkzame radius r_o van de kontakten veel kleiner dan de afstand tussen de kontakten, zodat ook algemeen geldt:

$$r_o \ll r_1 \quad (4a)$$

Hierdoor wordt

$$R_o \gg R_g \quad (4b)$$

en

$$R_o = \frac{\rho}{4\pi r_o} \quad (5)$$

Omdat de elektrodes veel groter zijn dan de probekontakten is

$$R_{oe} \ll R_{op} \quad (4c)$$

Met behulp van figuur 1 is een elektrisch netwerk op te stellen (figuur 2), waarmee men bij het meten van een elektrisch veld te maken heeft.

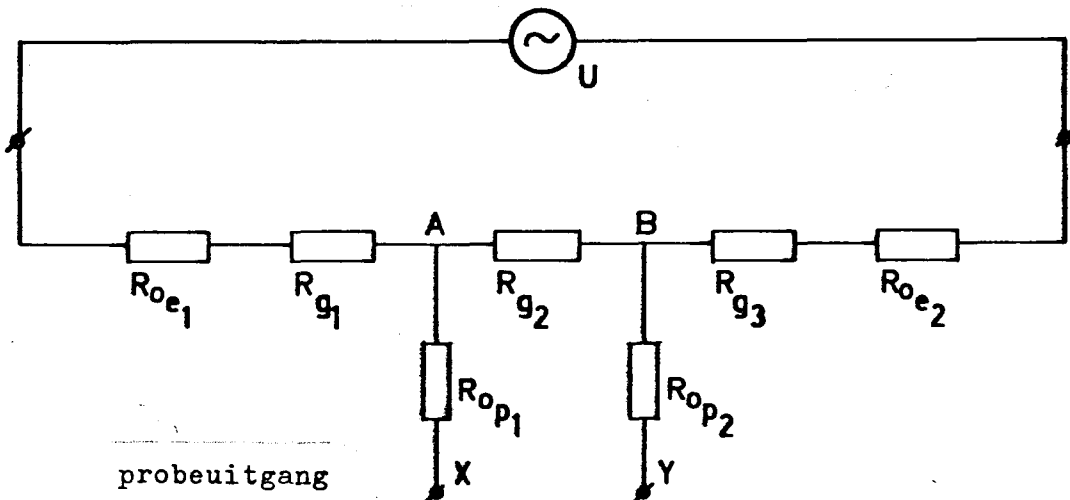


Fig. 2 Elektrisch netwerk waarmee men bij het meten van een elektrisch veld te maken heeft.

Als gevolg van de eigenschappen (4) liggen de differentiespanning bepalende U_A en U_B vast, onafhankelijk van de manier waarop X en Y belast worden.

IV HET METEN VAN DE DIFFERENTIESPANNING

De spanningen U_A en U_B worden via de weerstanden R_{op1} en R_{op2} aangeboden op de punten X en Y.

Omdat de probekontakten gelijk zijn, is $R_{op1} = R_{op2}$, gemakshalve R_p genoemd.

De spanning wordt gemeten met een meetinrichting. Hiervoor kunnen meerdere apparaten dienst doen, zoals b.v. een differentieversterker en een oscilloscoop.

De ingangsimpedantie van de meetinrichting, R_i , wordt veel groter dan de "eigen weerstand" van het probekontakt verondersteld,

$$R_i \gg R_p \quad (6)$$

Voor het meten van U_d zijn verschillende methoden denkbaar. De figuren 3, 4, 6 en 7 geven methoden weer waarbij een meetfout optreedt. Deze diverse methoden worden achtereenvolgens besproken. Daarna komt de meest nauwkeurige methode aan de orde, weergegeven in figuur 8.

Bij het meten van U_d met behulp van een meetinrichting met één ingangskanaal (b.v. een één-kanaals oscilloscoop) waarbij de meetinrichting aan aarde ligt (figuur 3), wordt één van de probe-uitgangen aan aarde gelegd.

Met behulp van figuur 2 is in te zien dat op deze manier U_A gemeten wordt in plaats van $U_B - U_A$.

Ook als de meetinrichting niet direkt met aarde verbonden is, zal het toch nog een capacitieve verbinding met aarde hebben.

Voor deze parasitaire capaciteit C_{ma} is vooral de voedings-transformator verantwoordelijk. Is de meetinrichting batterijgevoed, dan is C_{ma} aanmerkelijk kleiner.

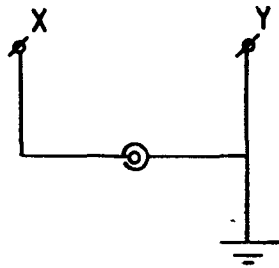


Fig. 3 Met een één-kanaals meetinrichting wordt U_A gemeten i.p.v. $U_B - U_A$.

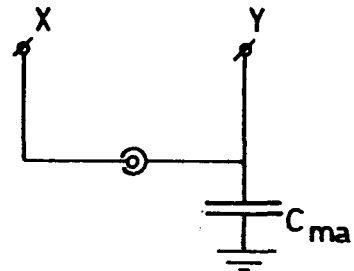


Fig. 4 Een "zwevende" meetinrichting heeft een capacatieve verbinding met aarde.

Wordt de schakeling van figuur 4 gekoppeld aan die van figuur 2 dan wordt bij een sinusvormig signaal

$$U_y = U_B \cdot \frac{1/j\omega C_{ma}}{1/j\omega C_{ma} + R_p} \quad (7)$$

De relatieve fout in U_d is

$$f_{u_d} = \frac{U_B - U_A - (U_y - U_x)}{U_d} \quad (8)$$

Met (7) en $U_x = U_A$ wegens (6) wordt dit

$$f_{u_d} = \frac{R_p}{1/j\omega C_{ma} + R_p} \cdot \frac{U_B}{U_d} \quad (9)$$

Is de verhouding common-mode signaal/differentiesignaal

$$\frac{U_c}{U_d} = \alpha, \quad (10)$$

dan is met behulp van (1) en (2) af te leiden dat

$$\frac{U_B}{U_d} = \alpha + \frac{1}{2} \quad (11)$$

Substitueren we ook nog voor R_p (5), dan wordt (9) met $\omega = 2\pi f$

$$f_{u_d} = \frac{\alpha + 1/2}{1 + jfC_{ma} \frac{\rho}{d}} \quad (12)$$

waar d de diameter van het probekontakt en ρ de soortelijke weerstand van het medium voorstelt.

Voor sinusvormige velden van 50 Hz in een reële situatie met

$$d = 3 \text{ mm}, \quad C_{ma} = 6 \text{ nF}, \quad \alpha = 100, \quad (13)$$

$$\rho = 20 \text{ } \Omega \text{ m (leidingwater),}$$

is de afwijking in de absolute waarde U_d

$$f_{u_d} = 0,2 = 20\%.$$

De fout wordt evenredig met de frequentie groter.

Als de hogere frequentiecomponenten slechts gedurende een korte tijd voorkomen is de fout slechts gedurende die korte tijd aanwezig. Bij een snelle veldsterkteverandering, zoals die optreedt bij condensatorontladingen en aangesneden sinussen, is de volledige sprongverandering als common-mode signaal zichtbaar, echter gedurende een responsietijd

$$\tau_c = R_p C_{ma} \quad (14)$$

Is deze tijd veel korter dan de RC-tijd τ_d van het te beschouwen signaal, dan zal de fout óf onzichtbaar óf in de vorm van een naald zichtbaar zijn. De te meten waarde kan dan toch nog goed bepaald worden.

Figuur 5 laat zien hoe de fout afhangt van de verhouding τ_c / τ_d bij $\alpha = 10$.

Indien de meetinrichting batterijgevoed is wordt τ_c minder wegens een kleinere C_{ma} (ca. 6 pF).

Doordat het common-mode signaal α maal zo groot is als dat waarop de meetinrichting is ingesteld, zal de ingangsversterker gedurende een korte tijd τ_c overstuurd worden.

Dit kan tot beschadigingen leiden als de grenzen van de absoluut toelaatbare maxima overschreden worden.

Het zich herstellen uit de oversturing kan langer dan τ_c duren.

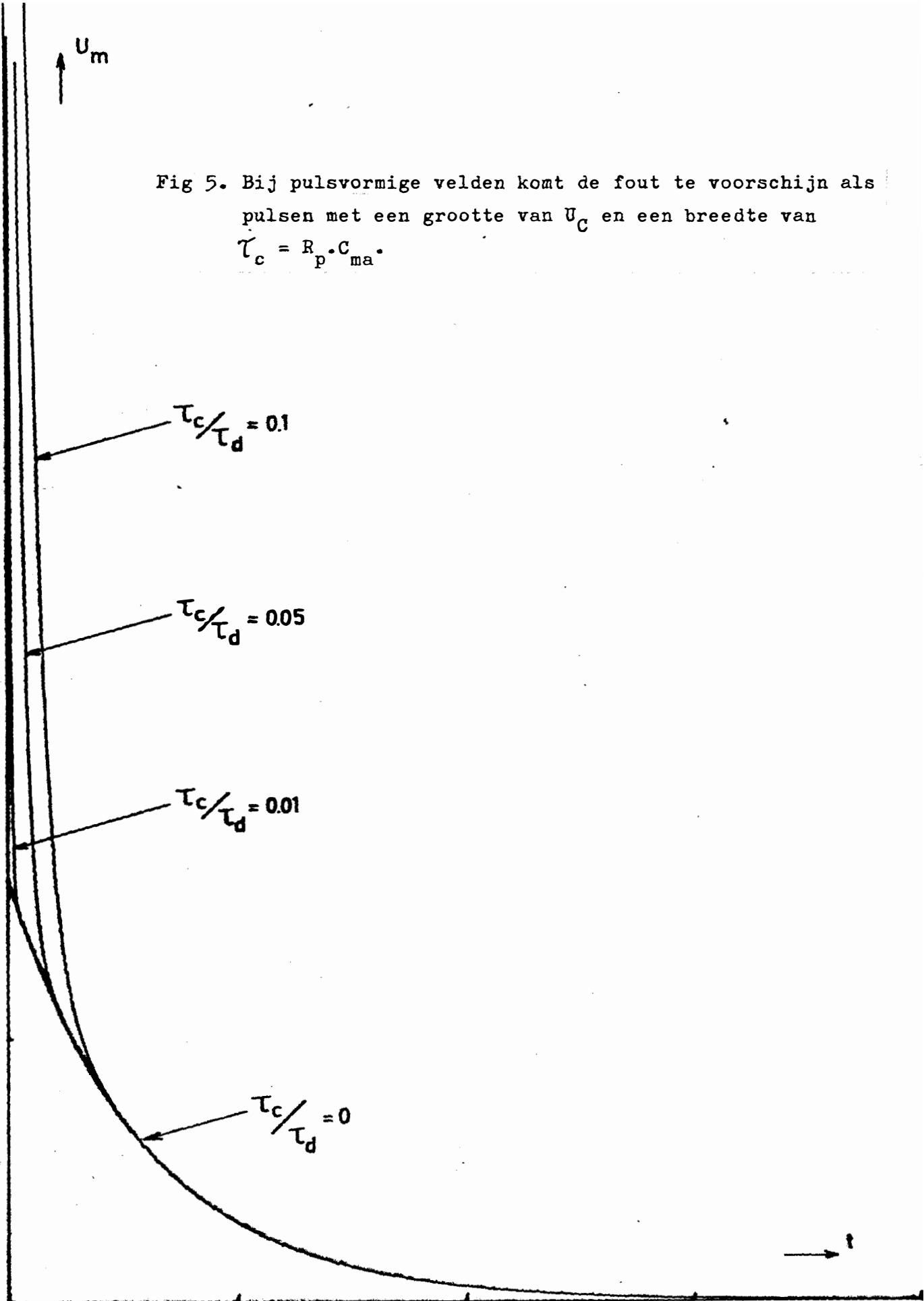


Fig 5. Bij pulsvormige velden komt de fout te voorschijn als pulsen met een grootte van U_c en een breedte van $\tau_c = R_p \cdot C_{ma}$.

V. METEN MET EEN MEETINRICHTING MET DIFFERENTIEINGANG

Het meten van een elektrisch veld met een meetinrichting met één ingang geeft dus in veel gevallen aanleiding tot fouten.

Deze fouten worden verminderd door te meten met een meetinrichting met differentie-ingang.

Als de ingangsimpedantie van de meetinrichting $R_i \gg R_p$ is, dan worden op X en Y de juiste spanningen U_A en U_B aangeboden.

De fouten die nu nog optreden zijn een gevolg van de niet-ideale kwaliteiten van de meetinrichting, veroorzaakt door een te lage common-mode rejection ratio CMRR of door een niet meer lineair werken van de differentieversterker wegens een te hoog common-mode signaal.

De waarde U_m die een geaarde meetinrichting aangeeft (figuur 6) is

$$U_m = \beta \left\{ U_d + \frac{U_c}{\text{CMRR}} \right\} \quad (14)$$

waarin β de versterkingsfaktor is.

Is de versterker niet overstuurd door een te hoog common-mode signaal (β is nog juist), dan is de relatieve fout in U_d

$$f_{u_d} = \frac{\beta U_d - \beta \left\{ U_d + \frac{U_c}{\text{CMRR}} \right\}}{\beta U_d} \quad (15)$$

Met (10) wordt dit

$$f_{u_d} = - \frac{\alpha}{\text{CMRR}} \quad (16)$$

Een normale oscilloscoop (b.v. Tektronix 464) heeft een CMRR van ongeveer 10 en voor een lineaire werking moet $\alpha \leq 10$.

De meetmethode van figuur 6 met alleen een oscilloscoop is in de meeste gevallen niet bruikbaar.

Deze methode is wel bruikbaar als er een aparte differentieversterker voorgeschakeld wordt, die een voldoende hoge CMRR heeft en bij deze common-mode signalen nog lineair blijft werken.

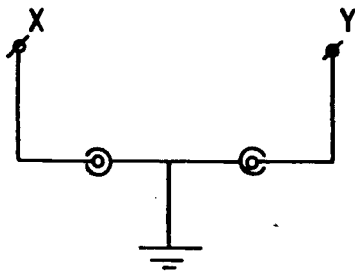


Fig. 6 Bij meten met een oscilloscoop met differentie-ingangen kan de fout nog groot zijn i.v.m. een te lage CMRR.

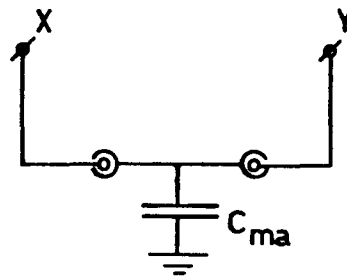


Fig. 7 Het zonder meer laten zweven van de oscilloscoop heeft onvoldoende effect.

Beschikt men niet over zo'n differentieversterker dan kan een andere oplossing gevonden worden in het verkleinen van U_c . Het laten zweven van de meetinrichting (figuur 7) kan onvoldoende effect hebben, omdat de parasitaire capaciteit C_{ma} het nu gemakkelijker van de beide hogereingangsimpedanties R_i wint. Op deze manier is de fout

$$f_{u_d} = - \frac{\alpha}{\text{CMRR}} \cdot \frac{1/2 R_i + \frac{\rho}{2\pi d}}{1/j\omega C_{ma} + 1/2 R_i + \frac{\rho}{2\pi d}} \quad (17)$$

De meest nauwkeurige meting, als men alleen beschikt over een oscilloscoop als meetinrichting, is door het chassis van de meetinrichting aan U_c te leggen. Dit kan gedaan worden met behulp van een extra probekontakt E (figuur 8) in het midden van A en B. f_{u_d} wordt nu als (17), echter met $R_i = 0$:

$$f_{u_d} = - \frac{\alpha}{\text{CMRR}} \cdot \frac{1}{1/jfC_{ma} \frac{\rho}{d_e} + 1} \quad (18)$$

waarin d_e de diameter van het extra probekontakt.

Dit is een faktor CMRR beter dan bij meting met een zwevende één-kanaals meetinrichting (zie (12)).

Bij snelle veldveranderingen komen hier precies dezelfde problemen naar voren als genoemd bij de één-kanaals meetinrichting.

Het verschil is alleen dat de fout een faktor CMRR minder zichtbaar wordt.

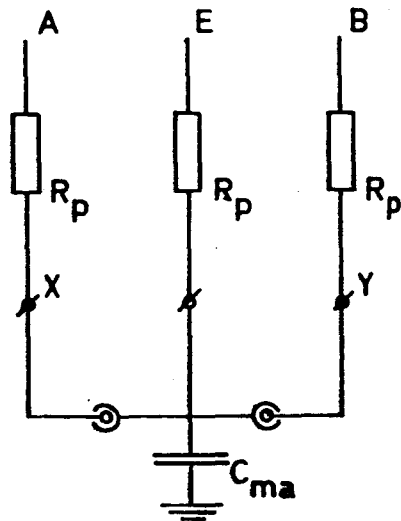


Fig. 8 Meten met een oscilloscoop met het chassis verbonden met een extra probekontakt midden tussen de beide andere probekontakten leidt tot minimale fouten.

In tabel I worden de fouten van de verschillende meetmethoden met elkaar vergeleken. Daarbij wordt uitgegaan van:

$$d = 3 \text{ mm}$$

$$\alpha = 100$$

$$\rho = 20 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$R_1 = 1 \text{ M}\Omega$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

TABEL I

Figuur	C_{ma}	aantal kanalen meetnr.	fout in %
3	geen	1	10000
4	6 nF	1	20
4	6 pF	1	0,02
6	geen	2	1000
7	6 nF	2	710
7	6 pF	2	0,71
8	6 nF	2	2
8	6 pF	2	0,002

Wordt de meetinrichting door een 220 V net gevoed, dan is het chassis via C_{ma} aan ongeveer de halve voedingsspanning verbonden. Er is dan in ieder geval al een common-mode signaal van circa $150 V_{top}$.

VI. MEETPROCEDURE EN KONTROLE OP FOUTEN

De beide methoden om een veld te meten, te weten:

- I. met een één-kanaalsmeetinrichting niet verbonden aan aarde en
- II. met een meetinrichting met differentie-ingang niet verbonden aan aarde, maar aan een extra probekontakt midden tussen de beide andere kontakten.

zijn bruikbaar, indien men zich bewust is van de gevaren en van de grootte van de mogelijke fouten.

Voor het meten moet men er zich van vergewissen dat de maximum common-mode spanning niet hoger is dan het toelaatbare maximum van de meetinrichting.

Bij sprongvormige velden is er nauwelijks onderscheid tussen de beide meetmethoden zolang de pulsduur τ_d van het veld veel groter is dan de responsietijd τ_c van het foute signaal.

De tijdsduur waarin de (grote) fout optreedt is dan een fractie van de pulsduur van het veld. De fout is dan óf onzichtbaar óf in de vorm van een naald zichtbaar. In dat geval maakt het niet uit of zo'n naald nu groot is of minder groot: de te meten waarde kan toch juist bepaald worden.

Om een inzicht te krijgen hoe groot de fouten bij de metingen kunnen worden, volgt hier een procedure om deze fouten te bepalen.

Er zijn drie mogelijke fouten:

- a. een te sterk doorkomend common-mode signaal;
 - b. niet meer lineair versterken van de differentieversterker;
 - c. te grote probekontaktweerstand R_p in vergelijking tot R_i .
- Opsporing van deze mogelijke fouten worden door de beide meetmethoden behandeld.

Om slechts eenmaal de test te hoeven doen gaat men uit van de ongunstigste situatie. Daartoe wordt de meetprobe in de buurt van de aangestuurde elektrodes gebracht.

De veldsterkte wordt op de normale manier gemeten. De probe wordt nu zo gedraaid dat een minimale veldsterkte wordt gemeten.

Zorg dat de probe bij alle tests zo blijft staan.

- a. Het overblijvende signaal is een gevolg van de slechte common-mode onderdrukking.

Wil men nauwkeurig kunnen meten dan moet dit signaal kleiner of smaller zijn dan de te meten U_d .

- b. (Bij meten met een één-kanaalsoscilloscoop is deze procedure niet nodig).

Het niet lineair meer werken van de differentieversterker kan getest worden door één stand gevoeliger te meten.

Houdt het signaal dezelfde vorm en grootte, dan werkt de versterker lineair.

- c. (Een oscilloscoop met differentie-ingang moet voor dit onderdeel als één-kanaalsoscilloscoop gebruikt worden. Het chassis mag ook niet met het extra probekontakt verbonden zijn).

Verbindt het chassis van de oscilloscoop met de tegen-elektrode. Sluit één probekontakt aan op de ingang. Meet het common-mode signaal. Als nu parallelschakeling van beide probekontakten hetzelfde signaal oplevert, dan is aan

voorwaarde $R_i \gg R_p$ voldaan.