

# Het meten van elektrostatische ladingen

J. VAN TURNHOUT

CENTRAAL LABORATORIUM TNO, DELFT

## Samenvatting

In dit artikel wordt het meten van elektrostatische ladingen besproken. Met de beschreven methoden kunnen totale ladingen, oppervlakte ladingen en locale ladingen worden bepaald. Als meetprincipes worden elektrostatische inductie en aantrekking benut. De ontwikkelde apparatuur leent zich zowel voor continu als periodiek gebruik, zodat ook de vervaltijd van ladingen er mee kan worden vastgelegd. In sommige toestellen kunnen meerdere voorwerpen tegelijk worden onderzocht. Ter illustratie van de toepassingsmogelijkheden worden enkele voorbeelden van ladingsmetingen aan elektreten gegeven. Twee frappante meetresultaten worden getoond: de complete ladingsverdeling van een elektreet en het gedrag van de lading van een elektreet bij hoge temperatuur.

## Summary

Methods are described for the measurement of electrostatic charges. With the developed apparatuses total charges, surface charges and local charges can be determined. As measuring principle either electrostatic induction or electrostatic attraction is used. Samples can be measured continuously or periodically so that the charge decay may be investigated as well. In some instruments several samples can be handled simultaneously. The equipment is especially suited for electrets. Two interesting examples of application are given, the behaviour of electretcharge at high temperature and the chargedistribution of an electret as found by probescanning.

## 1. Inleiding

In vele takken van industrie en wetenschap heeft men te maken met elektrostatische oplading [1, 2]. Toch is aan de meting en karakterisering van ladingen nog weinig aandacht besteed. Niet alleen zijn er in de handel geen geschikte instrumenten voor te krijgen, er is ook weinig over gepubliceerd. Bij uitzondering hebben onderzoekers van elektreten<sup>1)</sup> de meettechniek summier uiteengezet [3].

De laatste tijd begint hierin verandering te komen. Steeds vaker worden, zowel bij de bestrijding als bij het nuttig gebruik [4-8] van de elektrostatische ladingsmetingen ingeschakeld. Tot de groeiende belangstelling heeft vooral het beschikbaar komen van betere elektrometers bijgedragen. Voor ladingsmetingen zijn, vanwege de geringe meetstroom, n.l. voltmeters met een zeer hoge ingangswaerstand nodig (minstens  $10^{14} \Omega$ ). Tot voor kort werden voor dit doel mechanische meters bijv. de kwadrantelektrometer aangewend. Deze waren echter subtiel en ongevoelig.

De elektronische elektrometers van tegenwoordig zijn veel gevoeliger en robuuster. Door deze ontwikkeling zijn voor allerlei problemen exacte ladingsmetingen mogelijk geworden [9].

In het kader van een onderzoek aan kunststofelektreten zijn de laatste jaren op het Centraal Laboratorium diverse apparaten voor de bepaling van ladingen vervaardigd. Het is herhaaldelijk gebleken dat deze apparatuur ook bij andere onderzoekingen met succes kan worden toegepast. Vandaar dat

de ontwikkelde meettechnieken hier in het kort zullen worden besproken.

Een geleider ondervindt van een geladen object twee werkingen: er worden tegengestelde ladingen op geïnduceerd en er worden krachten, de z.g. ponderomotorische krachten, op uitgeoefend. Ladingsmeters berusten op één van deze effecten. Het inductieve effect is afhankelijk, het ponderomotorische effect echter onafhankelijk van het teken der lading.

Wanneer op of in een voorwerp dus positieve en negatieve ladingen aanwezig zijn, dan middelen die in de inductieve meters wel, maar in de ponderomotorische meters niet, tegen elkaar uit. Een ladingsmeting kan: het gehele object, en een groot resp. klein deel van het object omvatten. De eerstgenoemde meting, die van de totale lading, is zelfs voor grillig gevormde voorwerpen uitvoerbaar. De gedeeltelijke waarneming, voor de meting van oppervlakteladingen en plaatselijke ladingen, lukt daarentegen alleen bij eenvoudige geometriën.

In het volgende zal de apparatuur die bij deze drie bepalingen nodig is, theoretisch en praktisch worden toegelicht. Tevens zal kort worden ingegaan op de meting van de ontladingsduur van ladingen. Ten slotte zal terloops de relatie tussen gemeten en werkelijk aanwezige lading aan de orde komen.

## 2. De inductieve meting van oppervlakte ladingen

In het algemeen zullen de positieve en/of negatieve ladingen van een voorwerp niet alleen op het oppervlak zitten, doch ook in het volume voorkomen. In de appendix zal evenwel worden aangetoond dat men zich alle lading op het oppervlak geconcentreerd mag denken. Voor een vlak voorwerp behoeven daarom slechts de ladingsdichtheden op het

1) Elektreten zijn permanent gepolariseerde diëlektrica, de oppervlakken loodrecht op de polarisatie-richting zijn derhalve tegengesteld geladen. Elektreten kunnen bijv. uit polymethylmethacrylaat worden geformeerd, door dit in een elektrostatisch veld te verhitten en af te koelen. Tussen elektreten en magneeten bestaat een grote analogie.



boven- en onderoppervlak beschouwd te worden. Wanneer een dergelijk proefstuk zich tussen twee elektroden van gelijke potentiaal bevindt, dan induceert het op de bovinelektrode een lading  $Q$

$$Q = - \frac{[\sigma_1 d/\epsilon + (\sigma_1 + \sigma_2) u_2] A}{u_1 + u_2 + d/\epsilon} \quad (1)$$

hierin zijn  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  de gemiddelde lading per oppervlakte-eenheid aan de boven- resp. onderkant en  $u_1$ ,  $u_2$  de afstand tussen monster en boven- resp. onderelektrode<sup>2)</sup>. Verder is  $A$  het meetoppervlak,  $d$  de dikte van het voorwerp en  $\epsilon$  de relatieve diëlektrische constante. Vergelijking (1) is gemakkelijk af te leiden uit de grondbeginselen van de elektrostatica.

Voor  $u_2 = 0$ , m.a.w. als het voorwerp op de onderelektrode rust, vervalt de bijdrage van de lading aan de onderkant en wordt

$$Q = - \frac{\sigma_1 A}{1 + \epsilon u_1/d} \quad (2)$$

In dit geval kan men de gemiddelde oppervlakte lading  $\sigma_1$  blijkbaar bepalen door de verandering in  $Q$  vast te leggen bij een welomschreven variatie van  $u_1$  of  $A$ . De ladingsverandering  $\Delta Q$  wordt meestal indirect, met een elektrometer, bepaald als een spanningsverschil  $\Delta V$

$$\Delta V = \Delta Q/C \quad (3)$$

waarin  $C$  de capaciteit van het meetsysteem is. Men heeft de keuze tussen een snelle of een langzame variatie.

De snelle methode is vroeger [10] veel gebezigd omdat men, wegens de grotere meetstroom ( $\Delta Q/\Delta t$ ), met een „eenvoudiger“ voltmeter kan volstaan. Nu goede elektrometers voorhanden zijn, kan men ondanks de kleinere meetstroom beter de voorkeur geven aan de langzame procedure. Deze leent zich n.l. tot nauwkeuriger ladingsmetingen dan de snelle methode. Bovendien is ze mechanisch en eigenlijk ook elektronisch eenvoudiger.

Op het Centraal Laboratorium zijn twee meters ontworpen welke beide langzaam zijn: een „elevatorische“ en een roterende ladingsmeter. In de eerste is de variatie van  $u_1$  en in de tweede die van  $A$  benut.

Een tekening van de elevatorische meter is in figuur 1 gegeven. Het platronde monster bevindt zich op een gearde elektrode die „als een elevator“ op en neer te bewegen is, opdat de inductie van het monster op de geïsoleerde meetelektrode veranderd kan worden. Rond de flexibel opgehangen meetelektrode (oppervlak  $10 \text{ cm}^2$ ) is ter vermindering van randeffekten een schutring aangebracht. Parallel aan de elektroden zijn een condensator (grootte  $20 \text{ nF}$ ), een elektrometer (Keithley 610 A - B) en een schakelaar aangesloten. Het geheel is tegen storingen afgeschermd.

De meting verloopt als volgt: Met gesloten schakelaar wordt het monster tegen de meetelektrode aangedrukt, wat  $u_1 = 0$  maakt. Op de meetelektrode zullen nu het maximale aantal tegenladingen

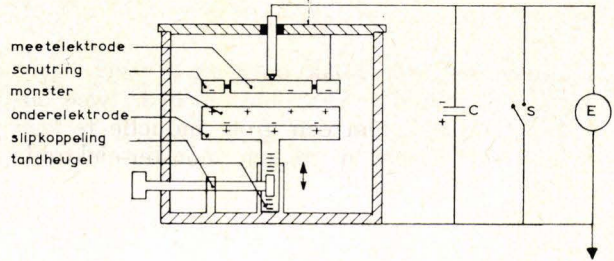


Fig. 1. Elevatorische ladingsmeter

worden geïnduceerd, vergelijk (2). Na opening van de schakelaar wordt het voorwerp naar beneden bewogen. De inductie op de bovinelektrode vermindert daardoor sterk. Diverse tegenladingen verliezen zodoende hun binding met het proefstuk en vloeien weg naar de buffercondensator. Over de condensator zal zich een spanning opbouwen, die al groter wordt naarmate de spleet toeneemt. In de laagste stand van het monster ( $u_{10}$ ) zal de condensatorspanning een waarde bereikt hebben van

$$CV = - \frac{\sigma_1 A}{1 + d/\epsilon u_{10}} \approx -\sigma_1 A. \quad (4)$$

In (4) zijn de capaciteit van de elektrometer ( $30 \text{ pF}$ ) en meetelektrode ( $15 \text{ pF}$ ) verwaarloosd. Het minteken duidt erop dat de polariteit van  $V$  en  $\sigma_1$  tegengesteld is.

Ter controle kan men de meting eveneens in omgekeerde richting uitvoeren. Weer worden alle circuitonderdelen met de schakelaar kortgesloten. vervolgens wordt het monster, bij geopende schakelaar, uit zijn onderste stand omhoog bewogen. De inductie zal dan toenemen, zodat er meer tegenladingen op de meetelektrode geïnduceerd zullen worden. Deze ladingen worden *onttrokken* aan de buffercondensator. Opnieuw gaat zich hierover een spanning ontwikkelen.

Zodra het proefstuk de meetelektrode raakt, neemt deze spanning haar eindwaarde aan

$$CV' = \frac{\sigma_1 A}{1 + d/\epsilon u_{10}} \approx \sigma_1 A. \quad (5)$$

In dit geval hebben  $V'$  en  $\sigma_1$  dezelfde polariteit.

Bij een voldoende grote verplaatsing van het object, mogen gevoeglijk de benaderingsformules worden gebruikt. Voor  $d = 2,5 \text{ mm}$ ,  $\epsilon = 5$  en  $u_{10} = 25 \text{ mm}$  bijv. benadert men de exacte waarde op  $2\%$ . (In de praktijk is de benadering vaak nog beter, want bij een grote spleet zal het monster ook op de wanden gaan induceren). In de gekozen opstelling zal de eindspanning meestal een paar volt bedragen. Oppervlakte ladingen zijn n.l. zelden groter dan enkele  $\text{nC/cm}^2$ .

Het zal duidelijk zijn dat de eventuele lading aan het onderoppervlak ( $\sigma_2$ ) op dezelfde wijze gemeten kan worden, door het monster om te keren.

De roterende ladingsmeter is in figuur 2 geschetst. Het monster ligt, met veertien andere, in een gearde schijf. De schijf wordt door een synchroonmotor in rotatie gebracht ( $0,2 \text{ omw./min.}$ ). Bovenop de schijf rust, via drie kogellegers, een schutring waarin twee elektroden ( $10 \text{ cm}^2$ ) zijn bevestigd.

<sup>2)</sup> In de formules is steeds het m.k.s. stelsel gebruikt.



Het proefstuk passeert aldus periodiek de meet-elektrode, waardoor de gewenste verandering van het inducerend oppervlak ontstaat. Er zijn twee elektroden nodig daar de monsters over twee cirkels zijn verdeeld. Om een grote inductie te krijgen, moet de spleet  $u_1$  tussen monster-elektrode klein zijn. Dank zij de nauwkeurige constructie kan een spleet van 0,05 mm worden gerealiseerd.

Het moment waarop een monster zich midden onder een elektrode bevindt wordt door een microschakelaar gesignaleerd. Het elektronische schema lijkt sterk op dat van de elevatorische meting. Wel is de schakelaar vervangen door een programma-schakelaar, die de elektroden na elke omwenteling kortsluit en daarna om beurten met de elektrometer verbindt. Voor continue metingen, waartoe de meter zich bij uitstek leent, wordt het circuit uitgebreid met een recorder (Moseley 680).

De meting verloopt aldus: Zodra een monster onder de meetelektrode arriveert, gaat het hierop ladingen induceren die worden geleverd door de buffercondensator. De spanning over de condensator neemt d.t.g. van nul af toe en bereikt (bij een uniforme ladingsverdeling) een maximum als het monster juist onder de elektrode zit. Dan is immers het inducerend oppervlak het grootst. Op dit moment geldt voor de spanning

$$CV = \frac{\sigma_1 A}{1 + \epsilon u_1/d} \approx \sigma_1 A \quad (6)$$

Draait het voorwerp verder dan nemen het inducerend oppervlak en de spanning weer tot nul af. Figuur 3 geeft een beeld van enkele registratiecurven. In elk der curven is uitsluitend de gemarkeerde spanning een maat voor de gemiddelde oppervlaktelading. Onregelmatigheden in de krommen wijzen erop dat een oppervlaktelading bipolair en/of ongelijkmatig verdeeld is.

Doordat, vooral bij oneffen monsters,  $\epsilon u_1/d$  niet erg klein is, gaat de benaderingsformule minder goed op dan bij de elevatorische meter. Daarom zijn „ter ijkings” twee elevatorische elektroden ingebouwd.

### 3. De ponderomotorische meting van oppervlakteladingen

Een geladen voorwerp induceert niet alleen, het oefent ook krachten uit op de elektroden. De ladingen en tegenladingen trekken elkaar immers aan. Uit energiebeschouwingen blijkt, dat de bovenelektrode de volgende kracht ondervindt

$$K = \frac{\sigma_1^2 A}{2\epsilon_0(1 + \epsilon u_1/d)^2} \quad (7)$$

Bij de afleiding van (7) is verondersteld, dat het monster op de onderelektrode ligt en dat beide elektroden dezelfde potentiaal hebben. Verg. (7) wordt eenvoudiger als ook de bovenelektrode het proefstuk raakt

$$K = \sigma_1^2 A / 2\epsilon_0 \quad (8)$$

De ladingsdichtheid aan de bovenkant  $\sigma_1$  zou men een effectieve oppervlaktelading kunnen noemen.

Deze is vaak groter dan de overeenkomstige gemiddelde waarde uit (1). Ponderomotorisch gedragen positieve en negatieve ladingen zich n.l. additief, inductief gezien gedragen ze zich echter subtractief, vergelijk (16) en (17).

In de eerste plaats kan men de kracht bepalen door de bovenelektrode (10 cm<sup>2</sup>) met een balans van het platronde monster af te tillen. Met voordeel kan hierbij een torsiebalans (VDF 500) worden gebruikt (figuur 4), aangezien men de tegenkracht dan van nul af kan opvoeren. De weegmethode is volgens (8) evenwel kwadratisch, dit levert bij kleine ladingen bezwaren op.

Teneinde een lineaire meting te krijgen, moet de kracht elektrostatisch gevonden worden. Dit gebeurt in het toestel van figuur 5. De middenelektrode wordt door het object en door een spanningsvoerende elektrode aangetrokken. Zodra op de laatste een spanning staat van

$$V \geq \sigma_1 \delta / \epsilon_0 \quad (9)$$

trekt hij de middenelektrode van het voorwerp los. In (9) is  $\delta$  de afstand van midden- tot aantrekelektrode;  $\delta$  kan op de micrometer worden afgelezen. De beweging naar de aantrekelektrode kan men zowel visueel als elektronisch waarnemen. Voor het laatstgenoemde staat tussen de elektroden van het monster een hoge weerstand. Tijdens de beweging wordt hierover, door de veranderende inductie, een spanning opgebouwd. Deze wordt tegelijk met de spanning  $V$  op een schrijver gezet. Zo leert men behalve de grootte tevens het teken van de lading kennen. De polariteit volgt immers uit het teken van de markeringspuls.

### 4. De meting van locale ladingen

Naast ladingsmetingen over oppervlakken van bijv. 10 cm<sup>2</sup> zijn locale ladingsmetingen evenzeer van belang. Voor toepassingen mag een oplading immers plaatselijk niet veel in grootte en polariteit variëren.

Inductief kan de verdeling van de lading bepaald worden door het vlakke voorwerp met een sonde af te tasten, zie [11, 12]. Men kan hierbij, evenals in paragraaf 2, de spleet of het inducerend oppervlak veranderen. In de puntvormige meter van figuur 6 is de laatste werkwijze aangehouden, omdat deze hier het eenvoudigst is. Logischerwijs heeft de puntvormige meter veel met de roterende meter gemeen. Onder andere: de aandrijving, de middenmarkering, de kleine meetspleet (0,1 mm), de geprogrammeerde schakelaar en de elevatorische ijkeenheid.

Het proefstuk van  $\varnothing$  36 mm kan, met twee andere, zowel in azimuthale als in radiale richting worden afgetast. Het bevindt zich hiertoe in een azimuthaal roterende plaat waarin het met een geprofileerde schijf, via een slede, radiaal verplaatst wordt. Per omwenteling bedraagt de radiale verplaatsing 1 mm. Na 36 omwentelingen is het gehele monster onderzocht en keert het in de oorspronkelijke stand terug. Figuur 7 geeft het patroon van de aftasting weer.

De meting is analoog aan die van de roterende



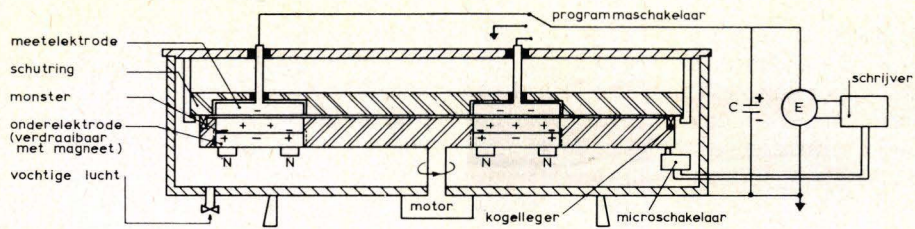


Fig. 2 Roterende ladingsmeter.

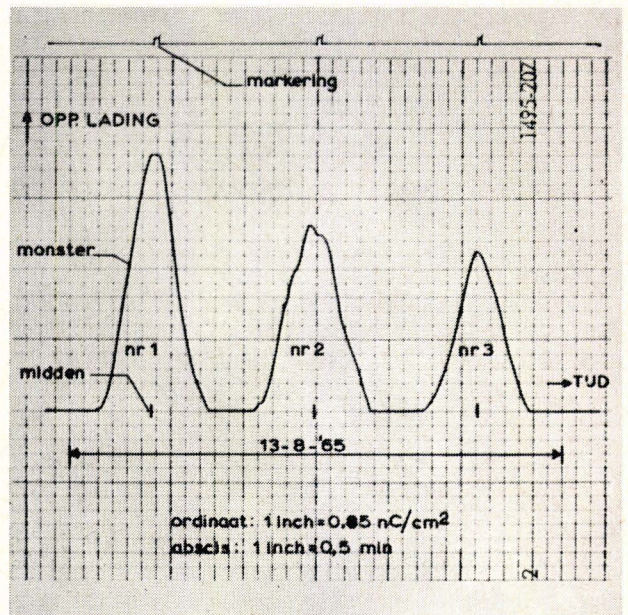
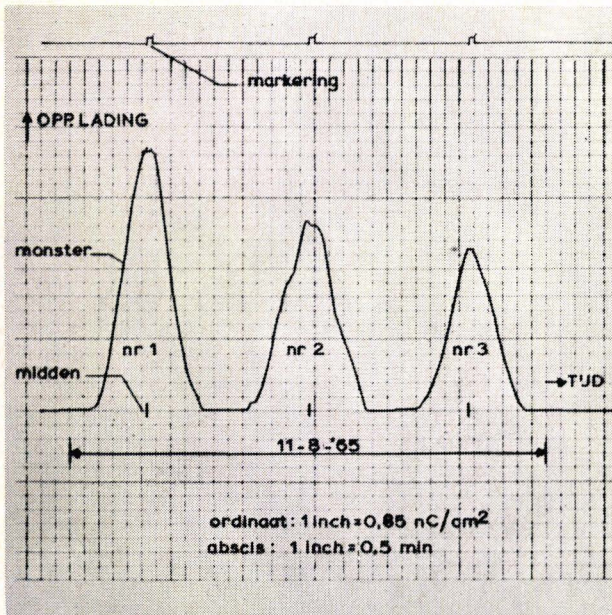


Fig. 3 Meetcurven van roterende meter, voor de monsters zijn elektreten gebruikt. (materiaal: PMMA, formatiecondities: nr. 1  $140^{\circ}\text{C} - 30\text{ kV/cm} - 2,5\text{ uur}$ ; nr. 2  $140^{\circ} - 15\text{ kV/cm} - 2,5\text{ uur}$  en nr. 3  $140^{\circ} - 80\text{ kV/cm} - 3\text{ uur}$ ).

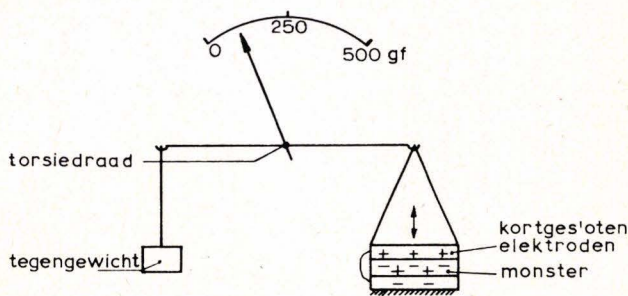


Fig. 4. Mechanische ponderomotorische ladingsmeter

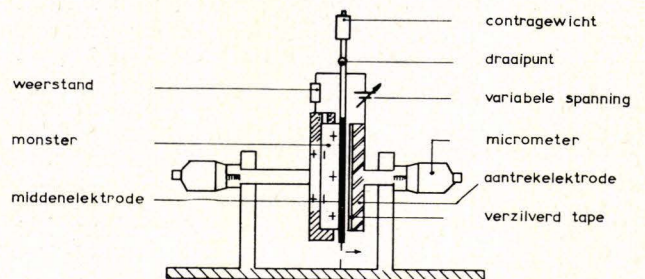


Fig. 5. Elektrische ponderomotorische ladingsmeter.

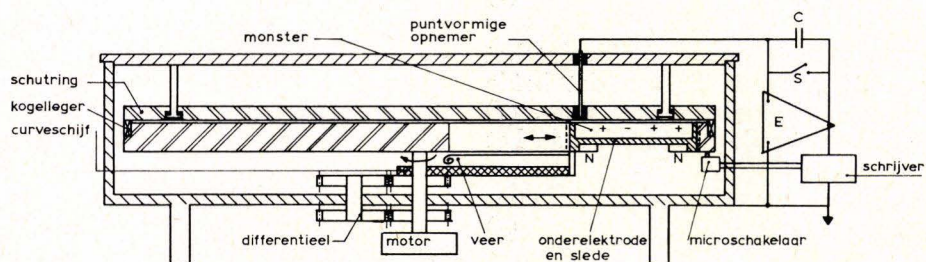


Fig. 6 Puntvormige ladingsmeter.



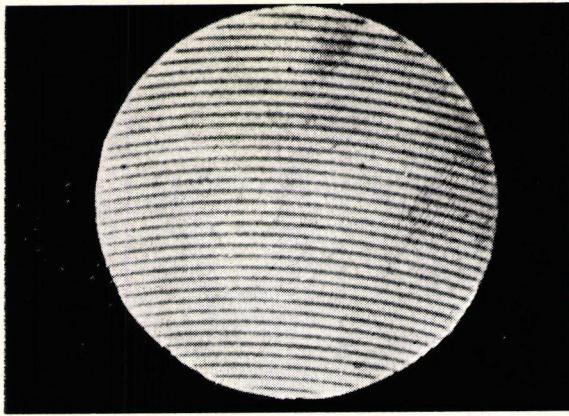


Fig. 7 Aftastingspatroon in puntvormige meter. De 36 banen zijn opgenomen door een corona-ontlading tussen de meetsonde en teledeltospapier te veroorzaken.

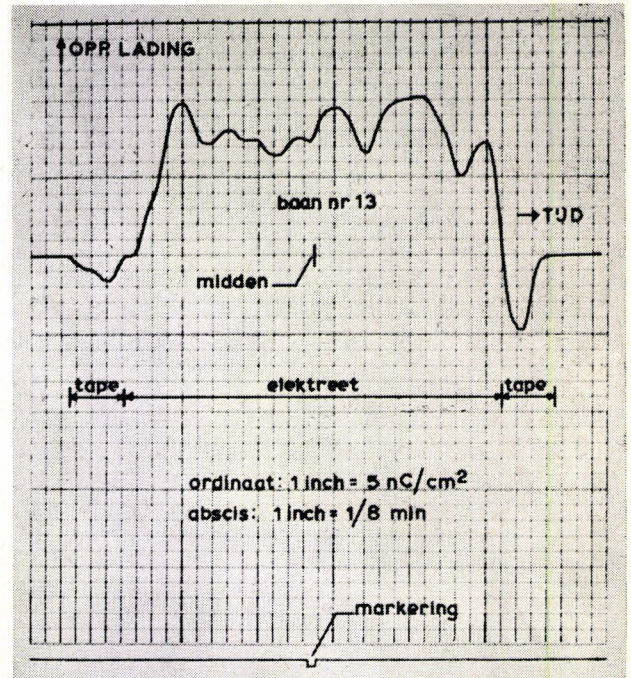
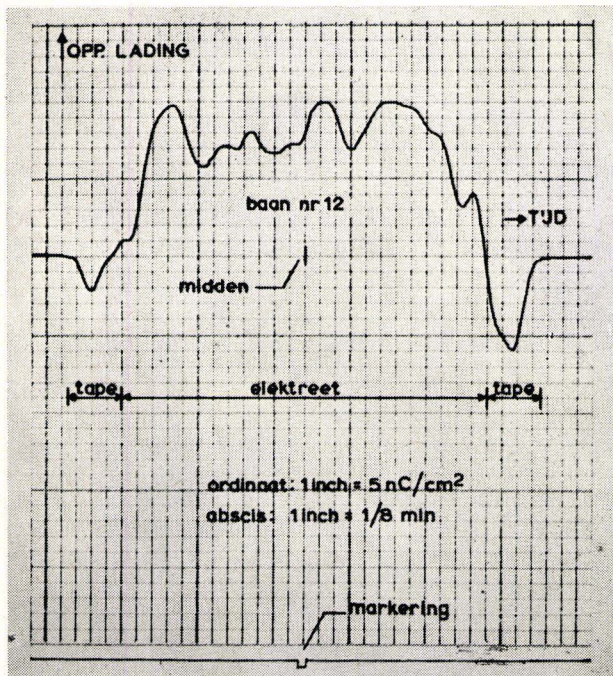


Fig. 8 Locale ladingen van een elektreet, beide krommen zijn met de puntvormige meter bepaald. (materiaal: PMMA, formatie:  $140^\circ - 30 \text{ kV/cm} - 2,5 \text{ uur}$ ).

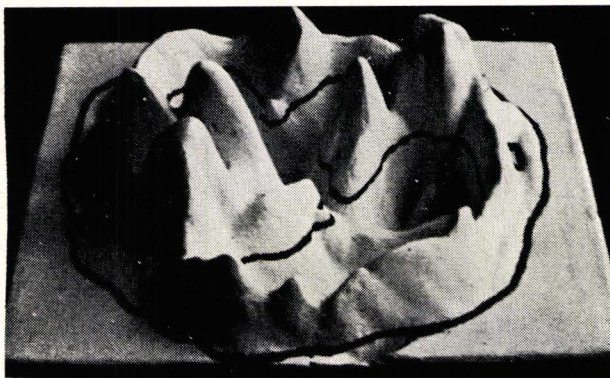


Fig. 9 Ruimtelijke weergave van de ladingsverdeling van een elektreet. Deze gipsafdruk is samengesteld uit de 36 meetcurven van de puntvormige meter. Positieve ladingen liggen boven en negatieve ladingen onder het zwarte nulniveau. (materiaal: PMMA, formatie:  $140^\circ - 60 \text{ kV/cm} - 2,5 \text{ uur}$ ).

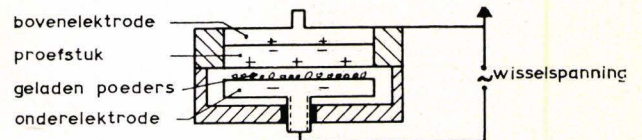


Fig. 10. Kwalitatieve bepaling van lokale ladingen met geladen poeders.



meter. De schrijver is hier gezien het grote aantal aftastingen uiteraard onontbeerlijk. Evenals in (6) geldt voor de spanning die het beschouwde oppervlakte-element teweegbrengt

$$CV = \frac{\sigma_1 a}{1 + u_1 \epsilon / a} \approx \sigma_1 a. \quad (10)$$

In (10) stelt  $\sigma_1$  de lokale oppervlaktebelading aan de bovenkant en  $a$  het oppervlak van de meetsonde ( $0,5 \text{ mm}^2$ )<sup>3)</sup> voor.

Vanwege het kleine meetoppervlak wordt er natuurlijk niet veel lading (ongeveer 5 pC) op het meetsysteem geïnduceerd. Dit impliceert dat de buffercondensator klein moet zijn (100 pF) en dat aan de isolatie en aan de afscherming hoge eisen gesteld worden. In het bijzonder moet de elektrometer stabiel en gevoelig zijn. Vandaar dat nu een z.g. trilplaatelktrometer (Vibron 62A) wordt gebruikt.

Fig. 8 toont hoe de lading van een elektreet er, volgens de puntvormige meter, plaatselijk uitziet. Ter verdere illustratie is in figuur 9 de complete ladingsverdeling van een elektreet afgebeeld. (Met opzet is voor deze gipsafdruk een elektreet uit het beginstadium van het onderzoek, met een onregelmatige verdeling genomen. Het plateau van een uniform en unipolair geladen elektreet zou immers nauwelijks spectaculair zijn. Tegenwoordig kunnen op het Centraal Laboratorium echter wel degelijk goede elektreten met een vlakke verdeling gemaakt worden).

Parallel aan bovenbeschreven methode is er een kwalitatieve methodiek ontwikkeld. Hiermee krijgt men zonder veel hulpmiddelen eveneens een indruk van de ladingsverdeling naar polariteit en grootte. Als ladingsdetector doen twee kunststofpoeders dienst, die elkaar door wrijving tegengesteld opgeladen hebben. Gebleken is dat van de diverse polymeren polyamide 11 (rilsan) en polymethylmethacrylaat (plexigum) het beste voldoen. Beide poeders laden elkaar, in droge toestand, tot ca  $0,5 \text{ nC/mg}$  op. Het rilsan wordt bijna uitsluitend positief en het plexigum negatief.

Wanneer de poeders in de buurt van het proefstuk worden gebracht, dan zullen de rilsankorrels naar de negatieve plaatsen en de plexigumkorrels naar de positieve plaatsen gaan. Verder zullen sterk geladen gebieden veel korrels en zwak geladen gebieden weinig korrels aantrekken. Door de poeders te kleuren bijv. rilsan geel en plexigum paars, is het mogelijk de ladingsverdeling duidelijk zichtbaar te maken en eventueel fotografisch vast te leggen.

Voor platte voorwerpen kan de gevoeligheid en reproduceerbaarheid aanzienlijk worden vergroot, door de aantrekkingskracht van het monster met het elektrodensysteem van figuur 10 te maximaliseren. Een nog grotere gevoeligheid krijgt men wanneer op de elektroden een wisselspanning ( $E = 2 \text{ kV/cm}$ , 50 Hz) wordt aangesloten. Deze zal de korrels n.l. op en neer laten springen. Bij hun opwaartse beweging komen de korrels zeer dicht bij het voorwerp, hetgeen hun vangkans uiteraard sterk vergroot. Met de laatste methodiek is de in

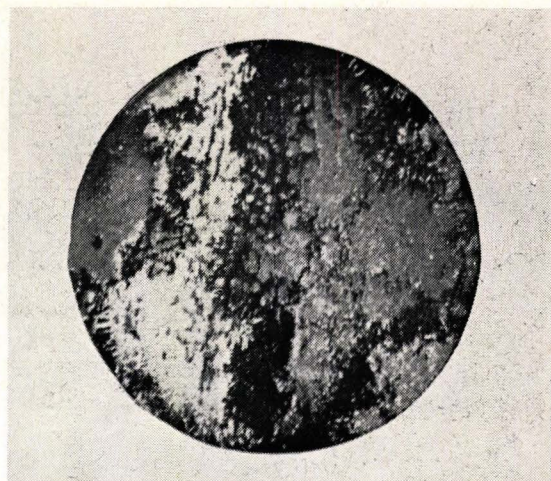


Fig. 11. Foto van de ladingsverdeling van een elektreet. De grijze gedeelten zijn positief en de witte negatief geladen, de zwarte gebieden zijn neutraal. (materiaal: PMMA, formatie:  $140^\circ - 20 \text{ kV/cm} - 3 \text{ uur}$ ).

figuur 11 gegeven foto van een ladingsverdeling verkregen. (Ook voor deze foto is bewust een slechte elektreet uitgezocht).

## 5. De inductieve meting van de totale lading

Voor objecten van ingewikkelde vorm zijn bovenstaande technieken niet bruikbaar. Wel uitvoerbaar is een bepaling van de lading van het gehele voorwerp, met de beker van Faraday (figuur 12). De beker bestaat uit twee cilinders, waarvan de binnenste als meetcilinder fungeert en de buitenste voor afscherming dient. Beide cilinders kunnen worden afgesloten.

Het elektrische schema is identiek met dat van figuur 1. Wordt, na voorafgaande kortsluiting van het circuit, het voorwerp in de meetcilinder gedeponeerd dan zal het hierop —  $Q$  tegenladingen induceren, als hetzelfde in totaal  $Q$  ladingen bevat. Doordat het voorwerp geheel wordt omsloten zal er n.l. geen krachtlijn verloren gaan. De tegenladingen worden geleverd door de buffercondensator, die zich bijgevolg gaat ontladen en een spanning aanneemt van

$$CV = Q \quad (11)$$

Na hernieuwde kortsluiting van de onderdelen, kan men nog een controlemeting doen bij het eruit

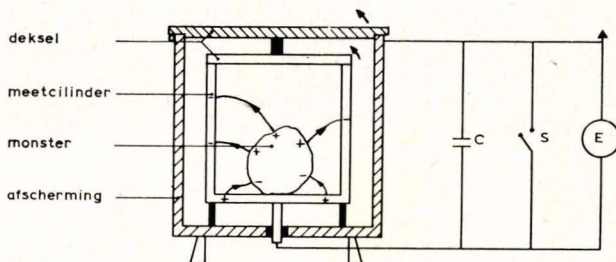


Fig. 12. Beker van Faraday.

<sup>3)</sup> (In werkelijkheid zal door randeffecten een iets groter oppervlak worden geobserveerd).



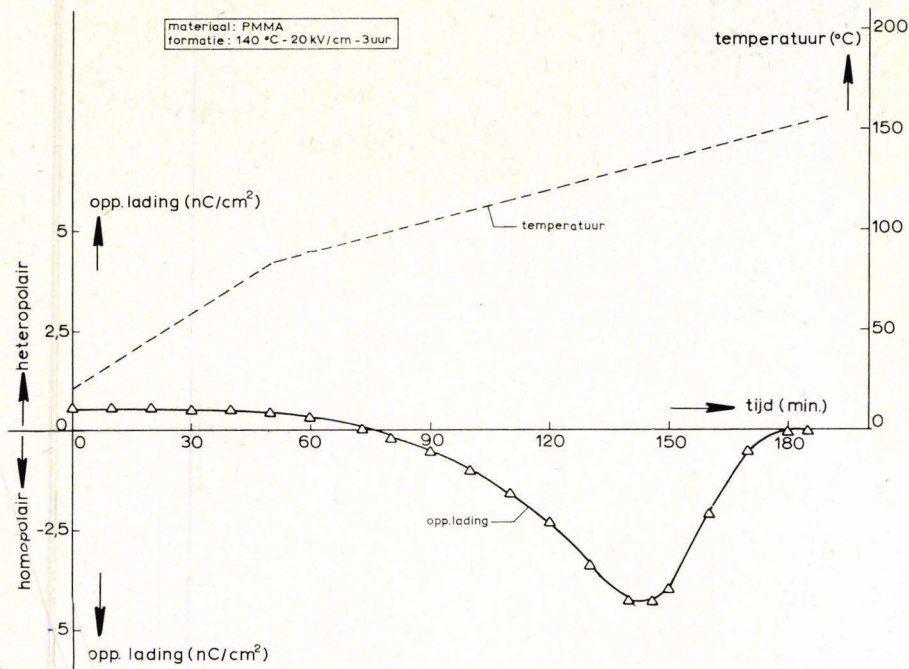


Fig. 13 Ontlading van een elektreet door temperatuurverhoging. De geprogrammeerde temperatuur neemt lineair met de tijd toe. De „overall” lading is heteropolaire als ze positief is en homopolaire als ze negatief is.

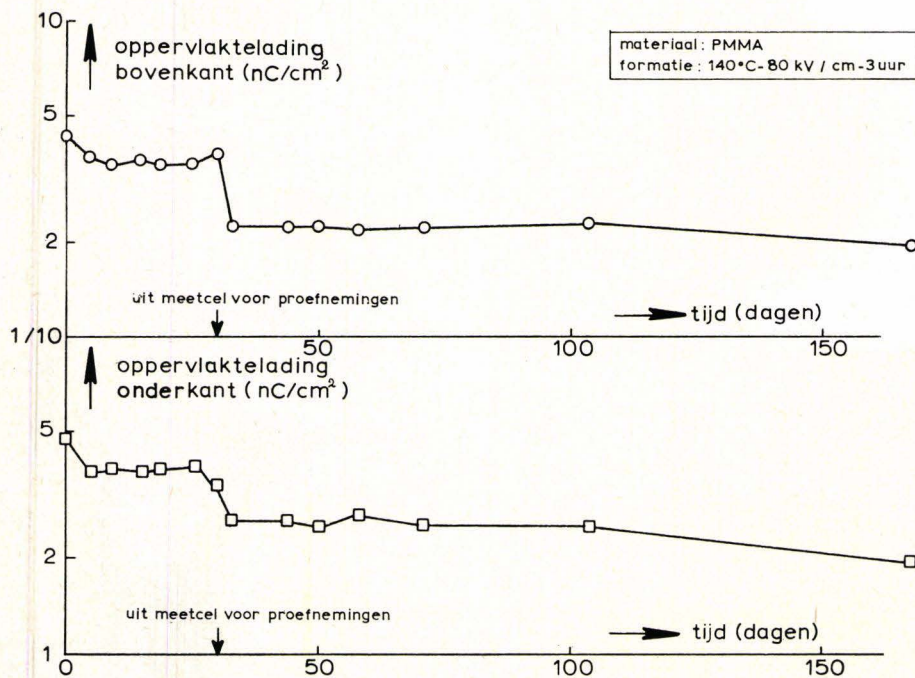


Fig. 14 Het verloop van beide oppervlakteladingen van een elektreet.



halen van het object. De op de meetcilinder geïnduceerde ladingen komen in dit geval weer vrij, zodat ze de buffercondensator zullen opladen tot een spanning

$$CV' = -Q. \quad (12)$$

Voor de bepaling van de totale lading van vlakke voorwerpen is niet per se een faraday-beker nodig. Hun totale lading is uit de eerder gemeten oppervlakteladingen te vinden. Het blijkt dat

$$Q = (\sigma_1 + \sigma_2)A. \quad (13)$$

Het zij-oppervlak moet vanzelfsprekend ongeladen zijn, anders is (13) niet juist.

## 6. De bepaling van de vervaltijd van ladingen

Van een lading wil men niet alleen de grootte en de verdeling, maar ook de permanentie meestal weten. Door in- en uitwendige neutralisatie verdwijnt de lading na een zekere tijd. De vervaltijd kan van uren tot dagen, voor elektreten zelfs tot jaren, variëren. De houdbaarheid hangt o.a. af van het geleidingsvermogen en de vochtigheid. Tevens speelt de grootte van het ontelektriserende veld een rol. Daarom worden de elektroden van het monster ter beperking van dit veld vaak kortgesloten.

In principe lenen de beschreven technieken zich alle tot het bepalen van vervaltijden. Men moet de ladingsmeting eenvoudig herhalen. Voor korte onlaadtijden, waarin de elektrometer niet wegdriift, is een nieuwe meting niet eens nodig. Bij de elevatorische en roterende meter bijv. wordt de buffercondensator door de neutralisatie vanzelf ontladen, zodat het verval direct volgt uit de afneming van de door (5) resp. (6) gegeven eindspanning. Bij de faraday-beker faalt deze techniek evenwel, want daar vloeit de neutralisatiestroom buiten het meetcircuit om.

Voor de bestudering van de lading op langere termijn kan aan automatisering worden gedacht. De roterende meter is hiertoe zonder meer geschikt. De elevatorische meter leent zich er echter ook toe, mits de gearde elektrode met een elektromagneet wordt bewogen.

Met behulp van een geautomatiseerde elevatorische eenheid zijn de markante meetresultaten van figuur 13 verkregen. Deze figuur toont het versnelde verval van een elektreet bij toenemende temperatuur. Het blijkt dat de „verdwijnende” oppervlakte lading van teken omkeert en tijdelijk zelfs aangroeit. (Deze toeneming wijst er op dat de persisterende lading van een elektreet uit twee tegengestelde ladingen is opgebouwd, die bij verschillende temperaturen vervallen. De waarnemingen bevestigen zodoende op fraaie wijze de hypothese van de z.g. homopolaire en heteropolaire ladingen). Bij vervalmetingen kan de meetcel het beste tevens als bewaarcel fungeren, aangezien de ladingen dan niet door aanraking en transport worden verstoord. Met een dergelijke gecombineerde cel, bestaande uit twee compacte elevatorische eenheden, is het in figuur 14 getekende ladingsverloop van een elektreet opgenomen.

## Appendix

### De relatie tussen gemeten en aanwezige lading

Hoe hangt de gemeten lading nu eigenlijk van de in werkelijkheid aanwezige ladingen af? In het algemeen kan een geladen voorwerp twee typen ladingen bevatten t.w. reële ladingen (ionen en/of elektronen) en fiktieve ladingen (dipolen). Beide kunnen zich in het volume en aan het oppervlak bevinden. Voor een universeel geladen plat voorwerp kan men uit de elektrostatische basisformules afleiden dat als oppervlakte lading aan boven- en onderkant gemeten worden

$$\sigma_1 = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} z \rho_r(z) dz + \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} P_o(z) dz - \frac{1}{2} \int_{-d/2}^{d/2} \rho_r(z) dz - \sigma_{1r} \quad (14)$$

$$\sigma_2 = -\frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} z \rho_r(z) dz - \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} P_o(z) dz - \frac{1}{2} \int_{-d/2}^{d/2} \rho_r(z) dz - \sigma_{2r}$$

Hierin is  $z$  de coördinaat in de dikterichting,  $\rho_r$  de reële ruimtelading,  $P_o$  de persisterende polarisatie (elektreten) en  $\sigma_{1r}$ ,  $\sigma_{2r}$  de reële oppervlakteladingen aan boven- en onderkant.

Als totale lading vindt men voor e.d. monster

$$Q = \left\{ -\sigma_{1r} - \sigma_{2r} - \int_0^d \rho_r(z) dz \right\} A = (\sigma_1 + \sigma_2)A. \quad (15)$$

Zoals te verwachten blijken ook ruimteladingen tot de gemeten ladingen bij te dragen. Stilzwijgend is daarom in de voorgaande formules met de „schijnbare” oppervlaktelading van (14) gerekend en niet met de werkelijke oppervlakte lading  $P_o + \sigma_r$ . Een ander punt is dat de ladingen steeds als een gemiddelde van de locale ladingen worden bepaald. In de inductieve meters heeft de middeling over het meetoppervlak plaats volgens

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{1}{A} \int_0^A (\sigma_1^+ - \sigma_1^-) dA \quad (16)$$

in de ponderomotorische meters naar

$$\bar{\sigma}_p = \sqrt{\frac{1}{A} \int_0^A (\sigma_1^+ + \sigma_1^-)^2 dA}. \quad (17)$$

In (16) en (17) zijn  $\sigma_+$  en  $\sigma_-$  het aantal positieve en negatieve ladingen op het beschouwde oppervlakje  $dA$ . Meestal zal de effectieve waarde  $\bar{\sigma}^d$  groter zijn dan de gemiddelde waarde  $\bar{\sigma}_1$ , tenzij de lading unipolair en uniform is.

### Literatuur

- [ 1 ] H. B. Loeb „Static electrification”, Springer Berlijn (1958).
- [ 2 ] „Static electrification”, Suppl. Brit. J. Appl. Phys. Nr. 2 (1953).
- [ 3 ] H. H. Wieder e.a. „Plastic electrets”, J. Appl. Phys. 24 (1958) 156-161.
- [ 4 ] N. J. Felici „Die e.s. Kräfte und ihre Anwendungen”, E.T.Z. A83 (1962) 485-491.



- [ 5] N. J. Felici „Recent developments and future trends in e.s. generation”, Direct Curr. **4** (1959) 192-201.
- [ 6] G. Haase e.a. „Elektrophotographie”, Umschau **14** (1962), 439, 460 en 492.
- [ 7] H. J. White „Industrial e.s. precipitation”, Wesley Londen 1963.
- [ 8] H. de Wit „Verfahren zum e.s. Auftragen von Lacken”, Ind. Lack. Betr. **30** (1962) 33-37.
- [ 9] A. N. Gubkin e.a. „Methods of measuring the charge of electrets”, Instr. Exper. Techn. Nr. 4 (1959) 631-637.
- [10] R. C. Waddel „An electric field meter for use in air planes”, Rev. Sci. Instr. **19** (1948) 31-35.
- [11] J. C. Devins e.a. „Rotating probe electrometer”, Rev. Sci. Instr. **28** (1957) 11-13.
- [12] H. Kräuser e.a. „E.s. Messgerät mit feinauflösender Sonde zum Bestimmen der Aufladung von Kunststoff-Oberflächen” Kunststoffe **54** (1964), 696-699.
-