

**DE EIGENSCHAPPEN VAN HET MENSCHELIJK LICHAAM
ALS STROOMGELEIDER.**

J. BIJTEL.

DE EIGENSCHAPPEN VAN HET MENSCHELIJK LICHAAM
ALS STROOMGELEIDER.

De eigenschappen van het menschelijk lichaam als stroomgeleider.

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD
VAN DOCTOR IN DE GENEESKUNDE AAN DE RIJKS-
UNIVERSITEIT TE LEIDEN, OP GEZAG VAN DEN
RECTOR-MAGNIFICUS DR. C. SNOUCK HURGRONJE,
HOOGLEERAAR IN DE FACULTEIT DER LETTEREN
EN WIJSBEGEERTE, VOOR DE FACULTEIT DER
GENEESKUNDE TE VERDEDIGEN OP DONDERDAG
19 JANUARI 1922 DES NAMIDDAGS TE 4 UUR,

DOOR

JOHANNES BIJTEL,

::: GEBOREN TE OEGSTGEEST :::

BOEK- EN STEENDRUKKERIJ EDUARD IJDO — LEIDEN.

LEIDEN. — EDUARD IJDO. — 1922.

Aan de nagedachtenis mijner Ouders.

Aan mijne Vrouw.

Nu ik, door dit proefschrift in te leveren, spoedig tot de oud-leerlingen van de Leidsche Hoogeschool ga behooren, komen mij de ruim twaalf jaren, verlopen tusschen mijn eerste binnentreden en thans, weer voor den geest en wordt de herinnering weer levendig aan zoovle leermeesters, die met volle toewijding en inspanning van alle krachten zich wijden aan onderwijs en vorming van de jongelingschap. Reeds in de praktijk van het leven getreden, begin ik iets te beseffen van wat die leermeesters speciaal voor mijzelf geweest zijn en steeds meer en meer gevoel ik nooit dankbaar genoeg te kunnen zijn.

In de eerste plaats gaan mijn gedachten naar U, Hooggeleerde EINTHOVEN, hooggeachte promotor. Van U toch mocht ik wel het meeste leeren. Alleen Uw voorbeeld was reeds een voortdurende prikkel tot eigen inspanning. Uw strenge kritiek getuigde immer van ware liefde voor de wetenschap en van de beste bedoelingen voor de vorming van Uw leerlingen. Steeds zal wat goed in mijn werk mag zijn, Uw stempel dragen. Nooit zou ik met dit proefschrift geslaagd zijn zonder Uw leiding.

Maar ook mijn andere leermeesters mag ik niet vergeten. Sterk genoeg zijn de indrukken, die ik van hun lessen heb, om steeds een schoone plaats in mijn geheugen te blijven innemen.

Aan vele anderen nog ben ik dank schuldig.

Ik denk in de eerste plaats aan U, hooggewaardeerde HUGENHOLTZ, die mij zoo trouw terzijde hebt gestaan bij de proefnemingen.

Ook aan U, Zeergeleerde BERGANSIUS, mijn dank voor menigen goeden raad en Uw vriendelijke hulp.

Ten slotte een oprecht getuigenis van waardeering voor allen, mede-assistenten, oud-assistenten en technisch personeel van het laboratorium, die mij trouwe hulp verleenden bij de bewerking van dit proefschrift.

INHOUD.

HOOFDSTUK I.

	Blz.
Inleiding en historisch overzicht	1

HOOFDSTUK II.

Metingen met den snaargalvanometer	9
§ 1. Methode	9
§ 2. Vergelijking van het lichaam met een onvolkomen condensator en een polariseerende cel	12
§ 3. Beschouwingen over den weerstand en de polarisatie	22

HOOFDSTUK III.

Onderzoekingen met wisselstroomen	37
§ 1. Methode	37
§ 2. Resultaten van de metingen	41
§ 3. Beschouwingen over en berekening van den lichaamsweerstand en de capaciteit	44
§ 4. De invloed van sterke doorstroming	57

HOOFDSTUK IV.

Praetische toepassingen	60
-----------------------------------	----

HOOFDSTUK V.

Samenvatting	69
------------------------	----

HOOFDSTUK I.

INLEIDING EN HISTORISCH OVERZICHT.

De physische verschijnselen, die zich voordoen, wanneer men een electrischen stroom door het menschelijk lichaam voert, zijn vrij samengesteld. Zij kunnen niet op eenvoudige wijze worden verklaard door het lichaam gelijk te stellen aan een voorwerp, dat uitsluitend Ohmschen weerstand zou bezitten. Zoo zien wij bijv., dat de stroomsterkte van een gelijkstroom niet evenredig toeneemt met het spanningsverschil, dat wordt aangebracht. Het is alsof de weerstand des te grooter wordt, al naarmate men een geringer spanningsverschil aanbrengt.

Bij gebruik van wisselstroomen neemt de schijnbare weerstand van het lichaam af, wanneer de frequentie der stroomschommelingen wordt verhoogd, en ten slotte herinneren wij nog aan het verschijnsel, dat men waarneemt, wanneer men de stroomsterkte tracht te meten zoo spoedig mogelijk na het sluiten van een keten, waarin zich behalve het menschelijk lichaam nog een constant blijvend klein potentiaalverschil bevindt. In het eerste oogenblik is de stroom sterk, om even later belangrijk zwakker te zijn. Het is alsof de weerstand, die eerst gering was, snel tot een hoog bedrag stijgt.

Ter verklaring van de genoemde verschijnselen heeft men de polarisatie te hulp geroepen. Dat deze bij de doorstrooming van het menschelijk lichaam een rol speelt, was reeds

in 1834 aan PELTIER¹⁾ bekend, maar hoe groot haar invloed is, wordt zeer verschillend beoordeeld en ook nog heden ten dage is een bevredigende oplossing van de vele vraagstukken, die zich bij het onderzoek voordoen, niet gevonden.

Toch geldt het een belangrijke zaak.

De toepassing van electrische stroomen om organen te prikkelen is zoowel in de physiologie als in de praktische geneeskunde zeer uitgebreid. En de physiologische gevolgen der prikkeling kunnen niet goed begrepen, de therapeutische gevolgen niet naar waarde beoordeeld worden, als niet eerst de physische verschijnselen van de doorstrooming bekend zijn.

Wat gezegd is van de stroomen, die van buiten af door het lichaam worden gezonden, geldt ook voor de stroomen, die hun oorsprong in de organen van het lichaam zelf hebben en naar het een of ander meetinstrument worden afgeleid. Wij wijzen in dit verband niet alleen op de talrijke onderzoekingen, die op het gebied der electrophysiologie plaats hebben, maar ook op haar toepassingen in de praktijk der geneeskunde. Het moet toch wenschelijk worden genoemd, de physische voorwaarden van den psycho-galvanischen reflex te kennen en verder ook te weten of en in hoeverre men in den vorm van het Ekg de nauwkeurige wedergave mag zien van de potentiaalschommelingen, die door de hartsactie worden teweeggebracht.

Over de beteekenis der polarisatie loopen de meeningen der verschillende onderzoekers nog zeer uiteen. Terwijl wij van de polarisatie in zenuwen en van den strijd over de uitwendige en inwendige polarisatie zwijgen, wenschen wij in 't bijzonder de aandacht te vestigen op de polarisatie

¹⁾ Geciteerd naar CREMER. NAGEL's Handbuch der Physiol. des Menschen, IV blz. 911.

in de huid. Deze laatste oefent naar de meening van sommigen slechts een matigen invloed uit, terwijl vele anderen haar zeer hoog aanslaan en alle veranderingen in schijnbaren weerstand, die het menschelijk lichaam aanbiedt, wanneer het doorstroomd wordt, uit de huidpolarisatie en haar variaties meenen te kunnen verklaren.

De voornaamste vertegenwoordiger van de laatst genoemde richting is GILDEMEISTER¹⁾, die te zamen met zijn leerlingen (GALLER²⁾, BELOUSS³⁾ en KAUFHOLD⁴⁾ een uitvoerig onderzoek naar het vraagstuk heeft ingesteld. Het meerendeel der onderzoekingen van GILDEMEISTER e.s. heeft betrekking op den kikvorsch, eenige op den mensch, terwijl BELOUSS nog enkele zoogdieren en vogels onderzocht.

GILDEMEISTER ontleent zijn krachtigste argumenten aan zijn proeven op kikvorschen, die hij met wisselstroomen van verschillende frequentie tot 38000 perioden per seconde doorstroomde. Hij vond daarbij een duidelijke condensatorwerking, die met behulp van een variabele zelfinductie quantitatief bepaald werd. Hij vond verder, dat de kikvorsch als stroomgeleider zich gedraagt naar de regels, die WIEN⁵⁾

¹⁾ GILDEMEISTER, M. Ueber die im tierischen Körper bei elektrischen Durchströmung entstehenden Gegenkräfte. Pfl. Archiv. Bd. CXLIX.

———. Die sogenannte psychogalvanische Reflex und seine physikalisch-chemische Deutung. Pfl. Archiv. Bd. CLXII.

———. Ueber Polarisation, Kapazität und Leitungswiderstand tierischer Gewebe. Pfl. Archiv. Bd. CLXXVI.

²⁾ GALLER, H. Ueber den elektrischen Leitungswiderstand des tierischen Körpers. Pfl. Archiv. Bd. CXLIX.

³⁾ BELOUSS, A. Untersuchungen über den Einfluss von Elektrolyten auf die elektrische Leitfähigkeit und die Polarisation der tierischen Haut. Pfl. Archiv. Bd. CLXII.

⁴⁾ KAUFHOLD, R. Untersuchungen über das elektrische Leitungsvermögen der überlebenden menschlichen Haut. Archiv. f. Physiologie. 1919.

⁵⁾ WIEN, M. Ueber die Polarisation bei Wechselstrom. Ann. der Physik und Chemie, Bd. 58.

voor een polariseerende cel aangeeft en niet naar de regels, die voor een condensator of onvolkomen condensator gelden. De gevonden capaciteit zou dus polarisatiecapaciteit moeten zijn.

GALLER¹⁾ doorstroomde kikvorschen tegelijkertijd met wissel- en met gelijkstroom. Hij vond, dat de wisselstroomweerstand aanzienlijk kleiner is dan de gelijkstroomweerstand en nagenoeg constant blijft, terwijl de gelijkstroomweerstand bij stijgende spanning daalt. GALLER ziet met GILDEMEISTER in den wisselstroomweerstand de benaderde waarde van den werkelijken Ohmschen weerstand van het lichaam. Zij trekken de conclusie, dat het verschil tussen den wisselstroomweerstand en den gelijkstroomweerstand op de ontwikkeling van tegenelectromotorische krachten moet berusten. Deze werden door GILDEMEISTER²⁾ gemeten, die daarvoor hooge waarden: voor den kikvorsch b.v. tot 1,42 volt, voor den mensch tot 6,6 volt vond.

Het organisme geeft echter volgens hem een geheel ander verloop van de polarisatie te zien dan een polariseerende cel, die immers een tegenspanning levert, welke tot een zeker maximum steeds bijna gelijk is aan de polariseerende spanning, om nooit boven dit maximum uit te gaan, hoe hoog ook de polariseerende spanning wordt. Het bedoelde verschijnsel komt in de polarisatiekromme als een vrij scherpe knik te voorschijn, welke knik wordt gemist in de polarisatiekrommen, die GILDEMEISTER van het levende organisme geeft. Ook is opvallend het groote verschil tussen polariseerende en polarisatiespanning, dat steeds bestaat, ook al is de polariseerende potentiaal lager dan de maximale polarisatiepotentiaal. GILDEMEISTER spreekt zich over dit laatste ver-

1) GALLER, H. l. c.

2) GILDEMEISTER, M. l. c.

schijnsel niet uit. In het volgende hoofdstuk komen wij er nog nader op terug.

Wij merken verder nog op, dat GILDEMEISTER bij zijn onderzoek naar de capaciteit een belangrijke daling van den weerstand meende te vinden bij doorstroming met wisselstroomen van stijgende frequentie. Indien hij bij zijn onderzoek naar de grootte van de tegenelectromotorische kracht met veel hogere frequenties had gewerkt en daarbij de faseverschuiving had gecompenseerd, zou hij, op dezelfde wijze redeneerende als hij deed, hebben moeten besluiten, dat de tegenelectromotorische krachten nog grooter waren dan de reeds vermelde. Maar wij kunnen ons met zijn conclusies niet vereenigen en zullen in hoofdstuk II aantoonen, dat de maximale tegenelectromotorische krachten, die in de huid ontwikkeld kunnen worden, integendeel veel zwakker zijn. Slechts bij een enkele proef uit zijn reeks vinden wij compensatie van de faseverschuiving aangegeven.

Nog dient vermeld, dat GILDEMEISTER den wisselstroomweerstand van het lichaam heeft gemeten gedurende de gelijkstroomschommelingen die bij het psychogalvanisch reflexverschijnsel optreden. Ook daarbij vond hij den wisselstroomweerstand voor $n=5000$ tot 6000 en gecompenseerde faseverschuiving nagenoeg constant. Hij besloot hieruit, dat het verschijnsel berust op verandering in potentiaalverschil en wel op vermindering van de tegenelectromotorische kracht.

Evenzoo besluit BELOUSS¹⁾, dat de wisselstroomweerstand van de huid onveranderlijk is en dat de schijnbare weerstandaverandering, die bij een herhaaldelijk gecommuteerden gelijkstroom optreedt, aan veranderingen in de polarisatie moet worden toegeschreven.

1) BELOUSS, A. l. c.

De groote beteekenis van de polarisatie voor den schijnbaren weerstand van het lichaam, waartoe GILDEMEISTER e.s. besluiten, brengt hen ertoe ook de zeer sterke weerstandsvermindering tot $\frac{1}{30}$ van de oorspronkelijke waarde, zooals GAERTNER¹⁾ bij langdurige sterke doorstrooming van het lichaam vond, toe te schrijven aan vermindering van de polarisatie. Deze vermindering zou het directe gevolg kunnen zijn van een beschadiging van het weefsel door concentratieveranderingen der electrolyten²⁾.

Uit bijzondere onderzoekingen werd nog afgeleid, dat de huid het belangrijkste aandeel heeft, zoowel in den waren wisselstroomweerstand als in de ontwikkeling der tegen-electromotorische krachten. Dit neemt niet weg, dat soortgelijke verschijnselen ook aan allerlei ontvelde dieren en afzonderlijke organen gevonden werden zelfs nog aan kikkervorschorganen dagen lang na den dood van het dier. Koken van de organen in water doet ze echter verdwijnen.

Over een condensatorwerking van de huid wordt door verschillende onderzoekers gesproken, o.m. door S. GARTEN³⁾. Deze registreerde met den snaargalvanometer krommen, waaruit bleek, dat de stroomsterkte in een keten, waarin het menschelijk lichaam opgenomen is, direct na de sluiting hooger is dan korten tijd later. De vermindering der stroomsterkte geschiedt aanvankelijk snel, later langzamer. De krommen werden geregistreerd met een snaar, die nog iets periodisch was en volgens de ijkingskromme ongeveer 7 σ noodig had voor het bereiken van den einduitslag.

Evenals GILDEMEISTER oppert GARTEN de mogelijkheid, dat

1) GAERTNER, G. Untersuchungen über das elektrische Leitungsvermögen der menschlichen Haut. Wiener Med. Jahrbücher 1882.

2) KAUFHOLD, R. l.c.

3) GARTEN, S. Beiträge zur Kenntnis des Erregungsvorganges im Nerven und Muskel des Warmblüters. Zeitschrift f. Biologie. Bd. 52.

de huid als een dielectricum zou kunnen werken, dat de elektrodenvlacstaf en het onderhuidsche weefsel als twee condensatorplaten van elkaar scheidt. Aangezien een gelijkstroom wel door het lichaam kan gaan, zij het ook dat hij daarbij hoogen weerstand ontmoet, zou de aldus gevormde condensator een onvolkomene zijn.

Maar terwijl GARTEN over de juiste verklaring der verschijnselen nog in twijfel is en het onbeslist laat, of zij aan weerstandsverandering dan wel aan elektrische lading moeten worden toegeschreven, meent GILDEMEISTER de capaciteit op den voorgrond te moeten plaatsen en haar geheel als polarisatie-capaciteit te kunnen opvatten.

Zijn meening, dat de vorm van krommen, die den stroomloop kort na de sluiting van de keten aangeven, niet beslissen kan over de kwestie, of polarisatie dan wel electrostatische capaciteit in het spel is, deelen wij niet, zooals uit een volgend hoofdstuk zal blijken.

Een bijzondere beschouwing verdient de invloed, die de duur der doorstrooming op den weerstand heeft. Wij hebben reeds de publicatie van GAERTNER¹⁾ over dit onderwerp aangehaald en medegedeeld, dat KAUFHOLD²⁾ de sterke schijnbare weerstandsvermindering, die onder den invloed van een gelijkstroom optreedt, toeschrijft aan verminderde polarisatie. Daarentegen zoekt GAERTNER de oorzaak in een werkelijke vermindering van den Ohmschen weerstand en toont aan, dat deze afhankelijk is van de doorstroomingsduur en van de stroomsterkte. Onder gunstige omstandigheden kan men zelfs een vermindering tot $\frac{1}{30}$ van de oorspronkelijke waarde verkrijgen. Hij verrichtte zijn proeven op menschen en stelde vast, dat de regel ook voor versche

1) GAERTNER, G. l.c.

2) KAUFHOLD, R. l.c.

lijken doorgaat. Aangezien een ontvelde hand niët, de geïsoleerde epidermis het verschijnsel wèl vertoont, concludeert hij, dat de zetel van de weerstandsvermindering in de huid moet worden gezocht. Wij sluiten ons in zooverre bij de voorstelling van GAERTNER aan, dat ook wij een vermindering van den Ohmschen weerstand der huid bij doorstrooming aannemen, maar merken tevens op, dat de verschijnselen, die zich bij het doorstroomen van het lichaam vertoonen, door de aanwezigheid van twee streng van elkaar te scheiden weerstanden van de inwendige deelen en van de huid, door polarisatie en door de werking eener electrostatische capaciteit gecompliceerd zijn.

HOOFDSTUK II.

METINGEN MET DEN SNAARGALVANOMETER.

§ 1. Methode.

Een gelijkstroomketen met een spanning van 0,1 tot 20 volt, waarin zich het lichaam bevond, werd gesloten en na enkele honderdsten van een seconde weer geopend, terwijl de stroomschommeling met den snaargalvanometer werd geregistreerd. Soortgelijke proeven zijn reeds vroeger door andere onderzoekers gedaan, zooals wij in onze historische inleiding hebben uiteengezet, terwijl wij hier nogmaals in 't bijzonder willen wijzen op de krommen, die GARTEN¹⁾ registreerde. Toch zijn onze opnamen niet overbodig. Zij onderscheiden zich vooral door de snelheid, waarmede de stroomsterkte door de snaar werd aangegeven.

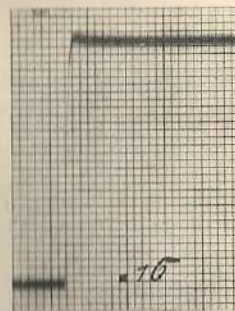


Fig. 1.

Ijningskromme. Absc. 1 deelstreep = 1σ ;
ordin. 1 deelstreep = 5×10^{-4} volt.

¹⁾ GARTEN, B. l. c.

Fig. 1 geeft de ijkingskromme van de snaar, waarmee een aantal metingen zijn verricht. Zij passeert bij een gevoeligheid van 10 mm. voor 5 millivolt in 1,2 σ den tweeden evenwichtsstand zonder noemenswaard daarover heen te gaan, terwijl haar weerstand zoo groot is, dat ook bij kortsluiting geen invloed van electromagnetische demping kon worden aangetoond.

Het model van den snaargalvanometer en de daarin uitgespannen snaren zijn sinds jaren in het laboratorium in gebruik, doch nog niet beschreven.

Een tweede onderscheid met het werk van vroegere onderzoekers bestaat in de variatie van de elektrische spanning, waarmee onze opnamen zijn gemaakt. Vooral de vergelijking tusschen de krommen, die bij verschillende spanningen zijn opgenomen, maakt het mogelijk, de verschijnselen te verklaren en de noodige conclusies te trekken.

Het lichaam werd met het overige gedeelte van de stroomketen door de gewone dompelelectroden verbonden. Elk lichaamsdeel, — hetzij een vinger hetzij de geheele onderarm, — bevond zich te zamen met een geamalgameerde zinkplaat in een glazen vat, dat met een 1-procents keukenzoutoplossing was gevuld. Dikwijls werd ook gebruik gemaakt van klokvormige glazen elektroden met gummiranden, die stevig op de huid aansloten (klokelectroden).

Behalve van het menschelijk lichaam registreerden wij krommen, waarbij dit was vervangen door een onvolkomen condensator met een in serie geschakelden weerstand w (nabootsing I, zie fig. 2) of door een polariseerende cel (nabootsing II). De onvolkomen condensator bestond uit een parallel geschakeld systeem van een micacondensator C en een weerstand r . Als polariseerende cel werd gebruikt een platina-zwavelzuurelement, n.l. twee platinadraadjes van 0,3 of 1 mm diameter, 4 cm diep in een 5% zwavelzuur-

oplossing gedompeld op een onderlingen afstand eveneens van 4 cm.

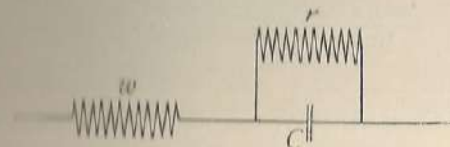


Fig. 2.

Schema van nabootsing I.

Het schakelschema vindt men in figuur 3 vereenvoudigd weergegeven. De hoofdstroom, die met een vette lijn is getekend, gaat van de batterij Ae door de weerstanden W_1 en W_2 naar den schakelaar S_1 , welke laatste automatisch door het registreertoestel gesloten en geopend wordt. De spanning

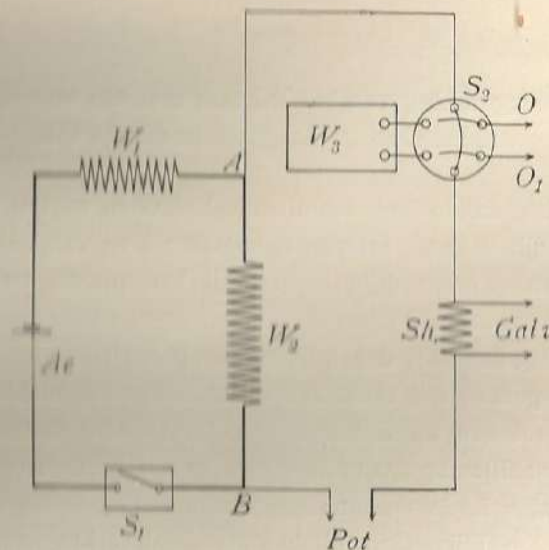


Fig. 3.

Schakelschema. Ae batterij W_1 en W_2 regelweerstand. W_3 substitutieweerstand voor het object OO_1 . Pot potentiometer.

tusschen de punten A en B wordt met de weerstanden W_1 en W_2 geregeld en kan met een voltmeter, — die evenwel tijdens de opname steeds uitgeschakeld is, — worden afgelezen. Van deze beide punten wordt de stroom afgeleid, die door den galvanometer — met zijn nevensluiting Sh — en het object $O O_1$ wordt gevoerd. Bij $Pot.$ is een potentiometer ingeschakeld, terwijl men met behulp van den schakelaar S_2 in staat is een weerstand W_2 in de plaats van het object $O O_1$, dat is dus in de plaats van het menschelijk lichaam of zijn nabootsing te substitueeren. Het is misschien niet overbodig te vermelden, dat de in het schema met S_1 aangegeven schakelaar uit twee deelen bestaat: 1e. een kwiksluiter en 2e. een contactverbreker, waarmede twee kleine, op elkaar gedrukte platinavlakken met groote snelheid van elkaar kunnen worden verwijderd.

§ 2. Vergelijking van het lichaam met een onvolkomen condensator en een polariseerende cel.

Wij zien, dat in de verschillende krommen zoowel van het menschelijk lichaam als van nabootsing I en van nabootsing II toppen te voorschijn komen bij het openen en sluiten van den stroom. De vorm van deze toppen en de verhouding van hun grootte tot den blijvenden uitslag zijn verschillend, al naar gelang wij te doen hebben met een polariseerende cel of met een onvolkomen condensator en naarmate wij met verschillende spanningen werken. Bij de onvolkomen condensator is de verhouding tusschen de grootte van den top en den blijvenden uitslag steeds dezelfde, met welke spanning wij ook werken. Bij een polariseerende cel is de genoemde verhouding afhankelijk van de spanning. De krommen, fig. 4, 5, 6 en 7 illustreeren dit.



Fig. 4.

Nabootsing I. $V = 0,1$ volt, $Sh = 245 \Omega$ 1).

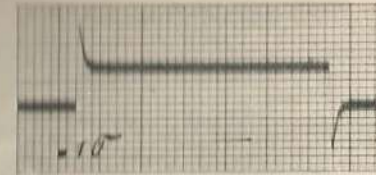


Fig. 5.

Idem. $V = 9,9$ volt, $Sh = 2,7 \Omega$.

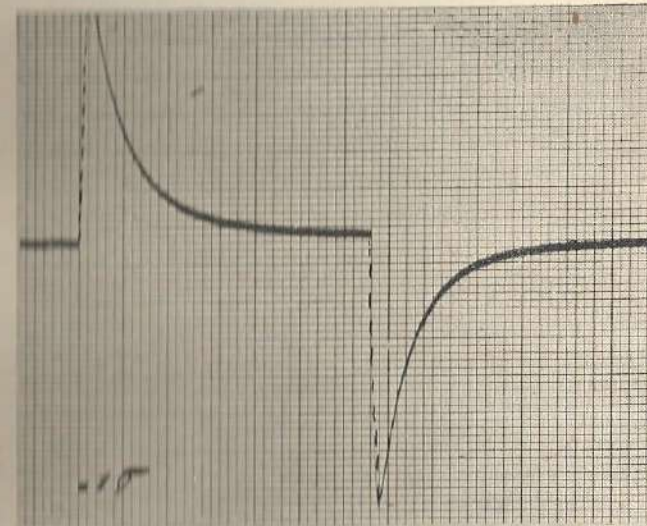


Fig. 6.

Platina-zwavelzuur cel. $V = 0,1$ volt, $Sh = 24 \Omega$.

Totale weerstand buiten de cel 100Ω .

1) V is het potentiaalverschil tusschen de punten A en B ; Sh de shunt (zie fig. 3).

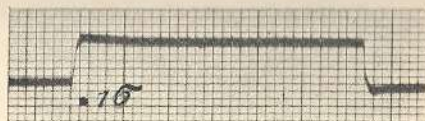


Fig. 7.

Idem. $V = 15,5$ volt, $Sh = 0,2 \Omega$.Totale weerstand buiten de cel 100Ω .Extra voorschakelweerstand voor den galvanometer 110000Ω .

In fig. 4 en 5, afkomstig van nabootsing I, is de verhouding van den blijvenden uitslag tot den top ongeveer als 1:2 en nagenoeg gelijk, terwijl de spanning van 0,1 tot 9,9 volt werd opgevoerd. De waarden voor w , r en C (zie fig. 2) bedroegen hier 1000Ω , 10000Ω en $0,12 \mu F$.

Voor de polariseerende cel echter is de zaak anders. Bij spanningen, die ver beneden den maximalen polarisatiepotentiaal liggen, is de blijvende uitslag zeer klein — in onze proeven zelfs niet afleesbaar — en eerst bij hogere spanningen treedt een duidelijke, blijvende uitslag op. De toppen daarentegen zijn hoog bij de lage potentiaalverschillen, om zeer snel af te nemen bij de potentiaalverschillen boven den polarisatiepotentiaal. De polarisatiepotentiaal voor platina in 5 % zwavelzuuroplossing bedraagt ongeveer 2 volt. Fig. 6 toont een kromme opgenomen bij 0,1 volt. Na een snellen, grooten top keert de snaar in 0,033 sec. langzaam verder terug tot op 1 mm boven den nulstand en is dan nog niet tot rust gekomen. Fig. 7 echter laat duidelijk een periode van constanten stroom zien na een zeer lagen top. Vergelijking met de ijkingskromme van fig. 1 leert, dat het aandeel van de polarisatie in de vorming van den top nagenoeg niets is. Deze kromme is opgenomen bij een spanning van 15,5 volt. Neemt men krommen op met spanningen, die tusschen deze beide uitersten in zijn gelegen, dan komen alle tusschenvormen tusschen de figuren 6 en 7

voor den dag; bij hogere spanningen worden de toppen regelmatig kleiner in verhouding tot den blijvenden uitslag.

Vergelijken wij thans de bovengegeven krommen der beide nabootsing met die, welke van het menschelijk lichaam zelf zijn verkregen en in de figuren 8, 9 en 10 zijn afgebeeld. Men ziet gemakkelijk, dat deze laatste in sommige opzichten met de krommen van nabootsing I, in andere opzichten daarentegen met die van nabootsing II overeenkomen,

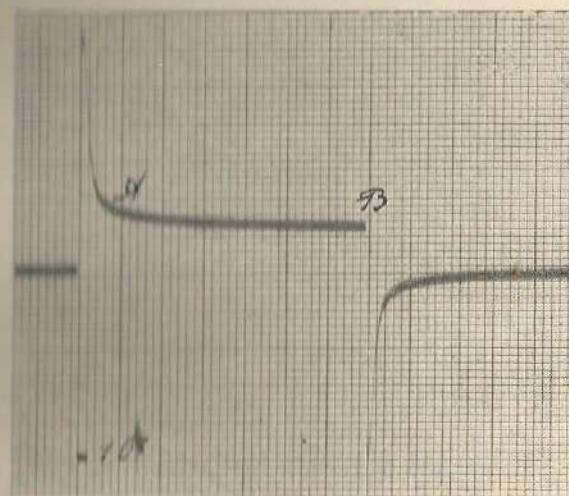


Fig. 8.

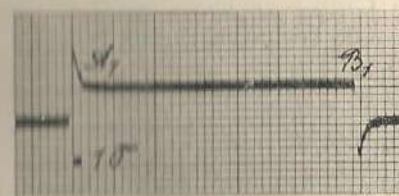
2 vingers in 1 % NaCl-opl. $V = 0,1$ volt, $Sh = 610 \Omega$.

Fig. 9.

Idem, $V = 9,5$ volt, $Sh 1,5 \Omega$.



Fig. 10.

Idem. $V = 19$ volt, $Sh = 0,4 \Omega$.

zoodat de conclusie voor de hand ligt, dat wij in het lichaam zoowel met polarisatie als met een electrostatische capaciteit te maken hebben.

Dat de polarisatie een rol speelt, kan gezien worden uit fig. 8, die opgenomen is met 0,1 volt en waarin het stuk van A tot B op een langzaam zich ontwikkelende tegenelectromotorische kracht wijst. Ofschoon in fig. 8 de ontwikkelde tegenelectromotorische kracht zwakker is dan in fig. 6, en de blijvende uitslag belangrijk groter, zoo zijn beide figuren principieel toch volkomen met elkaar vergelijkbaar, zoodat het wel niet aan twijfel onderhevig kan worden geacht, dat er in het lichaam een proces van polarisatie plaats grijpt.

Maar onmiskenbaar komt in onze krommen ook de invloed van een electrostatische capaciteit te voorschijn, en het is vooral op dit laatste veel betwijfelde en bestreden punt, dat wij de aandacht wenschen te vestigen. Fig. 9, die opgenomen is bij 9,5 volt, is vergelijkbaar met fig. 5 van nabootsing I. In deze beide figuren zijn in scherpe tegenstelling met fig. 7 van de polariseerende cel bij een gelijken, blijvenden uitslag de begin- en eindtoppen hoog en spits. De invloed van de polarisatie is in fig. 9 niet meer waarneembaar, daar het stuk tusschen A_1 en B_1 horizontaal loopt. In fig. 10 is het stuk $A_2 B_2$ zelfs een weinig bovenwaarts gericht, hetgeen in tegenstelling met het effect van de polarisatie is en een toeneming aantoonst van de stroomsterkte tijdens den duur der doorstrooming. De begin- en eindtoppen

in de figuren 9 en 10 kunnen dus niet aan polarisatie worden toegeschreven.

Indien men dit toch zou beproeven te doen, zou men bij de verklaring van sommige krommen in moeilijkheid komen en aan den polarisatiepotentiaal een veel grotere waarde moeten toekennen, dan hij feitelijk heeft ¹⁾. Op grond van de verhouding van den top tot den blijvenden uitslag in de kromme van fig. 10 zou hij minstens 3,2 volt moeten bedragen, want er dient in aanmerking genomen te worden, dat de top door de traagheid van de snaar nog te laag is weergegeven. Was nu de polarisatiepotentiaal werkelijk zoo hoog, dan zou een blijvende uitslag met lage spanningen als b.v. 0,1 volt al hoogst onwaarschijnlijk zijn in een verhouding tot den top, die de kromme in fig. 8 aangeeft.

Wij moeten nu nog bespreken waarom in fig. 10 de toppen lager zijn dan in fig. 9, terwijl toch in nabootsing I de toppen in verhouding tot den blijvenden uitslag even hoog blijven, met welke spanningen ook mag worden doorstroomd. Het verschijnsel wordt op eenvoudige wijze en geheel bevredigend verklaard door de omstandigheid, dat, zooals reeds aan CLAUERNER ²⁾ bekend was, de weerstand r_m der opperhuid bij sterke doorstrooming afneemt. Deze weerstandsvermindering is zeer belangrijk. Wij komen er in het volgende hoofdstuk nog nader op terug, terwijl wij thans slechts kortelijks wenschen te wijzen op de toeneming van den snaaruitslag tusschen A_2 en B_2 in fig. 10, die gevolg is van dezelfde oorzaak.

Om den invloed van een vermindering van den weerstand der nevensluiting op de strooming in een onvolkomen condensator te demonstreeren, reproduceeren wij in de figuren

¹⁾ Zie pag. 20 volg.

²⁾ Zie hoofdstuk I.

11 en 12 een paar krommen, die van nabootsing I zijn genomen. In fig. 11 had de nevensluiting aan den condensator een weerstand van $10000\ \Omega$, in fig. 12 daarentegen slechts

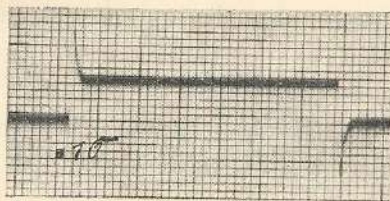


Fig. 11.

Nabootsing I. $C = 0,12\ \mu\text{F}$, $w = 1000\ \Omega$, $r = 10000\ \Omega$,
 $V = 0,9\ \text{volt}$, $Sh = 32\ \Omega$.

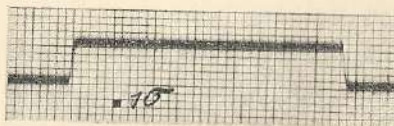


Fig. 12.

Idem. $r = 2000\ \Omega$. $Sh = 8,8\ \Omega$.

van $2000\ \Omega$. Men ziet, dat de toppen door deze vermindering van den weerstand geheel tot verdwijnen worden gebracht.

Tot dezelfde conclusies als bij de metingen met de vingers kwamen wij op grond van verdere proeven, waarbij andere deelen der huid met elektroden van verschillende grootte in aanraking werden gebracht. Een hand werd daartoe tot over het polsgewricht in een dompelelektrode gestoken, terwijl op den onderarm derzelfde zijde een klokelektrode werd geplaatst, die haar vloeistof met een huidoppervlakte van ongeveer $5\ \text{cm}^2$ in aanraking bracht.

In fig. 13 en 14 reproduceeren wij een paar op deze wijze verkregen krommen, en wel is fig. 13 opgenomen bij een spanning van $0,4$, fig. 14 bij een spanning van $9,5$ volt.

Bij beide opnamen was de klokelektrode positief, de stroom dus dalende. Bij omkeering van de stroomrichting werden krommen verkregen, die slechts zoo weinig van de boven-

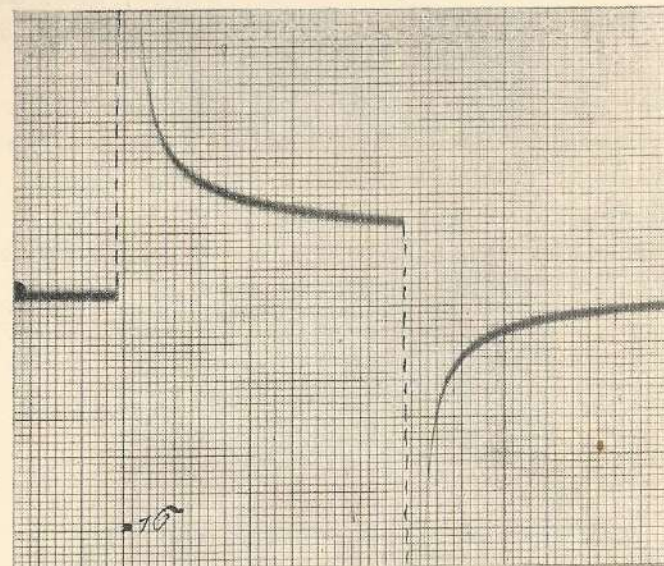


Fig. 13.

Arm met dompel- en klokelektrode. $1\ \%$ NaCl. opl.
 $V = 0,4\ \text{volt}$, $Sh = 3100\ \Omega$.

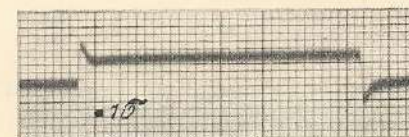


Fig. 14.

Idem. $V = 9,5\ \text{volt}$, $Sh = 1,4\ \Omega$.

afgebeelde verschillen, dat wij het overbodig achten, die eveneens hier weer te geven. Bij dalenden stroom zijn de weerstanden een weinig grooter dan bij stijgenden, maar

overigens kunnen de verschillen nauwelijks worden bemerkt. De vermindering van den weerstand bij sterke doorstrooming, gekenmerkt door een opgaande snaarbeweging, dat is dus een beweging, die tegengesteld is aan die, welke door polarisatie wordt veroorzaakt, komt in fig. 14 duidelijk voor den dag.

Gaan wij thans na, welken invloed een groote weerstand uitoefent, die in serie met het object wordt geschakeld. Zooals te verwachten is, maakt hij de toppen kleiner en is hij groot genoeg, dan brengt hij ze geheel tot verdwijnen. Deze gang van zaken geldt zoowel voor de polarisatiecel als voor nabootsing I en voor het lichaam.

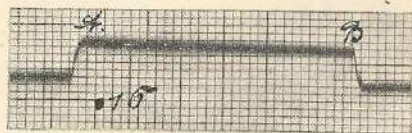


Fig. 15.

Platina-zwavelzuurcel. $V = 0,1$ volt, $Sh = 100 \Omega$. Totale weerstand buiten de cel $\pm 5100 \Omega$.

In fig. 15 is van een polarisatiecel onder overigens dezelfde omstandigheden als waarbij fig. 6 is vervaardigd, een kromme geregistreerd. De aangelegde spanning bedroeg in beide figuren $0,1$ volt, maar in fig. 15 was een weerstand van 5100Ω in serie met de cel geschakeld met het gevolg, dat de enorme toppen van fig. 6 in fig. 15 geheel tot verdwijnen zijn gebracht. Typisch voor het effect van de polarisatie blijft evenwel de langzame daling van het snaarbeeld tusschen A en B, die, zooals niet nader behoeft te worden betoogd, door de langzaam zich ontwikkelende tegenelectromotorische kracht wordt veroorzaakt.

In de beide figuren 16 en 17 geven wij de krommen van nabootsing I. In de eerstgenoemde figuur is $w = 10.000$, in

de laatstgenoemde $w = 100.000 \Omega$ genomen. Men ziet, dat de toppen door den grooteren weerstand ook hier tot verdwijnen worden gebracht.

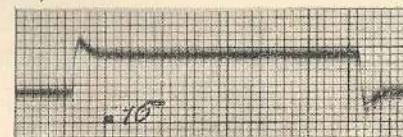


Fig. 16.

Nabootsing I. $w = 10.000 \Omega$, $V = 6$ volt, $Sh = 11 \Omega$.



Fig. 17.

Idem. $w = 100.000 \Omega$, $Sh = 61 \Omega$.

Bij het menschelijk lichaam valt hetzelfde te constateeren als bij de twee nabootsingen. Fig. 18 is opgenomen van twee vingers, terwijl een weerstand van 50.000Ω in serie met het lichaam is geschakeld. Vergelijkt men deze figuur met de figuren 8 en 9, dan is het opvallend, hoe klein in fig. 18 de toppen zijn geworden. De spanning bij de opname dezer figuur bedroeg $2,06$ volt, die van de beide andere

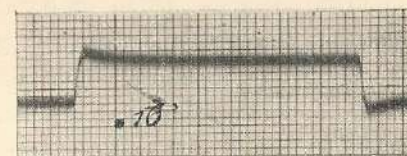


Fig. 18.

2 vingers in 1% NaCl. opl. $V = 2,06$ volt, $Sh = 88 \Omega$.
Totale weerstand buiten het lichaam 50.000Ω .

figuren resp. 0,1 en 9,5 volt, zoodat fig. 18 zonder extra-weerstand toppen zou hebben vertoond, die in hoogte tussehen die van fig. 8 en 9 in gelegen zouden zijn.

Blijkbaar is voor een opname van de beide vingers, die zelf reeds aan den stroom een grooten weerstand bieden, de toevoeging van een extraweerstand van 50.000Ω niet voldoende om de toppen geheel te laten verdwijnen. Dompelt men in plaats van alleen de vingers de beide onderarmen geheel in de keukenzoutoplossing, zooals dat in de electrocardiographie gebruikelijk is, dan is daartoe een veel geringere extraweerstand reeds voldoende. Wij zullen dat in hoofdstuk IV met een voorbeeld nader bewijzen.

§ 3. Beschouwingen over den weerstand en de polarisatie.

Wij onderscheiden in het lichaam twee weerstanden streng van elkaar, n.l. dien van de opperhuid, dien wij r_m noemen en dien van de inwendige deelen, dien wij w_m noemen. Bij onze proeven met de vingers treedt de stroom door den eenen vinger binnen, gaat door de middelhand heen en treedt door den anderen vinger weder uit. De weerstand moet dus bij deze proeven genoemd worden $w_m + 2r_m$. In het volgende hoofdstuk, waar een aantal metingen met wisselstroomen beschreven zullen worden, zullen wij de waarden van w_m en r_m leeren kennen. Deze waarden te berekenen uit de krommen, die met den snaargalvanometer zijn geregistreerd, is, zoo niet onmogelijk, dan toch zeker niet eenvoudig. Desniettegenstaande is het wenschelijk, dat wij den vorm onzer krommen in verband met de weerstanden van het lichaam aan een beschouwing onderwerpen.

Daartoe maken wij gebruik van een schematische voorstelling, die in principe overeenkomt met die, welke reeds

door vroegere onderzoekers met name GARTEN¹⁾ is gegeven en door fig. 19 wordt afgebeeld.

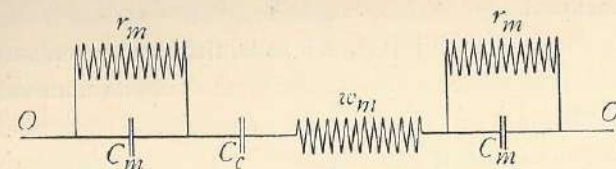


Fig. 19.

C_m en r_m : capaciteit, resp. huidweerstand van één vinger.
 w_m = weerstand van het inwendige weefsel. C_c = polarisatiecapaciteit.

De figuur veronderstelt de aanwezigheid van twee met een stroombron verbonden onpolariseerbare elektroden, in elk waarvan een der vingers van een hand is gedompeld. De weerstand in de opperhuid van elken vinger wordt voorgesteld door r_m , die van de inwendige deelen, welke den stroom van den eenen vinger naar den anderen geleiden, door w_m . C_m beteekent de dielectrische capaciteit, die steeds aanwezig moet zijn, waar twee goede geleiders door een niet of slecht geleidende laag zijn gescheiden. De goede geleiders zijn hier de vochtige buitenvlakte der huid en de inwendige deelen, die in de vingers onder de huid zijn gelegen, terwijl de slecht geleidende laag de opperhuid zelf is. Het complex $C_m r_m$ stelt voor iederen vinger den onvolkomen condensator voor, waarvan wij in een volgend hoofdstuk de capaciteit zullen trachten te meten. De polarisatiecapaciteit wordt weergegeven door C_c .

In bovenstaande schematische voorstelling is geen rekening gehouden met de weerstandsvermeerdering, die door de polarisatie wordt veroorzaakt, daar zij, zooals wij op p. 48 in het hoofdstuk over wisselstroomen nader zullen uiteenzetten, slechts zeer gering is en in onze omstandigheden ten

1) l. c.

opzichte van elk der weerstanden w_m en r_m , zonder tot een noemenswaardige fout aanleiding te geven, mag worden verwaarloosd.

Men denke zich bij OO_1 de aansluiting aan een stroombron, den galvanometer en verschillende weerstanden volgens het schema, dat in fig. 3 p. 11 is afgebeeld en vrage zich af, welken uitslag de galvanometer zal vertoonen, wanneer de stroom plotseling wordt gesloten.

In het eerste moment na de sluiting zal de stroom de capaciteiten passeeren, alsof deze kortgesloten zijn en nemen wij aan, dat de snaar in staat is, zich in een oneindig kleinen tijd in te stellen, dan zal bij afwezigheid van zelfinductie de grootte van den uitslag, behalve door de constanten van den galvanometer, uitsluitend bepaald worden door de spanning van de stroombron en de weerstanden, die zich in de keten bevinden.

De kortsluiting van C_m geldt tevens voor r_m zoodat wij in het menschelijk lichaam alleen nog met w_m behoeven rekening te houden. Zijn dus de weerstanden in de keten buiten het lichaam bekend, dan kan uit de grootte van den uitslag het bedrag van w_m worden berekend.

In een volgend hoofdstuk, waar de onderzoekingen met wisselstroomen zullen worden behandeld, zullen wij een methode leeren kennen om de werkelijke waarde van w_m te vinden. Daar vonden wij bij de proefpersonen W. en Z., — zie de tabellen op p. 42 en 43 — voor w_m in een rond getal 1000 Ω . Andere niet vermelde metingen gaven waarden van dezelfde orde van grootte. Nemen wij aan, dat deze waarde ook geldt voor den proefpersoon, die bij het registreeren van de krommen van fig. 8, 9 en 10 heeft dienst gedaan, dan zouden deze krommen ongeveer driemaal hogere toppen hebben moeten geven dan zij nu vertoonen. De top van fig. 8, die een hoogte bereikt van 31,3 mm, zou 3,2 maal,

die van fig. 9 ... 3,1 en die van fig. 10 ... 2,7 maal hooger moeten zijn. Zij bereiken deze hoogte niet, omdat het door ons gebruikte meetinstrument, mag het ook snel heeten in vergelijking met vele andere, toch nog zeer ver verwijderd is van de vereischte — oneindig groote — snelheid van aanwijzing.

Wij zouden ons doel kunnen benaderen door een nauwkeurige analyse der krommen¹⁾, maar wij hebben dit nagelaten, daar wij op die wijze toch geen grootere nauwkeurigheid zouden kunnen bereiken dan verkregen wordt bij de meting van w_m met wisselstroomen. Slechts zij hier opgemerkt, dat een ruwe schatting, zooals die in verband met den vorm der ijkingkromme van fig. 1 kan worden uitgevoerd wel ongeveer ook tot een drievoudige verhooging van de toppen leidt.

Wijden wij onze aandacht thans aan dat gedeelte der krommen, waar het snaarbeeld een rechte lijn schrijft, zooals dat in de figuren 9 en 10 tusschen A_1 en B_1 resp. A_2 en B_2 het geval is. In deze periode van de doorstrooming baart ons de eindige snelheid van de snaarbeweging geen zorg meer.

Bij de kromme van fig. 8, waar slechts een klein potentiaalverschil van 0,1 volt was aangebracht en waar het snaarbeeld bij B nog dalende is, speelt de polarisatie een rol, die een berekening van den weerstand bemoeilijkt. Daarentegen mag in de figuren 9 en 10, waar aanzienlijke potentiaalverschillen van resp. 9,5 en 19 volt toegepast zijn, de invloed der polarisatie worden verwaarloosd en kan een weerstandsmeting met nauwkeurigheid plaats vinden. Uit het schema

¹⁾ W. EINTHOVEN. Weitere Mitteilungen über das Saitengalvanometer. Analyse der saitengalvanometrischen Kurven. Masse und Spannung des Quarzfadens und Widerstand gegen die Fadenbewegung. Annalen der Physik. Vierte Folge. Bd. 21.

van fig. 19 volgt, dat wij hier met de som der weerstanden te doen hebben, n.l. $w_m + 2r_m$.

Deze waarde bedraagt voor den snaaruitslag tusschen de punten A_1 en B_1 in figuur 9: 6800 Ω en tusschen A_2 en B_2 in figuur 10: 2930 Ω , welke bedragen geheel in overeenstemming zijn met de uitkomsten, die bij meting met wisselstroomen zijn verkregen.

Wij wijzen in 't bijzonder op de vermindering van den weerstand bij toepassing van grootere potentiaalverschillen. Deze vermindering wordt veroorzaakt door het verschijnsel, dat r_m afneemt bij sterke doorstrooming. Een nader bewijs hiervoor zal in het volgende hoofdstuk worden gegeven.

Op de krommen, die met de klok- en dompelelectroden zijn verkregen, kunnen dezelfde beschouwingen worden toegepast als op die bij de vingers. Alleen moet in de plaats van $2r_m$ hier r_m worden gelezen, daar van de zeer ongelijke elektroden-oppervlakken wij den weerstand bij de dompelelectrode tegen dien bij de klokelectrode mogen verwaarlozen.

In fig. 13 zijn de toppen bij een potentiaalverschil van 0,4 volt zoo hoog, dat zij niet meer op de plaat worden afgebeeld, terwijl wegens de polarisatie de snaar nergens een horizontale lijn schrijft.

Op de plaats van het nagenoeg horizontale deel der kromme in fig. 14 bereikt $w_m + r_m$ bij een potentiaalverschil van 9,5 volt een bedrag van 6820 Ω . Bij de sterkere doorstrooming zien wij den weerstand ook hier weder kleiner worden.

Bij het gebruik van de kleine klok- en de groote dompelelectrode doet de vraag zich voor, of de richting, waarin doorstroomd wordt ook invloed uitoefent op de weerstandsvermindering. Een opzettelijk door ons verricht onderzoek toonde aan, dat deze vraag — praktisch gesproken — ontkennend moet worden beantwoord. In welke richting ook

doorstroomd, blijkt de huid haar weerstand te verkleinen.

Wij hebben nog een aantal proeven gedaan om op eenigszins andere wijze den invloed van sterke doorstrooming aan te toonen en wel namen wij krommen op bij een proefpersoon vóór en na sterke doorstrooming. Deze proeven bevestigen de resultaten der boven beschrevene: na de doorstrooming zijn de weerstanden kleiner. De resultaten zijn echter niet zoo sprekend als die der eerste reeks. Neemt men n.l. de krommen met een groot potentiaalverschil op, dan heeft men reeds een toestand, waarbij de weerstand van de huid gering is. Registreert men krommen met een klein potentiaalverschil, dan wordt het verschijnsel van weerstandsvermindering gecompliceerd door verandering in de polarisatie.

Een voorbeeld ter toelichting. De kromme van fig. 8 is vóór, die van fig. 20 onmiddellijk na doorstrooming opgenomen. De doorstrooming geschiedde met een gelijkstroom van 2 milliampère gedurende 1 minuut. Overigens zijn beide krommen onder dezelfde omstandigheden opgenomen van voor- en middelvinger van dezelfde hand, welke vingers gedurende de geheele proef onbewegelijk in de elektroden gedompeld bleven. Het potentiaalverschil bedroeg in beide gevallen 0,1 volt, de nevensluiting aan den galvanometer 610 Ω .

In fig. 20 is de uitslag der snaar, onmiddellijk nadat zij haar scherpen top geschreven heeft, ongeveer 5-maal grooter dan in fig. 8. Hadden wij geen rekening te houden met de polarisatie, dan zouden wij daaruit kunnen besluiten, dat in fig. 20, — dus na de doorstrooming — de weerstand 5-maal kleiner was. Terwijl wij inderdaad weten, dat de weerstand door de doorstrooming belangrijk verkleind moet zijn, ontgaat ons echter de mogelijkheid het bedrag van de verkleining te meten, want ook het vermogen van de huid om te polariseeren is door de voorafgaande sterke door-

strooming verminderd. De 5-maal grootere uitslag in fig. 20 is dus gedeeltelijk door vermindering van weerstand, gedeeltelijk door vermindering van polarisatie veroorzaakt.

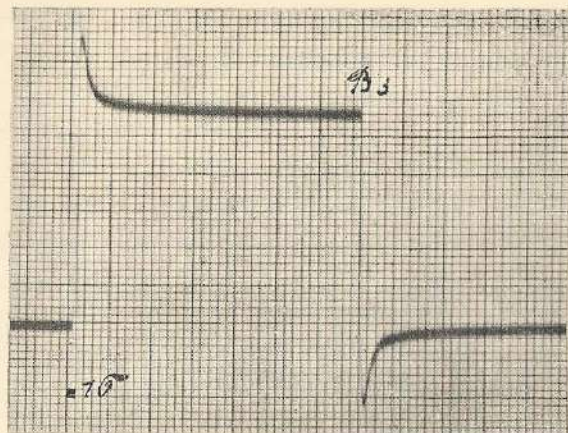


Fig. 20.

$$V = 0,1 \text{ volt, } Sh = 610 \Omega.$$

Het laatstgenoemde feit kan direct uit den vorm der krommen worden afgeleid. Beschouwen wij daartoe een stuk van elk der krommen ter lengte van 20 schaaldeelen, een tijd representeerende van 0,02 seconde, eindigende in B (fig. 8) resp. B_3 (fig. 20). Wij zien, dat dit deel der kromme in beide figuren nog dalende is tengevolge van zich ontwikkelende polarisatie. In fig. 8 bedraagt de daling 0,7 mm, in fig. 20 daarentegen slechts 0,3 mm. Geven wij de daling aan in verhouding tot de grootte van den uitslag, dan blijkt het verschil nog aanzienlijker te zijn. In fig. 8 bedraagt de daling 12 %, in fig. 20 daarentegen slechts 1,05 % van den geheelen uitslag.

Toont de vorm der krommen dus duidelijk aan, dat wij naast de vermindering van den weerstand een vermindering

van de polarisatie in de huid verkrijgen, wanneer zij met een sterken stroom wordt doorstroomd, ook op theoretische gronden moeten wij aannemen, dat weerstands- en polarisatiewijziging steeds parallel gaan en in denzelfden zin plaats hebben. Beide verschijnselen toch zijn in de huid gevolgen van eenzelfde oorzaak, te weten de verandering in ionenconcentratie. Neemt de ionenconcentratie toe, dan nemen weerstand en polarisatie beide af en omgekeerd.

Stellen wij ten slotte nog de vraag hoe groot de polarisatiepotentiaal in de huid wel kan worden. Om haar te meten kan men als volgt te werk gaan. Men doorstroomt de huid eenigen tijd met een sterken stroom en opent daarna de keten. Reeds na eenige weinige duizendsten van een seconde zal de electrostatische lading vereffend zijn, daar de huid immers slechts een zeer onvolkomen condensator is. De polarisatielading blijft echter geruimen tijd bestaan. Haar spanning kan door compensatie met een tegenelectromotorische kracht of met andere woorden met behulp van een potentiometer worden gemeten zonder dat de huid stroom behoeft te geven. Stroomsterktemeting na inschakeling van een grooten weerstand b.v. $10^5 \Omega$ in de keten zal evenzeer tot het doel leiden.

De laatstgenoemde methode hebben wij toegepast. Het schakelschema voor dit onderzoek geeft fig. 21. Wij doorstroomden het lichaam gedurende 5 sec. uit een batterij van accumulatoren bij een spanning van 10 of van 2 volt. Dan werd door het opheffen van een kortsluiting S_2 een weerstand W_2 van $10^5 \Omega$ in de keten gebracht en de galvanometer ingeschakeld zonder dat de stroom onderbroken werd. Vervolgens werd de stroombron uitgeschakeld met behulp van S_1 en 0,05 seconde later een kortsluiting S_3 aan den galvanometer aangebracht. Alle schakelaars werden automatisch in werking gesteld.

De metingen werden verricht met een nieuwe snaar van $28000\ \Omega$, waarvan fig. 22 de ijkingskromme weergeeft. Bij een gevoeligheid van 10 mm voor 20×10^{-8} volt, d.i. dezelfde gevoeligheid, waarmee de krommen werden geregistreerd, passeert zij in iets meer dan 1σ den eindstand, dien zij slechts met 1% van den uitslag overschrijdt.

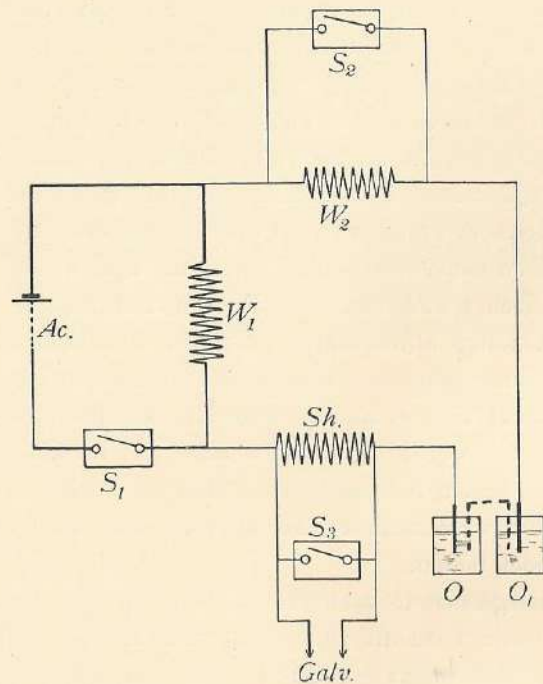


Fig. 21.

Schakelschema voor de meting van den polarisatiepotentiaal.

Fig. 23 geeft een kromme, waaruit de tegenelectromotorische kracht kan worden gemeten. De kromme is opgenomen, terwijl de proefpersoon beide armen tot even onder de ellebogen in de 1% keukenzoutoplossing van de gewone, onpolariseerbare dompelelectroden gebracht had.

De batterij *Ac* van 10 volt levert een stroom, die door

de nevensluiting W_1 en het lichaam OO_1 gaat, terwijl de galvanometer en de weerstand W_2 zijn kortgesloten. Deze toestand, waarbij de stroom, die door het lichaam vloeit,

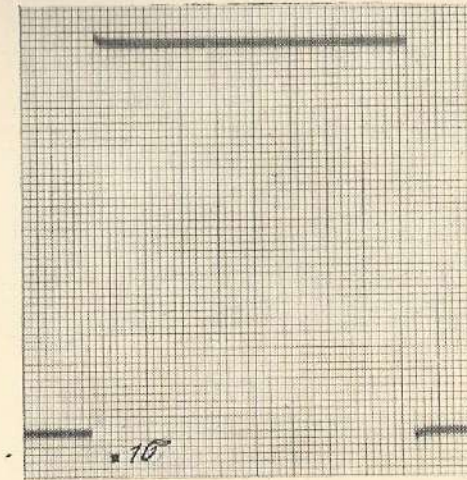


Fig. 22.

Ijkingskromme. Absc. $1\text{ dlstr.} = 1\sigma$. Ordin. $1\text{ dlstr.} = 2 \times 10^{-8}$ volt.

ongeveer 10 milliampère sterk is, blijft 5 seconden aanhouden. Daarna worden W_2 ten bedrage van $10^5\ \Omega$ en de galvanometer met zijn shunt van $1000\ \Omega$ ingeschakeld en begint de registratie. Nu wordt eerst door de vallende plaat het contact S_1 verbroken, waardoor de batterij wordt uitgeschakeld. Dit oogenblik wordt in de kromme door de plotselinge stijging bij *a* aangegeven, terwijl wij zien, dat de snaar, na een kleinen top *tp* te hebben geschreven, zich instelt op een hoogte van $52,8\text{ mm}$ boven den beginstand.

De top *tp* moet niet aan depolarisatie of aan de vereffening van een electrostatische lading worden toegeschreven, doch berust voor het grootste gedeelte op een andere oorzaak. Dit wordt duidelijk, wanneer wij het menschelek lichaam door een

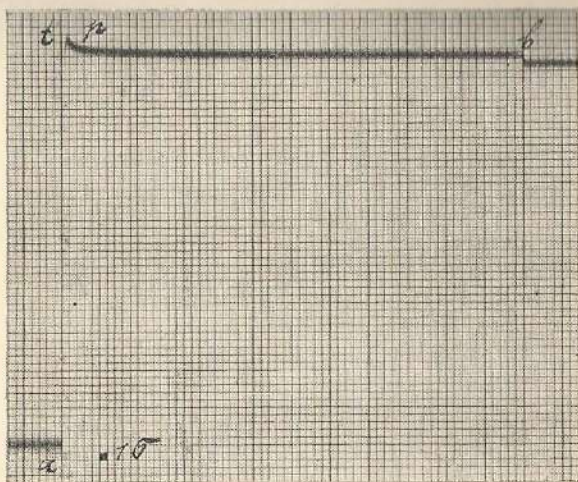


Fig. 23.

2 armen in 1 % keukenzoutoplossing. $V = 10$ volt.

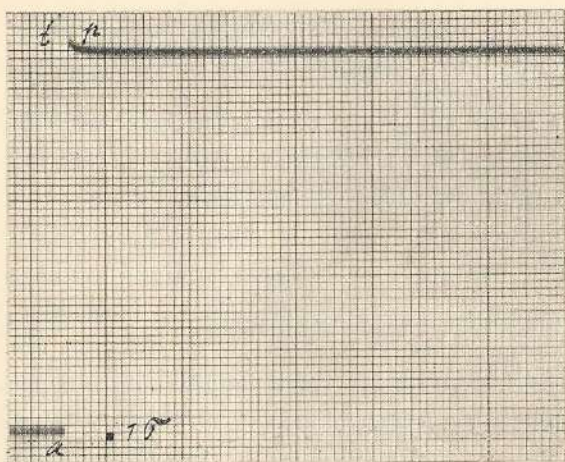


Fig. 24.

Als fig. 23, doch een manganin weerstand van 1000Ω is in de plaats van het menselijk lichaam gebracht.

manganinweerstand van gelijke grootte vervangen. Wij krijgen dan de kromme van fig. 24. Ook daar zien wij een top tp van nagenoeg dezelfde vorm en grootte. Deze wordt veroorzaakt door een in onze opstelling onvermijdelijke technische onvolkomenheid, daarin bestaande, dat de weerstand van $10^5 \Omega$ bij het verbreken van den hoofdstroom aanleiding geeft tot het ontstaan of de vereffening van ladingen in bepaalde gedeelten van de keten.

Dezelfde technische onvolkomenheid is aanwezig geweest bij het schrijven van fig. 23. Om haar invloed te leeren kennen, behoeven wij dus slechts de beide figuren 23 en 24 met elkaar te vergelijken en het verschil tusschen de beide toppen te meten. Dit verschil blijkt zoo klein te zijn, dat het voor ons doel mag worden verwaarloosd.

Wij zien dus door de krommen bevestigd, wat wij reeds uit de vroeger besproken opnamen hebben kunnen afleiden, dat de invloed der electrostatische lading der huid bij een extra-weerstand van $1,01 \times 10^5 \Omega$ in de keten niet meer zichtbaar is, terwijl wij verder moeten besluiten, dat bij dezen grooten weerstand de depolarisatie zoo langzaam geschiedt, dat ook deze in de eerste paar duizendsten seconde buiten beschouwing mag blijven.

Vervolgen wij nu onze beschouwing van fig. 23. Bij b wordt de galvanometer kortgesloten en daalt het snaarbeeld 1,1 schaaldeel. Het niveauverschil tusschen a en p ten bedrage van 52,8 schaaldeelen correspondeert met een spanning van 10 volt, de daling bij b dus met een spanning van 0,211 volt. Tusschen p en b verloopt een tijd van 57τ en daalt de snaar 0,9 mm corresponderende met een bedrag van 171 millivolt.

Uit bovenstaande gegevens moeten wij afleiden, dat 60τ na het uitschakelen van de stroombron de lichaamshuid een polarisatiespanning van 211 millivolt heeft behouden. Om de polarisatiespanning te leeren kennen op het oogenblik zelf,

dat de stroombron uitgeschakeld werd moeten wij nog rekening houden met den tijd, die tusschen het schrijven van de punten *a* en *p* verstrijkt. Nemen wij aan, dat gedurende dezen tijd de depolarisatie even langzaam plaats heeft gehad als onmiddellijk daarna, dan wordt de totale polarisatie-spanning op het oogenblik van *a*, dat is ook de polarisatie-spanning gedurende de doorstrooming van het lichaam, op 403 millivolt berekend.

De veronderstelling, dat de depolarisatie gedurende de eerste 3 duizendsten seconde even langzaam zou plaatsgrijpen als gedurende den tijd, die onmiddellijk daarop volgt, is niet volkomen juist. In het begin gaat de depolarisatie sneller. De door ons berekende waarde van 403 millivolt voor den polarisatiepotential is dus te klein, maar het bedrag der fout kan, — zooals uit den vorm der kromme voldoende blijkt —, niet belangrijk zijn. Wij schatten het op eenige weinige millivolts en mogen wel aannemen, dat de werkelijke waarde van het gezochte bedrag een maximum van 0,5 volt niet overschrijdt.

Indien men het lichaam gedurende 5 sec. met een batterij van 2 volt in plaats van een van 10 volt doorstroomt, wekt men in de huid een geringere tegenelectromotorische kracht op.

Fig. 25 is geheel vergelijkbaar met fig. 23. Alleen is de batterij van 10 volt door een van 2 volt vervangen, terwijl door verandering van den shuntweerstand de gevoeligheid van den galvanometer 5-maal grooter is gemaakt. In fig. 25 wordt de polarisatiepotential bij *b* berekend op 84 millivolt, bij *p* op 136 millivolt, zoodat wij wel mogen aannemen, dat hij gedurende de doorstrooming de waarde van 150 millivolt niet zal hebben overschreden.

Om hooge polarisatiepotentialen te verkrijgen is het noodig, dat de stroomdichtheid door de huid niet te gering is. Bij het registreeren van fig. 23 bedroeg de stroomsterkte 10 milli-

amp., bij fig. 25 2 milliamp., waarbij evenwel in aanmerking dient te worden genomen, dat groote oppervlakken van de huid, n.l. hand en onderarm in de keukenzoutoplossing waren gedompeld. Verder mag de voorafgaande doorstrooming niet te lang duren. Bij een doorstrooming van 3 minuten vonden wij reeds belangrijk geringere polarisatiepotentialen. Wij hebben ten slotte nagegaan, welken invloed de polarisatie van

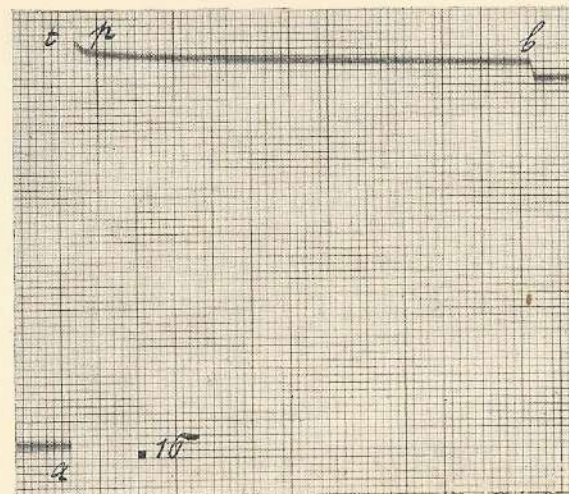


Fig. 25.

Als fig. 23, doch $V = 2$ volt.

de elektroden zelf op onze uitkomsten kan hebben gehad, want zij heeten wel onpolariseerbaar, maar zijn in dat opzicht toch niet volmaakt.

Fig. 26 toont het resultaat van het ingestelde onderzoek. Zij is weer geheel vergelijkbaar met fig. 23. De batterij had een spanning van 10 volt, maar in plaats van door het menschelijk lichaam werd de verbinding tusschen de beide elektroden tot stand gebracht door een glazen hevel, die met een 1-procents keukenzoutoplossing was gevuld. Wij zien, dat

onder deze omstandigheden de lijn van p tot b horizontaal loopt en dat op het oogenblik, dat de galvanometer kort wordt gesloten en zijn nulstand aangeeft, dat is dus bij b , geen verplaatsing van het snaarbeeld meer tot stand komt. Waaruit wij mogen besluiten, dat het spoortje polarisatie, dat nog in de onpolariseerbare elektroden aanwezig kon zijn gebleven, bij onze proeven geen rol heeft gespeeld.

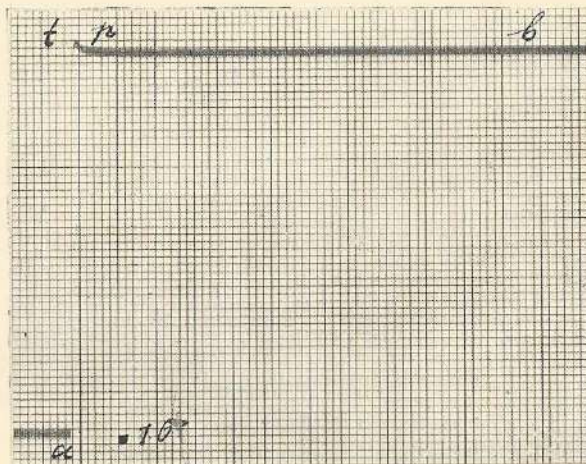


Fig. 26.

Kromme van de elektroden alleen. $V = 10$ volt.

Wij hebben onze metingen bij een aantal personen en onder verschillende omstandigheden uitgevoerd en steeds polarisatie-potentialen gevonden, die lager waren dan 0,5 volt, zoodat wij dit laatste bedrag als de maximum tegenelectromotorische kracht mogen beschouwen, die in de huid kan worden opgewekt.

HOOFDSTUK III.

ONDERZOEKINGEN MET WISSELSTROOMEN.

§ 1. Methode.

Wij werkten met wisselstroomen van verschillende frequenties, n.l. 50, 960, 3400 en 6800 perioden per seconde, die op de volgende wijzen werden verkregen:

a. 50 perioden per seconde. De stroom van de stadscentrale werd, nadat zijn spanning van 125 volt met behulp van een in het laboratorium vast opgestellten transformator in 21 volt was omgezet, door reguleerweerstand gevoerd van tezamen hoogstens 10 Ω . Door hiervan op doelmatige wijze af te takken waren wij in staat inductievrije stroomen door het lichaam te zenden, waarvan de spanning tussen 0 en 21 volt regelbaar was. De frequentie der stadscentrale week slechts weinig van de verlange 50 perioden per sec. af, gewoonlijk niet meer dan $\pm 0,5\%$, nooit meer dan 1% , hetgeen met een frequentiemeter werd gecontrôleerd. Met betrekking tot den vorm der wisselstroomen merken wij op, dat deze bijna zuiver sinusoidaal waren, zooals uit eenige met den snaargalvanometer opgenomen krommen bleek.

b. 960, 3400 en 6800 perioden per seconde. Hiervoor werd gebruik gemaakt van de beide „Hochfrequenzmaschinen” van SIEMENS & HALSKE, de kleine met 60 tanden, die ons de 960 perioden leverde en de groote met 100 tanden, waaruit de grootere frequenties werden verkregen. Om de omwentelingssnelheid der machines zoo goed mogelijk constant

te houden, werd aan de reguleerinrichtingen, die zij zelf reeds bezitten nog een reguleur *FOUCAULT* toegevoegd, die zóó voortreffelijk werkte, dat er geen schommelingen meer merkbaar waren in den frequentiemeter, waarmede het aantal omwentelingen werd gecontrôleerd. De grootste variaties, die in het periodental voorkwamen, moeten op nauwelijks meer dan 0,1 % worden geschat.

Maar de aldus verkregen wisselstroomen waren niet vrij van boventonen. Om in het menscheijk lichaam daarvan bevrijd te zijn werden drie ketens inductief aan elkaar gekoppeld zooals in fig. 27 schematisch is voorgesteld. De primaire keten, die de afneemklossen A_1 en A_2 der „Hochfrequenzmaschine” bevatte, werd met behulp van den draaicondensator C_1 en de zelfinductie S_1 op het periodental der machine afgestemd. De draaicondensator werd zóó gesteld, dat de milliampèremeter voor frequente wisselstroomen *Amp.* een maximum van stroomsterkte aanwees.

De secundaire keten met de zelfinducties S_2 en S_3 en den draaicondensator C_2 had slechts een kleinen weerstand en dus een gunstig decrement, terwijl de tertiaire keten de zelfinductie S_4 , den galvanometer, een variometer *Var.*, en het menscheijk lichaam *M* bevatte. Een substitutieweerstand W_s kon met behulp van den schakelaar *P* in de plaats gesteld worden van $M + Var$, terwijl de variometer zelf nog kon worden kort-gesloten.

Was de primaire keten op den grondtoon der machine afgestemd en werd de tertiaire als meetketen gebruikt, dan kon men met behulp der secundaire de aanwezigheid van een aantal vrij sterke boventonen bewijzen. Deze verdwenen eerst, als ook de secundaire keten op denzelfden toon als de primaire was afgestemd. Onzuiverheden konden dan met de tertiaire, die voor dat doel tijdelijk oscilleerend werd gemaakt, niet meer worden aangetoond. Door nauwkeurige

afstemming van primaire en secundaire keten op den grondtoon der machine waren wij aldus in staat om het lichaam met zuiver sinusoidale stroomen te doorstroomen.

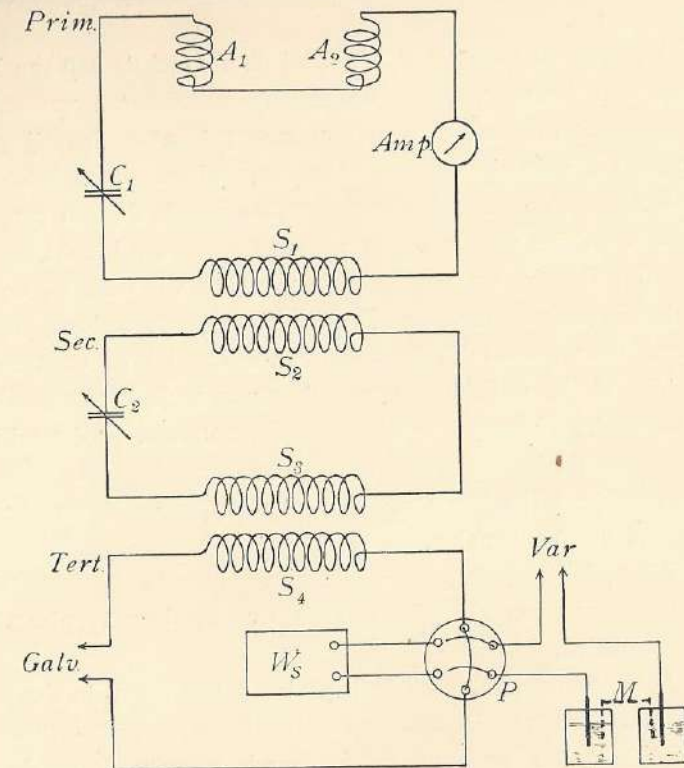


Fig. 27.

A_1 en A_2 afneemklossen van de „Hochfrequenzmaschine”. — C_1 en C_2 draaicondensatoren. — S_1 , S_2 , S_3 en S_4 zelfinducties. — W_s substitutieweerstand. — *Var* variometer. — *M* menscheijk lichaam. — *P* schakelaar.

Wat van den grondtoon der machine geldt, gaat ook op voor haar eersten boventoon, waarvan eveneens door zorgvuldige afstemming in primaire en secundaire keten zuiver

sinusoidale wisselstroomen konden worden verkregen. Inderdaad maakten wij, om met een periodental van 6800 te kunnen werken, van den eersten boventoon der machine gebruik, die daarbij slechts met een matige omwentelingssnelheid behoefde te draaien.

Voor de zelfinductie S_4 werd bij de frequentie 960 een klos van 0,01 henry, voor de hoogere frequenties een van 0,001 henry gebruikt en deze werden zoo geplaatst, dat zij geen merkbare inductie op den variometer uitoefenden. Voor de zelfinductie der tertiaire keten kon zodoende de som van die van S_4 en den variometer in rekening worden gebracht.

Bij 960 perioden per seconde maakten wij voor S_2 en S_3 gebruik van een kern van dun ijzerdraad, waaromheen koperdraad was gewikkeld. Dat gaf aanleiding tot de omstandigheid, dat de zelfinductie van S_4 veranderde, wanneer deze klos verder af of dicht bij S_3 werd geschoven. Veel moeilijkheid werd hierdoor evenwel niet veroorzaakt, daar wij de waarde der zelfinductie van S_4 voor elken afstand gemakkelijk vooraf konden bepalen.

Bij de hoogere frequenties was geen ijzer in de secundaire keten noodig en bleef de waarde van S_4 door verplaatsing onveranderd.

Als galvanometer van de tertiaire keten werd de thermogalvanometer van DUNDELL gebruikt. Deze bevat een dunnen, geplatineerden glas- of kwartsdraad, waardoorheen de te meten stroom wordt gezonden. Dicht boven dezen stroomdrager bevindt zich een der beide soldeerplaatsen van een kortgesloten thermoelement, dat tussehen de polen van een permanenten magneet aan een glazen draad draaibaar is opgehangen. Wordt de stroomdrager doorstroomd, dan deelt hij zijn warmte mede aan de soldeerplaats, die in het thermoelement een stroom ontwikkelt. Daardoor wordt dit in het magnetisch veld gedraaid en de draaiingshoek, die even-

redig is aan het kwadraat der stroomsterkte wordt met behulp van een spiegel op een schaal afgelezen.

Wij vervingen den glazen ophangdraad door een van kwarts, dat ons door zijn geringere elastische nawerking in staat stelde, de uitslagen van het instrument sneller en juister af te lezen.

Ten slotte zij vermeld, dat wij, om storende invloeden van een eventueele lading te vermijden, één pool van den te meten stroom aan de metaalmassa van den geïsoleerd opgestelden galvanometer verbonden. Men kan voor den stroomdrager draden van verschillenden weerstand gebruiken. Bij onze proeven was de weerstand 100 Ω .

§ 2. Resultaten van de metingen.

Bij onze proeven vonden wij onmiddellijk de bevestiging van het bekende feit, dat de schijnbare lichaamsweerstand afneemt, naarmate de frequentie van den wisselstroom toeneemt. Wij vonden dat reeds bij voorloopige proeven, waarbij zich geen variometer in de keten bevond en dus de phaseverschuiving niet gecompenseerd was. Wordt daarbij een groote zelfinductie b.v. 0,5 H, — d.i. veel grooter dan de zelfinductie, die noodig is voor de resonantie, — in de keten gebracht, dan kan zelfs bij frequenties van 960 en hooger de schijnbare lichaamsweerstand negatief worden. De uitslag van den galvanometer is dan met het menschelijk lichaam in de keten grooter dan met een weerstand 0 in de plaats daarvan.

Dit bewijst afdoende, dat het lichaam werkt als een condensator d.w.z. een capaciteit bezit. Wij zullen in de volgende bladzijden wederom twee capaciteiten van elkaar onderscheiden, de polarisatiecapaciteit C_e en de electrostatische C_m , van welke laatste wij de grootte zullen trachten te meten.

Bij de hogere frequenties (960, 3400 en 6800 perioden) hebben wij met behulp van den variometer de zelfinductie L gemeten, waarbij in de tertiaire keten resonantie optrad en daarbij tevens den aequivalenten weerstand voor het lichaam bepaald. De top van de resonantiekromme werd berekend uit een reeks van vijf instellingen van den variometer, 3 aan de eene en 2 aan de andere zijde op gelijke afstanden van den top, d.w.z. van den grootsten uitslag van den galvanometer. Dit kon geschieden met een nauwkeurigheid van 1 %. In de onderstaande tabellen geven wij de capaciteitswaarden van het lichaam aan, zooals zij bij eerste benadering uit de formule $C_t = \frac{1}{p^2 L}$ worden gevonden. In de formule is $p = 2 \pi n$ terwijl n het aantal perioden per seconde voorstelt.

De uitkomsten hebben telkens betrekking op een reeks opeenvolgende metingen, waarbij de proefpersoon de wijs- en middelvinger van eenzelfde hand ter diepte van $3\frac{1}{2}$ cm in de vloeistof van de elektroden dompelde.

Proefpersoon W., voor- en middelvinger van dezelfde hand in 1 % keukenzoutoplossing.

n	aeq. weerst.	Eerste benadering der cap. waarde volgens $C_t = \frac{1}{p^2 L}$
50	11400 $\pm$ 50 Ω	
960	1485 $\pm$ 5 "	0,120 μ F
3400	1099 $\pm$ 5 "	0,088 " "
6800	1034 $\pm$ 5 "	0,063 " "
3400	1119 $\pm$ 5 "	0,086 " "
960	1455 $\pm$ 5 "	0,127 " "
50	8050 $\pm$ 40 "	

Proefpersoon Z., idem.

n	aeq. weerst.	Eerste benadering der cap. waarde volgens $C_t = \frac{1}{p^2 L}$
50	10100 $\pm$ 50 Ω	
960	1279 $\pm$ 5 "	0,143 μ F
3400	1044 $\pm$ 5 "	0,104 " "
6800	944 $\pm$ 5 "	0,077 " "
3400	1019 $\pm$ 5 "	0,107 " "
960	1379 $\pm$ 5 "	0,154 " "
50	8400 $\pm$ 40 "	

De tabellen toonen aan, dat de aan het lichaam aequivalente weerstand daalt, naarmate de frequentie stijgt. Er dient echter rekening te worden gehouden met het feit, dat bij $n=50$ de phaseverschuiving niet, bij de overige hoge frequenties wel gecompenseerd was. Terwijl bij de hoge frequenties de aequivalente weerstand gedurende een proevenreeks voor iedere bepaalde frequentie nagenoeg gelijk blijft, zien wij, dat de weerstand bij $n=50$ aan het einde van elke proevenreeks belangrijk kleiner is dan in het begin.

De capaciteitswaarde neemt af, naarmate de frequentie stijgt en is, de grenzen van de waarnemingsnauwkeurigheid in aanmerking genomen, bijna constant voor een bepaalde frequentie.

De volgende tabellen geven de waarden van soortgelijke metingen, waarbij echter met klok- en dompelelektroden gewerkt werd.

Proefpersoon L., arm met dompel- en klokelectrode
met 1 % keukenzoutoplossing.

n	aeq. weerst.	Eerste benadering der cap. waarde volgens $C_t = \frac{1}{p^2 L}$.
50	$14800 \pm 50 \Omega$	
960	$882 \pm 4 "$	$0,095 \mu F$
3400	$525 \pm 2 "$	$0,087 " "$
6800	$408 \pm 2 "$	$0,055 " "$

Proefpersoon H., idem.

n	aeq. weerst.	Eerste benadering der cap. waarde volgens $C_t = \frac{1}{p^2 L}$.
50	$6500 \pm 30 \Omega$	
960	$725 \pm 4 "$	$0,118 \mu F$
3400	$389 \pm 2 "$	$0,093 " "$
6800	$323 \pm 2 "$	$0,077 " "$

Wij zien hier overeenkomstige verhoudingen als bij de proeven met de beide vingers.

§ 3. Beschouwingen over en berekening van
den lichaamsweerstand en de capaciteit.

Om met behulp van de gegevens der vorige paragraaf de werkelijk aanwezige weerstanden en capaciteiten van het menschelek lichaam te berekenen gaan wij uit van hetzelfde schema, dat reeds eerder in fig. 19 is gegeven, en dat wij in

de onderstaande figuur 28 in samenhang met de schakeling voor de wisselstroommen nogmaals reproduceeren.

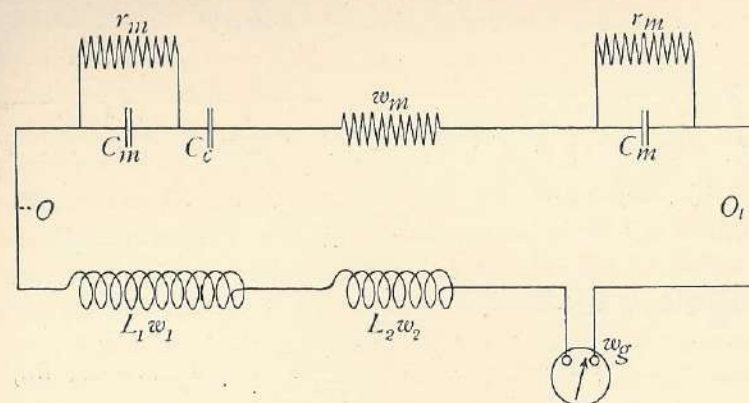


Fig. 28.

Schakelschema voor wisselstroommen. Boven O en O_1 is het schema van het menschelek lichaam geteekend; daaronder het schema van de stroombron $L_2 w_2$, den variometer $L_1 w_1$ en den galvanometer w_g .

Bij O en O_1 is het lichaam aan de wisselstroomketen verbonden. Deze bevat den klos S_4 van fig. 27, die inductief aan de wisselstroombron is gekoppeld en waarvan de weerstand en de zelfinductie resp. w_2 en L_2 mogen worden genoemd, terwijl verder nog aanwezig zijn de variometer met zijn weerstand w_1 en zijn zelfinductie L_1 en de galvanometer met den weerstand w_g .

Om de hierna volgende formules te vereenvoudigen stellen wij

$$w_m + w_g + w_1 + w_2 = w \dots \dots \dots (1)$$

en

$$L_1 + L_2 = L \dots \dots \dots (2)$$

Noemen wij de aangebrachte electromotorische kracht E en de stroomsterkte J , dan geldt de formule

$$J = \frac{E}{W} \dots \dots \dots (3)$$

waarin W den weerstandsoperator voorstelt.

De waarde van W wordt weergegeven ¹⁾ door

$$W = \sqrt{\left[w + \frac{2r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2 + \left[pL - \frac{1}{pC_c} - \frac{2r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2} \quad (4)$$

Bij compensatie van de phaseverschuiving of, anders uitgedrukt, bij resonantie, zooals wij die kunnen verkrijgen, wanneer wij in den variometer L op doelmatige wijze varieeren, moeten wij hebben

$$pL - \frac{1}{pC_c} - \frac{2r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (5),$$

zoodat wij dan voor W krijgen

$$W = w + \frac{2r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \quad \dots \dots \dots (6)$$

Vervangen wij met uitzondering van L_2 w_2 en w_g in de samengestelde keten van fig. 28 alle deelen door een substitutieweerstand ρ en maken wij dien zoo groot, dat de galvanometer denzelfden uitslag geeft als te voren bij resonantie, dan moet

$$W = \sqrt{(\rho + w_g + w_2)^2 + (pL_2)^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

L_2 werd steeds zoo klein genomen, dat $(pL_2)^2$ tegenover $(\rho + w_g + w_2)^2$ mag worden verwaarloosd. Wij mogen dus voor W schrijven

$$W = \rho + w_g + w_2 \quad \dots \dots \dots (8)$$

De weerstand, die aan het lichaam equivalent mag worden gesteld, is volgens het schema van fig. 28

$$w_a = \rho - w_1 \quad \dots \dots \dots (9)$$

¹⁾ Wij brengen hier gaarne onzen welgemeenden dank aan Prof. EHRENFEST voor de hulp, die hij ons bij de samenstelling dezer formule heeft verleend.

Uit (1), (6), (8) en (9) volgt

$$w_m = w_a - \frac{2r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \quad \dots \dots \dots (10)$$

In de formules (5) en (10) ligt de berekening opgesloten van de waarden van het menschelijk lichaam, die wij wenschten te kennen, n.l. de weerstanden w_m en r_m , en de electrostatische capaciteit C_m .

Hadden onze onbekenden alle constante waarden, dan zouden wij in staat zijn ze nauwkeurig te berekenen. Wij behoefden dan slechts eenige reeksen van metingen bij verschillende waarden van p , dat wil zeggen bij verschillende frequenties der wisselstroomen te verrichten en de uitkomsten op doelmatige wijze te combineeren. Maar onze onbekenden zijn niet constant, en wel in hoofdzaak, omdat de eigenschappen van de huid door allerlei omstandigheden worden gewijzigd. Al is een systematische oplossing der genoemde onbekenden daarom niet mogelijk, wij kunnen toch bij benadering wel eenige der waarden, die ons het meeste belang inboezemen, berekenen en wel die van de electrostatische capaciteit C_m en de weerstanden r_m en w_m .

Vooraf ga een woord over C_c en de weerstandsvermeerdering, die door de polarisatie ontstaat. Onderstellen wij, dat de polarisatie in de huid even sterk is als die van platina in verdund zwavelzuur, wat zeer overdreven is, dan zou de polarisatiecapaciteit een bedrag van de orde van grootte van $780 \mu F$ voor iederen vinger of $390 \mu F$ voor beide vingers in serie moeten bereiken. WIEN ¹⁾ vond immers voor de platina-zwavelzuurcel $39 \mu F$ per cm^2 van iedere electrode bij $n = 128$ en wij werkten met een ondergedompeld oppervlak van iederen vinger van ongeveer $20 cm^2$. Wij weten verder, dat de polari-

¹⁾ L. c. bl. 3.

satiecapaciteit van de platinazwavelzuurcel slechts weinig verandert met de frequentie.

Is de polarisatie van de huid in een 1 % keukenzoutoplossing zwakker dan van platina in verdund zwavelzuur, dan wordt bij onze proeven C_c nog grooter dan $390 \mu F$. In serie met C_c staat echter tweemaal het complex $\frac{C_m}{r_m}$, dat — zooals uit de gevonden waarden voor de *totale* capaciteit van het lichaam blijkt —, een capaciteitswaarde heeft, die vele honderden malen zoo niet duizenden malen kleiner is. Hierdoor is 't onmogelijk C_c met behulp van wisselstroomen te meten. De beste voorstelling van de mate, waarin de polarisatie in de huid optreedt, verkrijgt men dan ook niet met wisselstroomen, doch veel meer door registratie met een snel aanwijzenden galvanometer, zooals in het vorige hoofdstuk uitvoerig is besproken.

Waar polarisatie optreedt, heeft ook een weerstandsvermeerdering plaats. Deze is in de proeven van WIEN nauwkeurig gemeten en in zijn formules met Δw aangegeven. De grootste waarde vond WIEN bij nikkelelektroden in een 2-procents keukenzoutoplossing. Daarbij was $\Delta w = 34,9 \Omega$ voor 1 cm^2 electrodeoppervlakte. Daar Δw omgekeerd evenredig aan het elektrodenoppervlak is en wij met twee huidoppervlakken van 20 cm^2 ieder hebben gewerkt, zou onze Δw slechts het veertigste deel van $34,9$, dus $0,85 \Omega$ bedragen, indien de polarisatie in de huid even sterk was als die van nikkel. Wij weten evenwel, dat de huid veel zwakker polariseert, zoodat de weerstandstoename, die door de polarisatie wordt veroorzaakt, kleiner moet zijn.

Ook de frequentie der wisselstroomen heeft invloed op de grootte van Δw . Hoe grooter de frequentie, des te kleiner Δw . Terwijl WIEN het bovengenoemde bedrag bij een frequentie van $n = 64$ vond, hebben wij in den regel met grooter frequenties gewerkt. En in de gevallen, waarbij ons perioden-

tal geringer was, was het verschil toch van dien aard, dat Δw daardoor niet tot een noemenswaard bedrag kon worden opgevoerd.

Wat voor de wisselstroomen van geringe frequenties is opgemerkt, geldt ook voor onze metingen met gelijkstroom (zie p. 23). De duur der doorstrooming was daarbij zoo kort, dat er nauwelijks tijd beschikbaar was, om Δw tot een bij onze proeven meetbaar bedrag te vergrooten. Daarom mag ook in de ongunstigste omstandigheden Δw steeds, zoowel ten opzichte van r_m als van w_m worden verwaarloosd.

Wij gaan nu over tot de berekening van de electrostatische capaciteit der huid C_m en nemen als uitgangspunt de formule (5) op blz. 46. Uit deze formule volgt

$$pL = \frac{1}{pC_c} + \frac{2r_m^2 pC_m}{1 + (r_m pC_m)^2} \dots \dots \dots (11)$$

Nemen wij p zoo groot, met andere woorden werken wij met zulke hooge frequenties, dat in den noemer van den tweeden term van het tweede lid 1 ten opzichte van $(r_m pC_m)^2$ verwaarloosd mag worden, dan wordt de formule vereenvoudigd tot

$$pL = \frac{1}{pC_c} + \frac{2}{pC_m} \dots \dots \dots (12)$$

Wij weten verder, dat de waarde van C_c veel grooter is dan van C_m . Onder deze omstandigheden mogen wij in formule (12) den term $\frac{1}{pC_c}$ verwaarloozen, zoodat de formule wordt vereenvoudigd tot

$$pL = \frac{2}{pC_m} \dots \dots \dots (13),$$

waaruit volgt

$$C_m = \frac{2}{p^2 L} \dots \dots \dots (14)$$

Voor de capaciteit C_t van de beide vingers moeten wij dan schrijven

$$C_t = \frac{1}{2} C_m \text{ of } C_t = \frac{1}{p^2 L} \dots \dots \dots (15)$$

Met behulp van deze formule zijn de waarden van de genoemde capaciteiten bepaald, waarvan die van C_t in de tabellen van blz. 42 tot 44 zijn opgenomen.

Wij hebben de berekening slechts bij benadering kunnen uitvoeren. Uit de door ons gebruikte formules volgt, dat de capaciteit des te nauwkeuriger zal worden gevonden, naarmate p grooter is. De waarden voor C_t , die bij de hoogste door ons gebruikte frequentie van 6800 zijn verkregen, bedroegen bij de proefpersonen W. en Z. (zie de tabellen op blz. 42, 43) gemiddeld $0,07 \mu F$, waaruit volgt $C_m = 0,14 \mu F$. Het ondergedompelde oppervlak van den vinger bedroeg ongeveer 20 cm^2 , zoodat de electrostatische capaciteit per cm^2 op $7 \times 10^{-9} F$ moet worden gesteld.

Bij de proeven met klok- en dompelelectroden kunnen wij, als wij de capaciteit van de huid onder de klokelectrode C_m noemen, $C_m = C_t$ stellen, daar de capaciteit van de huid in de dompelelectrode zooveel grooter is dan van het stuk onder de klokelectrode. De oppervlakte van de huid, die door de klokelectrode werd bevochtigd, bedroeg 5 cm^2 . Bij de proefpersonen L. en H. (zie de tabellen op blz. 44) stond de klok-electrode op de buigzijde van den onderarm even onder de elleboog. Wij vonden voor $n = 6800 \dots C_m = 0,055$ resp. $0,077 \mu F$, dus gemiddeld $0,066 \mu F$ of per cm^2 $13 \times 10^{-9} F$. Zij is dus een weinig grooter dan die van de vingers.

Wenden wij ons thans tot de berekening van de weerstanden, en beschouwen wij nogmaals formule (10)

$$w_m = w_a - \frac{2 r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \dots \dots \dots (10)$$

Wij merken op, dat in deze formule w_m bepaald wordt

door het verschil van twee waarden, waarvan alleen de eerste nauwkeurig kan worden gemeten, doch de tweede slechts bij benadering kan worden bepaald. Daarom kan w_m slechts dan met eenige nauwkeurigheid worden berekend, wanneer de tweede term klein is. Dit zal het geval zijn als p groot is. Nemen wij p zeer groot, dan mag de tweede term tenslotte tegenover de eerste worden verwaarloosd en wordt de formule nog verder vereenvoudigd tot

$$w_m = w_a \dots \dots \dots (16)$$

Wij bereikten dit bij onze proeven, wanneer wij met de grootste der door ons gebruikte frequenties doorstroomden. Ten bewijze nemen wij uit de tabel op blz. 42 van den proefpersoon W. de uitkomst bij het periodental 6800. Wij vonden daarbij voor $w_{a6800} \dots 1034 \Omega$ en voor $C_m = 2 C_t \dots 0,126 \mu F$. Wij moeten dus nu nog een waarde stellen voor r_m om formule (10) volledig te kunnen toepassen. Zooals wij later zullen zien, kunnen wij bij geringe frequenties — b.v. $n = 50$ — stellen

$$r_m = \frac{1}{2} (w_{a50} - w_m).$$

In de genoemde tabel vinden wij als hoogste waarde voor $w_{a50} \dots 11400 \Omega$ en als laagste waarde 8050Ω , terwijl $w_{a6800} = 1034 \Omega$. Stellen wij $w_{a6800} = w_m$, dan is r_m in maximo 5183, in minimo 3508 Ω . Vullen wij de genoemde waarden voor C_m en r_m in het tweede lid van formule (10) in, dan krijgen wij daarvoor 13,4 bij de maximumwaarde en 19,8 bij de minimumwaarde van r_m . De grootste fout, die gemaakt wordt, als wij $w_m = w_a$ stellen, bedraagt dus 19,8 op 1034 of 2 %.

Voeren wij dezelfde berekening uit voor den proefpersoon Z. (zie de tabel op blz. 43), dan vinden wij voor $\frac{2 r_m}{1 + (r_m p C_m)^2}$ de waarden 10 en 12,3. Daar $w_{a6800} = 944$, is de fout hier dus nog iets kleiner n.l. in het ongunstigste geval 1,3 %.

Bij het gebruik van klok- en groote dompelelectrode moet de berekening eenigszins worden gewijzigd, daar het schema hierbij is veranderd. Wij hebben hieromtrent op de bladzijden 26 en 50 reeds een opmerking gemaakt. De huidweerstand van den ondergedompelden arm is klein en de capaciteit van deze groote huidoppervlakte is groot vergeleken met de overeenkomstige waarden van de huid onder de klokelectrode. Verwaarloozen wij het eene paar waarden ten opzichte van het andere paar, dan moeten de formules (4), (15) en (10) veranderd worden in

$$W = \sqrt{\left[w + \frac{r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2 + \left[p L - \frac{1}{p C_c} - \frac{r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2} \quad (17)$$

$$C_m = C_t = \frac{1}{p^2 L} \dots\dots\dots (18)$$

$$w_m = w_a - \frac{r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \dots\dots\dots (19)$$

Hierin stellen dus r_m en C_m weerstand en capaciteit van de huid onder de klokelectrode voor.

Wij kunnen nu ook voor dit geval aantoonen, dat bij de grootste der door ons toegepaste frequenties $w_m = w_a$ gesteld mag worden. In de tabel van proefpersoon L. op blz. 44 vinden wij de waarden van $w_{a\ 6800} = 408\ \Omega$ en $w_{a\ 50} = 14800\ \Omega$. Wij moeten voor r_m schrijven

$$r_m = w_{a\ 50} - w_m$$

waaruit volgt

$$r_m = 14392\ \Omega.$$

Substitueeren wij deze waarde in het tweede lid van de formule (19), en stellen wij hierin $C_m = 0.055$ dan vinden wij voor dit 2e lid 12,6, waaruit volgt, dat wij slechts een fout van $\pm 2,6\%$ maken, wanneer wij $w_m = w_{a\ 6800}$ stellen.

Op overeenkomstige wijze vinden wij met behulp van de gegevens voor den proefpersoon H. (zie de tabel op blz. 44) een fout van 4,4%.

Het spreekt vanzelf, dat wij het grootste deel dezer fouten kunnen corrigeeren door ten behoeve van w_m in het eerste geval 2,6 %, in het laatste geval 4,4 % af te trekken van de waarde, die voor $w_{a\ 6800}$ is gevonden. Wij krijgen dan voor w_m bij proefpersoon L. een bedrag van 397 Ω , bij proefpersoon H. van 309 Ω .

De voor w_m gevonden waarden zijn bij de metingen met klok- en groote dompelelectrode belangrijk kleiner dan bij de proeven met de vingers. Dit moet vermoedelijk worden toegeschreven aan den grooteren specifiekten weerstand van de deelen, die onder de huid van de vingers zijn gelegen. Wij hebben immers hier hoofdzakelijk te doen met been- en pees-substanties, waarvan de specifieke weerstand grooter moet zijn dan die van de spiermassa in den onderarm.

Wij gaan nu over tot de berekening van de laatste der waarden, die betrekking hebben op de doorstrooming van het menschelijk lichaam n.l. r_m . Daartoe beschouwen wij de uitkomsten, die bij lage frequenties van den wisselstroom zijn verkregen.

In formule (4) kunnen wij bij lage waarden van p belangrijke vereenvoudigingen aanbrengen. Wij brengen formule (4) even in herinnering:

$$W = \sqrt{\left[w + \frac{2 r_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2 + \left[p L - \frac{1}{p C_c} - \frac{2 r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \right]^2} \quad (4)$$

en zullen aantoonen, dat bij een periodental van 50 per seconde de tweede veelterm onder het wortelteeken geheel kan vervallen. Uit het gezegde onder „Methode” volgt, dat bij deze metingen L praktisch tot 0 werd gereduceerd, zoodat met $p L$ geen rekening behoeft te worden gehouden. Aangezien C_c zeer

groot moet worden gesteld, kan ook $\frac{1}{pC_e}$ vervallen. De term

$$\frac{2r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} \text{ vraagt echter nadere beschouwing.}$$

Vullen wij hierin de waarden voor p , C_m en r_m in volgens de gegevens uit de tabel voor den proefpersoon W. blz. 42, dan hebben wij

$$p_{50} = 2 \pi n = 314$$

$$C_m = 2 C_{t \ 6800} = 0,126 \mu F$$

$$r_m = \frac{1}{2} (w_{a \ 50} - w_{a \ 6800}) = 5183 \Omega,$$

waaruit gevonden wordt, dat

$$\frac{2 r_m^2 p C_m}{1 + (r_m p C_m)^2} = 2040.$$

Voor $1 + (r_m p C_m)^2$ vinden wij slechts 1,04 en vereenvoudigen daarom den eersten term (den tweeterm) onder het wortelteeken van formule (4) tot $(w + 2r_m)^2$, zoodat de weerstandsoperator wordt

$$W_{50} = \sqrt{(w + 10366)^2 + 2040^2}$$

Laten wij hierin den tweeden term onder het wortelteeken wegvallen, dan maken wij W_{50} hoogstens 4,2 % kleiner. De fout, die wij bij de berekening van W_{50} maken, is echter geringer, daar wij bij vereenvoudiging van $w + \frac{2 r_m}{1 + (r_m p C_m)^2}$ tot $w + 2r_m$ de berekende waarde van W_{50} ongeveer evenveel hebben vergroot.

Ten slotte mogen wij dus voor formule (4) schrijven

$$W_{50} = w + 2 r_m \dots \dots \dots (20)$$

of

$$r_m = \frac{W_{50} - w}{2} \dots \dots \dots (21)$$

Combineeren wij de formules (8), (9) en (21) en bedenken wij, dat bij de metingen met $n=50$ er geen variometer gebruikt werd, dan krijgen wij

$$r_m = \frac{w_{a \ 50} - w_m}{2} \dots \dots \dots (22)$$

Voor de proeven met klok- en dompelelectrode moet deze formule veranderd worden in

$$r_m = w_{a \ 50} - w_m \dots \dots \dots (23)$$

Geen van de waarden, die wij hebben gemeten, is zoo veranderlijk als r_m . In de volgende paragraaf zullen wij zien, dat deze waarde bij opzettelijk sterke doorstrooming van de huid belangrijk vermindert, maar ook het langdurig vochtig houden van de huid gepaard aan de werking van de stroomen, die bij onze metingen noodig waren, had een duidelijk effect in denzelfden zin, want r_m bleek regelmatig in den loop eener proevenreeks af te nemen. Bij den proefpersoon W. werd bij het begin der metingen (zie de tabel op blz. 42) gevonden $r_m = 5183 \Omega$, of voor 1 cm^2 huidoppervlak 103600Ω . Aan het einde der proef bedroeg r_m slechts 70160Ω voor 1 cm^2 . Ook bij den proefpersoon Z. (zie de tabel op blz. 43) vinden wij een vermindering van r_m , ofschoon niet zoo sterk. Bij het begin van de metingen vonden wij 91560Ω en bij het einde 74560Ω voor 1 cm^2 .

De specifieke weerstand van de huid van den voorarm biedt groote individueele verschillen aan en is in 't algemeen lager dan die van de vingerhuid.

Bij de proeven met klok- en dompelelectroden vonden wij (zie de tabellen op blz. 44) voor den proefpersoon L. 71960Ω , voor den proefpersoon H. 30885Ω voor 1 cm^2 .

Wij wenschen dit hoofdstuk niet te besluiten zonder er op gewezen te hebben, dat niet alleen r_m in grootte wisselt, maar dat ook de waarden C_m en w_m niet constant zijn.

Dit blijkt, wanneer wij het bedrag van de laatstgenoemde waarden trachten te berekenen uit de gegevens, die verkregen worden, wanneer met wisselstroomen van geringere frequenties wordt doorstroomd. Wel is waar kan daarbij niet dezelfde nauwkeurigheid worden bereikt als bij de metingen met $n = 6800$, maar de fouten, die door het werk met frequenties van 960 en 3400 worden gemaakt overschrijden toch ook weer niet zekere grenzen.

Bovendien kunnen wij eerst bij groote frequenties C_m meten en van de kennis dezer waarde gebruik maken, om met behulp van de resultaten, die bij de geringere frequenties zijn verkregen, w_m te berekenen. Of wij kunnen gebruik maken van de bij groote frequentie gemeten waarde van w_m om bij geringere frequentie C_m te meten. Op deze wijze zouden de formules, die wij moeten gebruiken, nog belangrijk kunnen worden vereenvoudigd en de fouten in de einduitkomsten worden verkleind. Maar soortgelijke berekeningen leiden niet tot het doel, en wel hoofdzakelijk, omdat noch C_m noch w_m constant zijn. Wel is waar varieren zij niet in die sterke mate als dat met r_m het geval is, maar toch voldoende, om bij het trekken van besluiten tot groote voorzichtigheid te manen.

Uit de berekeningen, die wij hebben uitgevoerd, meenen wij slechts te mogen afleiden, dat met name C_m bij geringere frequenties eenigszins toeneemt, iets wat een oppervlakkige beschouwing der tabellen op blz. 42 tot 44 wel reeds heeft doen vermoeden. De oorzaak van dit verschijnsel moet naar onze meening gezocht worden in de omstandigheid, dat de wisselstroomen van lagere frequentie waarschijnlijk dieper door de opperhuid heendringen en zodoende de half isoleerende laag, die zij vormt, dunner maken. De stroom zelf verkleint den weerstand der opperhuid en heeft daartoe des te beter gelegenheid, al naarmate haar periode langer duurt.

§ 4. De invloed van sterke doorstrooming.

Wij hebben nog enkele proeven verricht met het doel den invloed van een krachtige doorstrooming nader te leeren kennen en geven van een tweetal reeksen van metingen een overzicht in onderstaande tabellen. Zij werden verricht met klok- en dompelelektrode direct in aansluiting aan die, waarvan de resultaten op blz. 44 vermeld zijn. De nieuwe metingen geschiedden steeds onmiddellijk nadat de proefpersoon met een gelijkstroom van 2 tot 4 milliampère gedurende 1 of 2 minuten was doorstroomd. De richting, waarin de stroom door de huid wordt gevoerd, — in ons geval was zij dalend, — heeft praktisch weinig invloed op haar eigenschappen, zooals uit de opnamen met den galvanometer (zie blz. 26) gebleken is. Men zou dus in plaats van den gelijkstroom met hetzelfde gevolg een krachtigen wisselstroom kunnen aanwenden.

Proefpersoon L., arm met dompel- en klokelektrode
met 1 % keukenzoutoplossing. Doorstrooming met 2 m. A.
gedurende 1 minuut.

Periodental	Aequiv. weerstand		Eerste benadering der capaciteitswaarde volgens $C_t = \frac{1}{p^2 L}$	
	vóór doorstrooming	na doorstrooming	vóór doorstrooming	na doorstrooming
50	14800 Ω	3010 Ω		
960	882 „	1215 „	0,095 μ F	0,172 μ F
3400	525 „	569 „	0,067 „ „	0,084 „ „
6800	408 „	411 „	0,055 „ „	0,058 „ „

Proefpersoon H., idem. Doorstrooming met 4 m. A.
gedurende 2 minuten.

Periodental	Aequiv. weerstand		Eerste benadering der capaciteitswaarde volgens	
			$C_t = \frac{1}{p^2 L}$	
	vóór doorstrooming	na doorstrooming	vóór doorstrooming	na doorstrooming
50	6500 Ω	1115 Ω		
960	725 "	784 "	0,118 μ F	0,590 μ F
3400	389 "	511 "	0,093 " "	0,156 " "
6800	323 "	379 "	0,077 " "	0,088 " "

Wanneer wij met behulp van de gegevens der beide bovenstaande tabellen de waarden willen berekenen, die C_m , w_m en r_m na de doorstrooming met sterken gelijkstroom verkrijgen, doen er zich twee moeilijkheden voor. De eerste hiervan bestaat in de omstandigheid, dat $w_{a\ 50}$ door de doorstrooming zoo sterk afneemt, dat onze formules niet meer zoo gemakkelijk kunnen worden vereenvoudigd, tenzij wij ons met mogelijk grootere fouten in de einduitkomst tevreden zouden stellen. De vermindering van $w_{a\ 50}$ wordt voornamelijk veroorzaakt door een verkleining van r_m ; alleen door de frequentie van den wisselstroom belangrijk te vergrootten, zouden wij bij de berekening der eindresultaten weer een gelijke nauwkeurigheid kunnen verkrijgen als bij de proeven vóór de doorstrooming.

De tweede moeilijkheid is gelegen in den tijd, die door iedere meting in beslag wordt genomen. Als na de doorstrooming met gelijkstroom de meting met den wisselstroom van een bepaalde frequentie was verricht, moest eerst opnieuw met gelijkstroom worden doorstroomd om de meting met den wisselstroom van de andere frequentie te beginnen. Daardoor kunnen de resultaten, die bij de verschillende

frequenties zijn verkregen, niet direct met elkaar worden vergeleken.

Evenwel kunnen niettegenstaande de genoemde moeilijkheden toch wel eenige conclusies uit de waarnemingen worden getrokken. De zoo zorgvuldig mogelijk uitgevoerde berekeningen toonen in de eerste plaats aan, dat na krachtige doorstrooming de waarde van w_m een weinig afneemt, ongeveer 10 tot 20 %. Dit behoeft ons niet te verwonderen. De specifieke weerstand van de vochtige lichaamsdeelen onder de huid is ongeveer even groot als die van een keukenzoutoplossing van 1 %. Door krachtige doorstrooming kunnen de deelen, die onmiddellijk onder de klok-electrode zijn gelegen, warmer worden, waardoor hun weerstand moet afnemen.

In de tweede plaats blijkt C_m een weinig toe te nemen en wel bij de geringere frequenties meer dan bij de grootere. Wij zijn geneigd deze toename toe te schrijven aan dezelfde oorzaak, die wij reeds vroeger hebben genoemd: het dunner worden van de isoleerende laag der opperhuid.

De sterkste invloed van de doorstrooming laat zich gelden op r_m . Deze waarde, die toch reeds de meest variabele is in de menschelijke huid, wordt door de doorstrooming van 4 tot 6 maal verkleind. Naar alle waarschijnlijkheid zouden wij belangrijk sterkere verkleiningen hebben kunnen bewerkstelligen, als wij nog langer en krachtiger hadden doorstroomd. Maar het is niet ons doel geweest, een maximaal effect te voorschijn te roepen. De verkregen uitkomsten zijn reeds treffend genoeg en voor den aard van het verschijnsel beslissend.

Als oorzaak meenen wij te mogen noemen de kataphorese en de ionenverplaatsing, waardoor in de oorspronkelijk slecht geleidende laag der opperhuid de ionenconcentratie wordt vergroot en dus de weerstand verminderd.

HOOFDSTUK IV.

PRACTISCHE TOEPASSINGEN.

De kennis van de verschijnselen, die in de vorige hoofdstukken zijn beschreven, heeft niet alleen theoretische waarde. Men moet er rekening mede houden in de electrophysiologie zoo goed als in de electrodiagnostiek en electrotherapie. Sinds lang is aan den clinicus bekend, dat de gelijkstroom, dien hij met behulp van een dampbatterij of van accumulatoren door het lichaam van zijn patient zendt, gedurende den tijd, dat de doorstrooming duurt, vele malen in sterkte kan toenemen. Terecht heeft hij dit verschijnsel aan de weerstandsvermindering van de opperhuid toegeschreven.

De polarisatie is oorzaak, dat men met behulp van een gelijkstroom den weerstand van het lichaam niet nauwkeurig meten kan, vooral niet, wanneer men met geringe spanningen werkt, terwijl de dielectrische capaciteit het onmogelijk maakt om hem op eenvoudige wijze met behulp van wisselstroom te leeren kennen.

Prikkelt de clinicus spieren of zenuwen bij zijn patient met behulp van een gelijkstroom, dien hij maakt of breekt, dan bemerkt hij, dat het inschakelen in de keten van een weerstand, die slechts klein is ten opzichte van den lichaamsweerstand, het effect van het maken of breken van den stroom belangrijk verzwakt. Men heeft dit verschijnsel op eenigszins zonderlinge wijze trachten te verklaren en er ver-

schillende beschouwingen aan vastgeknoopt omtrent de grootheid, die als de juiste maat voor de prikkelingssterkte moet worden opgevat. Men is zelfs zoo ver gegaan¹⁾, dat men aan weerstanden, die in de physica practisch als vrij van zelfinductie gelden, toch een belangrijke zelfinductie meende te mogen toeschrijven met de aanbeveling aan de physica dit punt tot een onderwerp van nadere studie te maken.

Indien men evenwel met de electrostatische capaciteit der huid rekening houdt, kan het beschreven verschijnsel gemakkelijk worden verklaard. Bij het maken van een stroom speelt in het eerste moment de huidweerstand geen rol. De capaciteit is oorzaak, dat de opperhuid zich in het begin gedraagt, alsof zij kortgesloten is, zoodat als lichaamsweerstand uitsluitend de veel geringere weerstand der inwendige deelen in aanmerking komt. In de uitdrukking $2r_m + w_m$, die wij voor den lichaamsweerstand hebben gebruikt, valt de eerste term, die verreweg de grootste is, weg. Wij hebben dus in het eerste oogenblik van stroomsluiting een sterken stroom, die slechts zeer kort duurt en door geen milliampèremeter uit den handel — zelfs niet bij benadering — kan worden aangegeven. Is de eenige weerstand van de keten die van het lichaam en brengt men een nieuwen weerstand R daarin aan, dan zal de initiaalstroom worden verzwakt in de verhouding van $\frac{w_m + R}{w_m}$, een uitdrukking, die een aanzienlijk bedrag kan vertegenwoordigen. En het is deze verhouding der initiaalstroom, waarmede men bij de beoordeeling van het prikkelend effect rekening dient te houden.

Het aanbrengen van een grooten extraweerstand achter

¹⁾ Zie DUBOIS. Resistance du corps humain dans la période d'état variable du courant galvanique. Arch. de physiologie. t. 9. 1897.

de stroombron brengt wel is waar de complicatie mede, dat men een grooter aantal dospellementen of accumulatoren in gebruik moet nemen, ten einde dezelfde stroomsterkten te verkrijgen, maar het praktische voordeel daarvan bestaat hierin, dat de invloed van den weerstand, de polarisatie en de capaciteit van het lichaam op het prikkelend effect van de stroomsluiting wordt verminderd, zoodat men dit gemakkelijker kan regelen en de verkregen resultaten beter kan beoordeelen.

Eenige opmerkingen over de electrocardiographie zijn hier ook op haar plaats. Een van de voordeelen van deze boven vele andere methoden van hartonderzoek bestaat, zooals bekend is, daarin, dat men in het Ekg een kromme heeft, die in absolute maten wordt geregistreerd: de hoogte der toppen wordt direct in volts afgelezen, hetgeen ten gevolge heeft, dat alle Ekg^{en}, waar en met welk instrument ook opgenomen, — aangenomen, dat dit laatste aan de te stellen eischen van snelheid, gevoeligheid en aperiodiciteit voldoet — steeds onmiddellijk onderling vergelijkbaar zijn. Maar om dit te bereiken, is het noodig, om voordat de opname plaats heeft, den galvanometer, terwijl hij met den te onderzoeken persoon is verbonden, te ijken. Men gaat daarbij veelal aldus te werk. Terwijl het snaarbeeld, dat op den photographischen opnametoestel wordt geworpen, de rhythmische schommelingen van het Ekg vertoont, wordt plotseling een bekend potentiaalverschil van bijv. 3 millivolt in de keten geschakeld. De blijvende verplaatsing, die daardoor aan het beeld wordt medegegeven, en die men het best beoordeelt naar den stand, dien het tijdens de hartsdiastole inneemt, wordt dan door regeling der snaarspanning op 3 cm gebracht, zoodat 1 millivolt potentiaalverschil met 1 cm correspondeert.

Wij mogen bij het gebruik van een doelmatig meetinstru-

ment wel aannemen, dat onder deze omstandigheden de potentiaalschommelingen, die zich door de hartsactie in het lichaam zelf ontwikkelen, zoo door de snaar worden weergegeven, dat dezelfde evenredigheid tussehen uitslag en potentiaalverschil bestaat. Maar daartoe is meer noodig dan snelheid, gevoeligheid en aperiodiciteit. Men moet aan de electrocardiographische inrichting nog bovendien den eisch stellen, dat in de keten, waarin zich het lichaam en de galvanometer bevinden, een groote weerstand aanwezig is.

Is de weerstand klein, zooals dat bijv. het geval is bij een spiegelcardiograaf, dan moeten de krommen, die men registreert, noodzakelijkerwijze worden misvormd door den invloed van de capaciteit en de polarisatie van de huid.

Vergelijken wij een kortdurende hooge spits uit het Ekg, bijv. een der toppen van de *QRS*-groep, met een geringe, langer aanhoudende uitwijking, bijv. een breede, lage *T*-golf. De scherpe spits zal hooger worden dan met de werkelijke potentiaalschommeling van het lichaam en de ijking van den galvanometer overeenkomt. Want gedurende het korte oogenblik, dat de stroom van het lichaam door den galvanometer wordt gezonden, speelt de weerstand der opperhuid r_m een geringe rol. Deze weerstand wordt als het ware door de capaciteit der huid C_m kortgesloten, zoodat de stroom door den galvanometer gedurende een oogenblik sterker is dan het bedrag, dat door den ijkingssstroom is aangegeven. Deze misvorming wordt nog vergroot door de omstandigheid, dat gedurende het schrijven van de spits de polarisatie der huid slechts een geringen invloed kan uitoefenen en de tegenelectromotorische kracht, die zich tijdens de ijking deed gelden, achterwege blijft of wordt verzwakt.

Bij deze beschouwing hebben wij aangenomen, dat het meetinstrument snel genoeg is, om elke door het hart ontwikkelde potentiaalschommeling nauwkeurig weer te geven. Is het niet

snel genoeg, dan worden de spitse toppen lager, zoodat men op het denkbeeld zou kunnen komen, de aanwijzingen van het meetinstrument opzettelijk te vertragen of een traag uitslaanden galvanometer boven een snel uitslaanden te verkiezen. Maar hier zij daartegen onmiddellijk opgemerkt, dat een dergelijke methode om de fouten te compenseeren, die door de capaciteit en de polarisatie der huid worden veroorzaakt, verwerpelijk is. Een traag instrument kan de oorzaak zijn van nog grootere misvormingen dan die wij boven hebben beschreven.

Bij de breede, lage *T*-golf werkt de polarisatie in omgekeerden zin als bij de scherpe spitsen der *QRS*-groep. Zij zal zich hier, indien men bijv. met een uitslag van 1 mm — overeenkomende met een spanningsverschil van 0,1 millivolt —, heeft te doen, sterker doen gelden dan tijdens de ijking, die met een 30-maal hogere spanning heeft plaats gehad. Het gevolg moet zijn, dat de *T*-golf lager wordt geregistreerd dan zij behoorde te zijn.

Men kan de genoemde fouten verkleinen door gebruik te maken van groote huidoppervlakken, waarvan de stroom wordt afgeleid. Door de geringere stroomdichtheid, die daarbij in de huid ontstaat, wordt het effect van de polarisatie verkleind, terwijl verder ook de invloed der capaciteit afneemt. Wel is waar wordt de capaciteit C_m door de vermeerdering der oppervlakte vergroot, maar de weerstand r_m wordt daarmee evenredig verkleind. $C_m r_m$ mag als vrij wel constant worden beschouwd. Hoe kleiner r_m wordt, des te meer beteekenis verkrijgen de overige weerstanden in de keten. Kon men zoo groote huidoppervlakken gebruiken, dat r_m tegenover $w_m +$ den galvanometerweerstand kon worden verwaarloosd, dan zou door de aanwezigheid van capaciteit in de huid ook slechts een te verwaarloozen verschil overblijven tusschen de initiaalstroomsterkte en de blijvende stroomsterkte, die door het plot-

seling aanbrengen van een potentiaalverschil werd teweeggebracht.

Bij het prikkelen van spieren en zenuwen in de electrodiagnostiek en electrotherapie is het in den regel niet goed mogelijk, om de prikkelende electrode met een groote huidoppervlakte in aanraking te brengen. Daarentegen is men in de praktijk der electrocardiographie gewoon de beide onderarmen en een voet geheel in een keukenzoutoplossing onder te dompelen.

Maar ook deze groote oppervlakten zijn niet voldoende om bij een overigens geringen weerstand in de keten de misvorming van het Ekg tegen te gaan. Een nauwkeurige kromme kan alleen verkregen worden, wanneer de totale weerstand in de keten niet beneden zekere grenswaarde daalt. Ten bewijze reproduceeren wij in de figuren 29 en 30 een paar krommen, die verkregen zijn bij een proefpersoon, die zijn onderarmen in elektroden met een 1-procents keukenzoutoplossing heeft gedompeld. De galvanometer is geshunt en de snaar zoo sterk gespannen, dat 1 mm der ordinaten correspondeert met een spanningsverschil van 70 millivolt en wij dus met een gevoeligheid te doen hebben, die 700-maal geringer is dan de gewone cardiogramgevoeligheid. Onder deze omstandigheden zijn de schommelingen van het Ekg niet meer in de kromme zichtbaar.

In fig. 29 is weinig meer dan de lichaamsweerstand ten bedrage van 1700 Ω in de keten aanwezig, in fig. 30 bevat deze nog een extraweerstand van 10.000 Ω , zoodat de totale weerstand hier 11.700 Ω wordt.

Bij *a* wordt plotseling een potentiaalverschil van 2,1 volt in-, bij *b* uitgeschakeld. Het verschil tusschen de beide figuren is sprekend. In fig. 29 ziet men toppen, als gevolg van een sterken initiaalstroom, te voorschijn komen van de dubbele hoogte als de blijvende uitslag, terwijl in fig. 30 de toppen veel kleiner worden. Maar 10.000 Ω is blijkbaar nog niet vol-

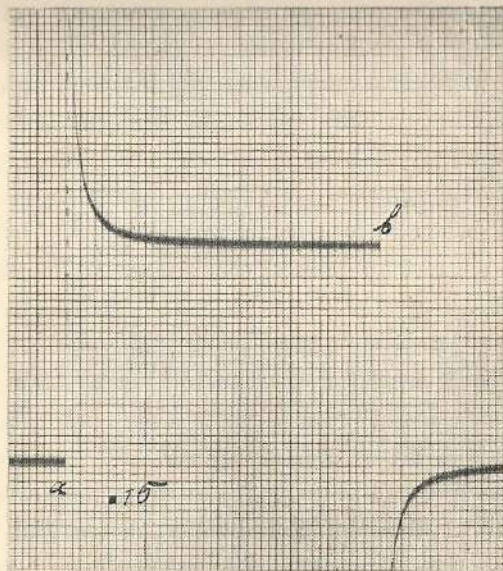


Fig. 29.

Beide armen in 1 % NaCl-oplossing. $V = 2,1$ volt. $Sh = 51 \Omega$.
Lichaamsweerstand = 1700Ω . Geen extraweerstand.

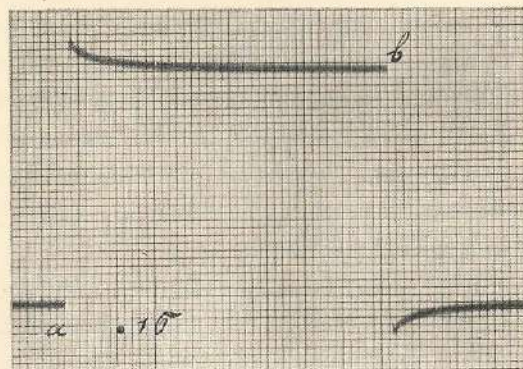


Fig. 30.

Beide armen in 1 % NaCl-oplossing. $V = 2,1$ volt. $Sh = 375 \Omega$.
Lichaamsweerstand = 1700Ω . Extraweerstand = 10000Ω .

doende, om in de gegeven omstandigheden de misvorming geheel weg te nemen. Daartoe zou een nog grootere extraweerstand nodig zijn. Deze wordt overbodig, wanneer men door gebruik te maken van andere oplossingen, waarin de lichaamsdeelen worden gedompeld, den huidweerstand verkleint.

De figuren 31 en 32 zijn genomen onder dezelfde voorwaarden als de beide vorige, evenwel met dit verschil, dat de 1-procents keukenzoutoplossing door een 20-procentsop-

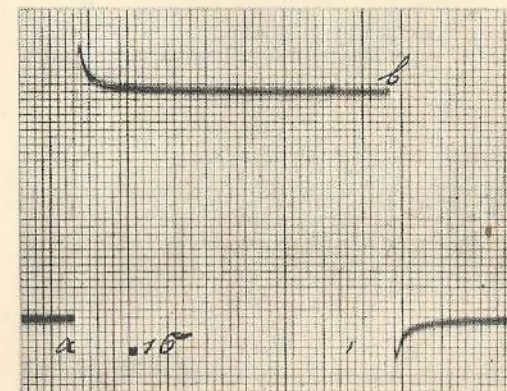


Fig. 31.

Beide armen in warme 20 % NaCl oplossing. $V = 2,1$ volt. $Sh = 23 \Omega$.
Lichaamsweerstand = 800Ω . Geen extraweerstand.

lossing van hetzelfde zout is vervangen. De lichaamsweerstand is van 1700Ω tot 800Ω gedaald. In fig. 31 bevat de keten geen extraweerstand, in fig. 32 is 10.000Ω extra ingeschakeld. Men ziet, dat de top, die in fig. 31 reeds belangrijk kleiner is dan in fig. 29, door de inschakeling van den extraweerstand in fig. 32 zoo goed als geheel verdwijnt. De kleine verheffing, die er nog overblijft, is het gevolg van de niet geheel aperiodysche beweging der snaar gecombineerd met de technische onvolkomenheid, waarvan op blz. 33 sprake is geweest. De

figuren 29 tot 32 toonen aan, van welke beteekenis het is, dat bij het electrocardiografeeren de huidweerstand wordt verkleind en een groote extra-weerstand in serie met het lichaam wordt geschakeld. Maakt men van een 20-procents keukenzout-oplossing gebruik en beschikt men over een doelmatige snaar met een weerstand van de orde van grootte van 10.000Ω dan behoeft men voor een misvorming der krommen door de capaciteit en de polarisatie der huid niet te vreezen. Gebruikt

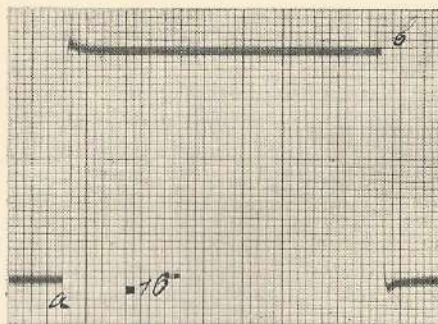


Fig. 32.

Beide armen in warme 20 % NaCl-oplossing. $V = 2,1$ volt.
 $Sh = 330 \Omega$. Lichaamsweerstand $= 800 \Omega$. Extraweerstand $= 10000 \Omega$

men daarentegen een dikke snaar of neemt men een spiegel-instrument van geringen weerstand in plaats van den snaar-galvanometer, dan verkeert men in ongunstiger omstandigheid. Het nadeel kan niet door het inlasschen van een extra-weerstand in de keten worden opgeheven, daar bij de gevoeligheid, die vereischt wordt, het inschakelen van een extra-weerstand vertraging van de aanwijzingen van het meetinstrument ten gevolge heeft en men, zooals wij boven reeds hebben betoogd, deze vertraging moet trachten te vermijden.

HOOFDSTUK V.

SAMENVATTING.

1. De eigenschappen van het menschelijk lichaam als stroomgeleider zijn onderzocht bij toepassing van gelijkstroom en van wisselstroom.

De meting van den gelijkstroom geschiedde met een snaargalvanometer, die zich door groote instelsnelheid onderscheidde en in ongeveer 1σ een aperiodischen uitslag volbracht. De meting der wisselstroomen geschiedde met een thermogalvanometer van DUDDELL.

2. Uit den vorm der krommen, die met den snaargalvanometer werden verkregen, kon worden afgeleid, dat de huid tegenelectromotorische krachten ontwikkelt en zich dus gedraagt als een polariseerende cel, maar dat zij bovendien een electrostatische capaciteit bezit. De tegenelectromotorische kracht, die de huid ad maximum kan ontwikkelen, werd gemeten door haar gedurende eenige minuten bij 10 volt spanning en met matige stroomdichtheid te doorstroomen. Zij moet op 0,5 volt worden gesteld.
3. De invloed der electrostatische capaciteit doet zich in de kromme gelden door de ontwikkeling van scherpe, hooge toppen. De vorm daarvan is behalve van de capaciteit zelf ook afhankelijk van de weerstanden en de polarisatie in de huid en van de snelheid, waarmede de snaar zich instelt. Daarom is het niet gemakkelijk, het bedrag der capaciteit uit de geregistreerde toppen te berekenen. Toch

kan een schatting worden uitgevoerd en deze leidt tot uitkomsten, die met de metingsresultaten met wisselstroomen wel in overeenstemming zijn.

4. Men moet in het lichaam twee weerstanden streng van elkaar onderscheiden: dien van de inwendige deelen, dien wij w_m hebben genoemd en dien van de opperhuid, r_m . Deze laatste maakt de huid tot een onvolkomen condensator.

De vorm der krommen, die met den snaargalvanometer worden geregistreerd, wordt door w_m op andere wijze beïnvloed dan door r_m . Evenals C_m kunnen de waarden van w_m en r_m met behulp der krommen worden geschat, welke schattingen eveneens tot uitkomsten leiden, die met de metingsresultaten met wisselstroomen in overeenstemming zijn.

5. Doorstroomt men de huid met een sterken stroom, dan wordt vooral r_m belangrijk kleiner. Daarmede gaat een vermindering van de polarisatie gepaard. Weerstands- en polarisatiewijziging hebben steeds parallel en in denzelfden zin plaats, hetgeen ook theoretisch volkomen verklaarbaar is. Beide verschijnselen toch zijn in de huid gevolgen van eenzelfde oorzaak, te weten de verandering in ionenconcentratie. Neemt de ionenconcentratie toe, dan nemen weerstand en polarisatie beide af en omgekeerd.
6. De toegepaste wisselstroomen hadden 50, 960, 3400 en 6800 perioden per seconde. De eerstgenoemde frequentie werd direct verkregen uit de standscentrale, de overige met de beide „Hochfrequenzmaschinen” van SIEMENS & HALSKE. De door deze toestellen verwekte wisselstroomen werden door inductieve koppeling aan een gesloten oscillatieketen van neventrillingen bevrijd. Wij beschikten zodoende over zuiver sinusoidale stroomschommelingen,

waarvan de vorm niet door de aanwezigheid van boven-tonen werd beïnvloed.

7. De schijnbare lichaamsweerstand neemt bij doorstroming met wisselstroomen af naarmate de frequentie daarvan grooter wordt. Bevindt zich een zelfinductie in de keten, dan kan de schijnbare lichaamsweerstand zelfs negatief worden. Dit moet worden toegeschreven aan de omstandigheid, dat de huid capaciteit heeft.
8. Het vermogen der huid om tegenelectromotorische krachten te ontwikkelen deelt haar een polarisatiecapaciteit mede. Maar het polariseerend vermogen der huid is zóó gering, met andere woorden haar polarisatiecapaciteit is zóó groot, dat men daarmede geen rekening behoeft te houden, wanneer men wisselstroomen van groote frequentie toepast.
9. Voor de dielectrische of electrostatische capaciteit van de huid der vingers werd gevonden bij den proefpersoon W. $6,3 \times 10^{-9}$, bij den proefpersoon Z. $7,7 \times 10^{-9}$ F. per cm^2 huidoppervlakte. Bij de huid van den onderarm werden waarden gevonden, die een weinig grooter waren n.l. 10×10^{-9} en 15×10^{-9} F. per cm^2 , maar hierbij dient te worden vermeld, dat voor de metingen aan den onderarm andere proefpersonen hebben dienst gedaan.
10. Voor den weerstand der inwendige deelen w_m werd gevonden in de vingers bij den proefpersoon W. ... 1034, bij den proefpersoon Z. ... 944 Ω , terwijl deze waarde in den onderarm bij L. en H. resp. 408 en 323 Ω bedroeg. Dat de stroom op zijn weg door de inwendige deelen van den eenen vinger naar den anderen eener zelfde hand zooveel meer weerstand ondervindt dan tusschen twee plaatsen van den onderarm, moet niet alleen daaraan worden toegeschreven, dat de laatste weg breeder is, maar

ook aan de omstandigheid, dat de specifieke weerstand van het been- en peesweefsel in de vingers grooter is dan van de spiermassa, waaruit de onderarm in hoofdzaak is opgebouwd.

11. Voor r_m werd bij de proefpersonen W. en Z. aan de vingers gevonden 104.000 en 92.000 Ω voor 1 cm², terwijl twee andere proefpersonen aan den onderarm 72.000 en 31.000 Ω voor 1 cm² vertoonden. Er is geen van de door ons gemeten waarden zoo veranderlijk als r_m , die zich vooral wijzigt, wanneer de huid gedurende eenigen tijd met sterke stroomen wordt doorstroomd.

De bovenstaande getallen hebben betrekking op de waarde van r_m , zooals die bij het begin van een proevenreeks werd gevonden. Aan het eind der reeks nadat de huid geruimen tijd vochtig was geweest en daarbij eenigen tijd was doorstroomd geworden, verminderden de bedragen vrij belangrijk. Van 104000 tot 70000 en van 92000 tot 75000 Ω voor 1 cm². Maar indien de huid opzettelijk met sterke stroomen doorstroomd was, konden verminderingen worden geconstateerd, waarbij slechts $\frac{1}{5}$ of $\frac{1}{6}$ van het oorspronkelijke bedrag was overgebleven.

De oorzaak van het verschijnsel moet worden gezocht in kataphoresen en ionenverplaatsingen en de verwachting mag worden uitgesproken, dat toepassing van grootere stroomdichtheden dan de door ons aangewende een nog belangrijker weerstandsvermindering dan de bovengenoemde ten gevolge zal hebben.

12. Ofschoon niet zoo veranderlijk als r_m , zijn toch ook C_m en w_m niet geheel constant. C_m neemt met afnemende frequentie een weinig toe, hetgeen wij geneigd zijn toe te schrijven aan de omstandigheid, dat de wisselstroomen van lagere frequentie waarschijnlijk dieper door de opper-

huid heendringen en zodoende de half isoleerende laag, die zij vormt, dunner maken.

De waarde van w_m neemt bij sterke doorstroming van het lichaam 10 tot 20 % af, hetgeen vermoedelijk aan de verwarming door den stroom moet worden toegeschreven.

13. De kennis van de boven beschreven verschijnselen heeft niet alleen theoretische waarde, maar is ook praktisch van beteekenis zoowel in de electrophysiologie als in de electrodiagnostiek en electrotherapie. Bij prikkeling van spieren en zenuwen in het menschelijk lichaam is het wenschelijk de stroomsterkte te kennen, waarmede geprikkeld wordt. Evenwel kan men die onder gewone omstandigheden niet op een milliampèremeter of een ander gebruikelijk meetinstrument aflezen, daar zij alle te traag zijn om den initiaalstroom aan te geven. De hierdoor ontstane moeilijkheid kan grootendeels worden opgeheven door gebruik te maken van een stroombron van hooge spanning met een grooten in serie geschakelden weerstand.
14. In de electrocardiographie is het gebruik van meetinstrumenten met geringen weerstand, zooals bijv. een spiegelinstrument of een snaargalvanometer met dikke snaar, niet aanbevelenswaardig. De hierdoor veroorzaakte misvormingen der te registreeren krommen kunnen niet goed gemaakt worden door het inschakelen van een grooten weerstand in serie met het lichaam. Dit zou een ongewenschte vertraging in de aanwijzingen ten gevolge hebben.

Men gebruike daarentegen een snaar van doelmatige lengte en dikte en wel zoo, dat zij bij de verlangde gevoeligheid aan een voldoende snelheid van uitslag een grooten weerstand paart.

STELLINGEN.

STELLINGEN.

I.

De gebreken in de techniek, die bij het electrodiagnostisch onderzoek gebruikelijk is, geven dikwijls aanleiding tot het trekken van onjuiste besluiten.

II.

De werking van urotropine bij ontstekingen van de urine-wegen berust in de eerste plaats op verhoogde diurese; aan de desinfecteerende werking door afsplitsing van formaldehyde mag geen invloed van beteekenis worden toegekend.

III.

De opvatting van ENGELMANN, dat prikkeling van den nervus vagus de prikkelbaarheid van het hart zou verhoogen, is onjuist.

IV.

Digitalis, atropine, physostigmine, morphine en chinidine zijn, ondanks hun principieele verschillen, alle geschikt om atriumfibrillatie en atriumfladderen te bestrijden. De werkzaamheid van deze middelen wordt bepaald door de gevoeligheid van het autonome zenuwstelsel en van de hartspier zelf voor hun invloed.

K.N.O.
104/52

V.

De wet van DUBOIS—REYMOND (z.g. algemeene wet van zenuwprikkeling) geldt niet voor centripetale zenuwen.

VI.

De functie van de motorische voorhorencellen bestaat in het reguleeren van het rythme van de motorische impulsen.

VII.

De geneeskundige dienst in het leger worde als regel waargenomen door officieren van gezondheid, die als zoodanig geschoold zijn.

VIII.

Bij iedere geneeskundige faculteit behoort de gelegenheid open te staan voor studie van de geschiedenis der geneeskunde onder leiding van een docent.

IX.

Indien de algemeene toestand van een patient, die het vermoeden wekt, dat zijn buikorganen zijn aangedaan, maar van wiens ziekte geen zekere diagnose kan worden gesteld, merkbaar achteruit gaat, worde een proeflaparotomie niet langer uitgesteld.

X.

Het is wenschelijk om gedurende iedere narcose en bij iedere ingrijpende operatie den toestand van het hart met behulp van een electrocardiograaf te controleeren.

XI.

Het verdient aanbeveling het onderwijs in algemeene bacteriologie en immuniteitsleer te geven voor het candidaats-examen.

XII.

De drukverhooging, die als gevolg van vaatverwijding in een aneurysma wordt teweeggebracht, heeft geen beteekenis voor de pathologie.

XIII.

Bij aandoeningen van de adnexa van het vrouwelijk genitaalapparaat worde steeds een nauwkeurig onderzoek naar den pijnzin van de buikhuid ingesteld.

