OVER DE MODERNE INZICHTEN OMTRENT HET WEZEN DER ELECTRICITEIT.

DOOR

Dr. G. J. W. BREMER.

In het jaar 1759 werd door ROBERT SYMMER omtrent het wezen der electriciteit een hypothese gesteld, die veel opgang maakte en tot voor betrekkelijk korten tijd nog algemeen gebruikt werd. Hij veronderstelde, dat er twee electrische vloeistoffen bestonden, die tegengestelde eigenschappen bezaten, in zoo verre, dat de deeltjes eener zelfde vloeistof elkaar afstooten, maar die van de tegengestelde vloeistoffen elkaar aantrekken. Zijn beide vloeistoffen in gelijke mate in een lichaam aanwezig, dan toont dit zich niet electrisch of, zooals SYMMER het uitdrukte neutraal electrisch. Door wrijving worden de beide vloeistoffen gedeeltelijk gescheiden. LICHTENBERG (1778) noemde de electriciteit, die glas krijgt bij wrijving met zeemleder, dat met tinamalgama bestreken is, positieve electriciteit, de andere de negatieve en zoo worden zij nog onderscheiden.

Hoe een electrisch lichaam op een afstand kon werken op een ander, was een vraag, die aanvankelijk niet gesteld werd Men wist door COULOMB, dat de werking omgekeerd evenredig was met de tweede macht van den afstand tusschen de lichamen en daarmede was men tevreden.

FARADAY begreep het eerst, dat door onderzoek kon blijken, of de stof tusschen de lichamen van invloed kon zijn op de electrische werking. Dit onderzoek is bekend gemaakt in de elfde reeks zijner verhandelingen, in de philosophical Transactions van 1838. Hierin zegt FARADAY:

»Ik begin nu de groote vraag over het *specifiek verdeelingsvermogen* te onderzoeken, namelijk te onderzoeken of de verschillende dielectrische stoffen werkelijk een invloed op den graad der door haar heen plaats hebbende verdeeling uitoefenen. Wanneer dit het geval

was, dan scheen mij dit niet alleen hoogst gewichtig voor het verder begrip der wetten en resultaten der verdeeling, maar ook een nieuw en een zeer krachtig argument voor de door mij opgestelde theorie, dat het geheel op een moleculaire werking berust, niet op een werking op merkbaren afstand."

Op twee manieren heeft FARADAY de vraag onderzocht. 1o. door middel van een bolvormigen condensator, waarbij hij ook als diëlectrische stof het luchtledig kon nemen, 2o. door een eenvoudig toestel, dat men gemakkelijk kan namaken. De inrichting is deze:

Plaat A is een geïsoleerde, op een bepaalde potentiaal geladen plaat. B en C zijn twee geheel gelijke, ook geïsoleerde platen, die ter weêrszijden van A verschuifbaar zijn opgesteld. In een glazen flesch waren twee goudblaadjes geïsoleerd opgehangen. Het eene goudblaadje werd met de plaat B verbonden, het andere met de plaat C. De platen B en C verbindt men tijdelijk met den grond. Wordt A dan positief geladen, dan worden B en C door inductie negatief electrisch. Zijn B en C dan op gelijken afstand van A, dan hangen de goudblaadjes evenwijdig aan elkander, maar plaatst men nu een plaat van schellak of van zwavel tusschen A en B, of tusschen A en C dan trekken de goudblaadjes elkander aan. Men kan tegenwoordig de proef zoodanig wijzigen, dat men gemakkelijk de zoogenaamde diëlectrische constante van de stof kan bepalen. Daarvoor laadt men A zeer doelmatig met een zuil van ZAMBONI. B en C worden met de tegenovergestelde kwadrantenparen van een electrometer van THOMSON verbonden. Zoodra men nu een plaat zwavel of een andere diëlectrische stof tusschen A en B of tusschen B en C brengt, ziet men den vleugel van den electrometer afwijken en wel in dezelfde richting als wanneer men de platen, waartusschen de diëlectrische stof geschoven is, dichter bij elkaar gebracht had. Schuift men nu deze platen verder uit elkaâr, dan kan de vleugel weer in den vroegeren stand terug gebracht worden. Men beoordeelt de afwijking van den vleugel door weerkaatsing van licht op een aan den vleugel bevestigd spiegeltje. Meet men nu de afstanden, die de beide platen B en C van A hebben en de dikte van de schijf der diëlectrische stof, die tusschen een der platen en de plaat A geschoven was, dan kan men daaruit gemakkelijk de diëlectrische constante van die stof bepalen. Deze verschilt nu naar gelang van den aard der stof, hetgeen beteekent, dat de electrische werking met verschillende intensiteit door even dikke lagen van verschillende diëlectrische stoffen heen gaat.

Hiermede was door FARADAY bewezen, dat werkelijk de diëlectrische stof tusschen de lichamen de electrische kracht overdraagt. Door MAX-

WELL is aan zijn denkbeelden een mathematische vorm gegeven. Daar electrische werkingen ook door het luchtledige plaats hebben, zoo is de aether ook een diëlectricum. Men kan zeggen, dat de beweegbare stof het diëlectrisch vermogen van den aether wijzigt. Het is wel zoo opgevat, dat de aether bestaat uit twee bestanddeelen, nl. uit electrische stof en een tweede bestanddeel. De deeltjes van de electrische stof zouden ten opzichte van elkaâr verplaatsbaar zijn, maar die van het tweede bestanddeel niet. Hierover kan men b.v. de leerboeken van prof. JULIUS en prof. WIND raadplegen. Van dit laatste boek gaf ik in den jaargang 1904 p. 278—288, een kort overzicht.

Welke voorstelling men zich ook vormen wil over het ontstaan van een electrisch veld, volgens MAXWELL moet het in ieder geval daardoor gekenmerkt zijn, dat er spanningen zijn in de richting der krachtlijnen en drukkingen loodrecht daarop.

De verschijnselen van de electrolyse hadden reeds de voorstelling opgewekt, dat de electriciteit als 't ware atomistisch zou samengesteld zijn. Wanneer bij de ontleding door den electrischen stroom een waterstof-atoom aan de negatieve pool wordt vrij gemaakt, dan heeft dit de kleinste hoeveelheid positieve electriciteit, terwijl b.v. een vrij geworden chloor-atoom, dat naar de positieve pool gaat, de kleinste hoeveelheid negatieve electriciteit zou bezitten. Hoe nu de kennis van de kathodestralen en van de stralen der radioactieve stoffen de overtuiging bracht, dat er kleinste electrisch geladen stofdeeltjes zijn, die men electronen noemt, is door dr. KETNER behandeld in een opstel, „de electronen en het vraagstuk van de oerstof", voorkomende in de November- en December-aflevering van 1904 van dit tijdschrift. [1])

Sedert dien tijd is er natuurlijk alweer het een en ander over het onderwerp geschreven en daarom meen ik den lezers van dit tijdschrift een aanvulling van het opstel van dr. KETNER te mogen geven.

Wanneer men een meer volledige studie van dit onderwerp wenscht te maken, dan beveel ik ten zeerste aan de volgende boeken:

H. A. LORENTZ, „Ergebnisse und Probleme der Electronentheorie" (62 pag.); AUGUSTO RIGHI, uit het Italiaansch in het Duitsch vertaald door B. DESSAU, „Die moderne Theorie der physikalischen Erscheinungen (Radioactivität, Ionen, Elektronen), (152 pag.); J. J. THOMSON, „Electricity and Matter (162 pag.)."

De electronen zijn in alle vaste, vloeibare en gasvormige stoffen

---

1) Op de pagina's 68 en 71 van dit opstel komt een zeer storende fout voor. Daar staat als lading van één atoom waterstof of die van één electron pl.m. 10^{20} electromagn. eenheden. Dit moet zijn 10^{-20} electromagn. eenheden.

voorhanden en uit hun rangschikking, beweging en werking moet men trachten alle electromagnetische werkingen te verklaren. Bij een geleider, waarop de electriciteit in evenwicht is, denkt men zich een dunne laag van positieve of negatieve electronen op de oppervlakte. Bij een stroom door een metaaldraad gaan de positieve electronen in de eene richting en de negatieve in de tegenovergestelde, misschien beide tegelijkertijd, zoodat men een „dubbelstroom" krijgt.

„Deze beweging", zegt LORENTZ, „waarin wij het wezen van een electrischen stroom zien, is een regelmatige, geordende. Zij wordt echter overal, waar een weerstand overwonnen moet worden, in een ongeordende warmtebeweging omgezet. Zoo worden de kooldraden onzer electrische lampen gloeiend en worden de daarin heen en weer trillende electronen de uitgangspunten van een licht- en warmtestraling."

In den vrijen aether zijn volgens LORENTZ geen electronen aanwezig, dus ook geen electrische stof. Rondom een electron ontstaat in den aether een electrisch veld, dat aan de vergelijkingen van MAXWELL voldoet, dat wil zeggen, er ontstaan spanningen volgens de krachtlijnen en drukkingen loodrecht daarop. Daar wij echter den bouw van den aether niet kennen, weten wij niet wat er eigenlijk in den aether plaats heeft om dezen toestand te voorschijn te brengen. Verplaatst zich een electron, dan wordt in den aether een magnetisch veld opgewekt, dat men evenals bij het electrische veld wel kan beschouwen als een vervorming in den aether, maar in beide gevallen zijn deze niet gelijk, wel echter analoog, want ook hierbij zijn spanningen volgens de krachtlijnen en drukkingen loodrecht daarop. Is de beweging rechtlijnig, dan zijn de magnetische krachtlijnen cirkels, waarvan de middenpunten op de baan der beweging liggen en wier vlakken loodrecht op de baan zijn. Daar men een electrischen stroom kan beschouwen als een reeks electronen, die zich eenparig bewegen, zoo zijn dus de krachtlijnen van een stroom electrische cirkels om den stroomgeleider.

Wanneer de beweging der electronen veranderlijk is, zooals bij het ontstaan en afbreken van een stroom, dan is ook het opgewekte magnetisch veld veranderlijk en dan treden inductieverschijnselen (zelfinductie) op. Is de beweging periodisch, dan ontstaan electrische golven of lichtgolven, waarvan de voortplantingssnelheid die van het licht is.

Bij een verandering der snelheid ontstaat een verandering van het magnetisch veld en dit doet weer een electrische kracht ontstaan, die de veranderingen der beweging tegenwerkt. Dit heeft zoowel plaats bij het toenemen als bij het afnemen van de snelheid. Zoo zal elke verandering van de stroomsterkte een electromotorische kracht opwek-

ken, die tracht deze verandering tegen te gaan; dit is de electromotorische kracht van de zelfinductie.

Bij een plotselinge verandering der snelheid van een electron, zooals plaats heeft bij de botsing van de kathodestralen in een Röntgenbuis, ontstaat er in den aether een electromagnetische golf, die analoog is aan de explosiegolven in de lucht. Zoo ontstaan de Röntgenstralen.

Men kan nu de vraag stellen of men in de electronen-theorie der metalen zal aannemen, dat er ééne of twee soorten van vrije atomen zijn. LORENTZ toont, dat de veronderstelling dat beide soorten van electronen vrij kunnen voorkomen reeds moeilijkheden aanbiedt, als een stroom van een metaal in een ander overgaat. Voor dit betoog verwijs ik den lezer naar bovengenoemd boek van LORENTZ p. 44—46. Verder zegt hij: „Tegen deze (dubbelstroomen) spreekt overigens ook het feit, dat in alle gevallen, waarbij men ontwijfelbaar met positieve electronen te doen heeft, zooals bij de kathodestralen en de α-stralen, de massa van dezelfde orde en grootte is als bij de chemische atomen. Hieraan zou beantwoorden, dat de positieve ladingen zich nooit van de metaal-atomen scheiden en dat de negatieve den overgang der electriciteit van de eene plaats naar de andere tot stand brengen, terwijl zij vrij door de moleculaire tusschenruimten loopen."

Door de electronentheorie kan men zich van verschillende physische verschijnselen rekenschap geven, LORENTZ beschrijft in zijn boek hoe men daardoor verklaren kan, dat de verhouding tusschen den warmte-geleidingscoëfficient **k** en den geleidingscoëfficient voor electriciteit σ bij een zelfde temperatuur voor verschillende metalen gelijk is.

In de tweede plaats verklaart hij door de electronentheorie de verschijnselen van den thermoëlectrischen stroom en die van het zoogenaamde Hall-effect.

Alleen van zijn beschouwing over genoemden geleidingscoëfficient zal ik hier een kort overzicht geven. Een electrische stroom moet beschouwd worden als een voortgaande beweging van electronen in de ruimten tusschen de metaalatomen. Wanneer, zooals de ervaring geleerd heeft [1]), een standvastige betrekking bestaat tusschen de coëfficienten van warmte- en electriciteitsgeleiding, dan moet men de geleiding van de warmte ook toeschrijven aan de bewegelijke electronen, die door hem »*vrije*« electronen genoemd worden.

---

1) De resultaten van een onderzoek door JAEGER en DIESSELHORST over de verhouding van genoemde coëfficienten bij 18° en bij 100° zijn in het boek van LORENTZ medegedeeld

Om een geleiding van warmte uit de beweging van die electronen te construeeren, toont hij de analogie aan tusschen deze beweging en die van de gasmoleculen volgens de kinetische gastheorie. Volgens deze is in ieder gas de gemiddelde energie der moleculen evenredig aan de absolute temperatuur T en verder is, bij een bepaalde temperatuur, deze gemiddelde energie voor alle gassen even groot, zoodat men ze kan voorstellen door α T, waarin α altijd dezelfde waarde heeft. Zelfs heeft de mathematische behandeling van de moleculaire bewegingen tot het besluit geleid, dat de constante α voor elk individueel deeltje, dat aan de moleculaire beweging deel neemt, onverschillig hoe groot of hoe klein het is, hetzij het een molecule, een atoom of een ion zij, en in welk lichaam zich het ook mag bevinden, gemiddeld dezelfde waarde heeft. Neemt men aan, dat hier negatieve electronen in het spel zijn en dat de massa daarvan het 2000ste deel is van die van een waterstofatoom, dus het 4000ste deel van die van een waterstofmolecule, dan moet zulk een electron, om dezelfde kinetische energie te hebben als een waterstofmolecule, zich met meer dan 60 maal grootere snelheid bewegen. Verder zullen de electronen bij hun beweging telkens tegen elkander of tegen de metaalatomen botsen. Dit laatste zal hier de hoofdrol spelen en de gemiddelde lengte van den rechtlijnigen vrijen weg bepalen; want bij de geleiding der electriciteit heeft men te doen met een strooming van electronen in dezelfde richting en daarbij kan door de onderlinge botsingen geen weerstand ontstaan. Maar dan zal een invloed, die zich slechts toont bij een van beide verschijnselen, de constante verhouding tusschen de grootheden, die men tracht te verklaren, storen.

In de theorie van de warmtegeleiding kan men nu geheel het voorbeeld der gastheorie volgen. Is in een verticale luchtkolom de temperatuur boven hooger dan beneden, dan is in de bovenste lagen de snelheid der moleculen het grootst. Uit de bovenste lagen dringen moleculen in de diepere en omgekeerd zullen moleculen met geringer snelheid uit de diepere lagen in de hoogere geraken. Daardoor zal het temperatuurverschil afnemen en een warmtegeleiding tot stand komen. Iets dergelijks heeft plaats bij de electronen in een metaal, dat op verschillende plaatsen ongelijk verwarmd is en ook hier komt het aan op de weglengte, die een deeltje rechtlijnig kan doorloopen. Hoe grooter deze is, des te verder dringen de electronen van de eene laag in de andere, dat blijkbaar een overdraging van energie, dus een warmtegeleiding tot stand brengt.

Van deze overweging uitgaande, heeft DRUDE een formule afgeleid voor den coëfficient van warmtegeleiding.

Noemt men N het aantal electronen per volume-eenheid, **u** de gemiddelde snelheid van hun warmtebeweging en **l** de gemiddelde vrije weglengte, terwijl α de bovengenoemde constante is, dan is volgens DRUDE $k = {}^1/_3 \alpha N l u$.

Ook voor de electrische geleiding speelt de warmtebeweging een rol en is de lengte van den vrijen weg van invloed. Zoo lang toch nog geen electrische kracht op het metaal werkt, is de beweging der electronen volkomen ongeregeld, naar alle richtingen vliegen zij in gelijke mate heen en weer. De electrische kracht brengt hierin zekere orde, terwijl onder haar invloed bewegingen volgens de richting der kracht iets meer voorkomen (misschien maar zeer weinig, dat hangt van de grootte der kracht af) dan bewegingen in andere richtingen. Men kan het ook zoo zeggen, dat bij de bestaande onregelmatige beweging nog een bepaalde snelheid in die richting, een *stroomsnelheid* gekomen is. Gelukt het deze te berekenen, dan kan men hieruit gemakkelijk het aantal electronen afleiden, die per tijdseenheid en per vlakte-eenheid gaan door een vlakte-element, dat loodrecht staat op de electrische kracht. Om een uitdrukking voor den electrischen stroom te krijgen, moet men dan dit aantal electronen met de lading **e** van één electron vermenigvuldigen en dan krijgt men ten slotte, bij deeling door de grootte der electrische kracht zelve, den gevraagden geleidings-coëfficient σ.

Men vindt dan $\sigma = \frac{e^2 N L u}{4 \alpha T}$ Bij vergelijking van deze formule met die van **k**, ziet men, dat beide den factor **N l u** bevatten. De grootheden **N** en **l** zijn waarschijnlijk in de afzonderlijke metalen zeer verschillend. Deelt men **k** door σ dan vallen zij weg en de verhouding $\frac{k}{\sigma} = \frac{4}{3}\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 T$ bevat slechts grootheden, die afhankelijk zijn van de bijzondere eigenschappen der metalen. Het is dus DRUDE werkelijk gelukt, van de gelijkheid der verhouding $\frac{k}{\sigma}$ bij verschillende metalen rekenschap te geven, hetgeen LORENTZ als een der schoonste uitkomsten van de electronentheorie beschouwt. Zijn formule toont verder, dat de waarde $\frac{k}{\sigma}$ evenredig met de absolute temperatuur toeneemt, hetgeen met de waarnemingen in overeenstemming is.

Bij de beoordeeling van dit resultaat moet men niet uit het oog verliezen, dat men zonder de electronentheorie in het minst geen grond zou kunnen zien voor den samenhang van de beide geleidingsvermogens.

Dr. KETNER heeft in zijn opstel hierboven genoemd, p. 81, melding gemaakt van een zeer belangrijke verhandeling van J. J. THOMSON, waarin het bewijs geleverd is dat een electrisch geladen voorwerp bij

zijn beweging er nog een »schijnbare massa« bij gekregen heeft.

Heel merkwaardig wordt dit bevestigd door onderzoekingen van KAUFMANN [1]), medegedeeld in het meermalen genoemde boek van LORENTZ. KAUFMANN liet op β stralen van radium, die verschillende snelheden hebben, zoowel een electrisch als een magnetisch veld inwerken, die dezelfde richting hadden en wel loodrecht op die der stralen. Door het electrisch veld krijgen de stralen een afwijking in het vlak gelegd door de electrische krachtlijnen en de stralen, en zij is loodrecht op de stralen gericht. Door het magnetisch veld krijgen de stralen een afwijking loodrecht op het vlak door de stralen en de magnetische krachtlijnen gelegd. Door als scherm een photographische plaat te gebruiken, die hij op een kleinen afstand van het uitgangspunt der stralen plaatste, kon hij kromme lijnen constateeren, die hem de waarden van $\frac{e}{m}$ voor stralen van verschillende snelheid deden kennen. Het bleek nu, dat $\frac{e}{m}$ bij toenemende snelheid der stralen afnam. Daar men de lading e als constant moet beschouwen, zoo besloot KAUFMANN dat m toenam.

Wanneer men nu aan een electron behalve de gewone „*ware*" massa m^0 nog een *schijnbare* of *electromagnetische* massa m' toekent, dan bleek, dat de som van beide (*effectieve* massa) $m^0 + m'$ in dezelfde mate met de snelheid verandert als de electromagnetische massa moet doen volgens een formule, berekend door ABRAHAM [2]).

Hieruit moet men tot het besluit komen, „dat de negatieve electronen geen ware, maar alleen electromagnetische massa bezitten, dat zij als het ware slechts lading, zonder materie, zijn."

Iedere toeneming in de snelheid van een electron heeft een verandering van het magnetisch veld ten gevolge, waardoor weer een electrische kracht ontstaat, die de versnelling der beweging tegenwerkt. Tegen een vermindering van de snelheid verzet zich ook een electrische kracht, die er naar streeft de snelheid van het electron onveranderd te houden.

In ieder geval is de electro-magnetische werking zoodanig dat zij schijnbaar een *traagheid* te voorschijn roept.

»Beschouwt men dus", zegt RIGHI, »de electronen enkel als electrische ladingen zonder materie, of met andere woorden als een verandering in den aether, die in ieder geval symmetrisch om een punt

1). Gött. Nachr. 1901, 1902 en 1903.

2) $m' = \frac{e2}{2R} [(1 + \frac{1}{3}) + (\frac{1}{3} + \frac{1}{5}) \beta^2 + (\frac{1}{5} + \frac{1}{7}) \beta^4 + \quad]$
waarin e= electrische lading van het electron, 2R= middellijn van het electron, β= verhouding tusschen zijn snelheid en die van het licht.

gerangschikt is, dan volgt daaruit voor dezen, op grond der wetten van het electromagnetische veld, het schijnbare bestaan der traagheid, dat wil zeggen de fundamenteele eigenschap der materie. Derhalve verhindert niets de veronderstelling te vormen, dat de materie, en daarmede alle bestaande lichamen, opgebouwd zijn uit aggregaten of systemen van electronen.«

Zoo zou dan een materieel atoom bestaan uit een zeker aantal positieve en een even groot aantal negatieve electronen. De moleculair- en atoomkrachten zouden dan werkingen zijn van de electromagnetische krachten der electronen. Zelfs zou de algemeene aantrekking der stof op grond van deze beschouwingen verklaard kunnen worden.

Intusschen is men bij lange na nog niet zoo ver gekomen en moet men vooreerst alleen het slechts waarschijnlijk achten, dat in de vrije negatieve electronen geen ware massa voorkomt.