

OVER HET OVERBRENGEN VAN KRACHT

DOOR MIDDEL VAN DEN

ELECTRISCHEN STROOM

DOOR

Dr. E. VAN DER VEN.

De wetenschap, dat barnsteen (grieksch: *elektron*) electrisch wordt door wrijving, dagteekent van de grijze oudheid; THEOPHRASTUS kent haar zelfs toe aan THALES van *Milete*, die 600 jaar voor onze jaartelling leefde. Toch duurde het tot in de 16^e eeuw eer GILBERT — een tijdgenoot van GALILEI, dien deze »benijdenswaardig groot” noemde — het verschijnsel maakte tot een voorwerp van onderzoek, dat op den naam »wetenschappelijk” aanspraak kon maken en het meer algemeen voorkomen daarvan, ook bij andere lichamen, aantoonde. De ook van elders bekende OTTO VON GUERICKE vervaardigde de eerste electriseermachine, waarin een snel wentelende bol van zwavel of van hars met de hand werd gewreven en in 1741 verving WINKLER daarin de hand door lederen kussens. Zoo ging het voort tot, tegen het einde van de vorige eeuw, VAN MARUM, in zijn groote, door CUTHBERSON te Amsterdam vervaardigde machine, op dit gebied vrij wel het laatste woord sprak.

Alle dezen, van de kinderen der wilden aan de oevers der Orinoco, die, tot zijne verbazing, HUMBOLDT zich zag vermaken met lichte voorwerpen, door sterk gewrevene, platte zaden aangetrokken, tot den laatstgenoemden schranderen natuurkundige, zij deden, elk naar zijne gaven, niets anders dan mechanisch arbeidsvermogen omzetten

in electrisch. Maar deze beschikte over dat arbeidsvermogen niet in dien gewenschten vorm, waaronder, onafgebroken, de stroomende beek, de bruisende waterval het hunne leveren. Door groote hoeveelheden electriciteit, op metalen oppervlakken opgehoopt, zich tusschen punten te doen ontladen of van punten te doen afstroomen, verschaftte hij zich arbeidsvermogen gelijksoortig met dat van de snel en dikwijls achtereen nedervallende waterdruppels; en waar hij, door tusschenkomst van de Leidsche flesch, groote hoeveelheden vastlegde, verkreeg hij een arbeid als dien het heiblok levert, dat in eenen slag het met moeite verschaftte arbeidsvermogen verteert en het eerst terug erlangt als het, met evenveel moeite, even hoog zal zijn opgeheven. Toch, hoe onbeholpen dan ook, die uitvinders der eerste electriseermachines hadden het middel gevonden om handenarbeid om te zetten in electrisch arbeidsvermogen, dat op zijne beurt zich, bij het gloeien en smelten van metaaldraden, in den vorm van warmte, kennen deed.

Bij de mannen van de statische electriciteit moet de liefde voor de wetenschap en hare vorderingen wel zeer sterk zijn geweest, indien zij, tegen het einde der vorige eeuw, zich niet onaangenaam aangedaan hebben gevoeld bij de kennismaking met de zuil van VOLTA. Met die zuil, waardoor, langs zoo eenvoudigen weg, bij elken toestand van den dampkring, resultaten werden verkregen, waarop zij, met hunne reusachtige, samengestelde machines en batterijen, alleen onder de gunstigste omstandigheden konden hopen. Zij wisten het, VAN MARUM verklaarde het zelfs ronduit, dat, langs hunnen weg gaande, de grens van het mogelijke was bereikt. Inderdaad bracht die zuil een stroom voort van een ongekennde sterkte; bij een genoegzaam aantal paren van platen kon men daarmede water ontladen en zijne beide bestanddeelen elk afzonderlijk verzamelen. Wel was die stroomsterkte nog weinig standvastig, en verzwakte zij spoedig nadat de zuil was in werking gebracht. Maar DANIELL, GROVE, BUNSEN, en met hen vele anderen, voorzagen in dit gebrek door hunne elementen, waarin de oorzaak der door de werking zelve in het leven geroepen electromotorische tegenkracht bij haar ontstaan reeds wordt vernietigd.

Deze elementen, op verschillende wijzen tot batterijen vereenigd, konden den electrischen stroom zóó leveren, dat men dien — om bij onze vergelijking met een stroomend water te blijven —, wat verval en in de tijdseenheid door het profiel stroomende hoeveelheid water betrof, naar gelieven kon wijzigen. Maar het was niet, als bij de electriseermachine, mechanisch arbeidsvermogen dat aan het voortbrengen van

den stroom werd besteed. Het electrisch arbeidsvermogen werd door de batterij uit chemisch arbeidsvermogen omgezet. Het verterend zink was het minimum van den prijs, dien men er aan ten koste legde; met het oog op dien prijs was de nieuwe wijze van omzetten eigenlijk een stap achterwaarts. En wat de beschikking betreft, die men, practisch gesproken, over dit arbeidsvermogen had, is alleen die der maatschappij ten goede gekomen, waarbij het door scheikundige verbinding in de elementen geleverde ter ontbinding wordt aangewend van stoffen, die deel uitmaken van de keten (*galvanoplastiek*). Eerst toen men den magnetiseerenden invloed van den stroom op week ijzer had leeren kennen, werd de mogelijkheid geboren op groote afstanden, bliksemsnel, het in de elementen besteed scheikundig arbeidsvermogen door middel van den stroom in mechanisch arbeidsvermogen om te zetten (*telegrafie*); maar, bij het beurtelings verbreken en herstellen van dien stroom, beschikte men toch over dit laatste nog weder niet anders dan in den vorm, waarin het heiblok dat levert.

Mechanisch arbeidsvermogen, hier regelmatig besteed, met volkomen behoud van den vorm, waaronder het wordt aangewend, naar elders over te brengen, dat werd eerst mogelijk, toen men kennis had gekregen van het feit, dat in een gesloten winding een stroom ontstaat als men ten opzichte van een magneetpool haren afstand laat veranderen. Het met snelheid voeren van een veelvuldig gewonden draad door een krachtig magnetisch veld, dit induceeren van een stroom, dat mechanisch arbeidsvermogen vordert en het omzet in electrisch, heeft zijne hoogste uitdrukking gevonden in de Gramme-machine en in de van haar afgeleiden. En bestaat er dus tusschen onze vaderen van A^o 1787 en ons al deze overeenkomst, dat zij hunne electriseermachines en wij onze Gramme's laten draaien, zooveel zijn wij hen dan toch in eene eeuw vooruit gekomen, dat zij langdurige inspanning slechts beloond zagen door een kortstondig bezit van arbeidsvermogen dat — en dan nog maar hoofdzakelijk in den vorm van warmte — plotseling verloren ging bij het gebruik. Waar tegenover wij, dank zij de volkomen omkeerbaarheid — *sit venia verbo* — der electro-dynamische machine, met haar hulp elders terugontvangen in dezelfde mate waarin wij hier leveren, zij het dan ook na aftrek van het verlies, dat aan elke dubbele omzetting van arbeidsvermogen noodzakelijk is verbonden.

Aan de hand van theorie en ondervinding in bijzonderheden na te gaan hoe deze omzetting geschiedt en waaraan het verlies is te wijten, zal in hoofdzaak het onderwerp zijn van onze beschouwingen in dit opstel.

I

Bij de overbrenging van kracht, zooals men meestal noemt wat eigenlijk overbrenging van mechanisch arbeidsvermogen moet heeten, wordt, door eenen electrischen stroom, in eene op zekeren afstand geplaatste electro-dynamische machine een draaivermogen, een moment, in het leven geroepen. Het ontstaat in haar door tusschenkomst van het magnetisme, door dien stroom opgewekt in de week ijzeren kernen van hare inductoren en het is dit moment, dat, genoegzaam versterkt, het tegenwerkend moment van eene op de as der machine werkenden mechanischen weerstand zal kunnen overwinnen. Op welke wijze deze stroom ontstaan is staat in geen onmiddellijk verband met deze zijne werking in de machine, die hem ontvangt. Daarom zullen wij in den aanvang onzer beschouwingen van dien oorsprong afzien en onderstellen dat de stroom ten koste van scheikundig arbeidsvermogen, dat wil zeggen door eene batterij, is voortgebracht.

In de eerste plaats willen wij meer in bijzonderheden nagaan hoe de stroom de machine, waardoor hij wordt heengevoerd, kan in beweging zetten. Die stroom maakt bij eene electro-dynamische machine de stukken week ijzer, waardoor de draaibare ring wordt omsloten, magnetisch. Tevens is de omwinding van dien ring zóó ingericht dat, op ongeveer 90° van het vlak, dat door zijne as en de polen dier magneet gaat, ook in de omwinding van den ring polen ontstaan. En, terwijl de eene pool van den magneet een der polen van den ring aantrekt en de andere afstoot, oefent de andere op beide polen van den ring eene juist tegenovergestelde werking uit. Beide werkingen ondersteunen alzoo elkander en er ontstaat een koppel, waarvan het moment afhankelijk is van de lengte der middellijn van den ring. Echter niet in dier voege dat evenredig met die middellijn ook dat moment toeneemt. Want, terwijl bij het toenemen dier middellijn de hefboomsarm van het koppel in gelijke verhouding toeneemt, nemen de magnetische werkingen der polen van ring en inductor onderling in reden van de tweede macht van den straal des rings af. Hoe kleiner dus de ring is, des te grooter is, onder overigens gelijke omstandigheden, het draaivermogen van de in het werktuig opgewekte krachten.

Hoe zwak ook de stroom zij, dien men door de machine brengt, bij zal tusschen den inductor en den ring de genoemde aantrekkende krachten doen ontstaan. Is dan de machine onbelast, moet er volstrekt geen uitwendigen weerstand op hare as worden overwonnen, dan zal

zij gaan draaien, zoodra ten minste de wrijving op die as overwonnen is. Is zij wel belast, dan zal men, naarmate de weerstand op hare as grooter is, den stroom moeten versterken. Want van de wederkeerige werking der in de machine opgewekte krachten is, tot op zekere hoogte ten minste, de intensiteit aan de stroomsterkte evenredig.

Onderstel, bij voorbeeld, dat men het werktuig wil gebruiken om kolen op te hijschen uit een mijnput en dat aan een wiel, dat één meter omtrek heeft, een bak met kolen hangt, die 19 kilogram weegt. Men zal in dat geval de stroomsterkte zoo hoog moeten opvoeren, dat ook in de machine het product van kracht en hefboomsarm gelijk is aan 19 kilogram werkende aan den straal van dat wiel. Eerst wanneer dit zoo is zal er evenwicht zijn, zoodat, bij nog eene kleine vermeerdering van de stroomsterkte, er beweging zal ontstaan, de bak omhoog zal gaan, er mechanische arbeid zal worden verricht. Houden wij den stroom op die sterkte, dan zal de standvastige overmaat van kracht aan de eene zijde ten gevolge hebben, dat de snelheid der beweging voortdurend stijgt. Brengen wij het zoover, dat het wiel vier malen omwentelt in de sekonde, dan wordt een gewicht van 19 kilogram in één sekonde vier meters hoog opgevoerd; de vereischte arbeid bedraagt dan 76 kilogrammeters in de sekonde of één paardekracht.

Zal nu die standvastige overmaat van kracht aan de eene zijde ook een gelijkmatig versnellende beweging van de machine veroorzaken; zoo als de standvastige werking van de zwaartekracht die veroorzaakt bij een vallend lichaam? Dit zou zoo zijn, indien niet gedurende ieder ondeelbaar oogenblik het in de machine opgewekt mechanisch arbeidsvermogen van plaats werd opgewogen door het arbeidsvermogen van beweging, dat zij zelve ontwikkelt. Terwijl dit geschiedt blijft de stroomsterkte voortdurend de waarde behouden, die noodig is, om op de as het tegenwerkend moment te vernietigen.

Zoolang de machine nog niet draaide kon men, door bij voorbeeld het aantal cellen in de batterij te vermeerderen, de stroomsterkte vergrooten. De electromotorische kracht E der batterij, dat is de kracht, waardoor de electriciteit door de geleiding werd gedreven, nam daardoor toe en met haar de stroomsterkte I , die, volgens de bekende wet van Ohm, door $\frac{E}{R}$ wordt uitgedrukt, als R de weerstand

in de gansche geleiding voorstelt. Het gansche electriscbe arbeidsvermogen, dat daarbij de batterij in elke sekonde ontwikkelde en dat door $EI = I^2R$ wordt voorgesteld, werd, zoolang de machine stil

stond, in warmte omgezet; evenals dit geschiedt in elke geleiding, van welke tot zóó lang dan ook de machine in niets verschilt. Zette men die vast, dan zou men door de gelijktijdige vermeerdering van E en I de draden tot gloeihitte kunnen verwarmen. Nu echter slechts een weerstand van bepaald vermogen op de as der machine aangrijpt, zal deze in beweging komen zoodra de electromotorische kracht wordt opgevoerd tot de waarde E_0 , waaraan een stroomsterkte I_0 beantwoordt, die een even groot draaivermogen op die as uitoefent. Voert men dan verder die kracht op tot de waarde E_1 , dan wordt van het gansche aldus ontwikkelde electrisch arbeidsvermogen $E_1 I_0$ toch slechts $E_0 I_0 = I_0^2 R$ in warmte, het overige in arbeid omgezet. Die hoeveelheid warmte $I_0^2 R$, die per sekonde verloren gaat, kan men den prijs noemen, waarvoor men het noodige draaivermogen koopt. Is de weerstand op de as groot, dan zal die prijs hoog, is hij klein dan zal die prijs laag zijn, omdat in het eerste geval de stroomsterkte I_0 , waardoor de beweging aanvangt, grooter is dan in het laatste. Was in ons boven gesteld voorbeeld de bak met kolen half zoo zwaar als wij daar onderstelden, dan zou er in de geleiding per sekonde ook maar half zoo veel van het electrisch arbeidsvermogen aan warmte verloren gaan, als nu hij 19 kilogram weegt. Waarbij men echter wel in het oog moet houden dat op deze wijze, bij dezelfde omwentelings-snelheid, de machine ook maar de helft van den arbeid zal verrichten.

De onmiddellijke oorzaak, waardoor, van het oogenblik dat de machine in beweging komt en verder ook hoe snel zij draaie, de stroomsterkte onveranderd blijft, ligt wel eenigszins voor de hand. Deze toch is zelf eene electro-dynamische; zelf brengt zij dus, draaiende, een stroom in de geleiding. Onderstel eens dat zij, in plaats van arbeid te verrichten, door het aanwenden van evenveel arbeidsvermogen, als zij nu levert, gedraaid werd; dat zij, om bij ons voorbeeld te blijven, in plaats van per sekonde 19 kilogram 4 meters hoog op te heffen, door een kracht van 19 kilogram, aan den omtrek van hetzelfde wiel werkende, in tegengestelden zin vier omwentelingen per sekonde volbracht. Dan zou zij, als wij het bij de omzetting te loor gaand arbeidsvermogen buiten rekening laten, een paardekracht in electrisch arbeidsvermogen omzetten en een daaraan evenredigen stroom in de geleiding brengen, die in richting met den batterij-stroom overeenkwam. Nu zij, dien arbeid verrichtende, juist andersom draait, werkt zij dezen stroom tegen. Tegenover de electromotorische kracht E_1 van de batterij stelt de machine eene kracht E_2 en deze wordt — aangezien bij eene electro-dynamische

machine, als alle andere omstandigheden gelijk zijn, de electromotorische kracht aan de omwentelingssnelheid evenredig is. — des te grooter, naarmate de machine, bij het toenemen van E_1 , sneller gaat draaien. Daarbij blijft, zooals door alle proefnemingen, onder de meest verschillende omstandigheden genomen, is bewezen, de stroomsterkte de waarde I_0 behouden, die zij bezit op het oogenblik, waarop de machine in beweging kwam. Zij behoudt die bij elke vermeerdering van den arbeid, dien deze ten gevolge van haren snelleren gang verricht; zoodat dan ook steeds de hoeveelheid warmte, die wij boven den prijs van het koppel noemden, door $I_0^2 R$ of door $\frac{(E_1 - E_2)^2}{R}$ zal

worden voorgesteld. Daar de som der uit- en inwendige weerstanden onveranderd blijft, zal uit de standvastigheid van de stroomsterkte ook die van de electromotorische kracht $E_1 - E_2$ volgen; zij zal steeds gelijk blijven aan de kracht E_0 , die ontwikkeld werd op het oogenblik dat er beweging ontstond.

Deze beschouwing is van groot gewicht, als men oordeelen wil over de wijze, waarop men moet handelen om de verhouding zoo gunstig mogelijk te maken tusschen het op de machine overgebrachte en het door de batterij geleverde arbeidsvermogen. Immers de waarde van dit laatste heeft tot uitdrukking $E_1 I_0$ of $\frac{E_1(E_1 - E_2)}{R}$ en het eerste $E_2 I_0$

of $\frac{E_2(E_1 - E_2)}{R}$, zoodat $\frac{E_2}{E_1}$ de verhouding voorstelt van beide. Als nu het verschil $E_1 - E_2$ standvastig is zal, bij gelijke waarde van de verloren warmte en dus ook bij gelijke waarde van het op de as uitgeoefend draaivermogen, die verhouding des te gunstiger zijn, naarmate E_1 en E_2 elk afzonderlijk door grootere getallen worden voorgesteld. Stelt men, bijvoorbeeld, $E_1 = 100$ en $E_2 = 80$, dan zal, bij een aan het verschil $E_1 - E_2 = 20$ geëvenredigd draaivermogen, de verhouding slechts $\frac{8}{10}$ zijn, terwijl zij voor $E = 200$ en $E_2 = 180$, bij gelijk draaivermogen, tot $\frac{18}{20}$ of $\frac{9}{10}$ stijgen zal.

Het is duidelijk, dat men, door E_1 en E_2 zoo weinig mogelijk van elkander te laten verschillen, de verhouding $\frac{E_2}{E_1}$ zoo na aan de eenheid kan brengen als men wil. Toch is het voordeel, dat men op deze wijze

zal verkrijgen, slechts schijnbaar. Het verschil $E_1 - E_2$ toch bepaalt de sterkte van den stroom in de geleiding en daardoor die van het magnetisme in de machine: en door dit verschil tot *nul* te doen naderen zal men ten laatste aan den eenen factor van het overgebracht arbeidsvermogen — het moment — gaan verliezen, wat men aan den anderen — de snelheid van omwenteling der machine — wint. Daarenboven zouden de doeleinden, waartoe men het overgebracht arbeidsvermogen, bij zoo klein moment aan de drijf-as, zou kunnen aanwenden, al van zeer bijzondere aard moeten zijn. Alleen die zouden in aanmerking komen, waarbij het, als bij een centrifugaalpomp, op den factor snelheid in het product arbeidsvermogen meer aankomt dan op den factor overwonnen weerstand.

Zoo blijkt dus uit onze beschouwingen dat de *absolute* hoeveelheid electrisch arbeidsvermogen, die men, over eene bepaalde electromotorische kracht beschikkende, op eenen bepaalden afstand kan overbrengen, afhangt van twee zaken, die als het ware elkanders antagogenisten zijn: te weten, aan de eene zijde van de grootte die men aan E_1 geeft en van de snelheid der machine afhangt, aan de andere zijde van de daaruit voortvloeiende waarde $E_1 - E_2$, of liever $\frac{E_1 - E_2}{R} = I_0$,

die het draaivermogen op hare as bepaalt. Waaruit dan van zelf de vraag rijst, hoe men het moet inrichten om, over een bepaalde electromotorische kracht beschikkende, op een gegeven afstand zooveel electrisch arbeidsvermogen over te brengen als slechts mogelijk is. En dan blijkt het, dat die grootst mogelijke hoeveelheid juist 50 percent bedraagt. Want de algemeene uitdrukking voor die hoeveelheid is $E_2 I_0$

of $E_2 \frac{E_1 - E_2}{R}$ en hiervoor kan men ook $E_1^2 \frac{E_2}{E_1} \frac{1 - \frac{E_2}{E_1}}{R}$ schrijven. Daar

nu het product van de twee deelen, waarin men op alle mogelijke wijzen de eenheid kan verdeelen, zoo groot mogelijk wordt als beide deelen even groot zijn, zal het product $\frac{E_2}{E_1} \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right)$ zijn grootste

waarde erlangen als $\frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{2}$, dat wil zeggen, als het op de machine overgebracht arbeidsvermogen de helft is van het door de batterij geleverde.

Wordt de stroom geleverd door eene electro-dynamische machine van gelijke inrichting als die welke hem ontvangt, dan zal men dus

de eerste dubbel zoo snel moeten laten draaien als de tweede. Aan het koppel op de as wordt dan de helft van de warmte besteed, die de eerste machine, even snel draaiende, in de geleiding zou kunnen opwekken als de tweede was vastgezet. als haar belet werd te draaien; de andere helft wordt door de tweede machine in mechanischen arbeid omgezet. Richtte men het anders in, trachtte men door $\frac{E_2}{E_1}$ grooter dan $\frac{1}{2}$ te maken zijn voordeel te doen, dan zou wel inderdaad het overgebracht arbeidsvermogen een grooter deel zijn van het verzondene, maar dit laatste zou zelf een kleiner deel zijn van datgene, wat de beschikbare electromotorische kracht E_1 , bij den gegeven weerstand, vermag te leveren.

Wij willen thans nagaan, welke er de gevolgen van zijn, als de afstand, waarop men het arbeidsvermogen wil overbrengen, en met dezen afstand de weerstand toeneemt. Onderstel dan, dat men door middel van een electrischen stroom dat vermogen wil overbrengen op een afstand n -maal zoo groot als zoo even en dat men daarbij een draad wil gebruiken van hetzelfde metaal en van gelijke doorsnede. De weerstand wordt dan — als wij de inwendige weerstanden van de batterij en van de machine verwaarloozen ten zijnen opzichte — n -maal zoo groot. Wendt men gelijke electromotorische kracht E_1 aan als zoo even en wil men de machine even snel doen draaien, zoodat zij weder even groote tegenstelde electromotorische kracht E_2 ontwikkelt, dan zal de stroomsterkte nu $\frac{E_1 - E_2}{nR}$, dus slechts het n^e gedeelte van zoo even zijn. Daar dit ten gevolge heeft dat het koppel op de as in dezelfde verhouding zwakker wordt, zal dus, bij een even voordeelige verhouding $\frac{E_2}{E_1}$ tusschen overgebracht en geleverd arbeidsvermogen, het eerste toch slechts het n^e deel van zoo even zijn. Onderstel zelfs dat de weerstand op de as in dier voege was gekozen, dat $\frac{E_2}{E_1} = \frac{1}{2}$ en dus de absolute waarde van het overgebracht arbeidsvermogen zoo groot mogelijk was, dan zou nog deze grootste waarde n -maal zoo klein zijn als bij den vroegeren weerstand. En dit alles ten gevolge daarvan, dat bij dien n -voudigen weerstand voor het koppel op de as slechts het n^e -deel van de warmte wordt besteed van zoo even. In de uitdrukking $I^2 R$ dier warmte toch wordt de eene factor — R —

wel n -maal zoo groot, maar daarentegen de andere — I_0^2 — n^2 -maal zoo klein.

Wordt de stroom, wier electromotorische kracht wij E noemden, door eene batterij geleverd, dan zal, daar de stroomsterkte tot op een n -de deel van hare vorige waarde is verminderd, — volgens de wet van FARADAY — in elke cel per sekonde ook slechts het n^e -deel van de vroeger verbruikte hoeveelheid zink verteerd worden. Deze zelfde batterij zou, onder gunstiger omstandigheden werkende, veel meer arbeid kunnen verrichten dan nu. Toch verspilt men, nu die omstandigheden minder gunstig zijn, haar arbeidsvermogen niet; men kan van het bij haar beschikbare slechts minder partij trekken. En zoo zal het ook zijn, wanneer de stroom wordt geleverd door een electrodynamisch werktuig, dat door een waterval, een stoommachine wordt bewogen. Onderstel dat deze stoommachine arbeidsvermogen genoeg bezit om, bij den weerstand R , de electrodynamische te draaien met de ter voortbrenging van het arbeidsvermogen $E_1 I_0$ vereischte snelheid, dan zal, bij dezelfde snelheid en dezelfde verhouding tusschen het voortgebracht en het overgebracht electrisch arbeidsvermogen, van het vermogen der stoommachine bij den weerstand nR slechts het n^e -deel ter voortbrenging kunnen worden gebezigd. Wat in het eerste geval van haar werd gevorderd toch had eene waarde $E_1 \frac{E_1 - E_2}{R}$; wat zij in het tweede had te leveren slechts een waarde $E_1 \frac{E_1 - E_2}{nR}$.

Het meest voor de hand liggend middel om dit bezwaar uit den weg te ruimen schijnt te zijn, dat men trachte den weerstand der geleiding, niettegenstaande hare grootere lengte, standvastig te houden; hetzij door haar eene grootere doorsnede te geven, hetzij door haar uit een beter geleidend metaal te vervaardigen, hetzij door aanwending van beide deze middelen te gelijk. Maar de toepassing van het eerste zou, als de afstanden eenigszins aanzienlijk worden, de massa van de draad de grenzen van het practische doen overschrijden. Bij aanwending van beide middelen te gelijk, wel is waar, zou dit bezwaar eenigermate worden voorkomen; maar dan verrijst dit andere, dat den prijs der geleiding zeer hoog zou worden, hooger dan eene voordeelige exploitatie van deze wijze van overbrenging van arbeidsvermogen zou toelaten. Het beter geleidende koper overtreft daartoe in prijs het minder geleidende ijzer te zeer. Wanneer men bij honderdvoudigen afstand in plaats van een gewonen telegraafdraad van onge-

veer 12.5 vierkante millimeter doorsnede een draad van rood koper wilde gebruiken, dan zou men deze wel niet een doorsnede van 1250 vierk. millim. behoeven te geven; daar het geleidend vermogen van laatstgenoemd metaal ruim 6 maal zoo groot is als die van het eerstgenoemde, zou de honderdmaal zoo lange draad reeds denzelfden weerstand bieden, als zij slechts een doorsnede had van ongeveer 200 vierk. millimeters. Toch zou de prijs per meter daardoor reeds stijgen in reden van $200 : 12.5 = 16$ maal de verhouding tusschen de prijzen van rood koper en ijzerdraad.

Maar bestaat er dan geen middel om met behoud van dezelfde absolute hoeveelheid *overgebracht*, en van dezelfde verhouding tusschen deze en de hoeveelheid *voortgebracht* electrisch arbeidsvermogen, den weerstand te vermeerderen? Inderdaad bestaat dit; het is gelegen in eene oordeelkundige vermeerdering van de electromotorische kracht van den voortgebrachten stroom. Op welke wijze die moet worden geregeld, leert de volgende redeneering.

Wat men bij het overbrengen aan arbeidsvermogen verliest is aan den weerstand in de geleiding evenredig. Maar het is ook evenredig aan het vierkant van de stroomsterkte; want de hoeveelheid in de gansche geleiding ontwikkelde warmte wordt in het algemeen voorgesteld door $I^2 R$. Wil men dus voorkomen, dat door een vermeerdering van R tot nR dat verlies stijgt, wil men het standvastig houden, dan behoef men slechts I tot $\frac{I}{\sqrt{n}}$ te verminderen, dus E tot $\sqrt{n} \times E$ te verhoogen; want $\frac{I}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{n} \times E}{nR}$. Het koppel op de as is nu wel $\sqrt{n}$ -maal zoo klein, omdat de stroomsterkte in die verhouding is afgenomen. Maar aangezien het ontwikkeld electrisch arbeidsvermogen — $\sqrt{n} \times E \times \frac{I}{\sqrt{n}} = EI$ — hetzelfde blijft en evenzoo datgene, wat daarvan in warmte wordt omgezet, niet verandert, zal ook de hoeveelheid, die ter voortbrenging van mechanisch arbeidsvermogen rest, onveranderd blijven.

Wanneer dus de afstand, waarop men het voortgebracht electrisch arbeidsvermogen wil overbrengen, met n wordt vermenigvuldigd, dan zal men de electromotorische kracht met $\sqrt{n}$ moeten vermenigvuldigen, indien men, langs een draad van hetzelfde metaal en dezelfde doorsnede, dezelfde absolute en relatieve hoeveelheid electrisch arbeidsvermogen wil overbrengen.

Onderstel dus, bij voorbeeld, dat men op den afstand één langs

een telegraafdraad het maximum van arbeidsvermogen heeft overgebracht, dat op dien afstand een batterij met een electromotorische kracht E_1 leveren kan, dat dus de electromotorische kracht van den door de machine ontwikkelden tegenstroom $\frac{1}{2} E_1$ was, en men wilde dan een even groot arbeidsvermogen overbrengen op den afstand *honderd*; dan zou men die batterij moeten samenstellen uit $\sqrt{100} = 10$ -maal zooveel cellen. De draad zou daarbij minder worden verwarmd dan in het eerste geval, aangezien in den honderd-maal zoo langen draad dezelfde hoeveelheid warmte werd ontwikkeld, dus in elken meter slechts het honderste-deel van zoo even.

Werd de stroom geleverd door eene, zelf door mechanischen arbeid gedrevene electrodynamische machine, dan zou men langs twee wegen E_1 tot $10 E_1$ kunnen opvoeren. Daar toch de electromotorische kracht van zulk een machine evenredig is aan de lengte van den draad der ringomwinding, die in de eenheid van tijd door een overlansche doorsnede van het magnetisch veld gaat, zoo zal men of het aantal windingen op den ring kunnen vertienvoudigen of de snelheid, waarmede hij draait. Langs den eersten weg gaande stuit men echter op dit bezwaar, dat eene zoo aanzienlijke vermeerdering van draadlengte in de beide werktuigen den weerstand tot veel hooger bedrag dan het tienvoud van hare oorspronkelijke waarde opvoert. Het tweede middel is dus het meer aangewezen: men zal de machine, die den stroom levert, tienmaal zooveel omwentelingen per minuut laten doen. Daarvan zal dan het gevolg zijn, dat de machine, die den stroom ontvangt, ook tienmaal zoo snel gaat loopen; en wel steeds, als men het maximum van het door de eerste geleverd electrisch arbeidsvermogen wil overbrengen, met de helft van de snelheid der eerstgenoemde. Wil men eene meer gunstige verhouding tusschen het overgebracht en het geleverd arbeidsvermogen dan als $1 : 2$, dan kan men die verkrijgen door kleiner weerstand op de as van den motor te laten aangrijpen; het verschil in de snelheden van beide zal dan kleiner worden. Maar men vergete niet, dat, als die verhouding meer tot één nadert, tevens het door de eerste machine geleverd electrisch arbeidsvermogen vermindert en steeds in snellere mate. Want men moge, doordien in het naar elders overgebracht arbeidsvermogen $E_2 I_0$ de laatste factor afneemt, dit door een toenemen van den eersten factor kunnen vergoeden: de vermindering, die daardoor in het hier voortgebracht arbeidsvermogen $E_1 I_0$ ontstaat, zal altijd nog grooter zijn, aangezien toch E_1 steeds grooter dan E_2 blijft.

Ook de snelheid, waarmede men eene machine kan laten draaien, heeft hare grenzen. Wil men dus een aanzienlijk arbeidsvermogen op grooten afstand overbrengen, dan zal men wel genoodzaakt zijn ook het aantal omwindingen van den ring te vermeerderen en bij zijne berekeningen de daaruit voortvloeiende vermeerdering van den weerstand in acht te nemen. Bij een n -voudigen afstand zal men dan de electromotorische kracht in plaats van met $\sqrt{n}$ hebben te vermenigvuldigen met den wortel uit het getal, dat aangeeft hoeveel malen, én door de vergrooting van den afstand, én door de vermeerdering van het aantal windingen, de weerstand toeneemt. Gebruikt men op den n -voudigen afstand dezelfde machines als op den afstand één, dan is het duidelijk, dat men zelfs met eene vermeerdering van de electromotorische kracht kan volstaan, die minder is dan het n -voud; de som der uitwendige en inwendige weerstanden toch zou dan minder dan het n -voud van de oorspronkelijke worden.

Daar met het aantal windingen van den ring alle afmetingen eener machine toenemen, volgt hieruit, dat voor eene doelmatige overbrenging van een groote hoeveelheid arbeidsvermogen op groote afstanden de toekomst aan de groote machines behoort. Zijn dan beiden, zij die den stroom levert en zij die hem ontvangt, van volkomen gelijke constructie en draait de eerste met de grootste snelheid, die men haar kan geven; richt men daarbij den weerstand op de as der laatste zóó in, dat hare snelheid de helft zij van die der eerste, dan zal men de grootst mogelijke hoeveelheid arbeidsvermogen overbrengen, die men door middel van beiden overbrengen kan. Meer arbeidsvermogen over te brengen dan deze hoeveelheid zou daarom onmogelijk zijn, omdat de machine, die den stroom levert eenvoudig niet in staat is meer dan deze hoeveelheid mechanisch arbeidsvermogen in electrisch om te zetten. Al beschikte men over eene stoommachine van nog zoovele paardenkrachten, ja over al het mechanisch arbeidsvermogen, dat de watervallen van den *Niagara* vertegenwoordigen, toch zou men, bij den gegeven weerstand, van al dien rijkdom niet meer baat kunnen hebben, dan wanneer men over juist de genoegzame hoeveelheid beschikte om de machine met hare grootste snelheid te doen draaien.

Er is een tijd geweest dat men van de gunstige verhouding tusschen geleverd en overgebracht electrisch arbeidsvermogen, van het »economisch rendement» zooals men het noemde, alles verwachtte. Gouden bergen beloofde men zich van de overweging »die verhouding kan men zooveel men wil tot één doen naderen. Waartoe dan zoo angstig vast

gehouden aan die 50 percent, die het maximum zijn zou? Waarom vooral, nu men weet, dat men bij een n -voudigen weerstand slechts de electromotorische kracht $1/n$ -maal heeft te nemen, om een even voordeel "rendement" te verkrijgen als bij den afstand *één*?"

Het is waar, men kan de electromotorische krachten in beide machines zoo na aan elkander brengen als men wil, door, als ze beide van dezelfde constructie zijn, hunne snelheden elkander te doen naderen. Maar als die krachten in stroom en tegenstroom aan elkander naderen, dan nadert de stroomsterkte tot *nul* en met dezen haren factor het electrisch arbeidsvermogen, dat de stroomgevende machine uit den overvloedigen schat van mechanisch arbeidsvermogen weet te putten. Als beide stroomen gelijk van kracht worden, als zij dus *niets* meer omzet, dan ontvangt men ook *niets*; dat is de beteekenis van 100 percent! De fout ligt hierin, dat men te weinig lette op de *absolute* waarde van hetgeen bij eene zeer gunstige verhouding werd overgebracht.

Wij resumeeren dus als volgt:

de gunstigste wijze van overbrengen van het door een machine uit mechanisch arbeidsvermogen om te zetten electrische is onder alle omstandigheden die, waarbij van het omgezette *de helft* wordt overgebracht;

wil men bij vergrooting van den afstand en zonder dat men de geleiding, anders dan in verhouding tot hare meerdere lengte, kostbaarder maakt, de absolute en de relatieve waarde van het overgebracht arbeidsvermogen beiden dezelfde doen blijven, dan moet men de electromotorische kracht van den afgezonden stroom zóó verhoogen, dat, als die afstanden zich verhouden als $1 : n$ die krachten zich verhouden als $1 : 1/n$;

kan dit doel niet genoegzaam worden bereikt door vermeerdering der snelheid alleen, dan zal men zijn toevlucht moeten nemen tot grootere machines, wier meerdere windingen, bij gelijke snelheid, een grootere electromotorische kracht in het leven roepen.

Wat men op deze wijze overbrengt is dan 50 percent van het electrisch arbeidsvermogen, dat door de eene machine uit mechanisch arbeidsvermogen is omgezet; de helft dus van — als ik het zoo noemen mag — hare netto-opbrengst. Het is er echter verre van af dat het ook de helft zou zijn van het haar geleverd mechanisch arbeidsvermogen. Indien wij dit wilden beweren, dan zouden wij, behalve de passieve weerstanden, die elke machine biedt, de vele oorzaken van

verlies buiten rekening laten, die voor *deze* machine karakteristiek zijn. En dan hebben wij niet alleen het oog op het verlies, dat men lijdt bij het verzamelen der partieele stroomen en door de werking der zoogenaamde stroomen van *FOUCAULT*, welke in de kern van den ring worden opgewekt. Wij doelen dan hoofdzakelijk op de zoogenaamde »doode toeren», die elke electro-dynamische machine te maken heeft, eer in de geleiding een stroom ontstaat. Daar, volgens onderzoekingen van *FROELICH*, het aantal dezer toeren bij eene machine kan stijgen tot 10 percent van het maximum, dat zij per minuut maken kan, zoo zal er, zelfs bij het zwakste koppel op de drijf-as der machine die den stroom ontvangt, tusschen beider snelheid een verschil van 10 percent dier toeren kunnen zijn, zonder dat op laatstgenoemde nog eenig arbeidsvermogen wordt overgedragen. Wanneer dus de machine, die het mechanisch arbeidsvermogen moet omzetten in electrisch, er op is ingericht om 1200 toeren per minuut te doen, dan zal zij er 120 per minuut kunnen doen eer de tweede, al moeten bij deze ook alleen de passieve weerstanden worden overwonnen, in beweging komt. Het is duidelijk dat de arbeid, besteed om de stroomgevende machine over deze doode toeren heen te brengen, geheel verloren gaat. En als al dit verlies geleden is, dan heeft de tweede machine nog het haar geleverd electrisch arbeidsvermogen in mechanisch om te zetten, wat al wederom niet kosteloos geschiedt.

Hoe groot het gezamenlijk bedrag van deze verschillende schade-posten is, kan alleen door de practijk worden uitgemaakt. Wanneer wij, in een volgend opstel, verslag hopen te doen van de proefnemingen, ter overbrenging van arbeidsvermogen op groote afstanden genomen, zullen wij uit de daaromtrent bekend geworden opgaven dit bedrag trachten af te leiden.

Haarlem, 1 Maart 1887.