

IEC
B161

TOT DE VONKEN ERAF VLIEGEN

STATISCHE ELEKTRICITEIT IN BEWEGING VAN TEYLER TOEN TOT TNO NU



COLOFON

Dit boekje werd uitgegeven als bijlage bij het Jaarverslag van TNO over 1984.

De illustraties kwamen tot stand door medewerking van Teylers Museum te Haarlem en Museum Boerhaave te Leiden.

De foto op het omslag en op pagina 41 is ter beschikking gesteld door Natuur en Techniek en gemaakt door P.P. Hattinga-Verschure, Deventer.

De afbeelding op pagina 45 is ontleend aan het boek 'Statische Elektrizität als Gefahr' van H. Haase.


De foto op pagina 46 is ter beschikking gesteld door PML-TNO.

De foto's op pagina 49 zijn ter beschikking gesteld door KRI-TNO.



Productie: Centrale Stafafdeling
In- en Externe Communicatie TNO
Fotografie: Victor Scheffer, Den Haag
Vormgeving: Andre Klijsen, Den Haag
Druk: Drukkerij Lakerveld bv, Den Haag

Copyright Nederlandse Organisatie van Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek TNO.
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

ISBN nummer: 90-6743-069-2
juni 1985  ©

In een weergalozе wedren jagen wetenschapsbeoefenaren elkaar op tot nieuwe ontdekkingen, nieuwe kennis, kennis die vroeg of laat de drempel van laboratoria passeert en een betekenis krijgt in de samenleving. De wedren wordt gevoed door nieuwsgierigheid, eerzucht en geld. Het resultaat is een aanzwellende stroom van informatie, waar de buitenwereld alleen incidenteel mee geconfronteerd wordt. Onder die omstandigheden verdwijnt het beeld van de wetenschap als een continu proces, waarin toevalligheden weliswaar soms een opmerkelijke rol lijken te spelen, maar waarin de continuïteit en de evolutie uiteindelijk toch bepalend zijn. Anders gezegd, als de toevalligheden niet op het goede moment voorvallen, zullen ze niet bekend worden.

In dit boekje wordt een poging gedaan om op een wat luchtige wijze een brug te slaan tussen de kinderjaren van de moderne natuurkunde en het heden. Daarbij zijn een paar beperkingen in acht genomen. Het verhaal betreft slechts één onderdeel van de fysica, de statische elektriciteit, en het begin en eindpunt zijn in belangrijke mate bepaald door de namen Teyler en TNO. Teylers Museum in Haarlem bezit een wereldberoemde collectie fysische instrumenten met als pronkstuk de grote elektriseermachine van Martinus van Marum. Lang hebben onderzoekers geworsteld met het grillige gedrag van het verschijnsel elektriciteit. Tenslotte leek het afgegraasd en rijp voor het basisonderwijs. In deze eeuw trekt het onderwerp echter weer volop de aandacht van de onderzoekers. Een belangrijke reden is de grootschalige toepassing van kunststoffen. Het boekje besluit dan ook met een paar actuele voorbeelden van het onderzoek op dit gebied zoals het onder meer bij TNO wordt uitgevoerd.

De auteur, Drs. G.A. van de Schootbrugge, studeerde experimentele natuurkunde aan de Universiteit van Utrecht en is werkzaam als wetenschapsvoorlichter bij de Centrale Stafafdeling In- en Externe Communicatie van TNO.

INTRODUCTIE	3
HET VERBLUFFENDE SUCCES VAN EEN NIEUWE DENKTRANT	5
DE WERELD VAN TEYLER EN VAN MARUM Teylers Stichting	9 12
MARTINUS VAN MARUM	15
WRIJVEN TOT DE VONKEN ERAF VLIEGEN	17
DE GROTE ELEKTRISEERMACHINE VAN VAN MARUM	27
DE LAATSTE TWEE EEUWEN	35
WAT WE NU WETEN OVER VONKEN EN WRIJVINGSELEKTRICITEIT	39
Lekkende lading en kosmische straling	39
De elektrische vonk	40
Het raadsel van de bliksem	41
STATISCHE ELEKTRICITEIT: GEVAREN	43
De mens als wandelende elektriseermachine	45
Stofexplosies	46
STATISCHE ELEKTRICITEIT: TOEPASSINGEN	47
BESLUIT	51
LITERATUUR	52



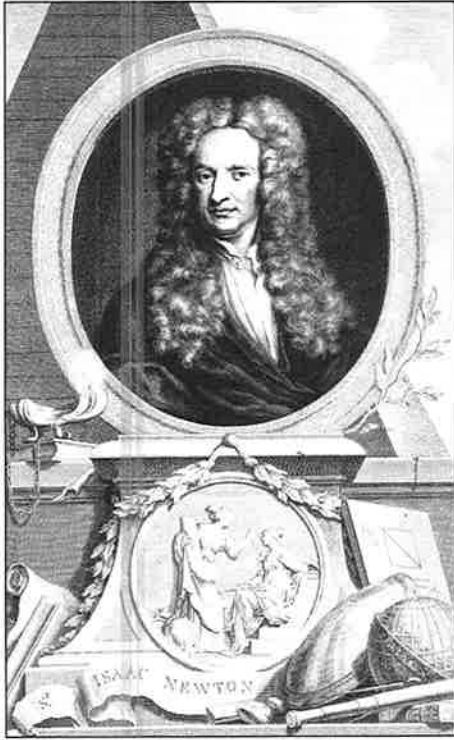
*Pieter Teyler van der Hulst
(1702-1778)*

Geboren en overleden te Haarlem en tot 1763 een voornaam en succesvol koopman en zijdefabrikant. De laatste 15 jaar van zijn leven hield hij zich in hoofdzaak bezig met de geldhandel. In 1756 liet hij in zijn testament vastleggen dat zijn nalatenschap bestemd moest worden voor hulp aan behoeftigen en voor bevordering van godsdienst, kunsten en wetenschappen.

De afbeelding toont een schilderij van Wijnand Hendriks, die van 1785 tot 1820 conservator was van Teylers kunstcollectie. Het bevindt zich nu in de ovale zaal van het museum. In zijn linker hand houdt Teyler zijn "In-trestboek", vóór hem ligt de catalogus van zijn kunstverzameling.

*Isaac Newton (1642-1727)
Volgens velen de grootste natuurkundige die ooit heeft geleefd. De dichter Pope schreef:
Nature and Nature's laws
lay hid in night:
God said, let Newton be! and
all was light.*

Zijn "Principia" bevatten de grondslagen van de klassieke mechanica. Bij zijn studie van het licht ontdekte Newton dat glas veel beter te elektriseren is dan zwavel.



Isaac Newton was zonder twijfel één van de grootste genieën uit de geschiedenis van de natuurkunde. Ooit merkte hij bescheiden op: "Ik kon zo ver kijken, omdat ik stond op de schouders van giganten."

Zijn eigen schouders hebben het zwaar te verduren gekregen. Ze torsen intussen vele generaties natuurkundigen. Het levert een aardig plaatje: de ontwikkeling van de natuurwetenschappen als een groeiende, omgekeerde pyramide van schouders, waartegen voortdurend alpinisten zonder hoogtevrees opklaten met in het vooruitzicht de beloning van een indrukwekkend uitzicht. Een bouwwerk met een aantal zeer sterke schouders en massa's nietige schouder-tjes die gezamenlijk voor een opmerkelijk hechte constructie zorgen.

Zoals bij een koraalrif groeit het bouwsel aan de buitenste rand en wordt het eerder aangelegde deel als een vanzelfsprekendheid beschouwd.

Het is de kracht van de wetenschappelijke methode dat er vooruitgang geboekt kan worden zonder dat in de dagelijkse praktijk een groeiende historische ballast hoeft te worden meegesleept. Een voortdurend proces van abstraheren, unificeren en didactisch innoveren maakt het mogelijk dat studenten in een acceptabele tijd een kennisniveau bereiken dat voldoende is om bij te dragen aan het proces van kennisvermeerdering.

Het gevaar van deze aanpak is, dat de aandacht voor de historie op een laag pitje komt te staan. Dat is om diverse redenen betreuenswaardig. Het is juist in onze samenleving van groot belang dat zowel wetenschapsbeoefenaren als leken gevoel hebben voor de wijze waarop de wetenschap zich ontwikkelt en voor de culturele en economische betekenis ervan. Dat kan alleen vanuit een zeker historisch besef. Voor de wetenschapsbeoefenaar zelf kunnen de banden met het verleden een niet te verwaarlozen invloed hebben op de betrokkenheid bij zijn vak. Ook de motivatie van jongeren die een wetenschappelijke carrière overwegen kan door historische beschouwingen aanzienlijk worden versterkt. Tenslotte mogen we zonder overdrijven vaststellen dat de wetenschap het grootste avontuur oplevert dat de mensheid ooit heeft beleefd. Ken-

nis van de geschiedenis kan dit besef nog aanzienlijk versterken.

In de geschiedenis van de moderne natuurwetenschappen heeft Nederland een niet onbelangrijke rol gespeeld. Gelukkig hebben vanuit eenzelfde historisch besef als waarvan hiervóór sprake was in het verre verleden reeds verstandige lieden zich ingespannen om de concrete bewijzen van die historische rol voor het nageslacht te bewaren. Eén van de meest geslaagde pogingen op dit gebied treffen we aan in Teylers Museum te Haarlem, waar een uniek beeld is geprepareerd van het wetenschapsbedrijf uit de 18de en 19de eeuw.

Uit contacten tussen TNO en dit wereldberoemde museum sproot het idee voort van een bijlage bij het TNO-jaarveslag 1984, waarin een verband gelegd wordt tussen de "fysica van Teyler" en huidige TNO-achtige activiteiten. Een historisch rustpunt in de jachtige momentopname van een jaarverslag. Het zou tevens kunnen dienen als informatiemateriaal voor de bezoekers van het museum.

Om redenen van omvang en overzichtelijkheid werd besloten niet te proberen het hele terrein van Teylers collectie te bestrijken, maar het verhaal te beperken tot een min of meer afgebakend gebied. De keuze van de auteur viel op het onderwerp "elektrostatica en gasontladingen". De belangrijkste overweging daarbij was dat de man, die als geen ander zijn stempel heeft gedrukt op de natuurkunde-afdeling van Teyler, zijn grootste bekendheid als onderzoeker juist op dit terrein heeft verworven.

Het was Dr. Martinus van Marum die op 25 juni 1784, tweehonderd jaar vóór het jaar waarover dit verslag handelt, werd benoemd tot directeur van Teylers Museum en bibliothecaris van de Stichting. Zijn beroemde elektriseermachine, de grootste in zijn soort die ooit werd gebouwd, kan nog steeds in zijn volle glorie bewonderd worden in het museum.

In dit artikel zal ik proberen een beeld te schetsen van de fantastische worsteling van generaties onderzoekers om het fenomeen elektriciteit te begrijpen. Fascinerend is ook de tijdgeest waarin deze problemen voor het

eerst werden aangepakt en waarin instituten als Teylers Stichting konden ontstaan. Hopelijk kan de lezer een vluchtige blik over de grenzen van de wetenschap heen op de "grote historie" van de Verlichting waarderen.

Iedereen is tegenwoordig doordrongen van de enorme betekenis van wetenschap en techniek voor de moderne samenlevingen, maar het kan dunkt me geen kwaad om eens te wijzen op het feit dat die invloed ook in de 18e eeuw reeds zeer indringend was.

Het mag duidelijk zijn, dat dit artikel geen gedetailleerde historische analyse beoogt. Veeleer is het bedoeld als leerzaam vermaak zoals in de tijd van Van Marum overigens in belangrijke mate voor de natuurwetenschappen zelf gold.

We zullen eerst kort nagaan op welke schouders mannen als Van Marum stonden, om vervolgens de ontwikkeling van de wetenschap te plaatsen in het bredere kader van de tijdgeest van de 18de eeuw, de eeuw van de Verlichting.

Vervolgens zullen we nader ingaan op het onderwerp van de elektrostatiche verschijnselen en gasontladingen. Na een korte kennismaking met de activiteiten van Van Marum en de onderzoekers die vóór hem met de legpuzzel bezig zijn geweest, zullen we arriveren in het heden om te leren, dat gasontladingen nog steeds in het middelpunt van de belangstelling staan en dat de elektrostatiche verschijnselen, na te zijn weggeleden naar de weinig opwindende wereld van het basisonderwijs, met een sterke "come back" bezig zijn.



*Galileo Galilei (1564-1642)
Een van de grondleggers van
de moderne natuurwetenschappen.
Galilei was een van de eersten die zich
bewust was van de grote
kracht van de combinatie
van experiment en wiskundige
analyse. Hij fundeerde
de sterkte- en elasticiteitsleer,
ontdekte de luchtdruk en
werkte aan geluids-, temperatuur-
en slingerproblemen.
In 1609 richtte hij een zelfgebouwde
telescoop op de hemel en werd de
meest overtuigde aanhanger van
Copernicus.*

De geboorte van Pieter Teyler van der Hulst valt in het begin van een eeuw die volgt op het tijdperk waarin de studie der natuur op een nieuwe leest werd geschoeid. Wat al geruime tijd broeide werd in de 17de eeuw een feit: de omschakeling van de op pure speculatie berustende beschrijving van de natuurverschijnselen uit de middeleeuwen naar een methodologie, waarin het experiment een beslissende rol speelt.

Francis Bacon (1561 - 1626) en Galileo Galilei (1564 - 1642) speelden in deze ontwikkeling een cruciale rol. Einstein verwoordde het als volgt: "Het leitmotiv dat volgens mij spreekt uit het werk van Galilei is zijn bewogen strijd tegen elk dogma dat alleen gebaseerd is op autoriteit. Hij aanvaardde alleen ervaringsfeiten in combinatie met zorgvuldige beschouwingen als maatgevend voor de waarheid. Het is voor ons moeilijk ons in te denken hoe radicaal en zelfs bedreigend een dergelijk standpunt in Galilei's tijd geweest moet zijn." Einstein kan het niet laten er fijntjes aan toe te voegen, dat het weliswaar lijkt alsof deze zienswijze sindsdien volledig is geaccepteerd, maar dat ook in onze tijd bepaalde opvattingen vaak zonder meer geaccepteerd worden louter omdat er een of andere autoriteit achter staat. Hij wijst tevens op een wijd verbreid misverstand als zouden deze geleerden van de nieuwe tijd zich uitsluitend baseren op proefondervindelijke informatie. Ook de moderne wetenschap kan niet zonder een bepaalde mate van speculatie. Het is interessant om te zien hoe juist de geniale combinatie van experiment en speculatie in de 17de eeuw tot enorme vooruitgang heeft geleid. Huygens (1629 - 1695) en Newton (1642 - 1727) zijn sprekende voorbeelden. In de daarop volgende eeuw van Teyler en Van Marum raakt dit subtiele samenspel in discredit. Men raakt steeds meer gefixeerd op het onmiskenbare succes van de experimentele aanpak. Het lijkt erop alsof men het speculatieve aspect in het werk van mannen als Galilei en Newton meer ziet als een laatste stuiptrekking van het verfoeide middeleeuwse denken. Het gevolg is een enorme experimentele activiteit die echter in veel gevallen niet gestuurd wordt door achterliggende concepten. Het resultaat is een grote

hoeveelheid beschrijvingen van alle mogelijke waarnemingen die moeilijk met elkaar in samenhang te brengen zijn.

Boeiend is ook de invloed die de godsdienst heeft gehad op deze hele ontwikkeling. De problemen die Galilei had met de katholieke kerk zijn bekend. In de 18de eeuw speelt diezelfde confrontatie een wezenlijke rol in Frankrijk, wanneer de filosofen van de Verlichting zich afzetten tegen de autoriteit van de kerk. Daar waar de ideeën van de hervorming zijn aangeslagen, speelt het geloof echter een totaal andere, meer positieve, rol. Het is juist de calvinistische ethiek die van grote betekenis is geweest voor de opkomst van de moderne natuurwetenschappelijke denktrant. Volgens Calvijn kon de mens niet veel beter doen dan zich onvermoeibaar bezig te houden met nuttige arbeid ter verheerlijking van God en ter verbetering van het menselijk bestaan. Deze instelling bleek een zeer belangrijke voedingsbodem voor het wetenschappelijk onderzoek en voor de ontwikkeling en toepassing van de techniek. Het calvinisme opende de weg voor het experiment. In Engeland waren vooral de opvattingen van de puriteinen van essentiële betekenis. Van de 68 wetenschappers, die in 1663 lid waren van de "Royal Society", hingen niet minder dan 42 deze overtuiging aan.

Sterk is ook het besef dat de wetenschap niet alleen een doel op zichzelf is. In 1620 schreef Bacon in zijn "Novum Organum", dat het niet alleen gaat om het geluk van de onderzoeker, maar om de toestand en het geluk van de mensheid. Het enige echte doel van de wetenschap is volgens hem het verrijken van het menselijk bestaan met nieuwe uitvindingen en middelen. Galilei laat met woord en daad merken dat hij eenzelfde opvatting huldigt.

Op een aantal gebieden had de wetenschap in de 17de eeuw grote vorderingen gemaakt. Galilei, Stevin en anderen hadden de mechanica bevrijd van een serie aristoteliaanse dwalingen. In zijn "Principia" had Newton de basis gelegd van wat nu de klassieke mechanica wordt genoemd. Na sterk aandringen van zijn leerling, de astronoom Halley, publiceerde Newton in 1684 het eerste deel. In 1687 en 1689 volgden de



*Christiaan Huygens
(1629-1695)*

Samen met Galilei grondlegger van de moderne natuurkunde; de grote voorganger van Newton. Huygens leverde belangrijke bijdragen op het gebied van de mechanica en optica. Hij verbeterde het uurwerk, de verrekijker en de microscoop. Huygens was tevens een groot wiskundige. Zijn belangrijkste werk ging over de kegelsneden en de waarschijnlijkheidsrekening.

delen twee en drie. Het laatste, "De Systemate Mundi", maakte ook buiten de kring van de fysici grote indruk. Newton liet zien hoe op basis van een algemene theorie van de zwaartekracht de beweging van de hemellichamen begrepen kon worden. Hij kwam erdoor in aanvaaring met de toen algemeen aanvaarde werveltheorie van Descartes. Voor Huygens was het idee van een werking op afstand in ieder geval moeilijk te verteren. Eerlijk gezegd was Newton zelf ook liever gekomen met een beschrijving van een medium dat in staat is een krachtwerking door te geven. Hij maakte over dit vraagstuk echter de volgende, uiterst belangrijke, opmerking: "De waargenomen verschijnselen maken duidelijk dat de zwaartekracht bestaat en alle lichamen beïnvloedt volgens de beschreven wetmatigheid. Alle bewegingen van de planeten en kometen kunnen ermee worden verklaard, zodat we mogen spreken van een natuurwet ook al begrijpen we de oorzaak van deze wet niet. Maar ik vermijd hypothesen, of ze nu metafysisch, fysisch, mechanisch of occult van aard zijn. Dat zou schadelijk zijn voor de wetenschap."

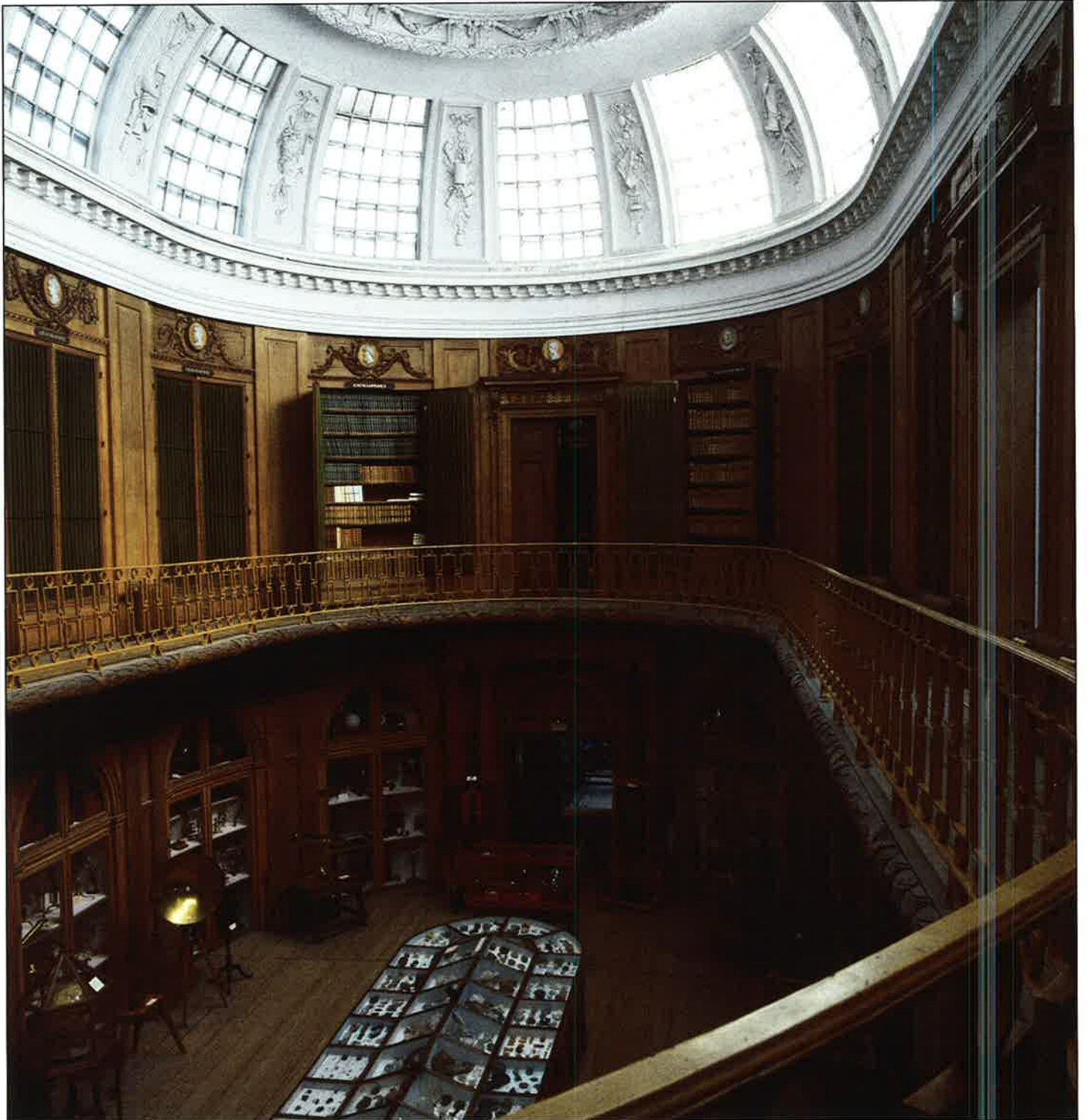
Hier spreekt een geniale wetenschapper met zeer moderne opvattingen, die geheel in de lijn liggen van de visie van mannen als Einstein of Bohr, die zich bij het funderen van respectievelijk de relativiteitstheorie en de quantumtheorie eveneens vol overtuiging neerlegden bij de feiten, ook al weken de consequenties sterk af van wat we op grond van de dagelijkse praktijk zouden verwachten. Het verband dat Newton wist te leggen tussen de verschijnselen op en buiten de aarde maakte ook op de leek een diepe indruk. Er ontstond in brede kringen een wereldbeeld, waarin de kosmos werd voorgesteld als een uurwerk. Gelovigen voegden daar dan nog een opperwezen aan toe, dat optrad als de grote klokkenmaker, die slechts zo nu en dan kleine correcties uitvoerde. Het hoeft ons niet te verbazen dat na verloop van tijd ook de levende natuur met een uurwerk werd vergeleken. In de tijd van Van Marum sprak men van "mon mécanisme" als men over zijn lichaam sprak.

Niet alleen de klassieke mechanica kreeg in de 17de eeuw een stevige basis. Pascal tilde de hydrostatica en pneumatica van de grond, terwijl Hooke, Huygens en

Newton enkele fundamentele optische processen op het spoor kwamen. Ook de astronomie maakte belangrijke vorderingen. Andere delen van de natuurwetenschappen stonden ten tijde van Teylers geboorte echter nog in de kinderschoenen.

Een vak als chemie bestond nog niet. Wel waren geleerden als Boyle en Newton aanhangers van het idee dat de natuur was opgebouwd uit elementaire deeltjes, die zich bevonden in vacuüm. Dit laatste begrip was het resultaat van experimenten met de door Gericke in de periode 1640 - 1663 ontwikkelde luchtpomp en met de uit diezelfde periode stammende barometer.

Ook de kennis op het gebied van geluid, warmte en gassen was minimaal, terwijl elektrische en magnetische verschijnselen alleen nog maar tot de verbeelding spraken. Men had geen benul van het wezen van deze geheimzinnige fenomenen. We moeten daarbij bedenken dat een hele reeks essentiële instrumenten pas in de 17de eeuw werden uitgevonden, zoals de microscoop, de telescoop, de thermometer, de barometer en de luchtpomp. Het waren de onderzoekers zelf die deze apparaten in elkaar knutselden. De perfectionering en "grootschalige" productie kwam pas van de grond toen in de 18de eeuw de professionele instrumentmaker zijn intrede deed. Luister naar de problemen van Blaise Pascal die op zijn 22ste niet alleen een rekenmachine bedacht, maar deze ook probeerde te maken. In 1645 overhandigde hij zijn bouwset aan Séguier met de woorden: "Omdat ik met metaal en hamer lang niet zo vaardig ben als met pen en passer, en omdat de ambachtslui meer vertrouwd zijn met de praktische uitoefening van hun vak dan met de wetenschap waarop hun vak berust, zag ik mij genoodzaakt het hele project op te geven." In de rest van het betoog vertelt Pascal hoe het hem uiteindelijk toch nog gelukt is. Een en ander is echter kenmerkend voor de grote praktische hindernissen waarvoor 17de eeuwse wetenschappers zich gesteld zagen. De grote onderzoekers waren dan ook allemaal tevens zeer begaafde "knutselaars". Ze moesten immers alles zelf doen. Zoals gezegd verandert dit beeld in de 18de eeuw drastisch. Er komen dan professionele instrumentmakers die zelf vaak volwaardig onderzoek doen.



*Ovale zaal van Teylers
Museum*

De in 1784 voltooide uitbreiding van het Fundatiehuis, bestemd voor de bibliotheek, voor het verrichten van natuurkundige experimenten en voor de collectie "Modellen van nuttige werktuigen", prenten, tekeningen, fossielen en mineralen.

De zaal werd in 1779 ontworpen door Leendert Viervant. De centrale kast werd in 1801 voorzien van glazen vitrines om de fraaiste mineralen te exposeren.

De wereld van Teyler en Van Marum is vooral de wereld van de 18de eeuw. Een eeuw die wetenschappelijk gezien wellicht wat minder briljant oogt dan de eeuw daarvoor, maar die cultuur-historisch een buitengewoon boeiend verloop heeft. Het is een eeuw waarin Europa danig door elkaar wordt geschud, waarin de filosofen van de Verlichting de Franse revolutie voorbereiden. Verlichting en verering van de ratio, fenomenen die alles te maken hebben met de indrukwekkende prestaties van de 17de eeuwse natuuronderzoekers. Op 25 maart 1702 wordt in Haarlem Pieter Teyler van der Hulst geboren, vijf dagen na het overlijden van Willem III. Deze stadhouder was de grote tegenspeler geweest van Lodewijk XIV en had al zijn energie en staatsmanschap moeten steken in het beteugelen van de enorme geldingsdrang van de Zonnekoning. Het wereldrijk van Karel V lag in duigen en overal werd gekibbeld en gevochten om de brokken. Lodewijk XIV was één van de begerigsten. Daardoor was hij een voortdurende bedreiging voor de Republiek. Het gevolg was, dat de Republiek zich zó op het vasteland moest concentreren, dat Engeland de gelegenheid kreeg de macht op zee van de Hollanders over te nemen. Hiermee werd de basis gelegd voor de Engelse wereldmacht. Duitsland was een legpuzzel van verbrokkelde staatjes, waar Pruisen in de 18de eeuw wat lijn in probeerde te brengen en alleen de Turken waren, als gemeenschappelijk vijand, in staat een enkele keer voor enige christelijke saamhorigheid te zorgen. Verder was de eeuw een kaleidoscoop van twisten, oorlogen en steeds wisselende bondgenootschappen. Militair en politiek ging het met Frankrijk uiteindelijk niet zo goed, maar de absolute monarchie slaagde er wel in van Parijs het culturele centrum van Europa te maken.

Zoals hiervoor al even werd aangestipt, voltrok zich onder invloed van vooral het Puritanisme in Engeland een geleidelijk overgangsproces van het middeleeuwse denken naar een nieuw wereldbeeld, waarin behalve voor religieuze ideeën ruimte vrijkwam voor de nieuwe opvattingen van de natuurwetenschappen. In Frankrijk kreeg de overgang naar de nieuwe tijd veel

mer het karakter van een harde confrontatie tussen kerk en wetenschap. De vonk sprong in het kruitvat toen na het overlijden van Lodewijk XIV in 1715 sommige Fransen ontdekten dat er ook buiten Frankrijk interessante dingen gebeurden, met name in Engeland. De Fransen ontdekten Engeland met enorme gevolgen voor Europa.

De belangrijkste "ontdekkingsreiziger" was zonder twijfel de meester-spotter Voltaire (1694 - 1778). Eén van de meest briljante en vruchtbare geesten uit onze geschiedenis. Op zijn 32ste werd hij voor straf naar Engeland gestuurd, omdat hij weer eens een notabele voor schut had gezet. Hij bleef er drie jaar. Lang genoeg om te ontdekken dat er vergeleken met Engeland veel mis was in zijn eigen vaderland, en ook lang genoeg om zich de ideeën van Newton eigen te maken. Hij kon in 1727 nog net diens begrafenis bijwonen.

In 1738 publiceerde Voltaire zijn "Elements de la Philosophie de Newton" en was daarmee één van de eersten die een poging deed het werk van Newton voor een breder publiek toegankelijk te maken. Vooral door dit werk kregen de ideeën van Newton ook op het vasteland een grote verspreiding.

Voltaire had zijn manuscript eerst voorgelegd aan een andere grote pleitbezorger van Newton's opvattingen, zijn vriend, de Leidse hoogleraar in de wiskunde en de astronomie, Willem Jacob 's Gravesande (1688 - 1742). Voltaire was zeker niet de eerste die zich waagde aan het populariseren van de moderne natuurwetenschappen. Reeds in 1715 publiceerde onze landgenoot Bernard Nieuwentijt zijn "Regt Gebruik der Werelt-Beschouwing ter overtuiging van Ongodisten en Ongelovigen aangetoont". Het werd een daverend succes, beleefde tussen 1715 en 1759 zeven drukken en werd vertaald in het Duits, Frans en Engels. Diderot (waarover later meer) las het boek evenals Voltaire. De eerste concludeerde eruit dat Nieuwentijt thuis hoorde in het gezelschap van Newton en Van Muschenbroek, de laatste merkte op: "Een goede zaak slecht verdedigd".

Voltaire raakte in Engeland niet alleen onder de indruk van de wetenschappelijke opvattingen, maar vooral



*Voltaire (1694-1778)
De eigenlijke naam van de schrijver en filosoof Voltaire was Francois Marie Arouet. Met zijn messcherpe pen hekelde hij de gevestigde machten in Frankrijk. Tijdens zijn Engelse ballingschap maakte hij kennis met het werk van Newton en liet er in 1738 een populariserend boek over verschijnen, dat belangrijk heeft bijgedragen tot de verbreiding van de ideeën van de moderne natuurwetenschappen.*



*Willem Jacob 's Gravesande
(1688-1742)*

*Deze telg uit een oud patriërs-
geslacht werd in 1717 benoemd tot
hoogleraar in de wiskunde en
astronomie aan de Universiteit van
Leiden.*

*Hij was de eerste op het vasteland
van Europa die zijn colleges baseerde
op de newtoniaanse beginselen. Hij kwam
in contact met Newton en andere geleerden
toen hij in 1715 als jurist werd toegevoegd
aan een gezantschap dat door de Staten
Generaal naar Engeland werd gestuurd om
Koning George I te feliciteren met zijn
troonsbestijging. In datzelfde jaar werd hij
lid van de "Royal Society".*

ook van de politieke en intellectuele vrijheid die er heersten. een groot verschil met Frankrijk, waar alles geregeld werd via de Bastille!

Vanuit zijn ballingsoord begon hij pamfletten Het Kanaal over te sturen, waarin hij de groeiende middenklasse van de burgers opriep dezelfde rechten na te streven. De lectuur werd onder de toonbank verkocht. Voltaire was lelijk, ijdel, zedeloos, lichtzinnig en gewetenloos, maar ook bescheiden, vriendelijk en hulpvaardig. Met zijn geniale gave van het woord sabelde hij bijna in zijn eentje de verwereldlijkte kerk neer. Zijn strijd tegen het bijgeloof was meedogenloos. Een historicus formuleerde zijn optreden als volgt: "Het lot schonk hem 83 levensjaren, opdat hij langzaam de bouwvallige eeuw kon afbreken."

Een tweede hoofdfiguur uit de Franse Verlichting was Jacques Rousseau, een idealist die zich onder meer verdiepte in het probleem van de ongelijkheid onder de mensen. Dat hij op een andere golfengte zat dan Voltaire mag blijken uit het commentaar dat laatstgenoemde gaf op zijn "Verhandeling over de ongelijkheid": "Ik heb, mijnheer, uw nieuwe boek tegen het menselijk geslacht ontvangen.... Niemand heeft met meer geest zich ertoe gezet ons tot dieren te maken dan u; het lezen van uw boek wekt in iemand de lust om op handen en voeten rond te lopen. Daar ik deze bezigheid al sedert zestig jaar niet meer verricht, voel ik mij ongelukkigerwijs niet meer in staat haar weer op te nemen."

De genadeloze kritiek van Voltaire heeft niet kunnen verhinderen dat Rousseau een zeer grote invloed kreeg. Het waren uiteindelijk zijn idealen die in de Franse revolutie gestalte kregen.

Meer verwantschap bestond er tussen Voltaire en de Encyclopedisten, aangevoerd door Jean d'Alembert en vooral door Denis Diderot. Tussen 1751 en 1780 brachten zij in 35 delen de "Encyclopedie van de Wetenschappen, Kunsten en Ambachten" uit. De ingrijpende veranderingen uit die tijd kunnen niet beter worden gekarakteriseerd dan door een zin uit de inleiding van dit monumentale werk: "Het tijdperk van de godsdienst heeft plaats gemaakt voor de eeuw van de wetenschap!"

Wetenschap en rede zouden leiden naar een nieuwe, vrije en gelukkige wereld. Een nieuw geloof, waarvan we nu weten dat het wat te naïef was. De Encyclopedie was overigens op de eerste plaats een poging om de samenhang van het menselijk weten en kunnen na te gaan. Het werk werd op grote schaal verspreid en werd het lexicon van de beschaafde Europese kringen. Het heeft een enorme invloed gehad op de sociale ontwikkelingen. Behalve een overzicht van de menselijke kennis bevatte het vele beschouwingen waarin langs rationele weg de positie van de kerk werd ondermijnd. Weliswaar werd geen enkel dogma zonder meer verworpen, maar ze werden wel, stuk voor stuk, in twijfel getrokken.

TEYLERS STICHTING

Als kind van zijn tijd, waarin verstandelijkheid, kritische zin, ruimte van blik, humaniteit en verdraagzaamheid het denken in brede kring gingen beheersen, ontwierp Pieter Teyler reeds in 1732 een plan voor een maatschappij tot bevordering van de studie der godgeleerdheid en van de natuurkunde. Evenals in Engeland dus ook hier geen tegenstelling tussen godsdienst en wetenschap. Twintig jaar later werd in Haarlem de Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen opgericht, waarbij Teyler overigens niet was betrokken. Het is het oudste en meest eerbiedwaardige instituut van zijn soort in ons land. De Hollandsche Maatschappij is en was geen staatsinstituut. De leiding werd gerecru-teerd onder de notabelen, de leden waren actieve wetenschapsbeoefenaren. De Maatschappij was een groot succes en het Haarlemse voorbeeld werd dan ook spoedig gevolgd door andere plaatsen in de Republiek. Hoewel ze geen koninklijke bescherming genoten, floreerden ze als produkten van de Verlichting, produkten van een groeiende burger trots. We noemen een paar van de eerste:
1768, Vlissingen, Zeeuws Genootschap der Wetenschappen;
1769, Rotterdam, Bataafsche Genootschap der Proefondervindelijke Wijsbegeerte;

1773, Utrecht, Provinciaal Utrechts Genootschap van Kunsten en Wetenschappen;

1777, Amsterdam, Felix Meritis;

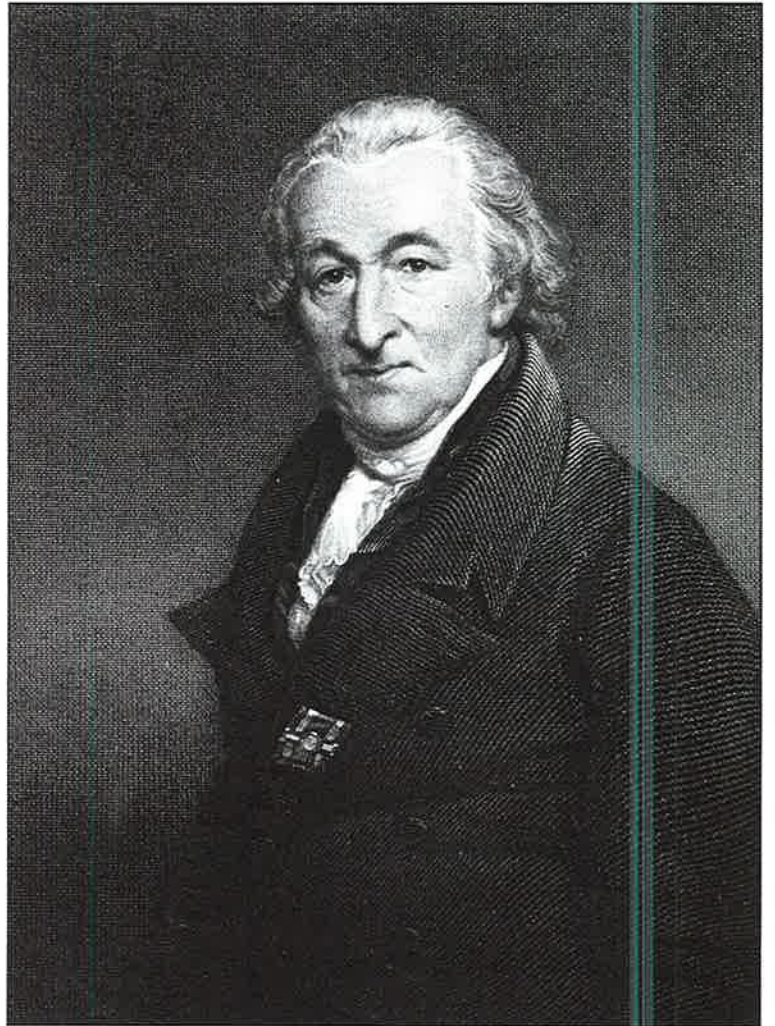
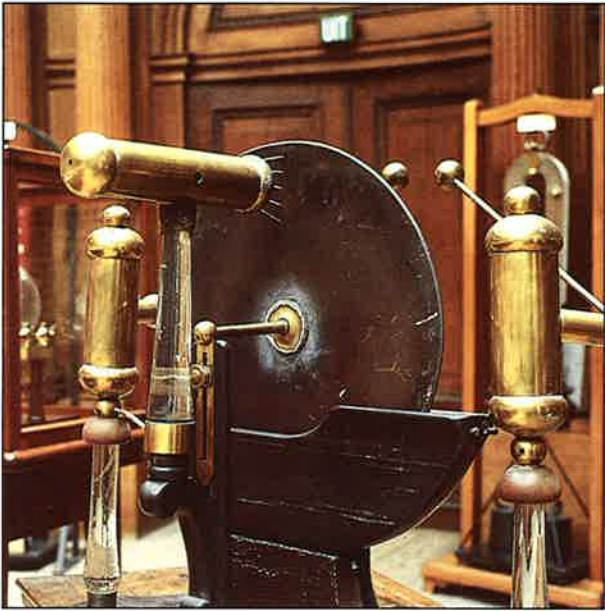
1778, Haarlem, Teylers Genootschappen.

En de lijst stopt niet bij Teyler. In de jaren daarna werden nog ettelijke soortgelijke genootschappen opgericht. Een belangrijk deel ervan bestaat nog steeds.

Op 8 april 1778 overleed de vermogende Teyler, kinderloos. Hij liet ondermeer verzamelingen na die kenmerkend waren voor zijn tijd: "Bibliotheecq en andere verzamelingen van Medailles, Prent en Teekenkonsten, opgezette vogels en natuurlijke zeldzaamheden".

In zijn testament werden vijf directeuren genoemd die als taak kregen om met de nalatenschap de godsdienst te bevorderen, kunsten en wetenschappen aan te moedigen en hulp te verlenen aan arme en noodlijdende mensen. Om de eerste twee doelstellingen te bereiken werden twee genootschappen opgericht, het "Eerste of Godgeleerd Genootschap" en het "Tweede Genootschap", dat als taak kreeg door discussies en het uitschrijven van prijsvragen het wetenschappelijk onderzoek te bevorderen.

Hoewel de Stichting bestuurd werd door aristocratische patriotten werd in 1784 de opmerkelijke, oranjegezinde, geleerde Martinus van Marum aangetrokken die sinds 1779 lid was van het Tweede Genootschap. Hij werd directeur van een splinternieuw onderdeel van de Stichting: Teylers Fysische en Naturaliën Kabinet en Bibliotheek. Dit nieuwe onderdeel, Teylers Museum, kwam op een logische wijze voort uit de collecties van het Tweede Genootschap, niet in de laatste plaats door de inbreng van dezelfde Van Marum. Op dat moment was Van Marum als directeur van het Naturaliën Kabinet ook verbonden aan de Hollandsche Maatschappij. In 1794 werd hij zelfs secretaris van dit genootschap, waardoor er tussen beide instellingen een zeer nauwe band ontstond.



*Martinus van Marum
(1750-1837)*

Na een studie aan de Universiteit van Groningen vestigde Martinus van Marum zich in 1776 als arts in Haarlem. In datzelfde jaar reeds werd hij door de vroedschap benoemd tot (onbezoldigd) lector in de wijsbegeerte en wiskunde "ten algemenen nutte van zyne medeburgenen" en werd hij lid van de Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen. Aan medisch werk is Van Marum nauwelijks toegekomen. In 1777 werd hij directeur van het "kabinet van natuurlijke zeldzaamheden" van de Maatschappij en in 1784 directeur van Teylers Physische en Naturaliën Kabinet en Bibliotheek". De afbeelding is een prent van W. van Sensus naar een schilderij van CH. H. Hodges.

Elektriseermachine van Van Marum.

De afgebeelde elektriseermachine werd door Van Marum ontworpen en door de Groningse instrumentmaker Gerhard Kuiper in 1774 gebouwd. Bijzonder aan het apparaat is dat de wrijving, die moest leiden tot elektrisering, werd opgewekt door de schijf door een bak met kwik te laten draaien. Van Marum verkocht het instrument uit zijn studententijd in 1790 voor 120,- aan Teylers Museum.

Martinus van Marum werd op 20 maart 1750 geboren in Delft. In de Republiek was sprake van een bloeiend wetenschapsbedrijf met universiteiten in Leiden, Franeker, Harderwijk, Groningen en Utrecht en met "Illustere Scholen" in Deventer en Amsterdam. Een periode met grote "kanonnen" als Huygens, Van Leeuwenhoek, Swammerdam, Boerhave, 's Gravesande en Van Musschenbroek was weliswaar afgesloten, maar ook de tweede helft van de 18de eeuw leverde kundige wetenschappers op vele gebieden. Nog even voor de aansluiting: in 1747 was na een reeks volksoptochten opnieuw een stadhouder benoemd, Willem IV, zoon van Jan Willem Friso, erfstadhouder van Friesland, Groningen, Drenthe en Gelderland. In Europa was net weer vrede na de Oostenrijkse succesie-oorlog, die onder meer in de zuidelijke Nederlanden voor krijgsgeweld had gezorgd. Frankrijk, in oorlog met Maria-Theresia van Oostenrijk, bezette in mei 1747 een deel van Zeeuws-Vlaanderen en tot grote schrik van de Hollanders ook Bergen op Zoom. Onze bondgenoot Engeland werd teruggedreven en in 1748 viel Maastricht. Toen vond Lodewijk XV het welletjes. Op zee waren de Engelsen heer en meester, waardoor de Franse handel veel schade leed. In 1748 werd de vrede van Aken gesloten. In 1751 verscheen het eerste deel van de Encyclopédie. In datzelfde jaar overleed Willem IV. Hij werd opgevolgd door zijn minderjarige zoon Willem V, wiens moeder Anna zijn taak waarnam.

Martinus van Marum ging in Groningen studeren en, zoals gebruikelijk in die tijd, werd hij ingewijd in een groot aantal vakgebieden, waaronder geneeskunde, natuurkunde, plantkunde en astronomie. Van Marum mocht in 1773 zijn proefschrift verdedigen ten overstaan van de Senatus Amplissimus met als voorzitter de in 1766 benoemde stadhouder Willem V. De studie handelde over de beweging van vloeistoffen in planten. Twee weken later verwierf Van Marum dezelfde graad in de medische wetenschap. Hij verwachtte een spoedige uitnodiging om Camper op te volgen, zijn oude hoogleraar in de plantkunde. Dat ging echter niet door, waarna hij dit vak teleurgesteld de rug toekeerde en zijn aandacht richtte op de theorie van de elektrische

verschijnselen. Hij had in die dagen net het boek van Priestley over de geschiedenis van dit thema in handen gekregen en was zodoende geheel op de hoogte van de stand van de wetenschap op dat gebied. Dat kon toen nog. (*The History and Present State of Electricity*, 1767. Het werk verscheen in 1773 ook in het Nederlands.)

Het gebied van de elektrische verschijnselen was overigens niet geheel nieuw voor Van Marum. Tijdens zijn studie van de fysiologie had hij al gebruik gemaakt van de elektriseermachine met alle chagrijn vandien. Weglekkende elektriciteit, samenhangend met een te vochtige atmosfeer, en ongelijkmatige wrijving van de kussens waarmee dergelijke apparaten waren uitgerust met als gevolg een weinig konstante elektriciteitsopwekking. Dit laatste probleem was voor de jonge Van Marum aanleiding om een eigen apparaat te ontwerpen. In 1776 kon hij niet zonder trots in een aan Prins Willem V opgedragen publikatie melden dat hij een nieuw type elektriseermachine had ontwikkeld waarvan de noodzakelijke wrijving werd opgewekt door de schijf door een bak met kwik te laten draaien.

Interessant is de door Van Marum in deze publikatie weergegeven visie die hij heeft op de stand van zaken van de wetenschap der elektrische verschijnselen op dat moment.

“Als er een tak van wetenschap is die in korte tijd vanuit het niets een respectabel aanzien heeft verworven en die het nut van het experiment het duidelijkst demonstreert dan is het wel die welke zich bezighoudt met de studie der elektrische verschijnselen. Nog geen dertig jaar geleden was het ongetwijfeld de bescheidenste onder de verschillende takken der natuurkunde: een handjevol effecten waar niemand wat van begreep en ogenschijnlijk uitsluitend geschikt voor amusementsdoeleinden. We zijn nu zover dat we er vrij zeker van zijn dat een groot deel van de belangrijkste natuurverschijnselen geheel of gedeeltelijk samenhangen met de werking van elektrische materie.”

De eerste die wezenlijk bijdroeg tot een beter inzicht in het verschijnsel elektriciteit was William Gilbert (1544 - 1603). Wat Galileo Galilei was voor de mechanica was deze tijdgenoot van Shakespeare voor de elektriciteitsleer. Hij maakte een einde aan een lange periode van zuiver speculeren, die terugging tot de oude Grieken, door het verschijnsel te onderwerpen aan een imposante reeks experimenten. Een vruchtbare vorm van vrijetijdsbesteding! De kost verdiende Gilbert namelijk als hofarts van Elizabeth I en James I.

Elektriciteit was heel lang een verschijnsel dat hoorde bij barnsteen, een fossiele hars die reeds in de oudheid diende als grondstof voor sieraden. Het materiaal, door de Grieken aangeduid als "elektron", moet in de ogen van onze voorvaders een paar opmerkelijke eigenschappen hebben bezeten. Zo bleken er, vreemd genoeg, soms (fossiele) insecten in opgesloten te zitten. En als je het flink wreef met wol trok het lichte voorwerpen, zoals strootjes en haren, naar zich toe. Plato maakte er al melding van. Sindsdien verstreken er zo'n 2000 jaar tot Gilbert het onderwerp aanpakte. De enige interessante vordering, die men in de tussentijd had gemaakt, was de ontdekking dat ook diamant en git een dergelijk gedrag vertonen.

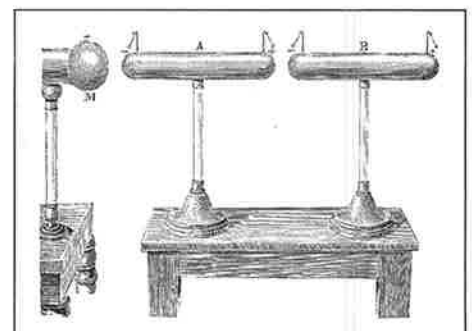
Gilbert breidde de lijst van elektriseerbare stoffen aanzienlijk uit. Hij wist er talrijke mineralen, maar ook stoffen als glas, zwavel en schellak, aan toe te voegen. Hij beproefde de werkzaamheid van allerlei wrijvingsmedia en stelde vast dat zijde, wol en de droge handpalm de beste resultaten gaven. Ook het arsenaal van de stoffen die gevoelig zijn voor de aantrekkende werking wist hij aanmerkelijk uit te breiden. Gilbert ontdekte dat zelfs vloeistoffen als olie en water niet onbewogen bleven onder de invloed van een naburig geëlektiseerd lichaam. Aanraken met papier, linnen of water vernietigde de elektriciteit, maar waarom water wel en de veel lichtere olie niet was een compleet raadsel. In feite was het hele gebeuren nog steeds een mysterie maar de kracht van de experimentele methode, waar Van Marum hiervóór op wees, werd door Gilbert, die nog een hele serie andere waardevolle zaken aan het licht bracht, duidelijk aangetoond. Zijn

aanpak stond in veel opzichten model voor de onderzoekers die na hem kwamen en waarvan we een enkeling die past in het kader van ons verhaal kort zullen memoreren.

Een bijzondere vermelding verdient zeker die andere amateuronderzoeker Otto Gericke (1602 - 1686). Ditmaal geen hofarts maar een burgemeester en wel van Magdeburg. De man figureert nu nog in onze natuurkundeleerboeken als een soort folklore met zijn halve-bollen-experiment. In feite heeft hij minstens twee zeer belangrijke uitvindingen op zijn naam staan: de luchtpomp en de elektriseermachine. Over laatstgenoemde onderwerp verscheen in Amsterdam in 1672 een publikatie van zijn hand waarin ook melding wordt gemaakt van een geheel nieuw fenomeen: de elektrische afstoting! Hierdoor kwamen bepaalde ideeën over een mogelijke relatie tussen elektrische kracht en zwaartekracht lelijk in de knel te zitten. De burgemeester maakte het zelfs nog wat ingewikkelder. Hij had namelijk ontdekt dat eenzelfde voorwerp zowel aangetrokken als afgestoten kon worden. Als hij een geweven zwavelbol boven een veertje hield dan werd dit aangetrokken tot het moment van contact. Daarna werd hetzelfde veertje afgestoten. Een zo onbegrijpelijk gedrag dat Gericke tot de slotsom kwam dat de bol blijkbaar zelf besliste of hij zou aantrekken dan wel afstoten.

De elektriseermachine van Gericke stamt uit 1660. Hij bestond uit een op een as gemonteerde zwavelbol, die geëlektriseerd werd door wrijving met de droge handpalm. Gericke was de eerste die waarnam dat de bol in het duister licht gaf als gevolg van kleine vonkjes die een "knisperend" geluid maakten. Ook bleek hem dat een aan de bol bevestigde linnen draad de elektrische werking over een afstand van meer dan een meter kon verplaatsen, waarmee een eerste aanwijzing was verkregen voor het verschijnsel van de stromende elektriciteit.

De betekenis van Gericke mag ook weer niet overdreven worden. Zijn experimenten met de zwavelbol hadden namelijk betrekking op het verschijnsel zwaartekracht. Waarschijnlijk was Gericke zich nauwelijks



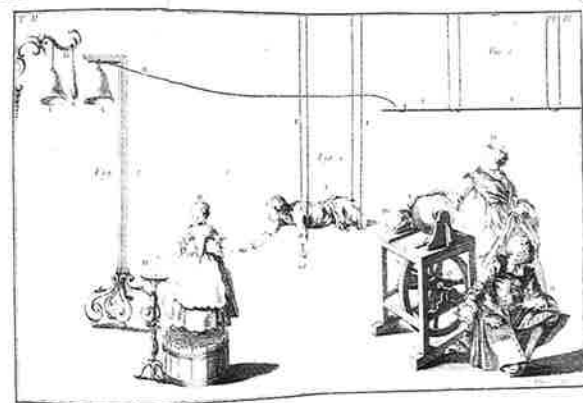
*Otto Gericke (1602-1686)
In 1660 bouwde Gericke een
apparaat dat vaak wordt
opgevat als de eerste elektri-
seermachine. De zwavel-bol-
generator was echter bestemd
voor onderzoek naar het
wezen van de zwaartekracht.
Gericke nam allerlei fenome-
nen waar die pas veel later
als elektrisch werden geken-
merkt.*

*Elektrostatistische inductie.
De afbeelding toont een
houtgravure uit een leerboek
van A. Ganot, waarin het
effect van een geladen voor-
werp (M) op een geleider (A)
in de buurt wordt geschetst.
De elektrometers op de uit-
einden suggereren de opho-
ping van lading op de uitein-
den. In een tweede geleider
(B) wordt evenzo een ladings-
scheiding opgewekt.*

bewust van het feit dat hij met een elektriseermachine bezig was. In 1671 bood hij Leibniz een model van zijn apparaat aan. Men neemt aan dat deze het verband heeft gelegd met de elektriciteit. Robert Hooke en Robert Boyle waren waarschijnlijk betrokken bij de introductie van het werk van Gericke in Engeland. Het baarde weinig opzien.

Maar het historische proces was niet meer te stoppen. In 1675 doet Newton zelf een belangrijke duits in het zakje door te laten zien dat glas een veel krachtiger werking vertoont dan zwavel. Eigenlijk was hij alleen geïnteresseerd in de lichtverschijnselen in het kader van zijn beroemde studie naar het wezen van licht en kleur. 30 jaar later pakte Francis Hauksbee senior deze draad weer op. Behalve door Newton werd hij geïntroduceerd door de waarneming van de Franse astronoom Jean Piccard van flauwe lichtverschijnselen in het vacuum boven het schommelende kwik van een barometer. Toen Hauksbee zijn onderzoek naar dit "kwiklicht" in 1705 begon was er niemand die een verband legde met de elektriciteit. Al snel werd duidelijk dat het glas ook zonder kwik tot lichten gebracht kon worden, zij het met een ander karakter, als het met wol of de droge handpalm gewreven werd. In 1706 legt Hauksbee het verband met de elektriciteit en in dat zelfde jaar komt hij met de eerste serieuze elektriseermachine.

Stephen Gray (1666 of 1667 - 1736) stelde vast dat elektriciteit van het ene voorwerp kan worden overgedragen naar het andere, waarbij sommige materialen de elektriciteit veel beter transporteren dan andere. Gray deed nog een andere zeer belangrijke ontdekking. Het was bekend dat de werking van een geëlektriseerd lichaam langs een geleidende draad verplaatst kon worden. Gray ontdekte dat de draad geen contact hoefde te maken met het betreffende voorwerp. Ook wanneer de draad dicht in de buurt werd gehouden, vertoonde het andere uiteinde een aantrekkende werking! Een verschijnsel dat bekend zou komen te staan als elektrostatistische inductie of influentie. Gray was de eerste die opmerkte dat de elektriciteit zich bij holle



Het geleidende lichaam. In 1730 nam Stephen Gray waar dat het menselijk lichaam de elektrische werking kan doorgeven. De rol van de elektriseermachine werd opgeladen door wrijving met de droge handpalm. De lading werd afgenomen door de voeten van een jongen die met zijden draden geïsoleerd was opgehangen. Dergelijke experimenten werden in vele variaties vaak als volksvermaak uitgevoerd. De afbeelding is ontleend aan een boek van J.H. Winkler uit 1748.

geleiders steeds aan de buitenkant ophoudt. In 1730 kon hij aantonen dat ook het menselijk lichaam een redelijk goede geleider is. Hij hing een jongen op aan zijden draden, bracht zijn voeten in contact met een geweven rol van rubber en konstateerde triomfantelijk dat bronsfolie aan het gezicht van het proefkonijn bleef plakken (afbeelding boven).

Het werk van Gray werd voortgezet door Charles F. Dufay (1698-1739) die zo'n beetje alles elektriseerde wat hij in handen kreeg. Alleen bij metalen voorwerpen lukte het hem niet. Later vond men dat ook deze wel degelijk te elektriseren zijn mits je ze maar geïsoleerd vasthoudt. Dufay sprak als één van de eersten het vermoeden uit dat er wel eens twee soorten elektriciteit zouden kunnen bestaan.

Het hele gebeuren bleef moeilijk te vatten. Maar geleid door vage voorstellingen en met een grote experimentele ijver werd al tastend en struikelend vooruitgang geboekt. Ook de ontwikkeling van de elektriseermachine stond niet stil. De Duitser Winkler verving de droge handpalm door leren kussentjes die met veren tegen de bol gedrukt moesten worden. Hij verbeterde ook het rotatiemechaniek wat hem mooiere en krachtigere ontladingen opleverde.

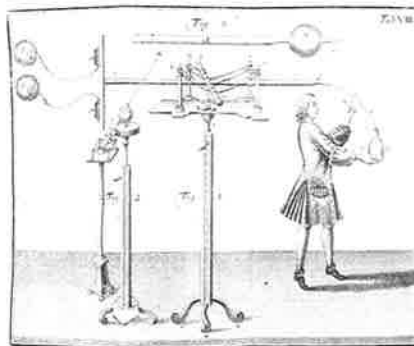
Experiment met de Leidse fles.

In zijn boek van 1746 geeft J.H. Winkler de eerste schets van het experiment van Van Musschenbroek dat leidde tot de ontdekking van de Leidse fles. De lading werd verkregen door de glazen bollen links rond te draaien. Van Musschenbroek vroeg zich af in hoeverre de elektriciteit via een draad kon worden opgevangen in een gedeeltelijke met water gevulde fles. Als de experimentator niet geïsoleerd staat, kan hij een sterke schok krijgen.



Petrus van Musschenbroek (1692-1761)
 Petrus van Musschenbroek volgde in 1743 's Gravesande op aan de Universiteit van Leiden. Daarvoor had hij professoraten vervuld aan de universiteiten van Duisburg en Utrecht. Van Musschenbroek behoorde tot een familie van beroemde instrumentmakers, die de demonstratietoestellen vervaardigden, die hoogleraren als de Volder, Senguerd, 's Gravesande en later ook Petrus bij hun colleges gebruikten. In 1746 maakte hij melding van zijn beroemde experiment dat leidde tot de ontdekking van de Leidse fles.

We keren terug naar het goede vaderland waar in Leiden twee internationaal befaamde hoogleraren resideerden, de al eerder genoemde wiskundige Willem Jacob 's Gravesande en de natuurkundige Pieter van Musschenbroek (1692-1761). Van de eerste is bekend dat hij in ieder geval vóór 1720 reeds beschikte over een Hauksbee-machine. De laatstgenoemde heeft zijn grootste bekendheid te danken aan de ontwikkeling van de Leidse fles, de eerste voorziening waarmee het mogelijk was elektriciteit op te slaan. In een brief aan Réaumur in 1746 beschrijft hij zijn ervaringen met een nieuwe experimentele voorziening, waarvan het effect blijkbaar een diepe indruk op hem heeft gemaakt. Hij schrijft erover bijna zoals twee eeuwen later verontruste wetenschappers zullen doen over de ontketening van de atoomenergie: "Ik stel er prijs op u in te lichten over een nieuw maar afschuwwekkend experiment met het dringende advies het niet zelf uit te voeren!" Waar was Van Musschenbroek zo van geschrokken? Hij had de volgende opstelling gemaakt. De loop van een geweer maakte contact met de bol van een elektriseermachine, die door één man snel werd rondgedraaid terwijl een tweede zijn handpalm er tegenaan drukte. Aan de andere kant van de loop hing een bronzen draad in een glazen fles, die gedeeltelijk gevuld was met water. De onderzoeker had deze fles in zijn rechter hand, terwijl hij met de linker vonken probeerde te trekken uit de loop (afbeelding onder).



in gläsernen Gefäßen. 121
 Das VIII. Hauptstück.
 Warum die verhärtete elektrische Kraft zwischen Blättern keine Elektricität mittheilen kann?
 § 115.
 So darf man die elektrische Stauung nicht als die trockne Wärme des Blattes in gläsernen Gefäßen ansehen, weil sie nicht bloß durch gewisse Körper, als Ziegelstein, Nasse Erde, an welchen sie keine Elektricität erwecken kann. Die elektrische Stauung ist ein trockner Körper nicht. Denn sie wirkt nicht durch Berührung elektrisch. In den Versuchen von den Eigenschaften und Ursachen der Elektricität habe ich das gesehen, daß verholzene Körper von einem elektrischen feinen Elektricität erhalten, in der allmählichen Entloftung durch elektrischen Strome geleitet (S. 5. 19.). Auch der Jet kan als in trocken Urtheile beklafte, mochten, da erweckt Nasse Erde, und ge-
 § 5. 18.

Plotseling kreeg hij een enorme schok door zijn rechter hand, die zijn hele lichaam deed schudden. Het was de wat ruwe start van een nieuw elektrisch hulpmiddel met een grotere toekomst dan het elektriseerapparaat: de condensator. De meeste histories vermelden niet dat Van Musschenbroek in feite een slordig experiment van een gast herhaalde. Een zekere Andreas Cunaeus had enkele dagen daarvoor alleen en niet volgens de regelen der kunst met de elektriseeropstelling gespeeld. Essentieel was dat hij niet geïsoleerd stond. In het boven beschreven experiment vormden het water in de fles en het lichaam de twee polen van de condensator met daartussen het glas als diëlektricum. Later zal Van Musschenbroek nog venijniger door de "bliksem" worden getroffen. Hij raakt dan enkele minuten volledig buiten adem. De onverwacht grote kracht van de Leidse fles zorgde alom voor veel opwindend en verwarring. Men zat met de handen in het haar. De toch al niet zo sterke theoretische modellen lieten het geheel afweten. Benjamin Franklin, waarmee we hierna nog nader zullen kennismaken, beschreef als eerste de werking van de Leidse fles. De opgeladen condensator ontladde via het lichaam van de onderzoeker omdat door het optreden van een vonk de condensator werd kortgesloten. Hier dus niet meer de onschuldige vonk waar men zich bijna honderd jaar mee had vermaakt maar een gevaarlijke ontlading die bij dezelfde spanning een veel grotere stroom deed vloeien.

Al snel werden aan de Leidse fles de nodige verbeteringen aangebracht. Zo ontdekte John Bevis dat je de fles niet in de hand hoeft te nemen. Ook als je de buitenkant met metaalfolie bedekte bleef de werking bestaan. En hoe groter het bedekte oppervlak en hoe dunner het glas des te groter bleef de opslagcapaciteit.

Een aparte vermelding verdient ook de naam van de wat excentrieke Fransman, Jean A. Nollet (1700-1770), al was het alleen maar vanwege zijn curieuze demonstraties voor het hof van Versailles, waar men in hoofdzaak geïnteresseerd was in vermaak. Met zijn kennis van de elektrische verschijnselen had Nollet nogal wat mogelijkheden om aan deze behoefte te voldoen. Zo zorgde hij ooit voor veel hilariteit door 180 soldaten,

die in een kring stonden en elkaars hand vasthielden, gelijktijdig te laten opspringen door een flinke lading door de kring te sturen. Enige jaren later deed hij het in Parijs nog eens dunnetjes over. Toen verhieven 700 Karthuizer monniken zich voor een kort ogenblik ten hemel. Wat positiever is de aantekening dat Nollet één van de belangrijkste populariserende auteurs was uit de 18de eeuw. Ook leverde hij een bijdrage aan de ontwikkeling van de Leidse fles met zijn waarneming dat de fles niet persé met water gevuld hoeft te zijn. Stoffen als kwik en ijzerpoeder voldeden eveneens uitstekend.

*Rolelektriseermachine.
Deze door Edward Nairne
gebouwd elektriseermachine
bestaat uit een glazen cylin-
der en twee bronzen geleiders
waarvan de één contact
maakt met het wrijvingskus-
sen de ander met de scherp
gepunten collectorkam. Van
Marum kocht het apparaat
in 1790.*

*Benjamin Franklin
(1706-1790)
Franklins faam bereikte het
grote publiek na de publicatie
van zijn ideeën omtrent de
bliksem als een elektrisch
verschijnsel in 1749 en de
middelen om dit natuurge-
weld te ontlopen door het
toepassen van bliksemaflei-
ders. In 1752 volgde het
beroemde vliegerexperiment,
waarmee Franklins vermoe-
den werd bevestigd. De
afbeelding op pagina 24 is
ontleend aan een boek van
John Cuthbertson uit 1782.*



Intussen gingen de verbeteringen aan de elektriseermachine door. We hebben gezien hoe de bol van zwavel werd vervangen door één van glas, hoe de bol overging in een rol en hoe de handpalm plaatsmaakte voor leren kussentjes. Dit stadium was rond 1750 bereikt. De volgende stap was de toepassing van schijven in plaats van rollen. Aanvankelijk werden daar meestal de namen van onze landgenoot Ingenhousz (ontdekker fotosynthese) en de Engelse instrumentmaker Ramsden bij genoemd (1764 resp. 1766). Tegenwoordig neemt men echter aan dat de Zwitser Martin Plantagen zeker tien jaar vóór was. Hoe het ook zij, de schijfmachine maakte snel furore en werd aan het eind van de jaren '60 reeds op relatief grote schaal geproduceerd. Een bekende bouwer was de Engelsman John Cuthbertson, die zich in 1768 als instrumentmaker in Amsterdam vestigde. Bij hem ook bestelde Van Marum in 1783 zijn beroemde machine, waarover straks meer.

Het elektrische spektakel trok ook aan de andere kant van de oceaan grote belangstelling onder meer van Benjamin Franklin (1706-1790). In 1746 hield hij zijn uitgeversactiviteiten voor gezien om zich geheel aan de wetenschap te wijden. Met grote scherpzinnigheid en geholpen door opmerkelijke praktische vaardigheid wist hij al snel dieper in de materie door te dringen dan zijn Europese collega's. Hij verwierf er bij kenners zowel als leken een enorm aanzien mee. In latere jaren ging de politiek een steeds groter deel van zijn tijd opeisen. Franklin was ongetwijfeld één van de belangrijkste vertegenwoordigers van de Verlichting in Noord-Amerika. Emilio Segré vergelijkt hem met Voltaire maar ook de ideeën van Rousseau spraken hem zeker aan. Hij was één van de opstellers van de Onafhankelijkheidsverklaring in 1776.

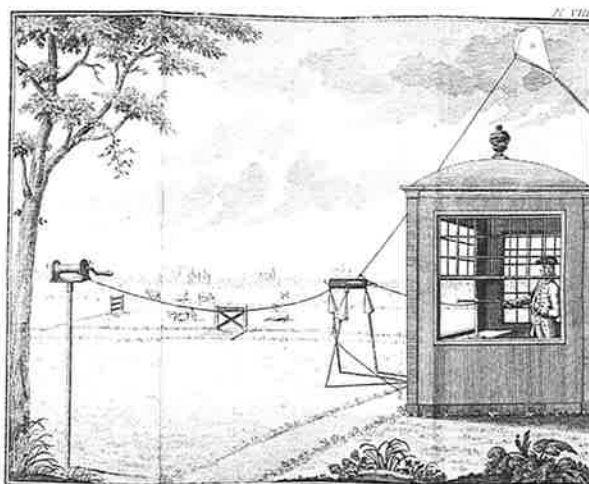
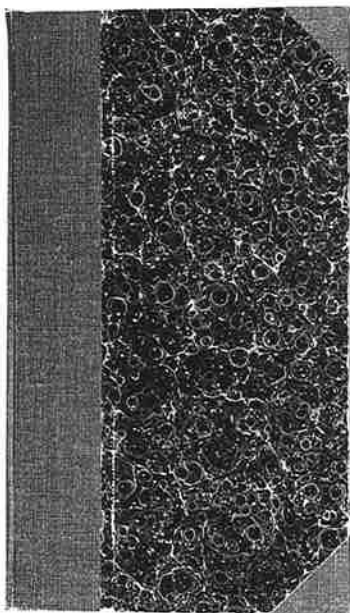
Op grond van vele subtiele experimenten kwam Franklin tot het idee dat er voor de twee soorten elektriciteit een behoudswet moest gelden. Lading kon niet verloren gaan en ieder voorwerp bezat onder normale omstandigheden evenveel positieve als negatieve lading. Hij kwam verder tot de overtuiging dat de kracht van de Leidse fles niet in de metalen folies zat maar in het glas! Zo vatte hij een glazen schijf tussen



twee platen van lood en laadde deze op met zijn elektrische machine. Vervolgens ontladde hij de metalen platen en nam ze weg. De naakte glasplaat bleek sterk geëlektriseerd. Werd het glas weer tussen de metalen platen gebracht dan kon een sterke vonk worden opgewekt. Franklin geloofde dat zich lading aan het glas hechtte. Aan het eind van het boekje komen we hier nog even op terug als het gaat om het verschijnsel elektreet.

Elektriciteit die aan de buitenkant van de fles zat, noemde hij positief, wat aan de binnenkant zat negatief. Enige tijd later ontdekte men dat negatieve lading ook best aan de buitenkant wil zitten met de positieve binnen. De meeste wetenschappers waren aanhangers van het idee dat de twee soorten elektriciteit moesten worden opgevat als twee vloeistoffen. Op grond van zijn waarnemingen dat geëlektriseerde voorwerpen streefden naar een toestand van neutraliteit kwam Franklin tot de conclusie dat er slechts sprake kon zijn

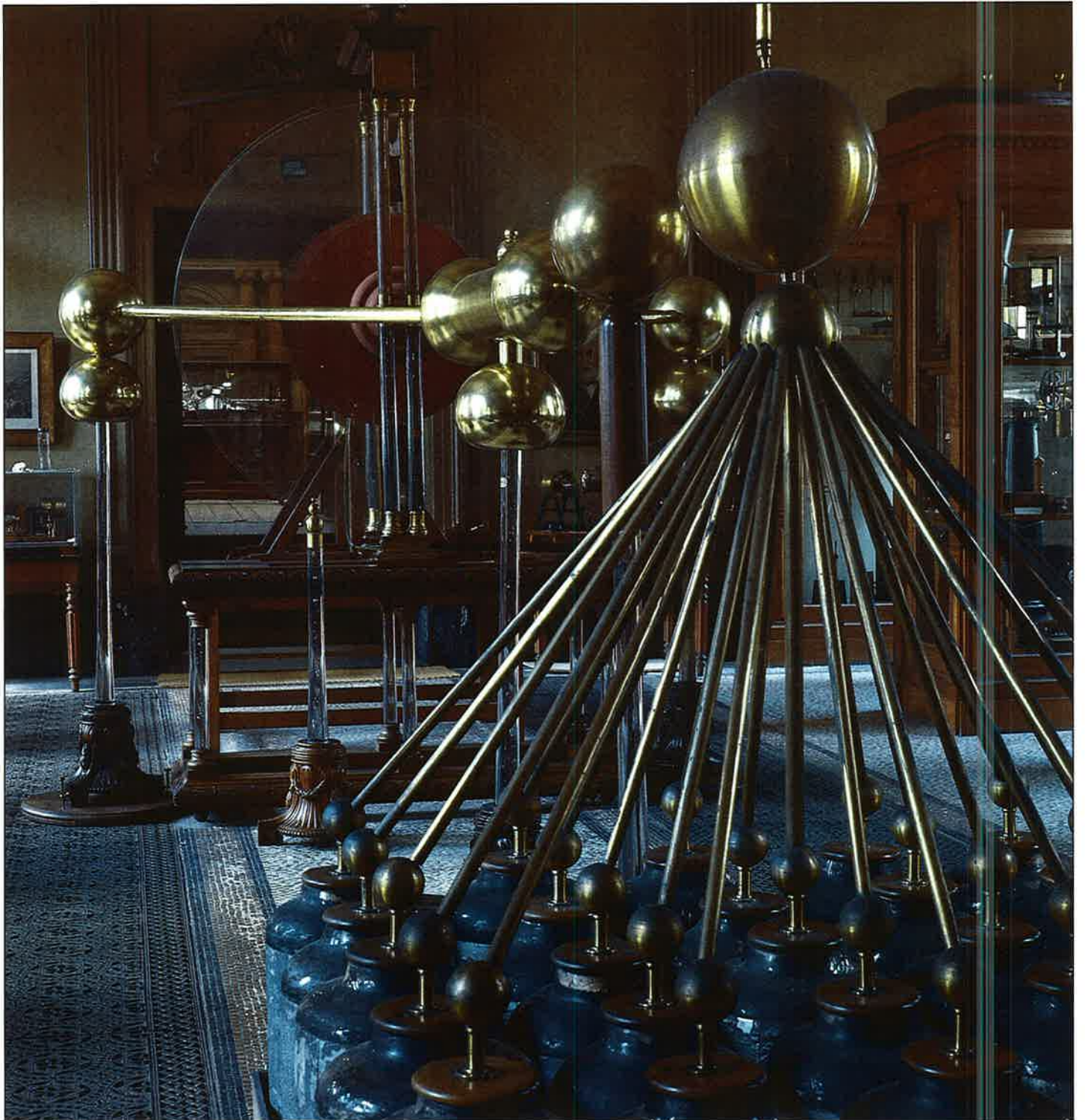
van één vloeistof, die uit positieve lading bestond. Een tekort aan deze vloeistof betekende dan dat het betreffende voorwerp negatief geladen was. Als we de tekens omdraaien kunnen we vaststellen dat deze voorstelling voor veel alledaagse elektrische verschijnselen, waaronder de statische elektriciteit, zo slecht nog niet is. Bij het publiek werd Franklin vooral bekend als degene die kon aantonen dat de bliksem een elektrisch fenomeen is waartegen men zich kan beschermen door het aanbrengen van een bliksemafleider (1753). Het eerste vliegerexperiment werd in 1752 uitgevoerd door Dalibard in de buurt van Parijs.



Het is moeilijk voor te stellen wat een indruk deze ontdekking op het publiek gemaakt moet hebben en hoezeer de status van de natuurwetenschappen erdoor werd verhoogd: het verbijsterende natuurgeweld ontgoddelijkt en zelfs enigszins getemd! Franklin had ontdekt dat een scherp metalen voorwerp zeer geschikt was om de lading van een geladen voorwerp, bij voorbeeld de rol van een elektriseermachine (afbeelding pagina 23) af te "schrappen". Met een gepunte staaf moest het dus mogelijk zijn geleidelijk de lading uit een wolk af te leiden naar de aarde. Het idee vond op grote schaal ingang. Er waren echter ook nogal wat lieden die er niets van moesten hebben uit vrees voor een aantrekkende werking op de bliksem. Ook wilde men de essentiële spits nog wel eens vervangen door een bolletje. Dit was vooral in Engeland het geval waar de ster van Franklin snel verbleekte toen zijn aandeel in de onafhankelijkheidsbeweging duidelijk werd. Anderzijds was hij in staat om op grond van zijn wetenschappelijke status in Frankrijk voor hetzelfde doel belangrijke steun te verwerven.



Tegen het eind van de 18e eeuw werden in Frankrijk, overigens nutteloze, draagbare bliksemafleiders gebruikt.



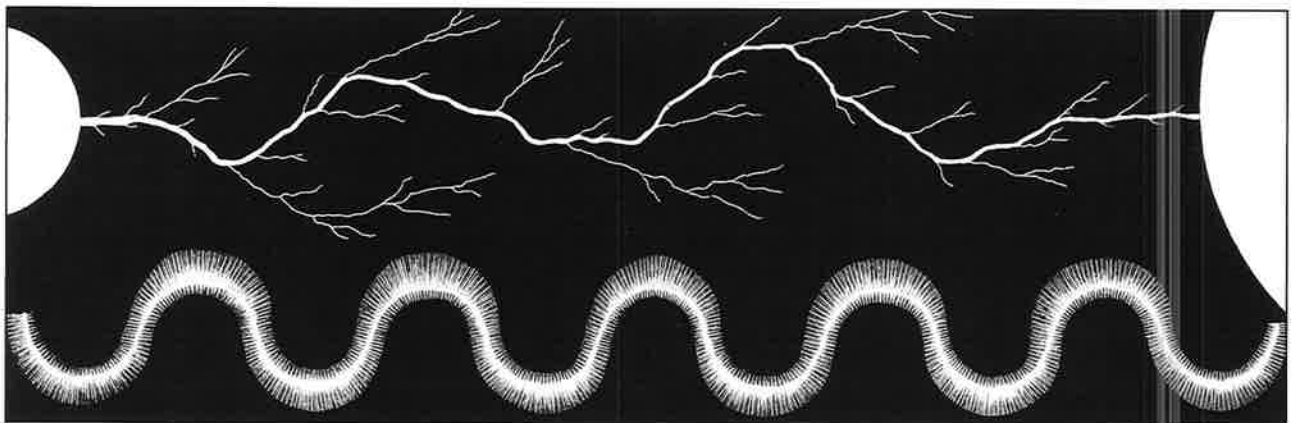
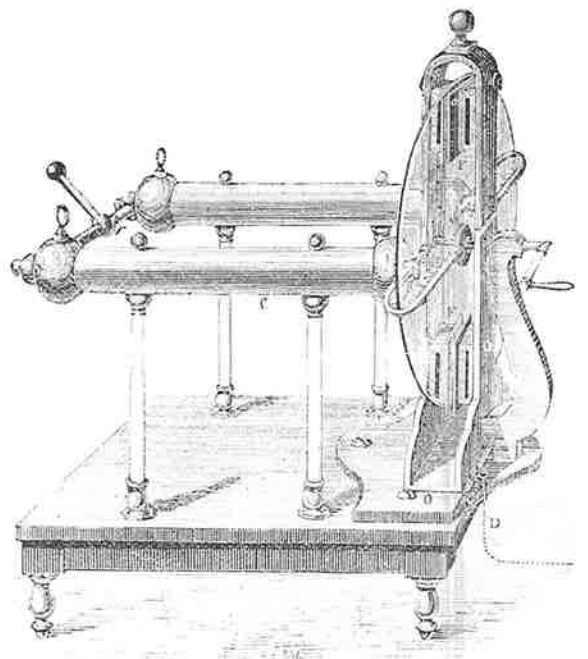
Met de rechtvaardiging van de grote elektriseermachine van Van Marum ging het eigenlijk niet veel anders dan met die van de tegenwoordige deeltjesversnellers. Volgens Van Marum ging de vooruitgang van de elektrische wetenschap gelijk op met de toename van de afmetingen van de elektriseermachines. Er was volgens hem dan ook goede hoop dat een nog groter apparaat tot nieuwe ontdekkingen zou leiden en daarmee tot een wezenlijke bijdrage van Teylers Stichting aan de vooruitgang van de wetenschap. Het apparaat dat Van Marum in gedachten had, was voor de meeste van zijn collega's volstrekt onbetaalbaar en Teyler zou de wetenschap dus een grote dienst bewijzen door de realisatie van een dergelijk projekt mogelijk te maken. Op 11 april 1783 gaven de directeuren Van Marum het groene licht en op 7 mei ging hij met een uitgewerkt plan naar de eerder genoemde instrumentmaker John Cuthbertson. Ruim een jaar later, op 24 december 1784, kon de machine geïnstalleerd worden in de nieuwe ovale zaal van het museum.

Daarop volgden een aantal jaren vol experimenten. Allereerst werden de karakteristieken van het apparaat zo goed mogelijk bepaald. De elektriciteitsproductie bleek boven verwachting maar een aanzienlijk deel van de lading lekte voortijdig weg wat op enkele punten aanpassingen noodzakelijk maakte. De foto's tonen de opstelling zoals die nu nog bestaat en die de situatie van 1791 weergeeft. Het hele systeem is geplaatst op een grote tafel die rust op dikke glazen poten. Op de tafel staan twee paar glazen kolommen die in hun midden een horizontale as ondersteunen. Op deze as zijn twee glazen schijven gemonteerd die met een dubbele slinger, bediend door twee man, rondgedraaid kunnen worden. Elke schijf draait aan de boven- en onderkant tussen een paar wrijvingskussens door vervaardigd van "gewaschte zijden taf". Tussen de schijven zijn in een horizontale lijn de spitse kammen aangebracht, die verbonden zijn met grote koperen cylinders, de primaire geleider.

De afmetingen van het geheel werden in belangrijke mate bepaald door de maximale omvang van de schijven die in Van Marums tijd geproduceerd konden worden. In de buurt van het Franse Laon kon men hem

De grote elektriseermachine van Van Marum. De afbeelding geeft een indruk van de machine zoals die er na enige aanpassingen in 1791 uitzag en nu nog steeds te bezichtigen is.

schijven leveren met een diameter van 1,65 meter en een dikte van 1 cm. De gebruikte kussens hadden een lengte van 40 cm. De werking van de machine zullen we globaal toelichten aan de hand van nevenstaande afbeelding. Het is een houtgravure uit een natuurkundeboek van A. Ganot zoals dat aan het eind van de vorige eeuw werd gebruikt. De prent geeft een goede indruk van de belangrijkste kenmerken van de elektriseermachine. Alvorens de werking toe te lichten een enkele opmerking over de ideeën die Van Marum zelf had over zijn machine. Die waren geheel gebaseerd op de één-vloeistoftheorie van Franklin. Sterker nog, één van zijn bekendste resultaten werd door veel tijdgenoten beschouwd als het doorslaggevende bewijs van Franklins gelijk. Van Marum kon zulke lange vonken trekken dat het voor het eerst mogelijk werd hun detailstructuur goed waar te nemen. In 1785 zag hij hoe zijn vonk van de ene naar de andere geleider sprong en hoe de hoofdontlading zich onderweg vertakte. Ook die vertakkingen bleken allemaal in de richting van de ontvangende geleider te wijzen (afbeelding onder). Volgens het twee-vloeistoffen-model was dit onmogelijk, omdat een ontleding een symmetrisch gebeuren was dat op beide geleiders startte. Van Marum reisde met zijn bevindingen naar Parijs waar Franklin net op het punt stond de boot naar huis te nemen. De beroemde

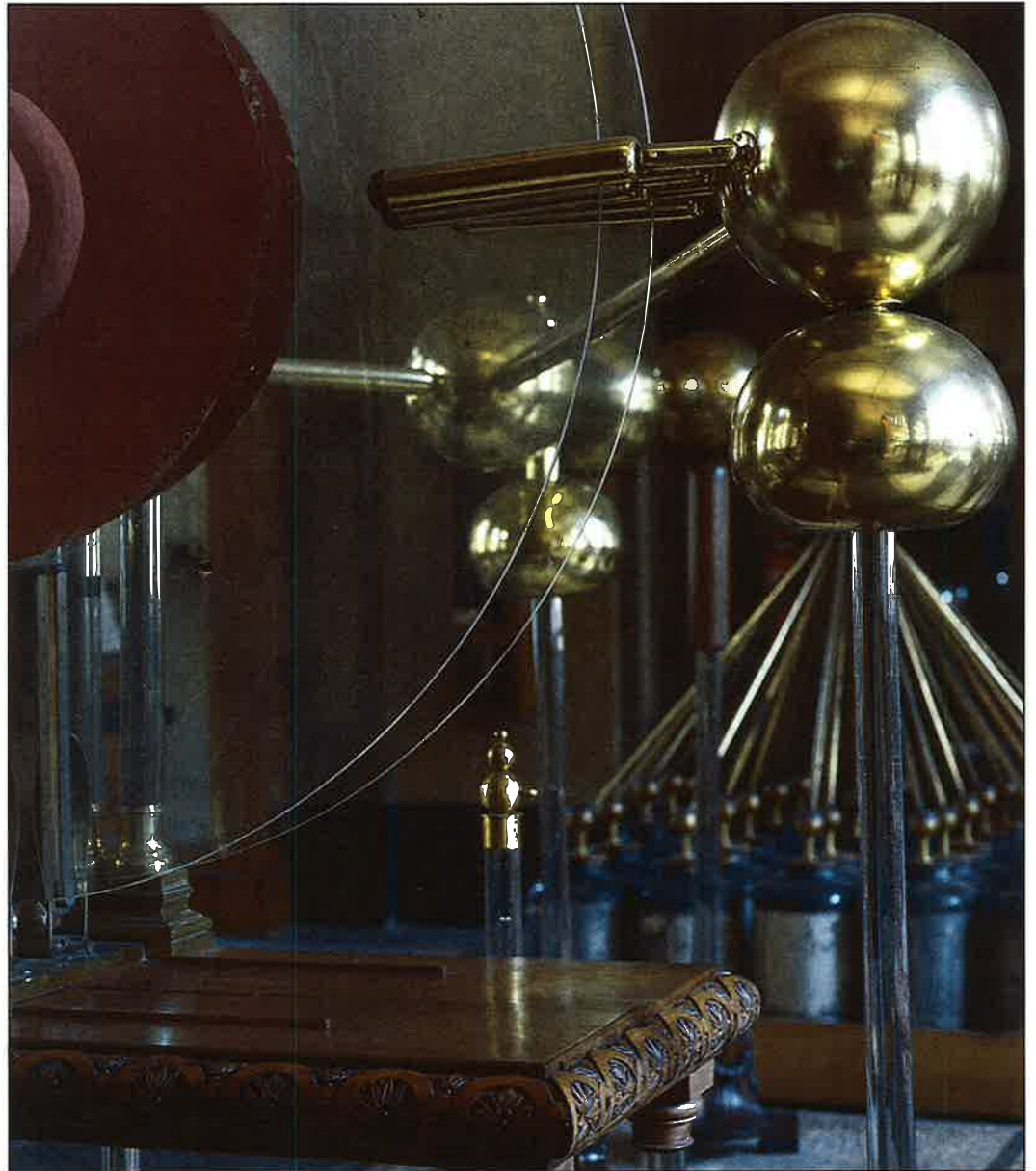


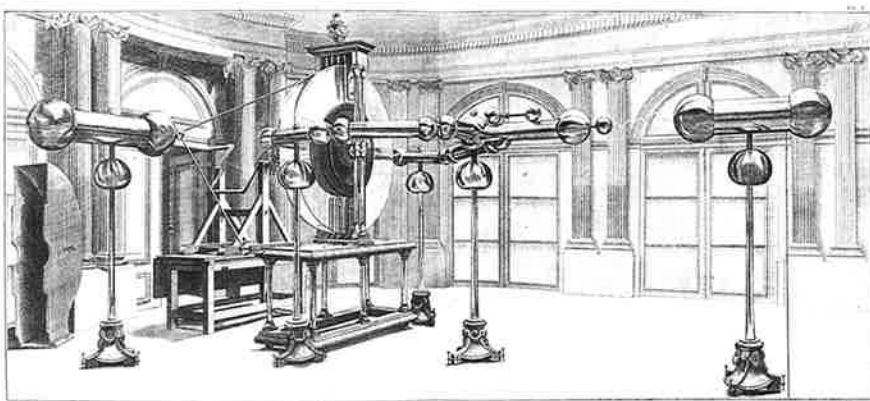
*Werking van de elektriseer-
machine.*

*De werking van de elektri-
seermachine wordt toegelicht
aan de hand van een houtgra-
vure uit een leerboek van A.
Ganot. De glazen plaat wordt
langs de wrijvingskussens F
gedraaid, die via ketting D
met aarde verbonden zijn. Bij
contact tussen glas en kus-
sens wordt het glas positief
en de kussens negatief gela-
den. De lading van de kussens
vloeit af naar aarde. De schijf
induceert op de collectorkam-
men een tegengestelde lading.
Door de spitse punten ont-
staat een sterk elektrisch
veld, waardoor corona-ontla-
ding optreedt. Er lekt zo nega-
tieve lading naar de schijf
terwijl de kammen en de ermee
verbonden geleiders C positief
geladen worden. In een der-
gelijke vorm werd de machine
rond 1755 uitgevonden door
de Zwitser Martin Planta.*

*Ontlading van de grote elek-
triseermachine.*

*De schets is afkomstig uit de
Verhandelingen van Teylers
Tweede Genootschap uit 1785
en toont de ontlading, die
volgens Van Marum de ideeën
van Franklin ondersteunde.
Van Marum schreef: "De
gewoone stralen hebben de
langte van 21 duimen en daar-
enboven en hebben de dikte
van de schacht van eene ge-
woone schrijffen. Uit de
meeste bochten ziet men aan-
merkelijke takken, die zich in
kleinere stralen verdeelen".*



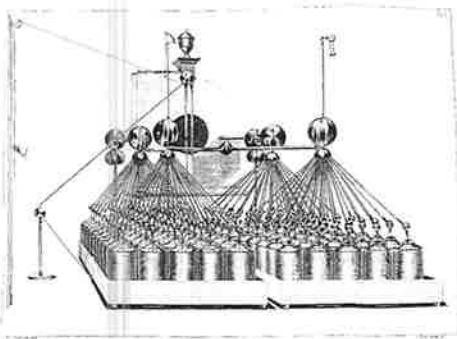


Schematische tekening van de opstelling van de grote elektriseermachine van Van Marum zoals die eind 1784 in de ovale zaal van Teylers Museum werd geïnstalleerd.

Amerikaan reageerde uiteraard zeer enthousiast evenals later zijn aanhangers, waaronder Volta. De tegenpartij nam echter nauwelijks nota van de ontdekking en kreeg in de 19de eeuw zelfs steeds meer aanhangers. Men verweerde zich met de opmerking dat Van Marum de polariteit van zijn machine had moeten omdraaien om ook vonken te trekken die op een negatieve bol beginnen. De dualisten verweerden zich door te stellen dat ze nooit ontkend hadden dat beide ontladingstypen wel eens verschillende optische effecten konden opwekken. In 1789 slaagde William Nicholson erin beide ontladingen, vrijwel net zo lang als die van Van Marum, gelijktijdig op te wekken. Ze verschilden inderdaad en de discussie bleef open. Pas tegen het eind van de 19de eeuw nam de belangstelling voor Franklins ideeën weer toe.

Van Marum vatte zijn machine op als een pomp voor de positief geladen elektrische vloeistof. Door de wrijving werd de vloeistof uit de aarde opgepompt en via de kussens aan de schijven toegevoegd. De kussens waren daartoe via een zware ketting met de aarde verbonden. De kammen zogen de vloeistof hier weer vanaf met als eindresultaat een positieve lading op de primaire geleider. Tegenwoordig zien we het iets anders. De kussens nemen bij wrijving negatieve lading op van het glasoppervlak dat daardoor een

*Batterij Leidse flessen.
De afbeelding toont één van
de vier eenheden van 25
Leidse flessen, die Van
Marum in 1789 installeerde
en die nu nog te bezichtigen is.*



positieve lading krijgt. Omdat de kussens geaard zijn, vloeit de negatieve lading af naar aarde. Na een kwart omwenteling passeert het opgeladen glas de gepunte uiteinden van de primaire geleider en induceert daarin een negatieve lading die aan de punten voor een hoge veldsterkte zorgt. Het gevolg is dat er negatieve lading van de punten weglekt naar de schijf die daardoor wordt geneutraliseerd. Het eindresultaat is ook in deze beschrijving een primaire geleider die met positieve lading blijft zitten. De lading van deze geleider wordt voortdurend verhoogd. Dit gaat natuurlijk niet eindeloos door. Naarmate de geleider meer lading bevat neemt ook het ladingsverlies door lek toe en wordt het aan de kammen geïnduceerde veld zwakker en daarmee de ladingsoverdracht naar de schijf geringer. De bereikbare spanning hangt onder meer af van de ladingssterkte die door wrijving op de schijf kan worden gerealiseerd. Deze spanning is maatgevend voor de lengte van de vonken die kunnen worden getrokken. De kracht van de ontlading wordt mede bepaald door de hoeveelheid lading die bij de ontlading betrokken is, dus door de capaciteit van de primaire geleider. Met de grote elektriseermachine waren ontladingen mogelijk die een afstand van 60 cm overbrugden, waaruit men heeft afgeleid dat het apparaat een spanning van ruim 300.000 volt kon opwekken. Om de capaciteit van de primaire geleider te verhogen sloot Van Marum er in 1785 een batterij van 135 Leidse flessen op aan. Ook dit was een absoluut wereldrecord. In 1787 verhoogde hij dit aantal tot 225 om in 1789 een geheel nieuwe batterij te bouwen bestaande uit 100 grote flessen. Daarvan zijn er nu nog 25 met de machine verbonden (afbeelding hiernaast). De totale capaciteit van de laatste batterij kan worden geschat op 0,56 mikrofaraad. Deze maakte ontladingen mogelijk met een energie van circa 30.000 joule, dat wil zeggen een transport van 0,1 coulomb bij een spanningsverschil van 300.000 volt.

Van Marum laat levende zowel als dode natuur kennismaken met de effecten van zijn machine. Hij onderzoekt de invloed op de hartfrequentie en op de prikkelbaarheid van de vaten van planten. Later stelt hij palin-

gen (bekend om hun grote taaiheid) bloot aan de krachtige batterij-ontladingen om na te gaan wat de doodsoorzaak is van mensen die door de bliksem worden getroffen. De ontlading blijkt de prikkelbaarheid van de spieren uit te schakelen wat vooral bij een passage van de hartspier dodelijk is. Ook de beveiliging tegen bliksem vormt een onderwerp van studie en heeft Van Marums speciale aandacht. Veel werk heeft een elektrochemisch karakter, zoals de effecten van ontladingen door gasmengsels en metaaldraden, die een ondersteuning vormen voor de nieuwe chemie van Lavoisier. Het werk aan de draden levert ook nuttige informatie in verband met de beveiliging tegen bliksem. Curieus is het project gericht op het vergelijken van elektrische stof en warmtestof, waaruit bleek dat beide minder met elkaar gemeen hadden dan men tot dan toe, mede op grond van het door beide opgewekte licht, vermoedde.



Van Marums laboratoriumjournaal loopt van 1783 tot 1790. In 1795 beweert hij dat de elektrische wetenschap in rustiger vaarwater lijkt te zijn gekomen en dat hij daarom zijn aandacht wil verleggen naar andere onderzoekgebieden, zoals geologie, mineralogie en botanie. In 1800 laat Volta de wereld kennismaken met de eerste batterij, de zuil van Volta. Het markeert het einde van het tijdperk van de wrijvingselektriseermachine. Speciaal op verzoek van Volta wordt de grote elektriseermachine nog eenmaal in bedrijf gesteld ten einde na te gaan of de galvanische vloeistof uit de zuil verschilt van de vloeistof die door de elektriseermachine wordt geproduceerd. Het levert Van Marum in 1802 een waardige afsluiting van dit deel van zijn loopbaan. Hij komt tot de belangrijke conclusie dat beide vloeistoffen identiek zijn, waarmee we het aandeel van deze ten onrechte in de vergetelheid geraakte landgenoot in dit verhaal afsluiten.

*Donderschip en donderhuis.
Bij een ontlading valt de mast
uiteen.*

*Het donderhuis stelt de
Utrechtse Poort in Amster-
dam voor. Als de geleider van
het torentje niet geaard is
vallen twee ramen, een deur
en het wachthuisje van hun
plaats. De voorwerpen stam-
men uit het eind van de 18de
eeuw.*

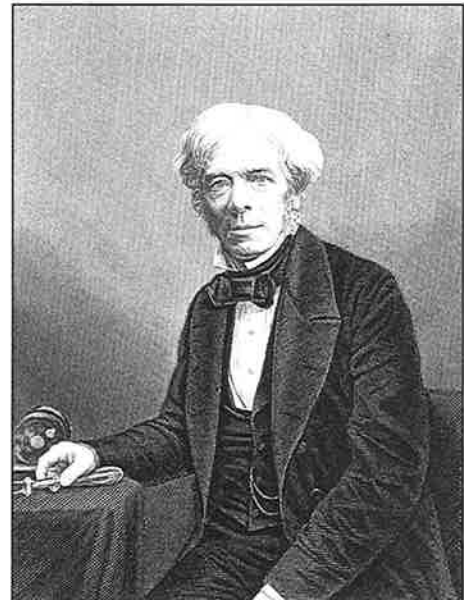
Zuil van Volta.

*In 1800 presenteert Volta zijn
beroemde zuil, de eerste
batterij. Het markeert het
einde van de eeuw van de
elektrostatica. De afgebeelde
zuil stamt uit het eerste kwart
van de 19de eeuw.*



*James Clerk Maxwell
(1831-1879)*

Maxwell slaagde er in 1864 in alle bekende verschijnselen over elektriciteit, magnetisme en licht in één theorie te vatten. In de klassieke theorie is aan zijn beschrijving nooit meer iets essentieels toegevoegd.



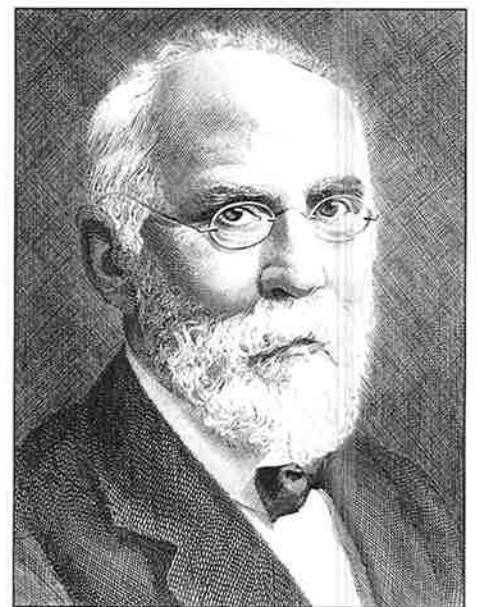
*Michael Faraday
(1791-1867)*

Tussen 1830 en 1839 legde Faraday de basis voor het werk, dat Maxwell in 1864 afsloot met zijn beroemde vergelijkingen. In leven en werken was Faraday het ideaal van de moderne wetenschapsbeoefenaar.

We staan nu voor de opgave om met enkele flinke stappen het heden te bereiken in de hoop dat er de nodige delen van de puzzel in elkaar zullen vallen en ook om te zien wat er geworden is van het onderzoekgebied waar zovelen in de eeuw van Van Marum mee geworsteld hebben. Daarbij zullen we ons enigszins beperken tot die onderwerpen die ook bij TNO op dit moment nog in de belangstelling staan. Wat de puzzel betreft kunnen we stellen dat het grootste deel van de stukjes inderdaad op zijn plaats lijkt te zijn gekomen. Zo werd al snel het grote nut van het begrip potentiaal duidelijk: geleiders die met elkaar in contact zijn nemen dezelfde potentiaal aan. De lading verdeelt zich daarbij zo over het buitenoppervlak dat de afstotende kracht die ieder ladingsgebiedje van alle andere ondervindt steeds loodrecht op het oppervlak is gericht. Dit leidt ondermeer tot grote ladingsdichtheden in puntige uitsteeksels. Dat de lading het oppervlak in het algemeen niet verlaat is het gevolg van een teruggrijvende kracht die voor een deel voor rekening komt van de zogenoemde beeldladingskracht die optreedt als geladen materie zich van een metaaloppervlak verwijderd. Het aanvankelijke idee, dat de atmosfeer de lading op zijn plaats houdt, bleek onjuist. Coulomb slaagde er in 1788 in de elektrische krachtwerking in een formule te vangen waardoor ineens allerlei waarnemingsresultaten toegankelijk werden voor een wiskundige analyse. In een serie briljante experimenten in de periode van 1830 tot 1839 kon Michael Faraday laten zien dat er maar één soort elektriciteit is hoe verschillend het gedrag onder bepaalde omstandigheden ook mag zijn. Hij maakte zich sterk voor het model van het elektrische veld als overdrachtmedium van de elektrische kracht. Het veld geeft in ieder punt van de ruimte de kracht die door een ladingsverdeling wordt uitgeoefend op een eenheidslading. Intussen was met de introductie van de zuil van Volta de aandacht van veel onderzoekers verschoven van de statische elektriciteit naar de werking van stromende elektriciteit. Ampère en Oersted legden de relatie bloot tussen elektriciteit in beweging en magnetisme. Tenslotte was het James Maxwell die er in slaagde al deze fenomenen in enkele fundamentele wiskundige relaties samen te vatten

(1864). Weer een hoofdstuk uit van het grote boek der natuur moeten veel van zijn tijdgenoten hebben gedacht en gedeeltelijk terecht. Toch bleven allerlei verschijnselen, waaronder het grillige gedrag van elektriseermachines en gasontladingen, moeilijk te vatten. De ontdekking van de atomaire structuur van de materie en van de elektriciteit, met als hoogtepunt de ontdekking van het elektron door J.J. Thomson in 1897 opende nieuwe wegen tot het begrijpen van allerlei complexe verschijnselen. Het was onze landgenoot Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928 en in de periode van 1909 tot 1928 curator van Teylers Natuurkundig Laboratorium en beheerder van het Fysisch Kabinet) die de link wist te leggen tussen de makroscopische wetten van Maxwell en de microscopische vormen waarin de elektriciteit kan voorkomen. Maar daarmee was de puzzel nog steeds niet compleet. De simpele puntladingen van Lorentz bleken soms veel meer een uitgesmeerde golfstructuur te bezitten. Deze fundamentele tweeslachtigheid werd de basis voor een geheel nieuw fysisch wereldbeeld, wiskundig beschreven door de formules van de zogenoemde quantummechanica. Daarmee is het nu eindelijk in principe mogelijk om onze oude problemen te begrijpen, waarmee al is gesuggereerd dat het in veel gevallen in de praktijk nog steeds niet zover is.

Heel in het kort komt het hier op neer. Alle materie is opgebouwd uit atomen, die bestaan uit een zware, positief geladen kern met daar omheen bewegend een wolk van negatief geladen uiterst lichte elektronen. De lading van kern en elektronenwolk houden elkaar normaal in evenwicht. Een atoom is van nature neutraal. In de natuur zijn 94 verschillende atomen aangekomen, die van elkaar verschillen door de lading van hun kern (en de corresponderende elektronenwolk). Atoom nummer 1, waterstof genaamd, bezit een kern met één elementaire positieve lading (proton). Atoomnummer 94, plutonium, heeft er 94. Het op een miniatuur-zonnestelsel lijkende atoom (de vergelijking gaat overigens ernstig mank) vertegenwoordigt een bepaalde hoeveelheid energie. Door aan de elektronen energie toe te voeren, bij voorbeeld door er licht op te laten vallen, kan een atoom extra energie opnemen.



*Hendrik Antoon Lorentz
(1853-1928)*

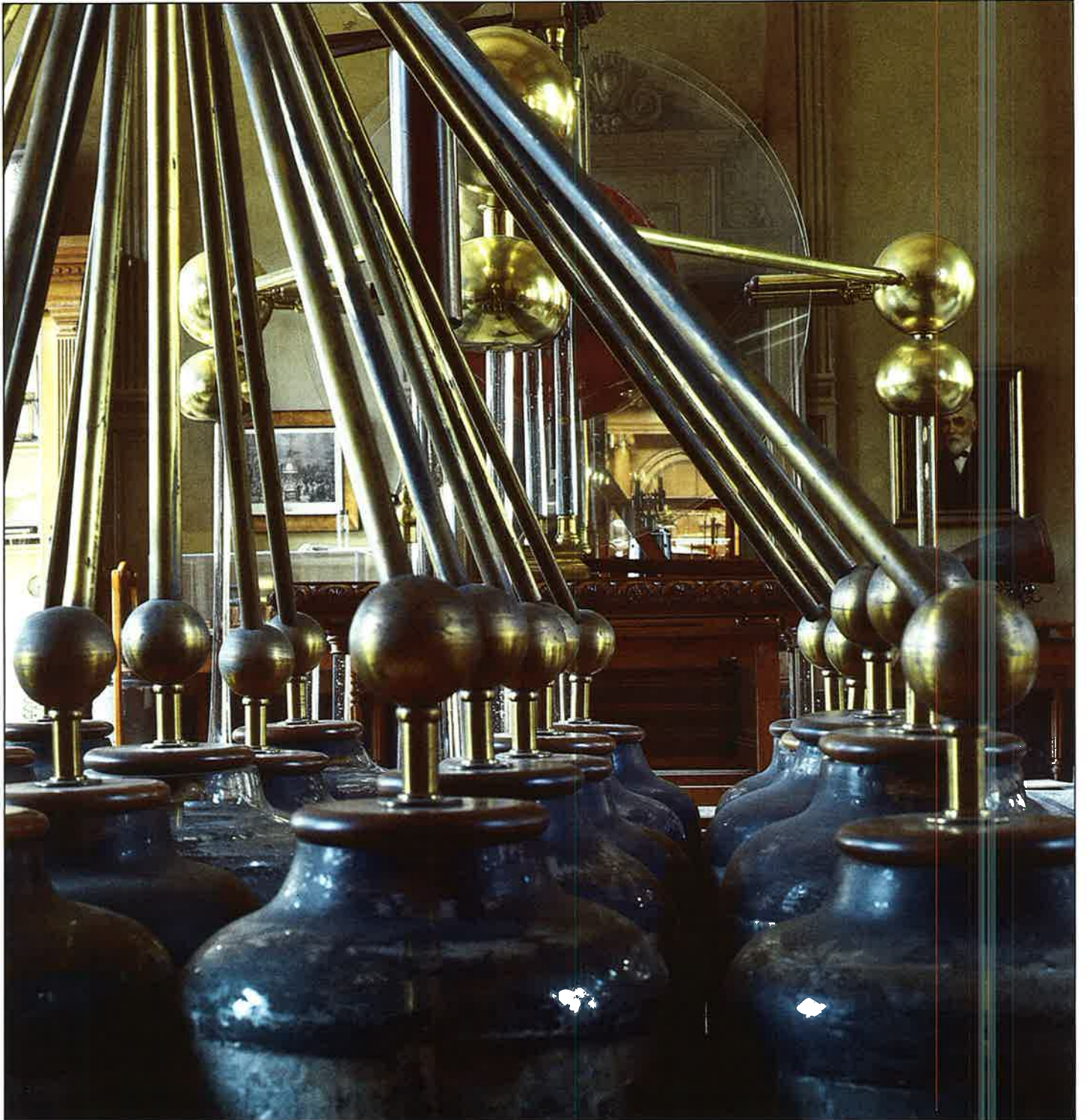
Met Huygens was Lorentz de grootste Nederlandse natuurkundige. Voor zijn vertaling van Maxwells theorie naar het atomaire niveau ontving hij in 1902 de Nobelprijs. Hij bereidde de weg voor de quantummechanica en de relativiteitstheorie. Lorentz was curator van Teylers Natuurkundig Laboratorium en beheerder van het Fysische Kabinet. Hij stond ook aan de wieg van TNO!

Alleen energie- hoeveelheden met een heel speciale waarde komen echter in aanmerking. De quantummechanica legt uit waarom. Boven een bepaalde waarde krijgt een elektron zoveel extra energie dat het aan de invloed van het positief geladen "achterblijfsel" kan ontsnappen. Er blijft dan wat men noemt een positief geladen ion achter. Soms bezit een combinatie van twee of meer atomen minder energie dan de losse atomen. De atomen kunnen dan een molecuul vormen. Het is het gevolg van het feit dat sommige atoomsoorten door het uitwisselen of gezamenlijk "gebruiken" van hun buitenste elektronen een wederzijdse binding kunnen vormen. Een simpel voorbeeld is het bekende keukenzout dat is opgebouwd uit de combinatie van de atoomsoorten natrium en chloor. De samenstelling van beide is van dien aard dat het buitenste elektron in een natriumatoom minder sterk wordt gebonden dan als extra elektron aan het chlooratoom. Brengt men deze atomen dicht bij elkaar in de buurt dan is er een levensgrote kans dat het elektron als het ware overwipt. Het resultaat is een natriumatoom dat een elektron tekort komt en een chlooratoom dat er één teveel heeft: een positief en een negatief ion, die elkaar stevig aantrekken.

Ongetwijfeld gaan er nu ook wat lichtjes branden bij de gedachte aan de werking van de wrijvingselektriseermachine. Helaas laten lang niet alle wisselwerkingen tussen atomen zich op een dergelijke simpele manier beschrijven. Het gaat echter wel steeds over het gedrag van ladingen en bijna altijd zijn het de buitenste, tamelijk los gebonden elektronen die een hoofdrol spelen. Net als atomen kunnen ook moleculen in ionvorm voorkomen. Van sommige moleculen is bekend dat ze in staat zijn een extra elektron te binden. Een bekend voorbeeld van een zogenoemd elektronegatief molecuul is het zuurstofmolecuul. Om deze zeer summiere schets te completeren nog een enkele opmerking over vaste stoffen. Deze kunnen zijn opgebouwd uit losse atomen, zoals de metalen, of uit moleculen, zoals de meeste vaste stoffen.

Eén van de vragen die lang op een antwoord heeft moeten wachten betreft het verschil tussen geleiders en isolatoren.

Ook in dit geval heeft de quantummechanica voor een overigens niet zo simpel te vertalen verklaring gezorgd. Van belang is dat in metalen grote hoeveelheden elektronen niet meer gebonden zijn aan één atoom maar min of meer vrij door het hele blok kunnen bewegen. Het metaal verlaten kunnen ze echter niet. Ze zitten als het ware in een grote bak. In niet geleiders houdt elk atoom of molecuul zijn eigen elektronen stevig bij zich. In een metaal kunnen de elektronen nog uit de kleinste elektrische velden energie opnemen, terwijl in isolatoren extreem grote spanningen nodig zijn om elektronen vrij te maken uit hun lokale gevangenschap. Als dat gebeurt spreekt men van elektrische doorslag.



In tegenstelling tot de elektrostatische verschijnselen als zodanig heeft het onderwerp van de vonkoverslag, of wat algemener de gasontlading, zich sinds de 16-de eeuw mogen verheugen in een blijvende en groeiende belangstelling. Belangrijke stimulansen waren onder meer het onderzoek aan de eigenschappen van atomen en moleculen en aan de eigenschappen van sterk geïoniseerde gassen meestal plasma's genoemd. De laatste spelen een hoofdrol in de moderne astronomie en worden intensief onderzocht door de wetenschappers die proberen in het laboratorium gecontroleerde kernfusie te realiseren. Belangrijke spin-off van al dit onderzoek zijn onder meer de neonverlichting, de laser en verschillende lastechnieken. Ook het fenomeen bliksem heeft de onderzoekers niet losgelaten.

LEKKENDE LADING EN KOSMISCHE STRALING

Verassend genoeg heeft ook het vervelende probleem van de weglekkende lading tot belangrijke ontdekkingen geleid. We weten nu dat de meeste lading verdwijnt langs de oppervlakken van de toegepaste isolatoren. Als de atmosfeer voldoende vochtig is vormt zich een uiterst dun en geleidend waterhuidje op deze oppervlakken. Reeds in 1785 echter had Coulomb op grond van nauwkeurige waarnemingen gemeld dat dit niet het hele verhaal kon zijn. Blijkbaar verdwijnt er een deel via het omringende gas. Geruime tijd werden stofdeeltjes verantwoordelijk gesteld. Het probleem werd werkelijk van alle kanten bekeken en men veranderde alle mogelijke parameters. Daarbij stuitte men op zaken die op dit moment weer hoogst aktueel zijn. Elster en Geitel meldden in 1901 dat de leksnelheid in bepaalde grotten en kelders met stilstaande lucht duidelijk hoger was dan in de open lucht. De conclusie was dat er blijkbaar iets uit de wanden vrijkomt dat de geleidbaarheid van de lucht vergroot. In hun boek "Conduction of Electricity through Gases" leggen vader en zoon Thomson, beide Nobelprijswinnaars, de link met het vrijkomen van radioactieve vervalprodukten. Alle materialen, de een meer dan de ander, bevatten spoorjes radioactieve verontreiniging, met name radium en thorium. Dergelijke stoffen zenden energie-

rijke straling uit die luchtdeeltjes kan ioniseren. Het verschijnsel staat de laatste jaren nogal in de belangstelling omdat door de toepassing van nieuwe bouwmaterialen, zoals industriegips, en door het uit besparingsoverwegingen reduceren van de ventilatie, in bepaalde woningen duidelijk verhoogde concentraties van vervalprodukten als radon en polonium zijn aangetroffen. De Radiologische Dienst TNO is nauw betrokken bij een groot inventariserend onderzoek op dit gebied.

Maar we zijn er nog niet. Minstens één belangrijke ontdekking verdient nog onze aandacht. Zoals gezegd werd het "lekprobleem" onder de meest bizarre omstandigheden bestudeerd. Zo werden allerlei verschillen gekonstateerd die samenhangen met de plaats op aarde waar de proeven werden gedaan. En men ging ook omhoog met zijn instrumenten. Eerst op de Eiffeltoren, wat later ook in de ballon. In 1923 komt Kolhörster met de suggestie dat een deel van de geleidbaarheid van de atmosfeer veroorzaakt zou kunnen worden door straling van buitenaardse bronnen. Hij denkt zelf aan de Melkweg, niet eens zo'n slecht idee zoals we nu weten. Eén van de eerste aanwijzingen voor het bestaan van de kosmische straling. Zo zien we hoe een ogenschijnlijk ordinair en hooguit storend experimenteel probleem de wetenschap uiteindelijk op het spoor heeft gezet van een verschijnsel dat van zeer grote betekenis is geworden voor de moderne natuurkunde en de moderne astronomie.

DE ELEKTRISCHE VONK

Van alle vormen van elektrische geleiding in gassen is de elektrische vonk waarschijnlijk de meest ingewikkelde. We weten nu dat in de atmosfeer (of in een gas) steeds enkele elektronen en ionen voorkomen. Ze ontstaan door de ioniserende werking van kosmische straling en natuurlijke radioactiviteit. De aanwezigheid van een ladingsconcentratie, dus van een elektrisch veld, kan deze luchtladingen een versnelling geven. Als de veldsterkte hoog genoeg is kunnen de elektronen tussen twee botsingen met luchtmoleculen zoveel energie opnemen dat ze uit een getroffen deeltje

een elektron kunnen wegslaan. Het resultaat is een snelle toename van het aantal ladingsdragers dat aan het proces deelneemt. Fotonen spelen in het hele proces waarschijnlijk een belangrijke rol. Ze zorgen ervoor dat er overal tussen de elektrodes ionen ontstaan terwijl ze ook uit de elektroden extra elektronen vrijmaken. Binnen éénhonderdmiljoenste seconde is het hele ontladingspad geleidend. De elektronen en ionen bewegen in tegengestelde richting. In eerste instantie doen de elektronen het werk, maar voorbij een bepaalde veldsterkte kunnen de ionen met zoveel energie op de negatieve elektrode terechtkomen dat ze daaruit elektronen bevrijden, hetgeen tot een zeer sterke toename van de ontladingsstroom leidt. Onder die omstandigheden wordt de ontlading ook wel een elektrische boog genoemd.

In de context van dit verhaal interessanter is de zogenoemde corona-ontlading die optreedt bij scherp gepunte elektrodes in de buurt waarvan zeer grote veldsterktes kunnen voorkomen. Als de punt positief geladen is zullen de elektronen uit de lucht er naartoe getrokken worden. Krijgen ze voldoende energie dan kunnen ionisatieprocessen optreden die gepaard gaan met lichtverschijnselen. Ook bij een negatief geladen punt is corona mogelijk zij het via een iets ander mechanisme.



HET RAADSEL VAN DE BLIKSEM

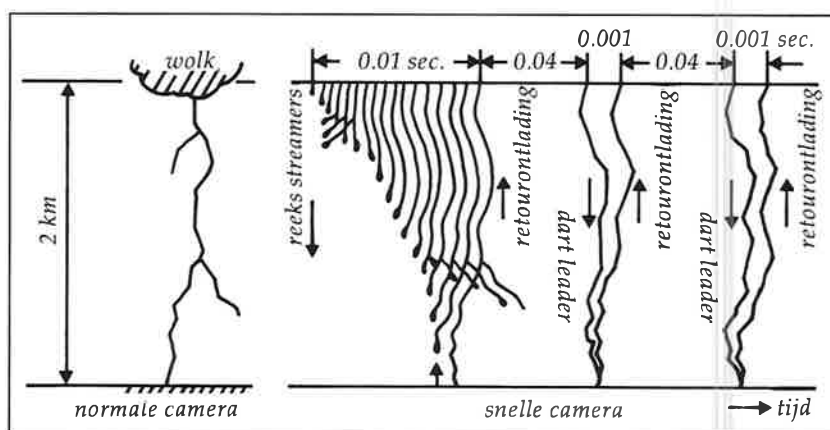
De lezer zal hebben opgemerkt dat de bliksem een niet onbelangrijke rol speelt in dit verhaal. Daarom een enkele opmerking over de situatie nu, waarbij we aantekenen dat het onderwerp bij TNO aandacht krijgt voor zover het gaat om de beveiligingsaspecten. Hoewel Franklin kon aantonen, dat onweer en elektriciteit alles met elkaar te maken hebben, bleef het mechanisme achter het verschijnsel in nevelen gehuld. En ook nu nog is lang niet alles even duidelijk. Het grootste probleem levert het ontstaan van de grote ladingsverschillen in onweerswolken. Sinds Lenard in 1892 ontdekte dat vallende waterdruppels kunnen breken en dan positieve druppeltjes opleveren is er een groot aantal processen voorgesteld ter verklaring van de ladings scheiding. De meeste hangen samen met het verschil in valsnelheid tussen zware en lichte deeltjes in een wolk, die bij contact lading kunnen overdragen. Ook het onder invloed van mechanische spanningen uiteenspatten van bevriezende waterdruppels levert geladen deeltjes op. Het resultaat is een enorme wolk die aan zijn basis negatief is en aan zijn top positief. Volgens de nieuwste ideeën zouden ook de sterke convectiestromen in de wolk een rol spelen evenals de aanvoer van lading van buiten de wolk (omringende atmosfeer en aarde). Men neemt nu aan dat onder geëigende omstandigheden al deze mechanismen wel eens een rol zouden kunnen spelen hetgeen de overzichtelijkheid niet ten goede komt.

Meer is er intussen bekend over het ontladingsproces. Snelle camera's hebben ons een blik gegund op een natuurverschijnsel dat veel complexer is dan Franklin ook maar heeft kunnen vermoeden. Het begint met een zogenoemde "streamer", die de wolk verlaat op weg naar de aarde maar al snel stopt. Direct daarna volgt een tweede ontlading die wat verder reikt. Dit spel herhaalt zich tot de uitgegroeide streamer, die dan "leader" wordt genoemd, bijna het aardoppervlak heeft bereikt (hoogte 5 tot 50 meter). Dan verlaat namelijk een streamer de aarde en maakt contact met de leader, waarna een ontlading volgt van de aarde naar

de wolk, die krachtiger is dan de leader. Binnen 0,04 seconde volgt dan een tweede ontlading van de wolk omlaag, de "dart leader", die op zijn beurt binnen 0,001 seconde een retourontlading oproept. De leaders vervoeren negatieve lading, de retourstromen bevatten positieve lading, per ontlading zo'n 10 à 20 coulomb, bij stroomsterktes van vele tienduizenden ampères. Langs hetzelfde kanaal kan zo wel 25 maal lading heen en weer flitsen. Vooral 's winters komt een ander type onweerswolk voor die aan de onderkant positief geladen is. Dergelijke wolken ontladen zich in één keer. Het resultaat is een veel krachtiger ontlading dan in zomerse buien voorkomt.

De energie-inhoud van zo'n ontlading is vaak meer dan één miljard joule, voldoende om ernstige ongelukken te veroorzaken. Was men vroeger vooral bezorgd om mens en gebouw, in deze tijd vraagt ook de steeds gevoeliger elektronische apparatuur om beschermende maatregelen. De beste is de zogeheten kooi van Faraday. Bij de beveiliging van gebouwen spelen Franklins afleiders nog steeds een centrale rol hoewel men er iets anders van verwacht. Ze moeten een ontlading met zo min mogelijk weerstand afvoeren naar aarde. In welke zin en mate het onweer ook beïnvloed wordt door een uitsteeksel dat corona vertoont, hangt sterk af van allerlei ook meteorologische omstandigheden.

Ultrasnelle opnames van een bliksemontlading. De afbeelding is een schets van de zeer snel opeenvolgende gebeurtenissen die zich afspelen tijdens een bliksemontlading en die allen waargenomen kunnen worden met zeer snelle fotografische apparatuur. Een ontlading blijkt dan in feite uit een hele reeks ontladingen te bestaan.



Met het onderwerp statische elektriciteit is het iets anders gegaan dan met de gasontladingen. Eind vorige eeuw leek het onderwerp alleen nog interessant als eenvoudige leerstof. In deze eeuw is dit beeld radicaal veranderd. De statische elektriciteit staat weer volop in de belangstelling en blijkt veel minder simpel te begrijpen dan men honderd jaar geleden dacht. De reden van die nieuwe aandacht is naast de ontwikkeling van een aantal interessante toepassingen de sterk toegenomen overlast die de statische elektriciteit vooral in de industrie veroorzaakt. Dit is een direkt gevolg van de enorme groei in het omgaan met niet-geleiders, met name kunststoffen, zowel in de sfeer van de productie als van de consumptie. Zo blijken er nogal wat mensen gevoelig te zijn voor statische oplading terwijl de steeds gevoeliger elektronische schakelingen beveiligd moeten worden tegen storende ontladingsladingsverschijnselen. In een brand-of explosiegevaarlijke omgeving kunnen vonken desastreuze gevolgen hebben.

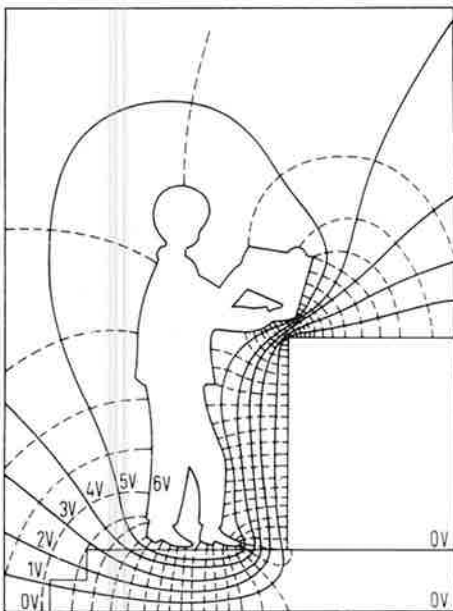
Ons hele verhaal heeft in het teken gestaan van de effecten die optreden als twee voorwerpen langs elkaar schuren. We weten nu dat in principe alle combinaties van materialen ladingsscheiding opleveren zij het in verschillende mate. Zelfs voorwerpen die uit hetzelfde materiaal bestaan vertonen dit effect. De ladingsoverdracht treedt op als twee materialen in direkt contact komen met elkaar. Het wrijven is in wezen secundair, maar niet onbelangrijk omdat het aantal contactplaatsen er in het algemeen sterk door wordt vergroot. Daarbij moet men bedenken dat zelfs gepolijste oppervlakken elkaar slechts op bepaalde gebiedjes echt aanraken. Het fysische en/of chemische verschil van de betreffende oppervlakken bepaalt de kans dat een elektron de grenslaag passeert en aan de overzijde een onderkomen zoekt. Bij metalen is het proces het best begrepen. Het metaal met de kleinste uittreedarbeid staat elektronen af totdat de Fermi-niveau's in beide metalen hetzelfde potentiaalniveau bezitten (met excuses voor het waarschijnlijk onbegrijpelijke vakjargon). Bij isolatoren gebeurt in wezen hetzelfde maar in tegenstelling tot de situatie bij metalen kan de lading het kontaktgebiedje niet verlaten en is dus sterk gelo-

kaliseerd. Ook in dit geval echter proberen de elektronen van de gelegenheid gebruik te maken om een energetisch gunstiger gebiedje te bereiken. Het hele fenomeen is experimenteel zeer lastig te benaderen omdat de toestand van de betrokken oppervlakken op atomaire schaal een rol speelt. Goed gedefinieerde en schone oppervlakken zijn uiterst moeilijk te realiseren.

Toch is dat nodig omdat het om nogal subtiële processen gaat. Immers, aan het oppervlak komen per cm^2 zo'n 10^{15} atomen voor. De maximale oppervlakteladingsdichtheid wordt meestal gerelateerd aan de elektrische veldsterkte waarbij doorslag door de lucht optreedt. Daarvoor hanteert men gewoonlijk een waarde van 3×10^6 volt per meter. Deze veldsterkte wordt bereikt bij een ladingsdichtheid van $26,6 \times 10^{-6}$ coulomb per m^2 . Als we nog weten dat de lading van een elektron $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb bedraagt dan wordt de doorslagspanning reeds bereikt als één op de 60.000 atomen een elektron afstaat (of opneemt). Met gevoelige instrumenten is het zelfs mogelijk om het ontbreken van één op de tien miljard elektronen aan te tonen. Het is duidelijk dat ook zeer kleine afwijkingen van de ideale situatie hier voor grote effecten kunnen zorgen. Bij vele industriële processen doen zich situaties voor die gunstig zijn voor elektrostatische oplading, zoals het op- en afrollen van papier, textiel en kunststof, bij het walsen, bij het verpulveren, bij het transport door buizen, bij het werken met poeder, bij het schuiven over een geïsoleerde ondergrond, bij het dragen van isolerende kleding, bij het versproeien van vloeistoffen, bij het stromen van gassen door vloeistoffen, bij het stromen van gassen waarin zich kleine deeltjes bevinden etc., etc.

De problemen treden vaak op in combinatie met inductieverschijnselen. Ergens bevindt zich een sterk opgeladen object dat op geïsoleerde geleiders in de omgeving ladingen induceert. Wordt zo'n geleider vervolgens op een ongelukkige wijze in twee delen gesplitst of even geaard dan blijven er ladingen op achter die vervolgens tot gevaarlijke vonken kunnen leiden. Wat voor objecten geldt, geldt uiteraard ook voor mensen.

De potentiaalverdeling rond een opgeladen mens. In de afbeelding is duidelijk te zien hoe vonken kunnen optreden bij scherpe uiteinden omdat daar de veldsterkte het grootst is.



DE MENS ALS WANDELENDE ELEKTRISEERMACHINE

Een korte wandeling over een modern tapijt kan spanningen oproepen. Het contact tussen schoenzool en ondergrond leidt tot de eerdergenoemde ladingsscheiding. Als de voet zich verheft kan een deel van de overgedragen lading niet snel genoeg terug omdat ze op isolatoren nu eenmaal veel minder mobiel is dan op metalen. De voet neemt dus wat lading mee omhoog. Als de voet zich van de aarde verwijderd, neemt het potentiaalverschil van de voet ten opzichte van de aarde toe. Het lichaam is evenwel een redelijk goede geleider die streeft naar een spanningsevenwicht. Het resultaat is dat de lading van de voet zich over het lichaam verspreid, zodat de potentiaal overal gelijk wordt. Gaat de voet weer omlaag dan zal het omgekeerde proces plaatsvinden. Het lichaam stuurt lading terug naar de voet, maar wel minder. Als de voet weer op het tapijt staat, is een deel van de eerste hoeveelheid "opgedane" lading op de rest van het lichaam achtergebleven. De voet kan nu opnieuw een bepaalde hoeveelheid, zij het een kleinere, lading aan het tapijt onttrekken en aan de rest van het lichaam doorgeven omdat er reeds lading aanwezig is. Er is dus sprake van een pompmechanisme, dat het lichaam theoretisch oplaadt totdat de potentiaal van opgeheven voet en lichaam niet meer verschillen. Er treedt echter nog een tweede mechanisme op, dat de ladingsopbouw beperkt. Immers als de ene voet opgeheven wordt, maakt de andere contact met de ondergrond. Via dat contact vloeit lading weg en wel des te meer naarmate de lichaampotentiaal toeneemt. Als deze "lekweerstand" kleiner is dan 10^9 Ohm is er in feite niet voldoende tijd om een spanning op te bouwen en vloeit de lading direct weer weg. Onder "gunstige" omstandigheden kunnen al lopend potentiaalverschillen van vele duizenden Volts ontstaan. In feite hebben we hier te maken met een elektriseermachine in mensengedaante!

In nevenstaande afbeelding staat een veldpatroon geschetst van een opgeladen persoon in de buurt van een gearde bak. Het is duidelijk waar zich de eventuele vonkoverslag het eerst zal manifesteren.

STOFEXPLOSIES

Het spreekt voor zich dat deze processen vooral in een omgeving waarin brandbare of explosieve stoffen en dampen voorkomen voor gevaarlijke omstandigheden kunnen zorgen. Bekende voorbeelden zijn gas-, stof- en kruitexplosies waar TNO zich uitgebreid mee bezighoudt. Het voorkomen van dit type problemen is een vak apart. Eén van de simpelste maatregelen is het zorgen voor een voldoende vochtige omgevingslucht. Generaties onderzoekers worstelden ermee, hier brengt het uitkomst.

Dat het fenomeen stofexplosie niet onderschat mag worden, is duidelijk als men weet dat er bijvoorbeeld in Duitsland gemiddeld eenmaal per dag een stofexplosie plaatsvindt. Tussen 1970 en 1980 werd er in Nederland gemiddeld één per maand geregistreerd, maar het werkelijke aantal ligt waarschijnlijk veel hoger. In het begin van de jaren zeventig is door TNO een omvangrijk onderzoekprogramma gestart naar dit verschijnsel. Directe aanleiding was een zware explosie in een veevoederbedrijf in 1972 (vijf gewonden en 4 miljoen gulden schade).

Het project loopt nog steeds en wordt uitgevoerd door het Prins Maurits Laboratorium TNO en het Instituut voor Graan, Meel en Brood TNO. Het Bureau Industriële veiligheid coördineert dit type werk. Eén van de vele uitkomsten van dit project was de bevinding dat de ontstekingsgevoeligheid voor elektrische vonken van een stof- luchtmengsel sterk afhangt van de deeltjesgrootte en nog sterker van het vochtgehalte. In sommige gevallen zakte de minimale ontstekingsenergie ruim een factor 100 als het vochtgehalte van de stof werd teruggebracht van 12 à 14% tot 1%.

Ook de anti-statische vloeistoffen die onder meer op grammofoonplaten worden aangebracht hebben als functie de lading een makkelijke weg naar de aarde te bieden. TNO houdt zich bezig met het inrichten van ruimtes waarin storingsgevoelige apparatuur moet worden ondergebracht. Naast luchtbevochtiging worden er nog verschillende andere technieken toegepast, zoals het direct neutraliseren met een tegenlading. Daarbij bewijst een oude bekende, de coronakam, nog steeds goede diensten.



Gevolgen van een stofexplosie.

Tenslotte enkele nuttige toepassingen van statische elektriciteit. In moderne vorm worden elektriseermachines gebruikt om hoge spanningen op te wekken voor onderzoeksdoeleinden maar ook voor toepassing in röntgenapparatuur en elektronenmikroscoopen. Een voorbeeld is de door TNO ontwikkelde en gebruikte één miljoen volt elektronenmikroscoop waarin een zogenoemde Vandegraaff-generator is toegepast. Elektrostatische velden worden veel toegepast om materialen van elkaar te scheiden. Zo worden in een precipitator fijne deeltjes uit gassen verwijderd door ze met corona op te laden en vervolgens af te buigen. In separatoren scheidt men op soortgelijke wijze verschillende vaste-stof-deeltjes van elkaar, met name mengsels van mineralen.

Ook bij veel coatingsprocessen speelt statische elektriciteit een belangrijke rol. Men verstuift het coatmateriaal boven het te coaten object en geeft vervolgens druppeltjes en object een verschillende lading. In zogenaamde elektrografische systemen wordt de drager, een fotoconductor, opgeladen en belicht. Waar licht is gekomen is de lading verdwenen. Vervolgens wordt een tegengesteld geladen toner aangebracht die zich hecht op de onbelichte delen en die tenslotte bij voorbeeld door verhitting wordt gefixeerd. Ook de ink-jet-printer maakt gebruik van elektrostatische afbuiging van de inktdruppeltjes.

ELEKTRETEN: OUDE WIJN IN NIEUWE ZAKKEN

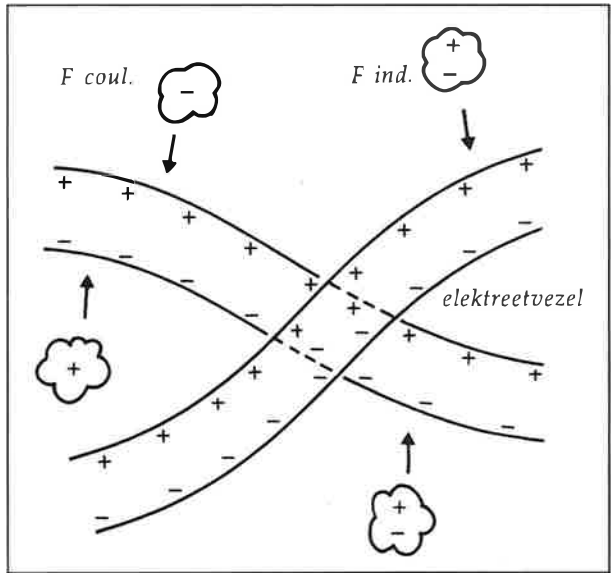
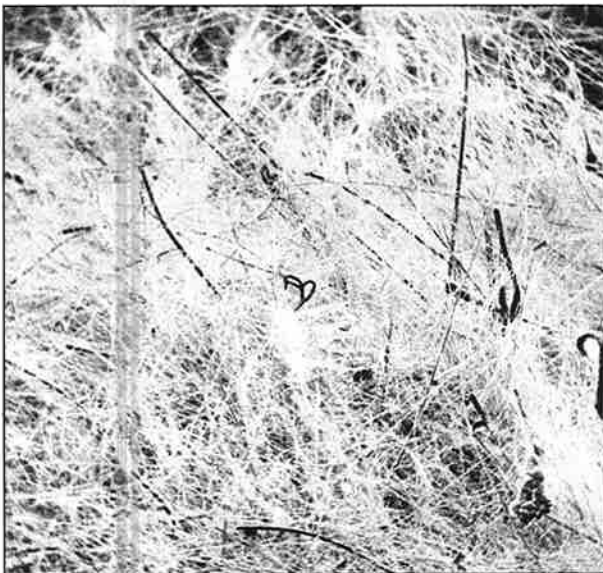
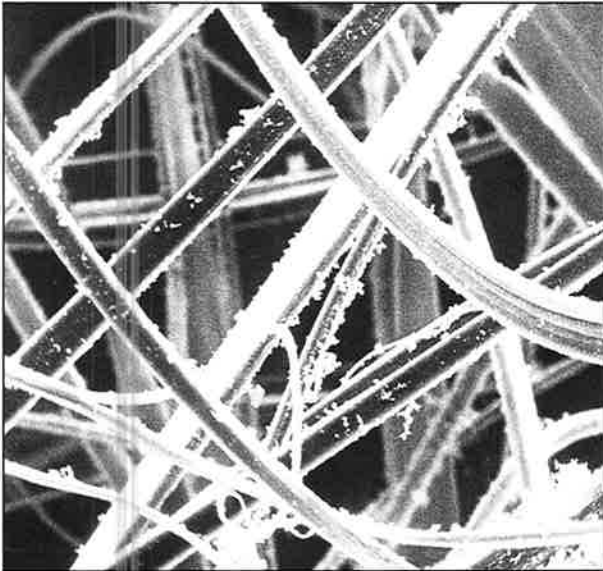
Een elektreet is een niet-geleider met een kwasi-permanente lading, die in de omgeving een elektrisch veld opwekt. De naam is gebaseerd op de analogie die bestaat met magneten. Om elektreten te maken is een kunstgreep nodig. De bekendste is verwarmen en afkoelen onder invloed van een extern aangelegd elektrisch veld. Sommige stoffen zijn opgebouwd uit moleculen met een asymmetrische ladingsverdeling. Het zijn elektrische dipooltjes, die gewoonlijk kriskras door elkaar liggen. Onder invloed van een voldoende sterk veld kunnen deze dipolen echter gericht worden als ze genoeg bewegingsvrijheid bezitten. Dat kan bereikt worden door het materiaal te laten smelten. Het

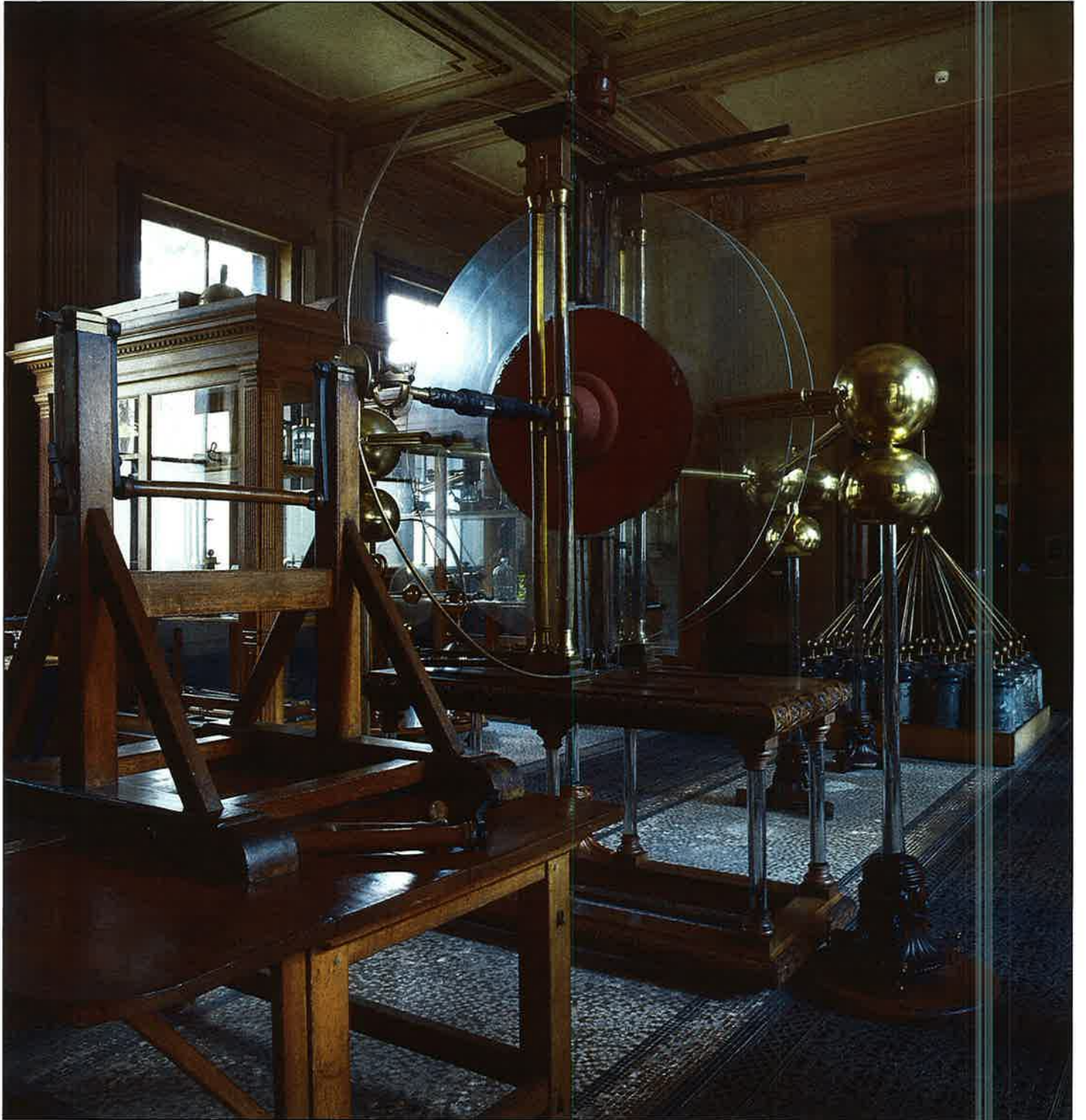
eindresultaat is dan een stuk materiaal met aan de oppervlakken die naar de polen van de externe spanningsbron wijzen de uiteinden van de dipooltjes met een lading die tegengesteld is aan die van de aanliggende pool (condensatorplaat). Door snel af te koelen kan dit geordende patroon worden "bevroren" met als resultaat een elektreet. Op deze wijze werd in 1919 de eerste elektreet vervaardigd door de Japanner Eguchi. Opmerkelijk genoeg had de reeds genoemde Stephen Gray twee eeuwen eerder vrijwel hetzelfde gedaan. Hij berichtte in 1732 dat hij stoffen als schellak, bijenwas, zwavel e.d. na een speciale behandeling maandenlang hun elektrische eigenschappen kon laten behouden. Franklin konstateerde soortgelijke eigenschappen bij glas (1748). Ook Volta met zijn "electrophorous perpetuum" moet in dit verband genoemd worden. Van bijzondere betekenis zijn de experimenten van Faraday (1837). Schellak bleek een polariteit te bezitten die tegengesteld was aan die van de omringende condensatorplaten. Die polariteit verdween echter snel om langzaam plaats te maken voor een tegengestelde polariteit. Een mogelijke verklaring is dat in eerste instantie de dipooltjes netjes gericht liggen. Aan het oppervlak verzamelt de schellak vervolgens lading die de dipooluiteinden neutraliseert. Vervolgens verliezen de dipooltjes langzaam hun ordening weer waardoor tenslotte alleen de weinig mobiele, ingevangen, oppervlakteladingen voor een merkbaar effect zorgen. Het is overigens nog steeds niet geheel duidelijk waar die neutraliserende lading vandaan komt. Een gedeeltelijke verklaring geeft het optreden van kleine coronaontladingen in de luchtspleet tussen plaat en diëlektricum. Alternatieve mechanismen laten we verder onbesproken.

Het aantal toepassingen van elektreten neemt de laatste jaren snel toe. Er wordt veel onderzoek naar gedaan, onder meer bij het Kunststoffen en Rubber Instituut TNO. Men onderzoekt er onder meer hoe de "permanente" lading het best kan worden aangebracht, hoe stabiel ze is (invloed van omgevingsvocht!) en welke kunststoffen het meest geschikt zijn. Elektreten worden tegenwoordig voor allerlei toepas-

singen gebruikt zoals beveiligingssystemen, kopieermachines, luchtfilters, microfoons en sensoren. We kiezen als voorbeeld het door TNO ontwikkelde elektreetfilter. TNO-onderzoekers zijn er in geslaagd een zeer efficiënt stoffilter te realiseren op basis van elektreetvezels. Deze worden gemaakt uit kunststoffolie dat, na strekken in één richting, met behulp van corona aan beide kanten van een tegengestelde lading wordt voorzien (een alternatieve techniek om elektreten te maken). De folie wordt vervolgens verwerkt tot vezels met een rechthoekige doorsnede die over hun hele lengte een dipoolkarakter bezitten. Ze worden in een zeer open weefsel samengebracht. Door hun permanente, relatief sterke en inhomogene veld leveren ze een zeer efficiënt stoffilter dat zich onderscheidt van conventionele filters door zijn zeer open structuur. Dit biedt grote voordelen omdat dergelijke filters weinig weerstand bieden aan een gasstroom. Deze materialen worden nu in Nederland op grote schaal gebruikt in mondmaskers, stofzuigers en luchtcirculatiesystemen.

Door TNO is een nieuw type filter ontwikkeld op basis van vezels met een elektreetstructuur. De vezels zijn over hun hele lengte elektrisch gepolariseerd. De afbeeldingen links en rechts boven zijn opnamen van een schoon respectievelijk een met stof bedekt elektreetfilter. Links onder eenzelfde opname maar nu van een schoon glasvezelfilter. Het grote verschil is de relatieve openheid van het elektreetfilter, terwijl het toch dezelfde vangstwerking heeft. De tekening geeft schematisch de werking van het elektreetfilter.





Rond de figuur van Martinus van Marum hebben we geprobeerd een indruk te geven van de ontwikkeling van een klein stukje van de natuurkunde. Een moeilijk stuk vanwege de ongrijpbaarheid van de basisprocessen en de praktische problemen bij het realiseren van reproduceerbare resultaten. Met de inspanning van velen en het genie van enkelen is men er uiteindelijk in geslaagd de zo weerbarstige materie, in ieder geval op dit punt, onder controle te krijgen. In Teylers Museum bevinden zich de wapens waarmee de moeizame overwinning is bevochten. TNO, ja wij allemaal, plukken er dagelijks de vruchten van.

LITERATUUR

ALGEMEENE GESCHIEDENIS

Dr.H. Brugmans, Dr.G.W. Kernkamp
A.W. Sijthoffs Uitgeversmaatschappij, Leiden

GESCHIEDENIS VAN DE FILOSOFIE

H.J. Störig
Prisma, 1959

DE PELGRIMSTOCHT DER MENSHEID

J.W. Berkelbach van der Sprenkel, C.D.J. Brandt
De Haan N.V., Utrecht, 1948

KURZE GESCHICHTE DER TECHNIK

Friedrich Klemm
Herder Bücherei, band 106

TEYLER 1778 - 1978

Studies en bijdragen over Teylers Stichting naar aanleiding van het tweede eeuwfeest.

MARTINUS VAN MARUM, LIFE AND WORK

Uitgave in zes delen van de Hollandsche Maatschappij der Wetenschappen
Ed. R.J.Forbes
Publikatie van Noordhoff Int. Publ., Leiden.

EARLY ELECTRICAL MACHINES

B. Dibner
Burndy Library, 1957

ELECTRICITY FROM GLASS

The history of the frictional electrical machine: 1600 - 1850
W.D. Hackmann
Sijthoff & Noordhoff, 1978

ELECTRICITY IN THE 17TH AND 18TH CENTURIES

J.L. Heilbron
University of California Press, 1979

DIE STAERKE DER ELECTRISCHEN KRAFT DES WASSERS IN GEFASSERN WELCHE DURCH DEN MUSSCHENBROEKSCHEN VERSUCH BEKANNT GEWORDEN IST

J.H. Winkler
B.Chr. Breitkopf, Leipzig, 1746

ESSAI SUR LA NATURE, LES EFFETS ET LES CAUSES DE L'ELECTRICITÉ

J.H. Winkler
S. Jorry, Parijs, 1748

ALGEMEENE EIGENSCHAPPEN VAN DE ELECTRICITEIT ONDERRICHTING VAN WERKTUIGEN EN HET NEEMEN VAN PROEVEN

J. Cuthbertson
Pieter Hayman, Amsterdam, 1782

LEERBOEK DER NATUURKUNDE, DEEL 3

A. Ganot, bewerkt door G. Maneuvrier
Cohen & Zonen, Amsterdam

FROM FALLING BODIES TO RADIO WAVES

E. Segré
W.H. Freeman and Company, 1984

CONDUCTION OF ELECTRICITY THROUGH GASES

J.J. Thomson, G.P. Thomson
Dover Publications, Inc., 1969

THUNDERSTORMS

Choji Magno
Elsevier Scientific Publishing Company, 1980

BLIKSEMDETECTIE

J. Joseph, H.Otten
Natuur en Techniek, april 1985

ELECTROSTATICS AND ITS APPLICATIONS

Ed. A.D. Moore
John Wiley & Sons, 1973

STATIC ELIMINATION

T. Horvath, I. Bertha
Research Studies Press, 1982

STATISCHE ELEKTRIZITÄT ALS GEFAHR

H. Haase
Verlag Chemie GmbH, 1968

ELEKTROSTATISCHE ONTLADINGEN : EEN STOREND FENOMEEN

P.P.M. Vercauteren, O.C. Kain
I-2, Elektrotechniek, Elektronica, febr. en maart 1985

ELECTRETS

Ed. G.M. Sessler
Springer - Verlag, 1980