

2. VOORBEELD VAN DE BEHANDELING VAN ELEKTRICITEIT IN DE PEDAGOGISCHE PRAKTIJK

In dit hoofdstuk willen we laten zien langs welk pad een fenomenologische behandeling van elektriciteit kan verlopen in de lespraktijk van een 11e klas. De inhoudelijke invalshoek die hier wordt gevolgd richt zich op de vraag naar de oorsprong van de elektriciteit. Het zoeken naar een antwoord op deze vraag zal ons ertoe brengen de aard van de tegenstelling tussen de elektrische polen in verband te brengen met de tegengestelde eigenschappen van stoffen, die aanleiding zijn voor het ontstaan van elektriciteit. We zullen hiertoe achtereenvolgens de verschijnselen van het ontstaan van statische elektriciteit door wrijving en het vergaan van het elektrisch veld in vonk, rhuimkorff en gasbuizen beschouwen.

Pedagogisch gezien betekent dit dat men aansluit bij de sociale verhoudingen die in een 11e klas gewoonlijk heersen. De 11e klasser (16-17 jaar) voelt zich namelijk heen en weer geslingerd tussen de rol die hij in de groep inneemt en zijn streven een persoonlijkheid te worden, die zich in zienswijze en gedrag onderscheidt van klasgenoten. De angst uit de gemeenschap gestoten te worden noopt hem ertoe zich aan te passen aan de groepscode en pinst hem vast op de rol die hij in het verleden binnen de groep innam. De individuele impuls die zich op deze leeftijd doet gelden maakt, dat hij juist afstand wil nemen van deze oude rol, als betrof het een oude huid die verwisseld moet worden om ruimte te geven aan innerlijke groei. Kortom, de 11e klasser voelt zich in een spanningsveld staan tussen meebewegen met de groep en vasthouden aan de eigen identiteit. We zullen zien dat dit een parallel vormt met de geaardheid van het elektrische spanningsveld.

Didactisch wordt vooral gewerkt met de socratische methode, het spel van vraag en antwoord. De docent staan twee uiterste wegen open. Hij kan geheel docerend de eigen ideeën brengen, of hij kan zich geheel richten op de leerlingen en aansluiten bij hun mogelijkheden tot inzicht. Hier wordt een combinatie van beide gezocht. De vragen worden zo gesteld dat een van tevoren in grote lijnen uitgestippelde route kan worden gevolgd, een hoofdroute met verschillende mogelijke aftakkingen. De in de lespraktijk gevolgde route zal nog in vele opzichten kunnen verschillen, afhankelijk van de klas en de mogelijkheden van de docent. Dit vereist van de leraar een combinatie van vasthoudendheid en souplesse. Tevens dient de leraar het terrein goed te beheersen, zodat minder adequate bijdragen in de goede richting kunnen worden omgebogen, maar ook eventuele voor de leraar zelf nieuwe gezichtspunten als zodanig kunnen worden herkend en geplaatst in het grote verband. Op deze wijze

vermijdt men het om over de hoofden van de leerlingen heen te werken, activeert men hun denken en bereikt men een betere aansluiting bij de denkwereld van de 11e klasser.

Als startpunt nemen we enkele basale proefjes rondom statische elektriciteit die de leerlingen in veel gevallen al van klas 8 of 9 kennen: het wrijven van platen zoals pvc, glas en perspex in alle mogelijke onderlinge combinaties en het wrijven van een gladde plaat pvc en een met schuurpapier ruw gemaakte pvc-plaat. Steeds stelt men vast welk materiaal positief en welk negatief elektrisch wordt. Als ijkpunt kan men een geëlektriseerde elektroscop nemen. Plexiglas met pvc gewreven wordt positief, ruw pvc dat met glad pvc wordt gewreven wordt negatief. Bij de galvanische elektriciteit kan men zich beperken tot het met behulp van een gevoelige ampèremeter vaststellen van de polariteit van een combinatie van twee metalen, die men eenvoudig in water doet. Als metalen kiest men dan bijvoorbeeld de onderlinge combinaties van koper, lood en zink. Deze reeks kan men dan vervolgens nog uitbreiden met het zilver of goud van een ring van een van de leerlingen. Een aanvullende proef vormt de concentratiecel. Men neemt hiervoor twee bekers met gelijke metalen elektroden, bijvoorbeeld koper, en water met een oplossing van een zout van het desbetreffende metaal, bijvoorbeeld kopersulfaat, in het ene bekersglas met een hoge, in het andere met een lage concentratie. De bekersglazen worden verbonden met een slangetje, gevuld met water. Dit levert een spanningsbron op, waarbij de koperen elektrode in het bekersglas met de geconcentreerde oplossing positief en de andere elektrode negatief elektrisch wordt.

De volgende dag* stelt men de vraag: onder welke voorwaarden ontstaat, afgaande op deze verschijnselen, elektriciteit? Al snel zal de klas dan komen op de eerste voorwaarde: zowel bij de statische als bij de galvanische elektriciteit dienen *stoffen met tegengestelde eigenschappen* als uitgangspunt genomen te worden. Na enig doorvragen zullen de leerlingen de activiteit van het wrijven bij de statische elektriciteit en het in water plaatsen bij de galvanische elektriciteit uitleggen als een *verbinden* van de stoffen met tegengestelde eigenschappen, wat als tweede voorwaarde kan worden aangemerkt. Beide voorwaarden behoeven een nadere uitwerking.

* De lesstof wordt gegeven in periodes (zie deel I).

1. *Stoffen met tegengestelde eigenschappen*

Bij de opwekking van statische elektriciteit kan men de leerlingen de in de proef gebruikte stoffen eerst in een reeks laten zetten, waarbij de stoffen zó in de reeks worden geplaatst dat bij het wrijven van twee van zulke stoffen de links in de reeks staande stof positief en de rechts in de reeks staande negatief elektrisch wordt:

+ *glas, plexiglas, pvc* -

Nu wordt aan deze reeks een andere toegevoegd van in de natuur voor komende stoffen:

+ *glas, barnsteen, rubber, amorfe zwavel* -

Al gauw wordt opgemerkt dat de eigenschap die van links naar rechts in afnemende mate door deze reeksen vertegenwoordigd wordt de hardheid van het materiaal betreft. Nu kan men de leerlingen zelf laten verwoorden dat bij het wrijven van twee stoffen het hardste materiaal positief en het zachtste negatief elektrisch wordt. Deze conclusie kan nog worden ondersteund door bij de kunststoffen die in de proef werden gebruikt na te gaan, welke stof het hardste en welke het zachtste is. Een plexiglas plaat, die met een pvc plaat gewreven positief elektrisch wordt, kan inderdaad wel in een pvc plaat krassen, terwijl dit andersom niet mogelijk is. Uit het gegeven, dat bij het wrijven van een glad en ruw oppervlak van hetzelfde materiaal het gladde positief en het ruwe negatief elektrisch wordt, blijkt voorts dat behalve de hardheid ook de ruwheid van het materiaal van belang is.

Bij de galvanische elektriciteit kan men uit de proef een vergelijkbare reeks opstellen:

+ *goud, zilver, koper, lood, zink* -

De leerlingen ontdekken meteen dat het hier om de edelheid van de stof gaat. De overeenkomstige conclusie luidt dan ook: worden twee metalen in water gedaan dan zal het edelste metaal positief en het onedelste negatief elektrisch worden. Een aanvulling op deze conclusie kan zijn, de beleving van de eigenschappen edel en onedel bij de leerlingen te versterken door er op te wijzen dat men een gouden ring slechts in koningswater op kan lossen, terwijl een onedel metaal als natrium zo graag en heftig met water reageert, dat het onder olie bewaard moet worden om te voorkomen dat het met het water in de lucht reageert. Een proefje dat dit demonstreert vormt het toevoegen van een stukje natrium aan een dikwandig en hoog bekerglas dat half gevuld is met water. De reactie is zo heftig dat deze met een kleine ontploffing gepaard gaat.

In de concentratiecel heeft men niet met een tegenstelling van een edel en onedel metaal te maken, maar met een half-edel metaal zoals koper, dat in het bekerglas met een lage concentratie kopersulfaat een

grotere neiging heeft in oplossing te willen gaan dan in het bekeerglas met een hoge concentratie.

Nu kan men de zaak op een rijtje zetten en aan de leerlingen de vraag voorleggen of de eigenschappen die de positieve ofwel de negatieve elektriciteit opleveren onder één noemer te brengen zijn:

<i>positief</i>	<i>negatief</i>
hard	zacht
glad	ruw
edel	onedel
weinig oplossen	sterk oplossen

De leerlingen zullen ervaren dat dit weliswaar mogelijk, maar lastig onder woorden te brengen is. Al heen en weer pratende kan men tot de conclusie komen dat aan de positieve kant de stof zijn vorm wil handhaven, bij het hard of glad in mechanische en bij het edele in chemische zin. Aan de negatieve zijde geeft de stof makkelijk(er) zijn mechanische of chemische vorm op. In de concentratiecel ontstaat de positieve pool waar het koper weinig in oplossing gaat, terwijl dit bij de negatieve pool juist sterk het geval is. Deze abstracte benadering kan men nog uitbreiden door de leerlingen te vragen een beeld te vinden voor dit verschil van eigenschappen. Zo'n beeld is bijvoorbeeld een middeleeuwse koning en zijn nar. De koning vertegenwoordigde in die tijd de onaantastbare macht, de zedelijke norm en sociale code. Hij kon nooit uit zijn rol schieten. De nar was de enige persoon aan het hof die in zijn grappen directe kritiek kon verwerken aan het adres van 's konings besluiten. Hij zorgde voor de sociale bewegingsruimte op het hof.

<i>positief</i>	<i>negatief</i>
eigenschappen: hard, glad, edel	zacht, ruw, onedel
weinig oplossen	sterk oplossen
vormhandhaving	vormbeweeglijkheid
(koning)	(nar)

2. De verbinding van de stoffen met tegengestelde eigenschappen

Hier kan men aanvangen met de vraag hoe de activiteit van het wrijven zich tot de tegengestelde eigenschappen hard-zacht en glad-ruw verhoudt, evenals de vraag hoe het in water doen zich verhoudt tot de tegengestelde eigenschappen edel-onedel. Dan zullen de leerlingen opmer-

ken dat juist het wrijven de activiteit is die in staat is de tegengestelde eigenschappen op elkaar te betrekken. Iets dergelijks wordt ook bereikt door twee verschillende metalen in water te doen. Juist het water, of nog beter, het zure water is in staat de chemische eigenschappen edel en onedel in een relatie tot elkaar te brengen. Men heeft te maken met één verschil in eigenschap, dat potentieel tot een werking kan leiden, maar die werking treedt pas op wanneer dit verschil door de verbinding geactualiseerd wordt.

De volgende stap heeft te maken met de aard van de relatie tussen tegengestelde eigenschappen die leidt tot het ontstaan van elektriciteit. Het karakter van deze relatie kan zich voor de leerlingen af gaan tekenen door de vergelijking met andere relaties. Deze relaties worden zó gekozen dat de oorsprong van het ontstaan van elektriciteit zichtbaar wordt. Wij gaan hierbij vooral in op het ontstaan van wrijvingselektriciteit:

- a. De polariteit warmte \leftrightarrow verdichting doet stoffen met de relatief tegengestelde eigenschappen zacht-hard ontstaan.
- b. Wrijving van een harde en zachte stof doet elektriciteit ontstaan.
- c. De elektrische toestand streeft ernaar te vergaan.

Ad a. Allereerst kan men de relatie levitatie en gravitatie ofwel warmte en verdichtingswerking in de natuur in de herinnering brengen zoals deze in achtste en negende klas behandeld werd (zie deel I, 4.5). De warmte doet de stof uitzetten, maakt hem beweeglijk en vormt hem om tot een eenheid. De verdichtingskrachten, die altijd in de stof werkzaam zijn maar de overhand krijgen als de warmte wordt weggenomen, doet de stof inkrimpen en verstarren tot apart naast elkaar staande objecten. De stof is dus het wisselwerkingsveld van deze twee krachten, die in hun tegengestelde maar op hetzelfde gebied gerichte werkzaamheid een polariteit vormen. Elke stof in een bepaalde toestand heeft eigenschappen, die een afspiegeling vormen van de plaats die deze stof op dat moment inneemt binnen de geschetste polariteit. Overheerst de warmte dan ontstaat de gasvorm, overheerst de verdichtingswerking dan neemt de stof de vaste-stofvorm aan. De toestand van de stof is steeds een wordende, bewegend tussen de extremen van de beide polen. Men vraagt de klas net zo lang door tot een zekere verzadiging van dit inzicht is bereikt. De termen die hier zijn gekozen kunnen natuurlijk per klas verschillen.

Ad b. Vervolgens overzien we met de klas het 'landschap' van stoffen die zo ontstaan zijn. Het eigenschappenpaar hard-zacht hangt samen met de geschetste polariteit warmte \leftrightarrow verdichting. We onderzoeken deze samenhang op overeenkomst, verschil en ontwikkeling. De overeenkomst is voor de leerlingen makkelijk te vinden. Zacht en hard vertegenwoordigen

één paar tegengestelde eigenschappen die ontstaan onder invloed van de polariteit warmte⇌verdichting. Het verschil laat zich al moeilijker vinden. Warmte en verdichting zijn polair, terwijl de eigenschappen zacht en hard relatief zijn: een stof kan alleen als hard of zacht worden omschreven ten opzichte van een andere stof. Ten slotte zoeken we naar de ontwikkeling die het ontstaan van de relatie zacht-hard inhoudt ten opzichte van de relatie warmte⇌verdichting. Het relatieve verschil in hardheid vormt blijkbaar het uitgangspunt voor het ontstaan van statische elektriciteit. De hard- en zachtheid van de twee stoffen staan weliswaar wordend in het krachtenveld van warmte en verdichting, maar vertegenwoordigen in de activiteit van het wrijven een min of meer onveranderlijke, geworden toestand, omdat bij wrijven de eigenschappen hard en zacht namelijk vrijwel ongewijzigd blijven, ook al oefenen de stoffen een zekere werking op elkaar uit. We onderzoeken met de klas waaruit deze werking bestaat. De zachte stof verandert tijdens het wrijven nog het sterkst in vergelijking met de harde stof, hij wordt meer ingedrukt en ondervindt meer slijtage, vooral in die zin dat het oppervlak 'dichtgesmeerd' raakt, terwijl de harde stof voor zover hij aangetast wordt meer neigt tot versplintering. Ook worden veel stoffen, zeker kunststoffen die zich zo goed lenen voor het opwekken van elektriciteit, door druk en wrijving enigszins harder. Bij zachte stoffen is dit weer in wat sterkere mate het geval dan bij harde. De tegenstelling die harde en zachte stoffen vertegenwoordigen, in de zin van vormstar tegenover vormbeweeglijk, wordt dus enigszins vereffend.

Vraagt men de leerlingen naar de andere tegenstellingen die elektriciteit kunnen opwekken, dan zullen zij de vereffening duidelijk herkennen in het geval van het wrijven van een ruwe en een glad gepolijste versie van dezelfde stof. De ruwe wordt bij het wrijven gladder en de gladde iets ruwer. De tegenstellingenparen hard/glad en zacht/ruw vertegenwoordigen dus een bepaalde potentie, kunnen in het wrijven nog tot een zekere werkzaamheid komen en mogen daarom als tegengestelde krachten worden beschouwd, maar zijn als eigenschappen dan wel krachten aan de stof gebonden, waardoor hun wederzijdse invloed op elkaar gering is.

Ook bij de concentratiecel zal de tegenstelling: hoge concentratie kopersulfaat en weinig oplossen van koper tegenover lage concentratie en veel oplossen, zich vereffenen. Bij de galvanische cel vereffent de tegenstelling edel-onedel, ofwel chemisch passief tegenover actief zich in zoverre, dat het onedele metaal een base of zout vormt en daarbij chemisch minder actief wordt. Natronloog dat ontstaat als we natrium in water doen is bijvoorbeeld minder actief dan puur natrium. Steeds zien we dat aan de negatieve pool de stofkwaliteit het sterkst verandert en beweegt in de richting van de stofkwaliteit aan de positieve pool, terwijl de verandering van de stof aan de positieve pool kleiner is. Dit zal de

leerlingen niet verbazen, aangezien we eerder de stofkwaliteiten van de negatieve pool als vormbeweeglijk en die aan de positieve pool als vormstar hebben beschreven:

	<i>vormbeweeglijk</i>	<i>vereffening</i>	<i>vormstar</i>
wrijven	zacht	→ harder	hard
	ruw	→ gladder	glad
galvanische cel:	onedel	→ passiever	edel
concentratiecel:	lage	→ hogere	hoge concentratie
	<i>negatief</i>		<i>positief</i>

Laat deze vereffening die vormstarre en vormbeweeglijke stoffen in hun verbinding op elkaar uitoefenen zich nu vergelijken met de wisselwerking tussen warmte en verdichting? Sommige leerlingen zullen dit willen nuanceren. Bij warmte en verdichting is immers sprake van een krachtenspel, dat uitmondt in het ontstaan van stof-eigenschappen, waarin zowel de werkzaamheid van de warmte als die van de verdichting terug te vinden zijn. Zulke eigenschappen kunnen we daarom middenkwaliteiten noemen. Bij de werking die harde en zachte stoffen tijdens het wrijven op elkaar uitoefenen is de mate van wisselwerking gering en kan de elektriciteit die daarbij ontstaat niet als middenkwaliteit worden gezien, maar als een dualiteit, die wordt gekenmerkt door een absolute tegenstelling dan die tussen hard en zacht: het gegeven van de aantrekking tussen ongelijknamige en afstoting tussen gelijknamige polen wijst hier op. In het klassengesprek kan het vermoeden worden uitgesproken dat het ontstaan van de elektrische toestand met zijn absolute tegenstelling tot stand wordt gebracht door de confrontatie van de 'krachten' hard-zacht, die door hun aan de stof gebonden vorm wel tot een zekere vereffening, maar niet tot het ontstaan van middenkwaliteit kunnen leiden. De elektriciteit met zijn absolute karakter is te beschouwen als een verworpen toestand en het ontstaan ervan kan worden opgevat als een tegenbeweging op de vereffening van de tegenstelling hard/glad-zacht/ruw die bij het wrijven optreedt.

Om het punt confrontatie te verduidelijken kan men een vergelijking inlassen. Stel twee klasgenoten die elkaar al geruime tijd kennen gaan samen op vakantie in een klein tentje. Ongetwijfeld worden zij nu voor het eerst met een aantal nog onbekende eigenschappen van de ander geconfronteerd in een situatie waar je moeilijk om deze eigenschappen heen kunt. Bijvoorbeeld springt de één 's ochtends steeds fluitend uit zijn bed, terwijl de ander veel tijd nodig heeft om wakker te worden. Tussen mensen zijn er nu twee mogelijkheden met alle tussenvormen vandien:

deze eigenschappen botsen en verharden zich, zodat de oplopende spanning zich ontlaaft in ruzie, òf je vriendschap verdiept zich omdat je merkt dat je elkaar aan kunt vullen, waarbij de wisselwerking tussen de verschillende eigenschappen aanleiding is voor het ontstaan van iets nieuws, dat de beide personen omvat en waarbij de som meer is dan de delen. De mens kent een zekere vrijheid van handelen, een vrijheidsruimte, die hij zich overigens wel moet veroveren. In de natuur is een vaste ordening werkzaam.

Ad c. Is de elektrische toestand eenmaal ontstaan, dan streeft hij er steeds naar om te vergaan. Dit kan op twee manieren plaatsvinden.

1. De elektriciteit van een positieve of negatieve pool kan zich in de ruimte versplinteren. De afstoting van gelijknamige lading tendeert al in deze richting.
2. Verder kan een vonk tussen ongelijknamige polen het veld doen verdwijnen. De aantrekking tussen de polen tendeert naar deze mogelijkheid.

Het vergaan van elektriciteit kan in verband worden gebracht met de aard van het ontstaan ervan. Dit kan aan de leerlingen duidelijk worden gemaakt door de zaken nog eens op een rijtje te zetten:

	<i>warmte↔verdichting</i>	<i>zacht-hard</i>	<i>negatief/positief</i>
toestand:	wordend	geworden	verworden
tegenstelling:	polair	relatief	absoluut
karakter:	samenspel	confrontatie	tegenbeweging
werkzaamheid:	wisselwerking	vereffening	vergaan
resultaat:	middenkwaliteit	dualiteit	spanning

Op een dergelijke wijze kan men voor de leerlingen zichtbaar maken dat het ontstaan van elektriciteit inhoudt dat polaire krachten van niet stof-gebonden aard, warmte en verdichting, aanleiding zijn voor het ontstaan van tegengestelde eigenschappen, die beschouwd kunnen worden als aan de stof gebonden 'krachten', terwijl deze in een proces van confrontatie en vereffening op hun beurt aanleiding zijn voor het ontstaan van een meer absolute tegenstelling, vertegenwoordigd door de elektrische polen. Deze elektrische toestand heeft blijkbaar een dusdanig eenzijdig en absoluut karakter, dat het streven te verdwijnen inherent is.

Om deze beschouwing ook vanuit een meer filosofische invalshoek te bekijken kan men de leerlingen voorhouden dat volgens de gangbare zienswijze elektriciteit niet ontstaat, maar dat elk elektrisch proces te

beschouwen is als een herverdeling van geladen deeltjes. Omdat de verschijnselen deze zienswijze niet dwingend opleggen kan een ander uitgangspunt worden gekozen, dat nauw aansluit bij de opvattingen van Aristoteles e.a. Volgens deze zienswijze is elektriciteit te beschouwen als een entiteit die zich in bepaalde omstandigheden met de ruimte en de stoffelijkheid verbindt. Elektriciteit is een fenomeen met een ruimtelijke werkzaamheid, maar heeft de stof als drager van deze werking nodig. Vanuit deze zienswijze zou het onjuist zijn te stellen dat de eigenschappen hard en zacht omgevormd worden in de elektrische polen. De situatie waarin de eigenschappen hard en zacht tot een confrontatie en gedeeltelijke vereffening komen, waarbij er door de stofgebonden aard van deze 'krachten' geen speelruimte is voor het doen ontstaan van middenkwaliteit, is aanleiding voor het in de verschijning treden van de entiteit elektriciteit. Evenzo zijn de eigenschappen hard en zacht ook niet op te vatten als metamorfozen van warmte en verdichtingswerking. De ook als entiteit op te vatten eigenschap 'hard' verbindt zich met de stof in die omstandigheden, waarin de verdichtingskrachten overheersen ten opzichte van de warmte. Wanneer de voorwaarden hiertoe zijn vervuld zal een entiteit zich noodzakelijk verbinden met de stof. Opvallend is nu dat de voorwaarden die hiertoe leiden geheel passen bij het wezen van die entiteit. De confrontatie en gedeeltelijke vereffening bijvoorbeeld van krachten die door hun stofgebonden karakter niet tot het ontstaan van middenkwaliteit aanleiding kunnen zijn, vormt het voertuig waarin de entiteit elektriciteit in de verschijning kan treden. Het wezen van de elektriciteit past bij dit voertuig, omdat het zelf een meer absolute tegenstelling vertegenwoordigt.

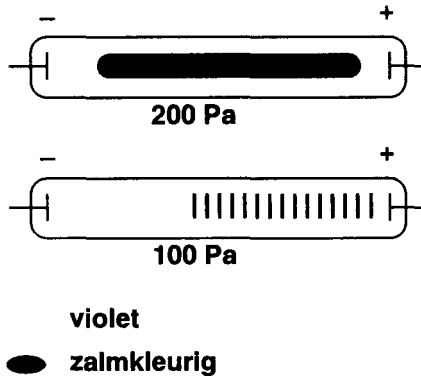
Al kan men het ontstaan van elektriciteit niet als een omvorming van de eigenschappen hard-zacht zien en deze niet als een metamorfose van warmte en verdichtingswerking, toch kan men het gehele proces als een ontwikkeling zien. In het hierop volgende klassengesprek kan dan het beeld ontstaan dat elektriciteit te beschouwen is als de laatste trede van een ontwikkelingstrap, omdat de tegengestelde krachten een in toenemende mate eenzijdig gebonden karakter krijgen. Warmte en verdichting staan in hun werkzaamheid nog boven de stof, in die zin dat zij niet aan de stof gebonden zijn. Met Rudolf Steiner kunnen wij hen krachten van de bovennatuur noemen, met dien verstande dat hij bij verdichting de kristallisatiewerking voor ogen had. De 'krachten' zacht en hard behoren tot de gewone natuur, omdat zij aan de stof gebonden zijn. De elektrische polen vertegenwoordigen een krachtensort die een nog eenzijdiger en meer absoluut karakter heeft; Steiner rekent die tot de ondernatuur (zie deel I, paragraaf 4.9.3). In schema:

- | | | |
|--|---|-------------|
| 1. <i>warmte en kristallisatie</i> | polaire krachten treden in wisselwerking | bovennatuur |
| 2. <i>zacht en hard</i> | aan de stof gebonden krachten in confrontatie vereffenen zich deels | natuur |
| 3. <i>negatieve en positieve elektriciteit</i> | absoluut tegengesteld krachten streven naar vergaan | ondernatuur |

Nadat we op deze wijze zicht hebben gekregen op de oorsprong van de elektriciteit, stellen we nu de vraag of deze oorsprong, zijn afdruk vindt in de aard van de beide polen van het elektrische veld. Ook deze vraag zal aan de hand van de verschijnselen van de statische elektriciteit worden beantwoord. Vooralnog zijn in een statisch veld geen kenmerken te vinden die verwijzen naar de oorsprong van de statische elektriciteit, te weten het vormbehoudende hard/glad bij de positieve pool resp. het vormbeweeglijke zacht/ruw bij de negatieve pool. Integendeel, de elektrische polen vertonen bij oppervlakkige beschouwing geen discriminerende kenmerken. Hooguit worden in de vonkontlading van een statisch veld de beweeglijkheid en starheid teruggevonden in de karakteristieke combinatie van grilligheid en starhoekige vorm van een vonk. De polariteit van een elektrische pool kan slechts met behulp van een andere pool worden vastgesteld: aantrekking of afstoting zijn dan bepalend voor de gezochte identiteit. Anders wordt het wanneer we het vergaan van een statisch veld beschouwen in samenhang met de vorm van de elektroden. De rhuimkorff-inductor biedt daartoe een mogelijkheid. Deze kan van een platte en een puntige elektrode worden voorzien. Het statische veld dat wordt aangebracht kan worden omgepoold. Laten we de leerlingen uitspreken hoe de verschillen die aan positieve en negatieve kant optreden geduid kunnen worden, dan wijzen zij er op dat de positieve pool blijkbaar een 'voorkeur' heeft voor de puntige of anders voor de rand van een platte elektrode, terwijl de negatieve pool overeenkomstig een 'voorkeur' heeft voor het platte vlak, of anders voor het meest vlakachtige aan de puntige elektrode, de zijkant.

Zoals eerder gesteld ligt het in het wezen van het elektrische veld besloten om te vergaan. We leggen aan de klas de vraag voor wanneer dit het beste kan geschieden. Blijkbaar als de drager van de positieve pool een ruimtelijk verdichte en van de negatieve pool een in de ruimte uitgebreide vorm heeft. Hier vinden we een kenmerk van de oorsprong van het elektrische veld terug. Want hoewel het ontstaan van het elektri-

sche veld altijd het ontstaan van beide polen gezamenlijk inhoudt, vormen de harde stoffen, dat wil zeggen stoffen die in sterkere mate de verdichtingswerking vertegenwoordigen, het voertuig waarin de positieve pool van het veld in verschijning kan treden. Op dezelfde wijze vormen zachte stoffen, die met hun grotere beweeglijkheid en mindere verdichting meer de warmtewerking vertegenwoordigen, het voertuig voor de negatieve pool.



De gasontladingsbuizen van William Crookes (1832-1919) kunnen het inzicht in de aard van de polen van het elektrische veld nog verdiepen. Laat men de vonk-ontlading van een hoogspanningsveld in een gas onder afnemende druk plaatsvinden, dan treden de verschijnselen die met ontleding samengaan aan positieve en negatieve zijde onderscheiden op. Mooi is dit te zien in een set buizen met afnemende druk. Bij een druk van 200 Pa ziet men een violet licht rond de negatieve pool. Naast dit licht is een donkere plek. Daarnaast vindt men naar de positieve pool toe een zalmkleurig licht. In de volgende buis heerst een druk van 100 Pa. Het violette licht aan de negatieve pool bestrijkt een groter gebied en is egaal van vorm. De donkere plek is verschoven ten opzichte van de vorige buis. Het zalmkleurige licht bij de positieve pool is meer samenge trokken en heeft een gelaagde ringenstructuur gekregen. Vragen we aan de leerlingen wat er is gebeurd tussen deze en de vorige buis, dan zullen zij dit als volgt benoemen: het violette licht aan de negatieve pool heeft zich egaal uitgebreid, het zalmkleurige licht bij de positieve pool heeft zich verdicht tot een gelaagde structuur. Dus een dubbele verdichting heeft in het licht aan de positieve pool plaatsgevonden: het licht heeft zich als geheel, maar ook nog tot lagen verdicht. Opnieuw zullen de leerlingen de kenmerken verdichting en uitbreiding herkennen van respectievelijk de positieve en negatieve pool van het elektrische veld. Alleen betreft het hier een overtreffende trap van beide kenmerken: het is gestructureerde verdichting

aan de positieve en egale uitbreiding aan de negatieve pool. De indruk kan ontstaan dat deze bij de polen van het veld behorende eigenschappen zich aan een vonk in een gas onder lage druk beter kenbaar kunnen maken en daarom meer specifiek in verschijning kunnen treden.

Bij een druk van circa 3 Pa zijn de lichtverschijnselen aan de polen van een gasontladingsbuis geheel gescheiden. Op een enkel kenmerkend verschil kan in dit verband nog worden gewezen. De kathodestraling, afkomstig van de negatieve pool, is al met een zwakke magneet af te buigen, anodestraling afkomstig van de positieve pool is pas af te buigen met een zéér krachtig elektromagnetisch veld. Daarbij is de mate van afbuiging bij straling van de negatieve pool onafhankelijke van het gas in de buis, terwijl bij de positieve pool de mate van afbuiging wel afhankelijk is van dit gas. Deze is namelijk omgekeerd evenredig met het massagetal of de standvastigheid van dit gas. Een laatste kenmerkend verschil tussen het licht bij de beide polen is dat kathodestraling voor elk gas dezelfde violette kleur heeft, terwijl het licht bij de anode per gas van kleur verschilt. Het verschil in afbuiging door een magneetveld zullen de leerlingen weer op één lijn kunnen brengen met de tegenstelling vormbeweeglijkheid en -starheid van de stoffen die bij confrontatie aanleiding zijn voor het ontstaan van een elektrisch veld.

Nog een samenhang wordt zichtbaar, als we de klas de gang laten beschrijven van warmtewerking/gas via zachte stof naar negatieve elektriciteit. De eenheid van de gaswereld (stof volledig gemengd, alle gassen dezelfde uitzettingscoëfficiënt), het feit dat het oppervlak van zachte stoffen bij wrijven dichtgesmeerd raakt, dat zij zich meer voegen waardoor zij in zeker opzicht meer een geheel blijven dan harde stoffen, de egale uitbreiding van het licht aan de negatieve pool in de buis met 100 Pa en de bij alle gassen gelijke afbuiging van hetzelfde licht bij een druk van 3 Pa, al deze fenomenen hebben dezelfde signatuur die kan worden aangeduid met het begrip *uniformiteit*. Zo hebben anderzijds de veelheid van aparte voorwerpen bij de vaste stof (verdichtingswerking), de harde stof die bij wrijven versplintert, het licht aan de positieve pool in een buis van 100 Pa dat uiteenvalt in lagen en hetzelfde licht in een buis van 3 Pa dat een mate van afbuiging door een magneetveld vertoont dat per gas verschilt, eveneens dezelfde signatuur, namelijk een van *diversiteit*. Het feit dat anodestraling per gas van kleur verschilt, terwijl kathodestraling altijd dezelfde kleur heeft past ook in deze samenhang. Samenvattend komen we tot het volgende overzicht:

	<i>positief</i>	<i>negatief</i>
oorsprong:	hard, glad, edel (vormbehoudend)	zacht, ruw, onedel (vormbeweeglijk)
kenmerken bij rhumkorff:	puntige drager verdichte vorm	vlakke drager uitbreidende vorm
drukbuizen:	verdichting tot structuur, afbuiging bij krachtig magneetveld verschilt per gas, kleur anodestraling ver- schilt per gas	egale uitbreiding, afbuiging bij zwak magneetveld gelijk voor alle gassen, kleur kathodestraling voor alle gassen gelijk
verwantschap:	verdichting en diversiteit	uitbreiding en unifor- miteit

Op deze wijze wordt voor de leerlingen concreet beleefbaar dat de elektrische polen als in eenzijdigheid gebonden werkingen te beschouwen zijn. Hoewel de stof drager of aanhechtingspunt is van deze werkingen, is de ruimte rond deze drager zelf veranderd en heeft de kwaliteit 'elektrisch' gekregen. Dit wordt aangeduid met het begrip elektrisch veld. De ruimte rond een positieve pool heeft een naar verdichting tenderende structuur, die rond de negatieve pool een naar egale uitbreiding strevende kwaliteit. Het elektrische veld oefent zijn werkzaamheid alleen uit op soortgelijke, te weten andere elektrische of magnetische velden.

In het voorgaande is gepoogd een voor 11e klassers toegankelijke weg te beschrijven, die hen nader kan brengen tot een wezenlijk begrip van elektriciteit. Tevens is geprobeerd deze weg zó te beschrijven dat leerlingen zo actief mogelijk in het kennisproces betrokken kunnen worden. Op meerdere plaatsen kan de behandelde stof aanleiding geven tot een klassengesprek. Als men bijvoorbeeld de aan de stof gebonden krachten hard-zacht vergelijkt met de in eenzijdigheid gebonden ruimtelijke elektrische werkingen positief-negatief, dan kan bij de klas een parallel opkomen met verschillende soorten eenzijdigheden in het menselijk bestaan. Je kunt bijvoorbeeld een lichamelijke handicap hebben of je kunt eenzijdig denken. Beide hebben hun invloed, maar werken heel anders uit. Dergelijke klassengesprekken verlevendigen niet alleen het begrip van de behandelde stof, maar belichten ook de menselijke ervaring van alle dag en dragen bij tot de morele ontwikkeling van de leerlingen.