

Hoogspanning waarom?

Citation for published version (APA):

Laan, van der, P. C. T. (1979). *Hoogspanning waarom?* Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1979

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Hoogspanning waarom?

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van gewoon hoogleraar in de technieken van de hoge spanningen en hoge stromen aan de Technische Hogeschool Eindhoven op vrijdag 9 november 1979 door dr.ir. P.C.T. van der Laan

Aan Janny
Aan Marieke, Martine en Heleen

Dames en Heren,

De titel van mijn voordracht is 'Hoogspanning waarom?' Graag wil ik vanmiddag met U het hoe en waarom van hoogspanning bespreken in de hoop dat U aan het eind van mijn voordracht overtuigd zult zijn van het belang en het bestaansrecht van hoogspanning. Ik heb met opzet het germanisme 'hoogspanning' gebruikt. Hoewel dat woord volledig ingeburgerd is, wordt het soms toch in officiële teksten vervangen door 'Hoge spanning', zoals dat ook het geval is in mijn officiële leeropdracht. Ik zal me bij het algemeen gangbare woord houden, en ik verwijs als argument daarvoor ook naar vele soortgelijke woorden zoals hoogblond, hoogfrequent, hooghaarlemmerdijs, Hooglied, hoogoven, hooggeleerd en hoogleraar. Dat laatste woord kan de gedachte bij U doen opkomen dat mijn titel rijker aan alliteratie had kunnen zijn door te luiden: 'Hoogspanning, waarom, hoogleraar waarom?' Nu heeft een intreedende soms wel iets van een preek voor eigen parochie, een 'oratio pro domo', maar ik hoop zoveel interessante en misschien enigszins dreigende hoogspanningszaken rond dat huis op te bouwen dat niet de verdediging van het huis maar het belang van het onderwerp zelf centraal komt te staan. Ik houd mij daarom aan de kortere titel.

Hoogspanning komt voor of wordt toegepast op zoveel gebieden, dat een indeling in categorieën, zoals gegeven in tabel 1, wenselijk is.

Categorie	Voorbeelden
Onbedoelde ontladingen	bliksem, vonken door elektrostatica
Krachten op deeltjes	vlierpit, stofafscheider, verfspuit, snelle schrijver
Gewenste ontladingen	- gasaansteker, autobougie - ignitron, getriggerde vonkbrug - gepulste laser
Snelle elektronen of ionen	televisiebuis e.d., röntgenbuis, versnellers
Overdracht elektrische energie	- energie in korte tijd naar experiment: plasmafysica, gepulste lasers en deeltjesbundels - zendbuizen - elektrische energievoorziening

Tabel 1: Het optreden van en toepassingen van hoogspanning.

In de categorie van de onbedoelde ontladingen denken we allereerst aan de bliksem. In de loop der eeuwen is daar al veel over gezegd en geschreven, en ik zal me daarom tot een paar opmerkingen beperken. Nog steeds is onweer een indrukwekkende zaak, je zou kunnen zeggen een grootse openluchtdemonstratie van de grilligheid van gasontladingen. Daarnaast blijkt ook hoe voorzichtig we moeten zijn met de schaalwetten: een geringe ruimtelading leidt, dank zij de grote afmetingen van de wolken, toch tot enorme spanningsverschillen. Als studie-objekt voor studenten is de bliksem overigens minder geschikt. Ik denk daarbij aan het lijfsgevaar maar vooral ook aan de pressie om de studieduur te bekorten.

In dezelfde categorie van de onbedoelde ontladingen wil ik ook noemen de zeer veel zwakkere vonkjes die kunnen optreden als gevolg van elektrostatische ladingen. Deze ladingen kunnen halfgeleiders onherstelbaar beschadigen. Microgolfdiodes en vooral ook de huidige, in MOS-techniek vervaardigde, transistoren moeten daarom tegen elektrostatische ladingen beschermd worden. Vonkjes als gevolg van elektrostatische ladingen zijn ook zeer gevaarlijk in de buurt van explosieve gasmengsels. Hoe voorzichtig je daarbij moet zijn blijkt uit het feit dat een elektrisch vonkje van $1,2 \mu\text{J}$ energie al voldoende is om een optimaal samengesteld mengsel van waterstof en zuurstof, knalgas, tot explosie te brengen (1). Zo'n hoeveelheid energie komt vrij als een speld van een hoogte van 2,5 mm naar beneden valt. De energie komt daarbij vrij in de vorm van geluid en warmte, maar het zal moeilijk zijn deze spreekwoordelijke speld te horen vallen.

Bij de tweede categorie van tabel 1, de krachten op deeltjes, kunt U denken aan de bekende proeven uit de elektrostatica over de krachten op vlierpitbolletjes en de krachten op papiersnippers. Daarnaast zijn er echter ook moderne toepassingsmogelijkheden. In elektrostatische stofafscidders wordt het stof uit de passerende luchtstroom weggezogen door elektrische velden. Bij elektrostatisch verfspuiten worden de verfdruppeltjes naar het metalen object toegezogen, zodat een nuttiger gebruik van de verf het gevolg is. En enigszins verwant aan de verfspuit zijn de moderne, voor computers ontwikkelde snelle schrijvers, waarbij kleine druppeltjes inkt worden gevormd, op de juiste wijze geladen en vervolgens door elektrostatische velden afgebogen om de letters op het papier te schrijven (2).

Bij de volgende categorie, die van de gewenste ontladingen, denk ik allereerst aan ontladingen die worden gebruikt om chemische processen op gang te brengen. Een alledaags voorbeeld daarvan is het nieuwe type gasaansteker, waarin met behulp van piëzo-elektriciteit hoogspanning wordt opgewekt, zodat een vonk kan overspringen. Een nog veel belangrijker voorbeeld is de autobougie. Ook daar gebruiken we hoogspanning zodat een vonk het benzinemengsel in de autocilinder kan aansteken, en op koude wintermorgens kan het er om spannen of we voldoende hoogspanning hebben.

Elektrische ontladingen kunnen ook gebruikt worden om een tweede ontlading op gang te brengen en zo een elektrische schakelaktie tot stand te brengen. Ik denk daarbij aan ignitrons en aan getriggerde vonkbruggen. In lasers tenslotte worden elektrische ontladingen toegepast om het laserproces op gang te brengen. U kunt daarbij denken aan stikstof en kooldioxyde lasers. In al deze toepassingen van gewenste ontladingen is 'concentratie' het sleutelwoord. De hoogspanning in het voedende apparaat loopt namelijk in de genoemde gevallen op, totdat de plotseling optredende vonk de energie, geconcentreerd in tijd en plaats, doet vrijkomen. Het tweede proces komt dan op gang dank zij die concentratie.

In de categorie van de snelle elektronen of ionen, gebruiken we de hoogspanning om individuele deeltjes te versnellen, tot ze een grote snelheid en de daarmee samenhangende energie hebben bereikt. In de gewone televisiebuis wordt dit toegepast alsook in de vele andere soorten beeldschermen; om een helder en goed gefocuseerd beeld te krijgen moeten elektronen van voldoende energie het beeldscherm treffen. Een tweede voorbeeld in deze groep is de röntgenbuis. Ook daar gebruiken we hoogspanning om de elektronen een hoge snelheid te geven, opdat bij botsing met de anode röntgenstraling wordt vrijgemaakt.

Als derde voorbeeld in deze categorie noem ik de deeltjesversnellers. Versnellers, gebouwd volgens diverse principes, staan in vele fysische laboratoria, waar ze snelle elektronen of ionen leveren voor het doen van allerlei experimenten. In al deze versnellers wordt hoogspanning toegepast; als wisselspanning tussen de dozen van een cyclotron, als zeer hoogfrequente wisselspanning in de trilholtes van een lineaire versnel-ler, of als gelijkspanning in de injector, de eerste trap van vele versnel-lers.

Bij de vijfde, de laatste categorie van tabel 1, gaat het over de overdracht van elektrische energie. Daarbij is niet de hoogspanning op zichzelf belangrijk, maar gaat het om het produkt van stroom en spanning, het vermogen. De belangrijkste toepassing van deze overdracht van elektrische energie hebben we natuurlijk in de openbare elektriciteitsvoorziening. Ik wil echter eerst nog twee andere voorbeelden van energie-overdracht noemen. In sommige fysische experimenten wil men in zeer korte tijd een aanzienlijke hoeveelheid energie naar een opstelling overpompen. Het kan hierbij gaan om een kortdurend plasmafysisch experiment, om een gepulste laser, of om experimenten met zeer intense en kortdurende bundels van elektronen of ionen. Om de stroom in een dergelijke opstelling snel te laten stijgen is een hoge spanning nodig, vaak al omdat het te voeden circuit door de afmetingen van de opstelling een inductief karakter krijgt. In deze experimenten kan men zeer grote vermogens bereiken, soms zelfs ruim duizend maal meer dan het totale vermogen van de in Nederland opgestelde elektriciteitscentrales (3). Hierbij gaat het uiteraard altijd over zeer korte tijden, in de orde van enkele micro-seconden of minder.

Als tweede voorbeeld in deze categorie noem ik de zendbuizen voor groot vermogen; ofwel zendbuizen van het meer conventionele type of zendbuizen voor hoge frequenties, magnetrons en klystrons. De stroom die in een zendbuis kan lopen is in het algemeen niet erg groot. De vacuümdoorvoer vormt een beperkende faktor, maar daarnaast is vooral ook een grens wat de gloeikathode aan stroom kan emitteren. Het ligt daarom voor de hand om in zendbuizen het vermogen, het produkt van stroom en spanning, te verkrijgen door hogere anode-spanningen toe te passen.

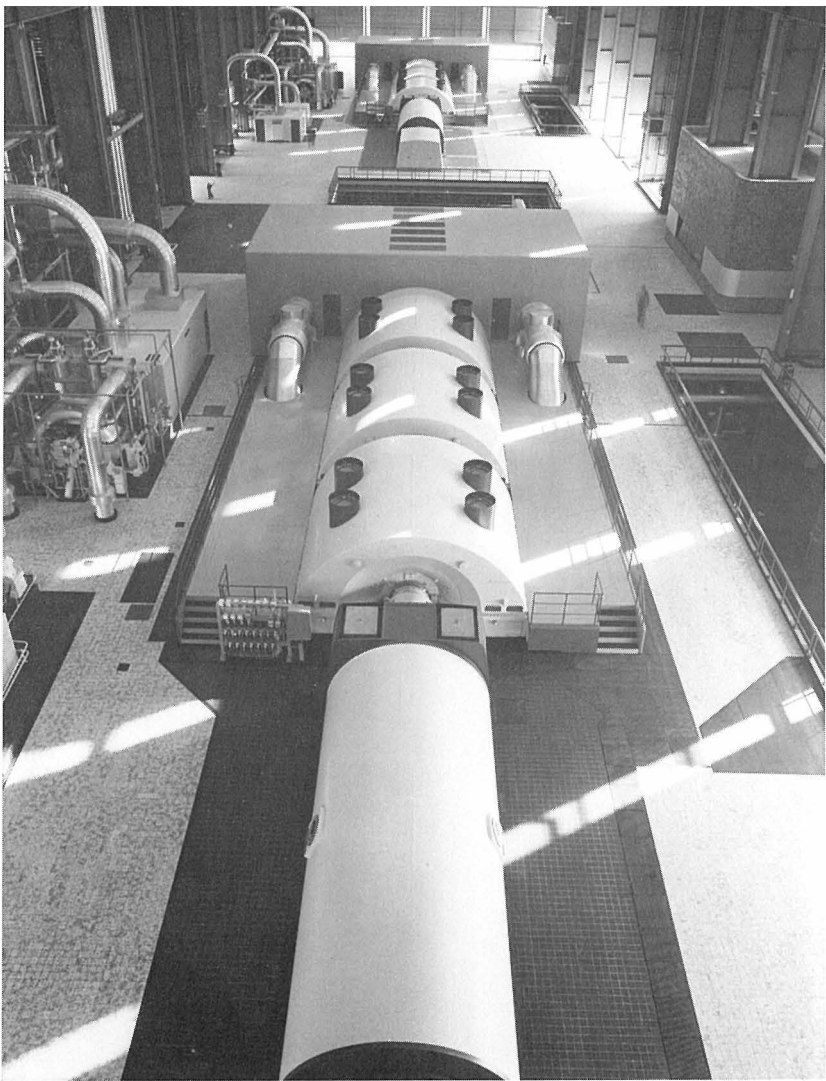
De openbare elektrische energievoorziening, waar we nu aan toe komen, staat onderaan mijn tabel en U zou mij kunnen verwijten dat deze plaats niet overeenkomt met de belangrijkheid van dat onderwerp. Die andere onderwerpen heb ik echter met opzet eerst genoemd. Niet alleen mag men aan een Technische Hogeschool een onderwerp als hoogspanning in bredere zin bekijken, maar ook zijn vele van de eerder genoemde zaken van belang voor de elektrische energievoorziening. Blikseminslag bijvoorbeeld kan optreden op hoogspanningslijnen en hier is veel onderzoek aan verricht. Elektrostatische effecten kunnen het optreden van doorslag vergemakkelijken, terwijl krachten op deeltjes van belang kunnen zijn bij doorslag in gassen en vloeistoffen waarbij vuil in vele gevallen de beperkende faktor is voor de te bereiken

doorslagspanningen. Men maakt zich daarbij dan ook vaak ernstige zorgen hoe het vuil weggehouden kan worden bij de montage. Tenslotte is ook de gedachtengang die we volgden bij de zendbuizen, zonder meer over te dragen op de elektrische energie-overdracht; ook daar zijn het de beperkingen in de stroom die ons er toe brengen hogere spanningen toe te passen, zodat toch het vermogen kan worden overgebracht. Ik kan dit toelichten aan het volgende voorbeeld. Een 380 kV hoogspanningslijn van het in Nederland gebruikelijke type kan maximaal 1000 A per geleider voeren, en dat mag dan in feite alleen maar in de winter (4). Omdat elke fase bestaat uit een bundel van drie geleiders loopt er dus een stroom van maximaal 3000 A bij een spanning van 380 kV. Het driefasen systeem vervoert dan een vermogen van bijna 2000 MW. Datzelfde vermogen zouden we ook kunnen overbrengen bij een spanning van 3000 V, als we dan de stroom maar opvoeren tot 380.000 A. Hoewel we met deze combinatie van stroom en spanning weer op hetzelfde vermogen zitten, is een lijn voor een dermate hoge stroom praktisch niet te bouwen en zeker niet te verkopen. De redenen zijn duidelijk; men zou extreem dikke geleiders moeten toepassen om de warmte-ontwikkeling nog enigszins in de hand te houden en dan veroorzaakt de stroom bovendien nog enorme krachten tussen naburige geleiders. De conclusie dat men hoge spanningen moet toepassen ligt daarom voor de hand, en die conclusie is dan ook terecht getrokken vanaf het begin van deze tak van de elektrotechniek. Welk spanningsniveau men zal kiezen voor de energie-overdracht hangt af van een aantal factoren. Belangrijk zijn de grootte van het over te brengen vermogen, de kosten zowel ten aanzien van de investering alsook van de verliezen bij het bedrijf, de bedrijfszekerheid, de reserve aan transportcapaciteit, de internationale afspraken over de toe te passen spanningsniveaus, en tegenwoordig ook meer dan voorheen de milieu-aspekten van de hoogspanningslijnen.

Omdat de hoogspanningsmasten en lijnen een essentiële schakel vormen in het geheel van de elektrische energievoorziening, geloof ik vooral meer te moeten zeggen over het belang en de omvang van het gebruik aan elektrische energie. Ik zal dat doen aan de hand van getallen en voorbeelden (5). De openbare centrales in Nederland leverden gedurende 1978 53,2 TWh (1 TWh is 1 miljard kWh). Met dit getal kan men uitrekenen wat de financiële omzet van de elektriciteitsmaatschappijen is geweest; na aftrek van verliezen in het lijnennet en tegen een gemiddelde kWh-prijs van 11,7 cent komt dit neer op 6 miljard gulden. In plaats van naar de verbruikscijfers te kijken kan men echter ook rekenen met

het verbruik per seconde, het vermogen. Het gemiddelde vermogen dat Nederland consumeerde was gedurende 1978 6,07 GW (1 GW is 1 miljard Watt). Hoe vormen we ons een beeld van dat getal? Uit de oorlog zijn bekend de zogenaamde knijpkatten, een zaklantaarn met een ingebouwde handdynamo. Dit oude apparaat, dat tegenwoordig ook weer in vernieuwde vorm te koop is, levert ongeveer 3 W. Bij wijze van gedachtenexperiment zouden we 2 miljard van deze knijpkatten kunnen produceren en uitreiken aan de halve wereldbevolking, baby's en grijsaards inbegrepen, die dan vervolgens dag en nacht moeten knijpen om Nederland te kunnen voorzien van elektriciteit, en dan alleen nog maar van het gemiddeld vereist vermogen. Als U dat wat ver vindt gaan kunt U het gedachtenexperiment ook anders inrichten. Een hardwerkende slaaf in goede conditie kan ongeveer 100 W leveren. Wij kunnen ons dus voorstellen dat 60 miljoen mensen, ongeveer de bevolking van België en Frankrijk samen, dag en nacht werkend in tredmolens of op home-trainers, Nederland eveneens van elektrische energie kunnen voorzien.

De realiteit vereist gelukkig minder slafelijke arbeid. Er staan in Nederland in de diverse centrales ongeveer 110 productie-eenheden, generatoren van kleiner of groter vermogen (6). Vrij dicht bij Eindhoven in de Clauscentrale in Maasbracht staan wat op het ogenblik de grootste eenheden in Nederland zijn, twee generatoren met een maximaal vermogen van 633 MW. Het gemiddelde, in Nederland opgenomen elektrische vermogen, kan dus in principe geleverd worden door 10 van deze generatoren, zoals dat vermogen in eerdere rekenvoorbeelden geleverd werd door 2 miljard knijpkatten of 60 miljoen slaven. Ik hoop dat deze buitensporige vergelijkingen U een beter gevoel geven voor het vermogen dat een dergelijke generator kan leveren. Figuur 1 laat de generator zien samen met de stoomturbine die, aangedreven door hogedrukstoom, de generator doet draaien. De afmetingen van de generator zijn: lengte 11,3 m en diameter 3,9 m. Figuur 2 geeft een overzicht van de gehele Clauscentrale. U ziet het hoge ketelhuis naast de machinezaal, de schoorstenen en de grote koeltorens. Ik weet niet of U een dergelijke centrale op het eerste gezicht mooi vindt, maar ik geloof wel dat we met waardering kunnen kijken naar een installatie die het werk van 12 miljoen slaven overneemt. Wij verrichten weinig slafelijke arbeid meer, maar stelt U zich eens voor hoe verheugd onze voorouders gekeken hebben naar de eerste windmolen die hun het moeizame leegpompen van een polder uit handen nam.

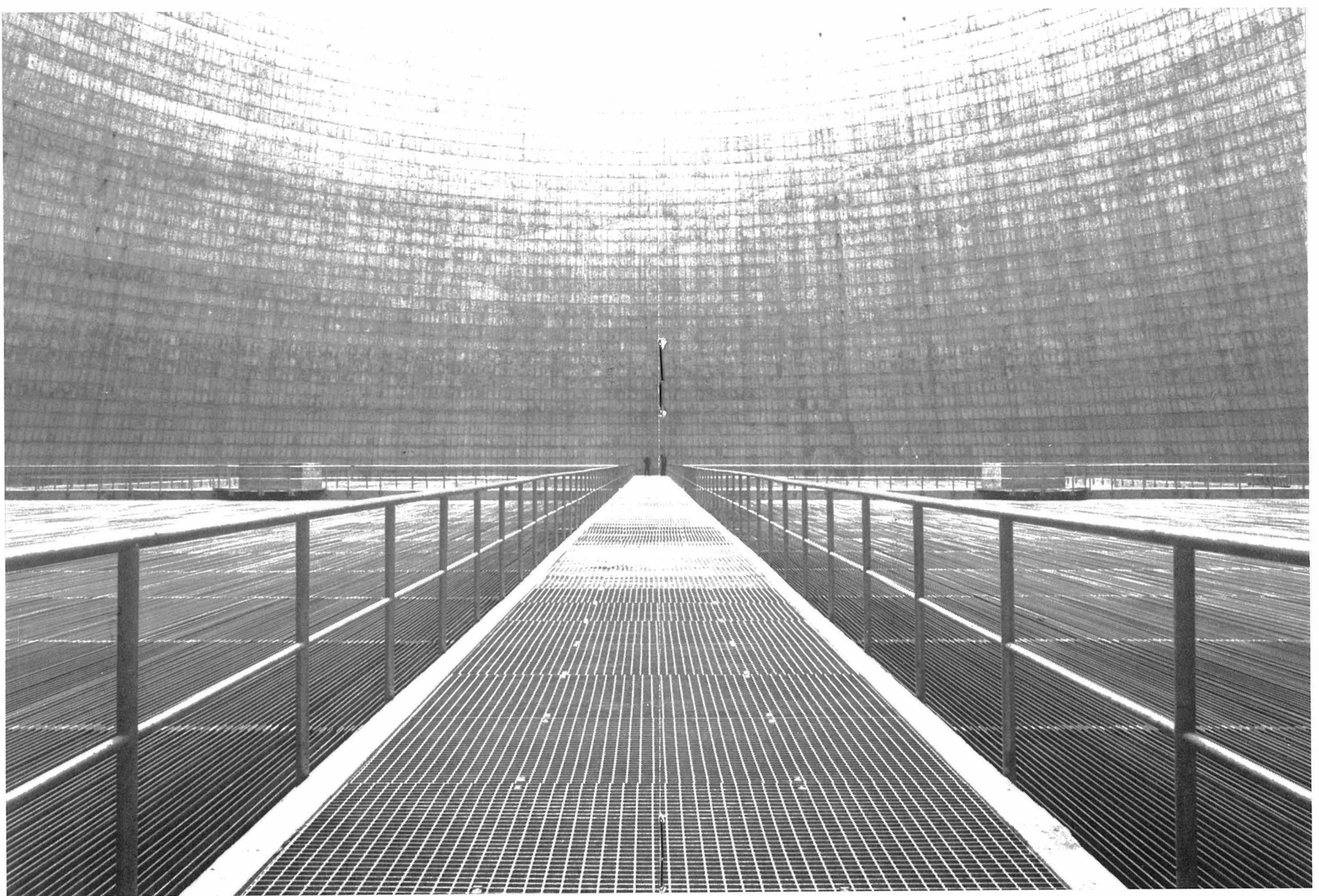


Figuur 1

De machinehal van de Clauscentrale. Op de voorgrond is de generator te zien. De aandrijvende turbine daarachter bestaat uit drie lagedruk turbinehuizen en een middendruk- en een hogedrukhuys, die samen in een rechthoekige kast zijn ondergebracht. Op de achtergrond is de identieke tweede eenheid te zien. De lopende man rechts boven het midden geeft een idee van de schaal.



Figuur 2
De Clauscentrale in Maasbracht. Duidelijk zijn te zien de beide koeltorens, de schoorstenen, de hoge ketelhuizen met daarachter de lichter gekleurde machinal. De koeltorens zijn 116 m hoog, de schoorstenen 150 m.



*Figuur 3
Het inwendige van een koeltoren op 12 meter hoogte. Aan het eind van het loop-
pad staan twee mensen.*

Een andere manier om te rekenen aan het door Nederland opgenomen elektrische vermogen, is het uit te drukken in het vermogen per hoofd van de bevolking. Gemiddeld over 1978 en gemiddeld over alle Nederlanders komt dit neer op 434 W. Over dit getal wil ik graag een paar opmerkingen maken.

1. Volgens het eerder gebruikte regeltje kunnen we zeggen dat er gemiddeld voor ieder van ons, dag en nacht, 4 slaven hard aan het werk zijn. Ik weet niet of die gedachte U bezwaart of tot zuinigheid aanspoort. Te grote zuinigheid zou in ieder geval misplaatst zijn als dat elektriciteitsgebruik de produktiviteit bevordert. Maar als ik alle 16 TL-buizen in mijn kamer op de TH aandoe, zit ik met 640 W boven het gemiddelde, terwijl ik ook met een bureaulamp mijn werk kan doen.
2. Elektrische energie kan niet eenvoudig worden opgeslagen. Daarom moeten de centrales in staat zijn om te allen tijde de sterk wisselende vraag op te vangen. Die vraag varieert per etmaal, en ook langzamer met de seizoenen. De maximale vraag treedt gewoonlijk op in december, meestal op een maandag. Zo werd vorig jaar op 18 december een vermogen van 9,28 GW gevraagd. Dit record werd dit jaar al in januari overtroffen als gevolg van de koude winter; op 4 januari werd een piekbelasting van 9,39 GW genoteerd. Omgerekend op een vermogen per inwoner komt dit neer op 671 W.
3. De centrales moeten niet alleen de piekbelasting opvangen, maar er moet ook reservecapaciteit zijn, zodat storingen kunnen worden ondervangen en onderhoud mogelijk blijft. Hoezeer de maatschappij is ingesteld op het voortdurend beschikbaar zijn van elektriciteit, blijkt pas bij grote elektriciteitsstoringen zoals optraden in de Verenigde Staten en Frankrijk. Bij elektriciteitsstoringen vallen uit: straatverlichting, verkeerslichten, liften, trams, treinen, allerlei vormen van communicatie en centrale verwarming. Van alle gevaarlijke situaties die daarbij ontstaan, noem ik alleen het uitvallen van de centrale verwarming bij zieken en bejaarden.
4. In een elektrische centrale moet meer brandstofenergie worden aanvoerd dan er elektrische energie kan worden geleverd, er ontstaat afvalwarmte. Dat is heel algemeen het geval wanneer thermische energie wordt omgezet in mechanische energie. In een auto is een koelsysteem met radiator een essentieel onderdeel van de motor. Iemand die hout hakt voor zijn open haard, wordt in ieder geval één keer warm. De verhouding tussen de geleverde elektrische energie en de opgenomen thermische energie, het rendement, ligt voor Nederland in 1978 voor de conventionele centrales op 38,3%. In 1968 was

dit getal nog 34,1%. Deze stijging is vooral bereikt doordat nieuwere, grotere produktie-eenheden oudere generatoren hebben vervangen. In de al eerder genoemde Clauscentrale in Maasbracht wordt de afvalwarmte gedurende een groot deel van het jaar afgegeven aan de Maas. Twee grote koeltorens kunnen de afvalwarmte afgeven aan de lucht wanneer er te weinig water in de Maas is om op milieutechnisch verantwoorde wijze te kunnen koelen. Figuur 3 geeft een beeld van het inwendige van een van de koeltorens in Maasbracht. U moet bedenken dat al de warmte die hier wordt afgevoerd moeilijk nuttig is toe te passen, omdat het gaat om thermische energie bij lage temperatuur.

Aan het slot van deze opmerking over de afvalwarmte en het rendement van elektriciteitsopwekking moet vermeld worden dat de magnetohydrodynamische (MHD) energieomzetting aanzienlijke verbetering van het rendement mogelijk kan maken.

5. Als we niet alleen letten op het gebruik van elektrische energie, maar ook meetellen wat wij verbruiken aan allerlei brandstoffen in de industrie, in het verkeer en thuis, komen we tot een ongeveer 14x hoger getal. Als we dat weer uitdrukken in een gemiddeld vermogen per hoofd van de bevolking, komen we voor 1978 op 6.150 W.
6. In tabel 2 wordt een vergelijking gemaakt tussen het gebruik van elektrische energie in een aantal landen (7). Er bestaat grote overeenstemming over het feit dat we zuinig moeten zijn met energie, maar het woord zuinigheid, of het nu gaat over geld of over energie, roept de haast onweerstaanbare neiging op om te zien of er mensen zijn die nog meer verspillen dan wij. Aan die neiging komt tabel 2 tegemoet. Voordat we een vernietigend oordeel uitspreken over de landen die hoog op de lijst staan, moeten we bedenken dat het hier alleen maar om het elektriciteitsverbruik gaat, en dat de ruime beschikbaarheid van waterkracht, zoals in Noorwegen, en de aanwezigheid van veel industrie, zoals in Luxemburg, het hoofdelijk elektriciteitsverbruik sterk beïnvloeden. De tabel geeft het elektriciteitsverbruik voor slechts enkele landen, maar het is overduidelijk dat de meerderheid van de bevolking in de wereld aanzienlijk minder elektrische energie verbruikt dan wij in Nederland.

Noorwegen	2050 Watt
Canada	1326
Luxemburg	1245
IJsland	1205
Zweden	1136
U.S.A.	1073
Nederland	410
Gehele wereld	186

Tabel 2: Elektriciteitsverbruik in enkele landen vermeld als gemiddeld vermogen per hoofd van de bevolking gedurende het jaar 1975.

Na deze beschouwingen over de huidige situatie kunnen we proberen een blik in de toekomst te slaan. Van de tweede nota 'Energiebeleid' is onlangs het eerste deel uitgekomen (8). Voor ons onderwerp zou het derde deel, dat gaat over de brandstofinzet in elektriciteitscentrales, nog meer van belang zijn. Enkele van de nu gepubliceerde voorspellingen over de elektrische energievoorziening zijn samengevat in tabel 3. Deze gegevens zijn ontleend aan twee energie-scenario's die door het Centraal Planbureau zijn ontwikkeld ten behoeve van de energienota. Uiteraard zijn voor het opstellen van deze scenario's vele veronderstellingen nodig, die hier niet verder besproken kunnen worden. Zoals in tabel 3 is te zien wordt er een duidelijke groei in het elektriciteitsverbruik verwacht.

Dat is niet alleen het geval in het hoge scenario, waarvoor de cijfers zijn weergegeven in de linkerkolom van tabel 3, maar ook in het lage scenario waarvoor de cijfers in de rechterkolom zijn weergegeven. Naast de getallen over het totale verbruik per jaar voor heel Nederland en de getallen voor het gemiddeld opgenomen vermogen per inwoner, zijn vooral van belang de schattingen voor het benodigde vermogen, het noodzakelijk geachte vermogen van alle elektriciteitscentrales in Nederland. Vergelijkt men deze getallen met het totale netto opgesteld vermogen van de openbare elektriciteitscentrales, thans circa 15 GW, dan blijkt dat in de tweede helft van de tachtiger jaren nieuwbouw van centrales noodzakelijk is. Op welk moment deze nieuwe centrales noodzakelijk zullen zijn, hangt af van de vraag of de Nederlandse economie zich volgens het hoge of het lage scenario zal ontwikkelen. Daarnaast is het echter zo dat, los van de mogelijke vraagontwikkeling, nieuwbouw in de jaren negentig toch nodig zal zijn om het wegvallen van verouderd produktievermogen op te vangen. In alle gevallen moet er dus beslist worden welke energiebronnen men wil gebruiken in de nieuwe centrales, en die beslis-

sing kan niet al te lang worden uitgesteld.

Jaar	1985		1990		1995		2000	
	H	L	H	L	H	L	H	L
Totaal verbruik in Nederland, in TWh	66	63	75	68	85	73	95	78
Benodigd vermogen van centrales, in GW	15,6	14,8	17,9	16,0	20,0	17,1	22,4	18,3
Gemiddeld vermogen per inwoner, in W	538	513	604	548	682	585	759	623

Tabel 3: Toekomstig elektriciteitsverbruik in Nederland volgens energie-scenario's, opgesteld door het Centraal Planbureau. De beide scenario's worden onderscheiden als hoog en laag (H en L).

Die conclusie brengt ons dan meteen midden in de energieproblematiek. Allerlei vragen dringen zich dan op. Willen we kernenergiecentrales of, kunnen de centrales met kolen gestookt worden? Is een verdergaande economische groei noodzakelijk, of kunnen we een stap achteruit doen met alle wereldwijde consequenties van dien? Zijn de grootschalige oplossingen wel de goede, of kunnen we op kleine schaal oplossingen zoeken, ook in ons dichtbevolkte land?

Haal ik nu te veel overhoop bij een simpel onderwerp als hoogspanning? Het lijkt mij van niet. In de eerste plaats tonen pamfletten van actiegroepen tegen kerncentrales naast de dreigende reaktorkoepel heel vaak ook hoogspanningsmasten. En het in Duitsland uitgekomen 'Handbuch zur Selbsthilfe', een handleiding voor saboteurs van kernenergie-installaties, schijnt te adviseren die sabotage-acties te richten op hoogspanningsinstallaties, omdat dat minder risico oplevert dan een aanslag op de kerncentrale zelf (9). In de tweede plaats laat het zich aanzien dat het transport van elektrische energie in de toekomst een nog belangrijker rol zal spelen. Bij een groot aantal van de voorgestelde oplossingen voor het energieprobleem wordt elektriciteit opgewekt, zodat hoogspanningsleidingen nodig zullen zijn. Ik denk daarbij aan grote en efficiëntere thermische centrales, aan nucleaire reaktorparken, aan de wat verder in de toekomst liggende fusie-reaktor, die ook groot lijkt te worden, of aan de in tropische oceanen drijvende elektrici-

teitscentrales die gebruik maken van het temperatuurverschil van het water aan de oppervlakte en op grote diepte.

Omdat het verband tussen hoogspanning, de elektrische energievoorziening en de energiecrisis zo duidelijk is, wil ik een aantal opmerkingen over de energieproblematiek maken.

1. Misschien haast net zo zorgelijk als de energieproblematiek zelf is de toenemende polarisatie binnen de maatschappij, waardoor redelijke discussies haast onmogelijk worden. Deze polarisatie schept diepe kloven tussen de mensen en veroorzaakt zoveel onbegrip dat je soms aan de babylonische spraakverwarring moet denken. De aarde is nu echter te klein geworden om bij elkaar weg te trekken, we zullen de spraakverwarring nu moeten oplossen door elkaars taal te leren, om zo de kloven te overbruggen.
2. Een soortgelijk communicatieprobleem werd aangeduid in het congres 'Chips en werk', waar Davidse naar aanleiding van de opkomst van de chips in het dagelijks leven zei: 'Met alle macht moet worden voorkomen dat er een nieuw onmondig proletariaat ontstaat, dat bij gebrek aan elementair inzicht in wat zich afspeelt in de wereld waarin het leeft, volledig afhankelijk is van een meer of minder welwillende kaste, die dit inzicht wel heeft' (10). Het lijkt me dat dit gevaar, dat dreigt bij invoering van de chips, al lang aanwezig is voor wat betreft het gebruik van energie. Veel mensen hebben er geen flauw idee van wat zich onder de motorkap van hun auto afspeelt of hoe de elektriciteitsvoorziening en hun elektrische apparaten werken. Sterker nog, sommige mensen zijn er trots op dat ze van deze zaken niets begrijpen. Je vraagt je af wat er allemaal gedaan zou moeten worden in het onderwijs en in de publiciteit om hier iets aan te veranderen. Daarbij zal men zeker begrip moeten zien te kweken voor de omvang van het energieverbruik en voor de schaal van de apparatuur die in de energietechniek wordt gebruikt. Het gaat wat ver, maar je vraagt je af of discussies over energie niet meer rendement zouden hebben als ze voortaan bij het licht van knijpkatten werden gehouden.
3. Het toepassen van kernenergie kan, bij onvoldoende controle, leiden tot een verdere verspreiding van kernwapens. Dit gevaar mag niet onderschat worden, maar evenmin mag men de risico's over het hoofd zien van een situatie waarin de oliereserves opraken en daardoor grote economische problemen ontstaan.
4. Of we het willen of niet, we moeten soms beslissingen met grote

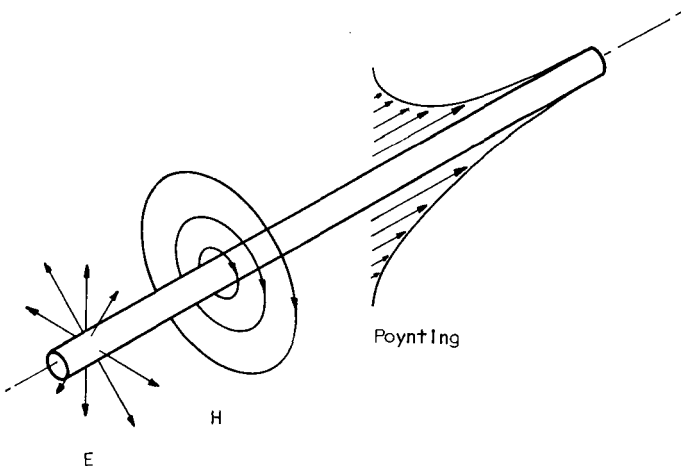
draagwijdte nemen. We kunnen daarbij met zorg denken aan de opslag van radio-actief afval, aan de toename van het CO₂-gehalte van de atmosfeer, of aan andere vervuiling afkomstig van fossiele brandstoffen. Misschien is echter nog erger wat we onze kinderen aandoen door in korte tijd op te stoken wat er aan olie en aardgas aanwezig is.

5. Aan de gevaren van kernenergie wordt veel aandacht besteed. Betrekkelijk weinig aandacht is er echter voor de slachtoffers, die vallen in het verkeer, in de mijnen en bij de olie-opsporing en -winning. Ook zonne- en windenergie hebben hun risico's; de grote opvangsystemen zijn arbeidsintensief en vereisen veel constructiematerialen, waardoor mijnbouw en werk in toeleveringsbedrijven noodzakelijk wordt (11).
6. Wij kunnen en mogen de ontwikkelingslanden niet tegenhouden als zij een groter aandeel in de energie-consumptie vragen. Zelfs als een stap terug in de ontwikkelde landen mogelijk zou zijn, dan zou toch het totale energieverbruik van de wereld stijgen.

Laten we teruggaan naar de elektriciteitsvoorziening. In een recent verschenen boek van Arthur Hailey, *Overload*, worden in geromantiseerde vorm de problemen van een gefingeerde elektriciteitsmaatschappij in Californië besproken (12). De elektriciteitsmaatschappij probeert toestemming te krijgen voor de bouw van nieuwe centrales, die hard nodig zijn gezien de te lage reserve aan opwekkingscapaciteit. Dit streven wordt gedwarsboomd door een zeer bonafide groep milieubeschermers, de Sequoia-club, een veel fellere actiegroep en een kleine groep terroristen. Interessant is, dat het boek partij kiest voor de elektriciteitsmaatschappij, echter wel met grote nadruk op de milieubescherming. De Verenigde Staten vormen een groot land, waar men zeer extreme opvattingen kan horen verkondigen. Grote groepen van de bevolking hebben zich echter niet zozeer vastgelegd op een bepaald standpunt. Ze hebben daardoor een zekere flexibiliteit behouden, die in Europa soms lijkt te ontbreken.

Laat ik nog verder teruggaan naar de hoogspanning en enkele aspecten van het vakgebied beschrijven. Elektrische energie wordt getransporteerd met bovengrondse hoogspanningslijnen of ondergrondse hoogspanningskabels. Rond de daarbij gebruikte geleiders hebben we zowel elektrische alsook magnetische velden, zoals aangegeven in figuur 4. Het elektrische energietransport vindt slechts plaats, daar waar

het elektrische en het magnetische veld tegelijk aanwezig zijn; die energiestroom is weergegeven met de Poynting-vektoren rechts in de figuur. De energiestroom loopt dus niet in de geleiders, maar in het isolerende medium rond de geleiders. Anders dan bij olie- of gasleidingen, waar de chemische energie duidelijk gelocaliseerd door de buis stroomt, speelt de omgeving bij het elektrische energietransport een essentiële rol. Dat leidt tot een aantal eisen die we aan het isolerend medium moeten stellen. De geleider moet door het isolerend medium of door aparte isolatoren op zijn plaats gehouden worden; het isolerend medium moet een hoge doorslagspanning hebben, een lage diëlektrische constante, lage verliezen, en het mag niet al te veel kosten. Eén van de problemen van de hoogspanningstechniek is dan ook goede isolatie-materialen te vinden. In de toekomstige fusie-reaktor kan het allemaal nog moeilijker worden; isolerend materiaal daar, zal bij een hoge temperatuur moeten functioneren en bovendien nog een hoge neutronenflux te verwerken krijgen.



Figuur 4
Rond een stroomvoerende geleider zijn zowel elektrische (E) als magnetische (H) velden aanwezig. De energie stroomt daar, waar beide velden aanwezig zijn, en vloeit dus buiten de geleider, zoals is aangegeven met de Poynting-vektoren rechts.

De hoge elektrische velden in de hoogspanningstechniek veroorzaken grote energie-dichtheden. Bij een gehele of gedeeltelijke doorslag in zo'n gebied van hoge energie-dichtheid kunnen zeer hoge frequenties optreden, omdat de energie zeer snel naar de plaats van de doorslag kan vloeien. Dit idee werd indertijd al toegepast door Hertz in zijn proeven met radiogolven en het vormde ook de basis voor de oude vonkzenders. Het principe werkt uiteraard nog steeds, en dat betekent dat er in de hoogspanningstechniek na doorslagen allerlei hoge en lage frequenties tegelijk kunnen optreden, waardoor vele problemen kunnen ontstaan.

De in de hoogspanningstechniek toegepaste onderdelen zijn vaak groot van omvang. De toegepaste weerstanden, condensatoren, zelfinducties en transformatoren kunnen daarom niet altijd met de netwerktheorie beschreven worden maar vereisen een toepassing van de veldentheorie (13). Nu is een consequent en goed toepassen van de Maxwell-wetten op omvangrijke apparaten moeilijk. Daardoor, en omdat de overgang van de netwerktheorie naar de veldentheorie vaak onvolledig wordt gemaakt, ontstaat er soms verwarring. Deze verwarring is heel duidelijk als het gaat over afschermingszaken, over aardsystemen en over het verschil tussen spanning en potentiaal. Zo spreekt Kùpfmùller (14) in zijn boek ten onrechte over het potentiaal-verval over een spoel, spanningsdelers voor hoogspanningspulsen worden in de Engelse literatuur (15) ten onrechte potential-dividers genoemd, terwijl een andere auteur (16) in een standaardwerk over de bliksem, zonder blikken of blozen spreekt over het potentiaal-verval langs een bliksemafleider.

Een laatste aspekt van het hoogspanningswerk dat ik wil noemen is het grote verschil in amplituden van interessante verschijnselen. Soms bekijkt men volledige doorslagen, waarbij ladingsverschuivingen van de orde van grootte van 1 Coulomb optreden, maar ook is het zeer interessant om partiële ontladingen te bestuderen, waarbij ladingsverschuivingen van 1 pC of minder optreden. Metingen aan deze zwakke partiële ontladingen en allerlei andere metingen aan verschijnselen, die aan de doorslag voorafgaan, zijn alleen mogelijk als een goede afscherming aanwezig is. De met veel zorg gebouwde, goed afgeschermd hoogspanningshal hier in Eindhoven biedt voor dit soort metingen unieke mogelijkheden.

Dames en heren, dat ik hier deze intreedende mag houden, is te danken

aan de steun en de positieve beïnvloeding die ik van diverse kanten heb mogen ondervinden. Mijn ouders hebben mij zeer veel meegegeven, en hun rol wordt zeer onvoldoende omschreven door te zeggen dat zij mij de gelegenheid gaven te studeren. Even moeilijk is het de rol van mijn vrouw te beschrijven, ik zou verhuizingen van en naar Amerika kunnen noemen, maar beter is het te zeggen dat ik zonder haar steun hier niet zou staan.

Ik ben ook zeer dankbaar voor alles wat ik heb geleerd en de vriendschap die ik heb ondervonden tijdens mijn lange jaren op het FOM-Instituut voor Plasma-fysica in Jutphaas. Graag wil ik met erkentelijkheid de namen noemen van prof. Braams, de directeur van het Instituut en tevens mijn promotor, en van dr. Bobeldijk, die thans de leiding heeft van de Pinchgroep in Jutphaas. In de beginjaren was dr. Rietjens leider van deze groep en ik ben blij hier weer met hem als collega te mogen samenwerken.

Ook denk ik met plezier terug aan de periode in de Controlled Thermonuclear Research-Division van het Los Alamos Scientific Laboratory in Nieuw Mexico, U.S.A. De contacten met de collega's waren erg prettig en het was interessant om van dichtbij en intensief mee te maken hoe men in Amerika denkt en werkt op het gebied van fusie en van het energievraagstuk.

Graag wil ik allen danken die hebben bijgedragen tot mijn benoeming tot hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Dames en heren, hoogleraren, lektoren en medewerkers van de Afdeling der Elektrotechniek. In 1957 heb ik enkele weken gewerkt in de Afdeling der Algemene Wetenschappen van deze Technische Hogeschool. Nu hier terug te komen als hoogleraar binnen de Afdeling der Elektrotechniek is een geheel andere zaak. In het bijzonder is dat zo, nu ik moet trachten mijn voorganger prof. ter Horst op te volgen. Ik betreur het, hem niet van dichtbij te hebben gekend, maar ik vind vrijwel dagelijks in mijn directe werkomgeving de duidelijke sporen van zijn grote werkracht en nauwgezetheid.

Ik ben dankbaar voor de goede contacten die ik binnen de Afdeling al heb en voor de vriendelijkheid waarmee men mij tegemoet is getreden. Ik hoop nog veel meer contacten te zullen leggen, omdat ik geloof dat

goede contacten tussen de vakgroepen wenselijk zijn om aan de studenten een bredere blik op de elektrotechniek mee te geven, waardoor zij later in hun werk als ingenieur ook buiten het vakje van hun specialisatie kunnen kijken.

Mevrouw, mijne heren medewerkers van de Vakgroep EHO, Technieken van de Energievoorziening. De stimulerende brieven die Lector Van Den Heuvel mij in Amerika toezond, waren de eerste serieuze contacten met Uw vakgroep. Na mijn aankomst hebben ook vele anderen mij hartelijk ontvangen, waarbij ik de namen van dr. Hosselet en prof. Van Hoek wil noemen. Dank zij uw aller hulp ben ik door de ergste inschakelverschijnselen heengekomen. Ik vertrouw dat we vele jaren van goede samenwerking en interessant werk tegemoet mogen zien.

Dames en heren studenten, het college geven heb ik tot nu toe een plezierig deel van mijn werk gevonden en ik hoop dat mede daardoor het college lopen voor U beter verteerbaar zal zijn. Via die college's en via het onderzoek in de Vakgroep zal ik met velen van U in aanraking komen. Daarbij zal ik proberen op U over te brengen dat het werken op het gebied van de energietechniek en de hoogspanning, door de relatie met de energiecrisis en dank zij de vele facetten van het vak, een uitdagende bezigheid is.

Ik dank U voor Uw aandacht.

Literatuur

- 1 Haase H. (1977), *Electrostatic Hazards*, Verlag Chemie, Weinheim.
- 2 Kuhn L. en Myers R.A. (1979), *Scientific American* 240 120.
- 3 Yonas G. (1978), *Scientific American* 239 40.
- 4 Voeten M.J.J.M. (1972), *Elektrotechniek* 50 251.
- 5 Elektriciteit in Nederland 1978 (1979), Uitgave Directie Arnhemse instellingen van de Elektriciteitsbedrijven.
- 6 Elektriciteitsplan 1983/84 en Toelichting (1978), Uitgave N.V. Samenwerkende Elektriciteits Productiebedrijven, Arnhem.
- 7 Information Please Almanac 1978 (1978), Information Please, New York.
- 8 Nota Energiebeleid, Deel 1/Algemeen, (1979), Staatsuitgeverij, Den Haag.
- 9 Gegevens ontleend aan Magazine Time, nummer van 3 sept. 1979, pag. 9.
- 10 Davidse, J. 'Leren voor een leven met micro-elektronica'. In: Chips en Werk, congres gehouden aan de TH Twente (Enschede), 6 en 7 sept. 1979, (Congresverslag in druk).
- 11 Inhaber H. (1979), *Science* 203 718.
- 12 Hailey, Arthur (1979), *Overload*, Doubleday, Garden City, New York.
- 13 Hammond P. (1979), *Electronics and Power* 25 205.
- 14 Küpfmüller K. (1959), *Einführung in die theoretische Elektrotechnik*, Springer Berlin p. 237.
- 15 Craggs J.D. en Meek J.M. (1954), *High Voltage Laboratory Technique*, Butterworths London, Chapter 9.
- 16 Baatz H. in hoofdstuk 19, *Protection of Structures* uit boek *Lightning* (1977) Volume 2, Edited by R.H. Golde, Academic Press London.

De figuren 1, 2 en 3 zijn welwillend ter beschikking gesteld door de Provinciale Limburgse Elektriciteitsmaatschappij.