

Opto-elektronica

Citation for published version (APA):

Diemer, G. (1961). *Opto-elektronica*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1961

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.

OPTO-ELEKTRONICA

Dr. G. DIEMER

OPTO-ELEKTRONICA

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN
HET AMBT VAN BUITENGEWOON HOOGLEERAAR

IN DE AFDELING DER

ALGEMENE WETENSCHAPPEN

AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL

TE EINDHOVEN

OP VRIJDAG 6 OKTOBER 1961

DOOR

Dr. G. DIEMER

*Mijne Heren Curatoren,
Mijne Heren Hoogleraren en Adviseurs,
Dames en Heren leden van de wetenschappelijke,
technische en administratieve staf,
Dames en Heren studenten,
en voorts,
Gij allen die door Uw aanwezigheid blijk geeft van Uw belangstelling,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Gaarne wil ik dit uur gebruiken om U iets te vertellen over mijn vak, de opto-elektronica, een klein domein in het gebied der technische wetenschappen. Ik zal er met U rondwandelen en onderwijl trachten een beschrijving te geven van de stand van onze gewassen. Hierbij zal ik af en toe ook de aandacht richten op de grotere omliggende velden van fysica en techniek, opdat wij het eigen domein in juistere proporties zullen zien.

De aard van ons werk is als dat van tuinlieden en kwekers; bepaalde struiken worden met zorg geplant en bemest, andere bijgesnoeid of soms met wortel en tak uitgeroeid. Met enthousiasme en geduld zoeken de bewerkers van de akker naar nieuwe variëteiten. De vakman voelt zich gelukkig als de vruchten van zijn werk ook door anderen worden geapprecieerd. Ik zal proberen U nader kennis te laten maken met de vaklieden, die wij op onze wandeling ontmoeten. Hoe hebben zij hun vak geleerd? Op welke wijze dragen zij hun ervaringen en inzichten over aan de nieuwelingen in het vak? Hoe komen de gewassen aan huns soms bizarre namen?

Dat ijle plantje, dat zich tot in alle uithoeken van ons domein heeft genesteld, heet constante van Planck. Het draagt de naam van de grote kweker, die met zijn diepteploeg de structuur van onze akkers voorgoed heeft gewijzigd. Deze mossoort, waarvan men de sporen eveneens bijkans overal in de "hortus physicus" terugvindt, heet daarentegen kortweg: elektron. Persoonlijk had ik liever gezien, dat men hem naar "Old J.J." had genoemd, de vakman die deze soort voor het eerst in reïncultuur heeft gekweekt.

Daar, in die eewenoude hoek, staan een paar stoere Newton-eiken. Nog immer massief, al heeft ongeveer een halve eeuw geleden Albert ze in zijn jeugdig enthousiasme ook iets beknot, toen hij de gladde omheining van relativiteitsligusters aanbracht. De sierlijke reuzen van Maxwell-beuken, die in hun majestueuze volwassenheid zowel nu als toen bijna al het andere gewas overschaduwden, bleven bij Alberts ingreep echter ongeschonden. Die rij van wuivende Schrödinger-populieren daar is pas enkele decennia geleden geplant. Snel zijn ze opgeschoten en nu dreigen ze met hun wortels Alberts omheining in de grond aan te tasten. Sommigen van onze bodemdeskundigen maken zich hierover wel zorgen, maar overigens koesteren wij tuinlieden ons graag in de schaduw van al dit geboomte en voelen wij ons veilig in dit beschermd domein. Zolang wij "hegend, pflanzend, wachsend" in onze eigen tuin nuttig en aangenaam bezig zijn, mogen we, geloof ik, ons vak met recht als een waardig en zinvol ambacht beschouwen. Helaas kunnen echter sommigen in hun vak-enthousiasme de verleiding niet weerstaan de hele wereld te overdekken met monocultures van hun gewassen, die buiten het eigen domein - soms tot grote schrik van hun kwekers - tot verstikkende woekerplanten kunnen ontaarden. Zeer ondoordacht zijn zij vaak "met klompen geschreden door de bloembedden" van anderer zorgvuldigst gekweekte kruiden en ook ikzelf, mijne toehoorders, moet oppassen dat ik met deze verhandeling over mijn vakgebied niet evenzeer de perken te buiten ga.

Ik heb trouwens toch al de beeldspraak langer volgehouden dan in oraties als deze te doen gebruikelijk is en ik kan me voorstellen dat sommigen Uwer de twijfel bekruipt of zij wellicht in Wageningen in plaats van in Eindhoven zijn terechtgekomen. Maar wat is beeldspraak? Er is geen spraak dan beeldspraak. Ook in de vaktaal. Verschil is er alleen in de mate van kreupelheid en om het verwijt te ontlopen, dat mijn beeld langzamerhand geen enkel been meer heeft om te gaan, beloof ik van nu af wat concreter te worden door de aandacht te richten op de licht- en kleureffecten die we in mijn vakgebied kunnen waarnemen.

Opto-elektronica is een term, die in de vakliteratuur in de afgelopen jaren burgerrecht heeft verkregen voor dat gedeelte der vaste-stoffenfysica en techniek, dat zich bezig houdt met de wisselwerking tussen licht en elektronen in de vaste stof. Meer in het bijzonder kunnen we hierin twee groepen van verschijnselen onderscheiden, die in zekere zin complementair zijn, nl. aan de ene kant de verandering in de elektrische eigenschappen van bepaalde halfgeleiders en isolatoren,

die wordt teweeggebracht tijdens de bestraling met licht, en aan de andere kant de verandering in de optische eigenschappen van dergelijke vaste stoffen, die optreedt als zij worden onderworpen aan de inwerking van elektrische of magnetische energie. Als we hier even afzien van de derde vorm van energie — de thermische energie of warmte — die bij nagenoeg alle verschijnselen in de vaste stof een begeleidende dan wel een fundamentele rol speelt, zijn deze beide complementaire groepen, aldus gedefinieerd, afgegrensd van twee andere ermee nauw verwante gebieden. Dit zijn: de *elektronica* van de vaste stof, waarin zowel de toegevoerde energie als de daardoor opgewekte verschijnselen van elektrische af magnetische aard zijn, en de *spectroscopie* van de vaste stof, waarbij de toegevoerde energie en de verschijnselen beide optisch van aard zijn.

De genoemde gebieden zijn overigens in de praktijk — en gelukkig! — niet streng gescheiden en het is juist hun onderlinge wisselwerking, die vaak aanleiding geeft tot de ontdekking van interessante nieuwe effecten of tot de praktische toepassing daarvan. Zo is bij fluorescentie — een zuiver optisch verschijnsel, waarbij met behulp van optische energie lichtverschijnselen worden opgewekt — de wisselwerking van licht met de elektronen in de vaste stof een essentiële tussenstap in het proces. Door het verkregen inzicht in deze elektronische processen is het zeer onlangs gelukt in de zogenaamde „laser” een vorm van fluorescentie op te wekken, waarbij in tegenstelling tot de overige tot dusver bekende vormen van lichtopwekking de lichtgolven coherent, d.w.z. in een regelmatig ritme worden uitgezonden. Daarbij heeft men gebruik gemaakt van de zogenaamde gestimuleerde emissie, een verschijnsel, dat uit een theoretische analyse van de stralingswetten al meer dan vijftig jaar bekend was en dat reeds een tiental jaren in de „maser” werd toegepast voor het opwekken en versterken van microgolven.

Ik zou mij hier nu verder evenwel willen beperken tot de twee genoemde complementaire gebieden der opto-elektronica. Daar waar optische stralingsenergie resulteert in een variatie van elektrische eigenschappen, zal ik korthedshalve spreken van een r.e.-verschijnsel (r van radiatie of straling, e van elektriciteit), in het alternatieve geval van e.r.-verschijnsel. Ook hier is de verscheidenheid der verschijnselen nog zo groot, dat het mij verstandig lijkt uit elk dezer beide gebieden een representatief effect te kiezen voor een nadere bespreking.

Mag ik dan eerst Uw aandacht vragen voor het r.e.-verschijnsel der foto geleiding? Hierbij wordt in een vaste stof, zoals bijv. een cad-

miumsulfide kristal, waarin van nature weinig of geen vrij bewegelijke elektronen voorkomen, tijdens bestraling met licht het aantal dezer vrije ladingsdragers aanzienlijk verhoogd, waardoor het elektrisch geleidingsvermogen van het kristal evenredig met dit aantal toeneemt. Voor de sprong, die de elektronen moeten maken om van hun natuurlijke, gebonden toestand vrij te raken, wordt de energie geleverd door de op het kristal vallende lichtquanta of fotonen; vandaar de term foto-geleiding. Zo'n fotogeleider is dus te beschouwen als een schakelaar voor elektrische stromen met een eindige inwendige weerstand, waarbij de hefboom van de schakelaar wordt bediend door het opvallende lichtsignaal. Men kan de efficiëntie van zo'n besturing aangeven door de vermogenversterking, dat is de verhouding van het elektrische vermogen dat door het kristal kan worden in- en uitgeschakeld, tot het stralingsvermogen dat we hiertoe op het kristal moeten laten vallen. Deze vermogenversterking kan voor cadmiumsulfide de verrassend hoge waarde van vele miljoenen keren bereiken. Door zo'n gevoelig r.e.-element te combineren met een e.r.-element kunnen we opto-elektronische „recht uit“-versterkers construeren. Dit combineren kan op twee verschillende manieren geschieden.

In de (e.r.-r.e.)-combinatie, waarbij de koppeling tussen de beide elementen door straling geschiedt, zijn zowel het besturende signaal als het afgegeven vermogen van elektrische aard, zodat we het geheel als een elektrische versterker kunnen beschouwen. Bij de (r.e.-e.r.)-combinatie is de onderlinge koppeling elektrisch en zijn besturend en afgegeven vermogen beide een stralingssignaal. Hiermede is het dus mogelijk stralingsversterking te bereiken, en indien vele van dergelijke combinaties in de vorm van lagen in een vlak zijn verenigd, is hiermee beeldversterking mogelijk. Maar, zoals we straks zullen zien, hebben de tot dusver beschikbare e.r.-elementen bij de omzetting van elektrische energie in licht een zo laag rendement, dat we bij dit element afzonderlijk van een verzwakking in plaats van een versterking moeten spreken. Juist daarom is voor deze toepassingsmogelijkheden een hoge waarde van de vermogenversterking in de fotogeleider van uitzonderlijk belang.

Voorwaarden voor deze grote versterking zijn: in de eerste plaats de mogelijkheid het materiaal te onderwerpen aan een sterk elektrisch veld; vervolgens: de vrijgemaakte ladingsdragers moeten een grote bewegelijkheid en in hun vrije toestand een grote levensduur hebben, d.w.z. het tijdsverloop tussen het moment van vrijmaken en terug-

vallen in de gebonden toestand moet groot zijn. Dit tijdsverloop geeft aan de in- en uitschakeling van de fotogeleider een traagheid, die nooit kleiner kan zijn dan het genoemde tijdsverloop. Het is dus duidelijk dat fotogeleiders die hun hoge gevoeligheid ontleen aan een grote levensduur der vrijgemaakte elektronen, een inherente traagheid moeten bezitten. Bij cadmiumsulfide is deze traagheid van de orde van 0,1 tot 0,01 seconde, bij het verwante cadmiumselenide kunnen we schakeltijden van ongeveer 1 milliseconde bereiken. Dienovereenkomstig is hier de versterking ook lager. Zoals gezegd, is bij de huidige ongunstige eigenschappen van de bestaande e.r.-elementen een zeer grote versterkingsfactor van de fotogeleider nodig om de combinatie bruikbaar te maken. De genoemde eisen bepalen de richting bij het zoeken naar materialen en naar prepareringscondities, die ons gevoelige, snelle fotogeleiders kunnen opleveren. Het zoeken hiernaar is van groot belang, omdat een vergroting van de schakelsnelheid de toepassingsmogelijkheden sterk verruimt.

Ondanks hun matige schakelsnelheid vertonen de huidige combinaties evenwel reeds thans zoveel aantrekkelijke aspecten, dat zij zeker in de naaste toekomst in beperkte gebieden in de praktijk zullen worden toegepast. Een aspect is, dat het schakelen door middel van lichtsignalen ons mogelijkheden tot koppeling en ontkoppeling van signalen geeft, die in geheel elektrisch werkende circuits moeilijk zijn te verwezenlijken. Kortweg kan men dit illustreren door te wijzen op het feit, dat in tegenstelling tot elektrische geleiders twee lichtstralen geen onderlinge kortsluiting veroorzaken, wanneer zij elkaar snijden. Een ander aspect kan met het Amerikaanse modewoord "molecular electronics" worden aangeduid: de hier besproken opto-elektronische schakelingen vervullen hun functie dank zij de eigenschappen van de stof zelf, die om de signalen op de juiste manier te verwerken alleen maar van elektroden behoeft te worden voorzien, waarop een spanning wordt gezet. Geconcentreerde additionele koppel-elementen, zoals condensatoren, weerstanden, zelfinducties, zijn hierbij niet nodig en daardoor is het mogelijk met eenvoudige laagconstructies, waarop meer of minder ingewikkelde elektrodesystemen worden aangebracht (bijv. door een druktechniek) een complete schakeling van zeer compacte vorm te vervaardigen. Verdere verbeteringen mogen echter eveneens worden verwacht op het gebied van de e.r.-elementen, waarvan ik thans de momenteel voor de praktijk belangrijkste representant, dat is de elektroluminescentie, zou willen bespreken. Alvorens hiertoe over te gaan, wil ik evenwel gaarne bij wijze van

intermezzo, U een kleine demonstratie geven van de opto-elektronische schakeling, die hier voor mij staat.

Een fotogeleider en een elektroluminescerend paneel zijn hier elektrisch in serie geschakeld en staan gezamenlijk onder spanning. Het licht van het paneel kan gedeeltelijk terugvallen op de fotogeleider, waardoor het wordt bestuurd: m.a.w. we hebben in deze (r.e.-e.r.)-schakeling een optische terugkoppeling aangebracht. Evenals bij andere teruggekoppelde versterkers kan dit systeem in twee verschillende stabiele toestanden verkeren. Dit is hier visueel direct waarneembaar door het al of niet oplichten van het elektroluminescentiepaneel. Zoals U ziet, is het zwakke lichtsignaal van een lucifer, of zelfs het onzichtbare infrarode „licht” van een sigaar, in staat de schakeling van de ene toestand blijvend in de andere toestand te brengen.

Richten wij thans onze aandacht op de elektroluminescentie. Het mechanisme van de elektroluminescentie heb ik eens in een overzicht-artikel als volgt omschreven: "Van andere bekende wijzen van luminescentie, bv. katodestraalluminescentie (gebruikt in televisie-weergeefbuizen) en fotoluminescentie (gebruikt in T.L.-lampen) verschilt de luminescerende werking van een lichtpaneel alleen door de wijze waarop de vaste stof wordt geëxciteerd. Bij katodestraalluminescentie wordt deze excitatie bewerkstelligd door beschieting met een bundel snelle elektronen, die bij het binnendringen in de stof bepaalde gebonden elektronen in een toestand met grotere energie brengen, waardoor zij in staat zijn bij hun terugvallen naar de grondtoestand lichtquanta $h\nu$ uit te zenden (h = constante van Planck = $6,62 \times 10^{-34}$ joulesec; ν = frequentie van het licht = aantal trillingen per seconde). Bij fotoluminescentie vindt een zelfde excitatie plaats door absorptie van op de stof vallende kortgolvlige straling, bv. ultraviolette quanta. De werking van het elektroluminescerende lichtpaneel blijkt men het best te kunnen begrijpen door te onderstellen dat in de stof bewegelijke elektronen kunnen optreden, die kinetische energie uit het aangelegde elektrische veld kunnen opnemen en, als zij voldoende energie bezitten, door botsing met gebonden elektronen in het kristal deze in een aangeslagen toestand brengen."

Tot zover dit citaat. Mag ik thans aannemen dat U weet wat wij onder elektroluminescentie verstaan? Van de niet-vakgenoten onder U mag ik dit nauwelijks verwachten, ook al is bij deze beschrijving er naar gestreefd het vakjargon tot een minimum te beperken, terwijl het artikel nog is bewerkt door een beroepsredacteur, die ervaring heeft

in het zo eenvoudige en duidelijk mogelijk formuleren van technisch-wetenschappelijke beweringen. Ik stel mij daarom voor een analyse van dit stukje proza te geven en een toelichting op de erin gestelde beweringen, die mij in de rest van dit uur tegelijkertijd de gelegenheid zal bieden iets meer over de achtergronden en methoden van ons onderzoek te vertellen.

Ik wil deze analyse graag beginnen met enkele opmerkingen over de gebruikte taal. De fysicus bezigt in zijn dagelijks werk, in zijn denken, voor het formuleren van zijn denkbeelden, in zijn omgang met andere onderzoekers (collegae, leermeesters, leerlingen) een taal, die hem vertrouwd is, inde meeste gevallen zijn moedertaal. In de stijl van het beschouwde citaat komt evenwel iets tot uiting van de typische wijze waarop wij in het algemeen in onze publikaties de taal gebruiken. In afwijking van wat wij in onze dagelijkse discussies doen en in strijd met hetgeen er werkelijk in het laboratorium heeft plaatsgevonden, neigen wij met ons kwistig gebruik van de lijdende vorm en van het "pluralis physicus" naar een onpersoonlijke verteltrant, waarvan een suggestie van objectiviteit dient uit te gaan. Onze persoonlijkheid offeren wij aldus nederig op het altaar van de "herhaalbaarheid".

Waarde toehoorders, het is vaker gezegd: niets is werkelijk herhaalbaar. Wat echter wezenlijk *on*herhaalbaar is, dat is het invoeren van nieuwe beelden en begrippen, gelanceerd door onze grote, gezaghebbende onderzoekers. Zij beïnvloeden aldus de denktrant der met en na hen levende onderzoekers dermate, dat wetenschap en techniek alleen al hierdoor een zich niet repeterend, historisch ontwikkelingsproces doorlopen. Het massabegrip van NEWTON, de constante van PLANCK, het atoommodel van BOHR, het relativiteitsbeginsel van Einstein, zij blijven altijd hun sporen nalaten in ons domein, ook al gaan wij door met ploegen en bebouwen van dezelfde akkers. Ook de wetenschappelijke taal, voertuig, stimulans en afspiegeling van ons wetenschappelijk denken, ondergaat een gericht, niet herhaalbaar groeiproces. En alleen al omdat het scheppen van nieuwe begrippen, het vormen van nieuwe beelden een creatief proces is, evenals elk creatief werk meer gebaseerd op fantasie, intuïtie, moed, dan op de rede, zal de momentele inhoud ook van de zogenaamde exacte wetenschappen immer essentiële niet-rationele elementen blijven bevatten. Het geniale van grote onderzoekers ligt dan ook in een combinatie van genoemde eigenschappen, waardoor zij niet schroomden tegen de schijnbaar dwingende logica van het bestaande, rationeel geordende ervarings-

materiaal in, onbevooroordeeld te zeggen, hoe zij de dingen zien en denkend verwerken. Het was niet logisch, dat Planck om de experimenteel bekende stralingswetten te verklaren er van afzag de energie van zijn stralingspakketjes naar nul te laten gaan; het was onlogisch toen Bohr postuleerde, dat een in zijn gesloten baan rondlopend elektron niet straalt. In de techniek vinden wij een duidelijke erkenning van de waarde dezer niet-rationele factoren in de praktijk van de octrooiverlening, waarbij een werkelijke uitvinding eer dient te berusten op een onverwachte, verrassende gedachtesprong dan op een conclusie, die door logisch redeneren uit bestaand ervaringsmateriaal is opgebouwd.

Maar er is meer. Immers, ons onderzoekingswerk, het opgroeien tot en het werken als fysicus speelt zich - ondanks onze gedwongen afzondering in tamelijk streng van de buitenwereld afgesloten instituten - minder dan ooit af in een ivoren toren. Het is door vele draden van maatschappelijke en andere menselijke activiteiten verbonden met het volle leven. Leren en het geleerde verwerken, de richting van ons onderzoek bepalen en in groepsverband trachten in deze richting verder te komen, in al deze stadia blijkt de taal veel meer te zijn dan alleen maar een codesysteem voor het overbrengen van signalen.

In den beginne was het Woord. Goethe's Faust, voor mij in menig opzicht *de* representant van de wetenschappelijke onderzoekers, aarzelt bij deze tekst en zet bij nader inzien hiervoor achtereenvolgens in de plaats: de zin, de kracht, de daad! Als ik echter het spoor van ons denken terug volg, kom ik bij: het beeld, bij het merkwaardige vermogen van de menselijke geest om de baaierd van zijn indrukken en gewaarwordingen te ordenen in beelden en begrippen. Dit begin van alle denken, meer bezwerend dan rationeel, is voorwaarde dat de taal van moeder op kind kan worden overgebracht en dat wij onze ervaringen en denkbeelden kunnen overdragen aan en ontvangen van anderen. Het leren onderkennen van de niet-rationele elementen in natuurwetenschap en techniek en de waarde ervan te beseffen heb ik ervaren als een belangrijke vordering in mijn vorming als wetenschappelijk onderzoeker.

Ik kom nu tot een bespreking van de zakelijke inhoud van het citaat over elektroluminescentie en wil daartoe beginnen met een toelichting op het begrip luminescentie.

Luminescentie is een bepaalde wijze van lichtuitstraling en wel die lichtuitstraling, waarvoor de benodigde energie niet wordt geleverd door verhitting. Het vuur, de kaarsvlam, de gasgloeikous, de elektrische gloeidraad, en ook de zon en de sterren zijn alle U welbekende vormen van lichtbronnen, die hun vermogen tot lichtuitstraling ontleen aan de verhitting. Het flitsen van de bliksem, het lichten der zee en van de lichtkevertjes, de neonreclame, de gele natrium-straatlantaarn, de T.L.-buis, het televisiescherm, de Cerenkov-straling en ook het elektroluminescerende lichtpaneel berusten daarentegen niet op verhitting en dit kunnen derhalve voorbeelden van luminescentie worden genoemd.

Waarom leggen wij bij deze definitie zozeer de nadruk op het onderscheid tussen het al of niet thermische karakter van de lichtopwekking? Voor mij geldt als belangrijkste reden, dat wij in de luminescentie ons willen distantiëren van de grove wijze van excitatie die de verhitting in wezen is. Zoals reeds gezegd, weten wij sinds PLANCK dat licht wordt uitgestraald in discrete energiesprongen, de quanta ter grootte $h\nu$, die voor het zichtbare stralingsgebied overeenkomen met elektronensprongen van 2 à 3 volt. Als wij een vaste stof verhitten, verhogen wij de thermische bewegingsenergie van het gehele ensemble der daarin aanwezige atoomkernen en elektronen.

Deze bewegingen zijn echter volkomen chaotisch en de energie die we op deze wijze aan de elektronen kunnen mededelen, schommelt om een gemiddelde waarde, die recht evenredig met de verhittings-temperatuur toeneemt. Bij temperaturen, die de ons ter beschikking staande vaste stoffen kunnen doorstaan zonder al te snel te verdampen is echter deze gemiddelde energie aanzienlijk kleiner nodig dan is voor elektronensprongen van 2 à 3 volt. Slechts enkele energierijke uitschieters van de chaotische beweging kunnen resulteren in een zo grote elektronensprong, dat een zichtbaar quantum wordt uitgestraald. Het merendeel der sprongen is te klein en levert infrarode of warmtestraling op. De directe conversie van thermische energie in licht is aldus even weinig efficiënt als wanneer wij, om een bepaalde toon aan een piano te ontlokken, niet beter weten te doen, dan het instrument van de trap af te gooien. Bij de luminescentie streeft men er naar de kunst te leren om de juiste toon aan te slaan.

Bij luminescentie denkt de fysicus echter niet alleen aan uitzending van zichtbare straling. *Elektroluminescentie* bijvoorbeeld, kan zowel uitzending van ultraviolette straling, zichtbare straling als infrarode straling betreffen. Fysisch zijn deze stralingssoorten nauw verwant:

voor ons verschillen zij alleen in de frequentie, die het hoogst is voor het ultraviolet en het laagst voor infrarood. Het gemak waarmee wij fysici de aan de zintuiglijke ervaring ontleende begrippen generaliseren, geeft ons onderzoek een wendbaarheid, waarvan degenen die zich beijveren onze vindingen in de praktijk toe te passen, wel eens de dupe worden. Het elektroluminescentie-onderzoek geeft hiervan een sprekend voorbeeld. Het elektroluminescerende lichtpaneel—in zijn eenvoudigste constructie een dunne zinksulfide-verflaag aangebracht op een dragerplaat en voorzien van elektrodelagen waarop de netspanning wordt gezet—werd aanvankelijk toegejuicht als een mogelijke vlakke lichtbron van zeer eenvoudige constructie. Toen ons echter bleek, dat zulke lichtpanelen niet zo erg goed bruikbaar waren voor verlichtingsdoeleinden—en wel om tamelijk principiële redenen, zoals ik straks nader zal uiteenzetten—hoefden wij het golf lengtegebied maar een eindje op te schuiven om een geheel ander toepassingsgebied te vinden, namelijk dat van de reeds vermelde opto-elektronische schakelingen. Voor het schakelen van elektrische signalen met behulp van stralingsquanta is het al of niet zichtbaar zijn van de straling uiteraard van geen direct belang en het blijkt nu dat hiervoor het nabije infrarood het gunstigste compromis wat betreft snelheid en gevoeligheid van de schakeling mogelijk maakt. Voor de fysicus is het variëren van de golflengte met nog geen factor twee slechts een geringe accentverschuiving, maar de verlichtingstechnicus vindt, dat de tuinman hem weer eens knollen voor citroenen tracht te verkopen. Waren het nog maar een betere soort peren geweest!

Hier in de Lichtstad mag ik mij er niet aan onttrekken U iets meer te vertellen van de redenen, waarom wij verwachten dat deze "lichtbron van de toekomst" voorlopig nog wel zijn naam al te letterlijk in ere zal houden. Het lichtpaneel voldoet weliswaar aan de gegeven definitie, waarbij werd gesteld dat de lichtuitstraling niet wordt veroorzaakt door verhitting, maar dit neemt niet weg, dat circa 99 percent van de toegevoerde elektrische energie wordt omgezet in warmte en slechts ongeveer 1 percent in licht. Zou men een gehele kamer op deze manier willen verlichten, door bijvoorbeeld de wanden en het plafond met lichtpanelen te bedekken, dan zou men ervaren dat men het Duitse "Leuchtkachel" treffend kan vertalen met: lichtkachel.

Dat het lage rendement een essentieel kenmerk is van het paneellicht, hangt samen met het mechanisme van de excitatie, waarover gesproken wordt in de laatste zin van het beschouwde citaat. In de aanhef liet ik mijn verhaal zich afspelen in de agrarische sector, maar dit ligt alweer

zo lang achter ons, dat ik, om U het mechanisme van de elektroluminescentie duidelijk te maken, het waag als plaats van handeling voor dit elektronenspel een sportveld te kiezen. De lichtemissie ontstaat tijdens een springconcours van elektronen. Geslaagde sprongen worden gevierd met het ontsteken van lichtsignaaltes en deze dartele kwanten krijgen een kleur mede, die de grootte van de sprong aanduidt. De grootste sprongen worden met violet of blauw beloofd, de kleinere achtereenvolgens met groen, geel, rood, terwijl onbeholpen, laag-bij-de-gronds gepruts met infrarood wordt afgedaan. Om te kunnen genieten van (zichtbaar) licht van een bepaalde kleur moeten we de elektronen dus dwingen de hiermee overeenkomende sprongen uit te voeren. Onze maatlat, die we gebruiken om de spronghoogte vast te stellen, hebben we geijkt in volts en we herinneren ons, dat we om zichtbaar licht te krijgen de hindernissen voor onze springers zo ongeveer tussen twee en drie volt hoog moeten maken. Dat is voor onze chemici een niet zo moeilijk karwei: zij lossen hiertoe slechts een spoortje mangaan in het zinksulfide op en bereiken hiermee dat, over het gehele zinksulfideveld verspreid, hindernissen van de juiste hoogte aanwezig zijn. Nu moet de fysicus de elektronen er nog toe brengen de sprongen goed uit te voeren. Hij legt daartoe in navolging van de Fransman DESTRIAU een elektrische spanning aan en zet aldus het gehele sportveld op een hellend vlak. Dat brengt letterlijk de spanning er in: de elektronen zetten zich in draf en enkelen, die niet teveel struikelen over de oneffenheden in het terrein, weten tussen twee opeenvolgende hindernissen zo'n vaart te ontwikkelen, dat de sprong gelukt en we verblijd worden met een bruikbaar lichtkwant. De meesten van onze rakkers zijn echter liever lui dan moe en dalen in een kalm sukkeldrafje van de helling af, glippen op slinkse wijze tussen de hindernissen door en hippen over molshopen, wat ons slechts onbruikbare zeer langgolvlige infrarode kwanten (dat is warmstraling) oplevert. De experimentator gaat de helling steiler en steiler maken om de weerbarstigen op deze wijze mores te leren, maar al spoedig gaan ze dan zo rauw te keer, dat ze het sportveld onherstelbaar beschadigen. "Het paneel is weer doorgeslagen", zucht de fysicus. Bij het trainen van de springers heeft hij dus uiteindelijk maar weinig succes en hij vertelt aan de lichttechnicus dat hij bij lichtpanelen, berustend op het Destriau-effect, genoeg zal moeten nemen met een laag rendement.

Voor een meer effectieve elektronendressuur roepen we nogmaals de chemici te hulp, hopen dat één van de vele variaties uit hun

lijvige receptenboek ons een beter sportveld voor de elektronen zal kunnen verschaffen. Denkend aan een lichtverschijnsel, dat de RUSLOSSEV reeds ontdekte, toen hij in de dagen van Rapallo speelde met een ouderwetse kristaldetector, komen we overeen het nu eens te proberen met een echte halfgeleider in plaats van met de „kwartgeleider” zinksulfide. Het halfgeleidende carborundum van de kristaldetector is evenwel voor onze chemici een niet zo erg gemakkelijk te hanteren materie en daarom nemen we het ietwat minder weerbarstige galliumfosfide, dat in zijn elektro-optische eigenschappen vele overeenkomsten vertoont met carborundum. Een galliumfosfide kristal vormt in zuivere toestand een sportterrein, waarop over het gehele veld de begane grond vol bezet is met elektronen, boven welke hoofden zich een steigerwerk uitstrekt op juist zoveel volt boven de grond, dat er af springende elektronen lichtkwanten van de gewenste kleur voortbrengen. Bij zuiver galliumfosfide is deze bovenbouw echter geheel leeg. De chemicus gaat nu op de ene helft van het speelveld, laten we zeggen de oostkant, een groot aantal donorpilaartjes bouwen, waarop elektronen zitten, die gemakkelijk kunnen overstappen op de steiger om, aangemoedigd door de alomtegenwoordige agitator BROWN daar een rondwandeling te maken. Voorlopig wagen ze het nog niet naar de volledig bezette grasmat onder hen te springen, daar de grote trainer PAULI het hun absoluut heeft verboden op de hoofden van hun soortgenoten te gaan zitten. Onze chemicus gaat nu de mogelijkheid tot springen voorbereiden door op de westhelft een aantal individuen van het volbezette veld te verwijderen (om precies te zijn, hij laat ze plaats nemen op vrij lage acceptor-barkrukjes, waarvan de poten nagenoeg geen plaats innemen op de grasmat). Aldus zijn er open plaatsen geschapen waar de springers kunnen belanden zonder ruzie te krijgen met de gevreesde PAULI. We zien nu bij de steigerlopers van de oostkant in de voorste gelederen een neiging ontstaan de sprong te wagen naar de verleidelijke lege plaatsen aan de westkant. Tegelijkertijd beginnen de oostelijke grond-elektronen naar deze lege plaatsen op te dringen waardoor in eigen gelederen nabij de scheidingslijn eveneens wat gaten ontstaan. (Ofschoon rechtzinnige toeschouwers wel eens moeite hebben ons hierin te volgen, vinden wij, ruim denkende fysici, het volkomen normaal en begrijpelijk, dat de oostelijke grensrechters deze gaten in eigen gelederen als individuen, als vreemdelingen beschouwen, waarvan een ondermijnende actie uitgaat.) De uittocht uit het eigen gebied straft COULOMB evenwel met zo'n sterk heimwee, dat aan de gebiedsoverschrijding spoedig een eind komt: COULOMB laat de vreemdelingen aan beide zijden zijn grote

krachten voelen door het gehele westveld zover op te lichten, dat het niveau van de barkrukkers gelijk wordt aan dat van de pilaarzitters. In deze vastgelopen situatie, waarin de chemicus geen licht ziet, trekt de fysicus het initiatief aan zich. Met behulp van een simpel zak-batterijtje van een paar volt, waarvan hij de pluspool verbindt met de westhelft en de minpool met de oosthelft, maakt hij de tegenwerking van COULOMB ongedaan en herstelt het oorspronkelijke niveauverschil tussen de steigerwandelaars op de oosthelft en de grasmat op de westhelft. Een onafgebroken stroom van elektronen waagt nu de sprong en in dit (ideaal gedachte) geval is elke sprong een succes. De elektrische verbindingslijnen met de negatieve en de positieve pool van de batterij zorgen respectievelijk voor de aan- en afvoer van de springers.

Het ideaal: een zeer hoog omzettingsrendement van elektrische energie in licht is in de praktijk tot dusver echter nog niet verwezenlijkt. In een intensieve samenwerking hebben fysici en chemici het rendement van dit Lossev-effect de laatste jaren weten op te voeren tot ongeveer hetzelfde peil als dat van het Destriau-effect. In tegenstelling met de situatie bij het zinksulfide-lichtpaneel is er bij de galliumfosfide-diode door het excitatiemechanisme echter geen principiële grens aan het omzettingsrendement gesteld. De voornaamste moeilijkheid om het rendement op te voeren ligt nu in een nog betere beheersing van het materiaal. De tot dusver beschikbare galliumfosfide-kristallen staan bijvoorbeeld zowel wat fysische als chemische zuiverheid betreft nog ver ten achter bij de transistor-materialen germanium en silicium. Als verontschuldiging voor onze achterstand kunnen wij vele argumenten aanvoeren, waarvan ik hier de volgende twee wil noemen: een kristal dat bestaat uit een verbinding van twee elementen als gallium en fosfor, heeft meer vrijheidsgraden, waardoor het zich aan onze beheersing kan onttrekken, dan een elementair transistorkristal; maar ook: de werkkraft, die aan het vervolmaken van de transistormaterialen is besteed, mag stellig geschat worden op tenminste een hondervoud van de aan galliumfosfide bestede activiteit. Het inzicht, dat het Lossev-effect in vele toepassingsgebieden zeer interessante perspectieven opent, begint nu meer en meer veld te winnen. Op het ogenblik dat het rendement voor opwekking van zichtbare straling nog een factor tien kan worden verhoogd, zal deze diode-lamp de "lichtbron-van-het-heden" kunnen worden, terwijl dan ook de mogelijkheid de volumineuze beeldbuizen

in televisietoestellen te vervangen door een „wandbeeld” wellicht niet langer een waanbeeld zal zijn.

Voorspellen is moeilijk, ook voor een fysicus, al heeft zijn vak de pretentie vele verschijnselen vanaf een gegeven beginsituatie in hun toekomstig verloop zeer exact te kunnen beschrijven. In mijn vertoog heb ik gewezen op de essentiële rol, die niet-rationele, niet-exacte factoren spelen bij het groei- en ontwikkelingsproces van fysica en techniek. Of wij met de Lossev-diode in de praktijk ooit een omzettingsrendement zullen bereiken van 100 percent of wellicht nog hoger - hetgeen, tussen haakjes, niet strijdig zou zijn met fysische wetten, daar een dergelijke diode in de doorlaatrichting gepoold door het zgn. Peltier-effect in staat is warmte aan de omgeving te onttrekken en om te zetten in andere vormen van energie - of wij dit zullen bereiken is een vraag, waarop U dan ook hier van mij geen antwoord moogt verwachten. Ter stumilering van het onderzoek plegen wij in de flugroep op het Nat. Lab. bij soortgelijke vragen wel een sigaar te zetten op de afloop van het experiment en ik ben straks na vijf uur ook gaarne bereid met U over de uiteindelijke uitslag van ons elektronen-springconcours een dergelijke toto-met-beperkte-inzet te entameren.

Van groter belang is echter dat wij weten, dat een Lossev-bron met een omzettingsrendement van slechts één percent reeds nu zeer bruikbare opto-elektronische schakelingen mogelijk maakt. Als de opgewekte straling hierbij minder in het zichtbare gebied valt dan in het nabije infrarood is dat, zoals ik reeds eerder heb opgemerkt, voor deze schakelingen juist een voordeel. Verder maakt de voeding met een gelijkstroom van lage spanning een veel betere aanpassing mogelijk zowel aan het fotogeleidende onderdeel van de opto-elektronische schakeling als aan andere vaste-stofelementen, zoals transistors, diodes en magnetische kernen, dan met het Destriau-paneel kan worden bereikt.

Wij hopen dat onze chemici moedig verder gaan met de vervolmaking van hun apparatuur voor de bereiding van zuiver galliumfosfide, een apparatuur die wegens de er in heersende combinatie van hoge druk en hoge temperatuur veel weg heeft van een fosforbom. Wij fysici zullen inmiddels trachten de identiteit van de boosdoeners op te sporen, de killers die nu nog de uitzending van 99 percent van de quanta in de kiem smoren.

Zeer gewaardeerde toehoorders, de dichter Hölderlin heeft in de volgende regels treffend uitgedrukt, hoe moeilijk het is voor de niet-ingewijde de essentie te ervaren van een voor hem vreemd werkgebied. "Wie enkel aan mijn plant ruikt, die kent haar niet en wie haar plukt, enkel om van haar te leren, kent haar evenmin". In hoeverre ben ik als gids op onze rondwandeling erin geslaagd de niet-vakgenoten onder U minder *om* de tuin te leiden, dan, zoals mijn bedoeling is geweest, hen er werkelijk binnen te voeren? De beantwoording van deze vraag laat ik gaarne over aan mijn gildebroeders, die de adequaatheid van het onverluchte beeldverhaal, dat ik hedenmiddag heb gebruikt als voertuig van mijn gedachten, kunnen toetsen aan de beeldspraak van de vaksymbolen en -formules.

Aan het einde gekomen van mijn voordracht zij het mij vergund mijn eerbiedige dank te betuigen aan *Hare Majesteit de Koningin*, die mij heeft willen benoemen tot buitengewoon hoogleraar aan deze Technische Hogeschool.

Mijne Heren Curatoren,

Moge ik bij dezen mijn erkentelijkheid tegenover U uitspreken voor het vertrouwen in mij, waarvan Gij blijk hebt gegeven, door mij voor te dragen voor dit ambt. Ik hoop U er hedenmiddag van te hebben kunnen overtuigen, dat het dynamische vak der opto-elektronica goed past in de aan Uw instelling heersende sfeer van enthousiasme, uitbreiding en vernieuwing; de sfeer, die het vervullen van dit ambt voor mij zo aantrekkelijk maakt.

Mijne Heren leden van de Senaat en Adviseurs,

Ik beschouw het als een eer en een voorrecht voortaan tot Uw gezelschap te mogen behoren. In de korte tijd, die ik hier op Uw campus aan de Dommel heb vertoeft, heb ik reeds ervaren, dat van Uw instituten, al doen zij — om in de trant van mijn verhaal te blijven — uiterlijk wel eens denken aan broeikassen, alle deuren wijd openstaan, zodat er een frisse wind waait. De wijze waarop Gij mij zijt tegemoetgetreden, wettigt mijn hoop, dat in mijn werk aan deze Hogeschool niet alleen de vele oude vriendschapsbanden, die ik hier reeds heb,

zullen worden onderhouden en versterkt, maar minstens zoveel nieuwe zullen groeien.

Mijne Heren leden en medewerkers van de onderafdeling der technische natuurkunde,

In Uw midden en met Uw steun hoop ik in de sectie materiaalkunde interesse te wekken voor een nieuw vak, dat, naar ik stellig verwacht, door zijn aspecten van praktisch belang, meer en meer zijn invloed zal doen gelden in verschillende gebieden van de techniek. Gij, waarde ZWIKKER, hebt met Uw brede belangstelling in zovele, sterk uiteenlopende gebieden der technische wetenschappen van de aanvang af de potentiële mogelijkheden van de elektroluminescentie onderkend. Het verheugt mij in hernieuwde en nauwe samenwerking met U voortaan aan deze Hogeschool het onderwijs en onderzoek in dit gebied te mogen opbouwen.

Op deze, voor mij zo gedenkwaardige dag, wil ik niet nalaten ook openlijk mijn dank uit te spreken aan al degenen die hebben bijgedragen aan mijn wetenschappelijke vorming. Ik ben mij bewust, hoezeer ik in mijn eerste schreden op de weg hiertoe ben geleid door wijlen mijn vader. In mijn beschouwingen over de waardevolle niet-rationele elementen in het leerproces heb ik ook tot uiting willen brengen, hoeveel ik in mijn vorming heb te danken aan mijn moeder. Ik prijs mij gelukkig, dat zij van de aanvaarding van mijn ambt getuige mag zijn. Mijn beslissing in mijn verdere studie de richting der exacte vakken in te slaan, is ten zeerste gestimuleerd door de lessen op de H.B.S. aan de Zuidpunt van Westerwolde, waar U, IR. BAUMANN, ons op een onvergetelijke wijze opvoedde tot zelfstandig en kritisch denken.

Evenzeer onvergetelijk is mijn herinnering aan wijlen mijn leermeester Prof. D. COSTER; zijn toewijding met hart en ziel, zowel aan hetvak als aan zijn leerlingen, staat mij nog altijd als een voorbeeld voor ogen.

Mijne Heren Directeuren van het Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken,

Ik dank U dat Gij zonder aarzeling erin hebt toegestemd, dat ik naast mijn hoofdtaak in Uw laboratorium deze functie aan de Eindhovense Technische Hogeschool aanvaard.

Uw belangstelling en steun, hooggeleerde CASIMIR, zijn in verschillende beslissende momenten van mijn loopbaan voor mij van grote waarde geweest.

Mijne Heren collegae van het Natuurkundig Laboratorium,

Zonder Uw steun en vriendschap zou ik thans niet hier staan. Ik wil gaarne bekennen, hoeveel ik op mijn vakgebied van U heb geleerd en U daarvoor oprecht dank zeggen. In het bijzonder geldt mijn dank de medewerkers van de flu-groep, temeer daar mijn aanvaarden van deze nieuwe taak voor U erop neerkomt, dat een groter deel van ons groepswerk op Uw schouders komt te rusten.

Dames en Heren Studenten,

Ik kan me voorstellen dat bij verschillenden onder U de introductie van weer een nieuw specialisme op het leerprogramma met gemengde gevoelens wordt ontvangen. Gij vraagt U wellicht af: "Is deze nieuwe plant op de door ons te bewerken akker inderdaad een aantrekkelijke bloem, zoals gij ons hebt trachten te suggereren, of is het een brandnetel, waar we liever met een boogje omheen lopen?" Ik zou U willen vragen, deze vergroting van Uw keuzemogelijkheden desalniettemin als een verrijking van Uw studietijd te beschouwen en U uitnodigen onder mijn leiding het nieuwe gewas wat van dichterbij te komen bekijken.

Mijns inziens is het zowel voor aanstaande fysici en chemici als elektrotechnici de moeite waard door studie van de elektro-optische verschijnselen in gekristalliseerde materialen de zeer speciale eigen sfeer van het vaste-stoffenonderzoek een tijdje te kunnen opsnuiven; de sfeer, die ontstaat als men in één en hetzelfde laboratorium, ja vaak in één en dezelfde kamer, in een nauwe onderlinge samenwerking met erkenning en handhaving van elkaars geheel verschillende mentaliteit en methode van onderzoek doch op basis van gelijkwaardigheid deze materie leert kennen en beheersen. Ikzelf heb pas vrij laat hiertoe de gelegenheid gekregen. Tijdens mijn studie jaren hield ik mij bezig met kernfysica. De eerste negen jaren van mijn verblijf in het Philips Natuurkundig Laboratorium ben ik werkzaam geweest in het elektrotechnische gebied van de microgolf buizen. Pas daarna heb ik van nabij kennis gemaakt met het wel geheel anders

geaarde onderzoek van de vaste stof, dat mij alras ging boeien, sterker dan enige andere tak der fysica dit eerder had vermocht. Als fysicus heb ik het nauwe contact met de chemici, die de materialen prepareren en variëren en met de elektro-technici, die ze in de opto-elektronische schakelingen toepassen, ondervonden als zeer vruchtbaar. Ik geloof dan ook dat het zeer goed is als de student in zijn laatste studie jaren de gelegenheid krijgt te ervaren hoe een dergelijke manier van samenwerking de kijk op en het inzicht in het eigen vakgebied verruimt. Van degenen onder U, die van de geboden gelegenheid tot nader kennismaking met mijn plant willen gebruik maken, wacht ik te zijner tijd het oordeel dan ook met gerustheid af.

Ik heb gezegd.

Enkele der tussen aanhalingstekens geplaatste zinsneden in deze tekst zijn ontleend aan Frank van der Goes en Goethe.