

licht
stroom

Lumenus reeks, deel 4

licht stroom

Bart van der Lugt

eerste druk 2017

ISBN: 978-94-02161-99-1
coverfoto: Joris van der Lugt
© D.B. van der Lugt

ter introductie

Licht. Gedurende vele eeuwen is het bestudeerd, in fraaie toonaarden bezongen en door schilders op het doek vastgelegd. Maar het licht van de openbare verlichting hebben we voor een groot deel te danken aan de elektrische infrastructuur waarop het is aangesloten. Vanaf het einde van de 19e eeuw zijn straatverlichting en elektriciteit namelijk onlosmakelijk met elkaar verbonden. Letterlijk verbonden, want de verlichting kan immers niet functioneren zónder het uitgebreide elektriciteitsnet dat, onzichtbaar voor iedereen, de vele lichtmasten van energie voorziet. Een gedegen kennis van de openbare verlichting is dus niet compleet zonder een even grondige kennis van elektriciteit en de hierbij gebruikte begrippen, componenten en netten.

Dit boek slaat deze brug en beschrijft in een aantal essays de manier waarop elektriciteit uiteindelijk wordt omgezet in zichtbare straling. . Het bevindt zich hierbij als het ware op het grensvlak tussen deze twee en gaat óf in een wat meer beschouwende vorm óf in detail in op onderwerpen zoals dimmen, het skin-effect, oriëntatie verlichting, smart grids en gelijkspanning. Het boek eindigt met een essay dat is gebaseerd op de opmerkelijke overeenkomst tussen de 18e Dynastie Egyptische Faraó Amenhotep IV en een 21e eeuwse Nederlandse professor ruimtevaart techniek.

inhoud

licht

de productie van zichtbare straling	10
toegepaste optica	15
voorschakelapparaten	23
de RLC-kring	30
het ontwerpen van een verlichtingsinstallatie	36
dimmen	50
de cosinus tot de derde wet	61
de contante waarde methode	66
oriëntatieverlichting	71
niet meer verlichten, maar dan?	75

stroom

wisselspanning	82
regulering	89
gelijkspanning	96
cosinus phi verbetering	101
hogere harmonischen	111
de pn-overgang	121
het skin effect	124
een slim energiesysteem	129
de tweede zonnerevolutie	140

referentielijst	146
-----------------	-----



licht

de productie van zichtbare straling

Technologische ontwikkelingen of evoluties komen bijna altijd voort uit een bepaalde noodzaak. Het komt vrijwel nooit voor dat een wetenschapper, of een handige doe-het-zelver, op een mooie dag plotseling aan zijn werkbank gaat zitten met de gedachte 'laat ik vandaag eens een gloeilamp uit gaan vinden'. Technologische ontwikkelingen of evoluties zijn eveneens bijna altijd, direct of indirect, gebaseerd op daarvoor ondernomen onderzoek. Al met al wordt een technologische innovatie bijna nooit 'uitgevonden' in de zin van dat het er opeens 'is'.

Het is het mooiste te illustreren aan de hand van de 'uitvinding' van de stoommachine. Deze wordt altijd spontaan toegeschreven aan de Schotse ingenieur James Watt, maar ook hij borduurde voort op de prestaties van zijn voorgangers. Hij was echter zo handig om op zijn machine patent aan te vragen; waarschijnlijk één van de redenen dat juist hij bekend is komen te staan als 'de uitvinder van'. Niets is echter minder waar. De Griekse uitvinder Heron van Alexandrië bouwde bijvoorbeeld al in de eerste eeuw een stoomturbine die hij aeolipile noemde. ^[Wikipedia1] Deze turbine bestond uit een bolvormige, met water gevulde drukkamer met daaraan een tweetal pijpjes. Als deze bol boven een warmtebron werd gehangen, ontsnapte de geproduceerde stoom via deze pijpjes en liet het geheel draaien. De eerste industrieel toegepaste stoommachine werd echter (eveneens gebaseerd op de ideeën van anderen) gebouwd door de Engelsman Thomas Newcomen. Een van de grote problemen binnen de Engelse mijnbouw werd gevormd door het regelmatig onder water lopen van de mijngangen. Newcomen ontwikkelde hiervoor een eencilinder stoommachine die, hoewel 'ie niet bepaald efficiënt was, precies deed waar 'ie voor gemaakt was; het drooghouden van de mijnen. Zo'n veertig jaar later zag James Watt in deze machine mogelijkheden tot verbetering en hij bouwde op zijn beurt zijn verbeterde versie. De Watt machine en de Newcomen machine hebben echter nog vele jaren naast elkaar bestaan.

Wie heeft de gloeilamp uitgevonden? Het is een vraag die sinds 1879 steevast werd beantwoord met een stellig uitgesproken 'Edison'. Maar hoewel inmiddels is vast komen te staan dat de Duitse wetenschapper Heinrich Göbel (1818-1893) de Amerikaanse uitvinder Thomas Alva Edison (1847-1931) zo'n 25 jaar voor is geweest (Göbel's gloeilamp brande voor 't eerst in 1854), is het eigenlijk onmogelijk 'de' uitvinding van 'de' gloeilamp aan een iemand toe te schrijven. Want weet u, ook de gloeilamp is helemaal niet uitgevonden. Net zoals elke technologische 'uitvinding' waren de gloeilampen van Göbel en Edison eigenlijk slechts de resultante van jaren van ontwikkeling door talloze anderen die zich eveneens bezig hielden met het proberen om licht te produceren door een stroom door een dun draadje te sturen. Vóór hun tweeën werd hiermee namelijk al geëxperimenteerd door, in 1761, de Britse wetenschapper, uitvinder en docent Ebenezer Kinnersley, in 1802, de Britse chemicus en uitvinder sir Humphry Davy, in 1835, de Schotse uitvinder en schrijver James Bowman Lindsay, in 1838, de Belgische lithograaf, fotograaf en uitvinder Jean-Baptiste-Ambroise-Marcellin Jobard, in 1840, de Britse astronoom en chemicus Warren De la Rue, in 1848, de Amerikaanse uitvinder John Wellington Starr en in 1851, de Franse goochelaar Jean-Eugène Robert-Houdin . . . om er maar even een paar te noemen. [Wikipedia2] En er zijn zelfs aanwijzingen dat men in de oudheid verder was op dit gebied dan wij nu voor mogelijk houden.

Het ontwikkelen van 'iets dat kunstmatig licht produceert' kan dus het beste worden gezien als een evolutieproces waarbij nieuwe generaties voortbouwen op de prestaties, ideeën en soms zelfs de mislukkingen van hun voorgangers. We zullen de vraag 'wie is de uitvinder' dus maar overlaten aan de dames en heren historici, en een kijkje gaan nemen naar de wijze waarop die productie van zichtbare straling nu eigenlijk in z'n werk gaat. We kijken hierbij even terug naar de temperatuurstralers, gaan dan verder met het gasontladingsproces om te eindigen bij de wijze waarop halfgeleider lampen functioneren.

temperatuurstralers: Het is uiteraard slechts uit nostalgische overwegingen, want de tijd dat er binnen de openbare verlichting nog temperatuurstralers in de vorm van gloeilampen, of zelfs gasverlichting, werden gebruikt ligt al v er achter ons. Een temperatuurstraler, zoals de gloeilamp, produceert (onder andere) zichtbare straling door een elektrische stroom door de gloeidraad te laten vloeien. Een en ander werkt eigenlijk volgens hetzelfde principe als een stuk ijzer dat in een vuur verwarmd wordt.

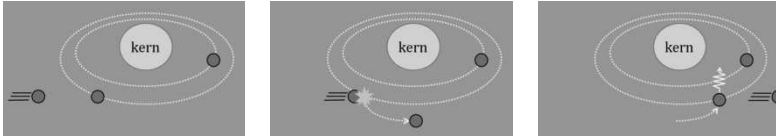
Het is rustig in het kleine dorp; een dorp zo klein dat niemand tot nu toe nog de moeite heeft genomen het een naam te geven. De enige plaats waar op deze vroege morgen iets lijkt te gebeuren, is in de smederij. De smid maakt zich op om aan het werk te gaan, en na het opstoken van de smidse legt hij een ijzeren staaf te midden van de gloeiende kolen. Eerst vormt de ijzeren staaf binnen het oranje inferno een donkere streep, maar dan begint het metaal opeens op onverklaarbare wijze licht uit te stralen. Eerst is het nog donkerrood, maar nadat het vuur verder is opgestookt, krijgt de ijzeren staaf een oranje gloed die het tegen de achtergrond van de gloeiende kolen bijna onzichtbaar maakt. De smid is hiermee nog niet tevreden, want met hernieuwd enthousiasme trekt hij aan de ketting die de grote blaasbalg bedient. De kolen worden heter en heter, en de man kijkt gefascineerd toe hoe de ijzeren staaf, na eerst een fel oranje en daarna een intens geel licht uitgestraald te hebben, uiteindelijk is omgeven met een bijna onaards aandoende witte gloed. Maar dan ontworsteld hij zich aan het fascinerende schouwspel, legt de wihete ijzeren staaf op het aambeeld en heft zijn hamer hoog om de eerste van een lange reeks slagen neer te laten dalen.

Dit schouwspel is iets dat me al tijden lang heeft geïnteresseerd. Het smeden van ijzer is op zich natuurlijk al een fascinerend schouwspel, maar ik heb het in dit geval over dat gedrag van die ijzeren staaf. Want, ga maar na. Je legt zo'n staaf ijzer in het vuur, in eerste instantie gebeurt er niets, en dan gaat 'ie op een voor de meeste mensen onverklaarbare manier opeens licht uitstralen. Ja, voor de meeste mensen, maar niet voor ons. Want als we de taal

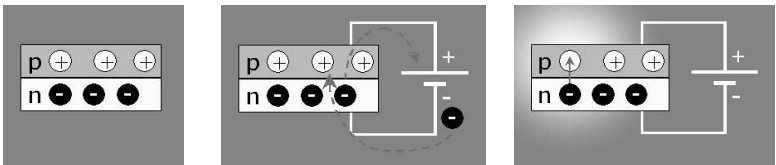
van ons vakgebied gaan spreken wordt alles opeens duidelijk. Hetzelfde gedrag wordt namelijk vertoond door de gloeidraad van een gloeilamp. Aan zowel de ijzeren staaf als aan de gloeidraad wordt in een toenemende mate energie toegevoerd. En op een gegeven moment gaan beide zichtbare straling produceren, en wel zo dat beide de kleuren van het zichtbare spectrum van rechts naar links doorlopen. Er moet dus op de een of andere manier een verband bestaan tussen de toegevoerde energie, of de temperatuur van het metaal, en de golflengte van de uitgestraalde zichtbare straling. Zowel de ijzeren staaf als de gloeidraad zenden namelijk elektromagnetische straling uit. In eerste instantie is dat het infrarood, oftewel warmte, waarna de oplopende golflengten op een zeker moment de 380 nm overschrijden, en in het zichtbare spectrum terecht komen. Als we het mysterie zo onder handen nemen wordt het opeens een stuk duidelijker. In eerste instantie wordt er géén zichtbare straling geproduceerd, maar alleen maar warmte; infrarode straling. Naarmate de grootte van de stroom toeneemt (of het vuur verder wordt opgestookt) zal het metaal allereerst donkerrode zichtbare straling gaan produceren; een kleur die geleidelijk zal overgaan naar oranje, geel en uiteindelijk wit. Hetzelfde speelt zich af in de gloeidraad van een gloeilamp. Er bestaat dus een duidelijk verband tussen de toegevoerde hoeveelheid energie en de golflengte van de geproduceerde straling.

gasontladingslampen: Hoewel ze (nu in 2017) in snel tempo terrein aan het verliezen zijn ten opzichte van de halfgeleiderlampen, maken gasontladingslampen nog steeds een substantieel deel uit van de lampen waarmee wij onze straten en pleinen verlichten. Een gasontladingslamp is niets anders dan een afgesloten, in eerste instantie vacuüm gezogen glazen buis, waarin een gas is ondergebracht. Aan beide zijden van de buis bevinden zich aansluitpunten die verbonden zijn met, in de buis aangebrachte elektroden. Als er tussen beide elektroden een voldoende groot potentiaalverschil bestaat zullen elektronen zich, op gang gebracht door de combinatie van een starter en een zelfinductie of door de werking van een LC-kring, van de ene naar de andere elektrode gaan bewegen.¹ Tijdens deze beweging komen

de elektronen in botsing met de, in de buis aanwezige gas-atomen. Deze botsing kan zo heftig zijn dat er een gas-elektron in een hogere baan rond de atoomkern wordt gestoten. Het atoom is nu echter onstabiel geworden en zal er voor zorgen dat het elektron weer in z'n oude stabiele baan wordt gebracht. Het elektron zal hierbij zijn, door de botsing ontvangen energie weer afstaan in de vorm van een foton die, al dan niet met behulp van een fluorescentiepoeder, wordt omgezet in zichtbare straling.



halfgeleiderlampen: De meest bekende halfgeleider lamp is de light emitting diode; de LED. Deze lamp bestaat feitelijk uit twee samengevoegde materialen. Het ene deel bevat een overdosís aan vrije, negatief geladen, elektronen (een zgn. n-type halfgeleider) terwijl het andere deel juist elektronen te kort komt (een zgn. p-type halfgeleider). Dit laatste materiaal bevat dus eigenlijk een aantal positief geladen gaten. Als de beide samengevoegde materialen aangesloten worden op een gelijkspanningsbron, zullen de vrije elektronen de neiging hebben om zich naar de positieve plaat van de gelijkspanningsbron te verplaatsen. De gaten in het andere deel van de LED worden opgevuld met elektronen, afkomstig uit de negatieve plaat van de spanningsbron.



In een aantal gevallen wordt een gat in het p-gedeelte opgevuld door een elektron uit het n-gedeelte. De energie die hierdoor ontstaat, komt vrij in de vorm van een lichtdeeltje; een foton.

¹ zie 'voorschakelapparaten'

toegepaste optica

Stelt u zich het volgende eens voor. U rijdt in uw auto op een keurig geasfalteerde weg, en u houdt zich netjes aan de maximum snelheid van 120 km per uur. Tot zover niets aan de hand. Echter, plotseling gaat deze keurig geasfalteerde weg over in een soppige modderweg. Op zo'n moment zult u een aantal veranderingen gaan ervaren. De voor dit onderwerp meest illustratieve verandering is die in de snelheid. Dankzij de modder ondervinden de wielen van de auto een véél grotere weerstand, waardoor de snelheid van de auto zal afnemen. Met dit voorbeeld in 't achterhoofd, is het wellicht voor te stellen dat een lichtstraal ongeveer hetzelfde gedrag gaan vertonen op het moment dat deze de overgang tussen twee verschillende licht doorlatende materialen passeert.

N.B. Een andere overeenkomst is dat de auto, nét zoals een lichtstraal, na het passeren van de 'asfalt-modder overgang' eveneens (en soms wel héél drastisch) van richting gaat veranderen. Dit is echter een associatie die het beste maar héél losjes gebruikt kan worden.

de Wet van Snellius: U kent Willebrord Snel van Royen (1580 – 1626), een Nederlandse wis- en natuurkundige, waarschijnlijk beter onder zijn Latijnse naam Snellius. Hij is vooral bekend door de naar hem genoemde Wet van Snellius; de natuurkundige wet die de wijze van breken van licht beschrijft. Van Royen zal ongetwijfeld dankzij observatie tot zijn inzichten zijn gekomen, en ook zijn gewoonte om zich te verdiepen in oude geschriften zal hier waarschijnlijk aan hebben bijgedragen. We weten het echter niet zeker, want om de een of andere reden heeft hij zijn bevindingen zelf nooit gepubliceerd. Pas ver na zijn dood werd zijn betrokkenheid bij dit onderwerp bekend toen, in 1703, Christiaan Huygens Snellius' bevindingen publiceerde. De Wet van Snellius komt in z'n algemeenheid neer op het volgende: licht verplaatst zich in materialen en media met verschillende dichtheden met verschillende snelheden voort. Als een lichtstraal zich beweegt door een optisch dichter materiaal (d.i. een materiaal waarin de