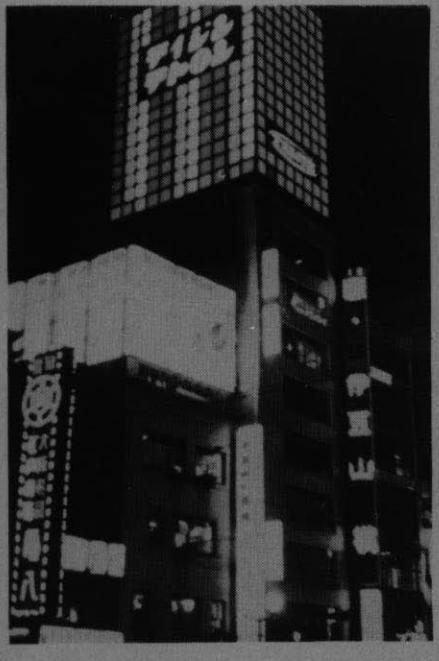
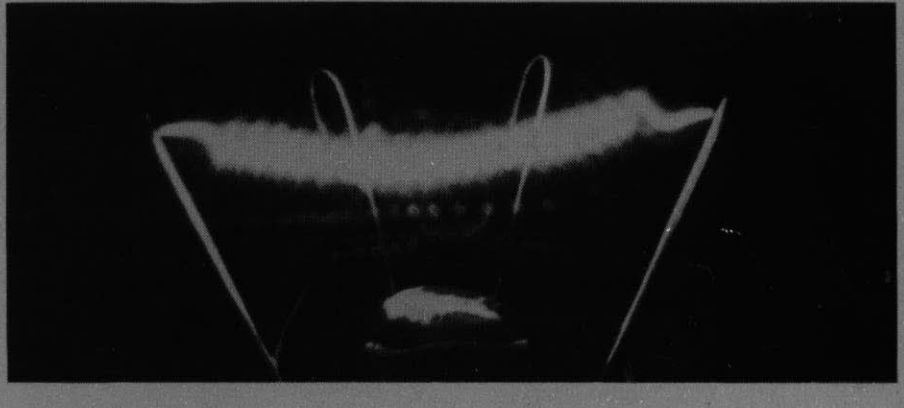
LICHTBRONNEN





PLON
Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO

lichtbronnen

Samengesteld door de projectgroep van het PLON in samenwerking met de Vakgroep Natuurkunde-Didactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht

voor de 5e klas HAVO

Experimentele uitgave

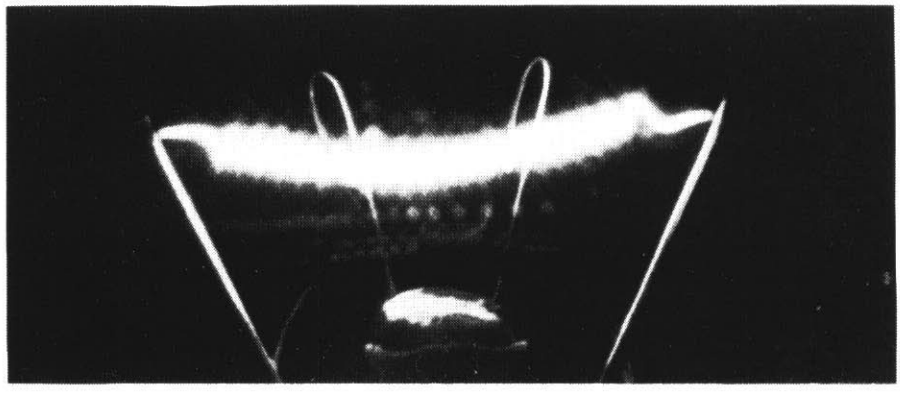
PLON

* Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
* Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
* Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
* Het adres van het PLON is:
  PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht, Tel. 030-532717

© 1984 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the prior permission of the publisher.

LICHTBRONNEN



PLON

Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO

inhoud

		blz
1	oriëntatie	5
2	verlichting	11
3	lichtmetingen	25
4	gloeilampen	36
5	gasontladingslampen	43
6	licht en atomen	49
7	moderne lichtbronnen	64
bijlage		
	omgekeerde evenredigheden	75
index		78

hoofdstuk 1

ORIENTATIE

inhoud blz

1.1 oude en nieuwe Lichtbronnen 5
1.2 de kwaliteit van Lichtbronnen 8
1.3 de opzet van het thema 'Lichtbronnen' 9

1.1 OUDE EN NIEUWE LICHTBRONNNEN

Elektrisch licht is zo gewoon geworden, dat je er meestal nauwelijks aandacht aan besteedt. Een kapotte lamp is snel en goedkoop te vervangen, en onze electriciteitscentrales laten het maar zelden afweten. We zijn allemaal erg afhankelijk geworden van die voorzieningen: weinig mensen zouden ze willen missen.

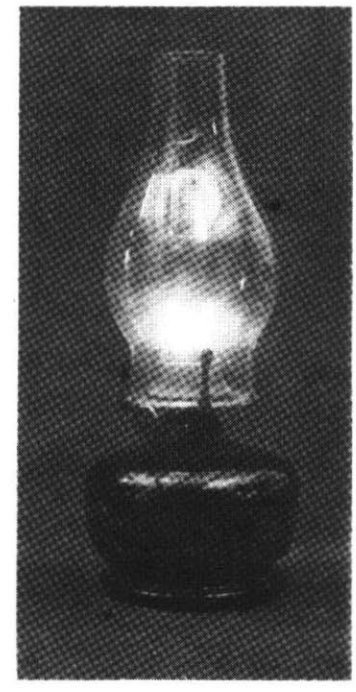
Vincent van Gogh's aardappeleters: één enkel pitje.

Een zee van licht.

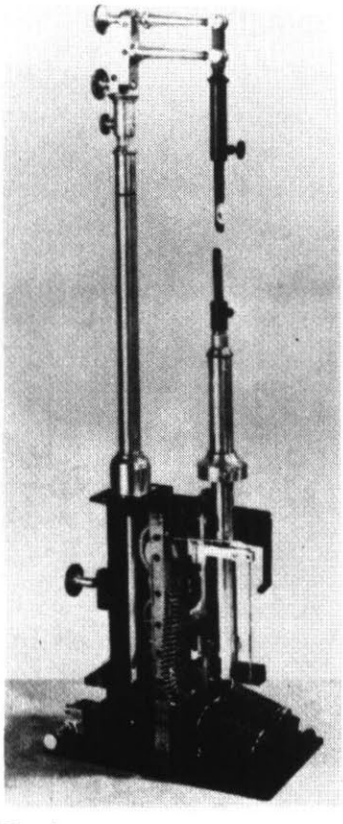
Nog niet zo vreselijk lang geleden waren mensen sterk afhankelijk van *daglicht*. Bij het vallen van de duisternis werden veel aktiviteiten onmogelijk door een gebrek aan verlichting. Straten waren niet of slecht verlicht, geen verlichte winkeletalages om naar te kijken, lezen of studeren was moeilijk en vermoeiend, werk in fabrieken en op kantoren ging langzaam en ondoelmatig. In grote delen van de wereld is dat overigens nog steeds zo.
Een goede verlichting betekent dat je tegenwoordig meer tijd hebt om dingen te doen die je nuttig en prettig vindt.

brandende lampen
Aan het begin van de ontwikkeling van onze lichtbronnen staat het vuur, dat onze verre voorouders leerden beheersen en gebruiken voor allerlei doeleinden: het kampvuur en het haardvuur. De behoefte aan licht reikte verder: al in het stenen tijdperk hebben mensen lampjes gemaakt van holle stenen of schelpen, waarin ze olie of vet lieten verbranden. In de koningsgraven van het oude Egypte en Babylonië zijn prachtig bewerkte olielampen gevonden van albast en goud. In de Romeinse tijd waren ook al kaarsen in gebruik.
Na vele eeuwen van langzame ontwikkeling gaat het in de 19e eeuw sneller. Omstreeks 1800 komt de olielamp met glazen 'schoorsteen' in gebruik; in dezelfde tijd

begint het gebruik van gas voor verlichting. Steeds meer steden passen gaslantaarns toe voor straatverlichting; steeds meer burgers laten gasverlichting in huis aanleggen. Het platteland blijft achter, tot omstreeks 1860 in Amerika de grootscheepse winning van aardolie begint en overal de petroleumlamp verschijnt.



De brandstof voor al deze lichtbronnen bevat koolstof. Bij onvolledige verbranding ontstaat roet: kleine brokjes koolstof. In de vlam zijn deze stukjes koolstof gloeiend heet – zij zijn de eigenlijke lichtgevers.



Booglamp.

gloei- en booglampen

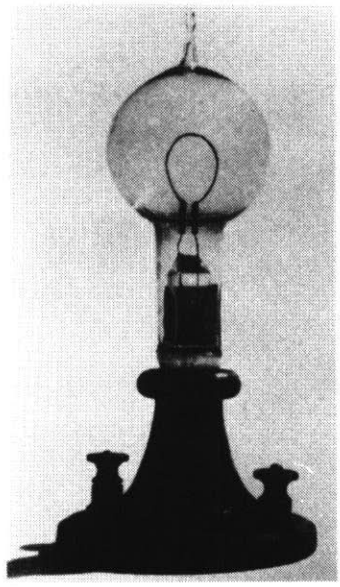
Het principe van de *gloeilamp* was al kort na 1800 bekend. De elektrische cel (voorloper van de zaklantaarnbatterij) kon voldoende stroom leveren om een metalen draad te laten gloeien. Maar al bij de eerste proeven bleek wat het grote probleem zou zijn: voor helder licht is een zeer hoge temperatuur nodig, en een zeer hete draad gaat snel te gronde door breuk, doorsmelten, verdamping of door oxydatie.

Een ander principe leek beter geschikt: de elektrische *lichtboog*. Daarbij worden eerst twee koolstofspitsen met elkaar in contact gebracht. De spitsen gaan gloeien als er een voldoend grote elektrische stroom doorheen gestuurd wordt. Door het gloeien van de spitsen is de lucht er omheen geïoniseerd, en dus geleidend geworden. De koolstofspitsen worden dan wat van elkaar verwijderd. Via de geïoniseerde lucht blijft er stroom lopen van de ene spits naar de andere: een soort voortdurende bliksem in het klein.

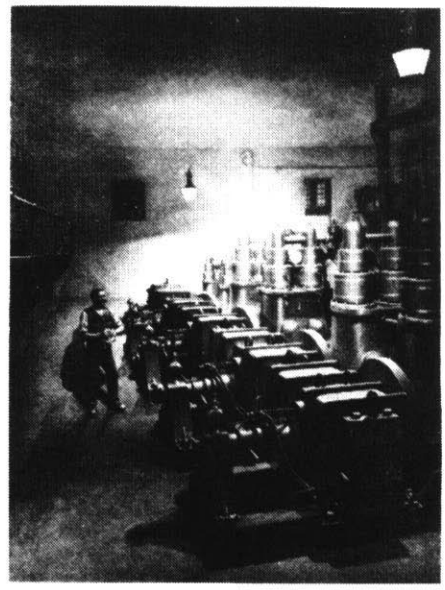
Zo'n elektrische lichtboog gaf flink wat licht. In 1842 al werden in Parijs de eerste proeven gedaan met booglampen voor straatverlichting. Ook in fabrieken en theaters werden ze tot omstreeks 1900 vrij veel toegepast. Voor verlichting in huis waren ze minder geschikt : het licht was scherp en onrustig. Bovendien gaf de vrij snelle slijtage van de gloeiende koolspitsen stank en technische problemen.

Eén hindernis voor de ontwikkeling van gloeilampen verdween door de ontwikkeling van een goede vacuümpomp omstreeks 1860. Maar ook in vacuüm gingen dunne gloeiende metaaldraden nog snel kapot. Uiteindelijk vonden Swan in Engeland en Edison in Amerika een oplossing: ze maakten koolstofdraden door bamboevezels of draden van katoen te laten verkolen. Intussen waren sinds 1850 de dynamo's ver genoeg ontwikkeld om voor een redelijk goedkope elektrische energie te kunnen zorgen. Banken en bedrijven zagen er brood in: er werden gloeilampenfabrieken gesticht (Philips in 1891), centrales gebouwd en lichtnetten aangelegd.

Edison in zijn laboratorium.



Edison's gloeilamp met koolstof-gloeidraad uit 1879.



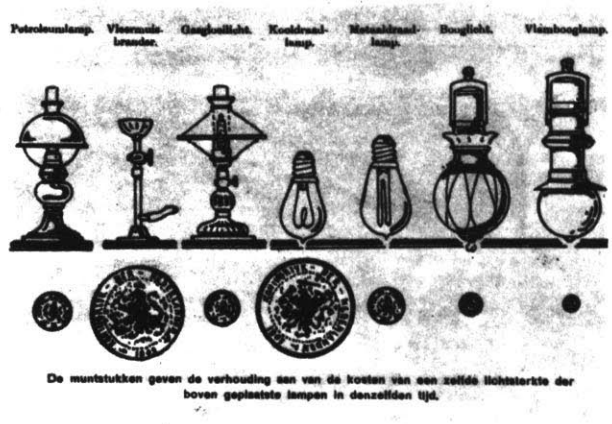
Kensington Court elektriciteits-centrale.

Een tijd lang bleef de gasverlichting concurrerend. De oorzaak hiervan was de uitvinding van het gloeikousje in 1885, dat door verbrandend gas op hoge temperatuur werd gehouden. De elektrische gloeilamp won, mede door technische verbeteringen: in 1907 de wolfraamdraad, in 1913 de gespiraliseerde draad en de gasvulling (argon). Latere ontwikkelingen zijn de dubbelgespiraliseerde draad (Philips in 1933) en (voor bepaalde toepassingen) de toevoeging van de halogenen broom en jodium aan de gasvulling (1959).

Natriumlamp.

	Gemiddelde kosten per uur.
Stearinekaars	10 ct.
Olielamp	3 „
Vleermuis-gasbrander	1.9 „
Electrische gloeilamp	1.4 „
Petroleumlicht	1.35 „
Acetyleenlicht	0.5 „
Auer-brander (ondersteld is dat het kousje nieuw is, terwijl geen rekening wordt gehouden met zijn vernieuwings-kosten).	0.4 „
Electrische booglamp (de kosten der koolspitsen niet medegerekend).	0.35 „
wanneer ze allen een lichtsterkte van 10 kaarsen bezitten.	

	Verbruikte zuurstof in liters.	Ontwikkeld koolzuur in liters.	Bedorven lucht in liters.	Aantal ontwikkelde caloriën.
Electrische gloeilamp	0	0	0	26
Acetyleen	80	50	400	100
Gas	95	56	450	550
Olie	130	94	675	580
Petroleum	170	121	931	822
Waskaars	240	175	1240	940
Stearinekaars	340	245	1650	1280



De muntstukken geven de verhouding aan van de kosten van een zelfde lichtsterkte der boven geplaatste lampen in denzelfden tijd.

Een vergelijking uit 1907 tussen de verschillende manieren van verlichting. (Let op de hoeveelheid bedorven lucht bij de elektrische gloeilamp.)

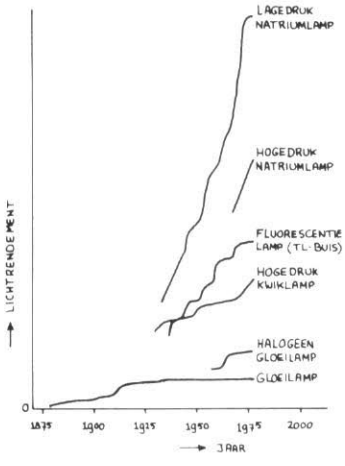
gasontladingslampen

Al voor 1800 kon men met behulp van elektriseermachines flinke elektrische vonken maken. Daarbij loopt er even een elektrische stroom door de lucht, en de elektriseermachine verliest een deel van de 'opgehoopte' lading. De lichtflits van zo'n bliksem-in-miniatuur duurt maar een fractie van een seconde.

In een ruimte met lagere luchtdruk treedt de 'doorslag' al op bij lagere spanning, of over grotere afstand. Ontladingen in allerlei verschillende gassen bij allerlei waarden van de druk geven een grote variatie te zien in helderheid en kleur van het uitgezonden licht. Die lichtverschijnselen werden al vanaf 1830 onderzocht en later toegepast in *gasontladingslampen*. In 1910 kwamen de eerste lichtreclamebuizen op de markt. In 1932 volgt

de *lage-druk natriumlamp* voor straatverlichting en in 1939 de *TL-buis*. De TL-buis bevat kwikdamp met lage druk, die vooral ultraviolette straling uitzendt. Deze onzichtbare straling wordt door de 'verf' aan de binnenkant van de buis grotendeels omgezet in zichtbaar licht. Een lage druk van het gas bleek niet noodzakelijk.Al in 1935 kwamen *hoge-druk kwiklampen* voor straatverlichting op de markt, en in 1965 *hoge-druk natriumlampen*.
Ook op dit gebied gaat de ontwikkeling nog steeds door. Technische vindingrijkheid is daarbij nog even noodzakelijk als in de tijd van Edison. Maar daarnaast is ook veel wetenschappelijke kennis nodig over de relatie tussen licht en materie. Dat laatste geldt voor de verdere ontwikkeling en verbetering van bestaande soorten lampen, maar ook voor de ontwikkeling van nieuwe soorten lichtbronnen zoals bijv. *lasers*.

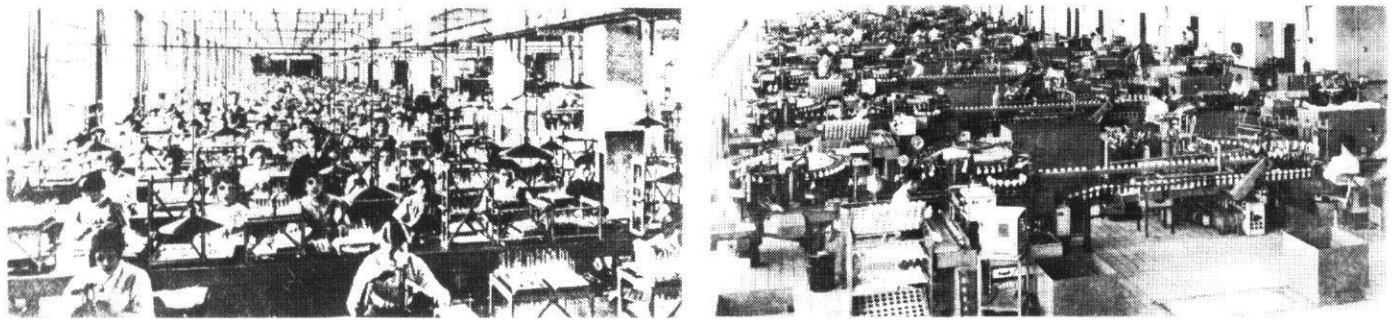
1.2 DE KWALITEIT VAN LICHTBRONNEN



Eén duidelijke lijn in de ontwikkeling van alle soorten lampen is het streven naar een zo hoog mogelijk *lichtrendement*: de verhouding tussen de lichtopbrengst en het opgenomen vermogen.

Als gebruikers van lampen willen we allemaal waar voor ons geld: lampen die goedkoop zijn, lang meegaan, veilig en energiezuinig zijn. Bovendien moeten ze goed licht geven: voldoende licht van de juiste kleur. En wat we 'voldoende' en 'juist' noemen hangt af van onder andere de situatie waarin lampen nodig zijn en van je persoonlijke smaak. De genoemde eisen zijn vaak met elkaar in strijd, zodat zowel de fabrikant als jijzelf als consument moet zorgen voor een zo goed mogelijke afweging. De lamp met de hoogste lichtopbrengst per watt opgenomen vermogen bijv. (de lage-druk natriumlamp) geeft niet de prettigste kleur licht (geel-oranje) voor gebruik in huis. Fluorescentielampen (TL-buizen) hebben een hogere lichtopbrengst dan gloeilampen bij eenzelfde opgenomen vermogen en gaan langer mee. Maar TL-buizen zijn duurder dan gloeilampen, en hebben de naam een 'koud' ongezellig licht te geven. Gloeilampen dan? Maar wat betreft de *lichtkleur* van TL-buizen is er tegenwoordig meer te kiezen dan je misschien denkt.

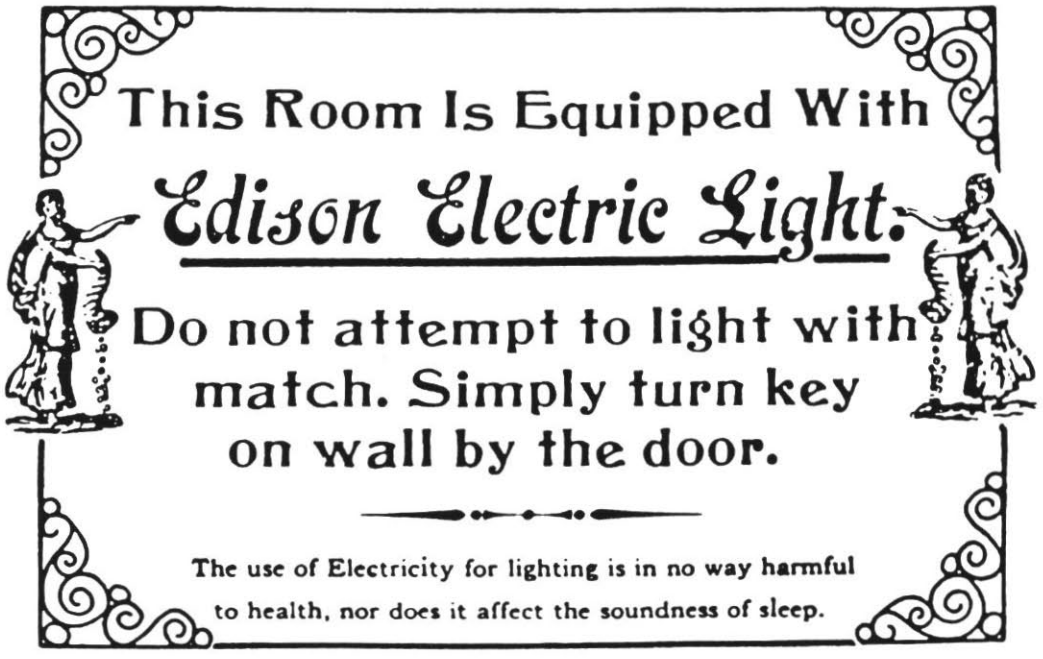
Uit deze en de vorige paragraaf blijkt dat je op een aantal verschillende manieren naar lichtbronnen kunt kijken: technisch, maatschappelijk en wetenschappelijk.
Kijk je vanuit *technisch* oogpunt, dan gaat het om vragen als: hoe zitten al die verschillende soorten lampen in elkaar, hoe worden ze gemaakt, waardoor gaan ze op den duur kapot, wat zou er nog aan te verbeteren zijn? *Maatschappelijke* vragen zijn bijv.: waarvoor gebruiken we die verschillende soorten lichtbronnen, wat voor eisen stellen we aan de verlichting thuis en op straat, wat kost die verlichting ons, hoeveel energie is ermee gemoeid, hoe zou er op te bezuinigen zijn? En *wetenschappelijk*: wat gebeurt er eigenlijk als een materiaal licht uitzendt, welke wetten gelden voor licht, waardoor is het lichtrendement van TL-buizen zoveel hoger dan dat van gloeilampen?



Gloeilampenfabricage bij Philips in 1915 en in 1965.

Deze drie verschillende manieren van kijken naar lichtbronnen leveren heel verschillende vragen op. Maar die vragen grijpen ook in elkaar. Bijv.: je wilt een kleine lichtbron met een hoog lichtrendement (een maatschappelijke vraag). Een TL-buis heeft een hoog lichtrendement, maar is nogal groot. Kan een TL-buis verkleind worden tot het formaat van een gloeilamp (vanuit wetenschappelijk/technisch oogpunt)? Dat bleek in-

derdaad te kunnen: de 'bespaarlamp' (bijv. de SL-lamp). Maar zou het wetenschappelijk/technisch gezien misschien ook mogelijk zijn om een lagedruk natriumlamp zodanig 'om te bouwen' dat hij licht van een meer aanvaardbare kleur geeft voor gebruik binnenshuis?
En omgekeerd: dat wat wetenschappelijk/technisch mogelijk is, wordt niet altijd even snel maatschappelijk aanvaard. Zie bijv. de kleine lettertjes in de hieronder afgedrukte waarschuwing in hotelkamers e.d. uit 1893.



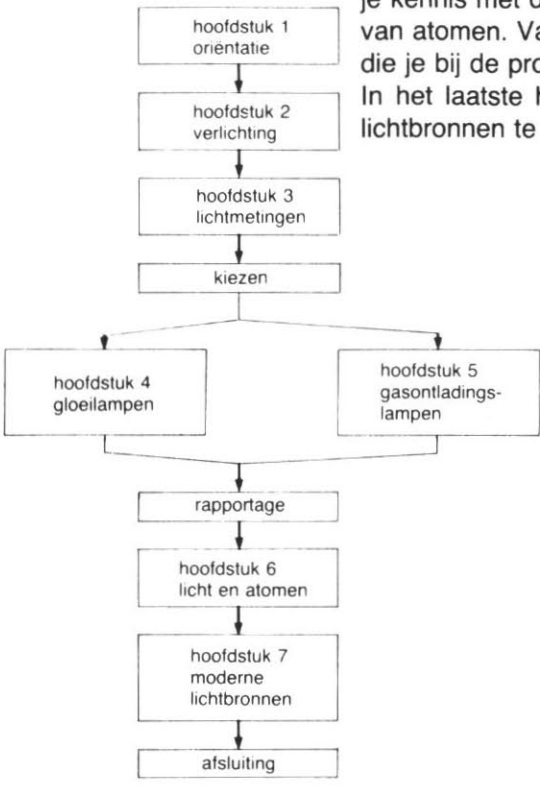
In het thema 'Lichtbronnen' gaat het om de volgende vragen:
– waarvoor gebruiken we de verschillende soorten lichtbronnen: welke eisen stellen we aan de verlichting thuis, op school, op straat enz., wat kost al die verlichting ons, hoeveel energie is ermee gemoeid, hoe zou daarop te bezuinigen zijn (maatschappelijke vragen);
– wat gebeurt er eigenlijk als een materiaal licht uitzendt: wat is licht, welke processen en wetten zijn bepalend voor de aard en de hoeveelheid van de uitgezonden straling door de verschillende soorten lichtbronnen (wetenschappelijke vragen);
– hoe zitten al die verschillende soorten lampen in elkaar: hoe wordt bij de ontwikkeling van moderne lichtbronnen gebruik gemaakt van natuurkundige processen en wetten, hoe wordt een zo goed mogelijke afweging gemaakt tussen tegenstrijdige eisen? (technische vragen)

De zon (onze belangrijkste lichtbron) komt in dit thema niet rechtstreeks aan de orde. Wel indirekt: ons oog is 'afgestemd' op zonlicht, en meestal willen we dat ons kunstlicht daarop lijkt.

1.3 DE OPZET VAN HET THEMA 'LICHTBRONNEN'

Over de verschillende soorten lichtbronnen die er zijn, heb je in dit hoofdstuk al wat kennis opgedaan. Om te onderzoeken welke soort straling ze uitzenden en waarin ze in dit opzicht van elkaar verschillen, is het nodig om een aantal algemene regels en begrippen voor licht te kennen. Dat komt aan de orde in hoofdstuk 2, gecombineerd met de vraag welke factoren in praktijksituaties belangrijk zijn voor het gebruik van en de afweging tussen verschillende soorten lichtbronnen.
Voor het onderzoek van lichtbronnen heb je ook meetmethoden en -instrumenten nodig. Daarover gaat hoofdstuk 3. Daarna moet je een keuze maken: je onderzoekt in kleine groepen òf de door gloeilampen uitgezonden straling (hoofdstuk 4) òf de straling van gasontladingsbuizen (hoofdstuk 5). Tijdens de rapportage van het verrichte onderzoek ga je na in welke opzichten de door deze verschillende soorten lampen uitgezonden straling verschilt. De processen en wetten die bepalend zijn voor de aard van de door

De opzet van het thema 'Lichtbronnen'.



lampen uitgezonden straling komen in hoofdstuk 6 aan de orde. In dit hoofdstuk maak je kennis met de regels die verband leggen tussen de uitzending van licht en de bouw van atomen. Vanuit de atoomtheorie worden in grote lijnen de verschijnselen verklaard die je bij de proeven in hoofdstuk 4 en 5 bent tegengekomen.
In het laatste hoofdstuk tenslotte gebruik je de opgedane kennis om naar moderne lichtbronnen te kijken: halogeen-, natrium- en kwiklamp, SL-lamp en de laser.

hoofdstuk 2

VERLICHTING

inhoud blz

2.1 licht en kleur 12
2.2 lichtrendement 13
2.3 verlichtingssterkte 17

verlichting

Wat is een goede verlichting? Dat is de belangrijkste vraag in dit hoofdstuk.
Licht uit verschillende lampen kan behoorlijk verschillen in sterkte en kleur. Een 100 W gloeilamp geeft meer licht dan één van 40 W. Een standaard TL-buis geeft 'witter licht' dan een gloeilamp. Daarnaast hebben verschillende soorten lichtbronnen een verschillend rendement: de ene soort geeft meer licht voor dezelfde hoeveelheid gebruikte energie dan de andere soort. En ze verschillen in prijs en levensduur.
Het gaat dus om het maken van keuzen: welke lamp kies je voor welk doel?

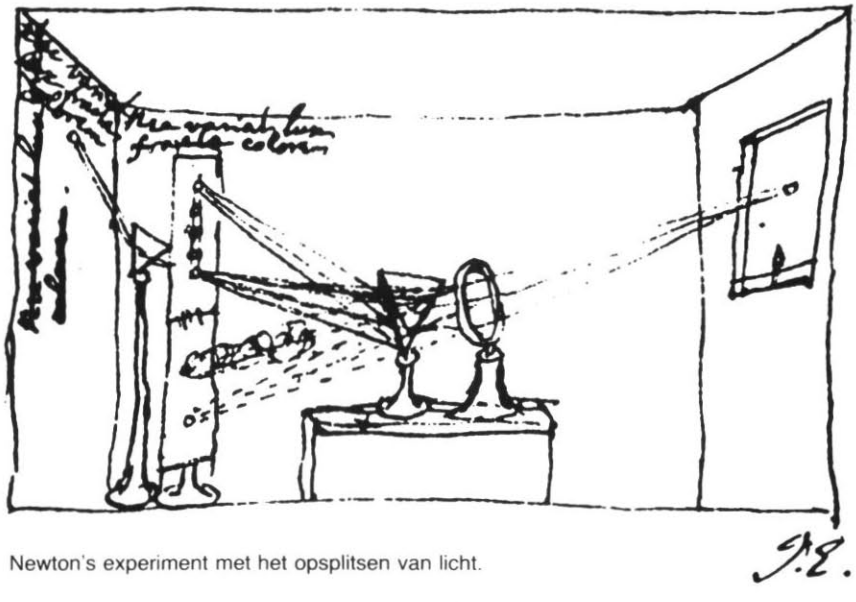
Een goede verlichting bestaat uit twee dingen: een voldoende grote *hoeveelheid licht* van de juiste *kleur* op het werkvlak (werkbank, tafelblad, boek enz.).
Voor de kleurindruk die licht op het netvlies van je oog geeft, is het door de lichtbron uitgezonden *spectrum* belangrijk, evenals de gevoeligheid van dat netvlies voor de verschillende kleuren licht. Die *spectrale ooggevoeligheid* speelt ook een rol bij het bepalen van het *lichtrendement* van lichtbronnen: hoeveel licht krijg je per watt door de lamp opgenomen elektrisch vermogen? Een vraag die belangrijk is uit een oogpunt van energie- en kostenbesparing. En als de keuze voor een bepaald type lamp gemaakt is, hoe groot moet het vermogen van die lamp dan zijn om voldoende licht uit te zenden. Met andere woorden: om een goede *verlichtingssterkte* op het werkvlak te geven.

2.1 LICHT EN KLEUR

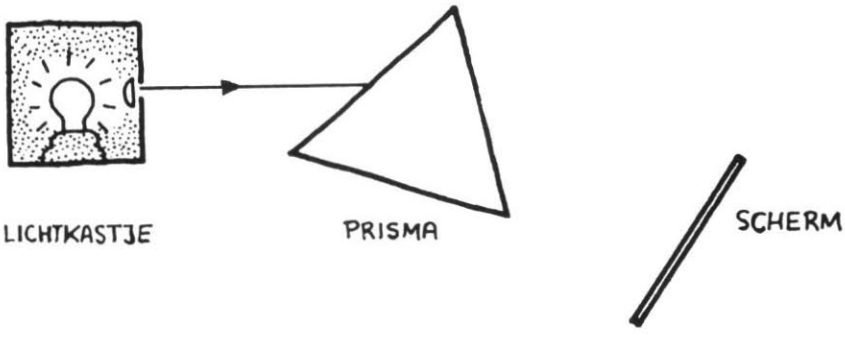
Je zult in een winkel wel eens kleren gekocht hebben. Misschien heb je daarbij de ervaring gehad dat de kleur er thuis toch wat anders uitzag dan in de winkel. De kleur van voorwerpen wordt beïnvloed door het soort licht dat erop valt: daglicht kan een andere kleur geven dan kunstlicht. Maar ook de soort (kunst)lichtbron, gloeilampen of TL-buizen, is daarbij van belang. Het verschil in kleurindruk wordt veroorzaakt doordat licht van verschillende lichtbronnen niet hetzelfde is. Hoe kun je nu dat verschil in uitgezonden licht zichtbaar maken?

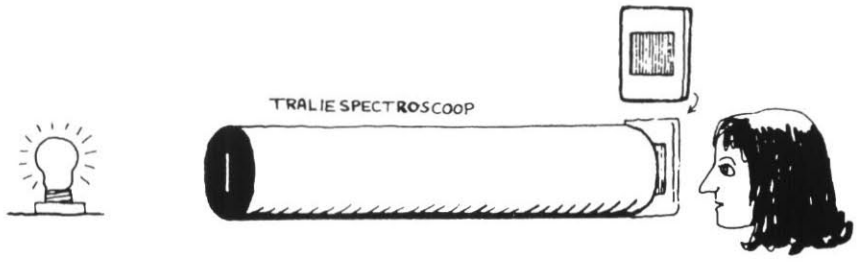
Een lichtbundel wordt *gebroken* als hij schuin invalt op het grensvlak van twee verschillende, lichtdoorlatende stoffen. Dat heb je gezien bij het werken met lenzen. Misschien heb je ook een tweede verschijnsel gezien: het ontstaan van gekleurde randen.
Dat verschijnsel is beter te zien als je een smalle bundel *wit licht* (van de zon, een gloeilamp of TL-buis) op een glazen *prisma* laat invallen. Op een scherm achter het prisma ontstaat dan een kleurenband: een *spectrum*. Het witte licht wordt opgesplitst in licht van een aantal verschillende kleuren.

REGENBOOG
Breking treedt ook op als zonlicht invalt op regendruppels.
Het spectrum dat je dan ziet, noem je een regenboog.



Newton's experiment met het opsplitsen van licht.





1. OPSPLITSEN VAN WIT LICHT

a. Maak met de hiernaast weergegeven opstelling een spectrum. Welke kleur licht wordt het meest gebroken? En welke het minst?
Bekijk het spectrum ook door je oog in de lichtbundel te houden.

b. Ga na wat er gebeurt als je tussen de lichtbron en het prisma verschillende kleurfilters aanbrengt.

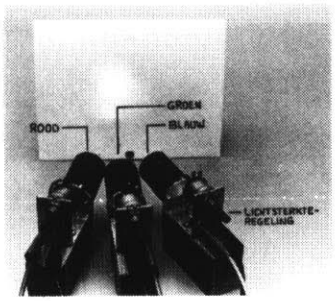
c. Probeer of je een bepaalde kleur licht uit het spectrum verder kunt ontleden met een tweede prisma.

d. Ga na of je met een tweede prisma de verschillende kleuren licht samen kunt brengen. (Hoe moet je het tweede prisma dan opstellen?)
Welke kleur licht krijg je dan?

2. SPECTRA VAN LICHTBRONNEN

Je kunt een spectrum ook maken met een *tralie*. Dat is een dia, waarop heel dicht naast elkaar lijnen staan (zo'n 500 per mm).
Bekijk met een *traliespectroscoop* het spectrum van daglicht, van een gloeilamp en van twee soorten TL-buizen

('wit' en 'wit de luxe'). Welke overeenkomst zie je? En welke verschillen? Let goed op de 'sterkte' van de verschillende kleuren in de spectra en op de onderlinge verschillen daarin tussen de verschillende lichtbronnen.



3. KLEUREN MENGEN

Met kleurfilters kun je licht van verschillende kleuren maken. En door verschillende kleuren te mengen maak je weer andere kleuren. Maak daarvoor de opstelling van de foto hieronder.

a. Breng de rode en groene lichtbundel op het scherm samen. Welke kleuren zie je?
Varieer de sterkte van de lichtbundels.
Wat zie je allemaal?
Probeer ook de andere mogelijke filtercombinaties uit.

b. Breng de rode, groene en blauwe lichtbundel op het scherm samen. Probeer op het scherm wit licht te krijgen, door de sterkte van de lichtbundels te variëren.

4. KLEURINDRUK VERANDEREN

Bevestig op het scherm van de opstelling uit aktiviteit 3 een aantal kleurkaartjes. Regel de sterkte van de lichtbundels, zodat je wit licht op het scherm hebt (net als bij 3b).

a. In het spectrum van 'witte' TL-buizen zit relatief veel *blauw* licht. Om te bekijken hoe de kleurindruk daardoor verandert, verhoog je de sterkte van de blauwe lichtbundel iets.
Welk effekt heeft dat op de kleurindruk die kleurkaartjes geven?

b. In het spectrum van gloeilampen zit relatief veel *rood* licht. Ga op een soortgelijke manier als bij 4a na welk effekt dat heeft op de kleurindruk die de kleurkaartjes geven.

De verschillen in kleurindruk die verschillende lichtbronnen veroorzaken zijn ook van invloed op de 'waardering' voor de lichtbron. De relatief grote hoeveelheid rood licht in het spectrum van een gloeilamp geeft gloeilampen de naam een 'gezellig' licht te geven. In het spectrum van een 'witte' TL-buis zit relatief veel blauw licht. Daardoor hebben TL-buizen de naam 'ongezellig' licht te geven en 'zakelijk', 'koel' te zijn. Dat is niet (meer) terecht. Er zijn TL-buizen die vrijwel dezelfde kleur licht als gloeilampen geven.

TL-buis

Binnen de verscheidenheid aan vermogens, lengtes en diktes bestaat er nog onderscheid in "kleurtemperaturen", die iets zeggen over het soort licht dat de buizen geven.

Om het nog wat ingewikkelder te maken: er zijn TL-buizen in "gewone" en "de luxe" uitvoeringen. Deze laatste zijn duurder, maar geven ook meer licht voor lagere kosten. Ze geven bovendien de kleuren natuurlijker weer dan de "gewone" buizen.

Rode bietjes of vlees ziet er bij licht van een "wit de luxe" buis veel aantrekkelijker uit dan bij licht van kleur "wit". Deze laatste kleur laat u ook algauw vermoeden dat iemand zich niet lekker voelt, omdat hij of zij er zo flets uitziet. Voor woonkamers en keukens raden we dan ook de "de luxe" kleuren aan.

5. TL DE LUXE

Lees het hiernaast afgedrukte stukje uit een artikel over TL-buizen in de 'Consumentengids' van februari 1984.
Welke beweringen over de kleurweergave door 'de luxe' TL-buizen, vergeleken met 'gewone' TL-buizen, worden in dat stukje gedaan? Controleer die beweringen. In hoeverre ben je het eens met de conclusie in het stukje?

2.2 LICHTRENDEMENT

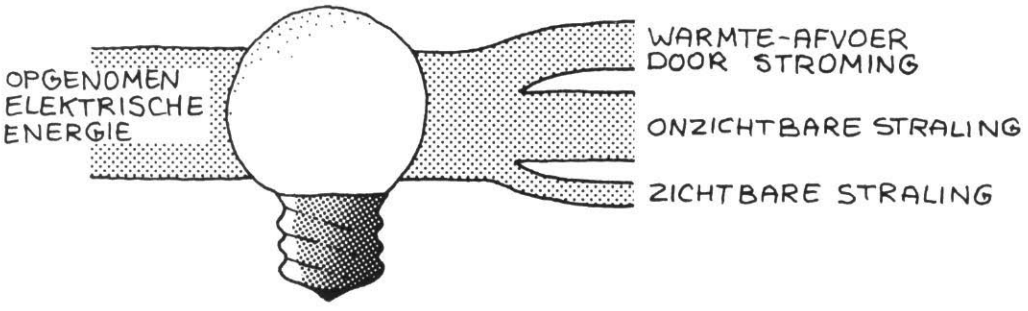
In voorgaande thema's is het rendement η van een energie-omzetter gedefinieerd als

$$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}} \cdot 100\%$$

Daarin is P_{uit} het door de energie-omzetter geleverde nuttig vermogen, en P_{in} het opgenomen vermogen. Het rendement van een energie-omzetter is een belangrijke grootheid bij het maken van een keuze voor het meest energiezuinige apparaat (en soms ook het uiteindelijk goedkoopste apparaat). Dat geldt ook voor lichtbronnen. Het definiëren van het rendement van een lichtbron (het *lichtrendement*) is echter niet zo eenvoudig.

lichtstroom

Een lichtbron is een energie-omzetter. De door een lamp per seconde opgenomen energie (het opgenomen vermogen dus) is gelijk aan het afgegeven vermogen. De energie wordt afgegeven door stroming en straling. De lamp is warm, verwarmt de omringende lucht, die stijgt op en maakt plaats voor koude lucht enz. (stroming). De rest van de energie wordt afgegeven in de vorm van straling. Slechts een *deel* van deze straling bestaat uit *zichtbaar licht.*



Energie-stroomdiagram van een lichtbron.

Van het afgegeven vermogen wordt dus slechts een deel nuttig gebruikt, namelijk: dát deel dat op het netvlies van je oog een lichtindruk geeft.

1.

a. De formule voor het rendement van een energie-omzetter is:

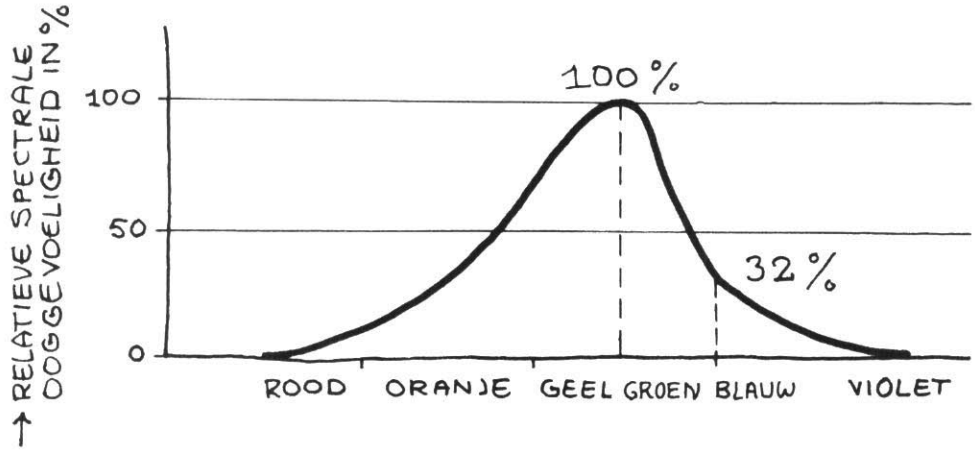
$$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}} \cdot 100\%$$

Omschrijf de betekenis van de grootheden P_{uit} en P_{in} voor het geval dat de energie-omzetter een lichtbron is.

b. Noem twee factoren die het rendement van een lichtbron beperken.

Het bepalen van het rendement van een lichtbron is echter niet zo simpel als het in activiteit 1 lijkt. De reden daarvoor is, dat voor het oog de ene watt de andere niet is: de lichtindruk die een bepaald vermogen op het netvlies geeft, hangt af van de kleur van het licht. Met andere woorden: het menselijk oog is niet voor alle kleuren van het spectrum even gevoelig.

Een bundel blauw licht geeft een minder sterke lichtindruk dan een bundel geelgroen licht *met hetzelfde vermogen*. Korter: het menselijk oog is minder gevoelig voor blauw licht dan voor geelgroen licht.



Relatieve spectrale ooggevoeligheid, afhankelijk van de kleur van het licht.

In het diagram is de *relatieve spectrale ooggevoeligheid* uitgezet tegen de kleur van het licht. Het oog is maximaal gevoelig voor geelgroen licht (100%). De gevoeligheid

voor blauw licht bedraagt 32%. Een lichtbundel blauw licht geeft op het netvlies dus een lichtindruk die zo'n driemaal zwakker is dan een bundel geelgroen licht van hetzelfde vermogen.
Bij een definitie van het rendement van een lichtbron gaat het om de lichtindruk die straling op het netvlies van je oog geeft. Voor het rendement van een lichtbron is dus *niet* het uitgezonden vermogen in de vorm van zichtbare straling maatgevend, maar het *voor de spectrale ooggevoeligheid gecorrigeerde vermogen.*
Het voor de spectrale ooggevoeligheid gecorrigeerde vermogen noem je de *lichtstroom S.* (Verwar deze *lichtstroom* niet met de *elektrische stroom* die nodig is om een lamp te laten branden.)
Een eenheid voor de meting van de lichtstroom zou de 'lichtwatt' kunnen zijn: de watt, maar dan gecorrigeerd voor de spectrale ooggevoeligheid. Een dergelijke eenheid klinkt echter wat verwarrend, zodat men afgesproken heeft de lichtstroom te meten in de eenheid *lumen* (afgekort: lm).

2.
Twee lichtbronnen met eenzelfde elektrisch vermogen zenden licht uit van verschillende kleur: de ene blauw en de andere geelgroen licht.
a. Verklaar waardoor het rendement van de blauwe lichtbron driemaal zo klein is als dat van de geelgroene, als beide lichtbundels eenzelfde vermogen hebben.
b. Ook als het vermogen van de blauwe lichtbundel bijv. tweemaal zo groot zou zijn als het vermogen van de geelgroene, is het rendement van de blauwe lichtbron kleiner dan dat van de geelgroene lichtbron. Verklaar dit.

lichtrendement
Voor het lichtrendement η_L van een (elektrische) lichtbron met een opgenomen (elektrisch) vermogen P_e en een afgegeven lichtstroom S geldt de formule:

$$\eta_L = \frac{S}{P_e}$$

Dit rendement wordt dus uitgedrukt in lumen per watt (lm/W), en niet in % zoals tot nu toe gebruikelijk was in de thema's 'Verkeer', 'Elektrische Machines' en 'Energie en Kwaliteit'.
Op grond van de definitie van de eenheid lumen (waar we hier verder niet op ingaan), is het theoretisch maximale rendement van een lichtbron gelijk aan 670 lm/W. Dat rendement geldt voor een lichtbron die al het opgenomen vermogen zou omzetten in geelgroen licht.

3.
a. Leg uit waarom een lichtbron voor een maximaal rendement geelgroen licht moet uitstralen.
b. Geef twee redenen waarom het lichtrendement van een lichtbron altijd lager zal zijn dan het theoretisch maximale rendement van 670 lm/W.

TL-BUIZEN DIAMETER 26 mm, 36 W

MERK EN TYPE	PRIJS	VERMOGEN 1)2)	LICHTOPBRENGST 1) VERMOGEN	LICHTOPBRENGST/ LEVENSDUUR	LICHTOPBRENGST NA 10.000 UUR	KLEURWEERGAVE	TEKENRESULTAAT	TOTAAL
	f	W	lm	3)				
WIT								
OSRAM *L 36W/20*	7,75	35,4	2770	□	+	□	-	REDELIJK
PHILIPS *TLD 36W/33*	7,75	36,4	2800	□	+	-	-	MATIG
SYLVANIA *F36W/CW-ST 133/ES*	7,75	36,1	2870	□	+	□	-	REDELIJK
WIT DE LUXE								
OSRAM *L 36W/21*	15,70	35,8	3270	++	+	+	+	GOED
PHILIPS *TLD 36W/84*	15,70	36,2	3240	++	+	+	+	GOED
SYLVANIA *F36W/CWX 184/ES*	15,70	36,2	3150	+	+	+	+	GOED

1 Gemeten na 100 branduren
2 Exclusief 7,5 W voor voorschakelapparatuur
3 Afname lichtopbrengst na 10.000 branduren:
+ = 10-20%; □ = 20-30%; - = 30-40%

++ = ZEER GOED; + = GOED; □ = REDELIJK;
- = MATIG; -- = SLECHT

4. ENERGIEZUINIGE VERLICHTING
In de Consumentengids van februari 1984 werden in een artikel 'besparen op verlichting' de resultaten bekend gemaakt van een vergelijkend warenonderzoek naar gloeilampen, TL-buizen en 'bespaarlampen'.
In de tabellen hiernaast en op blz. 16 vind je de onderzoeksresultaten van de nieuwe 'slanke-lijn' TL-buizen (26 mm dik; dunner dus dan de oude TL-buizen met een dikte van 38 mm) en de bespaarlampen.

BESPAARLAMPEN

MERK EN TYPE	PRIJS	AFMETINGEN INCL. LAMPVOET	GEWICHT	LICHTOPBRENGST VERMOGEN 1)	LICHTOPBRENGST 2)	OPGEG. LEVENSDUUR	STARTEN	LICHTOPBRENGST VERMOGEN	LEVENSDUUR	LICHTOPBRENGST NA 3000 UREN	TEINTRESULTAAT	TOTAAL
	f	mm	g	W	lm	h						
HITACHI *CIRCLE-LAMP 25 W*	29,00	122x210	515	24,5	865	3000	+	+	+	□		GOED
MS-LAMP *13 W*	20,00	218x 70	200	7,2	214	3000	□	□	--	5)		SLECHT[6]
OSRAM *CIRCOLUX 25 W*	40,00	98x165	210	27,0	786	6000	+	□	-	-		MATIG
PHILIPS *SL 18 18 W* 1)	28,00	170x 72	540	19,3	840	5000	-	+	++	□		GOED

1 Wordt ook door Pope en Splendor op de markt gebracht
2 Gemiddeld over totale brandtijd
3 Gemeten na 100 branduren
4 Afname lichtopbrengst na 5000 branduren: □ = 20-30%; - = 30-40%
5 Niet van toepassing
6 Verkoop inmiddels gestaakt

++ = ZEER GOED; + = GOED; □ = REDELIJK; - = MATIG; -- = SLECHT

VOORSCHAKELAPPARAAT
Bij TL-verlichting is een voorschakelapparaat nodig, met een opgenomen vermogen van 7,5 W. In de tabel met onderzoeksresultaten is dit extra benodigd vermogen niet meegerekend. Om het lichtrendement van een TL-buis te vergelijken met dat van andere soorten lampen, moet je daar wél rekening mee houden.

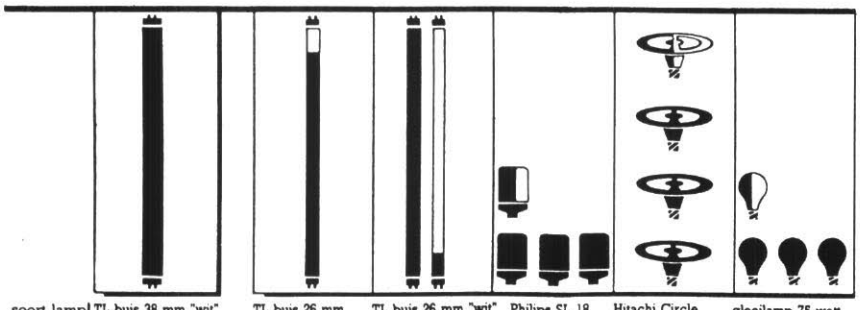
a. Bereken met behulp van de gegevens uit de tabellen het lichtrendement van de twee soorten TL-buizen ('wit' en 'wit de luxe') en de bespaarlampen. Noteer het resultaat van je berekeningen in een tabel. Neem in die tabel ook het lichtrendement van een 75 W gloeilamp op: 12 lm/W.

b. Welke manier van verlichten zal voor een zo laag mogelijk energiegebruik zorgen: met gloeilampen, TL-buizen of met bespaarlampen? Gebruik bij je antwoord de tabel met berekende lichtrendementen.

c. Welke andere faktoren zullen bij de keuze voor verlichting met gloeilampen, TL-buizen of bespaarlampen een rol spelen?

5. BESPAREN OP VERLICHTING

Energiezuinige verlichting betekent een laag energiegebruik, en een minder hoge rekening van het energiebedrijf. Maar uit de tabellen bij aktiviteit 4 blijken nogal wat verschillen in aanschafprijs. Een gloeilamp kost niet meer dan één à twee gulden, de prijs van een TL-buis is tien à vijftien gulden en voor een bespaarlamp moet je drie à vier tientjes neerleggen. De vraag is dus of het lagere elektriciteitsgebruik bij TL-buizen en bespaarlampen het verschil in prijs goed maken.



soort lamp (aantal) | TL-buis 38 mm "wit" (1) | TL-buis 26 mm "de luxe" (0,9) | TL-buis 26 mm "wit" (1,1) | Philips SL 18 (3,6) | Hitachi Circle Lamp (3,5) | gloeilamp 75 watt (3,4)

a. Voor een vergelijking tussen de jaarkosten van verlichting bij gebruik van gloeilampen, TL-buizen en bespaarlampen heb je een aantal gegevens nodig. Maak een lijstje van de gegevens die je van elk soort lamp nodig hebt om zo'n vergelijking te kunnen maken. Schrijf er ook bij waarom je die gegevens nodig hebt.
Hoe zou je met die gegevens aan het werk gaan om zo'n kostenvergelijking te maken?

b. In het bij aktiviteit 4 genoemde vergelijkend warenonderzoek is een vergelijking gemaakt tussen de jaarkosten van verlichting met de verschillende soorten lampen bij eenzelfde lichtopbrengst en 1000 branduren per jaar. Een eerste probleem daarbij is 'eenzelfde lichtopbrengst'. Daarbij is men als volgt te werk gegaan. Als uitgangspunt werd een oud type TL-buis genomen ('wit'/38 mm/40 W/3000 lm). Vervolgens werd berekend hoeveel lampen van elk ander type nodig zijn om dezelfde lichtopbrengst (dus: 3000 lm) te geven. De resultaten van die berekeningen zie je in de figuur hiernaast (de getallen tussen haakjes). Controleer deze berekeningen met behulp van de gegevens uit de tabellen bij aktiviteit 4. (De gloeilamp komt niet in deze tabellen voor, maar je weet wel het lichtrendement van een 75 W gloeilamp: 12 lm/W).

c. Nu kun je een kostenvergelijking maken. De daarvoor benodigde gegevens staan in de tabel hiernaast. Neem de tabel over in je schrift, en bereken de getallen in de opengelaten kolommen. Gebruik bij het invullen van de laatste kolom de gegevens over de aantallen benodigde lampen voor een lichtopbrengst van 3000 lm.

VERLICHTING KOSTEN PER JAAR 1)

SOORT	AANSCHAF: PRIJS	AANSCHAF: LEVENSDUUR GEMETEN	VERBRUIK 2): AFSCHRIJVING PER JAAR	VERBRUIK 2): VERMOGEN	KOSTEN PER JAAR	KOSTEN PER JAAR	LICHTOPBRENGST	KOSTEN PER JAAR PER 3000 lm
	f	h	f	W	f	f	lm	f
GLOEILAMPEN								
GLOEILAMP 75 W	1,50	1.000		72,1			889	
BESPAARLAMPEN								
HITACHI CIRCLE LAMP	29,00	5.000		24,5			865	
PHILIPS SL 18	28,00	5.000		19,3			840	
TL-BUIZEN								
38 mm TL WIT	10,95 3)	10.000		47,5 4)			3000	
26 mm TL WIT	9,00 3)	10.000		43,5 4)			2800	
26 mm TL WIT DE LUXE	16,95 3)	10.000		43,5 4)			3200	

1 Uitgaande van 1000 branduren per jaar
2 Bij een kWh-prijs van f 0,27
3 Inclusief starter van f 1,25
4 Inclusief 7,5 W voor voorschakelapparatuur

d. Maak een kort verslag van dit onderzoek naar 'besparen op verlichting'. Presenteer de resultaten van het onderzoek zo duidelijk en 'sprekend' mogelijk.
e. Vergelijk je conclusies met het hieronder afgedrukte gedeelte uit het artikel over 'besparen op verlichting' uit de Consumentengids van februari 1984. Zijn jouw conclusies dezelfde?

Besparen op verlichting: TL-buis en bespaarlamp

TEST

Verlicht u uw huis met gloeilampen, TL-buizen of bespaarlampen? Als we alleen naar de kosten kijken, loont het zeker de moeite alle gloeilampen rigoureus door TL-buizen te vervangen. Of door bespaarlampen, want ook die zijn zuiniger dan gloeilampen.

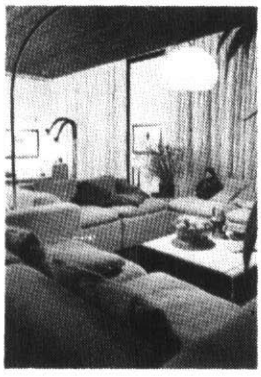
Met TL-buizen valt, op de *f* 200 à *f* 300 die een huishouden gemiddeld per jaar aan elektriciteit voor verlichting uitgeeft, het meest te besparen. Met de nieuwe, "slanke lijn", 36-watt-buis zelfs nog meer dan met de oudere, dikkere, 40-watt-buis.

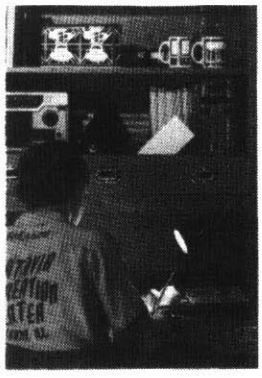
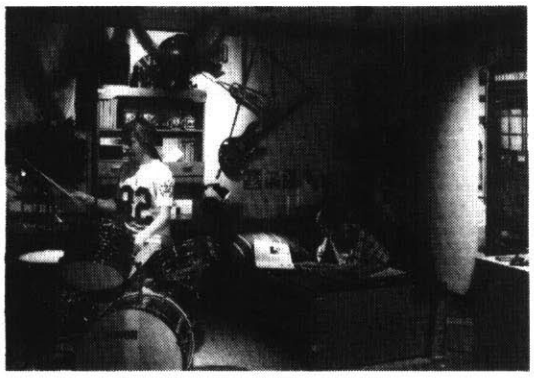
f. Bereken het energiebesparingspercentage, als je alle gloeilampen in een huis zou vervangen door TL-buizen (bij in totaal dezelfde lichtopbrengst). Doe dit ook voor de vervanging van gloeilampen door bespaarlampen.
g. Hoe groot is in beide gevallen het kostenbesparingspercentage? Is het zonder meer mogelijk om gloeilampen te vervangen door TL-buizen?En door bespaarlampen?
Met welke kostenfaktor is in de kostenvergelijking geen rekening gehouden? Welke kritiek kun je hebben op de conclusie uit het artikel in de Consumentengids?

2.3 VERLICHTINGSSTERKTE

Het lichtrendement van een lamp is belangrijk voor het energiegebruik, maar zegt nog niets over 'een goede verlichting'.
Als je zit te werken, wil je een behoorlijke verlichting op je tafel hebben. Als de verlichting erg zwak is, of erg ongelijk van sterkte, werk je niet prettig. Aan de andere kant is het ook niet nodig overal in huis een zee van licht te hebben. In een gang hoeft de verlichting niet zo sterk te zijn als in een huiskamer. En op een werktafel heb je meer licht nodig dan op een vloer.
Een 'goede verlichting' hangt van veel faktoren af, bijv.:
– het vermogen en het soort lampen (je hebt gezien dat gloeilampen en TL-buizen van hetzelfde vermogen een verschillende hoeveelheid licht leveren);
– de armaturen (lampekappen); deze kunnen het licht op allerlei manieren afschermen, richten of juist spreiden;
– de grootte en de vorm van de kamer en de plaatsing van de verschillende lampen in die kamer;
– de hoeveelheid licht die teruggekaatst wordt door het plafond en de wanden (indirekte verlichting).

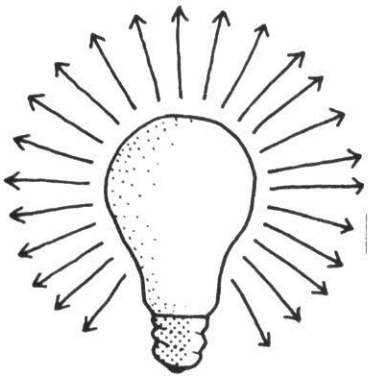
Verlichting moet niet alleen praktisch zijn, maar ook plezierig: de sfeer in een kamer hangt sterk af van de verlichting. Wat dat betreft zal je keuze afhangen van mode en persoonlijke smaak: voor sfeerverlichting zijn moeilijk algemene regels te geven.
Over de praktische kant is men het sneller eens. Voor een bureaulamp zullen de meeste mensen wel een gloeilamp van 40 of 60 W geschikt vinden; 25 W is duidelijk te weinig en 150 W teveel van het goede. Het kiezen van een geschikte lamp voor boven een tafel kan een kwestie van proberen zijn: als je het licht te zwak of te sterk vindt, kun je de lamp vervangen.



Voor fabrieken, scholen en kantoren kun je beter van te voren berekeningen maken: het wordt vervelend als je een paar honderd lampen moet vervangen, omdat ze te zwak blijken te zijn.

In deze paragraaf gaat het over de manier waarop je in een bepaalde situatie het aantal lampen en het vermogen daarvan bepaalt voor een 'goede verlichting'.

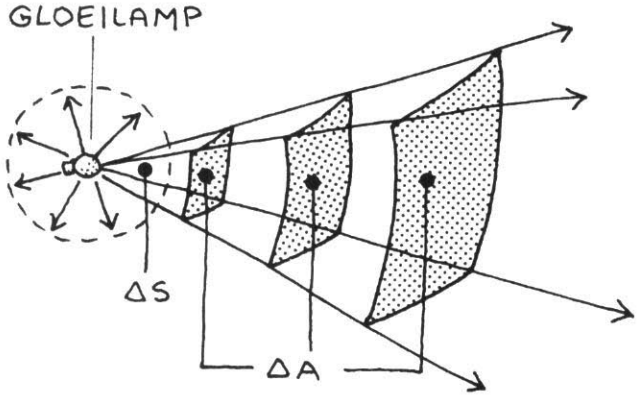


Tot nu toe heb je het symbool Δ gebruikt om verschillen aan te geven: bijv. een temperatuurverschil ΔT of een drukverschil Δp. Het symbool Δ wordt echter ook gebruikt om een deel van iets groters aan te duiden: bijv. een oppervlakte ΔA als deel van een grotere oppervlakte A of een lichtstroom ΔS als deel van de totale lichtstroom S die door een lichtbron wordt uitgezonden.

verlichtingssterkte

Een lichtbron zendt licht uit in allerlei richtingen. De nuttige hoeveelheid licht die de lichtbron per seconde uitzendt, is in paragraaf 2.2 de lichtstroom S genoemd. Naarmate het licht zich verder van een (puntvormige) lichtbron verwijdert, moet deze lichtstroom zich verdelen over een steeds groter boloppervlak (met de lichtbron als middelpunt). Je merkt dan ook dat de lichtindruk van een lichtbron op je netvlies zwakker wordt, naarmate je er verder vanaf staat.

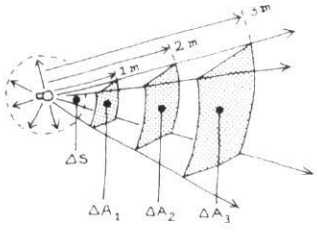
In de tekening hieronder is deze verspreiding van het licht voor een deel ΔS van de door de lichtbron uitgezonden lichtstroom weergegeven.



Een maat voor de verlichting van de (denkbeeldige) oppervlakken in de tekening hierboven is de *verlichtingssterkte* E:

$$E = \frac{\Delta S}{\Delta A}$$

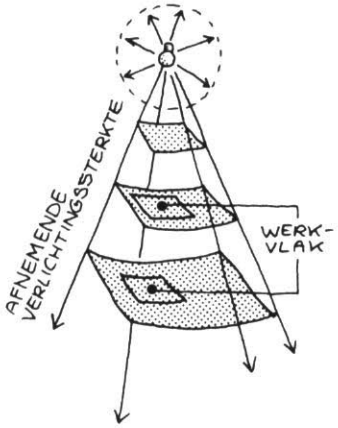
In deze formule is ΔA de grootte van het oppervlak waarover de lichtstroom ΔS zich heeft verspreid. (We gebruiken hier het symbool ΔA omdat het gaat om een *deel* van het (bol)oppervlak waarover het licht van de lichtbron zich verspreidt.)



1.
In de tekening hiernaast liggen de getekende oppervlakken ΔA op afstanden van 1, 2 en 3 m van de lichtbron.

a. Hoeveel maal zo groot is ΔA_2 ten opzichte van ΔA_1? En ΔA_3 ten opzichte van ΔA_1?

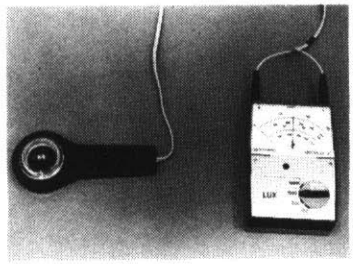
b. Hoeveel maal zo klein is daardoor E_2 ten opzichte van E_1? En E_3 ten opzichte van E_1?



De verlichtingssterkte geeft aan hoe goed (of hoe slecht) de verlichting van een vlak is. Hoe groter de verlichtingssterkte, des te beter de verlichting. (Maar als de verlichtingssterkte tè groot is, wordt de verlichting juist weer slechter: er kan verblinding optreden.)
Uit het voorgaande volgt dat de verlichtingssterkte op een *werkvlak* (de werkbank, het tafelblad enz.) afhangt van twee faktoren:
- de lichtstroom die de lichtbron uitzendt;
- de afstand tussen de lichtbron en het werkvlak.

Hoe groter de door een lamp uitgezonden lichtstroom, des te groter de verlichtingssterkte op het werkvlak. En dus: des te beter de verlichting. Hoe groter de afstand tussen de lichtbron en het werkvlak, des te kleiner de verlichtingssterkte op het werkvlak. En dus: des te slechter de verlichting.

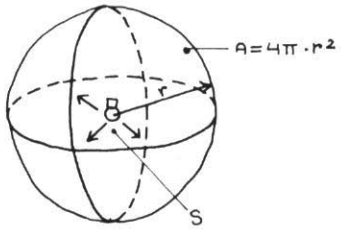
Volgens de hierboven gegeven formule is de eenheid van verlichtingssterkte de lumen per vierkante meter: lm/m^2. Deze eenheid heeft de naam *lux* (afgekort: lx). Er zijn meetinstrumenten in de handel die de verlichtingssterkte in deze eenheid aangeven: *luxmeters.*



Luxmeter.

Het verband tussen de verlichtingssterkte E en de afstand r tussen lichtbron en werkvlak kan theoretisch afgeleid worden. Op een afstand r van de (puntvormige) lichtbron heeft de lichtstroom S zich verspreid over een bolvormig oppervlak met straal r. De oppervlakte A hiervan wordt gegeven door: $A = 4\,\pi \cdot r^2$. Een kleine variatie op de definitie van verlichtingssterkte (we bekijken nu de totale lichtstroom van een lichtbron, in plaats van slechts een deel!) geeft dan:

$$E = \frac{S}{A} = \frac{S}{4\,\pi \cdot r^2}$$



In deze formule is $S/4\pi$ een constante (voor een bepaalde lichtbron). De verlichtingssterkte neemt dus af met het kwadraat van de afstand tot de lichtbron. Of, anders gezegd: E is omgekeerd evenredig met r^2. Bij een verdubbeling van de afstand tussen lichtbron en werkvlak wordt de verlichtingssterkte op het werkvlak dus viermaal zo klein. Bij een driemaal zo grote afstand tot de lichtbron wordt de verlichtingssterkte negenmaal zo klein enz. (Vergelijk dit met je antwoorden bij aktiviteit 1.)

2. VERLICHTINGSSTERKTE EN AFSTAND TOT DE LICHTBRON

Volgens de theorie is E omgekeerd evenredig met r^2 bij een puntvormige lichtbron. Controleer dze veronderstelling (hypothese) met een proef.
Gebruik als lichtbron in een verduisterde ruimte een bolvormig gloeilampje met melkglas. Plaats een luxmeter achtereenvolgens op verschillende afstanden, steeds op eenzelfde rechte lijn vanuit het middelpunt van de lamp. Meet het verband tussen verlichtingssterkte E en afstand tot de lichtbron r.
Ga na of de metingen overeenstemmen met de theorie (zie zonodig de bijlage 'omgekeerde evenredigheden').

3. EEN LIJNVORMIGE LICHTBRON

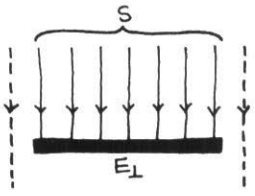
Een puntvormige lichtbron (gloeilamp) verspreidt het uitgezonden licht over een boloppervlak. Een TL-buis is echter geen puntvormige lichtbron, maar een 'lijnvormige'.

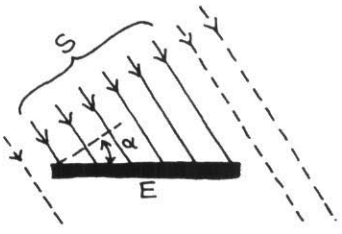
a. Over welk soort oppervlak zal een lijnvormige lichtbron het uitgezonden licht verspreiden?

b. Leid uit je veronderstelling bij 3a af welk verband er dan bestaat tussen verlichtingssterkte en afstand tussen werkvlak en lichtbron.

c. Controleer je veronderstelling (hypothese) bij 3b met een proef.
Gebruik als lichtbron in een verduisterde ruimte een lange TL-buis. Plaats een luxmeter achtereenvolgens op verschillende afstanden, steeds op eenzelfde loodlijn vanuit het midden van de lichtbron. Meet het verband tussen verlichtingssterkte E en afstand tot de lichtbron r.
Ga na welk verband er bestaat tussen E en r (zie zonodig de bijlage 'omgekeerde evenredigheden').

d. Zijn je veronderstellingen bij 3a en 3b een redelijke benadering van de werkelijkheid?





4. VERLICHTINGSSTERKTE BIJ SCHUIN INVALLEND LICHT

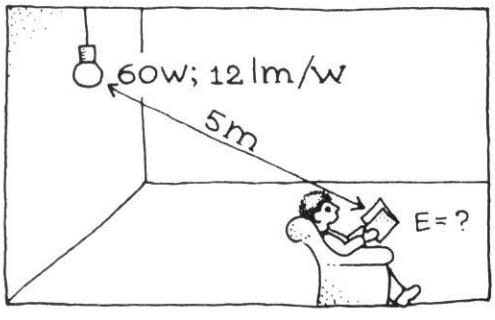
Een werkvlak wordt gelijkmatig verlicht door een evenwijdige lichtbundel die loodrecht invalt.

a. Beredeneer dat de verlichtingssterkte op het vlak afneemt als dezelfde lichtbundel vanuit een andere richting invalt.

b. Leid af welk verband er bestaat tussen de verlichtingssterkte E, $E_\perp$ (de verlichtingssterkte bij loodrechte inval) en de hoek α waaronder de lichtbundel het vlak treft. (Bedenk daarbij dat bij schuine inval de op het vlak invallende lichtstroom kleiner is dan bij loodrechte inval; zie ook het thema 'Energie en Kwaliteit', blz. 34.)

c. Controleer je veronderstelling (hypothese) bij 4b met een proef.
Gebruik een puntvormige lichtbron (gloeilamp) in een verduisterde ruimte. Varieer de hoek α door de luxmeter te draaien (dat is makkelijker dan steeds de lichtbron verplaatsen). Meet het verband tussen verlichtingssterkte E en de hoek α. (Meet ook $E_\perp$: de verlichtingssterkte bij loodrechte inval.)

d. Is je veronderstelling over het verband tussen E, $E_\perp$ en α bij 4b een redelijke benadering van de werkelijkheid?



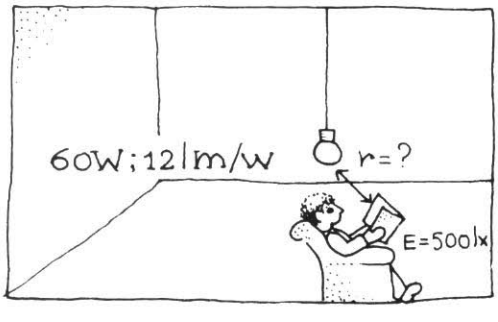
5.

In de hiernaast getekende situatie wordt een kamer verlicht door een gloeilamp van 60 W (lichtrendement 12 lm/W). Op een afstand van 5 m van de lichtbron probeert iemand een boek te lezen. De daarvoor benodigde verlichtingssterkte op het boek bedraagt 500-1000 lx (resp. voor een 'goede' en 'zeer goede' verlichting).

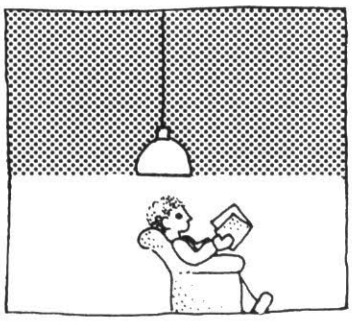
a. Bereken de verlichtingssterkte op het boek in deze situatie. Is hier sprake van een 'goede' verlichting. Zo nee, hoe groot zou dan het vermogen van de gloeilamp moeten zijn? Vind je dit een reële waarde? Zo nee, welke oplossingen zie je voor dit verlichtingsprobleem?

b. Eén van de (vele) mogelijke oplossingen voor dit probleem is het verminderen van de afstand tussen lichtbron en boek. Bereken de maximale afstand tussen de gloeilamp (60 W) en het boek, waarbij nog van een 'goede' verlichting sprake is. Hoe reëel lijkt deze oplossing je?

c. Geef een belangrijke oorzaak van het feit dat de verlichtingssterkte op het boek in beide situaties in werkelijkheid groter is dan berekend, resp. gegeven.



6.



In de hiernaast getekende situatie leest iemand een boek bij het licht van een gloeilamp van 60 W (lichtrendement 12 lm/W). De lamp zit in een armatuur, waardoor het licht zich niet meer in alle richtingen over bolvormige oppervlakken verspreidt, maar over *halve bollen*. De afstand tussen lichtbron en boek bedraagt 0,4 m.

a. Toon aan dat in deze situatie de verlichtingssterkte op het boek ruim 700 lx bedraagt.

b. Een verlichtingssterkte van 500 lx is een 'goede' verlichting voor het lezen van een boek. Ga na of de gloeilamp van 60 W vervangen kan worden door één van 40 W (lichtrendement 12 lm/W).

indirekte verlichting

Bij het bepalen van de verlichtingssterkte op een werkvlak zijn we tot nu toe uitgegaan van *direkt* licht: licht dat direkt van de lichtbron naar het werkvlak gaat. In veel gevallen komt op het werkvlak ook *indirekt* licht terecht: licht dat één of meer reflecties heeft ondergaan. Dit indirekte licht kan een belangrijke bijdrage leveren aan de verlichtingssterkte op het werkvlak.

We zullen twee gevallen wat nader bekijken:

– de bundeling van een lichtstroom door reflectie in de armatuur van een bureaulamp (belangrijk voor 'plaatselijke' verlichting van een werkvlak);

– de reflectie van licht tegen plafond en wanden van een kamer (belangrijk voor verlichting van een ruimte als geheel).

bureaulamparmatuur

Een bureaulamparmatuur bundelt het door de gloeilamp uitgezonden licht. Welk effekt heeft dat op de verlichtingssterkte op het werkvlak? En omgekeerd: kun je op grond van de eigenschappen van het armatuur en de gewenste verlichtingssterkte op het werkvlak bepalen hoe groot het vermogen van de gloeilamp moet zijn? Met deze twee vragen houd je je bezig in de aktiviteiten 7 t/m 9.

Bureaulamp-armatuur.

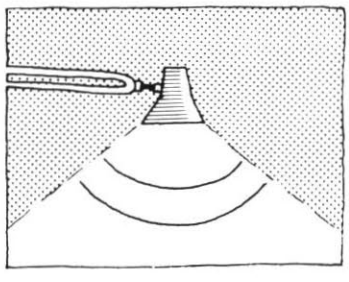
7. BUREAULAMPARMATUUR

a. Hang een 'kale' gloeilamp (25 W/12 lm/W) op een hoogte van 0,5 m boven een tafelblad (in een verder verduisterde ruimte). Meet de verlichtingssterkte recht onder de lamp op het tafelblad met een luxmeter. (Is de gemeten verlichtingssterkte in overeenstemming met wat je theoretisch mag verwachten?)

b. Draai de gloeilamp in een bureaulamp-armatuur. Zorg ervoor dat de gloeilamp weer op een hoogte van 0,5 m boven het tafelblad hangt. Meet de verlichtingssterkte op het tafelblad.

Met hoeveel % is de verlichtingssterkte door het aanbrengen van het armatuur gestegen?

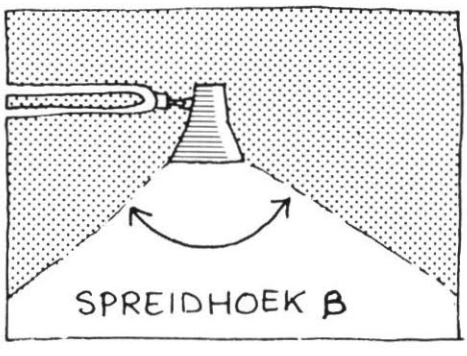
c. Verklaar de toename van de verlichtingssterkte op het werkvlak door het aanbrengen van het armatuur.



Bij een 'kale' gloeilamp wordt in vrijwel alle richtingen licht uitgezonden. Door het aanbrengen van een armatuur wordt de uitgezonden lichtstroom niet meer verspreid over steeds groter wordende boloppervlakken, maar over *delen* daarvan. De lichtstroom wordt dus verspreid over een kleiner oppervlak, en de verlichtingssterkte op dat oppervlak zal groter zijn dan bij een 'kale' gloeilamp. De bundeling van de lichtstroom is een gevolg van reflectie in het armatuur. Bij die reflectie wordt echter een deel van het licht geabsorbeerd. Bij een goed reflecterend armatuur is de door het armatuur uitgezonden lichtstroom zo'n 80% van de door de lamp uitgezonden lichtstroom.

8. ARMATUUR EN VERLICHTINGSSTERKTE

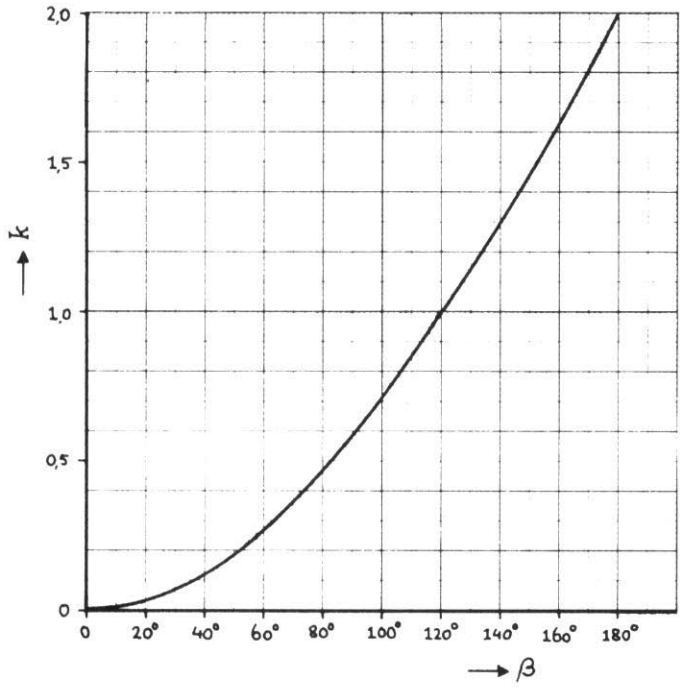
In aktiviteit 7 heb je de verlichtingssterkte op een werkvlak gemeten bij een 'kale' gloeilamp en bij dezelfde gloeilamp in een armatuur. De verlichtingssterkte bij een 'kale' gloeilamp kon je theoretisch controleren. In deze aktiviteit ga je dat doen voor een gloeilamp in een armatuur. Het belangrijkste probleem daarbij is de bepaling van de grootte van het *deel* van het boloppervlak waarover de lichtstroom wordt verspreid.



a. Bereken de lichtstroom die uit het armatuur komt in de situatie van aktiviteit 7 (gloeilamp 25 W; 12 lm/W). Houd daarbij rekening met de lichtabsorptie in het armatuur (zo'n 20%).

b. Bepaal de *spreidhoek* β van het armatuur. (Bedenk daar een meetmethode voor.)

c. Het oppervlak ΔA van het *deel* van het boloppervlak waarover de licht-



stroom wordt verspreid, is afhankelijk van de grootte van de spreidhoek β en de straal r van het boloppervlak. Dit oppervlak ΔA kun je berekenen met de volgende formule:

$$\Delta A = k \cdot \pi \cdot r^2$$

De faktor k is afhankelijk van de spreidhoek β. Het verband tussen k en β is in het diagram hieronder weergegeven.
Bereken het oppervlak ΔA bij r = 0,5 m en de bij 8b gemeten spreidhoek β.

d. Bereken uit je resultaten bij 8a en 8c de verlichtingssterkte op het tafelblad. Vergelijk het resultaat van je berekening met je meting bij aktiviteit 7b.

9. VERMOGEN KIEZEN

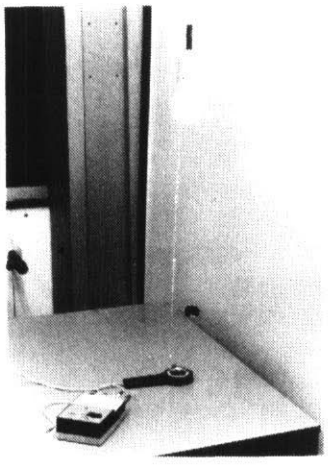
Nu je weet over welk oppervlak het armatuur de lichtstroom verspreidt (aktiviteit 8), kun je bepalen hoe groot het vermogen van de gloeilamp moet zijn om voor een 'goede' of 'zeer goede' verlichting te zorgen. De verlichtingssterkte op het werkvlak is daarbij 500 resp. 1000 lx. Bij die bepaling moet je uitgaan van een lamphoogte van 0,5 m boven het werkvlak (waarom?).

a. Bepaal het vermogen van de gloeilamp (η_L = 12 lm/W) bij een 'goede' en 'zeer goede' verlichting.
Welke vermogens zul je in de praktijk moeten kiezen? (En is het armatuur daarop berekend?)

b. Gelden de berekende vermogens ook voor andere armaturen? En voor andere lamphoogten boven het werkvlak? En voor andere typen lampen (TL-buis, bespaarlamp)?

ruimteverlichting

Een deel van de door lampen uitgezonden lichtstroom bereikt *direkt* het werkvlak. Een deel van de lichtstroom wordt uitgezonden naar de wanden en het plafond. Na reflectie komt van de wanden en het plafond *indirekt* licht op het werkvlak terecht. Welke invloed heeft dit indirekte licht op de verlichtingssterkte? Hoeveel lampen zijn nodig om een ruimte goed te verlichten? Met deze vragen houd je je bezig in de aktiviteiten 10 t/m 13.



10. REFLECTIE

a. Hang een 'kale' gloeilamp (40 W; 12 lm/W) op een hoogte van 0,5 m boven een tafelblad (in een verder verduisterde ruimte). Meet de verlichtingssterkte recht onder de lamp op het tafelblad met een luxmeter. (Is de gemeten verlichtingssterkte in overeenstemming met wat je theoretisch mag verwachten?)

b. Plaats naast de gloeilamp op zo'n 20 cm afstand een vertikaal wit scherm. Meet de verlichtingssterkte op het tafelblad op dezelfde plaats.
Met hoeveel % is de verlichtingssterkte gestegen door het plaatsen van het scherm?

c. Verklaar de toename van de verlichtingssterkte op het werkvlak door het plaatsen van het scherm.

Lichtreflectie door wanden en plafond levert een bijdrage aan de verlichtingssterkte op het werkvlak. De kleur en de struktuur van de wanden en het plafond bepalen welk deel van de uitgezonden lichtstroom naar het werkvlak wordt teruggekaatst. De 'verloren' lichtstroom verlicht de ruimte of wordt geabsorbeerd door de wanden en het plafond.

De lichtstroom die het werkvlak bereikt, is dus kleiner dan de lichtstroom die de in de ruimte aanwezige lampen gezamenlijk uitzenden. Onder gunstige omstandigheden (goed reflecterende wanden en plafond bij direkte verlichting) komt zo'n 60% van de door de lampen uitgezonden lichtstroom op het werkvlak terecht. Onder ongunstige omstandigheden (slecht reflecterende wanden en plafond bij indirekte verlichting) is dat slechts zo'n 5%.

Directe verlichting.

Overwegend indirecte verlichting.

11. VERLICHTING VAN EEN LOKAAL

a. Bepaal hoeveel % van de door de lampen uitgezonden lichtstroom in je klaslokaal het werkvlak bereikt. Verzamel daarvoor de volgende gegevens:
– de verlichtingssterkte op het werkvlak (en bereken daarmee de lichtstroom die het werkvlak bereikt);
– het vermogen van de aanwezige lichtbronnen en het lichtrendement hiervan (en bereken daarmee de lichtstroom die de lampen uitzenden).

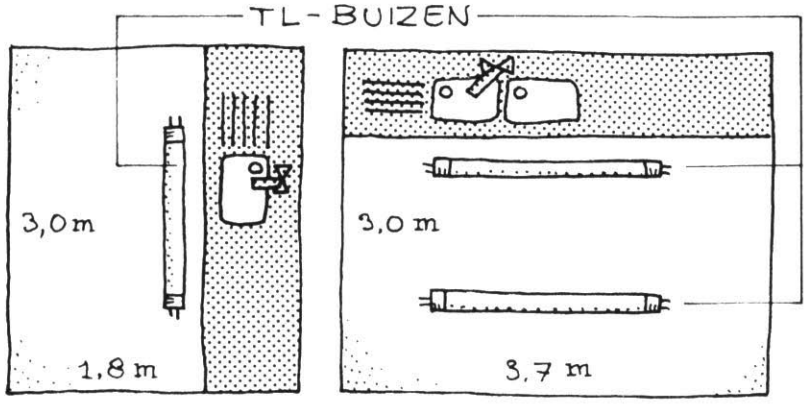
b. Voldoet de verlichtingssterkte op het werkvlak aan de daarvoor gestelde normen? (Zie de tabel op pagina 24.) Zo nee, welke verbeteringen zou je in dit opzicht in het lokaal kunnen aanbrengen? (Bedenk eerst welke faktoren de verlichtingssterkte op het werkvlak beïnvloeden; ga dan na welke van die faktoren veranderd kunnen worden in het betreffende klaslokaal en hóe ze dan veranderd moeten worden.)

VERLICHTINGSSTERKTE BUITEN
Ter vergelijking met de aanbevolen verlichtingssterktes uit de tabel op blz. 24 geven we hieronder een paar natuurlijke verlichtingssterktes:
- *daglicht maximaal 100 klx*
- *daglicht bewolkt 50 klx*
- *maanlicht maximaal 0,2 lx*
- *sterrelicht 1,5 mlx*

Bij een verlichtingssterkte van 1 lx kun je nog net met moeite lezen.

12. VERLICHTINGSSTERKTE-CONTROLE

Meet in verschillende ruimtes uit de tabel op pagina 24 of de verlichtingssterkte voldoet aan de aanbevolen waarden. Vind je het in situaties waarin aan de aanbevolen waarden van de verlichtingssterkte is voldaan erg licht, gewoon licht of nogal donker?



13. KEUKENVERLICHTING

In een keuken is de bijdrage van indirekt licht aan de verlichtingssterkte meestal vrij groot (wit plafond, (wit) betegelde wanden): gemiddeld bereikt zo'n 50% van de door de lampen uitgezonden lichtstroom het werkvlak.

a. Bepaal voor de twee hiernaast getekende keukens
– de gewenste verlichtingssterkte (algemeen);
– het benodigde vermogen van de TL-buizen (lichtrendement 70 lm/W). (Denk om de verkrijgbaarheid!)

b. Geef twee redenen voor het gebruik van twee TL-buizen in de grootste keuken.

c. Op de foto hiernaast zie je een keuken, die verlicht wordt door twee gloeilampen.
Waarom is het geen goed idee om deze twee lampen te vervangen door één lamp in het midden van het plafond, zelfs als deze lamp voor een even grote of grotere verlichtingssterkte zou zorgen?
Als je in deze keuken een extra lamp zou kunnen aanbrengen, waar zou je die dan plaatsen? Waarom?

d. Welke andere faktor dan het vermogen van de lampen is (uiterst) belangrijk bij het zorgen voor een goede verlichting?

Aard van de te verlichten ruimte	Verlichtingssterkte in lx
Woonhuizen	
Woonkamer (algemeen)	125-250
Woonkamers (plaatselijk)	1000-2000
Slaapkamers	125-250
Badkamers	250-500
Keukens (algemeen)	250-500
Keukens (plaatselijk)	500-1000
Winkels	
Verkoopruimten, showrooms	500-1000
Magazijnen	250-500
Etalages	
Algemeen	1000-2000
Plaatselijk	5000-10 000
Fabrieken	
Werkplaatsen voor grof werk (smederij, walserij)	250-500
Werkplaatsen voor gewoon werk (montagewerk, grof draaien, boren)	500-1000
Werkplaatsen voor fijn werk (fijn draaien, polijsten, naaien, zetterij, drukkerij, weverij, spinnerij enz.)	1000-2000
Werkplaatsen voor zeer fijn werk (instrumentmakerij, graveerinrichting, horlogemakerswerkplaats)	2000-5000
Scholen	
Leslokalen	250-500
Tekenzalen	500-1000
Gymnastieklokalen	125-250
Naaileslokalen	500-1000
Kerken	125-250

Aard van de te verlichten ruimte	Verlichtingssterkte in lx
Kantoren	
Normaal kantoorwerk (lezen, schrijven, bediening van kantoormachines, typen, boekhouden, correspondentie enz.)	500-1000
Tekenzalen	1000-2000
Ontvang- en wachtkamers	250-500
Hotels en restaurants	
Buffet	125-250
Eetzaal	125-250
Garderobes	125-250
Toiletten	250-500
Ziekenhuizen	
Ziekenzalen	125-250
Operatiekamers	500-1000
Operatietafels	50 000-100 000
Onderzoekkamers	500-1000
Alle soorten gebouwen	
Trappen	125-250
Gangen	125-250
Kelders	125-250
Buitenverlichting	
Terreinen (laad- en losterreinen, opslagplaatsen)	30-60
Rangeerterreinen	20-40
Pleinen	30-60
Straten, wegen	20-40
Tennisbanen	250-500
Voetbalvelden	100-200
Wielerbanen	50-100
IJsbanen	20-50
IJsbanen (ijshockey, wedstrijden)	50-100

De getallen in de eerste kolom gelden voor een goede verlichting, die in de tweede voor een zeer goede verlichting.

Uit Handboek voor de elektromonteur, Kluwer.

hoofdstuk 3

LICHTMETINGEN

inhoud blz

3.1 licht en kleur 26
3.2 meten aan spectra 30
3.3 lichtrendement meten 34

lichtmetingen

In hoofdstuk 2 heb je gemerkt dat verschillende soorten lichtbronnen van elkaar verschillen in twee opzichten: in het *spectrum* dat ze uitzenden en in hun *lichtrendement*. Om uit te zoeken hoe de uitgezonden straling nu precies verschilt, heb je meetmethoden nodig. Meetmethoden voor het onderzoek van het spectrum van een lichtbron (hoe maak je een goed spectrum, met welke grootheden beschrijf je een spectrum en hoe meet je die grootheden) en voor het onderzoek naar het lichtrendement (hoe meet je het opgenomen elektrische vermogen en de uitgezonden lichtstroom van een lichtbron). Die meetmethoden vind je in de paragrafen 3.2 en 3.3. Je kunt ze gebruiken bij je onderzoeken aan gloeilampen of gasontladingslampen in de hoofdstukken 4 en 5.
Voor een goed begrip van de verschillende meetmethoden is het nodig om iets meer te weten over wat licht nu eigenlijk is. Daar begin je mee in paragraaf 3.1. In hoofdstuk 6 komen we er op terug.

Aan het eind van dit hoofdstuk maak je een keuze voor één van de hoofdstukken 4 en 5: òf je onderzoekt de uitgezonden straling van gloeilampen (hoofdstuk 4) òf die van gasontladingsbuizen (hoofdstuk 5).

3.1 LICHT EN KLEUR

licht als golfverschijnsel

Een lichtbron zendt licht uit. Maar wat is licht eigenlijk? Eén van de opvattingen daarover gaat terug tot de 17e eeuw: het golfmodel van Huygens. In dat golfmodel is een lichtbron te vergelijken met een trillingsbron, die golven veroorzaakt. De golven planten zich in alle richtingen door de ruimte voort. In het thema 'Muziek' heb je ook met zo'n golfmodel gewerkt (voor geluid).

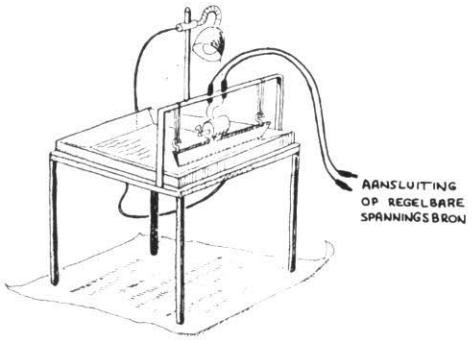
Zowel bij licht als bij geluid is het een probleem dat je die golven niet kunt zien.

Golven die je wèl kunt zien zijn watergolven. Door het gedrag van watergolven te vergelijken met het gedrag van lichtgolven, kun je een uitspraak doen over de volgende vraag:

kan het gedrag van licht met een golfmodel beschreven worden?

1. INTERFERENTIE VAN GOLVEN

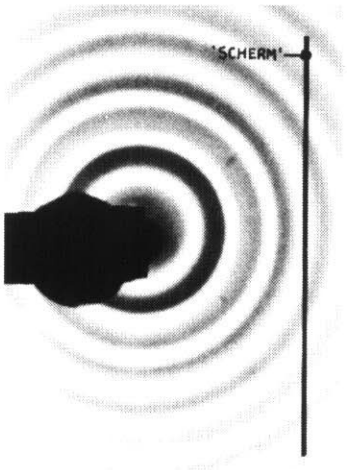
Voor de bestudering van watergolven gebruik je een golfbak met trilapparaat.



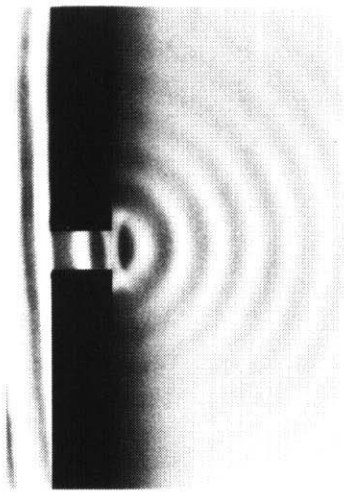
a. Bij een puntvormige trillingsbron ontstaan in de golfbak cirkelvormige golven, die van de trillingsbron weglopen. Op de golfbakfoto hieronder is een 'scherm' ingetekend. Er komen voortdurend nieuwe watergolven bij het 'scherm' aan. Neem eens even aan dat de watergolven die je in de golfbak ziet lopen geen watergolven, maar lichtgolven zijn. Wat zou je dan op het scherm zien? Zie je dat ook als je een echte lichtbron voor een scherm zet?

b. Als je in de golfbak een hindernis plaatst met een kleine opening, lopen vanuit die opening cirkelgolven weg: de opening in de hindernis is een puntvormige trillingsbron. Twee van dergelijke openingen in zo'n hindernis produceren beide cirkelgolven in de golfbak. Op elke plaats in de golfbak komen dus golven aan, afkomstig van beide trillingsbronnen. Die golven lopen door elkaar heen: ze *interfereren*. Als je goed kijkt naar het wateroppervlak in de golfbak, zie je een merkwaardig verschijnsel. Welk?

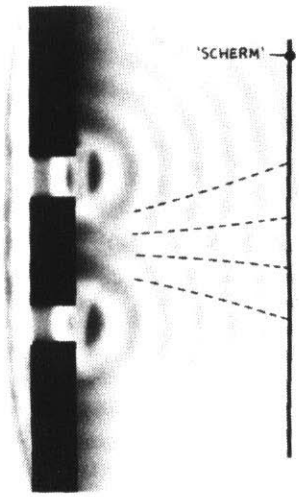
Op sommige plaatsen is het wateroppervlak in rust. Op die plaatsen wil het wa-



Een puntvormige trillingsbron veroorzaakt cirkelvormige golven.



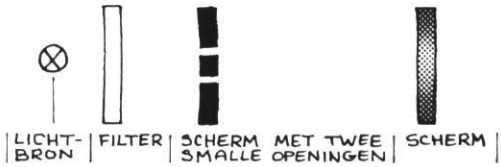
Een smalle opening in een hindernis is een puntvormige trillingsbron.



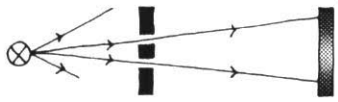
De golven van twee puntvormige trillingsbronnen interfereren.

teroppervlak door een golf van de ene trillingsbron bijv. juist omhoog bewegen, en door een golf van de andere trillingsbron juist omlaag. Het resultaat is: geen beweging van het wateroppervlak. Op die plaatsen *doven de golven elkaar uit.* Op andere plaatsen *versterken* ze elkaar.
Op de golfbakfoto hiernaast zie je zo'n *interferentiepatroon* van twee trillingsbronnen. De plaatsen waar het wateroppervlak in rust is, zijn met gestreepte lijnen ingetekend. Ook zie je weer een ingetekend 'scherm'. Neem eens even aan dat de watergolven die je ziet, lichtgolven zijn. Wat zou je dan zien op het 'scherm'? (Teken wat je op het scherm verwacht te zien.)

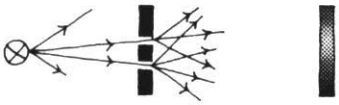
c. De vraag is nu, of je dit verschijnsel óók ziet als je tussen een echte lichtbron en een scherm een hindernis met twee openingen zet. Dat bekijk je met de hieronder afgebeelde opstelling. (De lichtbron levert licht van één kleur; dat heet *monochromatisch* licht.)
Wat zie je op het scherm? Klopt dat met wat je verwacht te zien, als je het gedrag van licht kunt beschrijven met een golfmodel (dus: overeenkomend met het gedrag van watergolven)?



Verschijnselen zoals in aktiviteit 1 leiden tot de conclusie dat het gedrag van licht beschreven kan worden met een golfmodel. Of korter: *licht* heeft een *golfkarakter.*



Stralengang bij rechtlijnige voortplanting van licht: twee lichtvlekken op het scherm.

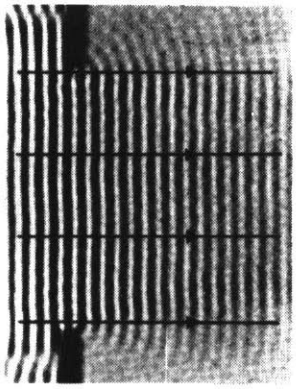


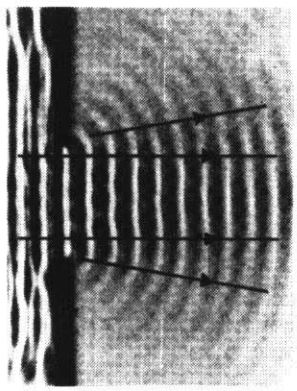
Stralengang die moet optreden om interferentie van licht mogelijk te maken.

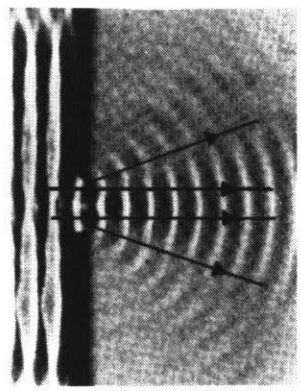
RECHTLIJNIGE VOORTPLANTING, OF ... BUIGING

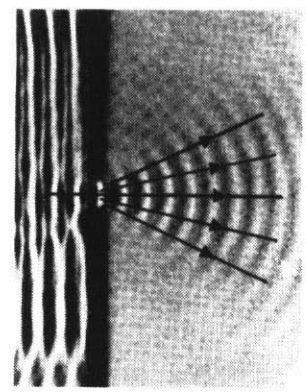
Zelfs als je aanneemt dat licht een golfkarakter heeft, is de proef bij aktiviteit 1c eigenlijk onbegrijpelijk. Vroeger heb je geleerd dat licht zich rechtlijnig voortplant. Daarom zou je verwachten dat je op het scherm *twee* lichtvlekken te zien krijgt. Toch krijg je iets te zien op het scherm dat vergelijkbaar is met de interferentie van watergolven: een aantal lichtvlekken naast elkaar. Dat kan alleen maar als vanuit de twee spleten licht wordt uitgezonden *in alle richtingen.*

Om te bekijken of dit laatste mogelijk is, grijpen we weer terug op de golfbak. Op de fotoserie hieronder zie je het gedrag van (vrijwel vlakke) watergolven als ze op een spleet vallen. Op de foto's zijn *golfstralen* ingetekend. Die golfstralen geven de bewegingsrichting van de watergolven aan. Op de eerste foto zie je dat de watergolven rechtdoor gaan; dat is vergelijkbaar met de rechtlijnige voortplanting van licht. Op de volgende foto's is de spleetbreedte steeds kleiner. Je ziet dan dat de watergolven









naar opzij gaan *afbuigen.* En op de laatste foto is de spleetbreedte zó klein, dat de watergolven vrijwel cirkelvormig geworden zijn: de spleet doet dienst als een *puntvormige* trillingsbron. En de golfstralen lopen in alle richtingen van de spleet weg. We noemen dit verschijnsel *buiging.*
Als licht een golfkarakter heeft (en daar zijn we het nu over eens), dan moet zich bij lichtgolven eenzelfde verschijnsel voordoen. Tenminste: als de spleet smal genoeg is. Je begrijpt nu waarom je in de opstelling voor het aantonen van het interferentieverschijnsel bij licht een scherm met twee *zeer smalle spleten* moet gebruiken.

kleur en golflengte

Nu het duidelijk is dat licht een golfkarakter heeft, komt de volgende vraag:
welk golfkenmerk bepaalt de kleur van het licht?
Uit het thema 'Muziek' weet je dat een golf door drie grootheden gekenmerkt wordt: de *amplitude*, de *golfsnelheid* en de *golflengte*. Voor geluidsgolven in lucht geldt dat de golfsnelheid voor golven met verschillende amplitude en golflengte steeds dezelfde waarde heeft. Je mag dus veronderstellen dat dit voor andere golfverschijnselen (zoals licht) ook het geval is. Het is dus òf de amplitude òf de golflengte van lichtgolven die de kleur ervan bepaalt.

2.

a. Welk golfkenmerk bepaalt de kleur van het licht: de amplitude of de golflengte van lichtgolven? Welk(e) argument(en) heb je voor je veronderstelling?

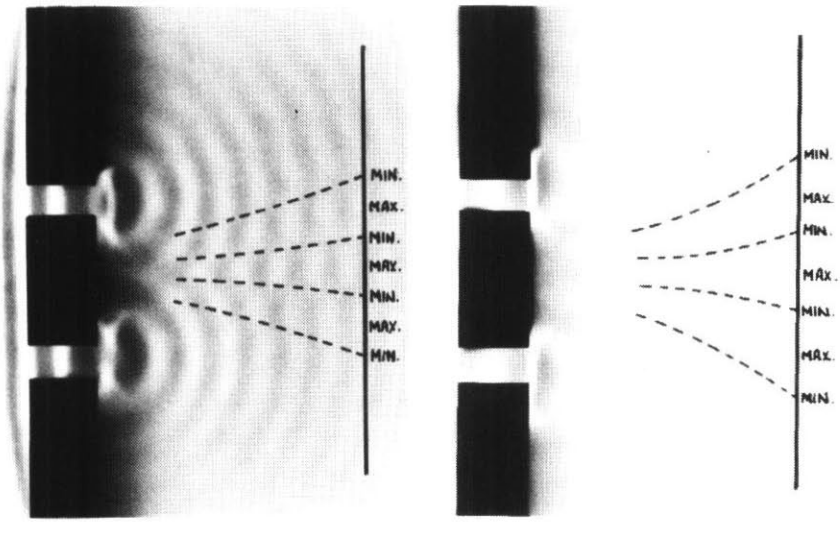
b. Controleer je veronderstelling door de experimenten bij aktiviteit 3 en 4 uit te voeren.

3. GOLFLENGTE EN INTERFERENTIEPATROON

Uit het thema 'Muziek' weet je dat het verband tussen golfsnelheid v, golflengte λ en frekwentie f gegeven wordt door:

$$v = \lambda \cdot f$$

Door de frekwentie van de trillingsbron te variëren, kun je dus de golflengte van de watergolven in een golfbak groter of kleiner maken.



a. Bekijk het interferentiepatroon van watergolven in een golfbak bij verschillende waarden van de golflengte. Maak een schets van het interferentiepatroon (bij minstens twee verschillende golflengten), waarbij je de plaatsen waar het wateroppervlak in rust is duidelijk aangeeft.

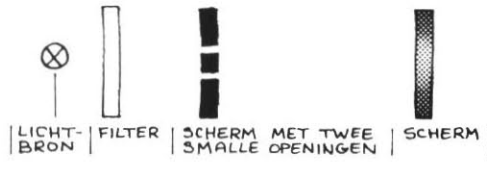
b. Hiernaast zie je twee interferentiepatronen van watergolven. Bij welk interferentiepatroon is de golflengte het grootst?

c. Op beide foto's hiernaast is weer een 'scherm' ingetekend. De plaatsen op het scherm waar het wateroppervlak maximaal in trilling is noem je een (interferentie)*maximum*; en waar het wateroppervlak in rust is een (interferentie)*minimum*.
Welk verband bestaat er tussen de afstand tussen de maxima op het scherm en de golflengte van de (water)golven?

4. GOLFLENGTE EN KLEUR

Je gaat nu onderzoeken of je bij licht net zulke interferentieverschijnselen kunt ontdekken als bij de watergolven in aktiviteit 3. Je gebruikt daarvoor de opstelling hieronder.

a. Bekijk het interferentiepatroon op het scherm bij gebruik van een rood en een blauw kleurfilter. Welke conclusie trek je over de onderlinge afstand tussen de maxima op het scherm bij deze twee kleuren licht? Betekent dit dat de kleur van het licht bepaald wordt door de golflengte ervan?



b. Bij welk van de twee kleuren licht is de afstand tussen de maxima op het scherm het grootst? Bij welke van deze twee kleuren is (dus) de golflengte het grootst? (Gebruik bij het geven van je antwoord je conclusie bij aktiviteit 3c).
Welk verband bestaat er tussen de golflengte van lichtgolven en de kleur ervan?

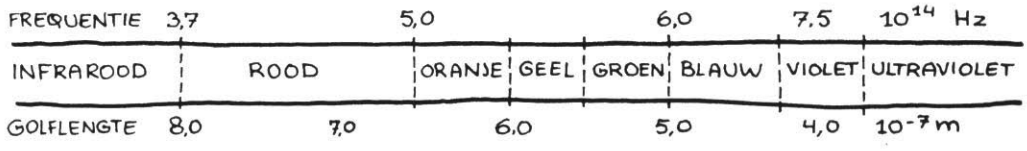
De verschillende kleuren in het spectrum van een lichtbron bestaan uit licht van verschillende golflengte. In paragraaf 3.2 vind je een manier om die golflengte te meten. Alle kleuren in het spectrum liggen in een golflengtegebied tussen ongeveer $7{,}8 \cdot 10^{-7}$ (rood) en $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ m (violet).
Bij elke golflengte λ hoort een bepaalde frequentie f. Algemeen geldt voor golven (zie het thema 'Muziek'):

$$v = \lambda \cdot f$$

Daarin is v de golfsnelheid. Voor licht is de golfsnelheid (voortplantingssnelheid) in lucht vrijwel gelijk aan die in vacuüm: $3{,}00 \cdot 10^{8}$ m/s. Het symbool voor die *lichtsnelheid* is c. Bij licht kun je voor elke golflengte de frekwentie berekenen, en omgekeerd, met:

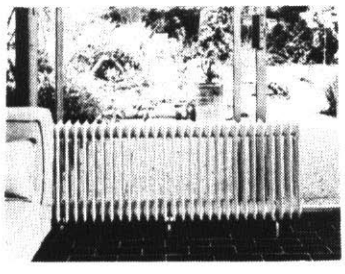
$$c = \lambda \cdot f.$$

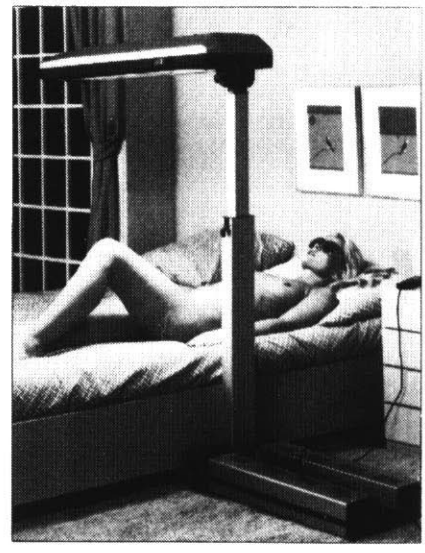
Naast zichtbaar licht zenden veel lichtbronnen ook onzichtbare straling uit, die veel eigenschappen met licht gemeen heeft: *infraroodstraling* met langere golflengten (en dus lagere frekwenties) dan het zichtbare rood en/of *ultraviolette straling* met kortere golflengten (en dus hogere frekwenties) dan het zichtbare violet.



Het zichtbare spectrum.

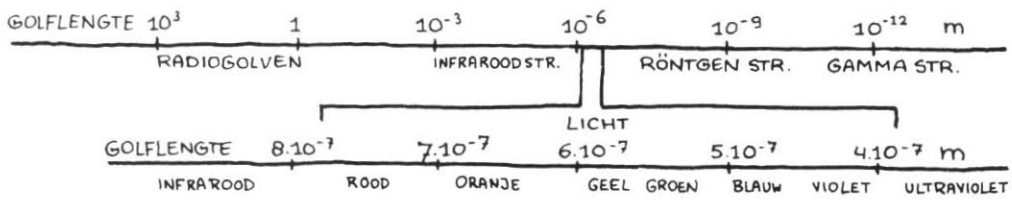
De aanwezigheid van infraroodstraling kun je voelen als warmte. De aanwezigheid van ultraviolette straling in de straling van de zon of van de 'lampen' in een zonnebank (solarium) merk je door het bruin (of rood) worden van je huid.





HET ELEKTROMAGNETISCH SPECTRUM
Radiogolven, infraroodstraling, licht, ultraviolette straling, röntgenstraling en gammastraling zijn voorbeelden van zogenaamde *elektromagnetische golven*. Gemeenschappelijke kenmerken ervan zijn:
– hun karakter, dat berust op de wisselwerking van elektrische en magnetische velden;
– hun voortplantingssnelheid in vacuüm, die voor alle $3{,}00 \cdot 10^{8}$ m/s is.

Verschilpunten zijn:
- hun uitwerking op de mens (zien, bruin worden, 'doorgelicht' worden);
- hun golflengte, die kan variëren van 10^{-12}m (gammastraling) tot 10^{3}m (radiogolven) en langer.



Het elektromagnetisch spectrum.

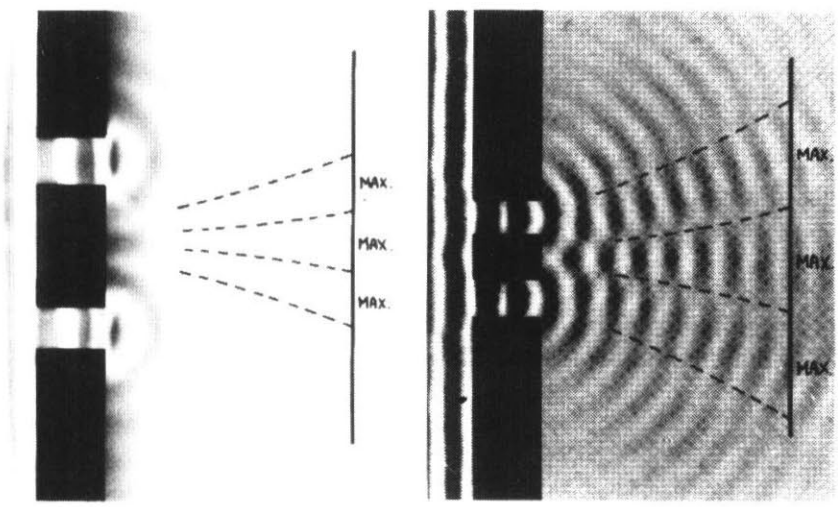
3.2 METEN AAN SPECTRA

Een spectrum van het licht van een lichtbron maak je met een *prisma* of een *tralie*. Bij een prisma maak je gebruik van het verschijnsel *lichtbreking*: een lichtbundel verandert van richting als hij schuin invalt op het scheidingsvlak van twee doorzichtige stoffen. Die richtingsverandering is verschillend voor licht van verschillende golflengten (kleur): rood licht wordt het minst en violet licht het meest van richting veranderd. Het gebruik van een prisma is een snelle manier om een indruk te krijgen van het spectrum van een lamp, maar minder geschikt om golflengten van het uitgezonden licht te meten.

golflengte meten

Om golflengten van uitgezonden licht te meten, gebruik je een *tralie*. Dat is een dia, waarop heel dicht naast elkaar lijnen staan (zo'n 500 per mm). Als er een lichtbundel op zo'n tralie valt, worden de openingen tussen de lijnen allemaal aparte lichtbronnen. Het spectrum ontstaat door *interferentie* van de lichtgolven van al deze aparte lichtbronnen. In paragraaf 3.1 heb je hetzelfde verschijnsel gezien bij slechts twee smalle openingen in een scherm.

1. SPECTRUM EN AFSTAND TUSSEN DE LICHTBRONNEN



Het interferentiepatroon van golven verandert als de afstand tussen de trillingsbronnen verandert.

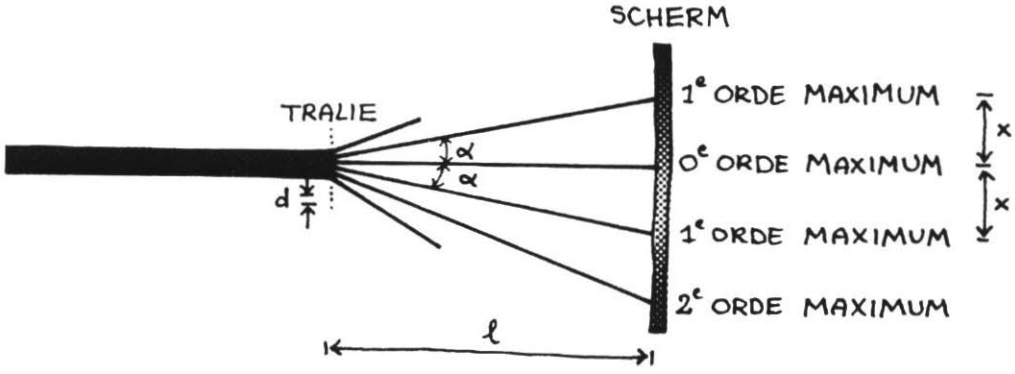
a. Bestudeer de interferentiepatronen van watergolven in een golfbak, waarbij je de afstand tussen beide trillingsbronnen varieert. Welke conclusie trek je over het verband tussen de afstand tussen de maxima op het 'scherm' en de afstand tussen de twee trillingsbronnen.

b. Ga na of de conclusie uit 1a ook geldig is bij de interferentie van lichtgolven van twee lichtbronnen. Gebruik daarbij de opstelling uit aktiviteit 4 in paragraaf 3.1.

c. Vervang de twee spleten bij 1b door een tralie. Vergelijk het ontstane spectrum met dat bij 1b. Welk verschil valt je het meest op? Heb je een verklaring voor dat verschil?

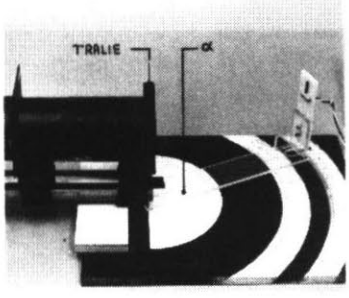
Het voordeel van interferentie bij een tralie is, dat het spectrum behoorlijk 'uitgerekt' wordt, vergeleken met interferentie bij twee spleten. Bovendien is het spectrum lichtsterker bij een tralie (de twee spleten laten veel minder licht door). Beide eigenschappen van spectra die met een tralie zijn gemaakt, maken dit spectrum beter geschikt voor het verrichten van precieze metingen.

In de tekening hieronder zie je een schematische voorstelling van de werking van een tralie, als er licht op valt van één golflengte (van één kleur dus: *monochromatisch* licht).



De invallende bundel splitst zich als het ware in een aantal uiteenlopende bundels. Op een scherm achter het tralie ontstaan lichtvlekken: maxima. Het rechtdoorgaande deel van de bundel geeft het *0e orde maximum*, en de schuin weglopende bundels het *1e*, *2e*, *3e enz. orde maximum.*
De golflengte λ van het invallende licht kan nu berekend worden met de volgende formule:

$\lambda = d \cdot \sin a$



Daarin is d de *tralieconstante* (dat is de afstand tussen twee spleten op het tralie) en a de hoek tussen de lichtbundels die het 0^e en 1^e orde maximum geven.
De tralieconstante d bepaal je uit het (gegeven) aantal spleten per mm van het tralie.
De hoek a kun je op twee manieren bepalen:
– door meting met een gradenboog: bij de plaats van het 1^e orde maximum lees je de hoek a direkt af;
– door meting van de afstand x op het scherm tussen het 0^e en 1^e orde maximum en van de afstand l tussen scherm en tralie bepaal je a uit $\tan a = x/l$.

WAARSCHUWING
Zorg ervoor dat de lichtbundel van een laser niet direkt of via een spiegelend oppervlak op je netvlies terecht komt. Een laserlichtbundel is nogal lichtsterk, en kan je netvlies onherstelbaar beschadigen.

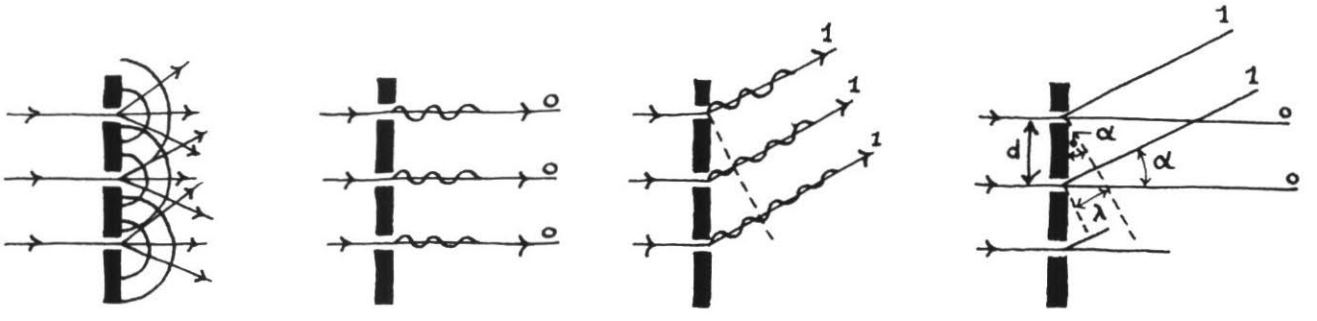
2. GOLFLENGTE METEN

Een *laser* zendt monochromatisch licht uit (licht van één kleur, dus: licht met één bepaalde golflengte).

Bepaal met een tralie (bekend aantal spleten per mm) de golflengte van het door de laser uitgezonden licht.

Bij monochromatisch licht bestaat het interferentiepatroon op het scherm uit een aantal lichtvlekken met alle dezelfde kleur. Bij monochromatisch licht van een andere kleur ontstaat een soortgelijk interferentiepatroon, maar de (anders gekleurde) lichtvlekken liggen op andere plaatsen. Want: uit de formule $\lambda = d \cdot \sin a$ volgt dat bij licht van een andere kleur (andere λ) de hoek a een andere waarde heeft.
Als er wit licht op het tralie invalt (dus: een lichtbundel waarin alle golflengten uit het zichtbare spectrum aanwezig zijn), komen de maxima op het scherm bij de verschillende kleuren op verschillende plaatsen te liggen. Op het scherm zie je dan een aantal spectra (1^e, 2^e enz. orde spectrum). Op de plaats van het 0^e orde maximum zie je geen spectrum, maar een witte vlek (wat is daarvan de reden?)

De formule voor het bepalen van de golflengte met een tralie kun je afleiden met het volgende model.
Op blz. 32 zie je (sterk vergroot) een deel van een tralie getekend. Elke spleet is een puntvormige lichtbron, die cirkelvormige lichtgolven uitzendt. Bij elke spleet zijn er twee getekend.
De golven op de golfstralen in richting 0 lopen netjes met elkaar 'in de pas'. Ze versterken elkaar, en bij aankomst op het scherm zullen ze een maximum geven



(het 0e orde maximum). Maar er zijn meer richtingen waarbij de golven in de pas lopen Richting 1 bijvoorbeeld. Deze lichtgolven zullen op het scherm het 1e orde maximum geven. Uit de figuur rechtsboven volgt dan

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} \rightarrow \lambda = d \cdot \sin \alpha$$

lenzen

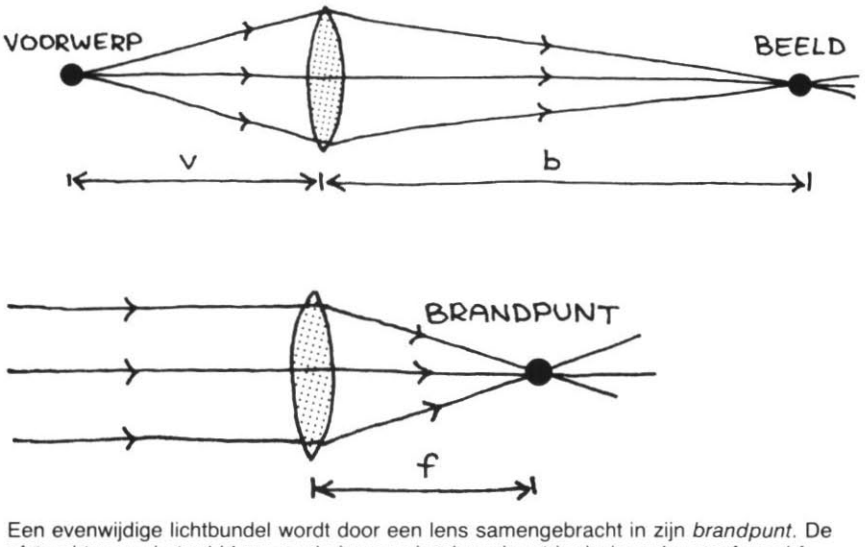
Bij aktiviteit 2 gebruik je een laser, die een vrij scherpe evenwijdige lichtbundel op het tralie laat invallen. De meeste lichtbronnen zenden echter divergerende bundels uit. De maxima op het scherm zijn daardoor licht*vlekken* (en geen licht*punten*). Dat maakt de bepaling van de golflengte wat onnauwkeurig door de onzekerheid in de waarde van α. De 'scherpte' van de maxima op het scherm kan verbeterd worden met behulp van *lenzen*. Een lens tussen lichtbron en tralie moet ervoor zorgen dat op het tralie een evenwijdige lichtbundel invalt. Een lens tussen tralie en scherm moet ervoor zorgen dat elke uit het tralie tredende lichtbundel op één punt van het scherm samengebracht wordt.

3. EEN EVENWIJDIGE LICHTBUNDEL MAKEN

Je weet dat je met een lens voorwerpen kunt afbeelden: een lens kan lichtbundels die uit één punt van een voorwerp (het *lichtpunt*) weggaan weer in één punt (het *beeldpunt*) samenbrengen. Het verband tussen de *voorwerpsafstand* v en de *beeldafstand* b wordt gegeven door de *lenzenformule*:

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Daarin is f de *brandpuntsafstand* van de lens.



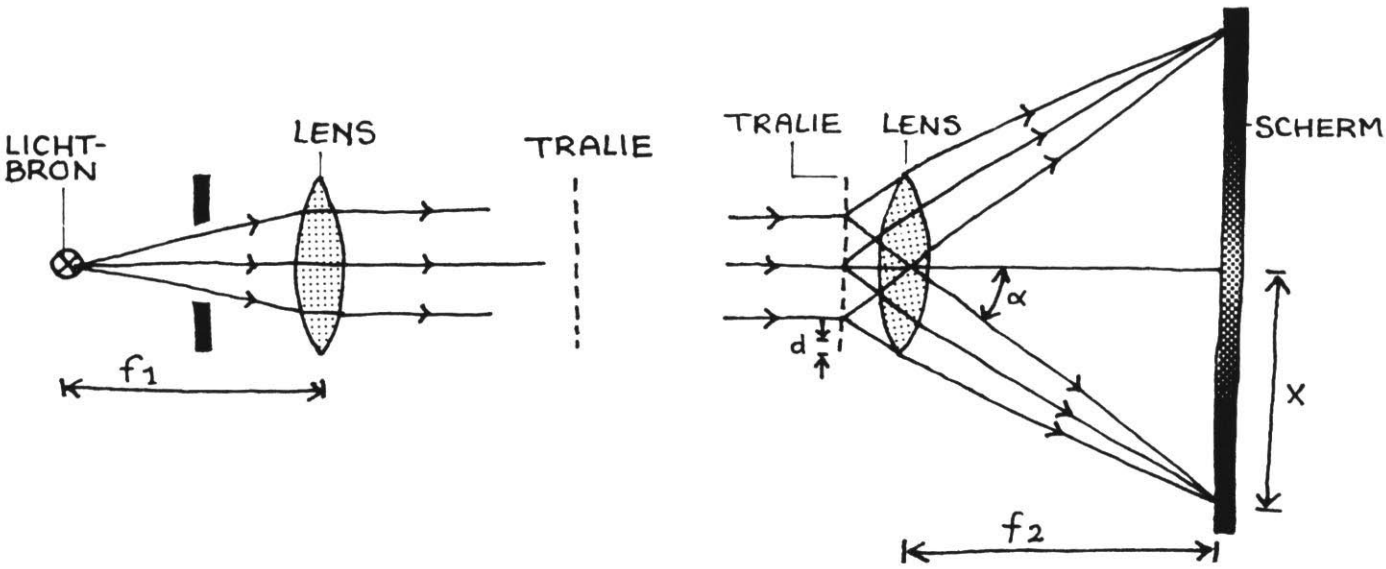
Een evenwijdige lichtbundel wordt door een lens samengebracht in zijn *brandpunt*. De afstand tussen het midden van de lens en het brandpunt is de *brandpuntsafstand f*.

a. Hoe groot is de beeldafstand b als de uit een lens tredende lichtbundels *evenwijdig* zijn? Toon nu met behulp van de lenzenformule aan dat de voorwerpsafstand v in dat geval gelijk moet zijn aan de brandpuntsafstand f.

Waar moet een lens dus geplaatst worden ten opzichte van de gloeidraad van een lamp (het 'voorwerp') om de *divergente* bundel die de gloeidraad uitzendt om te zetten in een *evenwijdige* bundel?

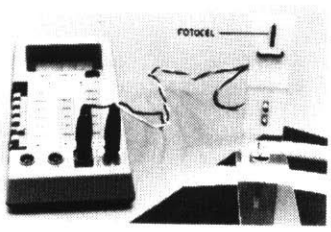
b. Hoe groot is de voorwerpsafstand v als op een lens een evenwijdige lichtbundel invalt? Toon met behulp van de lenzenformule aan dat de beeldafstand b in dat geval gelijk is aan de brandpuntsafstand f. Waar moet dus in dit geval een scherm geplaatst worden ten opzichte van een lens, om een zo scherp mogelijk beeld op te vangen?

Een opstelling voor het ontwerpen van een spectrum op een scherm bevat dus meestal twee lenzen. De eerste lens moet ervoor zorgen dat er een evenwijdige lichtbundel op het tralie invalt. Dat bereik je door de afstand tussen lens en (gloeidraad van de) lichtbron gelijk te maken aan de brandpuntsafstand f_1 van de (eerste) lens.
De tweede lens staat vlak achter het tralie. Deze lens bundelt de uit het tralie tredende evenwijdige lichtbundels tot lichtpunten op een scherm. Daarvoor moet de afstand tussen lens en scherm gelijk zijn aan de brandpuntsafstand f_2 van de (tweede) lens.



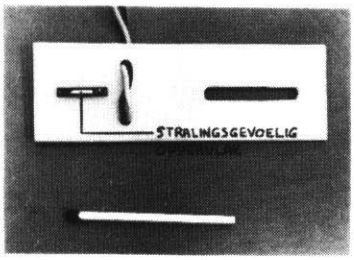
De golflengte van het op het tralie invallende licht wordt ook bij deze opstelling bepaald uit $\lambda = d \cdot \sin \alpha$.
De meting van de hoek α verloopt op eenzelfde manier als in de meetopstelling zonder lens. Bij meting van α met de gradenboog leg je de oorsprong van de gradenboog nu echter onder het midden van de lens. En bij de tweede meetmethode bepaald je α uit $\tan \cdot \alpha = x/f_2$. In plaats van de afstand l tussen tralie en scherm gebruik je de afstand tussen het midden van de lens en het scherm. In deze opstelling is die afstand gelijk aan de brandpuntsafstand f_2 van de (tweede) lens.

stralingsvermogen



Fotocel met voltmeter.

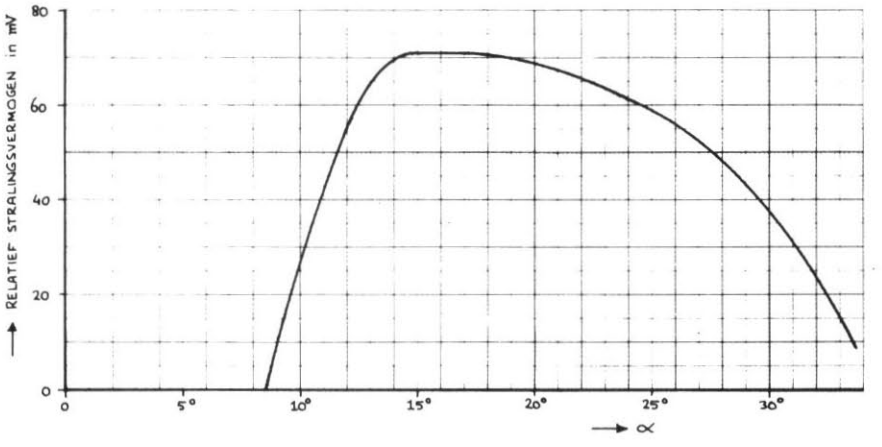
Het spectrum van een lichtbron geeft je een idee van de kleuren die in het uitgezonden licht voorkomen. De vraag is nu hoe 'sterk' de verschillende kleuren in het spectrum voorkomen. Want ook dát bepaalt de kleur van het uitgezonden licht: een spectrum met veel stralingsenergie in het rood en weinig in het blauw betekent bijv. dat het uitgezonden licht een wat geel/roodachtige, 'warme' kleur geeft. Veel stralingsenergie in het blauw en weinig in het rood daarentegen geeft een 'koel, zakelijk' blauwachtig licht.
Als *stralingsdetector* kun je een *silicium-fotocel* gebruiken. Zo'n fotocel geeft een spanning af als er straling op invalt. Bij een bepaalde golflengte van de invallende straling is de spanning van de fotocel evenredig met het invallende *stralingsvermogen*.
Omdat de fotocel zeer klein is, kun je er het stralingsvermogen in een klein stukje van het spectrum (in een klein *golflengte-gebied*) mee bepalen. Je kunt er dus het stralingsvermogen bij de afzonderlijke kleuren in het spectrum mee bepalen.
Omdat het bij het doormeten van een spectrum gaat om het stralingsvermogen bij de verschillende golflengten *ten opzichte van elkaar*, is het niet nodig om de aanwijzing van de voltmeter om te rekenen in een vermogen. Je meet dus eigenlijk het *relatieve stralingsvermogen* (in V of mV).
Waar je bij het verwerken van de meetresultaten wél rekening mee moet houden, is de spectrale gevoeligheid van de fotocel. Net als het oog is de fotocel niet bij alle golflengten even gevoelig!



Het stralingsgevoelige oppervlak van de fotocel.

4. HET ZONNESPECTRUM

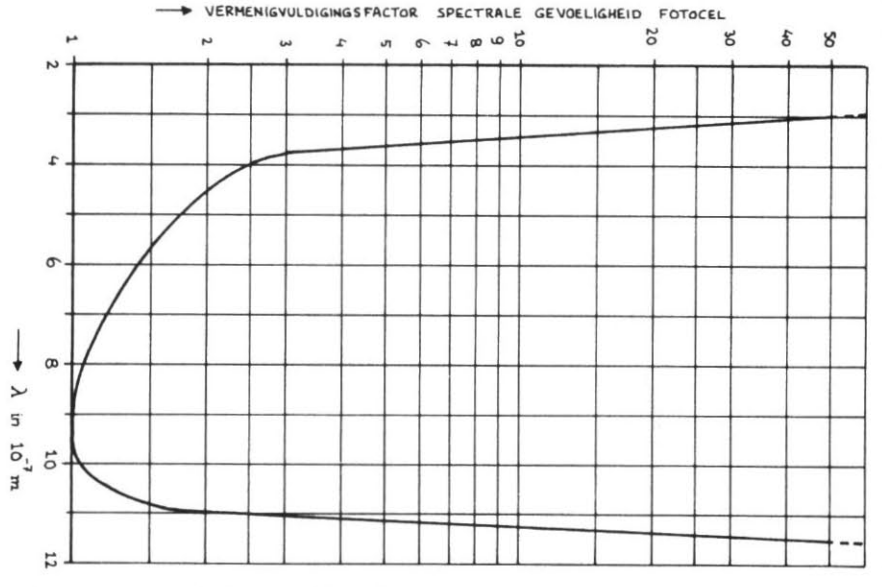
Het diagram hieronder is een weergave van metingen aan het 1e orde spectrum van zonlicht. Langs de verticale as staat het gemeten relatieve stralingsvermogen (in mV). Langs de horizontale as is de hoek α uitgezet. Het spectrum is gemaakt met een tralie met 500 lijnen per mm.



a. Bereken bij een aantal waarden van α de bijbehorende golflengte. Teken in een diagram het verband tussen het relatieve stralingsvermogen van het zonlichtspectrum en de golflengte.

b. Geef in het diagram de grenzen van het zichtbare gebied aan:
$3{,}8 \cdot 10^{-7}\text{m(violet)} < \lambda < 7{,}8 \cdot 10^{-7}\text{m(rood)}$.

5. SPECTRALE GEVOELIGHEID VAN DE FOTOCEL



Spectrale gevoeligheid van de fotocel.
Voor het meten van het stralingsvermogen bij golflengten groter dan $11{,}5 \cdot 10^{-7}$ en kleiner dan $3{,}0 \cdot 10^{-7}$ m is deze fotocel niet geschikt.

In het diagram hiernaast zie je de spectrale gevoeligheid van de fotocel. De grootheid langs de vertikale as is een vermenigvuldigingsfaktor. De gemeten spanning bij een golflengte van $4{,}0 \cdot 10^{-7}$ m bijv. moet je vermenigvuldigen met 2,5 om een goede waarde voor het relatieve stralingsvermogen te krijgen.

a. Voor welke golflengte is deze fotocel het gevoeligst?

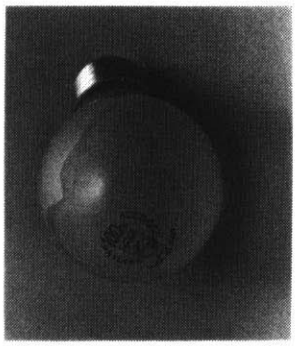
b. Corrigeer het diagram van aktiviteit 4 voor de spectrale gevoeligheid van de fotocel. Geef de resultaten van je correcties weer in hetzelfde diagram als bij aktiviteit 4.

3.3 LICHTRENDEMENT METEN

Een lamp neemt elektrische energie op, en zet deze gedeeltelijk om in stralingsenergie. Van die straling is slechts een gedeelte zichtbaar. Daar komt nog bij dat ons oog niet even gevoelig is voor de verschillende kleuren (golflengten) zichtbaar licht. Dit alles heeft in hoofdstuk 2 geleid tot de definitie van het *lichtrendement* η_L van een lichtbron:

$$\eta_L = \frac{S}{P_e}$$

Hierin is S de door de lichtbron uitgezonden *lichtstroom* in lm (lumen) en P_e het opgenomen elektrisch vermogen in W (watt).
Voor de bepaling van het lichtrendement van een lichtbron is dus de meting van P_e en S nodig.



elektrisch vermogen meten

Voor de verschillende manieren om het door een apparaat (lamp) opgenomen elektrisch vermogen te meten, verwijzen we naar de thema's 'Elektrische Machines' en 'Energie en Kwaliteit'. Maar je mag er in de experimenten in de hoofdstukken 4 en 5 ook van uitgaan, dat het door de fabrikant opgegeven vermogen juist is.

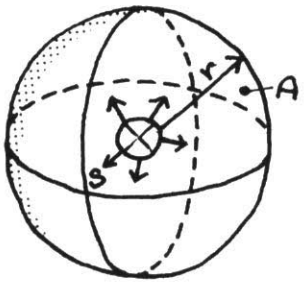
lichtstroom meten

De lichtstroom S die een lichtbron uitzendt, is niet direkt te meten. Wèl meetbaar is de verlichtingssterkte E in lx (lux) op een vlak.

Meting van de verlichtingssterkte (met een luxmeter) geeft de mogelijkheid om de lichtstroom S die de lamp uitzendt te bepalen. Daarvoor zijn wel een paar aannames nodig:

– een puntvormige lichtbron (bijv. een gloeilamp) zendt in alle richtingen (ongeveer) evenveel licht uit; het licht verspreidt zich over bolvormige oppervlakken met de lichtbron als middelpunt;

– een lijnvormige lichtbron (bijv. een TL-buis) zendt het overgrote deel van zijn licht uit loodrecht op zijn as; het licht verspreidt zich over cilindervormige oppervlakken met de lichtbron als as.

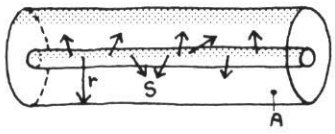


1. LICHTRENDEMENT PUNTVORMIGE LICHTBRON

Toon aan dat, bij de aanname van een gelijkmatige verspreiding van het licht van een puntvormige lichtbron over bololoppervlakken, het lichtrendement gegeven wordt door:

$$\eta_L = \frac{S}{P_e} = \frac{E \cdot 4\pi \cdot r^2}{P_e}$$

Hierin is E de gemeten verlichtingssterkte op een afstand r van het middelpunt van de lichtbron.



2. LICHTRENDEMENT LIJNVORMIGE LICHTBRON

Toon aan dat, bij de aanname van een gelijkmatige verspreiding van het licht van een lijnvormige lichtbron over cilinderoppervlakken, het lichtrendement gegeven wordt door:

$$\eta_L = \frac{S}{P_e} = \frac{E \cdot 2\pi \cdot r \cdot L}{P_e}$$

Hierin is E de gemeten verlichtingssterkte op een afstand r van de as van de lichtbron (gemeten loodrecht op die as) en L de lengte van de lichtbron.

3.

a. Onderzoek hoe reëel de twee hiervoor genoemde aannames zijn, door de verlichtingssterkte te meten op een aantal plaatsen rond

– een puntvormige lichtbron (bijv. 'kale' gloeilamp in het midden van een verder verduisterde, grote ruimte), steeds op dezelfde afstand van die lichtbron;

– een lijnvormige lichtbron (bijv. 'kale' TL-buis in het midden van een verder verduisterde, grote ruimte), steeds op dezelfde (loodrechte) afstand van die lichtbron.

b. Welke conclusie trek je uit deze metingen over de geldigheid van de genoemde aannames? Kun je een aanbeveling doen over de plaats waar je moet meten om een redelijk gemiddelde voor de verlichtingssterkte te vinden?

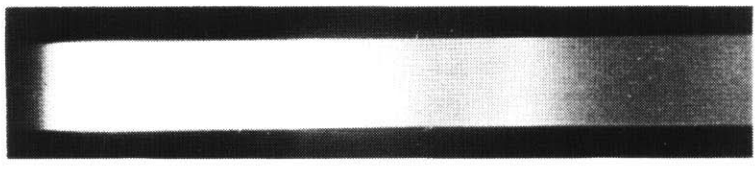
hoofdstuk 4

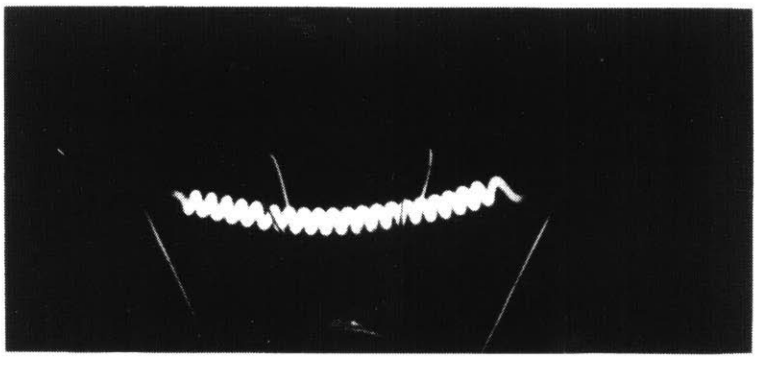
GLOEILAMPEN

inhoud blz

4.1 het spectrum van een gloeilamp 37
4.2 lichtrendement van een gloeilamp 39
4.3 gloeilampstraling 40

gloeilampen
In dit hoofdstuk onderzoek je de straling van gloeilampen. Kenmerkend voor deze soort lichtbronnen is, dat er licht uitgezonden wordt door een stukje gloeiend heet materiaal.
Bij dit onderzoek gaat het om de volgende *onderzoeksvragen*:
- welke kenmerken heeft het spectrum van gloeilamplicht;
- hoe hangen deze spectrumkenmerken af van de temperatuur en van het materiaal van de gloeidraad;
- hoe groot is het lichtrendement van een gloeilamp (is dat inderdaad zo'n 12 lm/W, zoals in hoofdstuk 2 wordt beweerd), en hoe hangt het lichtrendement af van de temperatuur van de gloeidraad.





Bij het zoeken naar antwoord op deze onderzoeksvragen gebruik je de meetmethoden die in hoofdstuk 3 beschreven staan.

In de laatste paragraaf wordt kort ingegaan op de herkomst van gloeilampstraling (meer daarover in hoofdstuk 6). In die paragraaf vind je ook een rapportage-opdracht.

4.1 HET SPECTRUM VAN EEN GLOEILAMP

gloeidraadtemperatuur

Het lampje van een zaklantaarn geeft soms nog maar een zwak, roodachtig licht. Je weet dan dat de batterij een eind heen is: de lamp brandt op een te lage spanning. Aan de andere kant heb je misschien wel eens 'lampje gepest' door bijv. een 6 V lampje aan te sluiten op een 9 V batterij.

1. SPECTRUM EN GLOEIDRAADTEMPERATUUR

a. Welke verschillen verwacht je te zien in het spectrum van een gloeilamp, als je die laat branden op achtereenvolgens onderspanning, normale spanning en overspanning?

b. Welke veronderstelling kun je maken over de temperatuur van de gloeidraad in deze drie gevallen?

c. Schrijf je veronderstelling op over het verband tussen de temperatuur van een gloeidraad en de eigenschappen van het uitgezonden spectrum. Controleer je veronderstelling door het uitvoeren van de aktiviteiten 2 en 3.

2. SPECTRA VERGELIJKEN

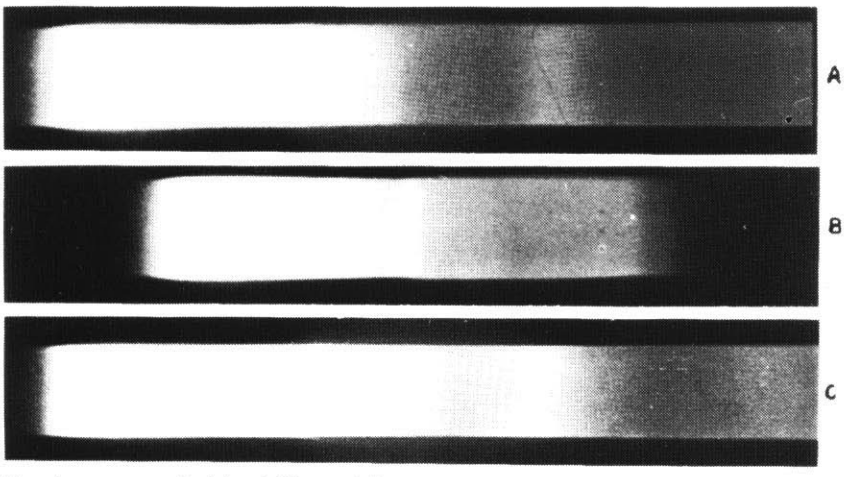
Ontwerp met een tralie een zo goed mogelijk spectrum van een gloeilamp op een scherm.

Laat de gloeilamp branden op onderspanning, normale spanning en overspanning. (Bijv. een 12 V lampje laat je branden op 8, 12 en 14 V spanning).

Schrijf op in welk opzicht de waargenomen spectra
- met elkaar overeenkomen;
- van elkaar verschillen.

3.

Vergelijk de resultaten van proef 2 met je veronderstelling bij 1c. Klopt je veronderstelling met je waarnemingen?



Spectra van een gloeidraad bij verschillende gloeidraadtemperatuur.

4.

Hiernaast zijn de spectra afgebeeld van eenzelfde gloeidraad bij verschillende temperatuur.

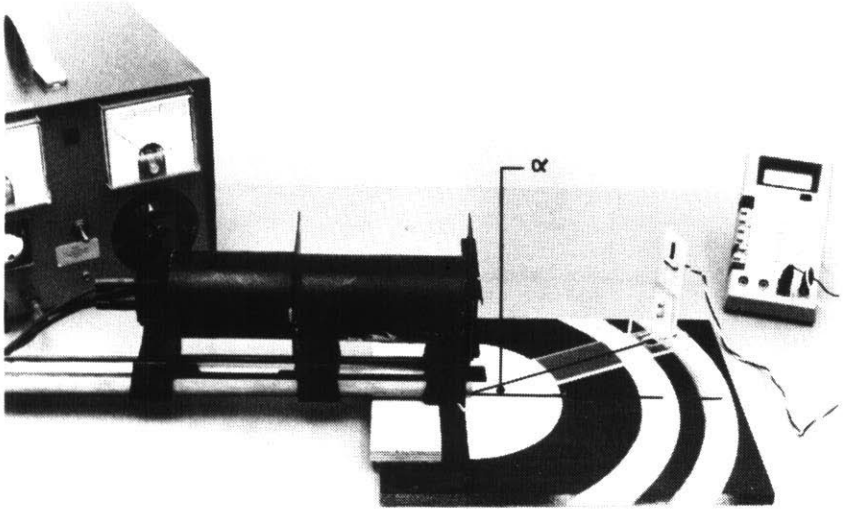
a. Geef aan waaraan je kunt zien dat het gloeilampspectra zijn.

b. Rangschik de spectra volgens toenemende temperatuur.

Het door een gloeilamp uitgezonden spectrum hangt af van de temperatuur van de gloeidraad. In de aktiviteiten 1 en 2 heb je daar een ruwe indruk van gekregen. De temperatuur van de gloeidraad beïnvloedt dus de kleur van het uitgezonden licht, maar ook de grootte van de uitgezonden lichtstroom. Voor het beoordelen van de kwaliteit van een gloeilamp zijn beide faktoren belangrijk. Voldoende reden dus om eens wat preciezer naar de uitgezonden spectra te kijken, of beter: om die spectra nauwkeurig door te meten.

5. GLOEILAMPSPECTRA DOORMETEN

Ontwerp met een tralie een zo goed mogelijk spectrum van een gloeilamp op een scherm.



a. Laat de gloeilamp op normale spanning branden. Zet de stralingsdetector op een aantal plaatsen in het (1e orde) spectrum en er even naast (dus in het niet zichtbare ultraviolet en infrarood). Noteer in een tabel bij iedere stand van de detector
- de hoek *α*;
- het door de detector gemeten relatieve stralingsvermogen.

Bepaal ook de waarde van de traliecon-stante *d*.

b. Herhaal je metingen als de lamp brandt bij onderspanning en overspanning (bijv. een 12 V lampje op 8 en 14 V).

c. Werk je metingen uit, zoals aangegeven in aktiviteit 6.

6. STRALINGSVERMOGEN EN GOLFLENGTE

a. Bereken de golflengtes van het licht op de plaatsen waar je bij aktiviteit 5 gemeten hebt. Zet die golflengtes ook in je tabel.

b. Corrigeer de gemeten waarden van het relatieve stralingsvermogen voor de spectrale gevoeligheid van de fotocel.

c. Teken in één diagram het verband tussen relatief stralingsvermogen en golflengte in de drie spectra die je hebt doorgemeten.

d. Breng het verband tussen stralingsvermogen en golflengte in een gloeilampspectrum onder woorden. Welke veranderingen blijken op te treden bij veranderende temperatuur van de gloeidraad?

e. Welke gevolgen heeft dit voor de kleurindruk die het licht van de gloeidraad op je netvlies geeft in de drie doorgemeten situaties?

spectrum van metalen

In hoofdstuk 1 heb je gezien dat men bij de ontwikkeling van de gloeilamp verschillende materialen heeft gebruikt voor de gloeidraad. Welke invloed heeft het gebruikte materiaal op het uitgezonden spectrum? Je beperkt je daarbij tot gloeidraden van metaal.

7. SPECTRUM EN GLOEIDRAADMATERIAAL

a. Welke veronderstelling maak je over het verband tussen het gloeidraadmateriaal en het uitgezonden spectrum?

b. Controleer je veronderstelling door het uitvoeren van de aktiviteiten 8 en 9.

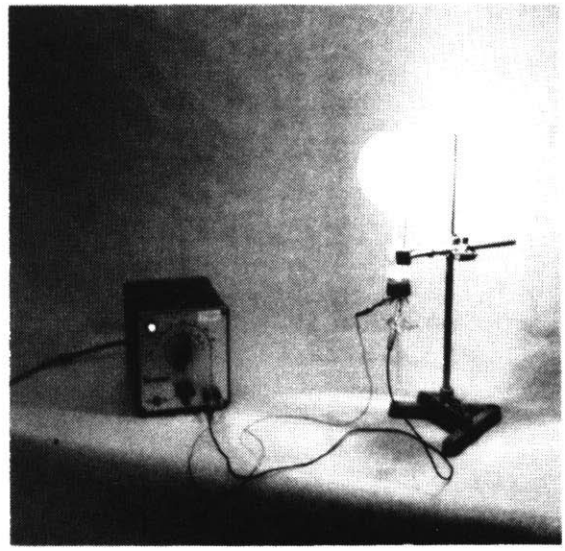
8. METAALSPECTRA VERGELIJKEN

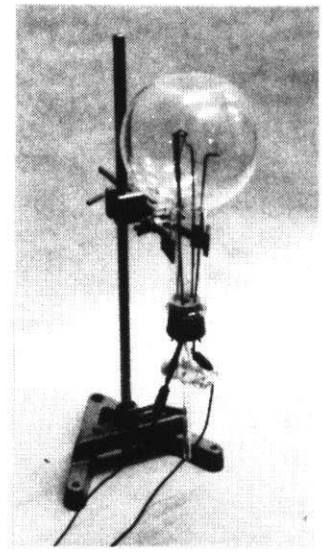
Bekijk met behulp van een zelfgemaakte gloeilamp (zie het kader hieronder) de invloed van het gloeidraadmateriaal op het uitgezonden spectrum. Schrijf op in welk opzicht de waargenomen spectra
- met elkaar overeenkomen;
- van elkaar verschillen.

EEN ZELFGEMAAKTE GLOEILAMP

Voor het onderzoek gebruik je een zelfgemaakte gloeilamp: een rondbodemkolf met daarin gloeidraden van ijzer, nichroom en constantaandraad. Met een luchtpomp

verwijder je zoveel mogelijk lucht uit de kolf. (Wat zal er met de gloeidraad gebeuren als deze gloeit in – zuurstof bevattende – lucht?)





De zelfgemaakte gloeilamp voor het onderzoek van metaalspectra.

Bekijk met bijv. een spectroscoop de spectra van de gloeiende metaaldraden op overeenkomsten en verschillen.

9.
Is er een verband tussen het gloeidraadmateriaal en het uitgezonden spectrum? Waardoor worden eventuele verschillen tussen de spectra veroorzaakt, denk je? Welke aanwijzingen heb je daarvoor?

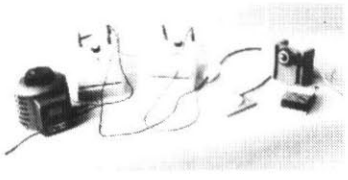
4.2 LICHTRENDEMENT VAN EEN GLOEILAMP

Een belangrijke vraag bij het gebruik van gloeilampen is hoe zuinig ze omspringen met energie. De gloeidraad moet op een hoge temperatuur blijven om te gloeien. Om die hoge temperatuur te handhaven is de toegevoerde elektrische energie nodig.
Hoe zuinig gloeilampen omspringen met energie wordt gegeven door het lichtrendement van de gloeilamp.

1. LICHTRENDEMENT METEN
Meet het lichtrendement van een normale gloeilamp van 25, 40, 75 en 100 W.

2. LICHTRENDEMENT EN VERMOGEN
a. Welke conclusie trek je uit de metingen bij 1 over het verband tussen lichtrendement en het vermogen van een gloeilamp?
b. In hoofdstuk 2 is gesteld dat het lichtrendement van een 75 W gloeilamp zo'n 12 lm/W bedraagt. Is dit gegeven in overeenstemming met jouw metingen? Heb je een verklaring voor een eventueel verschil?

3. LICHTRENDEMENT EN GLOEIDRAADTEMPERATUUR
In aktiviteit 6 van paragraaf 4.1 heb je in een diagram de spectra weergegeven van gloeilamplicht bij verschillende gloeidraadtemperaturen.
a. Welke veronderstelling maak je op grond van die spectra over het verband tussen lichtrendement van een gloeilamp en de gloeidraadtemperatuur.
b. Controleer je veronderstelling door het uitvoeren van de aktiviteiten 4 en 5.

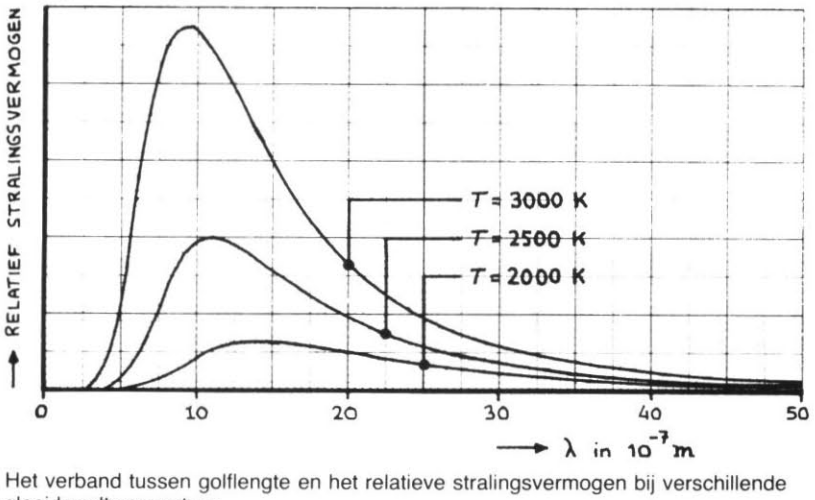


4.
Meet het lichtrendement van een normale gloeilamp bij een aantal waarden van de spanning (bijv. een 12 V gloeilamp op 8, 12 en 14 V).

5.
a. Geef het resultaat van je metingen bij aktiviteit 4 weer in een diagram, waarin je het lichtrendement uitzet tegen de spanning (een maat voor de gloeidraadtemperatuur).

b. Welke conclusie trek je uit dit diagram? Is die conclusie in overeenstemming met de bij 3a gemaakte veronderstelling?

6. LICHTRENDEMENT EN STRALINGSKROMMEN
In het diagram hieronder zijn de stralingskrommen gegeven van een gloeidraad bij verschillende waarden van de temperatuur (vergelijkbaar met je eigen meetresultaten bij aktiviteit 6 uit paragraaf 4.1). Bij deze stralingskrommen is geen rekening gehouden met de spectrale ooggevoeligheid.



Het verband tussen golflengte en het relatieve stralingsvermogen bij verschillende gloeidraadtemperatuur.

Het totale oppervlak onder een stralingskromme is een maat voor het stralingsvermogen van de gloeidraad (de per seconde uitgezonden stralingsenergie over het hele golflengtegebied). Het oppervlak onder een stralingskromme tussen ruwweg $\lambda = 4{,}0 \cdot 10^{-7}$ en $\lambda = 8{,}0 \cdot 10^{-7}$ m is dan een maat voor het stralingsvermogen van de gloeidraad in het *zichtbare gebied*.

a. Bepaal uit het diagram door meting van oppervlakken onder de stralingskrommen (in mm^2) het *rendement* van een gloeilamp bij de drie aangegeven gloeidraadtemperaturen. (We praten hier over 'rendement', omdat we géén rekening houden met de spectrale ooggevoeligheid.)

b. Zijn de resultaten van je metingen bij 6a in overeenstemming met je conclusie bij 5b?

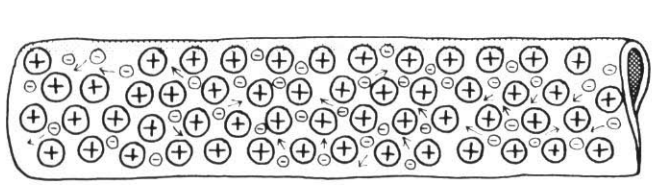
c. Het rendement van een gloeilamp is in de praktijk lager dan je in 6a berekend hebt. Wat is daarvan de oorzaak?

4.3 GLOEILAMPSTRALING

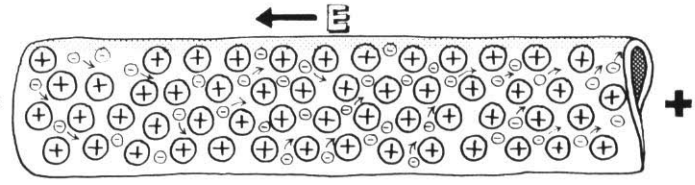
Een gloeilamp is een energie-omzetter. Elektrische energie wordt omgezet in warmte en stralingsenergie. Elk voorwerp dat warmer is dan zijn omgeving zendt straling uit. Bij een lage temperatuur is dat straling met grote golflengten: infraroodstraling (bijv. van een radiator van een CV-installatie). Hoe hoger de temperatuur, des te meer straling er ook bij kortere golflengten wordt uitgezonden. We komen dan in het gebied van het zichtbare licht.

Een voorwaarde voor het uitzenden van zichtbare straling (licht) door een gloeidraad is dus een voldoend hoge temperatuur. Die hoge temperatuur wordt bereikt door een omzetting van elektrische energie in warmte in de gloeidraad. Van die energie-omzetting kun je een *model* maken.

model voor energie-omzetting in een gloeidraad
In een vaste stof zijn de atomen volgens een bepaalde rangschikking met elkaar verbonden. In metalen (en andere geleiders) raken de elektronen die het verst van de kern zitten makkelijk los van het atoom. Deze elektronen kunnen dan tamelijk vrij door het

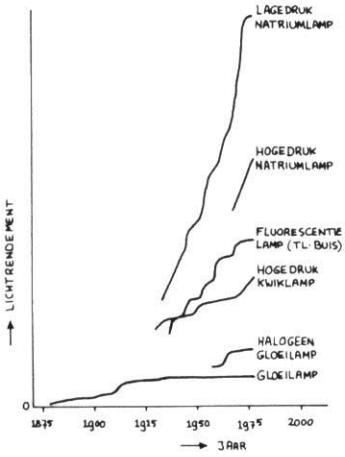


Model van een metaaldraad.



Model van een elektrische stroom in een metaaldraad.

hele metaal rondzwerven. De metaalatomen zijn door het losraken van deze elektronen niet neutraal meer: het zijn positievere ionen geworden.
Door het aanleggen van een elektrisch veld tussen de uiteinden van een metaaldraad (met een spanningsbron) is het met het vrij rondzwerven van elektronen door het metaal afgelopen. Ze worden door het elektrisch veld gedwongen zich in een bepaalde richting te bewegen: van de negatieve naar de positieve pool van de spanningsbron. Er ontstaat dus een elektrische stroom, die door de spanningsbron rondgepompt wordt. Die spanningsbron levert de elektrische energie. Door de gedwongen beweging van de elektronen, komen deze voortdurend in botsing met de metaalionen die als grote hinderpalen op hun weg staan. Bij die botsingen dragen de elektronen een deel van hun (bewegings)energie over op de metaalionen: de (bewegings)energie van de metaalionen neemt toe. Toegenomen bewegingsenergie van metaalionen betekent: toegenomen *inwendige energie* van het metaal (zie het thema 'Energie en Kwaliteit', hoofdstuk 4), ofwel: temperatuurstijging.



Het verband tussen gloeidraadtemperatuur, levensduur en lichtrendement leidt tot een optimaliseringsprobleem: hoog lichtrendement en korte levensduur of lager lichtrendement en langere levensduur (bij eenzelfde opgenomen elektrisch vermogen). Dit optimaliseringsprobleem heeft geleid tot de ontwikkeling van de *halogeenlampen* (zie hoofdstuk 7).

de ontwikkeling van gloeilampen

Hoe hoger de temperatuur van een gloeidraad, des te hoger het lichtrendement. Bij een hoge temperatuur valt namelijk een relatief groter deel van de uitgezonden straling in het zichtbare gebied (het gebied met golflengten tussen ruwweg $4{,}0 \cdot 10^{-7}$ en $8{,}0 \cdot 10^{-7}$ m). Een belangrijk probleem bij de ontwikkeling van de gloeilamp was daarom het vinden van een zo geschikt mogelijk materiaal voor de gloeidraad. Faktoren die een rol speelden waren smeltpunt, elektrische weerstand, stevigheid, vervormbaarheid en bestendigheid tegen verdampen. Voor de kleur van het licht maakte de keuze van het draadmateriaal niet zoveel uit: alle metalen zenden een vrij breed, *continu* spectrum uit (dat wil zeggen dat alle kleuren (golflengten) binnen dat brede spectrum voorkomen). Wèl heeft de gloeidraad*temperatuur* invloed op de kleur van het uitgezonden licht.

1.
Het lichtrendement van een gloeilamp kan verhoogd worden door een hogere gloeidraadtemperatuur. Welk effekt zal dit hebben op de levensduur (= totale brandtijd) van een lamp?

2.
Welke invloed heeft de gloeidraadtemperatuur op de kleur van het uitgezonden licht?

3.
In sommige flitslampen bevindt zich magnesium als gloeidraadmateriaal. Ga na hoe men bereikt dat zo'n lampje kortstondig véél licht levert. Kun je de (felwitte) kleur van flitslicht verklaren?

4.
Voor militaire en journalistieke doeleinden gebruikt men beeldversterkers, die het mogelijk maken om infraroodopnamen te maken van objekten. Leg uit wanneer infraroodfotografie zal worden toegepast.
Van welke eigenschappen van het te fotograferen voorwerp maakt men gebruik bij deze vorm van fotografie?

5. RAPPORTEREN

Bereid een rapportage over je onderzoek in dit hoofdstuk voor, waarin de volgende punten aan bod komen:

- hoe ontstaat gloeilamplicht;
- welke kenmerken heeft het spectrum van gloeilamplicht;
- hoe hangen deze spectrumkenmerken af van de temperatuur van de gloeidraad en van het gloeidraadmateriaal;
- hoe groot is het lichtrendement van een gloeilamp;
- welk verband bestaat er tussen de gloeidraadtemperatuur, het uitgezonden spectrum en het lichtrendement van een gloeilamp;
- hoe zou het lichtrendement van een gloeilamp te verbeteren zijn, en tegen welke praktische problemen loop je dan op?

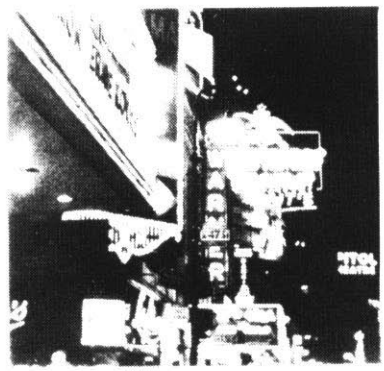
hoofdstuk 5

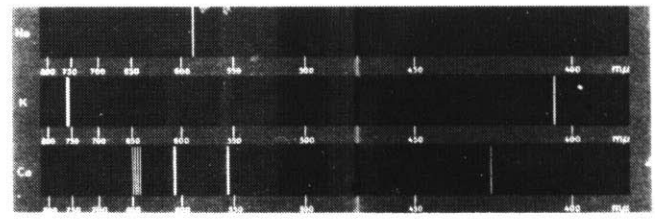
GASONTLADINGSLAMPEN

inhoud blz

5.1 het spectrum van gasontladingslampen 44
5.2 lichtrendement van gasontladingslampen 46
5.3 gasontladingslampstraling 47

gasontladingslampen
In dit hoofdstuk onderzoek je de straling van gasontladingslampen.
Kenmerkend voor deze soort lichtbronnen is, dat een gas waar zich snelle elektronen doorheen bewegen licht uitzendt. Bij dit onderzoek gaat het om de volgende *onderzoeksvragen*:
– welke kenmerken heeft het spectrum van het licht van een gasontladingslamp;
– hoe hangen deze spectrumkenmerken af van het soort gas dat in de gasontladingslamp gebruikt wordt en van de 'verf' aan de binnenkant van een gasontladingslamp (bijv. een TL-buis);
– hoe groot is het lichtrendement van een gasontladingslamp (is dat inderdaad zo'n 80 lm/W bij een TL-buis, zoals in hoofdstuk 2 wordt beweerd?) en hoe hangt het lichtrendement af van het soort gas in de gasontladingslamp en de gebruikte 'verf' aan de binnenkant ervan.





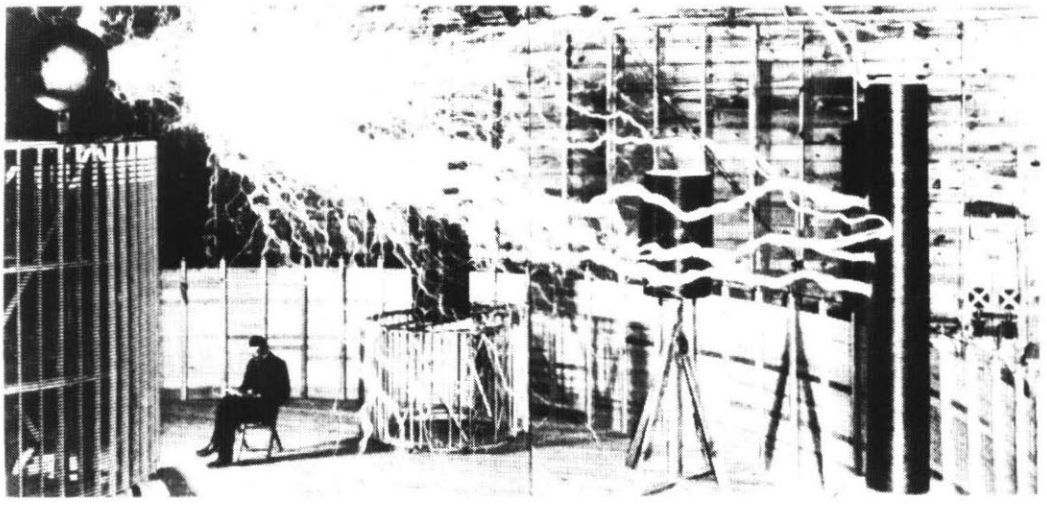
Bij het zoeken naar antwoorden op deze onderzoeksvragen gebruik je de meetmethoden die in hoofdstuk 3 beschreven staan.

In de laatste paragraaf wordt kort ingegaan op de herkomst van straling bij een gasontlading (meer daarover in hoofdstuk 6). In die paragraaf vind je ook een rapportage-opdracht.

5.1 HET SPECTRUM VAN GASONTLADINGSLAMPEN

gasontlading

Sinds onheuglijke tijd doet zich in de natuur het verschijnsel van de bliksem voor. Onder bepaalde omstandigheden zendt de lucht (zichtbaar) licht uit.
Een kunstmatige bliksemflits krijg je als je met behulp van een elektriseermachine een (hoge) spanning aanlegt tussen twee metalen bollen (elektroden), die zich op enige afstand van elkaar bevinden. Zo'n kunstmatige bliksemflits is het gevolg van een korte stroomstoot door de lucht tussen de elektroden.



Kunstmatige bliksem in het laboratorium van Nicola Tesla.

Als je het licht dat bij zo'n ontlading wordt uitgezonden wat nauwkeuriger wilt bekijken, zit je met het probleem dat zo'n ontlading heel kort duurt.
Het is echter ook mogelijk om met een geschikte buis met gas gedurende lange tijd stroom door het gas te laten gaan. In de buis moet zich dan gas onder lage druk bevinden. Het gas zendt licht uit, zolang er stroom door het gas loopt. Zo'n buis noem je een gasontladingslamp.

spectrum van gassen

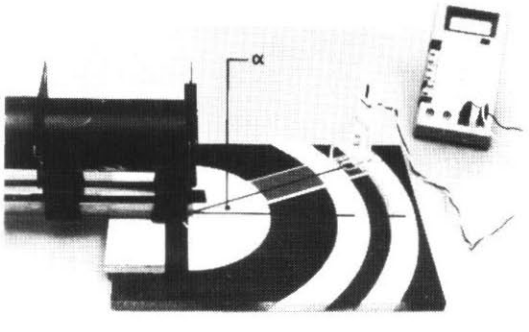
Er zijn nogal wat verschillende soorten gasontladingslampen: kwiklampen, natriumlampen, neonlampen enz. Ze verschillen vooral in het soort gas waarmee ze gevuld zijn.

1. GASVULLING EN KLEUR

a. Welke kleur licht zenden de genoemde gasontladingslampen uit? Welke veronderstelling kun je daaruit afleiden over het verband tussen het spectrum van een gasontladingslamp en de gasvulling?

b. Controleer je veronderstelling door het uitvoeren van de aktiviteiten 2 en 3.

2. GASVULLING EN SPECTRUM



a. Ontwerp een zo goed mogelijk spectrum van het licht van een gasontladingsbuis, gevuld met waterstof.
Zet de stralingsdetector op de plaats van de 'kleurlijnen' in het spectrum. Onderzoek of er naast de zichtbare kleurlijnen in het 1e orde spectrum nog andere, onzichtbare (dus infrarode of ultraviolette) 'kleurlijnen' aanwezig zijn.
Noteer in een tabel bij iedere stand van de detector:

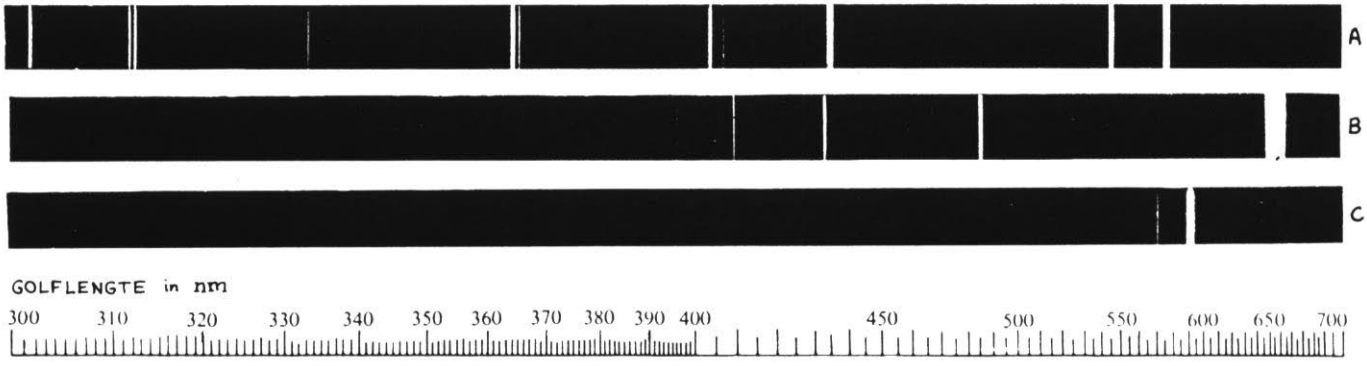
– de hoek α;
– het door de detector gemeten relatieve stralingsvermogen.
Bepaal ook de waarde van de traliecon-stante d.

b. Herhaal dit doormeten van het spectrum bij gasontladingsbuizen, gevuld met neon, kwik en natrium.
c. Werk je metingen uit, zoals aangegeven in aktiviteit 3.

3. STRALINGSVERMOGEN EN GOLFLENGTE
a. Bereken de golflengtes van de kleurlijnen in de doorgemeten spectra bij aktiviteit 2. Zet die golflengtes ook in je tabel.
b. Corrigeer de gemeten waarden van het relatieve stralingsvermogen voor de spectrale gevoeligheid van de fotocel.
c. Teken voor elk soort spectrum in een diagram het verband tussen stralingsvermogen en golflengte.

d. Wat is het kenmerkende verschil tussen de waargenomen gasontladingsspectra en het spectrum van een gloeilamp (zoals je dat in hoofdstuk 2 hebt gezien)?
e. Controleer met behulp van de diagrammen bij 3c je veronderstelling bij aktiviteit 1a.

4.
Hieronder zie je de gefotografeerde spectra van verschillende gasontladingsbuizen. Ga na welke gasvulling bij de verschillende spectra hoort. (Gebruik daarbij je meetresultaten uit 3c).

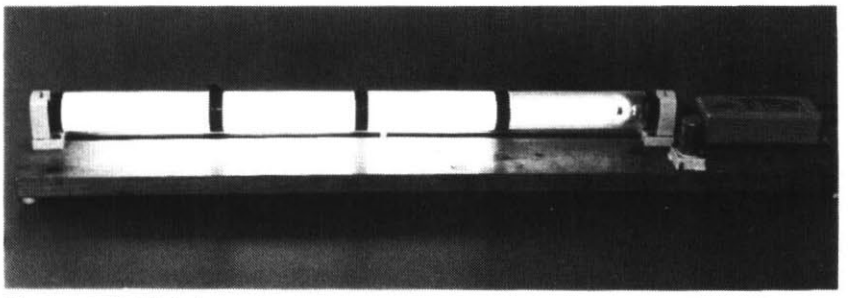


Spectra van gasontladingsbuizen.

fluorescentie
De kleur licht die gasontladingsbuizen geven, is afhankelijk van de gasvulling. Neongas geeft rood en natriumdamp geeft geeloranje licht (toepassingen: neonreclame en straatverlichting).
Een TL-buis is gevuld met kwikdamp. Een gasontladingsbuis met kwikdamp geeft naast enkele kleurlijnen in het zichtbare gebied, veel ultraviolette straling. Deze UV-straling is niet zichtbaar. Je kunt de ultraviolette 'kleurlijnen' wèl zichtbaar maken op een speciaal scherm.

5. UV-STRALING ZICHTBAAR MAKEN
Ontwerp met een tralie een zo goed mogelijk spectrum van een kwiklamp op een normaal scherm.
Noteer de plaatsen waar kleurlijnen optreden.
Vervang het scherm door een scherm met een oppervlak van zinksulfide. Noteer weer de plaatsen waar 'kleurlijnen' optreden.
Welke verschillen neem je waar, als je beide spectra met elkaar vergelijkt?

6. KLEUR VAN TL-BUIS-LICHT
Welke kleur licht zou een TL-buis moeten geven, als je kijkt naar het zichtbare spectrum van een met kwikdamp gevulde gasontladingsbuis? Geeft een TL-buis die kleur licht ook?



Demonstratie-TL-buis.

7. SPECTRUM VAN EEN TL-BUIS
Gebruik bij deze proef een speciale demonstratie-TL-buis, waarin over een deel van de lengte de witte 'verf' aan de binnenkant is weggelaten.
Ontwerp een zo goed mogelijk spectrum van het licht dat door beide delen van de TL-buis (de 'geverfde' en de 'ongeverfde' kant) wordt uitgezonden. Meet beide spectra door, ook aan de ultraviolette kant.

8.
Kun je op grond van de resultaten van de proeven bij aktiviteit 5 en 7 iets zeggen over de funktie van de 'verf' aan de binnenkant van TL-buizen?

Onder bepaalde omstandigheden komt het voor dat een oppervlak, waarop straling valt met een bepaalde golflengte, zelf weer straling uitzendt met een andere, *langere* golflengte. Het is daarbij mogelijk dat het oppervlak ultraviolette straling (onzichtbaar) absorbeert, en vervolgens zichtbare straling (grotere golflengte dan ultraviolette straling) uitzendt. Dit verschijnsel heeft *fluorescentie.* De 'verf' aan de binnenkant van TL-buizen is een fluorescerende stof, die de ultraviolette straling van de kwikdamp in de buis omzet in zichtbaar licht: wit of enigszins gekleurd, afhankelijk van de gebruikte fluorescerende stoffen.

5.2 LICHTRENDEMENT VAN GASONTLADINGSLAMPEN

Een belangrijke vraag bij het gebruik van gasontladingslampen is hoe zuinig ze omspringen met energie. Om de gasontlading te handhaven is een voortdurende toevoer van elektrische energie nodig.
Hoe zuinig gasontladingslampen omspringen met energie wordt gegeven door het lichtrendement.

1. LICHTRENDEMENT METEN
a. Meet het lichtrendement van een paar TL-buizen van verschillend vermogen (dezelfde kleurtemperatuur).
b. Meet het lichtrendement van een kwiklamp en een natriumlamp.

2. LICHTRENDEMENT EN VERMOGEN
a. Welke conclusie trek je uit de metingen bij 1a over het verband tussen lichtrendement en het vermogen van een TL-buis?
b. In hoofdstuk 2 is gesteld dat het lichtrendement van een 36 W TL-buis zo'n 65 lm/W bedraagt. Is dit gegeven in overeenstemming met jouw metingen?

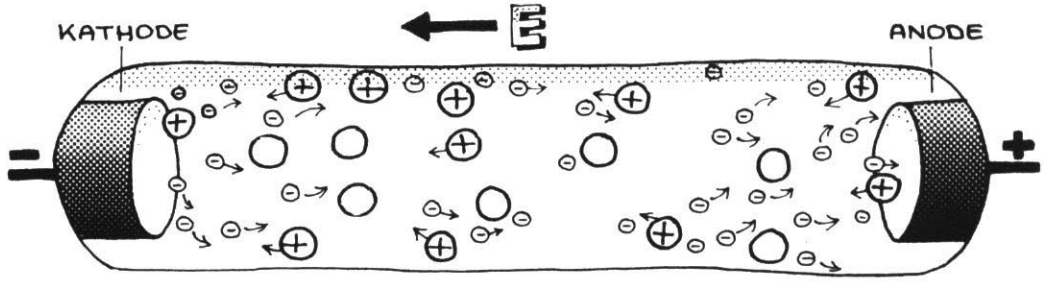
3. LICHTRENDEMENT EN SPECTRUM
a. Een TL-buis heeft een veel hoger lichtrendement dan een gloeilamp. Kun je dat verklaren met wat je weet over het spectrum van kwikdamp en over de constructie van een TL-buis?
b. Natriumlampen hebben een hoger lichtrendement dan bijv. TL-buizen. Kun je dat hoge lichtrendement verklaren met behulp van het spectrumdiagram van deze lampen uit aktiviteit 3 in paragraaf 5.1?

5.3 GASONTLADINGSLAMPSTRALING

Een gasontladingslamp is een energie-omzetter. Elektrische energie wordt omgezet in warmte en stralingsenergie. Van die omzetting kun je een *model* maken.

model voor energie-omzetting in een gasontladingsbuis

Hieronder zie je schematisch een gasontladingsbuis getekend: een gasgevulde buis met twee elektroden. In de buis heerst als gevolg van de spanning tussen de beide elektroden een elektrisch veld.



Model van een elektrische stroom in een gasontladingsbuis.

De gasatomen zijn elektrisch neutraal. Zij zullen dus niet onder invloed van het elektrisch veld gaan bewegen. Door bijv. thermische emissie kunnen echter uit de kathode elektronen vrijkomen (zie het thema 'Materie'). Deze elektronen versnellen onder invloed van het elektrisch veld, en gaan op weg naar de anode (de positieve elektrode). Op weg naar de anode zullen deze elektronen een aantal malen botsen met de gasatomen. Er kunnen bij zo'n botsing twee dingen gebeuren, die belangrijk zijn voor het uitzenden van licht.

Een elektron dat flink lang heeft kunnen versnellen kan een zodanig grote (bewegings)energie hebben, dat het in staat is bij botsing met een gasatoom dit atoom te ioniseren (dus: een nieuw elektron vrij te maken). Het uit het gasatoom vrijgemaakte elektron gaat ook op weg naar de anode, en kan in principe weer nieuwe elektronen uit andere gasatomen vrijmaken: een *lawine-effekt.*

Een elektron dat vrij kort heeft kunnen versnellen kan bij botsing met een gasatoom (een deel van) zijn (bewegings)energie overdragen aan dit gasatoom, zonder ionisatie te veroorzaken.

Het opnemen van energie door een gasatoom en het uitzenden van die opgenomen energie in de vorm van een stralingsflits komt uitgebreid aan de orde in hoofdstuk 6.

In dit laatste geval zal het gasatoom een overschot aan energie hebben. Dat energieoverschot raakt het gasatoom vroeger of later kwijt door het uitzenden van een stralingsflits. Op die manier wordt de elektrische energie van de spanningsbron (die zorgt voor een elektronenstroom in de gasontladingsbuis) omgezet in stralingsenergie.

1.

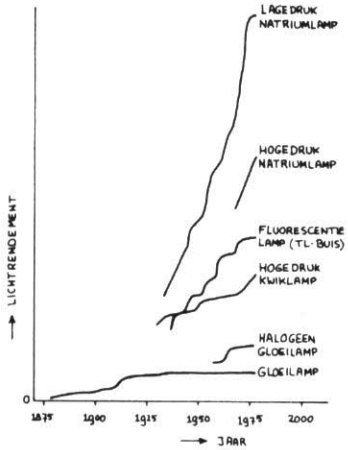
Waarom zal de gasontlading bij een hoge gasdruk pas tot stand komen bij een | hoge waarde van de spanning?

de ontwikkeling van gasontladingslampen

Omstreeks 1900 is de ontwikkeling van gasontladingslampen zover gevorderd dat ze praktisch bruikbaar zijn. Het kenmerkende van gasontladingslampen is, dat het spectrum bestaat uit een beperkt aantal kleurlijnen. Een dergelijk spectrum heet een *lijnenspectrum*. Gasontladingslampen geven daardoor licht met een bepaalde, kenmerkende kleur: rood bij neonbuizen, geeloranje bij natriumlampen, blauw bij kwiklampen enz. Bij kwiklampen heeft men deze beperking kunnen opheffen door het gebruik van geschikte fluorescerende stoffen. Zo ontstond de *fluorescentielamp* (TL-buis).

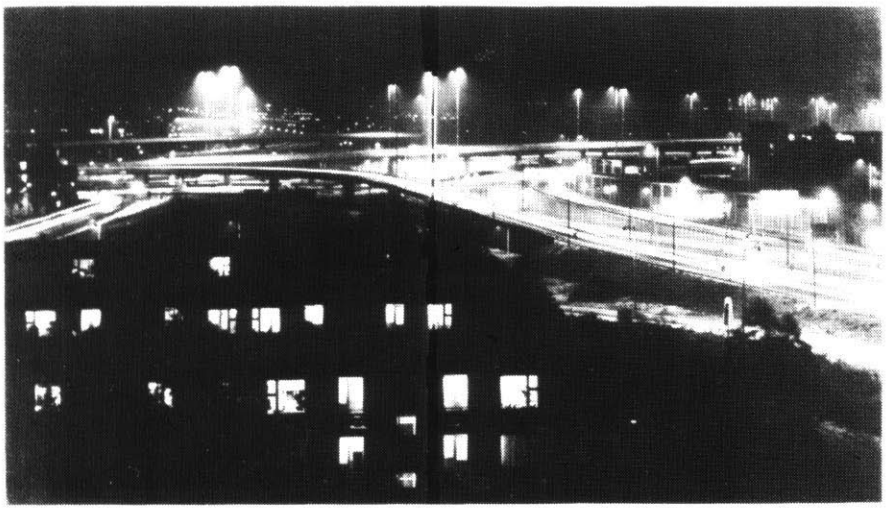
Het lichtrendement van deze verschillende typen gasontladingslampen vertoont nogal wat verschillen, maar opvallend is dat het lichtrendement een stuk hoger ligt dan dat van gloeilampen.

Bij een TL-buis wordt dat bereikt door met fluorescerende stoffen ultraviolette straling



Het lichtrendement van gasontladingslampen is hoog, vergeleken met dat van gloeilampen.

om te zetten in zichtbaar licht. De lichtopbrengst wordt daardoor flink vergroot. Het zeer hoge lichtrendement van natriumlampen heeft te maken met het feit dat een groot deel van de uitgezonden straling een golflengte van $5{,}89 \cdot 10^{-7}$ m heeft. Deze golflengte ligt vrij dicht in de buurt van de golflengte waarvoor het menselijk oog maximaal gevoelig is ($5{,}55 \cdot 10^{-7}$ m). De geeloranje kleur van natriumlicht zorgt dus voor een hoog lichtrendement.



Autosnelwegverlichting met natriumlampen.

2.
Natriumlampen worden veel gebruikt voor straat- en autosnelwegverlichting, maar niet binnenshuis. Wat is daarvan de reden?

3.
Gloeilampen zenden naast zichtbaar licht voornamelijk infrarode straling uit en nauwelijks ultraviolette straling. Waarom kan het lichtrendement van een gloeilamp niet opgevoerd worden met fluorescerende stoffen?

4. RAPPORTEREN
Bereid een rapportage over je onderzoek in dit hoofdstuk voor, waarin de volgende punten aan bod komen:
- hoe ontstaat gasontladingslicht;
- welke kenmerken heeft het spectrum van gasontladingslicht;
- hoe hangen deze spectrumkenmerken af van het soort gas dat in de gasontladingslamp gebruikt wordt en van het gebruik van fluorescerende stoffen;
- hoe groot is het lichtrendement van een gasontladingslamp;
- welk verband bestaat er tussen het uitgezonden spectrum, het gebruik van fluorescerende stoffen en het lichtrendement van een gasontladingslamp?

hoofdstuk 6

LICHT EN ATOMEN

inhoud blz

6.1	het Rutherford-atoom	50
6.2	het Bohr-atoom	52
6.3	lijnenspectra en het Bohr-atoom	56
6.4	de straling van gasontladingslampen	58
6.5	spectra van atomen en moleculen	59
6.6	de straling van gloeilampen	61
6.7	absorptie van straling	62

licht en atomen

In de hoofdstukken 4 en 5 heb je de kenmerken van de straling van gloeilampen en gasontladingslampen onderzocht. Je hebt daarbij gekeken naar de aard van het uitgezonden spectrum en het lichtrendement.

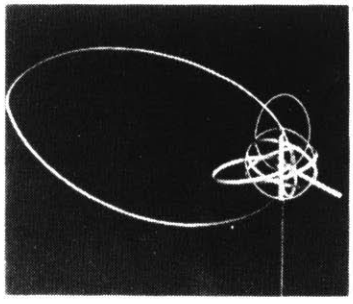
We weten daarmee nog niet waarom deze kenmerken zijn zoals ze zijn. Wèl dat ze iets te maken hebben met atomen: in een gloeidraad en in een gasontladingsbuis wordt energie toegevoerd aan metaal- en gasatomen door botsende elektronen. Maar ...

Hoe komt het dat het rendement van gloeilampen zo laag is? En dat van gasontladingslampen hoger?

Hoe komt het dat een gloeidraad, die toch ook uit atomen is opgebouwd, een continu spectrum uitzendt, terwijl losse gasatomen juist een heel specifiek lijnenspectrum uitzenden? Als dat komt vanwege botsingen van elektronen met gasatomen, waarom worden er dan toch steeds dezelfde lijnen uitgezonden? Dat ligt toch nauwelijks voor de hand bij zulke willekeurige botsingen? Wat gebeurt er dan precies bij die botsingen? En wat gebeurt er dan precies in zo'n gasatoom?

Om antwoorden op deze vragen te vinden, moeten we ons afvragen hoe de atomen in de ontladingslamp of in de gloeidraad nu precies in elkaar zitten. Kunnen we bijvoorbeeld met het atoommodel van Rutherford uit het thema 'Materie' deze vragen beantwoorden? Of moeten we dit model daarvoor nog aanvullen of zelfs wijzigen?

En dan komt de vraag: kun je met zo'n nieuw atoommodel de verschillen tussen de straling van gloei- en gasontladingslampen begrijpen? En: heb je er iets aan voor de ontwikkeling van nieuwe, betere lichtbronnen?



Het licht is rond.

Het licht is rond en rolt naar alle kanten
de bergen op en af, de dalen door,
de wezens in en uit en langs de planten
stijgt het aan de bomen in en gaat het alles voor.
Waarheen? Ik vraag dat niet, ik kom, ik ga,
omdat mijn handen en mijn voeten,
mijn ogen en mijn hart zo moeten
en ik het licht nu eenmaal zo versta.

Pierre Kemp

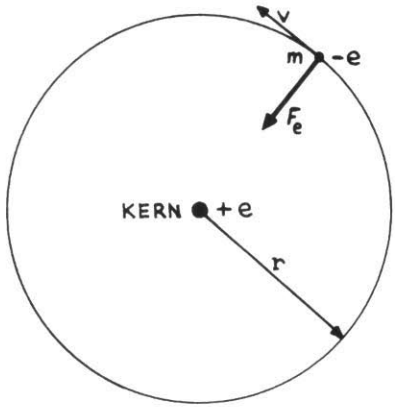
6.1 HET RUTHERFORD-ATOOM

het atoommodel van Rutherford

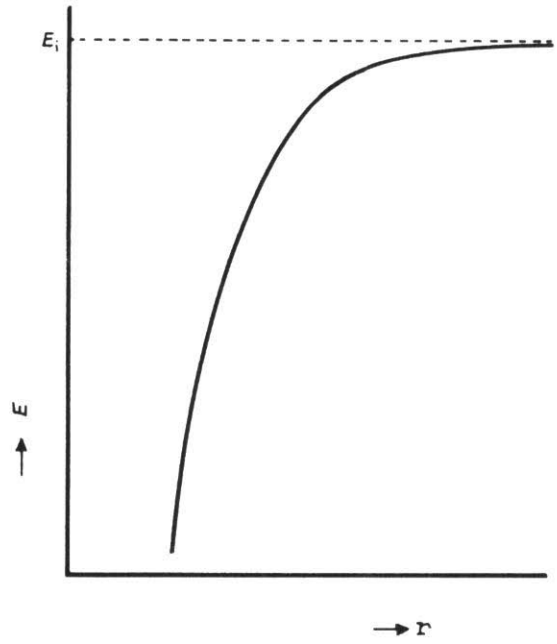
Metalen (gloeidraden) en gassen (in een gasontladingsbuis) zenden licht uit bij energietoevoer. Volgens de modellen in hoofdstuk 4 en 5 nemen de atomen energie op: ze nemen (een deel van) de bewegingsenergie van *vrije* elektronen over, als die met de atomen botsen. Daarna wordt er energie uitgezonden in de vorm van straling. Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de atomen daarvoor verantwoordelijk zijn. Maar welk deel van het atoom?

In het thema 'Materie' is het atoommodel van Rutherford ter sprake gekomen: een heel kleine, maar zware kern met daaromheen cirkelend de veel lichtere elektronen. Vanwege zijn betrekkelijke eenvoud was dat een aantrekkelijk model. Maar is dit model ook in staat het uitzenden van straling door atomen te verklaren? Voor de eenvoud beperken we ons bij het zoeken naar een antwoord op die vraag voorlopig tot het waterstofatoom (H-atoom).

Volgens Rutherford bestaat het H-atoom uit een positief geladen kern en een negatief geladen elektron. Dat betekent dat er tussen de kern en het elektron een *aantrekkende* elektrische kracht werkt. Die kracht zorg ervoor dat het elektron en de kern bij elkaar blijven: het elektron is een *gebonden* elektron.
De elektrische kracht levert de middelpuntzoekende kracht die nodig is om het elektron een eenparige cirkelbeweging om de kern te laten uitvoeren. Het elektron heeft in het model van Rutherford dus een hoeveelheid *kinetische energie*.

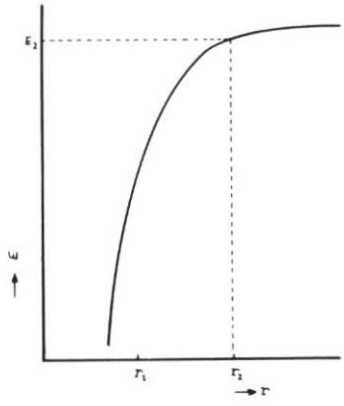


Rutherford-model van een H-atoom.



Elektron-energie E als functie van de afstand r tussen kern en elektron bij een H-atoom. Bij een elektron-energie groter dan E_i is het elektron los van de kern: het H-atoom is dan geïoniseerd.

Het elektron heeft echter ook een hoeveelheid *elektrische energie*. In het thema 'Materie' heb je gezien dat een elektron in het elektrisch veld tussen kathode en anode van een gasontladingsbuis elektrische energie bezit. In het Rutherford-model bevindt het elektron zich in het elektrisch veld van de kern. Ook dit elektron bezit dus elektrische energie.
Berekeningen geven als resultaat dat de *som* van kinetische en elektrische energie groter is, naarmate het elektron op grotere afstand van de kern ronddraait. Het verband tussen de elektron-energie E en de afstand r van het elektron tot de kern is hierboven weergegeven.



het Rutherford-model en straling

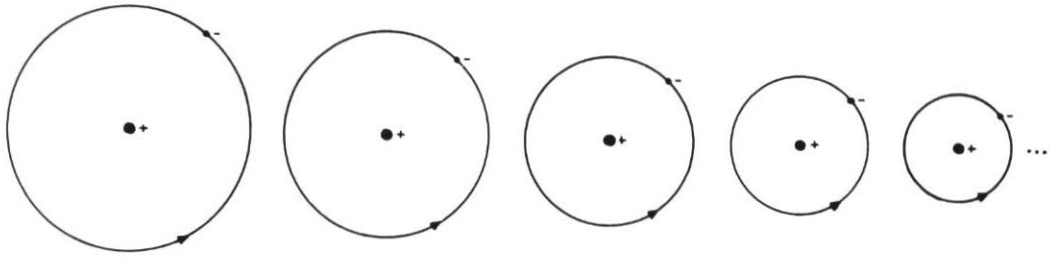
Kan het Rutherford-model het uitzenden van straling door een atoom verklaren? Bij de botsing van een *vrij* elektron met het atoom neemt het atoom energie op. In het Rutherford-model betekent dit een toename van de energie van het in het atoom *gebonden* elektron: het gebonden elektron komt in een baan met een grotere straal om de kern terecht.

Bij het uitzenden van straling verliest het atoom energie. Dat past in het model als we aannemen dat het gebonden elektron daarbij vanuit de baan met een grotere straal weer in een baan dichter rond de kern terecht komt. De energie die het elektron zo kwijt raakt, moet dan omgezet zijn in stralingsenergie.

1.

Neem het hiernaast getekende diagram over. Geef in het diagram aan hoeveel energie als straling moet zijn uitgezonden, als het elektron vanuit een baan met straal r_2 terechtkomt in een baan met straal r_1.

Deze beschrijving lijkt redelijk, maar er duikt een probleem op. Als alle afstanden r tussen kern en elektron mogelijk zijn, waarom zou een elektron dat eenmaal aan het stralen is gegaan, daar op een gegeven moment dan mee ophouden? Waarom verliest zo'n elektron dan niet achter elkaar al zijn energie om tenslotte pas op de kern tot rust te komen? En stel eens dat zo'n elektron, door wat voor oorzaak dan ook, op een bepaalde afstand tòch zou ophouden met stralen. Waarom zou deze eindafstand dan voor elk waterstofatoom gelijk zijn? Dat mag je zonder goede reden dan toch nauwelijks verwachten? Maar betekent dat dan ook niet dat een waterstofatoom elke willekeurige grootte zou kunnen hebben? En zouden al die verschillende H-atomen dan tòch precies dezelfde eigenschappen kunnen hebben? Dat lijkt zeer onwaarschijnlijk.



Welke is het echte H-atoom?

Daarmee zijn we aangekomen bij de vraag hoe we het Rutherford-model moeten veranderen. Uiteraard met behoud van het goede! Het antwoord hierop werd in eerste instantie gegeven door de Deen Niels Bohr.

2.

a. Wat zijn de goede, sterke punten van het atoommodel van Rutherford, denk je? En wat zijn de zwakke punten? Heb je suggesties voor verbetering van het Rutherfordmodel?

b. Rutherford wist zelf ook wel dat zijn model niet 'het einde' was. Toch stelde hij het op. Vind je dat achteraf gezien terecht?

6.2 HET BOHR-ATOOM

Bohr met vriendin.

Twee jaar nadat Rutherford zijn model opstelde, zette Bohr in 1913 een nieuwe stap in de goede richting. Hij voegde een vijftal, met elkaar samenhangende veronderstellingen toe aan het Rutherford-model.

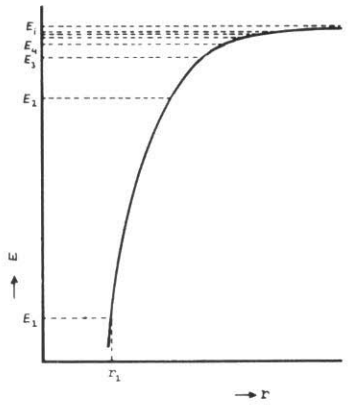
het atoommodel van Bohr

veronderstelling 1.

Een gebonden elektron kan alleen maar een beperkt aantal, scherp bepaalde, energiewaarden hebben; andere energiewaarden kunnen niet voorkomen.

In het diagram hieronder zijn een aantal van deze toegestane energiewaarden E_n (met n = 1, 2, 3, ...) getekend. De tussenliggende energiewaarden kan het elektron *niet* hebben.

Deze veronderstelling leidt tot een atoommodel met slechts een beperkt aantal toegelaten banen van het elektron om de kern. Als de elektron-energie de waarde E_1 heeft, dan moet de baan een straal r_1 hebben (en omgekeerd). Op dezelfde manier horen bij de andere toegelaten energiewaarden E_n de daardoor precies bepaalde baanstralen r_n.



Toegestane energiewaarden E_1, E_2, ... van een gebonden elektron in een H-atoom.

1.

a. Neem het diagram hiernaast over. Geef in het diagram aan welke baanstralen r_n kennelijk alleen maar mogelijk zijn bij de aangegeven energiewaarden.

b. Maak met behulp van het diagram van 1a een schets op schaal van de elektronenbanen in het H-atoom volgens het model van Bohr.

c. Herformuleer de eerste aanname van Bohr zodanig, dat hij betrekking heeft op de *baan* van het elektron.

veronderstelling 2.

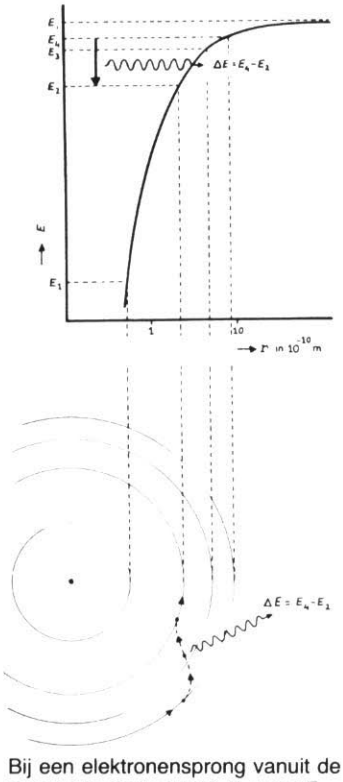
Het elektron streeft altijd naar de toestand met de minste energie: de grondtoestand.

De mogelijke toestanden waarin het elektron kan zitten, vastgelegd door E_n of r_n, worden *aangeslagen toestanden* van het atoom genoemd. Een atoom komt in een aangeslagen toestand door energietoevoer, bijv. bij de botsing van een vrij elektron met het atoom. Het gebonden elektron in het atoom komt dan in een toestand met hogere energie E_n ($n \geqslant 2$). Het verblijf van het elektron in deze toestand met hogere energie is echter slechts tijdelijk. Uiteindelijk blijkt het elektron altijd vanzelf terug te vallen naar de toestand met de laagste energie E_1. In deze toestand met laagste energie moet het elektron dan wel blijven zitten. Dit *eindstation* noemt men de *grondtoestand* van het atoom. De straal r_1 die bij deze grondtoestand hoort, heeft voor het H-atoom de waarde $0{,}53 \cdot 10^{-10}$ m. Omdat het elektron praktisch altijd in deze kleinste baan zit, wordt deze afstand wel *de* straal van het H-atoom genoemd.

2.

a. Welk probleem met het Rutherford-model is door deze tweede veronderstelling van Bohr verdwenen?

b. Wat zal er gebeuren met de energie die het elektron moet kwijt raken, als het naar een baan dichter rond de kern 'springt'?



Bij een elektronensprong vanuit de aangeslagen toestand E_4 naar E_2 zendt het atoom elektromagnetische straling uit met een energie $\Delta E = E_4 - E_2$.

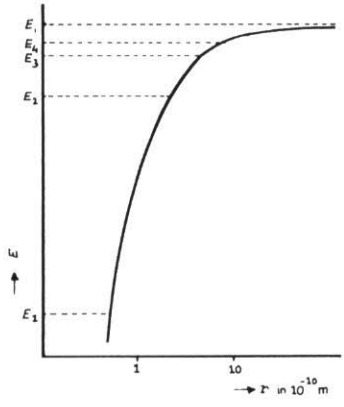
veronderstelling 3.
Bij een elektronensprong van een toestand met hogere energie E_m naar een toestand met lagere energie E_n, wordt de vrijkomende energie $\Delta E = E_m - E_n$ uitgezonden als elektromagnetische straling.

Deze derde veronderstelling brengt ons terug bij het onderwerp van dit hoofdstuk: de uitstraling van *licht* door *atomen.*

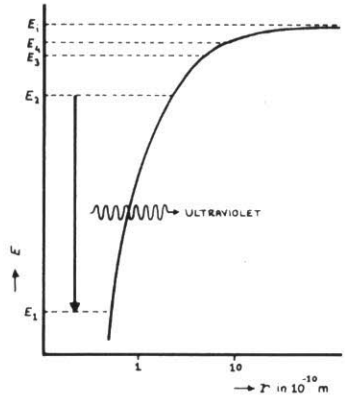
3.
a. Welke betekenis heeft de in het diagram hierboven getekende pijl?
Neem het diagram over. Teken in dit diagram andere mogelijke pijlen.
Waarvoor is de lengte van de pijlen een maat?
b. In dit model wordt het uitzenden van straling gekoppeld aan een elektronensprong in het atoom. Van waar naar waar 'springt' het elektron steeds?
c. Je weet dat er verschillende soorten straling zijn (bijv. infrarood, zichtbaar licht in een reeks van kleuren, ultraviolet). In dit model zie je dat het elektron verschillende sprongen kan maken.
Verwacht je dat er een verband is tussen die twee dingen? Zo ja, welk verband zou dat dan kunnen zijn?

veronderstelling 4.
De frekwentie f van de bij een elektronensprong uitgezonden straling is evenredig met de afname ΔE van de elektron-energie; dit wordt beschreven met de formule:
$\Delta E = h \cdot f$.

De evenredigheidsconstante h wordt de *constante van Planck* genoemd ($h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Js). Hiermee kun je de energieverschillen bij een elektronensprong omrekenen in de daarbij behorende stralingsfrekwentie.



4.
De *tweede* veronderstelling van Bohr zegt dat een elektron altijd uiteindelijk terugvalt naar de grondtoestand met een energie E_1. Voor een elektron in de aangeslagen toestand met energie E_4 zijn er echter vier verschillende manieren waarop dit elektron in de grondtoestand (E_1) terecht kan komen.
a. Neem het diagram hiernaast over. Teken in dit diagram met behulp van pijlen de vier manieren waarop een elektron van E_4 naar E_1 kan springen.
b. De eenvoudigste manier voor een elektron om van E_4 naar E_1 te springen is een grote sprong in één keer. Wat kun je zeggen over de frekwentie(s) van de uitgezonden straling bij de drie andere manieren om van E_4 naar E_1 te springen, vergeleken met de frekwentie van de uitgezonden straling bij een sprong in één keer.



5.
De *vierde* veronderstelling van Bohr zegt: hoe groter de elektronensprong (of: hoe groter de afname van de elektronenergie bij een elektronensprong), des te groter de frekwentie van de uitgezonden straling. Welk verband bestaat er dan tussen de grootte van de elektronensprong en de *golflengte* van de uitgezonden straling?

6.
In het diagram hiernaast levert een elektronensprong van E_2 naar E_1 ultraviolette straling.
Welke soort straling verwacht je dan bij de andere mogelijke elektronensprongen?

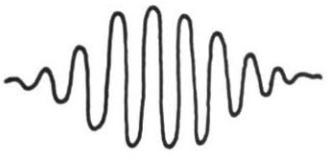
7.
Kun je met het atoommodel van Bohr verklaren dat een H-atoom een lijnenspectrum uitzendt? Zo ja, hoe? Zo nee, wat is dan nog het probleem met het Bohr-model?

fotonen

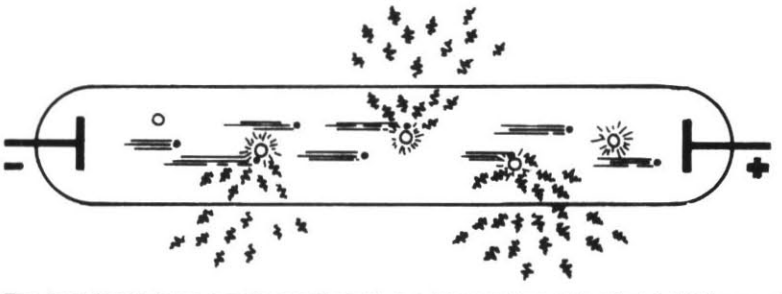
Tot zover lijkt alles prachtig te kloppen. Laten we daarom nog even verder denken. Een atoom zendt straling uit tijdens een elektronensprong. Maar als zo'n sprong nou heel vlug gaat, dan zendt zo'n atoom dus eigenlijk alleen maar een heel kort 'flitsje' uit. Waarom merken we daar dan niets van, als je naar een lamp kijkt? En kun je licht dan niet beter beschrijven als een stroom 'flitsjes' in plaats van als een continu golfverschijnsel, zoals je in hoofdstuk 3 geleerd hebt?

veronderstelling 5.
Bij een elektronensprong wordt de vrijkomende energie uitgezonden als een klein 'pakketje' straling.

Zo'n 'pakketje' straling wordt een *foton* genoemd. Elektromagnetische straling (en dus ook licht) is bij nader inzien dus niet een continu golfverschijnsel (zoals watergolven), maar kan beter worden voorgesteld als een *stroom van fotonen*.
Je kunt je bij zo'n foton ruwweg het volgende voorstellen. Het atoom zendt alleen energie uit tijdens de elektronensprong. Zo'n sprong duurt maar heel kort, in de orde van 10^{-9} s of nog korter. Alleen gedurende dat tijdje wordt er straling uitgezonden, die zich met de lichtsnelheid c voortplant ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Op die manier ontstaat er een 'kort stukje straling': een 'golfpakketje'.
Het foton kun je je voorstellen als een 'golfpakketje' of 'golftreintje' (zoals het ook wel genoemd wordt), dat een hoeveelheid energie 'meedraagt'. Het idee van zo'n golftrein maakt aannemelijk waarom een stroom van fotonen zich tòch als een golfverschijnsel gedraagt.



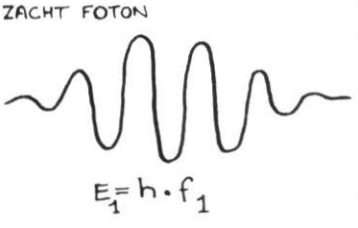
Voorstelling van een foton: een golftreintje.

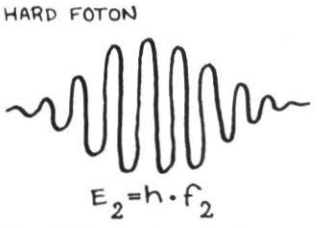


Een brandende lamp zendt voortdurend een fotonenstroom in allerlei richtingen uit.

8.
a. Als je weet dat de energie van een 'zichtbaar' foton ruwweg 2 eV bedraagt, hoeveel fotonen zendt een 100 W lamp dan per seconde uit (ruwweg)?
b. Waarom merk je bij zo'n lamp niets van het bestaan van afzonderlijke fotonen?

9.
a. Geef het verband tussen de energie E_f van een foton en de frekwentie f van het foton in een formule weer.
b. Hoe hangt 'de kleur' van een foton samen met zijn energie?
c. Controleer de aanname van een foton-energie van ruwweg 2 eV bij 'zichtbare' fotonen (zie 8a), door de bijbehorende golflengte te berekenen.





Voorstelling van een hard en een zacht foton. Een zacht foton heeft een kleinere energie dan een hard foton. Daardoor is de frekwentie van de straling in het zachte foton kleiner dan die in het harde foton.

Fotonen als een soort ondeelbare 'lichtdeeltjes' kunnen dus nog heel verschillende hoeveelheden energie hebben. Afhankelijk van de grootte van de elektronensprong kan het foton veel of weinig energie hebben: *hard* of *zacht* zijn. De frekwentie f van de uitgezonden straling bij een elektronensprong hangt samen met de energie E_f van het foton:

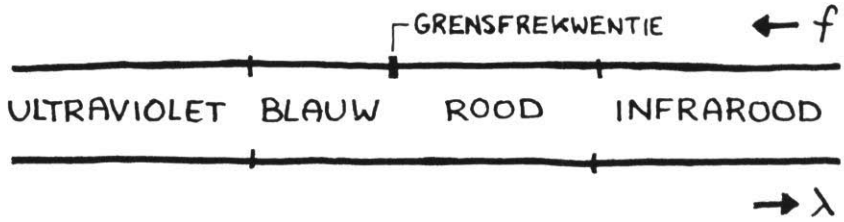
$$E_f = h \cdot f$$

HET FOTO-ELEKTRISCH EFFECT

Het bestaan van 'harde' en 'zachte' fotonen geeft de sleutel voor het oplossen van het raadsel van het *foto-elektrisch effect*. Dit foto-elektrisch effect vormde in het begin van deze eeuw een groot probleem.

Het foto-elektrisch effect treedt op als licht met een geschikte golflengte op een geschikt metaaloppervlak invalt: het licht maakt dan elektronen vrij uit het metaal. Merkwaardig daarbij was, dat er voor ieder metaal een *grensfrekwentie* bleek te zijn (of een *grensgolflengte*): bij licht met een frekwentie *groter* dan de grensfrekwentie trad het effect wèl op, en in het andere geval niet. De intensiteit van het invallende licht had geen invloed op het optreden van het effect, wèl op de grootte ervan (hoe groter de intensiteit van het licht, des te meer elektronen kwamen vrij).

Bij een grensfrekwentie midden in het zichtbare gebied kan dus ieder beetje blauw licht al elektronen vrijmaken, terwijl rood licht met grote intensiteit geen enkel effect heeft.



Bij de meeste metalen ligt de grensfrekwentie in het ultraviolet, zodat zichtbaar licht er geen elektronen uit kan vrijmaken. Het foto-elektrische effect was één van de verschijnselen die met de golftheorie van het licht niet verklaard konden worden. Een verklaring vond Einstein omstreeks 1900, door te veronderstellen dat licht bestaat uit zoiets als fotonen, waarvan de energie afhangt van de frekwentie. Uit deze veronderstelling volgt dat licht (of straling) alleen maar in staat is om energie over te dragen in porties van de foton-energie $h \cdot f$.

10.

Verklaar de verschijnselen bij het foto-elektrisch effect met de fotonentheorie. (Aanwijzing: voor het losmaken van een elektron uit een metaal is een bepaalde hoeveelheid arbeid nodig om de aantrekkende kracht op het elektron te overwinnen.)

De verklaring van Einstein vond echter weinig aanhang, omdat ze strijdig leek met de gevestigde ideeën over licht als golfverschijnsel.

Ook het atoommodel van Bohr ondervond om dezelfde reden flink wat tegenstand. Maar niet alleen daarom. De *eerste* veronderstelling van Bohr was ook nogal ongebruikelijk. Want in onze wereld van alledag kun je elk voorwerp in principe elke energiewaarde geven en op elke plaats zetten die je maar wilt (als je maar sterk genoeg zou zijn). Waarom zou dat voor een elektron in een atoom dan heel anders zijn?

Het sterke van Bohr's atoommodel was, dat daarmee twee in die tijd hete hangijzers tot één geheel werden samengesmeed: de atoombouw en licht als een stroom van afzonderlijke fotonen. Daardoor konden zowel het bestaan van lijnenspectra als het foto-elektrisch effect verklaard worden.

11.

a. Bohr maakte een aantal veronderstellingen, die in strijd waren met de gevestigde ideeën. Mocht hij dat nu zo maar doen? Hoe zou je dat volgens jou kunnen rechtvaardigen?

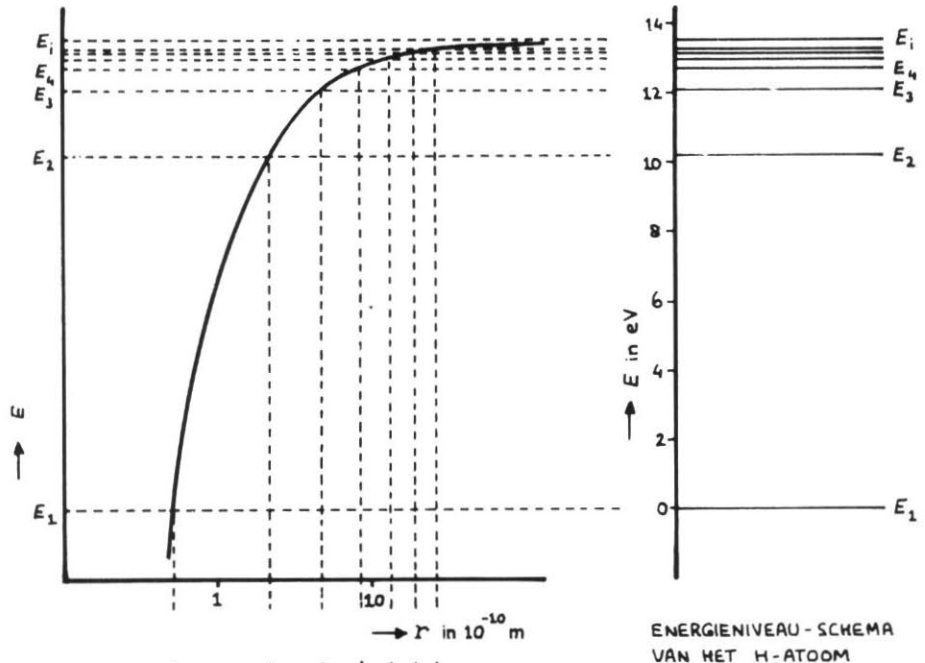
b. Vind je dat Bohr's atoommodel iets verklaart? Of eigenlijk helemaal niets? Waarom?

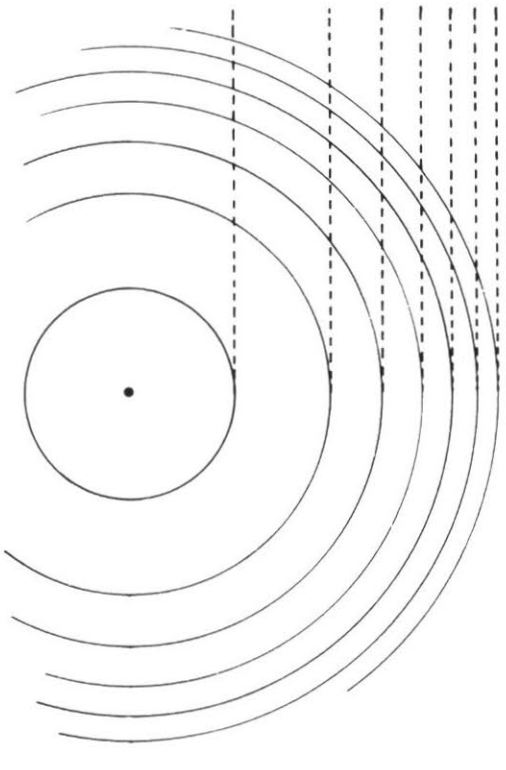
6.3 LIJNENSPECTRA EN HET BOHR-ATOOM

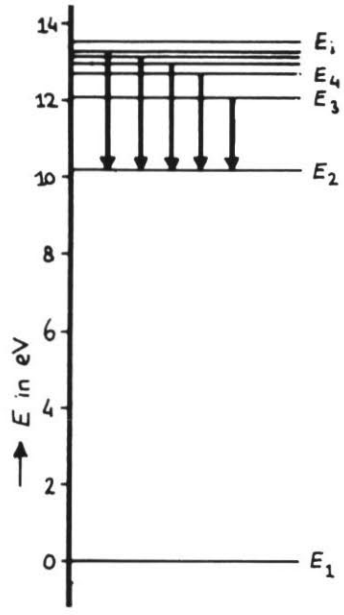
energie-niveau	energie in eV
E_1	0
E_2	10,20
E_3	12,09
E_4	12,75
E_5	13,06
E_6	13,22
E_7	13,32
E_i	13,60

Energiewaarden van de eerste zes aangeslagen toestanden van het H-atoom.
Aan de grondtoestand E_1 wordt de energiewaarde 0 eV toegekend. Dat betekent niet dat het gebonden elektron in de grondtoestand geen energie heeft. Voor de verklaring van het optreden van lijnenspectra met het Bohr-model zijn de energiewaarden zélf echter niet belangrijk. Het gaat bij die verklaring om de *verschillen* tussen de energiewaarden. En voor die verschillen maakt het niet uit of we bij 0 eV of bij een andere energiewaarde beginnen.

Bohr's atoommodel bestond uit 'niet meer dan' een aantal *veronderstellingen*. Met name het idee van de aangeslagen toestanden was volledig nieuw. Het nieuwe atoommodel kreeg meer overtuigingskracht toen Franck en Hertz een paar jaar later erin slaagden de energiewaarden van de aangeslagen toestanden te *meten*.
In de tabel hiernaast zijn een aantal van deze energiewaarden voor het H-atoom gegeven. Het is gebruikelijk om deze energiewaarden weer te geven in de vorm van een *energieniveau-schema*. Hieronder is zo'n energieniveau-schema voor het H-atoom getekend (rechts). In die tekening zie je ook het verband met de tekeningen die al eerder in dit hoofdstuk gebruikt zijn om iets over de aangeslagen toestanden van het H-atoom te zeggen.







1. ANALYSE VAN HET H-SPECTRUM

In deze activiteit ga je controleren of het energieniveau-schema het waargenomen spectrum van waterstof verklaart.

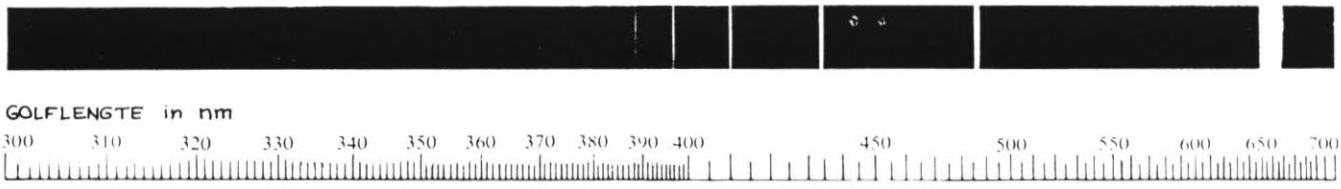
a. Hiernaast zijn in het energieniveau-schema van waterstof een aantal elektronensprongen aangegeven. Neem het schema over.
Bereken bij elke aangegeven overgang de golflengte van de uitgezonden straling. Noteer die golflengtes in het schema bij de bijbehorende overgang.

b. Welke van de bij 1a berekende golflengtes liggen in het zichtbare gebied? Om welke soort straling gaat het bij de golflengte die niet in het zichtbare gebied ligt?

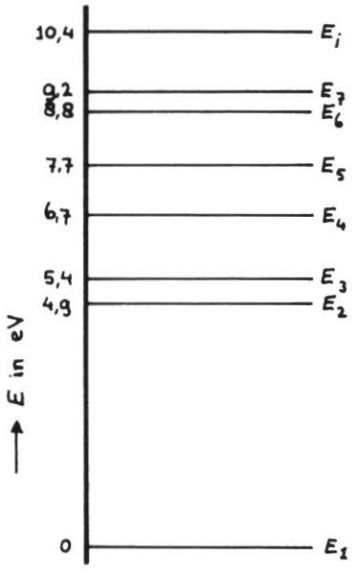
c. Op de foto hieronder zie je een gedeelte van het H-spectrum. De foto geeft naast de lijnen uit het zichtbare gebied ook lijnen buiten het zichtbare gebied weer (de gevoeligheid van het fotografisch materiaal is anders dan dat van het menselijk oog).
Ga na of de golflengtes in het gefotografeerde spectrum overeenkomen met de golflengtes die je bij 1a uit het energieniveau-schema hebt berekend.

d. In het gefotografeerde spectrum is nog een zesde lijn te zien (naast de vijf die je bij 1a hebt berekend). Hoe groot is de golflengte van deze lijn? Bij welke overgang in het energieniveau-schema hoort deze lijn naar alle waarschijnlijkheid? (Aanwijzing: bedenk dat er tussen de aangeslagen toestanden E_7 en E_i nog een aantal aangeslagen toestanden mogelijk zijn.)

e. Bereken met behulp van de golflengte van de in 1d bedoelde lijn in het H-spectrum de energiewaarde van de aangeslagen toestand E_8. Geef dit energieniveau aan in het energieniveau-schema.



H-spectrum.

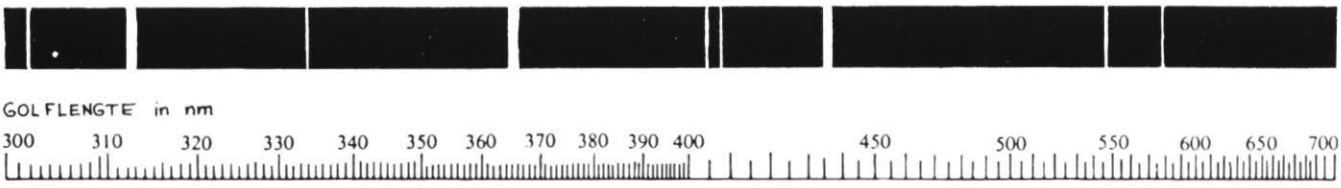


Energieniveau-schema van het Hg-atoom.

Het energieniveau-schema van het waterstofatoom is vrij eenvoudig. Voor andere atomen dan het H-atoom wordt de situatie ingewikkelder. Want er is dan altijd méér dan één elektron aanwezig, en elk elektron kan in principe gaan 'springen'. Het aantal mogelijke energieniveaus neemt ook sterk toe, zodat er veel elektronensprongen van zeer verschillende grootte mogelijk zijn.

2. HET Hg-SPECTRUM

Hiernaast is een vereenvoudigd energieniveau-schema van het kwikatoom getekend. Hieronder zie je een gefotografeerd kwik-spectrum.
In het gefotografeerde kwikspectrum komen een aantal heldere lijnen voor. De golflengtes daarvan zijn $2{,}54 \cdot 10^{-7}$, $3{,}13 \cdot 10^{-7}$, $3{,}66 \cdot 10^{-7}$ en $4{,}36 \cdot 10^{-7}$ m. Geef bij elk van de vier genoemde golflengtes aan welke overgang in het energieniveau-schema erbij hoort.



Hg-spectrum.

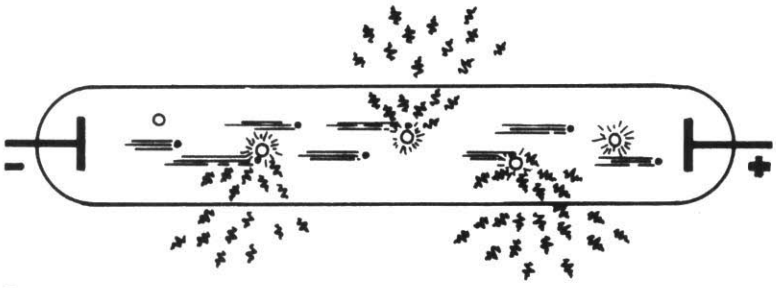
6.4 DE STRALING VAN GASONTLADINGSLAMPEN

In deze paragraaf gaat het om de vraag: wat levert het atoommodel van Bohr nu op voor het begrijpen van de kenmerken van de straling van gasontladingslampen.

1.
Welke van de kenmerken van de straling van gasontladingslampen kun je nu verklaren? En hoe ziet die verklaring er dan uit?

Een atoom zal er altijd naar streven om in zijn grondtoestand over te gaan en daar te blijven. Dat maakt begrijpelijk dat een gas, bestaande uit atomen, onder 'normale' omstandigheden geen straling zal uitzenden. Pas als de elektronen in de gasatomen voortdurend 'wakker geschud' worden (dat wil zeggen: als ze voortdurend op de één of andere manier in een aangeslagen toestand worden gebracht), kan het gas wèl straling uitzenden. Dit 'wakker schudden' of *aanslaan* van de gasatomen kan gebeuren tijdens botsingen. In een gasontladingslamp wordt de energie voor het aanslaan van gasatomen geleverd door vrije elektronen, die versneld worden door het elektrisch veld in de lamp. Deze elektronen kunnen bij botsingen met de gasatomen hun energie hieraan geheel of gedeeltelijk afstaan. Is de overgedragen energie groot genoeg, dan komt het gasatoom in een aangeslagen toestand. Vanuit deze aangeslagen toestand zal het terugvallen onder uitzending van straling.

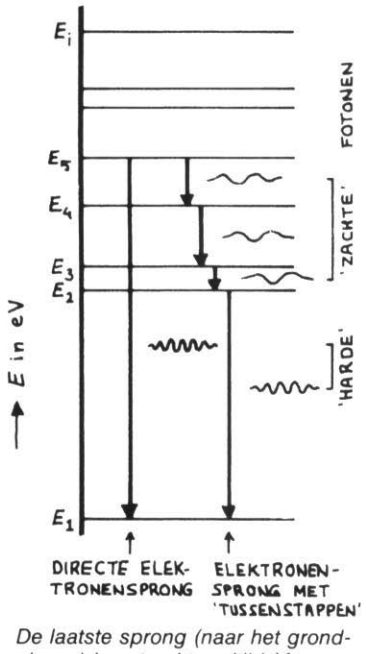
Een elektron dat zijn energie is kwijtgeraakt door een botsing wordt opnieuw versneld en kan opnieuw een atoom aanslaan. Duurt het wat langer voordat het elektron een gasatoom tegenkomt, dan kan de energie van het elektron groot genoeg worden om het atoom te ioniseren. Het gas-ion en het 'nieuwe' (vrije) elektron zullen op hun beurt versneld worden en botsen, enz.
Uit dit verhaal blijkt dat bij een gasontladingslamp steeds een hoeveelheid (elektrische) energie moet worden toegevoerd om de gasatomen voldoende aan te slaan.



De gasontladingslamp.

Dat een atomair gas alleen een lijnenspectrum uitzendt, is nu wel duidelijk. Een atoom kàn immers niet anders vanwege de precies bepaalde, aparte energieniveaus. Maar de ligging en het aantal van deze niveaus is wèl voor elk atoom verschillend. Zoals gezegd komt dit vanwege het verschil in elektronen-aantal tussen verschillende atomen. Daaruit volgt ook dat elke atoom*soort* een heel *eigen* spectrum uitzendt, dat kenmerkend is voor die soort. Voor de natuurkundigen is het spectrum van een atoom dan ook wat een vingerafdruk is voor de detective. Het spectrum is hèt identificatiemiddel van een atoom.
Als we naar de energieniveau-schema's van atomen kijken, begrijpen we ook waarom een verzameling gas-atomen nooit *alleen* infrarode straling uitzendt. Daarvoor liggen zelfs de laagste aangeslagen niveaus gewoon te hoog. Als een atoom eenmaal hoog aangeslagen is, kan het soms wel òf een ultraviolet, òf een zichtbaar, óf een infrarood foton uitzenden. Maar nooit *uitsluitend* een infrarood foton. Gemiddeld over een groot aantal atomen, wat in een gasontladingslamp altijd het geval is, zullen we altijd een 'mengsel' van fotonen waarnemen. En nooit alleen de infrarode, zoals bij een warme gloeidraad wèl het geval kan zijn.

Naarmate de energie van een aangeslagen elektron hoger is, liggen de energieniveau's gemiddeld dichter op elkaar. Als een elektron vanuit een hoog energieniveau terugspringt naar de grondtoestand, wordt een foton met een hoge frekwentie uitgezonden: een hard foton (bijv. ultraviolet). Het elektron kan echter ook via een aantal tussenstappen terugspringen naar de grondtoestand. Als zo'n tussenstap gemaakt wordt tussen twee hoge energieniveaus, kan de foton-energie klein zijn (want de verschillende hoge energieniveua's liggen gemiddeld dicht bij elkaar). De frequentie van het foton is dan laag: een zacht foton, bijv. zichtbaar of (nog zachter) infrarood.



De laatste sprong (naar het grondniveau) levert echter altijd òf een zichtbaar òf een ultraviolet foton op, omdat het energieverschil tussen de eerste aangeslagen toestand (E_2) en de grondtoestand vrij hoog is. In het geval van een sprong met één of meer tussenstappen kan dus een combinatie van infrarode en zichtbare of ultraviolette fotonen worden uitgezonden, maar nooit alleen een infrarood foton.

Het rendement van een gasontladingslamp kan relatief hoog zijn want de elektrische energie die je toevoert, wordt via botsingen voor het grootste deel omgezet in een aanslagenergie van de atomen. Als je er nu ook nog voor zorgt dat de gekozen atoomsoort veel niveaus heeft van waaruit vooral zichtbare fotonen worden uitgezonden, dan komt de aanslag-energie voor een groot deel vrij als zichtbaar licht. En dus heb je dan betrekkelijk weinig energie 'verloren'.

2.

a. Noem de begrippen en regels (veronderstellingen) uit Bohr's theorie, die in het voorgaande leesstuk gebruikt zijn voor de verklaring van de kenmerken van de straling van gasontladingslampen.

b. Noem de kenmerken van de straling van gasontladingslampen, die in dit stuk verklaard worden.

3. FLUORESCENTIE

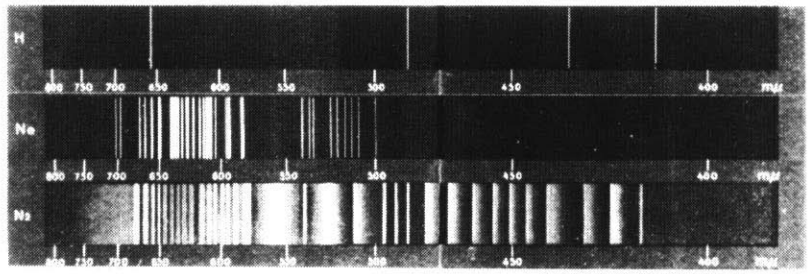
Het aanslaan van een atoom kan gebeuren door een botsing met een vrij elektron. Maar het is ook mogelijk dat een atoom aangeslagen wordt door een *foton* (het aanslaan van een atoom is tenslotte niets anders dan het toevoeren van energie aan het atoom).

a. Leg uit dat een ultraviolet foton dat op een materiaal invalt fluorescentie kan veroorzaken (dat wil zeggen: het materiaal zendt een zichtbaar foton uit). Geef ook met bijv. een simpel energieniveauschema aan hoe dat dan in zijn werk gaat.

b. Leg uit waarom een infrarood foton nooit fluorescentie kan veroorzaken.

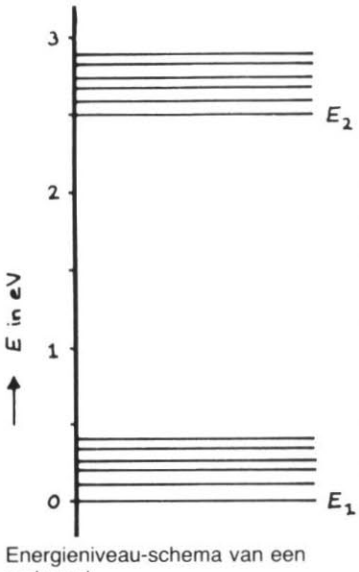
6.5 SPECTRA VAN ATOMEN EN MOLECULEN

De theorie van Bohr was aanvankelijk een groot succes. Het spectrum van waterstof kon er bijna perfect mee begrepen worden. Toch ontstonden er weldra problemen. Voor atomen met meer elektronen bleken niet alleen de spectra er ingewikkelder uit te zien, maar bleek ook dat de Bohrtheorie die niet meer volledig kan verklaren. De spectra van *moleculen* (twee of meer aan elkaar gebonden atomen) leverden nog meer moeilijkheden op.



Het waterstof-spectrum: een eenvoudig lijnenspectrum, overeenkomend met de afzonderlijke, ver uit elkaar liggende energieniveau's van één eenzaam gebonden elektron.
Het neon-spectrum: een veel ingewikkelder lijnenspectrum dat overeenkomt met de energieniveau's van een tiental gebonden elektronen.
Het spectrum van het stikstofmolecuul (twee gebonden stikstofatomen): ingewikkelder dan dat van het neonatoom, en hier en daar lijkend op een continu spectrum.

Sinds de formulering door Bohr heeft zijn model dan ook talloze aanvullingen en wijzigingen ondergaan. Toch is gebleken dat één grond-idee van het Bohr-atoom zijn geldigheid heeft behouden. En dat grond-idee is:
de energie van een gebonden systeem kan alleen maar zeer beperkte waarden aannemen.
De uitzending van straling gaat dus altijd gepaard met een sprong van een hoger naar een lager energieniveau. Deze regel geldt voor alle systemen: atomen, moleculen en zelfs kristalroosters.



Energieniveau-schema van een molecuul.

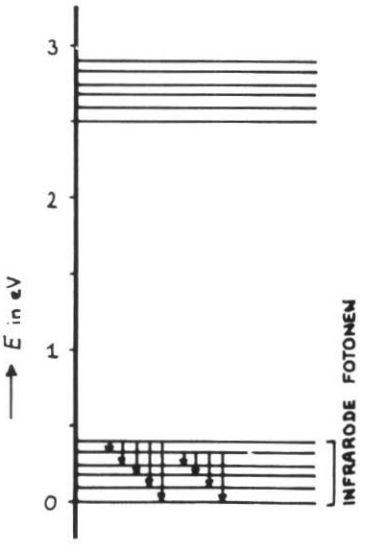
Met deze regel zijn in grote lijnen de ingewikkelder spectra van moleculen te verklaren. Natuurlijk is in het spectrum van bijv. het N_2-molecuul het lijnenspectrum van de twee afzonderlijke stikstofatomen aanwezig. Maar de beide atomen zelf zijn door onderlinge krachten aan elkaar gebonden. Net als een elektron in een atoom een gebonden deeltje is, zo zijn de atomen in een molecuul ook gebonden deeltjes. De atomen kunnen op verschillende manieren ten opzichte van elkaar bewegen (trillen of draaien); ze hebben dus een hoeveelheid energie ten opzichte van elkaar (net als een gebonden elektron dat heeft ten opzichte van de rest van het atoom). Volgens het grond-idee van Bohr kan die energie alleen maar heel bepaalde waarden aannemen. Deze energieniveaus blijken echter heel dicht bij elkaar te liggen: op een 'afstand' van ruwweg 0,1 à 0.01 eV. Het energieniveau-schema komt er dan uit te zien zoals hiernaast geschetst: de energieniveaus van het atoom worden als het ware opgesplitst in een aantal dicht op elkaar liggende energieniveaus.

1.

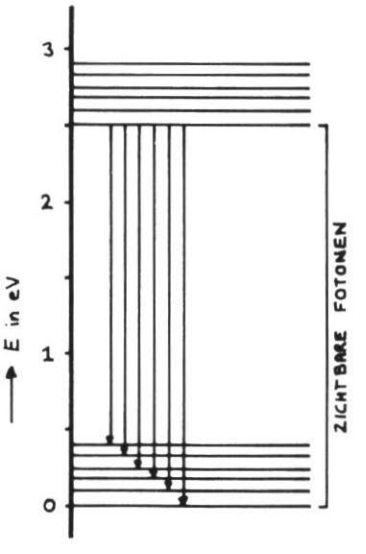
a. Verklaar met het hiernaast weergegeven energieniveau-schema dat een molecuul na een zeer geringe energieopname (bijv. hooguit 0,5 eV) in staat is *uitsluitend* infrarode fotonen uit te zenden. Geef aan welke energieniveausprongen voor het uitzenden van die straling verantwoordelijk zijn.

b. Verklaar met het hiernaast weergegeven energieniveau-schema dat *delen* van een molecuulspectrum continu *lijken* te zijn bij voldoende energietoevoer aan het molecuul (bijv. 2,5 eV).

Het energieniveau-schema van een molecuul geeft een verklaring voor het feit dat een molecuul in staat is *uitsluitend* infrarode straling uit te zenden. (In paragraaf 6.4 heb je gezien dat dit bij een atoom niet mogelijk is.) Bij een geringe energietoevoer aan het molecuul komt het molecuul in een aangeslagen toestand net iets boven de grondtoestand. Bij terugval naar de grondtoestand zijn de energieniveau-sprongen zeer klein. De fotonen die bij zo'n sprong horen, zullen dus in het infrarode deel van het spectrum liggen.



Uitzending van uitsluitend infraroodstraling door een molecuul.



Ontstaan van een schijnbaar continu deel in een molecuulspectrum.

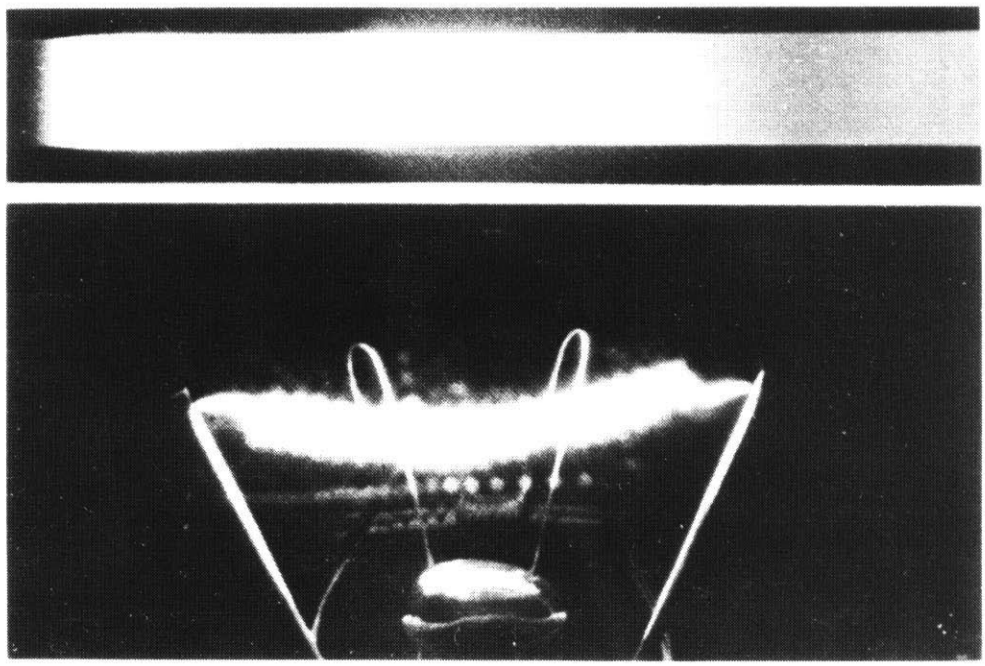
Als het molecuul echter meer energie toegevoerd krijgt, zodat het in hogere aangeslagen toestanden terecht komt, treden weer andere verschijnselen op. Er zijn dan een groot aantal sprongen naar de grondtoestand mogelijk, met een vrijwel gelijke maar nét iets van elkaar verschillende energie-afname. Daardoor zullen in het spectrum een groot aantal lijnen vlak naast elkaar optreden: *delen* van het spectrum *lijken* continu te

zijn. Deze 'stukjes' continu spectrum kunnen in het zichtbare gebied liggen, maar ook daarbuiten.

2.
Geeft de theorie van de molecuulspectra aanwijzingen voor het verklaren van het spectrum van de straling van een gloeidraad (= een grote verzameling gebonden atomen)? Hoe zou die verklaring er ruwweg uitzien, denk je?

6.6 DE STRALING VAN GLOEILAMPEN

De gloeidraad van een gloeilamp bestaat uit een onvoorstelbaar grote hoeveelheid gebonden deeltjes bij elkaar. Al die deeltjes kunnen ten opzichte van elkaar bewegen (trillen), en hebben dus een hoeveelheid energie ten opzichte van elkaar. En volgens Bohr's grond-idee alleen maar heel bepaalde waarden. Het energieniveau-schema 'loopt vol' met dicht op elkaar gelegen energieniveaus: een situatie waarin het begrijpelijk is dat bij sprongen tussen energieniveaus alle mogelijke fotonfrekwenties in principe kunnen voorkomen. Ofwel: een situatie waarin een *continu* spectrum wordt uitgezonden.



Continu spectrum.

In zo'n veelheid van mogelijkheden doet het niet zo veel meer toe hoe de afzonderlijke atomen er nu precies uitzien: het voor een atoom karakteristieke energieniveau-schema verdwijnt in de veelheid van andere mogelijke energieniveaus. Het spectrum is dan vrijwel onafhankelijk geworden van de soort stof die het uitzendt.
Wèl is het spectrum nog afhankelijk van de temperatuur van de stof. Bij een lage temperatuur (bijv. kamertemperatuur) is de gemiddelde energie van de deeltjes gering. De daaruit volgende energiesprongen omlaag leveren dus fotonen met een kleine energie: de uitgezonden straling ligt uitsluitend in het infrarood. Bij een hogere temperatuur is de gemiddelde energie van de deeltjes groter. De energiesprongen omlaag kunnen dus ook groter worden en de daarbij uitgezonden fotonen hebben grotere frekwenties. Naast de infrarode fotonen kunnen nu ook zichtbare of zelfs ultraviolette fotonen uitgezonden worden. Ofwel: naarmate de temperatuur van een vaste stof hoger wordt, is het uitgezonden spectrum breder. Naast het rood verschijnen in het spectrum ook oranje, geel, groen, blauw en violet in steeds grotere mate. De totaalindruk als je naar de gloeidraad kijkt, verandert van 'roodgloeiend' tot 'witheet'.

1.

a. Noem de begrippen en regels (veronderstellingen) uit Bohr's theorie, die in het voorgaande leesstuk gebruikt zijn voor de verklaring van de kenmerken van de straling van gloeilampen.

b. Leg jouw veronderstelling bij activiteit 2 uit paragraaf 6.5 eens naast het leesstuk hierboven. In hoeverre komt jouw veronderstelling overeen met de hierboven gegeven verklaring?

2.

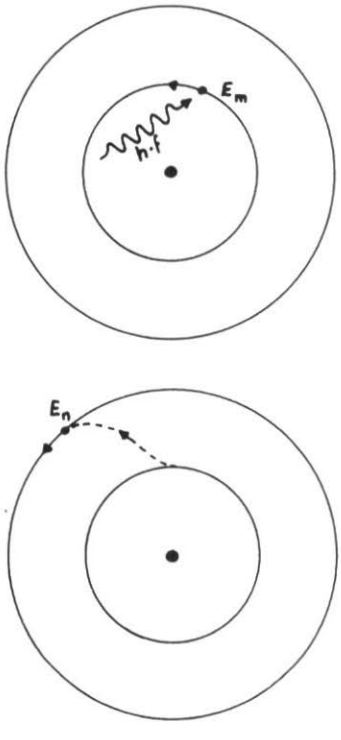
Een gloeidraad zendt volgens de theorie hierboven altijd straling uit. Ook als de draad niet gloeit (dus: als de lamp uit is). Zelfs bij kamertemperatuur wordt infraroodstraling uitgezonden. Waar haalt de gloeidraad de energie vandaan om die straling te kunnen uitzenden?

3.

a. Waarom is het lichtrendement van een gloeilamp lager dan dat van een gasontladingslamp?

b. Is het mogelijk het lichtrendement van een gloeilamp te vergroten met behulp van fluorescentie?

6.7 ABSORPTIE VAN STRALING



Model voor absorptie van een foton.

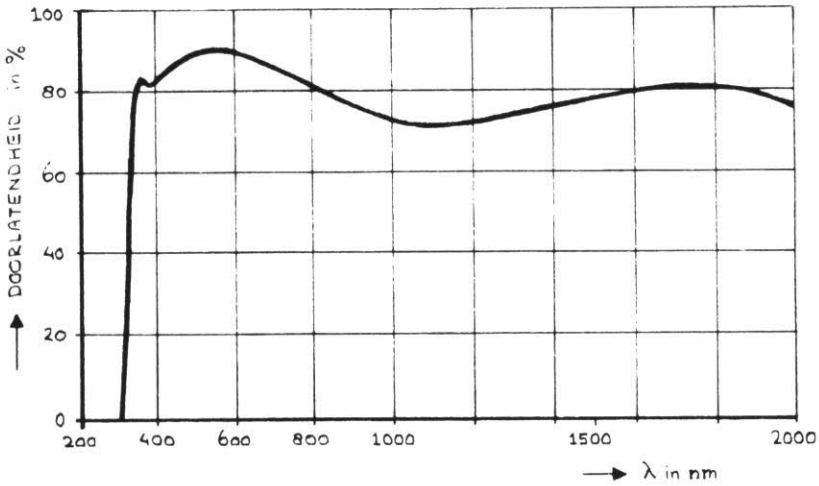
Tot nu toe hebben we in dit hoofdstuk gezien hoe straling *ontstaat* in een lichtbron. Belangrijk is natuurlijk ook wat er met de uitgezonden straling verder gebeurt, als deze door allerlei voorwerpen opgevangen wordt. Hoe komt het bijv. dat voorwerpen in een kamer allerlei kleuren vertonen, terwijl ze allemaal licht ontvangen van dezelfde lamp?
Om op zo'n vraag een antwoord te vinden, kunnen we uitgaan van de theorie over straling en atomen. Het uitzenden van straling door een atoom is duidelijk: bij een elektronensprong van een hoger naar een lager energieniveau ontstaat een foton. Nu het omgekeerde: we zien een foton naar een atoom toegaan en erin verdwijnen, terwijl een elektron overspringt naar een hoger energieniveau. Dit verschijnsel noemen we *absorptie* van straling. Net als bij het uitzenden van straling geldt bij absorptie dat de energie $h \cdot f$ van het foton gelijk moet zijn aan het energieverschil $E_m - E_n$ tussen de twee niveaus.

1.

Door absorptie van een foton gaat een atoom over naar een hoger energieniveau. Het atoom kan terugkeren naar het oorspronkelijke niveau door uitzending van precies zo'n foton als het geabsorbeerde. Is dit de enige mogelijkheid, of kan de terugval eventueel ook op een andere manier plaatsvinden?

absorptie in vaste stoffen

Bij een vaste stof hebben we te maken met heel veel energieniveaus heel dicht bij elkaar. Daardoor zijn in een vaste stof energiesprongen van allerlei groottes mogelijk, waarbij fotonen ontstaan met allerlei frekwenties. Omgekeerd kan een vaste stof dus ook fotonen van allerlei verschillende frekwenties absorberen. Dat wil nog niet zeggen dat ieder invallend foton ook werkelijk geabsorbeerd wordt. De meeste materialen kaatsen een flink deel van het opvallende licht terug, en sommige materialen laten een flink deel vrijwel ongehinderd doorgaan.



Doorlatendheid van 4 mm dik vensterglas als functie van de golflengte van de invallende straling. Een doorlatendheid van 60% betekent dat 60% van het invallende stralingsvermogen door het glas wordt doorgelaten.

2.
Een belangrijk voorbeeld is de absorptie in de ballon van een lamp: voor een zo hoog mogelijk lichtrendement moet de absorptie van de zichtbare straling zo klein mogelijk zijn.
In het diagram hiernaast is de doorlatendheid van normaal 4 mm dik vensterglas weergegeven als funktie van de golflengte.
a. Leid uit het diagram af hoe groot ongeveer de absorptiekans is voor fotonen in het zichtbare deel van het spectrum (dat wil zeggen: hoeveel % van de opvallende fotonen zullen door het genoemde glas geabsorbeerd worden)?
b. Leg uit dat in een dunnere laag glas (bijv. de ballon van een gloeilamp) de absorptiekans nog kleiner is.
c. Voor hoogtezonlampen is gewoon glas een ongeschikt materiaal. Aan welke eigenschap van glas is dat te wijten?

ABSORPTIE
Bij absorptie verdwijnt licht, maar het verdwijnt nooit spoorloos: met de energie van de fotonen moet iets gebeuren.
De meeste fotonen komen aan hun eind doordat hun energie wordt omgezet in trillingsenergie van de atomen in het absorberende materiaal. Daardoor stijgt de temperatuur van dat materiaal. Daarnaast kunnen fotonen in bepaalde materialen chemische veranderingen veroorzaken. In fotografisch materiaal bijv. veroorzaken fotonen de splitsing van zilverbromide in zilver en broom: een geabsorbeerd foton levert de energie om de chemische binding tussen een zilveratoom en een broomatoom te verbreken. Chemische veranderingen door lichtabsorptie zijn vooral belangrijk in de levende natuur. Planten gebruiken lichtenergie voor de opbouw van suikers en zetmeel uit koolstofdioxide en water. In het netvlies van de ogen van dieren en mensen veroorzaken geabsorbeerde fotonen tijdelijke chemische veranderingen, die zorgen voor elektrische signalen naar de hersenen.
In sommige materialen kan de energie van geabsorbeerde fotonen de bewegingsvrijheid van elektronen vergroten. Daardoor wordt zo'n materiaal een betere stroomgeleider. Meer daarover vind je in het thema 'Elektronica'.

In de meeste vaste stoffen kan licht nauwelijks doordringen: het wordt door de atomen aan het oppervlak al meteen geabsorbeerd of teruggekaatst. Is de absorptiekans voor alle fotonen in het zichtbare spectrum 100%, dan is het materiaal volkomen zwart. Wordt daarentegen 0% geabsorbeerd (dus alles teruggekaatst), dan is het materiaal volkomen wit. In de praktijk komen die uitersten niet voor.

absorptie en kleur
De kleur van de voorwerpen om ons heen is te danken aan iets wat je 'oneerlijke absorptie' zou kunnen noemen: absorptie waarbij de 'pakkans' voor fotonen met verschillende energie verschillend is. Bij een aantal spectra heb je gezien dat in het spectrum heldere en minder heldere lijnen aanwezig zijn. Er zijn dus kennelijk een aantal energiesprongen die relatief vaak optreden, waar een zekere voorkeur voor bestaat. Datzelfde geldt bij absorptie.
Absorbeert een voorwerp bijv. alle fotonen, behalve die uit het gele deel van het spectrum, dan ziet dat voorwerp er voor ons geel uit: we krijgen alleen het teruggekaatste gele licht in ons oog. Dat is echter niet de enige manier waarop de kleurindruk geel kan ontstaan. Als een voorwerp alleen het blauwe en violette deel van het spectrum absorbeert, dan is het teruggekaatste licht een mengsel van rood, oranje, geel en groen. Dat mengsel geeft in ons oog ook de kleurindruk geel.

De lichtbron is hierbij natuurlijk ook van belang: als in het spectrum van een lamp een bepaald golflengtegebied ontbreekt, dan ontbreekt dit ook in het teruggekaatste licht. Sommige voorwerpen zullen in het licht van zo'n lamp dus een andere kleurindruk geven dan bij belichting met een gloeilamp.
Een duidelijk voorbeeld daarvan zie je op wegen die verlicht worden met het geeloranje licht van lagedruk-natriumlampen: alle voorwerpen vertonen onder die belichting dezelfde kleur, en alleen de helderheid verschilt.

3.
Verklaar wat hiervoor gezegd is over kleur en helderheid onder natriumlicht. Gebruik in je verklaring de begrippen foton, absorptie, absorptiekans en teruggekaatsing.

hoofdstuk 7

MODERNE LICHTBRONNEN

inhoud blz.

7.1 gloeilampen 64
7.2 halogeengloeilampen 67
7.3 natriumlampen 68
7.4 hogedruk-kwiklampen 69
7.5 fluorescentielampen: TL en SL 71
7.6 lasers 73

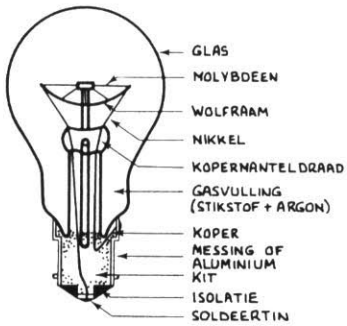
moderne lichtbronnen

In het vorige hoofdstuk hebben we ons verdiept in de natuurkundige principes van de lichtuitzending door gasontladingslampen en gloeilampen. Nu zullen we nagaan hoe die principes worden toegepast in de praktijk, bij de fabricage van diverse soorten lichtbronnen. Zoals zo vaak in de techniek gaat het hier om *optimalisering*: een zo goed mogelijke afweging van eisen, die deels tegenstrijdig zijn. Een hoger lichtrendement kan bijv. ten koste gaan van de levensduur van de lamp, of de prijs hoger maken.

ADVERTENTIE

De informatie in dit hoofdstuk is niet bedoeld als leerstof in die zin dat je allerlei bijzonderheden over de constructie van lichtbronnen zou moeten kennen. Wel moet je, uitgaande van de gegeven informatie, de vragen kunnen beantwoorden. Wat je in de vorige hoofdstukken geleerd hebt zal daarbij vaak nodig zijn.
De zes paragrafen van dit hoofdstuk kun je los van elkaar bestuderen. Wel wordt er soms verwezen naar een stukje uit een andere paragraaf.

7.1 GLOEILAMPEN



Doorsnede van de huidige gloeilamp.

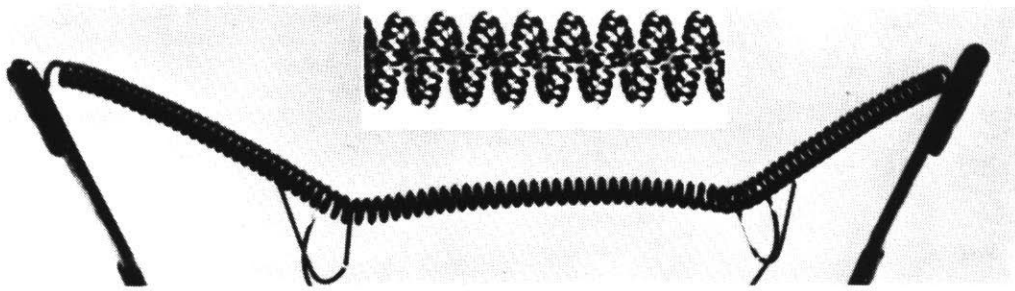
Het centrale probleem bij het ontwerpen van gloeilampen is dat verhoging van het lichtrendement ten koste gaat van de levensduur. Verhoging van het lichtrendement is namelijk alleen mogelijk door verhoging van de gloeitemperatuur; dat wil zeggen: door de atomen in de gloeidraad heviger te laten trillen (zie paragraaf 6.6). Maar naarmate de temperatuur hoger is, gaan er meer en meer atomen losschieten: de gloeidraad verdampt steeds sneller. In de tabel hieronder zie je de toename van het lichtrendement naast de afname van de levensduur.

Lichtrendement en levensduur van een gloeilamp met rechte wolfraamdraad, diameter 0,01 mm in vacuüm.

temperatuur (K)	lichtrendement (lm/W)	levensduur (h)
2000	2,9	$1{,}0 \cdot 10^2$
2200	5,7	$7{,}2 \cdot 10^4$
2400	9,8	$1{,}2 \cdot 10^3$
2600	15	39
2800	21	1,9
3000	28	0,15

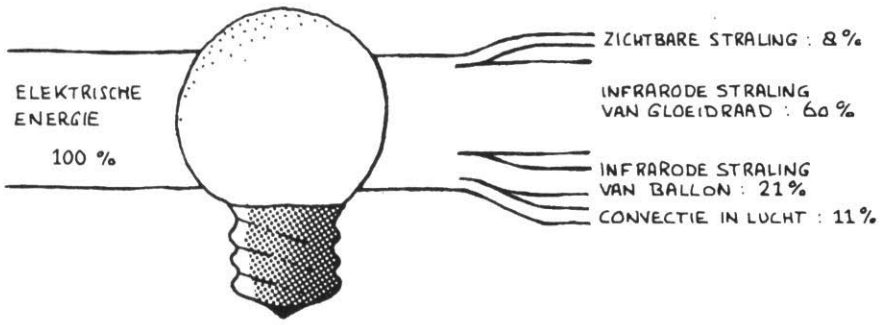
1.
Is de volgende bewering juist?
'Bij hogere temperatuur wordt het lichtrendement groter, doordat de gloeidraad meer zichtbaar licht en minder infrarood uitstraalt'.
Motiveer je antwoord.

de gasgevulde gloeilamp
Om de slijtage van de gloeidraad tegen te gaan, wordt bij veel typen gloeilampen de ballon gevuld met een gas: meestal argon. Losgeschoten wolfraamatomen lopen de kans om door botsingen met gasatomen teruggekaatst te worden naar de gloeidraad. Daardoor wordt de verdamping gedeeltelijk ongedaan gemaakt. En daardoor kan de gloeitemperatuur hoger worden gekozen dan bij een vacuümlamp. Een nadeel van de gasvulling is dat het gas warmte transporteert (vooral door stroming) van de gloeidraad naar de ballon. Onderzoek van dit transportproces leverde een mogelijkheid op om het energieverlies te beperken: het spiraliseren van de gloeidraad. De spiraal gedraagt zich als een korte dikke draad, die minder warmte aan de omgeving afstaat dan de oorspronkelijke draad.



Dubbel gespiraliseerde gloeidraad. In de inzet een stukje van de dubbelspiraal nog sterker vergroot.

2.
Uit een gloeiende wolfraamdraad ontsnappen voortdurend atomen. In een vacuümlamp vliegen deze atomen rechtdoor naar het glas, waar ze een zwart laagje vormen.
a. Dit proces voltrekt zich in een gasgevulde lamp langzamer. Leg uit waardoor de gasatomen het proces vertragen.
b. Wordt een gasgevulde lamp steeds in dezelfde stand gebruikt, dan vormt het zwarte laagje zich vooral boven de gloeidraad. Verklaar dit.



Energie-stroomdiagram van een gloeilamp.

3.
De figuur hiernaast is een energie-stroomdiagram voor een gangbaar soort gasgevulde gloeilamp van 75 W.
a. Welk proces wordt hier bedoeld met 'convectie'?
b. Pas enige tijd na het inschakelen wordt het in het diagram weergegeven 'evenwicht' tussen energieafvoer en energietoevoer bereikt. Waardoor duurt het even voor het evenwicht zich heeft ingesteld?
c. Wat zal er in het energie-stroomdiagram veranderen wanneer door verdamping van de gloeidraad een zwarte afzetting op het glas ontstaat?

weerstand, lengte en dikte van de gloeidraad

Op een gloeilamp worden gewoonlijk de bedrijfsspanning V en het bijbehorende vermogen P aangegeven. Daaruit kun je de stroomsterkte I berekenen en dus ook de weerstand R van de gloeidraad. De weerstand van de verbindingsdraden is in de praktijk te verwaarlozen.

4.
a. Controleer dat voor een 220 V/75 W gloeilamp geldt dat $R = 6{,}5 \cdot 10^2\ \Omega$.
b. Beredeneer dat de weerstand van een 220 V/25 W gloeilamp driemaal zo groot is als die van een 220 V/75 W lamp.

De weerstand R van een draad is afhankelijk van de lengte l, het oppervlak van de doorsnede A, het soort materiaal en de temperatuur. Voor draden van hetzelfde materiaal, bijv. wolfraam, en gelijke temperatuur geldt:
- *R is evenredig met l;*
- *R is omgekeerd evenredig met A.*

Naarmate het vermogen van een gloeilamp kleiner is, moet de weerstand van de gloeidraad groter zijn bij gegeven bedrijfsspanning. De eenvoudigste manier om een grotere weerstand te krijgen is: neem een langer stuk draad. Maar als je uitgaat van dezelfde gloeitemperatuur (vanwege het lichtrendement), zou die langere draad meer straling moeten uitzenden, terwijl het opgenomen vermogen juist kleiner is. Dat kan dus niet kloppen: de draad zal die hoge temperatuur niet bereiken. Het probleem is alleen op te lossen door voor de lamp met kleiner vermogen uit te gaan van een kleinere draaddikte. De kleinste dikte die in de praktijk wordt gebruikt bedraagt ongeveer 0,01 mm.

5.
Hoe komt het dat de gloeidraad van een lamp veel heter wordt dan de verbindingsdraden, waar toch dezelfde stroom door gaat?

6.
Bereken de weerstand van een 220 V/40 W lamp en ook die van een 12 V/40 W autolamp. Welk(e) verschil(len) verwacht je te zien als je de gloeidraden vergelijkt?

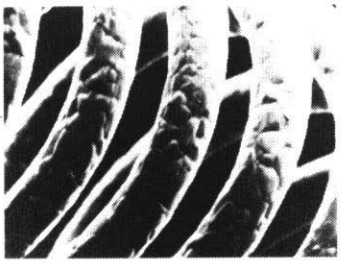
7.
De gloeidraad van een lamp wordt geleidelijk dunner door verdamping. Beredeneer dat hierdoor het vermogen van de lamp afneemt.

de levensduur

Gloeilampen voor verlichting in huis hebben een levensduur van ongeveer 1000 uur. Er zouden best lampen te maken zijn met een veel langere levensduur, maar het voordeel daarvan zou niet opwegen tegen het nadeel van een lager lichtrendement.
Om te weten of je zoveel mogelijk waar voor je geld krijgt, moet je letten op de verhouding tussen de geleverde hoeveelheid licht en de kosten, gerekend over de totale levensduur. De totale lichthoeveelheid vind je door de lichtstroom (in lumen) te vermenigvuldigen met de levensduur (in uur). De kosten bestaan uit de prijs van de lamp en die van de gebruikte energie.

8.
Voor drie typen 40 W gloeilampen A, B en C zijn gegevens vermeld in onderstaande tabel. Ga na welk type het voordeligst is, uitgaande van een aanschafprijs van *f* 1,50 en een elektriciteitstarief van 20 cent/kWh.

lamptype	gloeitemperatuur (K)	lichtrendement (lm/W)	levensduur (h)
A	2300	8	7000
B	2400	10	1200
C	2500	12,5	200



Opname van een gloeidraad, gemaakt met een elektronenmicroscoop. Onregelmatigheden in het oppervlak veroorzaken ongelijkmatige verdamping.

Dat de gloeidraad op den duur doorbrandt is eigenlijk niet vanzelfsprekend. De draad wordt door verdamping dunner, maar daardoor wordt de weerstand groter en het opgenomen vermogen kleiner. De gloeitemperatuur zou steeds lager worden en de verdamping zou sterk verminderen.
In de praktijk gebeurt echter de verdamping niet gelijkmatig. Er is altijd wel een stukje draad een beetje dunner dan de rest. Dit dunne stukje wordt extra heet, waardoor het extra snel verdampt, zodat het nog dunner en nog heter wordt enz.

9.
Door een dunner stukje van een gloeidraad gaat dezelfde stroom als door de dikkere delen van de draad. Verklaar dat toch het dunnere gedeelte een hogere temperatuur krijgt.

7.2 HALOGEENGLOEILAMPEN

Omstreeks 1960 kwam een nieuw type gloeilamp in de handel, dat zijn bijzondere eigenschappen ontleende aan de toevoeging van jodium aan de gasvulling. Tegenwoordig wordt ook wel broom gebruikt, dat evenals jodium behoort tot de chemische groep van de *halogenen*.
Tot dan toe werd de gasvulling alleen toegepast om losgeraakte wolfraamatomen door botsingen met gasatomen terug te laten keren naar de gloeidraad (zie paragraaf 7.1 tot aan vraag 2). Hierdoor wordt de verdamping van de gloeidraad maar gedeeltelijk ongedaan gemaakt. Op den duur slaat steeds meer wolfraam op het glas neer, waardoor de stroomsterkte afneemt en daarmee de gloeitemperatuur. Dat gaat ten koste van de lichtstroom. En er is altijd wel een dunner stukje van de gloeidraad, dat heter wordt dan zijn omgeving, daardoor sneller verdampt en na verloop van tijd doorsmelt.

het principe: de wolfraamkringloop
Door toevoeging van jodium en een klein beetje zuurstof aan de gasvulling wordt het verdampingsprobleem grotendeels opgelost. Er treedt namelijk een chemische reactie op met het op de ballonwand neergeslagen wolfraam volgens de vergelijking:
$W + O_2 + I_2 \rightarrow W O_2 I_2$.
De gevormde verbinding, wolfraamoxyjodide, is gasvormig: de moleculen blijven dus in de ballon rondzwerven. Komen ze in de buurt van de hete gloeidraad, dan doen ze iets heel nuttigs: ze splitsen zich in wolfraam, zuurstof en jodium. De vrijgekomen wolfraamatomen kunnen zo terugkeren op de gloeidraad.
Het middel zou natuurlijk erger zijn dan de kwaal, wanneer in de perioden dat de lamp uit is de gloeidraad sterk zou worden aangetast. Maar de vorming van wolfraamoxyjodide gebeurt bij kamertemperatuur uiterst langzaam.

1.
Geef een korte beschrijving (zonder reactievergelijking) van de wolfraamkringloop in een halogeenlamp.

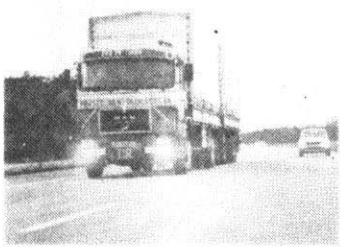
2.
Bij een gewone gloeilamp neemt de lichtstroom af naarmate de lamp langer in gebruik is, bij een halogeenlamp niet. Geef twee oorzaken aan voor dit verschil.

3.
Ook al keert er in een halogeenlamp evenveel wolfraam terug naar de gloeidraad als er weggaat, toch zal de draad op den duur doorsmelten. Verklaar dit.

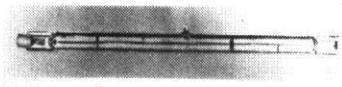
praktische uitvoering

Halogeenlampen worden veel kleiner gemaakt dan gloeilampen met hetzelfde vermogen. Ze mogen kleiner zijn, omdat er geen zwarting van de ballon optreedt. Ze moeten ook kleiner zijn, omdat ze een hoge wandtemperatuur moeten hebben – anders zou het neergeslagen wolfraam zich niet snel genoeg verbinden met het halogeen. De hoge wandtemperatuur (omstreeks 800 K) heeft tot gevolg dat gewoon glas niet geschikt is: het zou te zacht worden. Men gebruikt kwartsglas, dat pas bij ongeveer 1500 K week wordt.

De voordelen van de wolfraamkringloop worden in de praktijk niet zozeer gebruikt voor verlenging van de levensduur als wel voor verhoging van de gloeitemperatuur: halogeenlampen geven meer en witter licht dan gewone gloeilampen met gelijk vermogen.



Halogeenlampen worden veel gebruikt bij auto's.



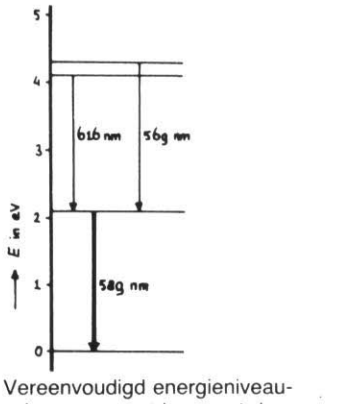
Halogeenlampen voor verlichting van bijv. sportvelden. De 2000 W uitvoering van dit type is 34 cm lang, levert een lichtstroom van 44000 lm en heeft een levensduur van 2000 uur.

4.
a. Waarom moet bij een halogeenlamp de wandtemperatuur hoog zijn?
b. Hoe komt het dat een kleine ballon, bij gegeven vermogen, heter wordt dan een grote ballon?
c. Waarom is bij gewone gloeilampen de onvermijdelijke zwarting een reden om de ballon niet te klein te maken?

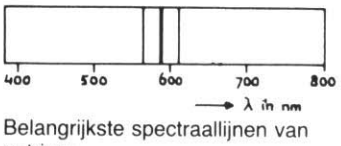
5.
Om welke redenen worden voor verlichting in huis niet vaak halogeenlampen ('minispots') gebruikt?

6.
Halogeenlampen in filmprojectoren hebben vaak een levensduur van ongeveer 100 uur. Om welke redenen neemt men voor deze toepassing genoegen met een zo korte levensduur?

7.3 NATRIUMLAMPEN



Vereenvoudigd energieniveauschema van natrium, met de belangrijkste overgangen.



Belangrijkste spectraallijnen van natrium.

De eerste natriumlampen (omstreeks 1930) hadden met 50 lm/W al een hoger lichtrendement dan alle andere lichtbronnen. Sindsdien is hun voorsprong nog flink vergroot. Waarom natrium zo geschikt is voor een hoog rendement kun je zien aan het energieniveau-schema. Het laagste aangeslagen niveau ligt bij 2,1 eV; bij terugval naar de grondtoestand ontstaat licht met golflengte 589 nm, waarvoor ons oog behoorlijk gevoelig is.

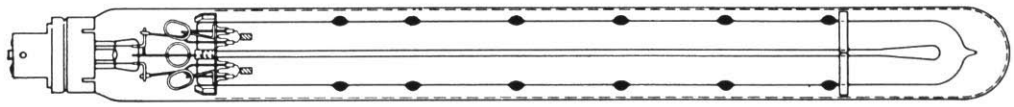
1.
Controleer door berekening dat bij een fotonenergie van 2,1 eV een golflengte hoort van 589 nm.

2.
Waarom is het belangrijk dat het 2,1 eV niveau het *laagste* aangeslagen niveau is?

Voor toepassingen waar lichtrendement hoofdzaak is en kleurweergave onbelangrijk, zoals voor de verlichting van autowegen, ontwerpt men lampen die voornamelijk de geeloranje straling van 589 nm uitzenden. Sinds 1970 zijn ook natriumlampen op de markt die werken bij hogere temperatuur en druk. Het voordeel van die hogedruklampen is een wat betere kleurweergave doordat de straling van 589 nm minder overheerst. Het lichtrendement is daarbij nog steeds groot – 100 à 130 lm/W – maar wel een stuk kleiner dan bij de lagedruklamp, die meer dan 180 lm/W kan leveren.

de lagedruk-natriumlamp

Een natriumlamp moet na het ontsteken nog flink wat opgewarmd worden om het natrium te laten smelten en verdampen. De opwarming zou kunnen gebeuren door botsingen van vrije elektronen met natriumatomen, maar de kans op zulke botsingen is in het begin klein. Daarom bevat de buis behalve natrium ook neon. Dit gas wordt door



Doorsnede van een moderne natriumlamp. De donkere vlekken in de ontladingsbuis stellen vrij natrium voor, dat in koude toestand in de uitstulpingen van de buis gecondenseerd is. De stippellijn aan de binnenzijde van de mantel is het reflectiefilter, dat de infrarode straling naar de ontladingsbuis terugkaatst.

botsende elektronen opgewarmd en zorgt voor de verdamping van het natrium. Het laagste aanslagniveau van neon is 16,6 eV; botsingen van elektronen met minder dan 16,6 eV aan energie kunnen het neonatoom niet aanslaan en leveren alleen winst aan kinetische energie op. Is de buis eenmaal op temperatuur, dan leveren de elektronen vooral energie aan de natriumatomen. Zodra immers een elektron door het elektrische veld in de buis versneld is tot een energie boven 2,1 eV, loopt het een flinke kans zijn energie grotendeels kwijt te raken door een natriumatoom in aangeslagen toestand te brengen. Omdat de ontladingsbuis een groot oppervlak heeft en omdat de bedrijfstemperatuur vrij hoog is (ongeveer 540 K), is een goede warmte-isolatie belangrijk. Energieverlies door geleiding en convectie wordt tegengegaan door om de ontladingsbuis een vacuüm gepompte buitenbuis aan te brengen. De voornaamste verliespost is dan de infrarode straling van de hete ontladingsbuis. Sinds 1970 wordt dit verlies gereduceerd door de binnenkant van de omhullende buis te voorzien van een laagje indiumoxyde, dat een flink deel van de infrarode straling terugkaatst. Vermindering van de energie-afgifte door uitstraling van infrarood betekent dat er ook minder toevoer van elektrische energie nodig is.

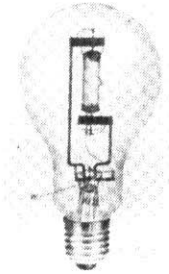
3.
Waarom moet de hierboven afgebeelde natriumlamp in horizontale stand gebruikt worden?

4.
In de eerste minuten na het ontsteken van een natriumlamp neemt de lichtstroom toe, terwijl de kleur verandert van rood naar geeloranje. Verklaar dit.

5.
Het reflectiefilter moet de infrarode straling zoveel mogelijk terugkaatsen. Welke andere eis moet je er ook aan stellen?

6.
Hoe ziet een rood-wit-blauwe vlag er uit onder natriumlicht?

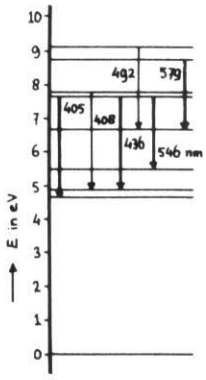
7.4 HOGEDRUK-KWIKLAMPEN



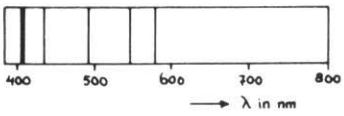
Hogedruk-kwiklamp uit 1950. De buitenballon is hier helder gelaten om het binnenwerk te laten zien.

Vóór 1930 werden kwiklampen voornamelijk toegepast als bron van ultraviolette straling, bijv. als *hoogtezon* voor medisch gebruik. Omdat gewoon glas het bruikbaarste deel van het ultraviolette spectrum absorbeert, is kwarts het aangewezen materiaal voor de ontladingsbuis. Omstreeks 1930 kwamen de eerste kwiklampen voor straatverlichting op de markt. Ze waren door hun blauwwitte kleur duidelijk te onderscheiden van gloeilampen. Het lichtrendement was met 30 lm/W aanzienlijk hoger dan dat van gloeilampen, maar de kleurweergave was veel slechter.

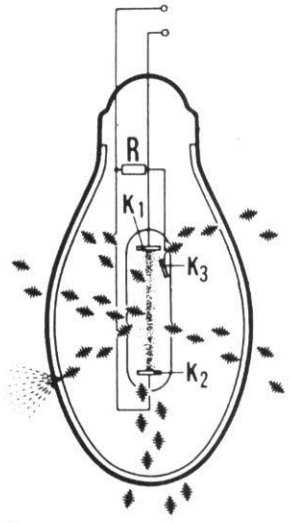
Uit het energieniveau-schema van het kwikatoom volgt dat de laagste aangeslagen toestanden bij terugval naar de grondtoestand ultraviolette straling moet opleveren.



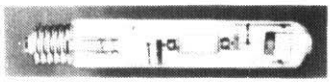
Vereenvoudigd energieniveau-schema van kwik, met de belangrijkste overgangen in het zichtbare spectrum.



Belangrijkste spectraallijnen van kwik in het zichtbare spectrum.



Doorsnede van een hogedruk-kwiklamp met fluorescerende ballon.



Superhogedruk-kwikjodidelamp. De 1000 W uitvoering van dit type is 38 cm lang en heeft een lichtrendement van 90 lm/W.

Voor de produktie van zichtbaar licht moeten hogere niveaus worden aangeslagen. De omstandigheden daarvoor blijken het gunstigst in kwikdamp met hoge temperatuur en hoge druk (1 bar en hoger). Een belangrijke verbetering van het lichtrendement werd bereikt door de beschermende ballon aan de binnenkant te voorzien van een laagje fluorescerend materiaal.

1.
In het energieniveau-schema hiernaast zijn de overgangen van de laagste aangeslagen niveaus – 4,7 en 4,9 eV – naar de grondtoestand niet getekend. Toon door berekening aan dat deze overgangen ultraviolette straling opleveren.

2.
De fluorescerende laag moet een zo groot mogelijk deel van de ultraviolette straling omzetten in zichtbaar licht. Is dit de enige eis die je eraan zou stellen of zijn er meer?

het starten

Bij het inschakelen van de lamp ontstaat een elektrisch veld in het gasontladingsbuisje. Dit veld is sterker naarmate de spanning tussen de elektroden groter is en de afstand tussen de elektroden kleiner. Dat veld alleen is nog niet voldoende – er zijn ook geladen deeltjes nodig en die zijn er nog niet. Hier komt de natuur te hulp: door straling van radioactief materiaal of door kosmische straling worden altijd wel enkele kwikatomen geïoniseerd. De vrijgekomen elektronen worden door het elektrische veld versneld; sommige elektronen kunnen genoeg energie aan kwikatomen overdragen om deze te ioniseren, zodat nieuwe elektronen vrijkomen. Ook door botsingen van elektronen of ionen op de elektroden van de buis kunnen elektronen losgeslagen worden.

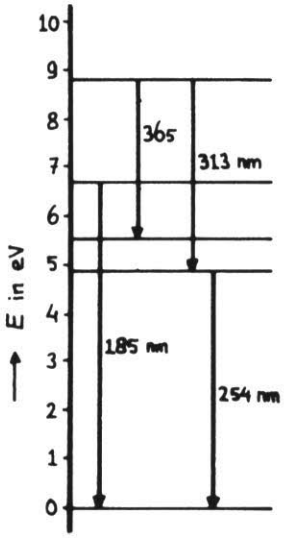
3.
In de figuur hiernaast is K_3 een hulpelektrode, die dienst doet bij het starten. Er ontstaat eerst een gasontlading tussen K_1 en K_3 en daarna pas tussen K_1 en K_2.
a. Verklaar dat de gasontlading begint tussen K_3 en K_1, en niet tussen K_2 en K_1.
b. Zodra de gasontlading tussen K_3 en K_1 gestart is, loopt er stroom door de weerstand R. Dan is er dus ook een spanning tussen de aansluitpunten van R; de totale spanning wordt verdeeld in een spanning over R en een spanning tussen K_1 en K_3.
Welke invloed heeft deze spanningsverdeling op de gasontlading tussen K_1 en K_3.

4.
Waarvan hangt het af hoeveel energie een elektron krijgt voordat het met een kwikatoom botst?

variaties

In *superhogedruk-kwiklampen* worden drukken toegepast van 10 bar en hoger; de temperatuur in het centrum van de gasontlading kan boven 5000 K liggen. Het lichtrendement is hoger en de kleur is witter dan bij minder hoge druk. Een andere manier om witter licht te krijgen is een gloeidraad in serie te schakelen met het gasontladingsbuisje. De gloeidraad van zo'n *menglichtlamp* zorgt er tevens voor dat de stroom in het gasontladingsbuisje niet te hoog oploopt. *Stroombegrenzing* is bij gasontladingslampen altijd nodig, omdat na het starten steeds meer vrije ladingsdragers – ionen en elektronen – gevormd worden, waardoor de weerstand afneemt.
Een grote verbetering in lichtrendement (tot 70 à 100 lm/W) werd omstreeks 1970 bereikt met de *kwikjodidelamp*. Daarin wordt gebruik gemaakt van jodiumverbindingen als natriumjodide, telluurjodide en indiumjodide. Deze verbindingen ontleden bij hoge temperatuur en de losse atomen natrium, telluur en indium gaan de hoofdrol spelen in het lichtuitzendingsproces. Deze atomen laten zich gemakkelijker aanslaan dan de kwik- en jodiumatomen en hun straling ligt grotendeels in het zichtbare gebied. Het mengsel wordt zo gekozen dat de kleuren elkaar aanvullen: natrium geeft vooral geeloranje licht, telluur zorgt voor groen en indium voor blauw.

7.5 FLUORESCENTIELAMPEN: TL EN SL



Vereenvoudigde energieniveauschema van kwik met de belangrijkste overgangen in het ultraviolet.

Het licht van *fluorescentielampen* is voor het grootste deel niet rechtstreeks afkomstig van de gasontlading, maar indirect: door omzetting van ultraviolet in zichtbaar licht. Dit lijkt een omslachtige methode om licht te maken, maar ze wordt sinds 1940 met toenemen succes – zowel wat betreft lichtrendement als kleurweergave – toegepast. Bij een fluorescentielamp moet een groot deel van de elektrische energie omgezet worden in ultraviolette straling. Dat lukt goed met kwikdamp van lage druk, dankzij het feit dat het kwikatoom zijn laagste aanslagniveaus heeft bij 4,7 en 4,9 eV. Daarna moet een groot deel van de ultraviolet-fotonen worden ingeruild voor fotonen in het zichtbare gebied. Voor dit doel zijn diverse fluorescerende stoffen ontwikkeld.

1.
Controleer door berekening dat bij de terugval van het 4,9 eV niveau naar de grondtoestand ultraviolette straling ontstaat.

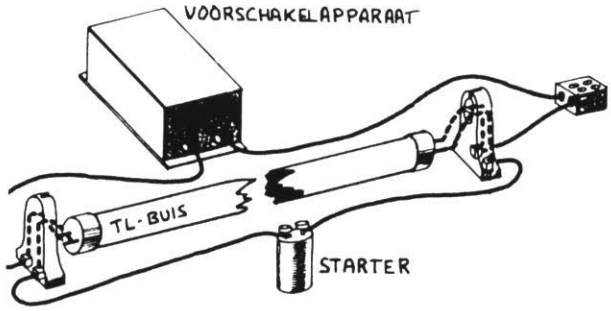
2.
Kan de absorptie van een ultraviolet foton door een fluorescerende stof ook *twee* nieuwe fotonen opleveren in het zichtbare gebied?

de TL-buis

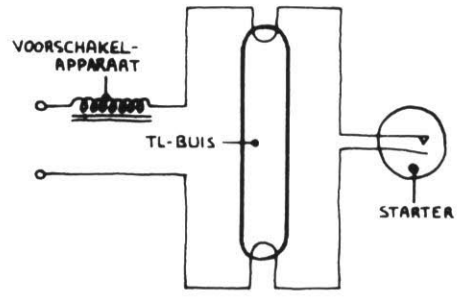
Bij het inschakelen van een TL-buis wordt de gasontlading op gang gebracht door elektronen, die door verhitting van de elektroden vrijkomen en die door het (wisselende) elektrische veld tussen de elektroden versneld worden. Zodra een elektron een energie heeft boven 4,7 eV kan het een kwikatoom aanslaan; boven 10,4 eV kan het een kwikatoom ioniseren. Bereikt een elektron de positieve elektrode, dan wordt zijn energie omgezet in warmte of gebruikt om elektronen uit de elektrode los te slaan.
Door de toename van het aantal ladingsdragers – ionen en vrije elektronen – wordt de weerstand van de buis kleiner. Om te voorkomen dat de stroomsterkte te hoog oploopt, wordt een *voorschakelapparaat* in serie met de lamp geschakeld. Een eenvoudige weerstand is hiervoor niet geschikt, omdat daarin veel elektrische energie verloren zou gaan door omzetting in warmte. Efficiënter is het gebruik van een *inductiespoel* of een *condensator*.

Om de kans op 'productieve' botsingen van elektronen met kwikatomen te vergroten (de kwikdamp is erg ijl), wordt argon toegepast als stootgas. *Door botsingen met argonatomen verandert telkens de bewegingsrichting van een elektron, waardoor het een langere weg aflegt.*

De starter: een neonbuisje met elektroden van bimetaal.



Schakeling van een TL-buis.



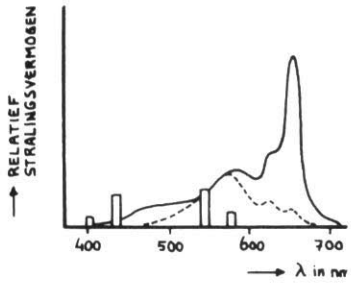
Schakelschema van een TL-buis.

Bij het starten van de buis worden de elektroden even flink verhit om elektronen vrij te maken. Daarvoor dient een speciale schakeling: een neonbuisje staat als *starter* parallel aan de TL-buis. Bij het inschakelen van de netspanning ontstaat tussen de elektroden van het neonbuisje een gasontlading. De elektroden zijn van bimetaal en door de temperatuurstijging trekken ze zodanig krom dat ze contact maken. Deze 'kortsluiting' veroorzaakt een sterke stroom, die via de elektroden van de TL-buis loopt en deze elektroden verhit, zodat er elektronen uit ontsnappen. Daardoor start de gasontlading in de buis. Het voorschakelapparaat zorgt ervoor dat de spanning over de buis beperkt wordt tot ongeveer 80 V. Die spanning is te laag om het neonbuisje opnieuw te laten starten, wanneer het zover is afgekoeld dat de bimetaal-elektroden zijn rechtgetrokken. (Tijdens de kortsluiting is de weerstand zo klein, dat de stroom nauwelijks warmte produceert.)

3.
Waardoor trekt een strook bimetaal krom bij temperatuurstijging, in plaats van gewoon een beetje uit te zetten?

4.
Tussen welke grenzen moet de ontsteekspanning van het neonbuisje liggen?

5.
Een TL-lamp van 40 W werkt bij een spanning van 80 V tussen de elektroden.
a. Hoe groot is de stroomsterkte in de buis en hoe groot is de weerstand?
b. Als je een gewone weerstand als voorschakelapparaat zou gebruiken bij aansluiting op 220 V netspanning, hoe groot zou die weerstand dan moeten zijn?
c. Hoeveel vermogen zou in dit geval verloren gaan in het voorschakelapparaat?

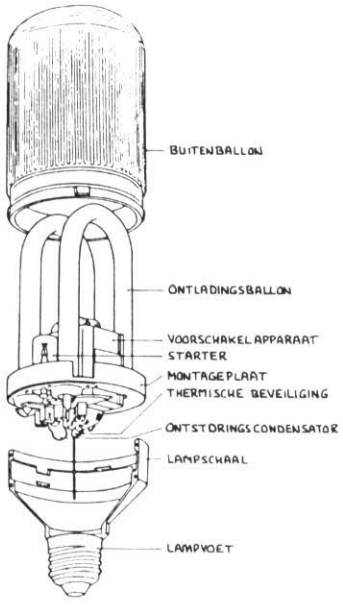


Spectrale energieverdeling van een 'warmwitte' TL-buis. De gestippelde lijn geeft de lichtverdeling na correctie voor de spectrale ooggevoeligheid.

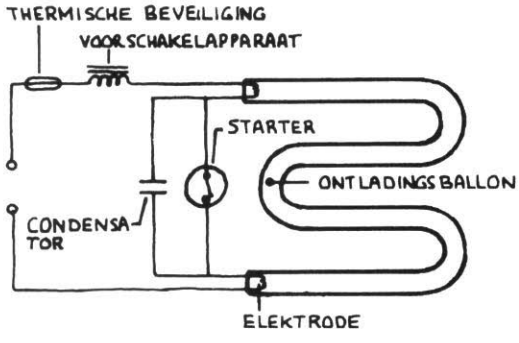
spectrum en lichtrendement
TL-buizen worden geleverd in verschillende tinten; het verschil in spectrum ligt aan de keus van de fluorescerende stoffen, de zogenaamde *fosforen*. Lange tijd ging de keus vooral tussen 'standaard' TL-buizen met een hoog lichtrendement (80 lm/W) en 'de luxe' TL-buizen met een betere kleurweergave, maar een lager lichtrendement (50 lm/W).
Voor een goede kleurweergave is een continu spectrum niet nodig. Met een goede combinatie van gebiedjes in het rood, groen en blauw lukt het ook, en na 1970 is het daarmee gelukt een goede kleurweergave te bereiken bij een lichtrendement van 80 lm/W.
De nieuwe smalle-bandfosforen waren ook belangrijk bij de ontwikkeling van de SL-lampen, die na 1980 op de markt zijn gekomen.

6.
Welke factoren moeten tegen elkaar afgewogen worden bij de keuze van de meest geschikte dikte van de fluorescerende laag?

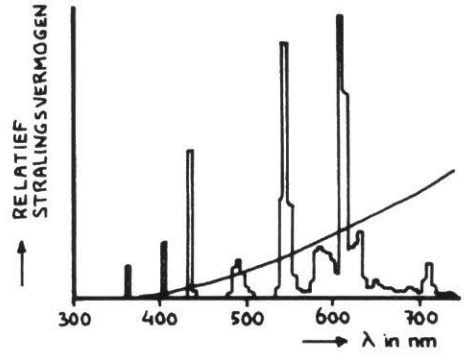
de SL-lamp
Een SL-lamp bestaat uit een gasontladingsbuis, die met het voorschakelapparaat en de starter in één huis is ondergebracht. Door de compacte bouw wordt de temperatuur in de buis ongeveer 370 K. Een probleem was dat bij die temperatuur de kwikdampdruk te hoog is voor een optimaal lichtrendement. De oplossing daarvoor is gevonden in het gebruik van bepaalde amalgamen (mengsels van kwik met andere metalen). Door de temperatuurstijging na het starten komt uit die amalgamen steeds meer kwikdamp vrij.
De SL-lamp is ontworpen als vervanger voor gloeilampen, maar hij is groter en zwaarder en bovendien veel duurder. Tegenover deze nadelen staat een viermaal zo hoog lichtrendement en een minstens vijfmaal zo lange levensduur.



SL-lamp. Het voorschakelapparaat, de starter en de dubbelgevouwen gasontladingsbuis zijn ondergebracht in één ballon. De totale lengte van de Sl•18 lamp is 17 cm.



Elektrisch schema van een SL-lamp.



Spectrale energieverdeling van een SL•18 lamp (staafdiagram) en van een 75 W gloeilamp (vloeiende lijn).

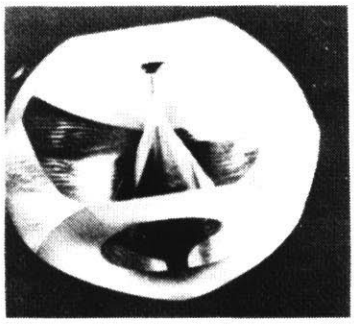
7.
Hoe komt het dat een SL-lamp niet meteen op volle sterkte brandt?

8.
In een SL-lamp wordt ongeveer 15% van de gebruikte elektrische energie omgezet in zichtbaar licht. In het voorschakelapparaat gaat zo'n 20% verloren, aan elektrodenverhitting 15%, aan verliezen in de gasontlading 25% en aan verliezen in de fluorescentielaag 25%.

a. Door welk proces wordt de elektrodenverhitting veroorzaakt (afgezien van de kortstondige verhitting bij het starten)?
b. Welk(e) proces(sen) veroorzaken verliezen in de gasontlading?

7.6 LASERS

Enkele toepassingen van lasers:
- *operaties aan het netvlies;*
- *verwijdering van huidkanker;*
- *boren van heel kleine gaatjes;*
- *meten van kleine verplaatsingen, bijv. bij stuwdammen;*
- *holografie, een soort driedimensionale fotografie;*
- *aftasten van geluids- en videoplaten (compact-disc);*
- *bepaalde wapensystemen;*
- *communicatie via glasvezels;*
- *allerlei wetenschappelijk onderzoek.*

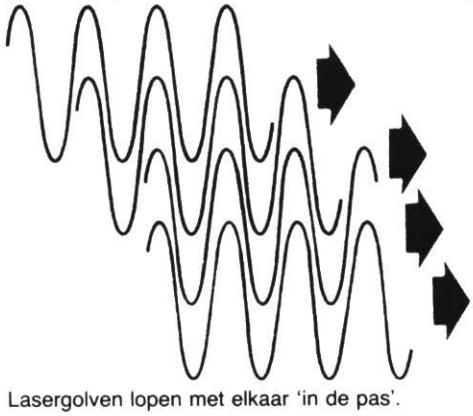


Vergroot model van een treksteen voor de fabricage van dunne metaaldraden, bijv. voor gloeilampen. Laserstralen zijn zeer geschikt om in zulke stenen (diamanten) gaatjes te boren van de juiste vorm.

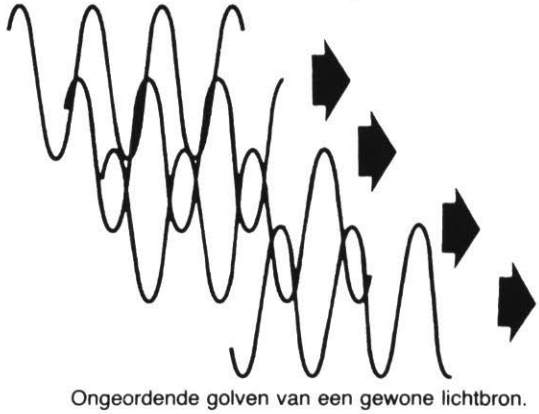
Lasers vormen een bijzondere soort lichtbronnen. Ze dienen niet voor verlichting, maar voor allerlei toepassingen waarbij smalle lichtbundels van hoge intensiteit nodig zijn. Belangrijk is ook dat het licht monochromatisch is (dat wil zeggen: van één enkele golflengte).

het principe: gestimuleerde emissie
Om te begrijpen hoe een laser werkt, moeten we de theorie over lichtuitzending door afzonderlijke atomen nog wat uitbreiden. De twee belangrijke aanvullingen zijn:
– een atoom kan in bepaalde aangeslagen toestanden betrekkelijk lang onveranderd blijven; we spreken dan van een *metastabiel* energieniveau;
– lichtuitzending door een aangeslagen atoom gebeurt niet altijd spontaan (dat wil zeggen: zonder invloed van buitenaf): er is ook *gestimuleerde emissie* mogelijk, namelijk door fotonen van de passende golflengte (het langskomen van zo'n foton werkt als het ware aanstekelijk).

Een laser werkt in grote lijnen als volgt. In een geschikt materiaal – gas, vloeistof of vaste stof – wordt een groot aantal atomen op een metastabiel energieniveau gebracht. De energie daarvoor wordt geleverd door botsende elektronen of door straling. Na een tijdje zal hier of daar zo'n aangeslagen atoom spontaan een foton uitzenden. Passeert dit foton een ander metastabiel atoom, dan wordt dit atoom gestimuleerd tot het uitzenden van net zo'n foton. De twee fotonen samen stimuleren weer andere atomen enz., zodat een lawine van fotonen kan ontstaan.
Een belangrijke bijzonderheid hierbij is, dat de fotonen met elkaar 'in de pas lopen': golfberg naast golfberg en golfdal naast golfdal. Om zoveel mogelijk atomen te stimuleren tot lichtuitzending laat men het licht in een laser heen en weer lopen tussen twee spiegels. Eén van de twee spiegels is enigszins doorlatend; daar komt het licht de laser uit. De afstand tussen de spiegels moet heel nauwkeurig een geheel aantal golflengten groot zijn, anders zouden de fotonen bij het heen en weer lopen uit de pas raken.



Lasergolven lopen met elkaar 'in de pas'.



Ongeordende golven van een gewone lichtbron.

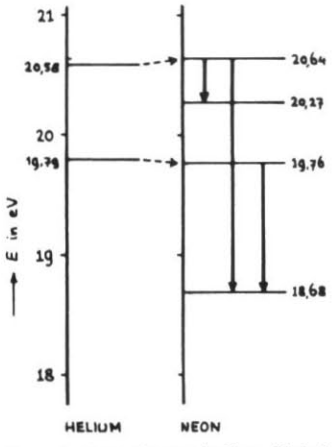
1.
LASER betekent: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Wat is hier bedoeld met 'stimulated emission'? En wat met 'light amplification'?

2.
Waarom is kijken in de lichtbundel van een laser gevaarlijker voor je oog dan kijken in een gewone lamp?

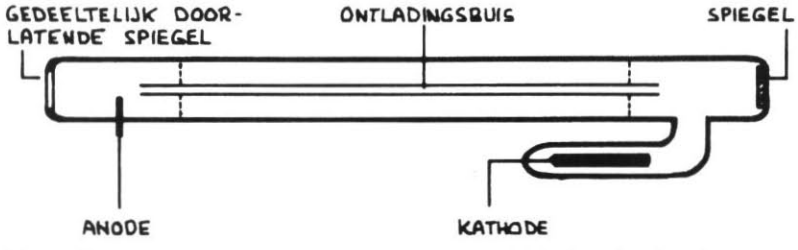
de helium-neonlaser

Voor schoolproeven wordt meestal een gaslaser gebruikt met een mengsel van helium en neon (ongeveer 5 : 1). Net als in gewone gasontladingsbuizen worden hier atomen aangeslagen door versnelde elektronen. Van belang voor de laserwerking zijn de volgende omstandigheden:

- het heliumatoom heeft twee metastabiele niveaus bij 19,79 en 20,58 eV;
- het neonatoom heeft twee metastabiele niveaus – 19,76 en 20,64 eV – vlak bij die van het heliumatoom;
- door het kleine energieverschil kunnen heliumatomen bij botsingen hun aanslagenergie overdragen aan neonatomen;
- de neonatomen kunnen terugvallen naar de niveaus 20,27 en 18,68 eV en vandaar verder omlaag.



Energieniveau's van helium (links) en neon (rechts), die belangrijk zijn voor de laserwerking.



Eenvoudige gaslaser; de lengte is 25 cm. De spiegel links is enigszins doorlatend.

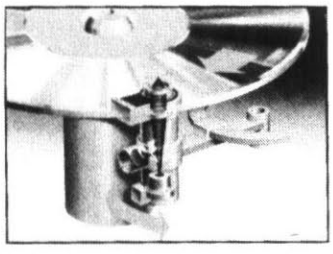
Op deze manier zijn drie lasergolflengten beschikbaar, waarvan één in het zichtbare gebied. Door de afstand tussen de spiegels geschikt te kiezen zorgt men ervoor dat de zichtbare straling (met een golflengte van 633 nm) zo goed mogelijk versterkt wordt.

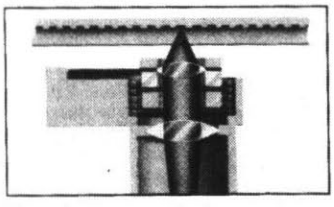
3.
Ga na bij welke overgang de golflengte van 633 nm hoort.

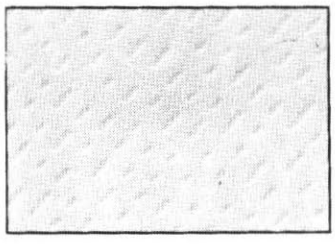
4.
Aan welke voorwaarde moet de afstand tussen de spiegels voldoen?

vaste-stoflasers

De ontwikkeling van lasers begon in 1960 met de robijnlaser. Robijn is gekristalliseerd aluminiumoxyde met een kleine hoeveelheid chroomoxyde. Een robijnlaser werkt met een cilindrisch staafje robijn van ongeveer 10 cm lengte, waarin de chroomionen naar een metastabiel niveau worden 'gepompt' door licht van een flitslamp. Daarna zenden de verspreide chroomionen door laserwerking een korte, felle licht'puls' uit.
Continu werkende vaste-stoflasers zijn te maken van halfgeleidende materialen (waarover meer in het thema 'Elektronica'). Dit type levert de dunne lichtbundel die gebruikt wordt voor het aftasten van de 'compact disc', de modernste geluids- en beeldplaat.



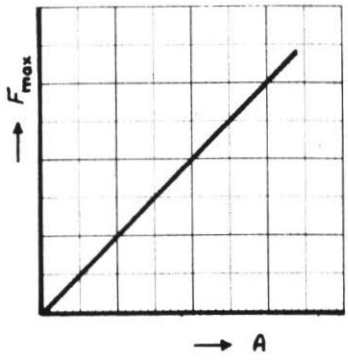

Het principe van de Compact-disc: de laserstraal tast de op het plaatje vastgelegde informatie af.


Het oppervlak van de speelkant van de compact-disc, ongeveer 12500× vergroot. In de 'putjes' van uiteenlopende lengte liggen de instructies opgeslagen om onder andere geluid te reconstrueren, de snelheid van de aandrijving te regelen en de laser te sturen.

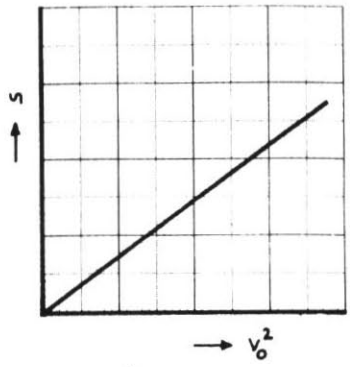
bijlage

OMGEKEERDE EVENREDIGHEDEN

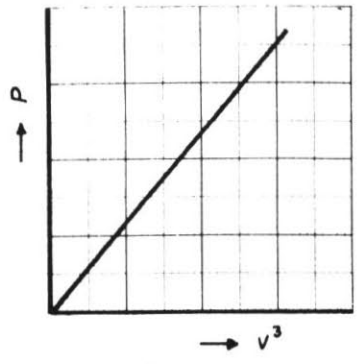
In voorgaande thema's ben je vaak verbanden tussen grootheden tegengekomen, die je kon omschrijven met het woord *evenredig*.
In het thema 'Vergelijken' bijv. was het verband tussen de maximale trekkracht F_{max} op een draad *recht evenredig* met de draaddoorsnede A.
In het thema 'Verkeer' bijv. was het verband tussen de remweg s en de beginsnelheid v_0 een *kwadratische evenredigheid*. Met andere woorden: s is recht evenredig met v_0^2.
En voor het verband tussen het aerodynamisch vermogen P_{ae} en de snelheid v bleek te gelden: P_{ae} is recht evenredig met v^3.



$F_{max} = c \cdot A$



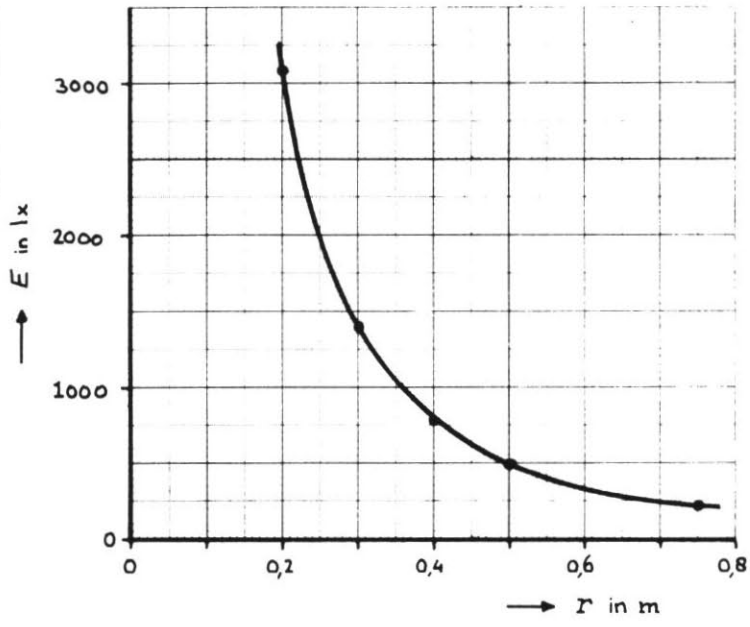
$s = c \cdot v_0^2$



$P_{ae} = c \cdot v^3$

De overeenkomst in al deze gevallen is dat naarmate de ene grootheid groter wordt, de andere *ook* groter wordt. In het thema 'Muziek' ben je al eens een andersoortig verband tegengekomen: het geluidsniveau van een geluidbron neemt in het open veld *af* naarmate de afstand tot de geluidsbron *groter* wordt. Naarmate de ene grootheid groter wordt, neemt de andere dus af.
Ook bij lichtbronnen vind je een dergelijk verband: de verlichtingssterkte op een werkvlak neemt af, naarmate de afstand tussen werkvlak en (puntvormige) lichtbron groter wordt. Resultaten van die metingen zie je in de onderstaande tabel (als voorbeeld). Het diagram van deze metingen levert een dalende kromme lijn op voor het verband tussen verlichtingssterkte E en afstand r.

E in lx	r in m
3100	0,20
1400	0,30
780	0,40
500	0,50
220	0,75



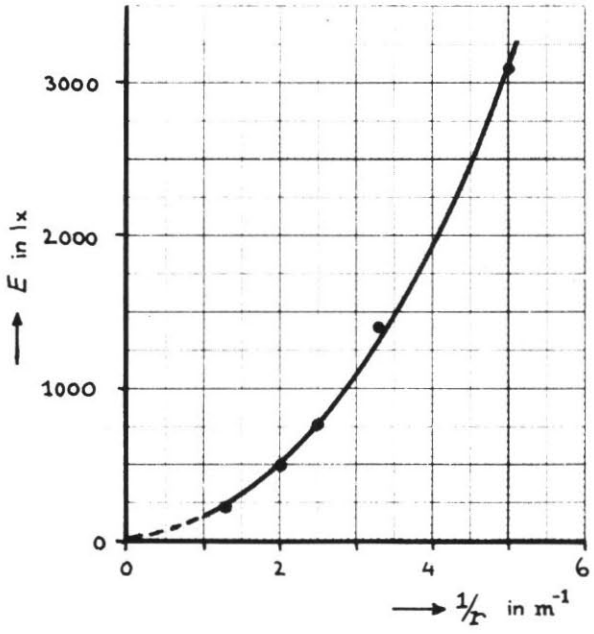
Als je naar het diagram kijkt en daarbij de wiskundelessen in je geheugen terugroept, moet de *vorm* van de lijn je bekend voorkomen. Het zou best wel eens een hyperbolische functie kunnen zijn: $y \cdot x = c$ of $y = c/x$.
Je kunt dat niet zeker weten: het diagram *lijkt* er wel op, maar misschien is de kromming te scherp of te flauw. Er is een methode om dat te controleren.

Laten we eens aannemen dat er inderdaad een hyperbolisch verband bestaat tussen E en r. In dat geval geldt (vergelijk maar met de wiskundige uitdrukkingen $y \cdot x = c$ of $y = c/x$):

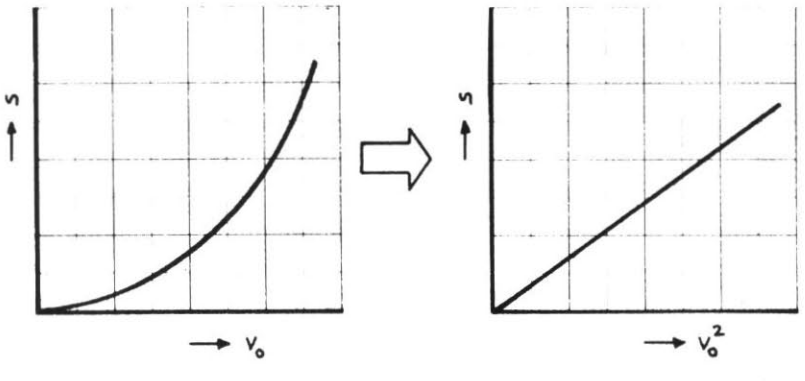
$$E \cdot r = c \text{ of } E = \frac{c}{r} \text{ of } E = c \cdot \frac{1}{r}$$

Volgens de laatste manier van schrijven moet E recht evenredig zijn met $1/r$. Dat kun je controleren door in een diagram E en $1/r$ tegen elkaar uit te zetten: het verband tussen E en $1/r$ moet in een diagram een rechte lijn door de oorsprong opleveren.
Je berekent dus bij elke waarde van r de waarde van $1/r$. Daarna tekenen we een diagram waarin E en $1/r$ tegen elkaar zijn uitgezet. De tabel en het diagram vind je hieronder.

E in lx	r in m	$1/r$ in m^{-1}
3100	0,20	5,0
1400	0,30	3,3
780	0,40	2,5
500	0,50	2,0
220	0,75	1,3



Het resultaat valt wat tegen. We vinden geen rechte lijn door de oorsprong. Onze veronderstelling is dus onjuist. Maar we hebben wel iets gevonden wat we herkennen uit het thema 'Verkeer'. Het diagram hierboven lijkt sterk op het diagram waarin remafstand s en beginsnelheid v_0 tegen elkaar zijn uitgezet. En dat bleek uiteindelijk een *kwadratische* evenredigheid: s is recht evenredig met v_0^2.



We kunnen dus nu een nieuwe veronderstelling maken over het verband tussen E en r:

$E \cdot r^2 = c$ of $E = \frac{c}{r^2}$

Met andere woorden: E is recht evenredig met $1/r^2$.

1.

a. Controleer deze nieuwe veronderstelling over het verband tussen E en r met een diagram.

b. Welke conclusie trek je uit dit nieuwe diagram over het verband tussen E en r?

De nieuwe veronderstelling blijkt juist te zijn: de verlichtingssterke E is recht evenredig met $1/r^2$. Ofwel: E is recht evenredig met het *omgekeerde* van r^2. Een dergelijk verband noemen we een *omgekeerde evenredigheid.* Dus: E is *omgekeerd evenredig* met r^2.

2.

a. Geef aan hoe je uit een tabel met meetresultaten kunt zien dat er waarschijnlijk sprake is van een omgekeerde evenredigheid voor het verband tussen twee grootheden.

b. Maakt het iets uit wèlke van de twee grootheden je 'omkeert' (dus: van welke grootheid je de omgekeerde waarden berekent) voor de controle van die veronderstelling met een diagram?

3.

Hiernaast zie je een tabel met gemeten verlichtingssterkten op verschillende afstanden van de as van een TL-buis. Bepaal het verband tussen verlichtingssterkte E en afstand r.

E in lx	r in m
10000	0,10
5000	0,20
3300	0,30
2500	0,40
2000	0,50
1300	0,75

INDEX

aangeslagen toestand 52
absorptie 62
armatuur 21
atoommodel van Bohr 52

beeldafstand 32
brandpuntsafstand 32
breking 12
buiging 27

constante van Planck 53

direct licht 21

elektron
  (gebonden –) 50
  (vrij –) 50
elektronensprong 53
energieniveau 56
  (metastabiel –) 73
energieniveau-schema 56

fluorescentie 46
fluorescentielamp 47, 71
foto-elektrisch effect 55
foton 54
  (hard –) 54
  (zacht –) 54

gasontladingslamp 7
gasvulling 65
gestimuleerde emissie 73
gloeilamp 6, 65
golfmodel 26
golfstraal 27
grensfrekwentie 55
grensgolflengte 55
grondtoestand 52

halogeenlamp 67
hogedruk-kwiklamp 69

indirect licht 21
infraroodstraling 29
interferentie 26
  (–maximum) 28
  (–minimum) 28

laser 73
lawine-effect 47
lenzenformule 32
lichtboog 6
lichtrendement 15
lichtsnelheid 29
lichtstroom 15
lumen 15
lux 19
luxmeter 19

monochromatisch licht 31

natriumlamp 68

orde (van interferentiemaxima) 31

prisma 12

relatief stralingsvermogen 33
relatieve spectrale ooggevoeligheid 14
ruimteverlichting 22

SL-lamp 72
spectrum 12
  (continu –) 41
  (lijnen–) 47
spreidhoek 21
starter 71
stralingsdetector 33
stroombegrenzing 70, 71

TL-buis 71
tralie 30
tralieconstante 31
traliespectroscoop 12

ultravioletstraling 29

verlichtingssterkte 18
voorschakelapparaat 71
voorwerpsafstand 32

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
H.P. Hooymayers, lector natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gammavakken CITO
F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
M. Sjamaar (sedert 1982), rector Niels Stensen College te Utrecht
A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
R. de Vries (sedert 1980), leraar natuurkunde havo/vwo, namens de NVON
E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep PLON havo-bovenbouw

G. Buisman (sedert 1978), leraar natuurkunde hts
P.G. Hogenbirk (1981-1982), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Holl (1982-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
J. de Jong (sedert 1983), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Maarschall (1978-1981), leraar natuurkunde hts
H. Poorthuis (1978-1981), leraar natuurkunde havo-top pedagogische academie
J. Scherrenburg (sedert 1978), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
W.J.G. Schraven (1978-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
M. van Woerkom (sedert 1982), leraar natuurkunde havo/vwo

PLON-team havo-bovenbouw

H.M.C. Eijkelhof (sedert 1981)
R. van Eyck (1981-1982)
A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
F.L. Gravenberch (1978-1983)
P.G. Hogenbirk (1981-1983)
E. Holl (sedert 1983)
T. Jörg (sedert 1982)
W.H. Kamphuis (sedert 1978)
P.T. Kloek (sedert 1983)
J. Kortland (sedert 1982)
P.L. Lijnse, Rijks Universiteit Utrecht
F.A. v.d. Loo, Rijks Universiteit Utrecht
B. Pelupessy (sedert 1978)
T. Römgens (1979-1981)
P. Verhagen (sedert 1983)
H. Vermeulen (1981-1983)
R.F.A. Wierstra (sedert 1978)

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
R. Lindeman (1977-1980)
M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
N. Rotteveel (sedert 1982)
A.G. Schwering (1980-1982)
B. Schillert (sedert 1980)
H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

A. Lurvink (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)
H. de Waal (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
P. Broekman
C. Hellingman
T. Heuvelmans
H. Vonken

Proefscholen 1983-1984

Ashram College te Alphen a/d Rijn
S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
Chr. S.G. Revius te Deventer
S.G. Oost Betuwe te Bemmel
Hertog Jan College te Valkenswaard
Marnix College te Ede
Niels Stensen College te Utrecht
Eemland College Noord te Amersfoort
Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
S.G. Huizermaat te Huizen
Chr. Lyceum en Havo te Veenendaal

Overzicht van PLON-thema's voor havo-bovenbouw

VOOR DE 4e KLAS

- Vergelijken
- Weersveranderingen
- Muziek
- Verkeer
- Elektrische Machines
- Energie en Kwaliteit

VOOR DE 5e KLAS

- Materie
- Lichtbronnen
- Ioniserende Straling
- Elektronica

- Repeteerthema

Tevens zijn beschikbaar:

- docentenhandleidingen (AVOL's) en apparatuurgidsen bij elk thema