

Dr. Ir. J. BERGMANS



**HET ZIEN  
VAN KLEUREN**

Dr. Ir. J. BERGMANS

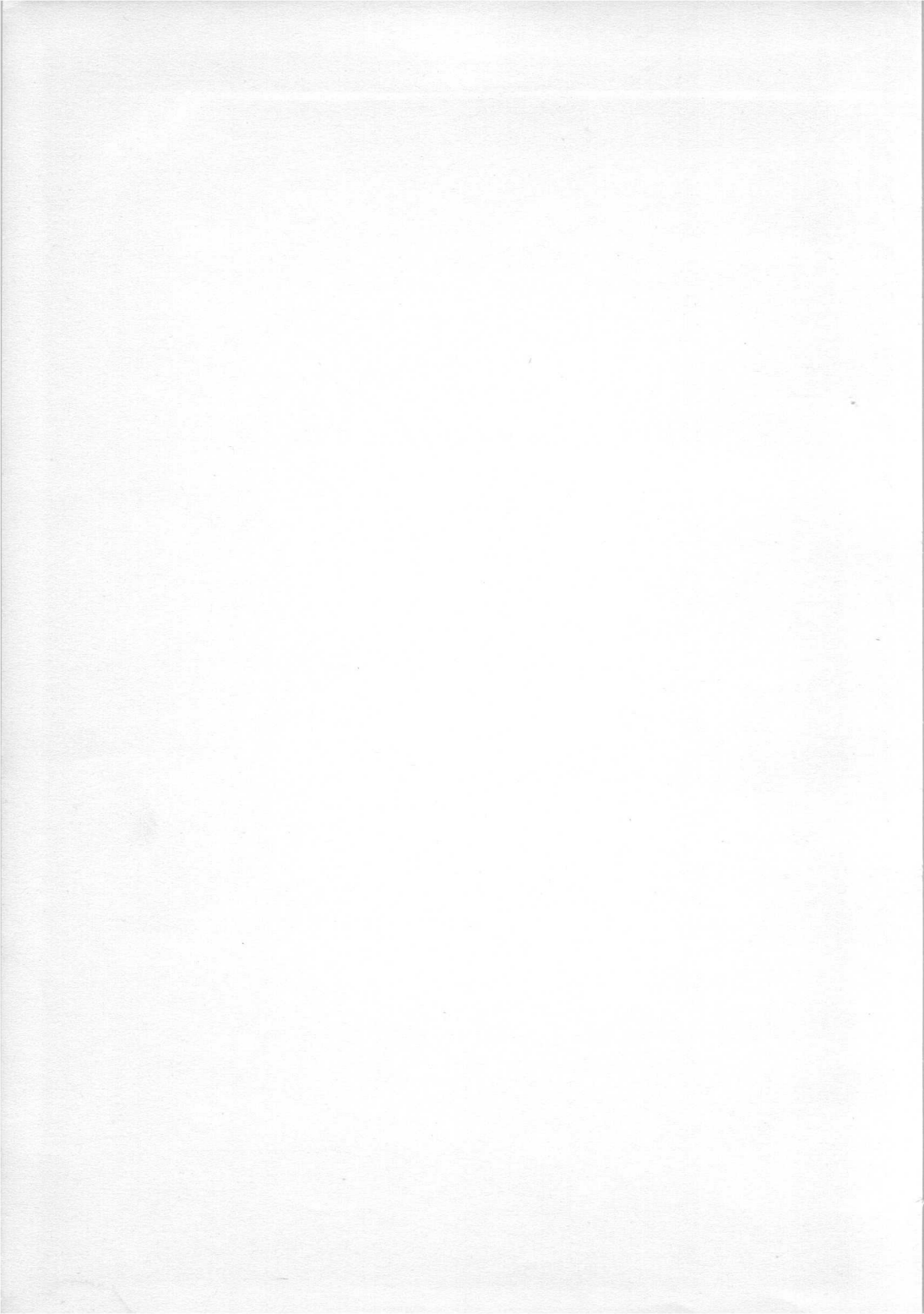
HET ZIEN VAN KLEUREN



POPULAIRE REEKS

PHILIPS' TECHNISCHE BIBLIOTHEEK

HET ZIEN VAN KLEUREN



A. G. v. Capelle

---

# HET ZIEN VAN KLEUREN

DOOR

Dr. Ir. J. BERGMANS

1959

PHILIPS' TECHNISCHE BIBLIOTHEEK

*Mededeling van de uitgever:*

Dit boek wordt uitgegeven in het Nederlands, Duits, Engels en Frans

Dit boek bevat 87 pagina's, 23 figuren en 2 kleurenplaten.  
U.D.C. nr. 535.6

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken - Eindhoven (Nederland). 1959

Nadruk, ook gedeeltelijk, verboden.

Gedrukt in Nederland.

Alle in dit boek opgenomen gegevens zijn medegedeeld zonder octrooigarantie van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven.

## WOORD VOORAF

Op de middelbare scholen, welke de basis vormen voor de algemene ontwikkeling, worden heden ten dage vele onderwerpen gedoceerd, die tientallen jaren geleden totaal niet tot een onderdeel van de algemene ontwikkeling gerekend konden worden.

In die jaren waren deze onderwerpen namelijk het studieterrein van enkele geleerden, verspreid over verschillende landen, die in hun publicaties en hun onderlinge correspondentie in een door hen zelf gevormde taal hun gedachten bekend maakten.

Toen later de behoefte werd gevoeld om bijv. de grondbeginselen van de Chemie en de Natuurkunde tot een onderdeel van de algemene ontwikkeling te maken, heeft men het resultaat van de jarenlange studie van de geleerden in een bepaalde eenvoudige, echter toch wetenschappelijk verantwoorde, vorm gebracht en aan het lesrooster van de middelbare school toegevoegd. Bepaalde voorstelingswijzen, die de geleerden in de aanvang van hun studie gebruikt hadden, konden worden weggelaten, omdat de nieuwere inzichten de mogelijkheid gaven om het eenvoudiger en juister te zeggen.

## WOORD VOORAF

Door de jarenlange inspanning van de docenten van de middelbare scholen is nu bij de verschillende cultuurvolken de toestand zo, dat een belangrijk percentage van het volk een behoorlijk begrip heeft van de grondbeginselen van de Chemie en de Natuurkunde.

Wat betreft het probleem van het kleuren-zien, hebben we het stadium van de discussie tussen de betrokken geleerden in zoverre achter de rug, dat er reeds belangrijke internationale afspraken over normalisatie gemaakt konden worden. Men kan echter niet zeggen, dat het tot de algemene ontwikkeling behoort iets van de kleurendriehoek te weten; op het lesrooster van de middelbare school komt dit onderwerp dan ook niet voor.

Persoonlijk ben ik met het kleurenprobleem in aanraking gekomen doordat ik, als werktuigbouwkundig ingenieur, in mijn praktijk veel met licht te maken kreeg. Alhoewel ik in diezelfde praktijk ook de gelegenheid had om door zelfstudie de lacunes in mijn kennis aan te vullen, heeft het toch vele jaren geduurd voordat ik in dit onderwerp wegwijs was.

Het grootste struikelblok hierbij waren de z.g. standaardkleuren, waarvan gezegd werd, dat men een grote vrijheid had om ze zelf te kiezen, en dat men dan in staat was om uit deze standaardkleuren alle andere kleuren samen te stellen. Het heeft lang geduurd voor ik inzag, dat deze standaardkleuren slechts voor het laboratoriumwerk hun betekenis hebben, maar dat ze onmogelijk kunnen dienen om het inzicht in het kleurenprobleem te bevorderen.

Omdat een klein boek over een onderwerp waarover men pleegt grote boeken te schrijven, extra problemen stelt, heb ik het buitengewoon op prijs gesteld, dat ik Dr. A. A.

## WOORD VOORAF

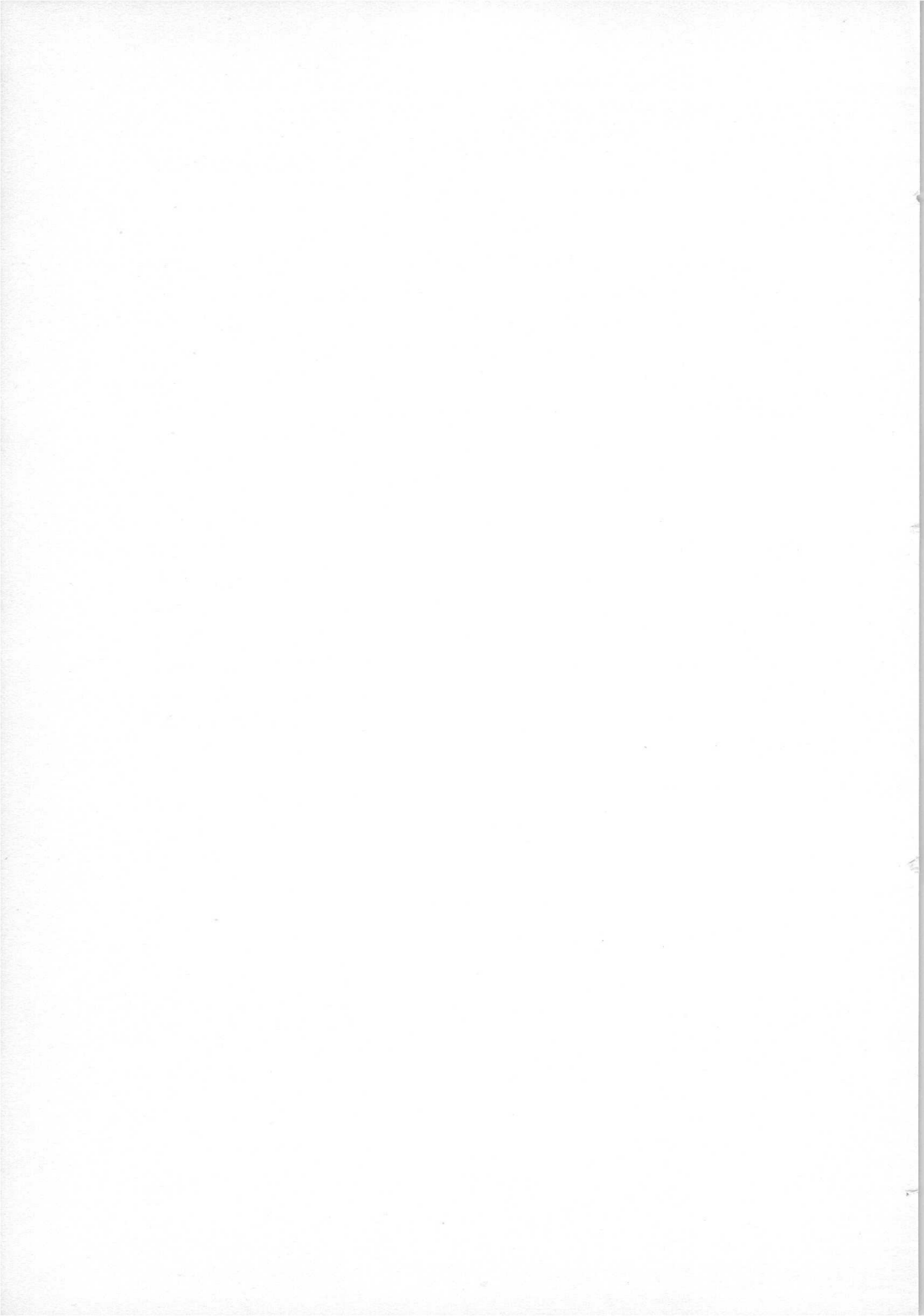
Kruithof altijd bereid gevonden heb om met mij deze moeilijkheden te bespreken. Tevens dank ik de heren R. Swierstra en Ir. P. L. Walraven voor hun waardevolle opmerkingen, die ik in de tekst heb kunnen verwerken, en de heren F. J. Gerritsen, A. B. de Graaff, C. P. Fritzius en W. A. K. de Schrevel voor hun hulp bij de proeven in het laboratorium en bij het reproducieren van de gevonden resultaten op het kleurenblad.

Het zou voor allen die aan de totstandkoming van dit boekje hebben medegewerkt een grote voldoening zijn, dat leraren van middelbare scholen de inhoud ervan aan de leerlingen bekend maakten, ook zonder dat de eind-exameneisen hen hiertoe dwingen. Dit zou een eerste stap kunnen zijn om de kennis van de menselijke gezichtszin een onderdeel te doen worden van de algemene ontwikkeling.

Dr. Ir. J. BERGMANS

Mei 1959





## INHOUDSOPGAVE

|   |    |
|---|----|
| Woord vooraf .....  | V  |
| Inleiding .....   | 1  |
| Hoofdstuk I.     WAT IS KLEUR? .....  | 5  |
| Hoofdstuk II.    DE NATUURKUNDIGE EIGEN-<br>SCHAPPEN VAN HET LICHT .....                            | 8  |
| De spectrale verdeling van de energie<br>van temperatuurstralers .....                              | 10 |
| De spectrale verdeling van de energie<br>van gasontladingslampen .....                              | 17 |
| De reflectie en doorlating van het licht<br>door voorwerpen die zelf geen licht-<br>bron zijn ..... | 20 |
| Het mengen van lichtsoorten .....   | 26 |
| Hoofdstuk III.   DE GEZICHTSZIN .....   | 32 |
| Het vormen-zien .....   | 32 |
| Het kleuren-zien .....  | 33 |
| Hoofdstuk IV.   KLEURENDRIEHOEKEN .....   | 39 |

## INHOUDSOPGAVE

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Hoofdstuk V.    | DE KLEURENDRIEHOEK VOLGENS<br>HET X-Y-Z-SYSTEEM VAN DE C.I.E.                                    | 44 |
| Hoofdstuk VI.   | HET WITPUNT, EIGENSCHAPPEN<br>VAN DE SPECTRUMKROMME EN<br>COMPLEMENTAIRE LICHT-<br>SOORTEN ..... | 55 |
| Hoofdstuk VII.  | KLEURTEMPERATUUR VAN<br>LICHTBRONNEN .....   | 59 |
| Hoofdstuk VIII. | DOMINERENDE GOLFLENGTEN EN<br>VERZADIGINGSGRAAD .....  | 62 |
| Hoofdstuk IX.   | KLEURWEERGAVE .....  | 66 |
| Hoofdstuk X.    | KLEURWEERGAVE VAN DE WARM-<br>WIT DE LUXE „TL“ LAMP<br>(KLEUR 32) .....                          | 75 |
| Hoofdstuk XI.   | DEMONSTRATIE VAN KLEUR-<br>WEERGAVE .....  | 78 |

## INLEIDING

Over het probleem van het kleuren-zien zijn de laatste jaren verscheidene boeken geschreven (zie \*) pag. 4). Ook in de Philips' Technische Bibliotheek verscheen reeds het boek Kleuren en Kleurindrukken van wijlen Dr. P. J. Bouma, dat beoordeeld wordt als een der beste werken op dit gebied.

Toch menen wij, dat het zin heeft over dit probleem een boek van kleiner formaat uit te geven. Hiervoor willen we de volgende redenen noemen:

- a) De materie is zo uitgebreid en de verschillende werken op dit gebied hebben een dergelijke omvang, dat we vrezen dat maar weinigen de tijd kunnen vinden om ze grondig door te werken.
- b) Alhoewel het probleem van het kleuren-zien een van de fysiologische studie-onderwerpen is waaraan nog voortdurend wordt gewerkt en bijvoorbeeld de *werkelijke* rood-, groen- en blauwgevoeligheden van het oog nog steeds niet wetenschappelijk vast liggen, is er toch zoveel bekend en tot een goed sluitend geheel bij elkaar gevoegd, dat de tijd rijp is om de kennis van een en ander in grote kring te verspreiden.

## INLEIDING

- c) De kleur plegen we te beschouwen als een essentiële eigenschap van een voorwerp. Toch blijkt het soms, dat twee lichtbronnen die op een wit opvangscherm dezelfde kleur teweeg brengen, de kleur van een voorwerp geheel verschillend weergeven. We spreken daarom van „kleurweergave” en bedoelen dan een eigenschap van het licht. Omdat hoe langer hoe meer “TL” lampen in de woningen worden geïnstalleerd, gaat deze kleurweergave een steeds grotere rol spelen in de praktijk van het dagelijks leven. Het is daarom nodig, dat alle mensen die deze lampen gebruiken of overwegen ze te gaan gebruiken, georiënteerd worden over dit, op het eerste gezicht, wonderlijke verschijnsel.

Ons doel is daarom in kort bestek een afgeronde beschouwing te geven over het probleem van het kleurenzien.

We zouden deze beschouwing willen vergelijken met de aardrijkskundeles, zoals die wordt gegeven aan de leerlingen van de middelbare school. De leraar geeft de leerlingen door middel van kaarten, die vele gegevens, ook van geologische aard, bevatten, een inzicht in de vorm en de betekenis van de landen, zonder er diep op in te gaan hoe men tot het samenstellen van deze kaarten is gekomen. De eigenlijke studievakken: landmeetkunde en geologie, zonder welke deze kaarten nooit hadden kunnen worden gemaakt, worden praktisch niet besproken. Het gaat er immers slechts om, dat de leerlingen de gegevens die ze nodig hebben voor hun verdere leven en voor de reizen die ze zullen maken, in hun onderling verband kunnen zien en in zich opnemen. Daarvoor moeten ze veel van de gegevens die op de kaarten staan, uit hun hoofd leren, maar het

is vooral belangrijk dat ze de kaart „leren lezen“.

Ook voor de kleuren bestaat er zo'n kaart. Ongeacht de verdere studie van de specialisten over de kleurgevoeligheid van de menselijke gezichtszin (zie wat we hierboven onder b) schreven), is immers in 1931 op het Congres van de Commission Internationale de l'Eclairage een internationaal systeem van kleuraanduiding officieel aanvaard. Dit systeem, aangeduid als „C.I.E.-kleurendriehoek“, waarbij de aanduiding van de kleuren geschiedt in de „coördinaten x, y en z van de C.I.E.“, is nu reeds 25 jaar officieel in gebruik. Het blijkt goed met de werkelijkheid te kloppen en is zeer praktisch.

We zullen dus ons betoog over de menselijke gezichtszin baseren op deze kleurendriehoek, als op de „landkaart“, die voor de les onmisbaar is. Men zal deze moeten leren lezen, zodat men er ook mee werken kan. Slechts dan is men in staat om zich een oordeel te vormen over de nieuwe lichtbronnen en hun mogelijkheden, en kan men mededenken en -spreken over hun toepassingen.

Bij het schrijven hebben we er rekening mee gehouden, dat een deel van ons lezerspubliek terugschrikt voor grafische voorstellingen, terwijl een ander deel daar juist om vraagt. Om het gehele lezerspubliek te dienen, hebben we in de hoofdttekst grafische voorstellingen vermeden; echter hebben we op alle plaatsen waar ons dit wenselijk voorkwam, delen ingelast, waarin het voorafgaande nog eens herhaald en verduidelijkt wordt aan de hand van grafische voorstellingen. *Deze delen, die we hebben aangegeven door aan het begin van iedere alinea een sterretje te plaatsen, geven dus niets nieuws;* voor het volgen van de hoofdttekst zijn deze delen dan ook niet nodig. We

## INLEIDING

menen echter, dat diegenen onder onze lezers die aan het gebruik van grafische voorstellingen gewend zijn, ze zullen appreciëren.

Voor één grafische voorstelling hebben we een uitzondering moeten maken. Dat is de kleurendriehoek zelf. Zonder landkaart geen aardrijkskunde, zonder kleurendriehoek geen behandeling van het probleem van het kleurenzien. De kleurendriehoek is dus de *enige* grafische voorstelling die bij de hoofdtekst hoort.

- \*) 1. A. C. Hardy, Handbook of Colorimetry. The Technology Press M.I.T., Cambridge, Massachusetts, 1936.
2. M. Richter, Grundriss der Farbenlehre der Gegenwart, Theodor Steinkopff Verlag, Dresden, Leipzig, 1e Auflage 1940; 2e Auflage in Vorbereitung.
3. R. M. Evans, An Introduction to Color, John Wiley and Sons, New York, Chapman and Hall Ltd., London, 1948.
4. Yves Le Grand, Lumière et Couleurs, Optique Physiologique, Tome II, Editions de la „Revue d'Optique“, Paris, 1949.
5. D. B. Judd, Color in Business, Science and Industry, J. Wiley and Sons, New York, Chapman and Hall Ltd., London, 1952.
6. H. D. Murray, Colour in Theory and Practice, Chapman and Hall, London, 1952.
7. R. W. G. Hunt, The Reproduction of Colour, The Fountain Press, London, 1957.
8. Yves Le Grand, Light, Colour and Vision, (approved translation by R. W. G. Hunt, J. W. T. Walsh, and F. R. W. Hunt), Chapman and Hall Ltd., London, 1957.
9. W. D. Wright, The Measurement of Colour, Hilger and Watts Ltd., London, 1958.

### WAT IS KLEUR?

Als de menselijke gezichtszin niet de eigenschap bezat om onderscheid te maken tussen verschillende lichtsoorten, zouden we niet kunnen spreken van een begrip „kleur“.

De kleurindruk die onze gezichtszin van een bepaalde lichtsoort krijgt, is dus het uitgangspunt van onze studie over kleuren.

Het probleem wordt gecompliceerd, doordat lichtsoorten die dezelfde kleurindruk teweegbrengen, in hun natuurkundige samenstelling sterk kunnen verschillen, met andere woorden: wat we als dezelfde kleur zien, behoeft niet dezelfde lichtstraling te zijn.

Is het nu zo, dat slechts één van de soorten lichtstraling die dezelfde kleurindruk geven, als de „echte“ lichtstraling van die kleurindruk is te kwalificeren, en dat we de andere „nabootsing“ moeten noemen? Dit is beslist niet het geval: alle lichtsoorten die een bepaalde kleurindruk geven, zijn even echt. Zij bootsen dus geen van alle iets na en hebben alle dezelfde aanspraak op de officiële benaming die de kleurindruk in de C.I.E.-kleurendriehoek heeft gekregen.

Toch gebruikten we in punt c) van de inleiding reeds het



## H. I. WAT IS KLEUR?

woord „kleurweergave“, en ook spreekt men van een „onjuiste“, „verkeerde“, „onnatuurlijke“ kleurweergave. Daar wordt dus wel een discriminatie gemaakt en gesuggereerd dat slechts één kleurweergave de „echte“ zou zijn.

We kunnen dit niet begrijpen zonder scherp onderscheid te maken tussen twee begrippen, die in het dagelijks leven beide „kleur“ worden genoemd. Deze zijn:

- a) De kleurindruk die de menselijke gezichtszin van een bepaalde lichtsoort krijgt. Onze gezichtszin kent aan een lichtsoort een bepaalde eigenschap toe: de „*kleur*“. De vraag komt direct naar voren: is er tussen de ogen van verschillende personen niet zo'n groot onderscheid, dat het onmogelijk is te spreken van de menselijke gezichtszin? Door de onderzoekingen van de laatste decenia is gebleken dat, afgezien van bepaalde individuele afwijkingen (vormen van kleurenblindheid), er een grote overeenstemming bestaat tussen de ogen van de mensen, -als ze onder dezelfde omstandigheden worden getest. Deze overeenstemming is zo groot, dat het mogelijk was hierop de standaardisatie van de C.I.E.-kleurendriehoek te baseren, waardoor voor iedere lichtsoort een internationaal aanvaarde kleuraanduiding vastligt.
- b) De kleur als eigenschap van een voorwerp. We zeggen, dat een voorwerp een bepaalde kleur bezit. Dit betekent echter niet, dat een voorwerp licht van een bepaalde kleur *maakt*, maar slechts, dat het een *voorkeur heeft voor het reflecteren of doorlaten* van licht van een bepaalde kleur. Als het voorwerp dus verlicht wordt met licht waarin de betreffende kleur ontbreekt, ziet men het voorwerp niet in die kleur. Een rood voorwerp kan men dus alleen als rood zien indien het licht waarmede

het wordt verlicht ook rode lichtsoorten bevat. Is dit niet het geval, dan ziet men het voorwerp beslist niet als rood. Een voorwerp heeft dus als onvervreembare eigenschappen niet de *kleur* waarmee het wordt waargenomen, maar slechts zijn *reflectie- of doorlatingseigenschappen*. Als men dus toch aan een voorwerp een eigenschap toekent: de „kleur“, dan heeft dat alleen zin als men daarmee bedoelt de reflectie- en doorlatingseigenschappen.

Om verwarring te voorkomen, zullen we het onder a) bedoelde begrip altijd aanduiden met „kleur volgens het oog“ en het onder b) bedoelde met „voorwerpskleur“.

De nadere studie van deze beide begrippen: de „kleur volgens het oog“, als internationaal gestandaardiseerde kleuraanduiding van iedere lichtsoort, en de „voorwerpskleur“, opgevat als aanduiding van de reflectie- of doorlatingseigenschappen van een voorwerp, zullen het ons mogelijk maken de merkwaardige verschijnselen van de kleurweergave te verklaren.

Het is duidelijk, dat we hierbij veel aandacht moeten schenken aan hetgeen bekend is over de menselijke gezichtszin. We stellen dit echter uit tot Hoofdstuk III en behandelen eerst in Hoofdstuk II de natuurkundige eigenschappen van het licht, waarmee we bedoelen de eigenschappen van het licht als stralingsverschijnsel, zoals dit in de ruimte rondom de mens voorkomt.

## Hoofdstuk II

### DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

In de natuurkunde zijn we in staat het licht te ontleden met behulp van het bekende verschijnsel van de straalbreking. Wanneer het licht niet loodrecht, maar bijv. onder een hoek  $\alpha$  met de loodlijn (zie fig. 1) invalt op een glasoppervlak, zal het zich door het glas voortplanten onder een hoek  $\beta$  met de loodlijn ( $\beta$  is altijd kleiner dan  $\alpha$ ). Omdat voor éézelfde hoek  $\alpha$  de hoek  $\beta$  voor de verschillende lichtsoorten verschillende waarden heeft, kunnen we door middel van een glasprisma het licht ontleden in de bekende spectrale kleuren violet, blauw, blauw-groen, groen, geel, oranje en rood.

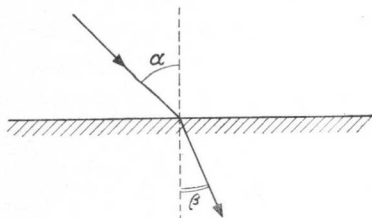


Fig. 1.

Deze spectrale ontleding, dat is het te voorschijn roepen van een aantal „kleuren volgens het oog“ uit een lichtbundel die eerst niet gekleurd scheen, betekent, natuurkundig gezien, dat men een trillingsverschijnsel, samengesteld uit trillingen met verschillende golflengte, ont-

leedt in de trillingen waaruit het is samengesteld.

Met andere woorden: door de spectrale ontleding brengt men een samengestelde lichtsoort terug tot de enkelvoudige lichtsoorten waaruit zij was samengesteld. Het resultaat van de ontleding is een „spectrum” waarin alle enkelvoudige lichtsoorten netjes naast elkaar liggen. Zie als voorbeeld van zo'n spectrum Plaat I tussen de bladzijden 28 en 29. Voor de enkelvoudige lichtsoorten gebruiken we daarom de naam „spectrale lichtsoorten”.

De straling van elk dezer spectrale lichtsoorten bestaat uit licht van slechts één *golflengte*. Door het aangeven van die golflengte is de aard van de straling van zo'n spectrale lichtsoort volkomen vastgelegd.

Soms komt het voor, dat zeer veel stralingsenergie geconcentreerd is op één enkele spectrale lichtsoort. We spreken dan van „monochromatisch licht”. Zo wordt de natriumlamp, waarin het overgrote deel van de straling op deze wijze geconcentreerd is, een „monochromatische lichtbron” genoemd.

Bij vele lichtbronnen is echter de stralingsenergie verdeeld over alle spectrale lichtsoorten. Dit betekent niet, dat iedere spectrale lichtsoort even sterk medewerkt, maar wel, dat er geen discontinuïteiten zitten in de spectrale verdeling van de energie, dus geen opeenhopingen van de energie in een enkele spectrale lichtsoort. We zeggen dan dat de lichtbron een „continue spectrale verdeling van energie” heeft. Omdat het licht van zo'n lichtbron bij spectrale ontleding een continu spectrum geeft, wordt ook wel kortweg gesproken van een lichtbron met een „continu spectrum”.

Er bestaat een enorm groot aantal spectrale lichtsoorten,

want iedere straling met een golflengte tussen de 380  $m\mu^*$ ) en de 780  $m\mu$  is zichtbaar, en een kleine verandering van de golflengte betekent een andere spectrale lichtsoort.

Wanneer we natuurkundig de samenstelling van een bepaalde lichtsoort omschrijven, kunnen we dat slechts doen door aan te geven hoe de energie van de straling verdeeld is over de verschillende spectrale lichtsoorten.

In dit hoofdstuk zullen we behandelen:

- a) de spectrale verdeling van de energie van temperatuurstralers,
- b) de spectrale verdeling van de energie van gasontladingslampen,
- c) de reflectie en doorlating van het licht door voorwerpen die zelf geen lichtbron zijn,
- d) het mengen van lichtsoorten.

### *De spectrale verdeling van de energie van temperatuurstralers*

Bij temperatuurstralers wordt het licht altijd uitgestraald door op hoge temperatuur verhitte vaste stof; voorbeeld: een gloeiende pook. Alle vanouds bekende lichtbronnen: het open haardvuur, de fakkel, de kaars, de olielamp en ook de modernere: de gasvlam, het gasgloeilicht en de gloeilamp, zijn temperatuurstralers. De kleine deeltjes vaste koolstof die in de genoemde vlammen zweven, de ragfijne gloeikous van het gaslicht, de dunne wolfram-

---

\*) Een  $m\mu$  (uitspraak: milli-micron) is een duizendste micron, dus een miljoenste mm. De langste golflengte van het zichtbare licht (780  $m\mu$ ) is dus nog altijd kleiner dan één micron (een duizendste mm).

draad van de gloeilamp, zijn de vaste stoffen die door hun hoge temperatuur de lichtstraling teweegbrengen.

Gloeiende vaste stof heeft de eigenschap licht uit te stralen waarin alle spectrale lichtsoorten voorkomen. De temperatuurstralers hebben dus een continue spectrale verdeling van de energie.

Een belangrijk onderdeel van de studie over de lichtuitstraling van temperatuur-

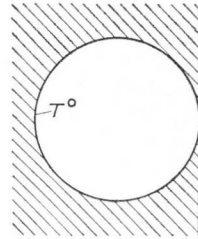


Fig. 2.

stralers was het onderzoek aan het z.g. zwarte lichaam. Een „zwart lichaam”, als in het laboratorium gebruikt, heeft de vorm van fig. 2. Het stralende oppervlak is de binnenzijde van een holle ruimte; de straling treedt uit door een kleine opening. Brengt men de binnenzijde van de holle ruimte op een gelijkmatige temperatuur van bijv.  $T^\circ$ , dan blijkt de straling die uit de opening komt onafhankelijk te zijn van het materiaal waarvan de binnenzijde van de holle ruimte gemaakt is. Omdat de straling alleen afhangt van de temperatuur, kunnen we dus spreken van „de straling van een zwart lichaam met een temperatuur van  $T^\circ$ ”. Tevens blijkt op iedere temperatuur, dat het zwarte lichaam altijd minstens dezelfde, maar meestal meer energie van iedere spectrale lichtsoort uitstraalt dan een willekeurige andere straler met hetzelfde stralingsoppervlak \*).

Door de onafhankelijkheid van het materiaal kon de straling van het zwarte lichaam gebruikt worden om daar-

\*) Omdat de naam „zwart lichaam” misschien iets wonderlijk schijnt, wanneer daarmee een opening in een holle ruimte wordt aangeduid, merken we op, dat een dergelijke opening, waaruit van invallende lichtstralen praktisch niets meer terugkomt, zwarter is dan het meest zwarte oppervlak dat men maken kan.

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

op de nieuwe, internationaal aanvaarde, eenheid van lichtsterkte te baseren. Tevens zullen we zien, dat ook het begrip „kleurtemperatuur“, waarop we bij het bespreken van de kleurendriehoek nog terugkomen, hiermede samenhangt.

Bij zeer hoge temperatuur, ongeveer bij 6000° Kelvin \*), ligt het maximum van de spectrale verdeling van de energie van het zwarte lichaam in het midden van het zichtbare spectrum. Deze verdeling van de energie komt ongeveer overeen met die van daglicht bij bedekte hemel. Bij lagere temperaturen wordt niet alleen de hoeveelheid energie die wordt uitgestraald door 1 cm<sup>2</sup> kleiner, maar verschuift ook het maximum van de straling naar het langgolvlige gebied. Bij een temperatuur van 3000 °K ligt dat maximum reeds lang niet meer in het zichtbare gebied. Voor deze temperatuur is de energie van de nog juist zichtbare spectrale lichtsoorten van korte golflengte (circa 380 m $\mu$ ) slechts ongeveer 1/16 van de energie van de nog juist zichtbare van lange golflengte (circa 780 m $\mu$ ).

De spectrale verdeling van de energie van gloeilampen komt ongeveer overeen met die van het zwarte lichaam op 3000 °K. In verhouding tot het daglicht hebben dus bij gloeilampenlicht de spectrale lichtsoorten van lange golflengte (rood licht) veel meer energie dan die van korte golflengte (blauw licht). Hiermede hangt samen, zoals we later nog duidelijker zullen zien, dat rode stoffen beter

---

\*) De Kelvin temperatuurschaal is gelijk aan te temperatuurschaal van Celsius, het nulpunt van de Kelvin schaal ligt echter op het absolute nulpunt, dus op een temperatuur van  $-273$  °Celsius. Bijv.: 6000 °Kelvin (aangeduid met een K, dus 6000 °K) is  $6000 - 273 = 5727$  °C.

tot hun recht komen onder gloeilampenlicht dan onder daglicht. Het omgekeerde is het geval met blauwe stoffen. De *kleurweergave* van het daglicht is dus beslist anders dan de kleurweergave van het gloeilampenlicht. Toch is deze afwijking in de kleurweergave niet storend. Ons oog past zich telkens in korte tijd volledig aan de rodere kunstlichtbron aan.

\* Wanneer we de continue spectrale verdeling van de energie van een lichtbron door een grafische voorstelling in beeld willen brengen, moeten we ons realiseren, dat er tussen de grenzen van het zichtbare spectrum (380  $m\mu$  en 780  $m\mu$ ) oneindig veel golflengten liggen die alle aan de straling meedoen. Verder zullen we ook de verdeling van de onzichtbare straling (infrarood en ultraviolet) in beeld willen brengen.

\* Omdat bij een *continue* verdeling de energie over alle golflengten verdeeld is, voeren we het begrip „spectrale dichtheid van de stralingsenergie” in, uitgedrukt in mW per  $m\mu$ . De spectrale dichtheid van de stralingsenergie van een bepaalde lichtbron is voor iedere golflengte te meten, door in een spectraalfotometer (combinatie van een monochromator met een receptor; voor de receptor kan een bolometer of een multiplicatorbuis gebruikt worden) de stralingsenergie te meten, die in een klein golflengtegebied (bijv. 2  $m\mu$ ) rondom de betreffende golflengte wordt uitgestraald.

\* Fig. 3 brengt voor een bepaalde lichtbron de continue energie-golflengtekromme in beeld, welke men, zoals uit het bovenstaande blijkt, ook „curve van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie” zou kunnen noemen. In horizontale richting is de golflengte uitgezet op een



## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

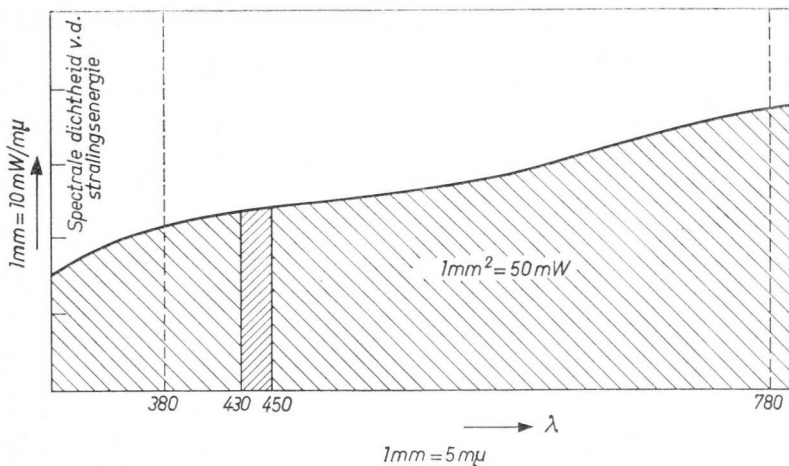


Fig. 3. De continue energie-golflengte-kromme van een lichtbron, ook te noemen „curve van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie”. Horizontaal is de golflengte uitgezet, verticaal de spectrale dichtheid van de stralingsenergie. Het oppervlak geeft dus stralingsenergie.

schaal  $1 \text{ mm} = 5 \text{ m}\mu$  en in verticale richting de spectrale dichtheid van de stralingsenergie op een schaal  $1 \text{ mm} = 10 \text{ mW}$  per  $\text{m}\mu$ . Het is duidelijk, dat het gearceerde oppervlak de stralingsenergie voorstelt, en wel op een schaal  $1 \text{ mm}^2 = 50 \text{ mW}$ . Een deel van deze stralingsenergie valt binnen, en een deel buiten de begrenzing van het zichtbare spectrum ( $380$  en  $780 \text{ m}\mu$ ). Uit de figuur kunnen we verder voor ieder golflengtegebied aflezen hoeveel energie daarin wordt uitgestraald bijv. in het gebied van  $430$  tot  $450 \text{ m}\mu$ : het in de figuur anders gearceerde oppervlak.

\* In fig. 4 geven we voor 1 cm<sup>2</sup> oppervlak van het zwarte lichaam de energie-golflengtekromme voor resp.

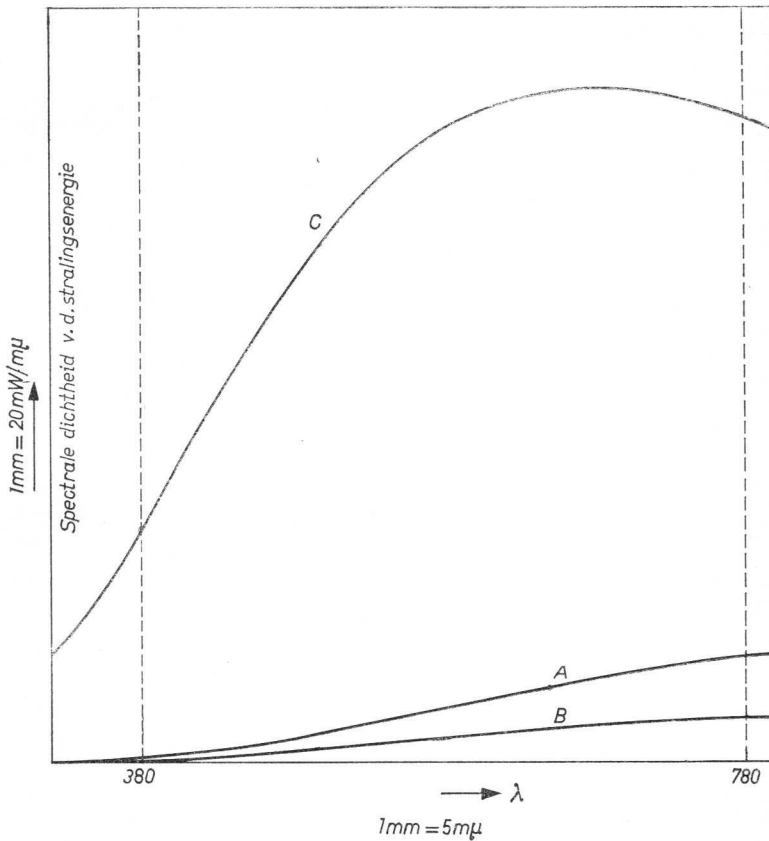


Fig. 4. Energie-golflengtekromme van drie lichtbronnen:  
 A een plaatje van 1 cm<sup>2</sup> zwart lichaam op 3000 °K  
 B een plaatje van 1 cm<sup>2</sup> wolfram op 3000 °K  
 C een plaatje van 1 cm<sup>2</sup> zwart lichaam op 4200 °K

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

3000 °K en 4200 °K. Men ziet hoeveel sterker de straling bij hogere temperatuur wordt, hetgeen betekent, dat men, om een bepaalde energie uit te stralen, op hogere temperatuur een kleiner stralend oppervlak nodig heeft. Tevens ziet men hoe het maximum van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie zich vanuit het infrarood verplaatst naar het zichtbare spectrum, hetgeen betekent, dat op hogere temperatuur de straling nuttiger wordt: we krijgen meer licht voor dezelfde stralingsenergie, want de infrarode straling levert geen bijdrage tot het zichtbare licht.

\* Fig. 4 geeft tevens de energie-golflengtekromme van 1 cm<sup>2</sup> oppervlak van het *metaal wolfram*, waarvan de gloeispiralen van de lampen gemaakt worden, voor 3000 °K. Voor dezelfde temperatuur blijkt de kromme van wolfram lager te liggen dan die van het zwarte lichaam. Dit was te verwachten, want, zoals reeds gezegd, straalt het zwarte lichaam bij iedere temperatuur altijd minstens dezelfde, maar meestal méér energie van iedere lichtsoort uit. Dit betekent echter niet dat het zwarte lichaam op een bepaalde temperatuur ook *economischer* zal stralen. Integendeel, het kan vaak voorkomen (en bij wolfram is dat ook het geval), dat de individuele stralingseigenschappen van de stof de oorzaak zijn van het verkrijgen van méér lichtstroom uit dezelfde stralingsenergie. Afgezien van andere energieverliezen die in een lamp optreden, is het immers duidelijk, dat het er voor de lichtopbrengst in de eerste plaats om gaat, dat in het gebied van de zichtbare golflengten naar verhouding meer energie wordt uitgestraald dan in het gebied van de onzichtbare. De verhouding van deze stralingsenergieën

is voor wolfram gunstiger dan voor het zwarte lichaam.

*De spectrale verdeling van de energie van gasontladingslampen*

Constaateerden we bij de temperatuurstralers, dat er geen stoffen zijn die er bij het licht van deze lichtbronnen opvallend onnatuurlijk gaan uitzien, hetzelfde kunnen we voor gasontladingslampen niet zeggen. In deze ontstaat het licht niet doordat bepaalde deeltjes vaste stof op hoge temperatuur licht van alle mogelijke golflengten uitstralen, maar doordat de atomen van het gas door de elektrische ontlading in een bijzondere toestand, of soms in verschillende bijzondere toestanden, worden gebracht. Bij de overgang van de ene toestand van het atoom naar de andere, ontstaat licht, en wel bij iedere soort overgang één bepaalde spectrale lichtsoort. De straling van gasontladingslampen is dus in hoofdzaak geconcentreerd op enkele spectrale lichtsoorten, waarvan de golflengten samenhangen met de eigenschappen van de atomen van het gas. Omdat deze lichtconcentraties in het spectrum, dat kan worden gevormd door spectrale ontleding van het licht van de lamp, als heldere lijnen naar voren treden, zegt men dat het atoom bij die golflengten „spectraallijnen” bezit. Voor een bepaalde lichtbron is de energie van iedere spectraallijn te meten, en men spreekt van sterkere en minder sterke spectraallijnen.

Aan de „kleur volgens het oog” van de spectraallijnen herkent men het gas waarmee de lamp gevuld is. Zo is de rode kleur (een aantal spectraallijnen, gelegen in het

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

golflengtegebied tussen ca. 600 en 650  $m\mu$ ) typisch voor neon, en de gele kleur (golflengte 589  $m\mu$ ) voor natrium. Het kwik-atoom heeft een viertal sterke spectraallijnen in het zichtbare gebied. De onderlinge verhouding van de energie die bij een ontlading in kwikdamp in deze spectraallijnen is geconcentreerd, is afhankelijk van de druk van de kwikdamp en van de stroomsterkte van de ontlading. Bij een hoge druk van de kwikdamp en bij een, in verhouding tot de diameter van de lamp, grote stroomsterkte, worden de spectraallijnen van langere golflengte naar verhouding sterker dan die van kortere golflengte.

Alhoewel bij de gasontlading de energie-uitstraling in de spectraallijnen domineert, is zij toch niet altijd tot die lijnen beperkt. De reeds genoemde ontlading in kwikdamp van hoge druk bijvoorbeeld geeft bij grote stroomsterkte behalve de spectraallijnen een hoeveelheid straling die continu spectraal verdeeld is. Dit is het geval bij de luchtgekoelde kwiklampen (HP) en in het bijzonder bij de watergekoelde kwiklampen (SP); vooral bij de laatste is de continu spectraal verdeelde energie van grote betekenis.

Er is echter nog een mogelijkheid om aan de spectraallijnen continu spectraal verdeelde energie toe te voegen. Men kan dit doen door fluorescerende stoffen op de binnenwand van de lamp aan te brengen. Deze stoffen hebben namelijk de eigenschap om straling te absorberen en een deel van de daaruit opgenomen energie weer uit te stralen. Deze heruitgestraalde energie is continu spectraal verdeeld.

Zoals een gloeilamp de energie van de elektrische stroom omzet in licht, zo zet de fluorescerende stof de energie van de spectrale lichtsoorten van korte golflengte (vaak golf-

lengten die buiten het zichtbare spectrum vallen en dus niet door ons oog worden gezien) om in licht van langere (zichtbare) golflengte. Het is daarbij zelfs mogelijk om door een verstandige combinatie van fluorescerende stoffen naar keuze de continue spectrale verdeling van de energie van een van de bekende temperatuurstralers te benaderen. Deze fluorescerende stoffen worden gebruikt op de binnenwand van de buitenballon van de kleurgecorrigeerde luchtgekoelde kwiklampen (HPL). Toch overheerst bij deze lampen de straling van de spectraallijnen nog de continu spectraal verdeelde stralingsenergie. Dit is niet meer het geval bij de buisvormige fluorescentielampen ("TL"). Bij deze heeft men in de eerste plaats de continu spectraal verdeelde stralingsenergie van de fluorescentiestoffen, en ook is er nog een kleine invloed van de spectraallijnen van de kwikdamp in overgebleven.

\* De eenvoudigste manier om de energie-uitstraling van een lichtbron die uitsluitend in enkele spectraallijnen straalt te beschrijven, is dit te doen in de vorm van een *tabel* waarin voor iedere spectraallijn wordt aangegeven hoeveel watt stralingsenergie in die lijn wordt uitgestraald.

\* Wanneer een lichtbron ook nog continu spectraal verdeelde energie uitstraalt, zou men deze in beeld kunnen brengen op geheel dezelfde wijze als dit voor temperatuurstralers wordt gedaan, en daarnaast in een tabel de energie vermelden welke in de spectraallijnen wordt uitgestraald. Deze methode is niet mooi. Men wenst één grafiek, waaruit men zich een oordeel kan vormen omtrent de gehele stralingsenergie. Dit stuit echter op de moeilijkheid, dat de spectrale dichtheid van de stralings-

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

energie van de spectraallijnen vaak meer dan duizend maal groter is dan die van de andere golflengten, omdat bij de spectraallijn het stralingsverschijnsel slechts over een golflengtegebied van één honderdste  $m\mu$  of minder optreedt.

\* Voor de praktijk heeft men nu een afspraak gemaakt, die het mogelijk maakt om in één grafiek de totale straling van de lichtbron in beeld te brengen. Men *smokkelt* namelijk met de breedte van de lijnen, en tekent, in plaats van *lijnen* met een breedte van één honderdste  $m\mu$ , *banden* met een standaardbreedte van bijv.  $10 m\mu$ . Zo wordt het mogelijk zich met één energie-golflengtekromme een oordeel te vormen over de gehele straling van de lichtbron: het oppervlak van de aldus omgevormde spectraallijnen (méér dan 1000-voudig verkort en méér dan 1000-voudig verbreed) geeft immers op dezelfde schaal (bijv.  $1 \text{ mm}^2 = 50 \text{ mW}$ ) de energie van de spectraallijnen aan, als het oppervlak van de curve van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie dit doet voor de continu spectraal verdeelde energie. De energie-golflengtekromme van fig. 5 is hiervan een voorbeeld. Daarin wordt de spectrale verdeling van de energie van een "TL" lamp in beeld gebracht.

### *De reflectie en doorlating van het licht door voorwerpen die zelf geen lichtbron zijn*

In Hoofdstuk I hebben we ons aangepast bij de ingeburgerde gewoonte om te spreken van de „kleur” van een voorwerp als het in wezen gaat om de reflectie- en doorlatingseigenschappen van dat voorwerp; we hebben daar-

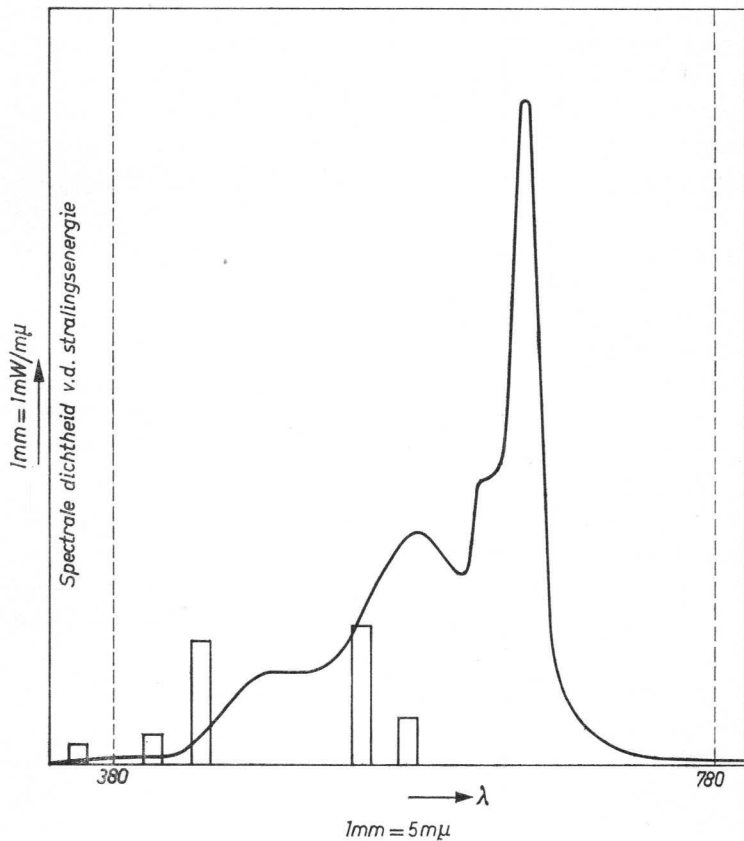


Fig. 5. Energie-golflengtekromme van de 40W "TL" lamp kleur 32 (1850 lumen). Alle spectraallijnen zijn aangegeven met een breedte van  $10\text{ m}\mu$ .

Het betreft hier de lijnen:

Golflengte  $404,7/407,8\text{ m}\mu$  met een energie van  $39,9\text{ mW}$

Golflengte  $435,8\text{ m}\mu$  met een energie van  $165\text{ mW}$

Golflengte  $546,1\text{ m}\mu$  met een energie van  $184,5\text{ mW}$

Golflengte  $576,9/579,1\text{ m}\mu$  met een energie van  $61,6\text{ mW}$



## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

voor het woord „voorwerpskleur“ ingevoerd. We zullen nu nader ingaan op de natuurkundige eigenschappen welke bepalend zijn voor de „voorwerpskleur“.

Door fluorescentie wordt, zoals we reeds zagen, straling van korte golflengte omgezet in straling van langere golflengte. De voorwerpen die ons in ons interieur omringen, fluoresceren echter praktisch niet. Deze veranderen de golflengte van het licht dus niet: wat ze aan straling van een bepaalde golflengte opvangen, geven ze ook weer in diezelfde golflengte af, echter niet alles, omdat een deel wordt geabsorbeerd.

Deze absorptie heeft plaats wanneer het licht de stof doorloopt. Als bijv. licht door een gekleurde glasplaat valt, zal een groter of kleiner deel van het licht van iedere spectrale lichtsoort worden geabsorbeerd. Gekleurd glas absorbeert in het algemeen veel licht, echter maar weinig van de lichtsoorten die de kleur van het glas hebben. Men kan ook zeggen: gekleurd glas heeft een *voorkeur voor het doorlaten* van bepaalde spectrale lichtsoorten. Het effect van deze voorkeur wordt sterker als het licht een grotere weg door het glas moet afleggen, omdat dan van de andere lichtsoorten meer wordt geabsorbeerd. Daardoor zal een dikkere glasplaat van hetzelfde materiaal licht doorlaten, dat een zuiverder, „rijkere“, „kleur volgens het oog“ heeft.

Bij reflectie op gekleurde voorwerpen dringen de lichtstralen altijd enigszins het oppervlak in, en worden daarna pas gereflecteerd. Ook hier doorlopen dus de lichtstralen de stof en worden daarbij voor een deel geabsorbeerd. De weg die de lichtstralen bij reflectie door het materiaal afleggen is veel korter dan bij doorlating. Ook is de weg

ongelijk: sommige lichtstralen worden al heel vlug gereflecteerd, andere pas wanneer ze al dieper in het materiaal zijn doorgedrongen. Door deze kortere en ongelijke weg door het materiaal verkrijgt men in het algemeen bij reflectie minder zuivere, minder rijke „kleuren volgens het oog” dan bij doorlating.

Gekleurde plaatjes van lichtdoorlatend materiaal (glas, plastic, enz.) zijn dus bij uitstek geschikt om sterke kleur-effecten te bereiken. Iedereen kent de bijzonder artistieke effecten van glas-in-lood ramen, welke veel helderder kleuren vertonen dan men met de meeste reflecterende materialen bereiken kan.

In de studie over kleuren hebben speciaal voor dit doel gefabriceerde plaatjes de naam „filters” gekregen. Ze „filtreren” een deel van de lichtstralen uit en laten slechts de lichtstralen die aan een bepaalde golflengte-eis voldoen, doorgaan.

Bekende firma's \*) brengen deze filters in de handel. Ze zijn van een nauwkeurige nummering voorzien, en aan de hand daarvan kan men in een catalogus de spectrale doorlatingseigenschappen van deze filters vinden.

Zeer speciale filters zijn de *interferentie-filters*. Met deze is men in staat uit licht van een willekeurige spectrale samenstelling praktisch één enkele golflengte te separeren. Men kan dus met dit hulpmiddel monochromatisch

---

\*) Lichtfilters:

*Glas:* Corning Glass Works, Corning, N.Y., U.S.A.  
Chance Brothers, Smethwick near Birmingham, England.  
Schott, Jena und Mainz.

*Gelatine:* Kodak, Wratten Division, Kingsway, London.  
Ilford Limited, Ilford, London.  
Agfa, Wolfen, Deutschland.

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

licht van iedere gewenste golflengte maken. Ook deze filters worden in de handel gebracht door firma's die er zich speciaal op toeleggen\*). Op het filter staat dan de golflengte die het doorlaat vermeld. Men moet er bij het gebruik van deze filters echter op letten, dat ze alleen goed functioneren als de lichtstralen er praktisch loodrecht door passeren.

Wanneer men een stof met een rode „voorwerpskleur“ verlicht met licht waarin geen langgolvlige spectrale lichtsoorten voorkomen, dan zal, omdat, zoals we zagen, de stof zelf geen rode spectrale lichtsoorten maakt, de „kleur volgens het oog“ van het gereflecteerde licht niet rood kunnen zijn. De stof die we als een „rode stof“ kennen, ziet er dus onder dat licht niet rood uit, en we zeggen dat de „voorwerpskleur“ van de stof door dat licht onjuist wordt weergegeven. Het is dus gemakkelijk te begrijpen dat een lichtbron die in een belangrijk deel van het spectrum geen licht uitstraalt, een onjuiste kleurweergave heeft.

\* Wanneer we meer in details willen nagaan hoe de eigenschappen van de voorwerpen worden vastgelegd, maakt het voor ons betoog niets uit of we het hebben over *reflectie* of over *doorlating*. We zullen deze beide woorden dus niet blijven herhalen, maar alleen spreken van reflectie. Voor doorlating blijft het betoog precies hetzelfde.

\* Voor niet-fluorescerende stoffen, die dus geen straling van kortere golflengte omzetten in straling van langere golflengte, kunnen we de reflectie-eigenschappen volledig bepalen door voor iedere spectrale lichtsoort de

---

\*) Interferentie-filters:  
Balzers Gerätebau-Anstalt. Fürstentum Liechtenstein.

reflectiefactor van het voorwerp te meten. Net als bij het meten van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie, zullen we ook hier de reflectiefactor moeten meten in een klein golflengtegebied (bijv.  $2\text{ m}\mu$ ) rondom die spectrale lichtsoort. We krijgen dus voor iedere spectrale lichtsoort een reflectiefactor (een getal tussen nul en één). Deze reflectiefactoren zetten we in een grafiek uit tegen de golflengte, en we verkrijgen dan de spectrale reflectiekromme van het voorwerp (zie fig. 6).

\*

Wanneer de spectrale verdeling van de energie van de lichtbron die het voorwerp verlicht bekend is, kan men met behulp van de spectrale reflectiekromme de spectrale verdeling van de energie van het gereflecteerde licht berekenen. Hiervoor behoeft men slechts per golflengte de spectrale dichtheid van de stralingsenergie

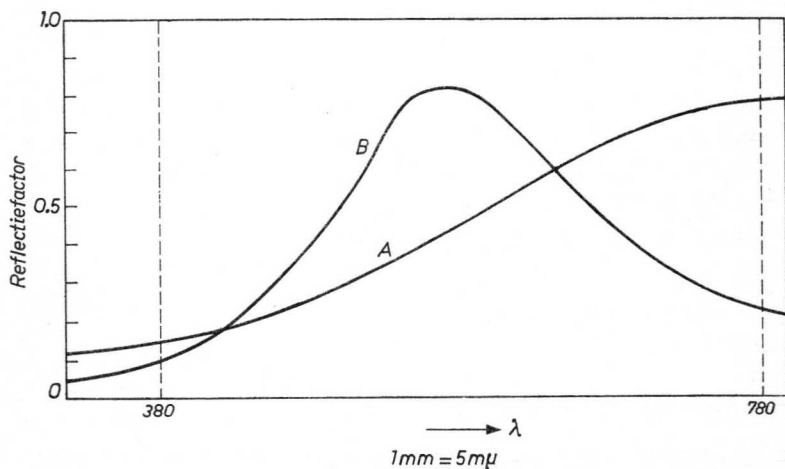


Fig. 6. Spectrale reflectiekrommen voor twee stoffen A en B.

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

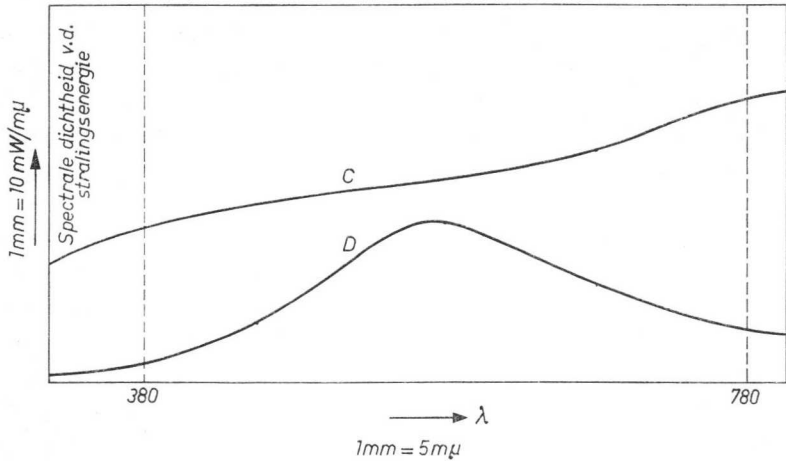


Fig. 7. Energie-golflengtekrommen van een lichtbron (C) en van het door stof B (fig. 6) gereflecteerde licht (D).

van de lichtbron te vermenigvuldigen met de reflectiefactor. We hebben dit bij wijze van voorbeeld gedaan voor de lichtbron waarvan we in fig. 3 de energie-golflengtekromme gaven, en voor het reflecterend oppervlak met de spectrale reflectiekromme B van fig. 6. In fig. 7 geeft C de energie-golflengtekromme van de lichtbron (dezelfde als fig. 3), en D die van het licht, dat het genoemde oppervlak reflecteert.

### *Het mengen van lichtsoorten*

In de aanvang van dit hoofdstuk zagen we, dat door spectrale ontleding samengestelde lichtsoorten kunnen worden

teruggebracht tot de spectrale lichtsoorten waaruit ze bestaan.

Men kan dit proces ook omgekeerd laten verlopen en uit spectrale lichtsoorten een samengestelde lichtsoort vormen, of, hetgeen in de praktijk meer zal voorkomen, uit twee of meer lichtsoorten van verschillende spectrale samenstelling een nieuwe lichtsoort maken.

Voor dit samenstellingsproces wordt de naam *mengen van lichtsoorten* gebruikt. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. Bij de meest eenvoudige en zekere manier maakt men gebruik van een wit diffuus reflecterend opvangscherm. Zo'n scherm heeft namelijk de eigenschap om het licht dat er vanuit verschillende richtingen op geworpen wordt, in alle richtingen in dezelfde mate te reflecteren. Op dat scherm werpt men bundels van verschillende lichtsoorten. Het door het scherm gereflecteerde licht is nu het „mengsel” van die lichtsoorten. Alle oorspronkelijke spectrale lichtsoorten komen er immers in voor, en de onderlinge verhouding van de energie van die spectrale lichtsoorten stemt overeen met de verhouding die in de oorspronkelijke bundels samen aanwezig was. Dit mengen komt dus in wezen op hetzelfde neer als het mengen van vloeistoffen. Wanneer men de samenstelling van de oorspronkelijke vloeistoffen kent en tevens weet welke hoeveelheid van ieder van de vloeistoffen aan het mengsel wordt toegevoegd, kan men, althans indien geen chemische reactie optreedt, op eenvoudige wijze het percentage berekenen van ieder van de samenstellende delen in het gevormde mengsel. Zo kan men, als men de spectrale verdeling van de energie van de oorspronkelijke bundels kent, en tevens weet welke hoeveelheid energie door iedere

bundel op het scherm wordt geworpen, de spectrale verdeling van de energie van het lichtmengsel berekenen.

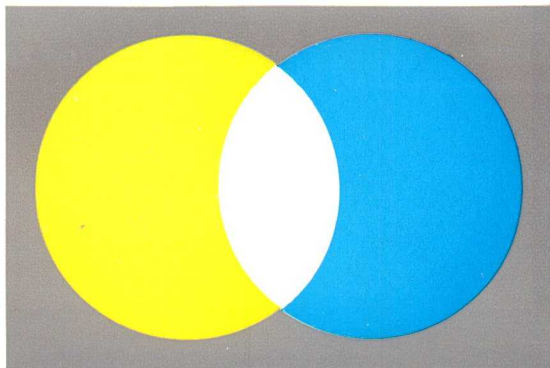
Wanneer we in de volgende hoofdstukken spreken van het mengen van licht, dan bedoelen we steeds dit of soortgelijke processen, waarbij uit verschillende lichtsoorten een nieuwe lichtsoort gemaakt wordt, die natuurkundig is op te vatten als een mengsel van de oorspronkelijke lichtsoorten.

Door een ingeburgerd, in wezen onjuist, spraakgebruik, zullen we even moeten uitweiden over het begrip „mengen”.

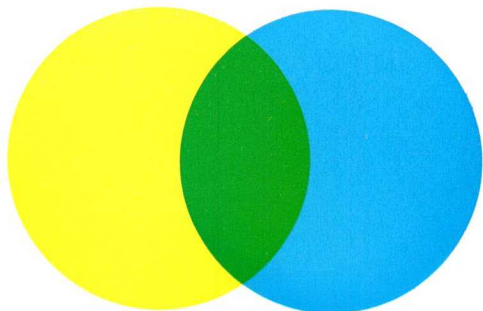
Men spreekt namelijk van „additief” en van „subtraktief” mengen. Het proces dat we hierboven omschreven als het mengen van lichtsoorten, wordt dan „additief mengen” genoemd, en de toevoeging „subtraktief” wordt o.a. gebruikt als het gaat om het mengen van verven.

Als men zich realiseert dat het „additief” mengen van een gele en een blauwe lichtsoort een witte of nagenoeg witte lichtsoort geeft (zie fig. 8), en door het „subtraktief” mengen van gele en blauwe verf een groene verf ontstaat (zie fig. 9), dan is het duidelijk dat hier hetzelfde woord „mengen” wordt gebruikt voor twee processen die in wezen niets met elkaar hebben te maken.

Het ontstaan van de spraakverwarring is historisch gemakkelijk te begrijpen. Voor het bestuderen van de eigenschappen van de gezichtszin werden lichtsoorten gemaakt die natuurkundig waren op te vatten als *mengsels* van andere lichtsoorten. Door de natuurkundigen werden dus nieuwe „kleuren volgens het oog” gemaakt door het *mengen van lichtsoorten*. De schilders maakten echter reeds

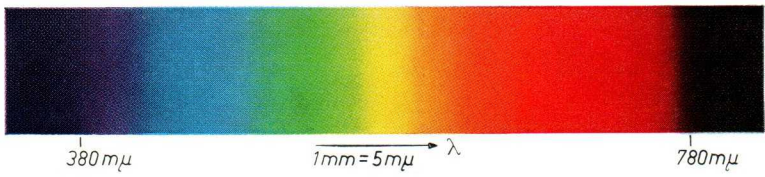


*Fig. 8. Een gele en een blauwe lichtbundel over elkaar geworpen op een wit diffuus reflecterend scherm geeft een witte vlek.*



*Fig. 9. Gele en blauwe verf met elkaar gemengd of over elkaar gedrukt geeft een groene „voorwerpskleur“.*





PLAAT I. Spectrum ontstaan door spectrale ontleding van een „witte“ lichtbundel.

eeuwen lang nieuwe „voorwerpskleuren“ door *verven te mengen*.

Toen bleek dat hetzelfde woord „mengen“ werd gebruikt voor totaal verschillende werkmethoden, en dat er in het effect van deze werkmethoden zulke grote verschillen waren als we hierboven aangaven (zie fig. 8 en fig. 9), heeft men getracht een duidelijk onderscheid te maken. Men heeft toen de woorden „additief“ en „subtraktief“ ingevoerd. „Additief mengen“ was hetgeen de natuurkundigen voor hun studie over de gezichtszin deden; „subtraktief mengen“ was het mengen van verven door de schilders.

Deze beide woorden zijn ongelukkig gekozen. Additief als toevoeging aan het woord „mengen“ is overbodig, want bij mengen wordt altijd iets bij iets anders gevoegd (geaddeerd). Subtraktief suggereert dat iets wordt afgetrokken, en is daardoor in tegenspraak met het begrip mengen. Men zou het gebruik van dit woord kunnen verdedigen door erop te wijzen, dat bij het mengen van verven pigmenten worden gemengd, en dat het essentiële van pigmenten hun absorptie is. Men zou dus kunnen zeggen, dat absorpties (subtrakties) worden gemengd. Bevredigend is deze verklaring geenszins.

We moesten dit minder gelukkige gebruik van het woord „mengen“, dat ook door de toevoeging „subtraktief“ niet gecorrigeerd kan worden, hier signaleren, omdat hierover in de literatuur zoveel is geschreven, dat er toch bij onze lezers vragen over zouden rijzen. Voor ons betoog behoeven we gelukkig slechts te herhalen, dat we onder „mengen“ *alleen* verstaan het maken van nieuwe lichtsoorten, die natuurkundig zijn op te vatten als mengsels van de oorspronkelijke lichtsoorten. Daarover spreken we dus

## H. II. DE NATUURKUNDIGE EIGENSCHAPPEN VAN HET LICHT

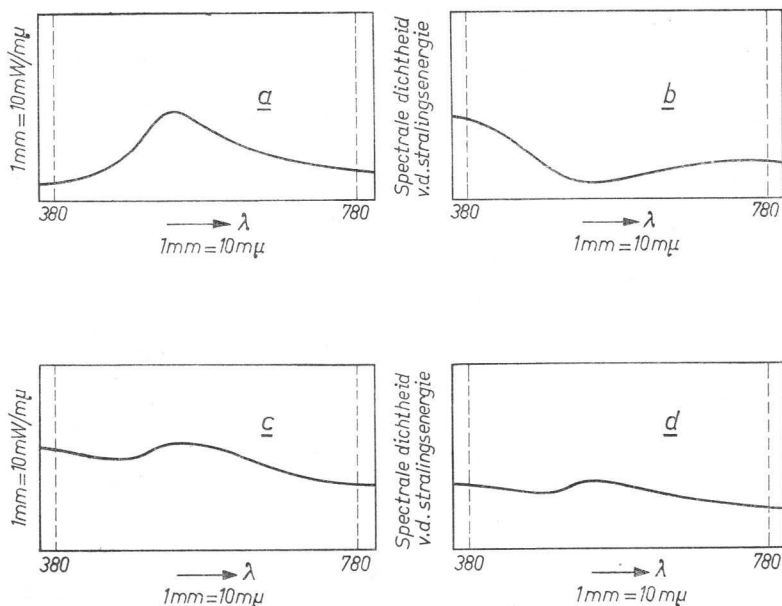


Fig. 10. *Het mengen van licht.*

Alle grafieken geven energie-golflengtekurven:

a en b die van de door een scherm opgevangen straling van 2 verschillende lichtbronnen, c die van de totale, door het scherm opgevangen straling, d die van de door het scherm gereflecteerde straling.

alléén en we laten de discussie over een zuiverder naam voor hetgeen nu „subtraktief mengen” wordt genoemd, graag aan anderen over.

De spectrale verdeling van de energie van een licht-  
\* soort die bestaat uit een mengsel van twee of meer

lichtsoorten, waarvan de spectrale verdeling van de energie bekend is, is gemakkelijk te vinden.

- \* We mengen, door de verschillende lichtsoorten op te vangen op een diffuus reflecterend scherm. Het is nu nodig voor iedere lichtsoort te weten hoeveel energie van iedere golflengte door het scherm opgevangen wordt. We kunnen hiervan energie-golflengtekrommen maken, voor elke lichtsoort apart (zie fig. 10, a en b).

- \* Door nu per golflengte de spectrale dichtheden van de stralingsenergie van alle lichtsoorten (ordinaten van de energie-golflengtekrommen) op te tellen, krijgen we een energie-golflengtekromme van de totale straling die door het scherm wordt opgevangen (zie fig. 10, c).

- \* Omdat het witte, diffuus reflecterende scherm voor alle golflengten dezelfde reflectiefactor heeft, behoeven we, om de energie-golflengtekromme van de door het scherm gereflecteerde straling te krijgen, slechts de ordinaten van c te vermenigvuldigen met de diffuse reflectiefactor van het scherm (zie fig. 10, d).

## Hoofdstuk III

### DE GEZICHTSZIN

Ons oog is het uitwendige orgaan waarmee we zien. We kunnen ook zeggen: ons oog is de ontvangapparaat voor het zien. Zonder ogen is de gezichtszin onbestaanbaar.

Toch verstaan we onder gezichtszin nog heel iets anders dan de werkzaamheid van de ogen alleen. Omdat de ingrijpende rol die de hersenen spelen bij het verwerken van de gegevens die ze van de ogen ontvangen, het duidelijkst blijkt bij het vormen-zien, willen we hieraan een korte beschouwing wijden, voordat we het kleuren-zien gaan beschrijven.

#### *Het vormen-zien*

In populaire verhandelingen over het zien wordt het oog beschreven als een camera obscura. Een dergelijke voorstelling bevredigt niet. Heeft men ooit het gevoel, wanneer men de omgeving bekijkt, bezig te zijn een beeld in een camera te beschouwen? U moet het eens proberen met zo'n ouderwets foto-apparaat, waarbij men het contact met de omgeving af kan sluiten door middel van een over en om het hoofd hangende zwarte doek. Zolang het foto-apparaat

stil staat gaat dat nog wel, maar beweegt men het zoals onze ogen plegen te bewegen, dan verliest men alle oriëntatie. Dan schieten de beelden over het matglas van het foto-apparaat heen en weer, omhoog en omlaag; men wordt er „zeeziek” van.

Dat we ditzelfde effect bij het bewegen van onze ogen totaal niet ondervinden komt doordat, wat betreft het waarnemen van vormen, de gezichtszin niet slechts gebaseerd is op de berichten die door de ogen naar de hersenen worden doorgegeven. In die hersenen worden deze „berichten” samen met berichten van andere organen, onze evenwichtsorganen, onze oogspieren (onbewust weten we, dat we onze ogen gedraaid hebben) verwerkt tot de werkelijke gezichtsindruk. Deze werkelijke gezichtsindruk is voor ons besef nooit die van bewegende beelden op het matglas van een fototoestel, maar de wetenschap dat er zich bepaalde dingen om ons heen bevinden, die in vele gevallen in rust zijn terwijl ons oog beweegt. Het resultaat van het vormen-zien is dus een beeld van de werkelijkheid om ons heen, dat ontstaat doordat onze hersenen de berichten van onze ogen, samen met andere gegevens, hebben verwerkt.

Voor wat betreft het vormen-zien, heeft dus het oog alleen de functie van orgaan tot het opnemen van een deel van de informatie, en komt de eigenlijke waarneming tot stand door het verwerken van die informatie, samen met informaties van andere organen. Deze verwerking geschiedt in de hersenen. Daar zetelt dus de gezichtszin, en het oog is slechts een, zij het ook onmisbaar, hulpapparaat.

### *Het kleuren-zien*

Alle onderzoekers zijn het erover eens, dat het opneem-

orgaan voor kleuren op een of andere manier ingebouwd moet zitten in de lichtgevoelige organen van onze ogen. Deze zijn echter zo klein, dat het nog niet gelukt is en het misschien ook niet zal lukken ze anatomisch te ontleden.

Het probleem van het kleuren-zien heeft men dan ook op een geheel andere manier bestudeerd. Men deed dit door fysiologische proeven over het kleuren-zien.

Men had reeds lang geleden ontdekt, dat het licht samengesteld is uit spectrale lichtsoorten (Newton 1672), en dat men door het mengen van deze spectrale lichtsoorten verschillende „kleuren volgens het oog” verkrijgen kan. Tevens bleek, dat men eenzelfde „kleur volgens het oog” bereiken kan met licht van zeer verschillende spectrale samenstelling. Onderzoekers als Young (1802), Grassman (1853), Maxwell (1860) hebben allen aandacht voor dit probleem gehad. Toch heeft het nog tot de tweede helft van de 19e eeuw geduurd, voordat, speciaal ook door het werk van Helmholtz en zijn medewerker Arthur König, de inzichten vaste vorm begonnen aan te nemen.

De fysiologische proeven, waarbij dus altijd de mens als proefobject fungeerde, werden genomen:

1e met mensen met normale gezichtszin,

2e met mensen met afwijkingen in het kleuren-zien.

Sinds Helmholtz ging men namelijk uit van de hypothese, dat de lichtgevoelige organen van de ogen drie soorten kleurgevoelige receptoren bevatten. Mensen met een normale gezichtszin noemt men dan ook normale *trichromaten*. Het kan zijn, dat iemand een afwijking heeft in de gevoeligheid van één van de drie soorten receptoren. Zo'n persoon wordt een *abnormale trichroma*t genoemd, en men onder-

scheidt drie soorten in deze categorie, al naar gelang de abnormaliteit voorkomt in een van de drie soorten receptoren.

Er zijn echter ook personen die slechts twee receptorsoorten bezitten; deze noemt men *dichromaten*. Ook hierbij kan men weer drie soorten onderscheiden. Verder zijn er nog mensen die helemaal geen kleur onderscheiden kunnen. Dit zijn de totaal kleurenblinden, die echter maar zelden voorkomen.

De fysiologische proeven die men met deze proefpersonen nam, kwamen er op neer, dat men hen liet kijken naar twee aan elkaar grenzende vlakken, waarbij op ieder van die vlakken licht van een andere spectrale samenstelling werd geworpen (zie fig. 11). Op deze manier constateerde men welke spectrale verdelingen van de energie door de personen met normale gezichtszin worden gezien als gelijk van „kleur volgens het oog”, en tevens welke afwijkingen de proefresultaten met personen met abnormale gezichtszin vertonen.

Door al deze fysiologische proeven werd de hypothese van Helmholtz bevestigd, zodat we momenteel kunnen zeggen, dat het feit dat mensen met normale gezichtszin drie soorten kleurgevoelige receptoren bezitten, waarvan de gevoeligheid van persoon tot persoon slechts weinig uiteenloopt, wetenschappelijk vaststaat.

Laten we, om de gedachte te bepalen, die drie soorten

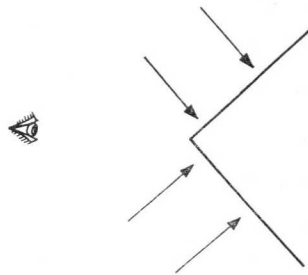


Fig. 11.



### H. III. DE GEZICHTSZIN

receptoren de rood-, groen- en blauwreceptoren noemen. Alle drie soorten receptoren vangen licht op, dat, zoals we in het vorige hoofdstuk zagen, samengesteld is uit vele spectrale lichtsoorten. Iedere receptorsoort nu heeft haar eigen manier om dat licht te „waarderen”. Dit betekent, dat bijvoorbeeld de roodreceptoren voor iedere spectrale lichtsoort een bepaalde omrekeningsfactor (de „roodfactor”) hebben waarmee deze receptoren de energie van die spectrale lichtsoort vermenigvuldigen om te komen tot de „roodhoeveelheid” van die spectrale lichtsoort. De som van de roodhoeveelheden van alle spectrale lichtsoorten is de totale roodhoeveelheid van het samengestelde licht.

Op geheel overeenkomstige manier bepalen de groenreceptoren van alle spectrale lichtsoorten de groenhoeveelheid en daaruit de totale groenhoeveelheid van het samengestelde licht. Zo ook de blauwreceptoren de totale blauwhoeveelheid.

Wanneer we de helderheid van het voorwerp waar we naar kijken verhogen (bijvoorbeeld door de lamp er dichterbij te zetten) wordt het beeld op ons netvlies helderder. De drie receptorsoorten zullen nu resp. een rood-, een groen- en een blauwhoeveelheid vinden, die alle evenredig met de verhoging van de helderheid van het netvliesbeeld zijn gestegen. Door deze verhoging van de helderheid is echter de „kleur volgens het oog” van het licht niet veranderd \*). Het is dan ook begrijpelijk, dat deze „kleur volgens het oog” niet wordt bepaald door de absolute grootte

---

\*) Slechts bij zeer lage helderheden, waarbij ons oog de speciale verschijnselen van nacht-adaptatie gaat vertonen, blijkt de „kleur volgens het oog” te veranderen bij verhoging van de helderheid.

van de drie hoeveelheden, maar door hun onderlinge verhouding.

Deze drie hoeveelheden worden waarschijnlijk via de zenuwen naar de hersenen overgebracht. Deze blijken in staat te zijn uit de onderlinge verhouding van de drie hoeveelheden te komen tot de „kleur volgens het oog”. Dit hersenmechanisme is niet wonderlijker dan het hersenmechanisme waarmee we op basis van het voortdurend veranderende beeld op het netvlies tot het besef komen van de ons omringende werkelijkheid.

We moeten erop wijzen dat, alhoewel wetenschappelijk vaststaat dat alle normale trichromaten in hun ogen drie soorten, van persoon tot persoon behoorlijk met elkaar overeenstemmende, kleurgevoelige receptoren bezitten, men er niet in is geslaagd de gevoeligheden van ieder van deze receptorsoorten ook werkelijk vast te leggen. De hierboven vermelde fysiologische proeven, waarbij „kleuren volgens het oog” van lichtsoorten van verschillende spectrale samenstelling vergeleken worden, gaven namelijk als resultaat, dat het mogelijk is om *met een groot aantal stellen* van telkens drie op elkaar afgestemde kleurgevoeligheden alle door normale trichromatische waarnemers gevonden resultaten te verklaren en vast te leggen.

Dit resultaat is voor deskundigen *niet onbegrijpelijk*, omdat het hier slechts gaat om het *vergelijken* van „kleuren volgens het oog”.

Ons stelt het ook niet teleur, omdat wij slechts bedoelden nauwkeurig te weten hoe de menselijke gezichtszin reageert op de verschillende lichtsoorten. Voor dat doel is ieder stel van kleurgevoeligheden goed, en mogen we er zelfs een keuze uit doen en het stel kleurgevoeligheden

### H. III. DE GEZICHTSZIN

kiezen dat ons om praktische redenen het best schikt.

Teleurstellend kan dit resultaat zijn voor biologen en oog-artsen, indien zij zich als doel gesteld hebben om door middel van deze kleurgevoeligheden dieper door te dringen in de fysiologische bouw van de receptoren.

## Hoofdstuk IV

### KLEURENDRIEHOEKEN

We zagen in het vorige hoofdstuk, dat voor het vastleggen van de „kleur volgens het oog“ van een bepaalde lichtsoort slechts de onderlinge verhoudingen tussen de rood-, groen- en blauwhoeveelheden, zoals die door de drie soorten oogreceptoren gevonden worden, van belang zijn.

Noemen we de van een bepaalde lichtsoort gevonden rood-, groen- en blauwhoeveelheid resp.  $a$ ,  $b$  en  $c$ . De onderlinge verhoudingen kunnen we op verschillende manieren bepalen, bijv.:  $\frac{a}{b}$ ,  $\frac{a}{c}$ ,  $\frac{b}{c}$ . Voor de kleurgevoeligheid heeft het echter zin de onderlinge verhoudingen nog iets anders vast te leggen. De drie waarden samen geven immers de totale impressie die het oog van de lichtsoort krijgt. Wanneer we dus de roodhoeveelheid delen door deze totale impressie, dan meten we hoe groot het rood-aandeel in het geheel is. We komen dan tot drie verhoudingen:

$$\frac{a}{a + b + c} \quad , \quad \frac{b}{a + b + c} \quad , \quad \text{en} \quad \frac{c}{a + b + c} \quad .$$

Dit zijn drie getallen tussen nul en één, waarvan de som altijd één is. Wanneer we er twee kennen, ligt de derde

#### H. IV. KLEURENDRIEHOEKEN

vast. Deze drie verhoudingen zijn dus niet onafhankelijk van elkaar. Dit is niet iets bijzonders van deze ooggevoeligheden. Wanneer men alleen belangstelling heeft voor de *onderlinge verhoudingen* tussen drie grootheden, dan zal het altijd blijken dat door het vermelden van twee van deze, van elkaar onafhankelijke, verhoudingen alles omtrent de *verhoudingen* tussen de drie grootheden bekend is.

Dit betekent dus, dat de „kleur volgens het oog” niet bepaald wordt door *drie*, maar door *twee* van elkaar onafhankelijke grootheden.

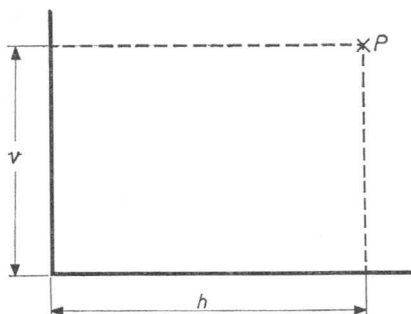


Fig. 12.

In een plat vlak heeft men altijd twee van elkaar onafhankelijke richtingen, bijv. horizontaal en verticaal. In fig. 12 hebben we met dikke lijnen een „assenkruis” getekend. Dit assenkruis (twee elkaar snijdende lijnen) dient als basis voor de plaatsbepaling van punten in het vlak van de tekening. Het punt P wordt namelijk ten opzichte van het assenkruis vastgelegd door de afstand  $h$  langs de horizontale as en de afstand  $v$  langs de verticale as. Iedere combinatie van afstanden  $h$  en  $v$  legt dus een punt van het

vlak van de tekening vast. Men kan dit ook omdraaien: ieder punt in het vlak van de tekening legt een combinatie van afstanden  $h$  en  $v$  vast.

Wanneer we nu voor de afstand  $h$  de verhouding  $\frac{a}{a+b+c}$  nemen, en voor de afstand  $v$  de verhouding  $\frac{b}{a+b+c}$ , dan mogen we zeggen, dat het punt  $P$  een be-

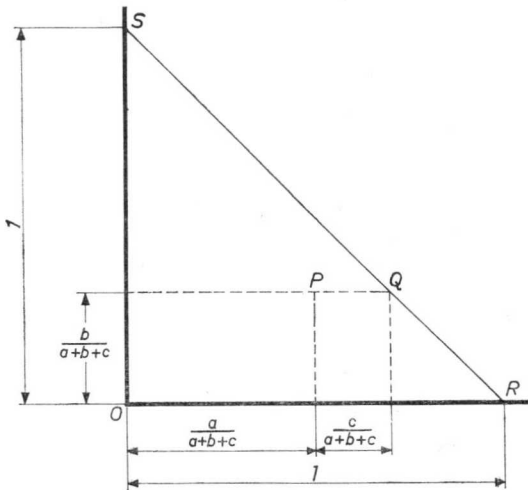


Fig. 13.

aalde kleur vastlegt.  $P$  is het „kleurpunt“ van de lichtsoort waarvoor de oogreceptoren respectievelijk de waarden  $a$ ,  $b$  en  $c$  hebben gevonden.

In fig. 13 hebben we deze tekening herhaald, waarbij in plaats van  $h$  en  $v$  de verhoudingen van de waarden  $a$ ,  $b$  en  $c$  zijn gebruikt. We hebben in deze figuur ook

#### H. IV. KLEURENDRIEHOEKEN

nog de verhouding  $\frac{c}{a+b+c}$  in horizontale richting uitgezet. Daardoor komen we aan een punt Q. Dit punt Q heeft als horizontale afstand  $\frac{a}{a+b+c} + \frac{c}{a+b+c}$ , en als verticale afstand  $\frac{b}{a+b+c}$ . De som van de horizontale en de verticale afstanden tot de assen is dus voor Q gelijk aan één. Dit betekent, dat Q ligt op een lijn onder  $45^\circ$ , die twee, respectievelijk op de horizontale en de verticale as gelegen punten R en S verbindt, welke punten beide een afstand één verwijderd zijn van het snijpunt O van de beide assen. De driehoek ORS bevat alle punten die de verhoudingen

$\frac{a}{a+b+c}$ ,  $\frac{b}{a+b+c}$  en  $\frac{c}{a+b+c}$  vastleggen, indien voor a, b en c willekeurige waarden worden genomen, die groter dan of gelijk aan nul zijn.

Alle kleurpunten liggen dus binnen deze driehoek.

Bij het bespreken van de X-Y-Z-driehoek zullen we echter zien, dat lang niet alle punten binnen deze driehoek ook werkelijk kleurpunten kunnen zijn.

In het vorige hoofdstuk zagen we, dat er een groot aantal stellen van telkens drie op elkaar afgestemde kleurgevoeligheden zijn, welke alle gebruikt kunnen worden om vast te leggen hoe de menselijke gezichtszin op de verschillende lichtsoorten reageert. Ieder van deze stellen kleurgevoeligheden kan gebruikt worden om de kleurpunten van de verschillende lichtsoorten vast te leggen. Ieder stel geeft een kleurendriehoek met een eigen vorm. Bij de wetenschappelijke studie over de gezichtszin zijn in de loop der

jaren vele kleurendriehoeken gebruikt, vaak met het doel om een bepaald facet van de gezichtszin te kunnen bestuderen. Voor sommige van deze driehoeken is niet gemakkelijk aan te geven op welk stel kleurgevoeligheden ze gebaseerd zijn. Voor de X-Y-Z-kleurendriehoek van de C.I.E., die we voor onze verdere studie willen gebruiken, is het stel kleurgevoeligheden echter wel duidelijk vastgelegd.



## Hoofdstuk V

### DE KLEURENDRIEHOEK VOLGENS HET X-Y-Z-SYSTEEM VAN DE C.I.E.

Van de kleurendriehoeken zullen we dus slechts bespreken de bij uitstek praktische X-Y-Z-kleurendriehoek, die door de Commission Internationale de l'Eclairage in 1931, na zeer consciëntieus onderzoek, officieel werd aanvaard en nu reeds meer dan 25 jaar in de praktijk wordt gebruikt.

In het internationale gesprek over kleuren wordt deze driehoek altijd gebruikt, zodat het ook om die reden de moeite waard is nader over dit systeem van aanduiding van „kleuren volgens het oog” georiënteerd te zijn.

In dit systeem is het gebruikelijk de drie gevoeligheden aan te duiden met de hoofdletters X, Y en Z, ieder voorzien van een horizontale streep erboven, dus  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  en  $\bar{Z}$ . De X-Y-Z-kleurendriehoek van de C.I.E. heeft dus als basis de  $\bar{X}$ -gevoeligheid van de  $\bar{X}$ -receptoren, die we ook de *rood-receptoren* kunnen noemen, de  $\bar{Y}$ -gevoeligheid van de  $\bar{Y}$ -receptoren, die we ook de *groenreceptoren* kunnen noemen, en de  $\bar{Z}$ -gevoeligheid van de  $\bar{Z}$ -receptoren, die we ook de *blauwreceptoren* kunnen noemen.

De gevoeligheid van ieder van de receptorsoorten is nu

zo omschreven, dat er voor iedere spectrale lichtsoort een  $\bar{X}$ -factor vastligt, welke  $\bar{X}$ -factor niets anders is dan de hierboven reeds genoemde roodfactor, waarmee de energie van die spectrale lichtsoort vermenigvuldigd moet worden om tot de roodhoeveelheid te komen. Het is gebruikelijk deze roodhoeveelheid aan te duiden met  $X$  (dus zonder streep).

We zagen in het voorafgaande, dat voor een lichtsoort die uit verschillende spectrale lichtsoorten bestaat, de receptoren de roodhoeveelheden van al die spectrale lichtsoorten sommeren.

Wij moeten dus ook de  $X$ -waarden van die spectrale lichtsoorten optellen om de totale  $X$  van zo'n samengestelde lichtsoort te bepalen.

Mutatis mutandis kan hetzelfde van de  $\bar{Y}$  en de  $\bar{Z}$  worden gezegd, en zijn we in staat om van iedere lichtsoort de  $X$ ,  $Y$  en  $Z$  te bepalen.

We moeten nu de onderlinge verhoudingen van de  $X$ ,  $Y$  en  $Z$  kennen. Dit gaat op dezelfde manier als we reeds in het vorige hoofdstuk bespraken. Het is daarbij gebruikelijk de verhouding:

$$\frac{X}{\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}} \quad \text{te noemen: } x,$$

en verder

$$\frac{Y}{\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}} \quad \text{door } y, \text{ en}$$

$$\frac{Z}{\bar{X} + \bar{Y} + \bar{Z}} \quad \text{door } z \text{ aan te duiden.}$$

Als van elkaar onafhankelijke verhoudingen kunnen we nu kiezen de combinatie van  $x$  en  $y$ , van  $x$  en  $z$  of van  $y$  en  $z$ . In de literatuur zal men al deze variaties gebruikt zien. Wij willen ons echter beperken tot één combinatie, omdat we, zoals we ook in de inleiding hebben gezegd, de kleurendriehoek mogen beschouwen als de landkaart van de aardrijkskundefles. De leraar tracht de leerlingen de vorm van het land in het hoofd te prenten, zodat ze snel de verschillende plaatsen kunnen vinden en zich op de kaart kunnen oriënteren. Dit zich oriënteren op de kleurendriehoek zou niet bevorderd worden als we in onze beschouwing driehoeken gebruikten die gebaseerd zijn op verscheidene combinaties. We kiezen dus de meest gangbare methode, waarbij een rechthoekig \*) assenkruis wordt gebruikt, en de  $x$  wordt afgezet langs de horizontale as en de  $y$  langs de verticale, en we verwachten, dat men zich na ons verder betoog even goed thuis zal voelen op deze driehoek als de leerlingen op de landkaart.

Punt  $P$  in fig. 14 is het voorbeeld van een kleurpunt, en wel van de „kleur volgens het oog”, waarvan  $x = 0,5$  en  $y = 0,3$ , terwijl  $z = 0,2$ . Ook de  $z$  kan men, zoals we in het vorige hoofdstuk reeds zagen, uit de figuur aflezen, door vanuit  $P$  een horizontale of een verticale lijn te trekken naar de hypotenusa van de driehoek. De  $z$  is dan de afstand, langs één van deze lijnen gemeten, van  $P$  naar het snijpunt van die lijn met de hypotenusa.

Voor alle punten langs de horizontale as (de  $x$ -as) is de  $y = 0$ , voor alle punten langs de verticale as (de  $y$ -as) is

---

\*) Soms wordt de driehoek als gelijkzijdige driehoek getekend, om de gelijkwaardigheid van  $x$ ,  $y$  en  $z$  duidelijk te doen uitkomen.

de  $x = 0$ , en voor alle punten van de hypothenusa is de  $z = 0$ .

In de driehoek stelt het punt P grafisch een bepaalde „kleur volgens het oog” voor. We spreken dus van P als van het kleurpunt van die „kleur volgens het oog”.

We mogen echter ook P het kleurpunt van een bepaalde lichtsoort noemen. Dit zal een lichtsoort zijn die is samengesteld uit verschillende spectrale lichtsoorten. We weten dat een bepaalde „kleur volgens het oog” bereikt kan worden met verscheidene lichtsoorten, waarvan de spectrale samenstelling onderling enorm verschillen kan. Het omgekeerde is echter niet het geval: men kan voor

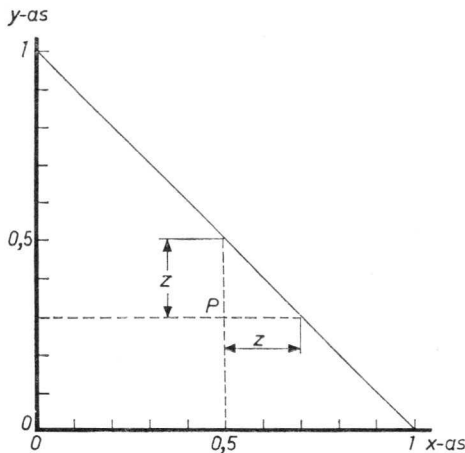


Fig. 14.

een bepaalde lichtsoort nooit verscheidene „kleuren volgens het oog” vinden. Iedere lichtsoort heeft dus haar „kleur volgens het oog” en dus ook haar kleurpunt in de kleuren-driehoek. Er is echter een groot aantal lichtsoorten, ieder met een eigen spectrale samenstelling, die, omdat ze de-

zelfde „kleur volgens het oog” hebben, allemaal evenveel recht hebben op één zelfde kleurpunt. Door een opgave van het kleurpunt is dus de spectrale verdeling van de energie van de lichtsoort nog helemaal niet vastgelegd. Wanneer we echter de spectrale verdeling van de energie van een lichtsoort kennen, ligt daarvoor wél het kleurpunt vast.

Omdat de meeste lichtbronnen in alle richtingen licht van dezelfde spectrale samenstelling uitstralen, kan men voor die lichtbronnen dus ook spreken van „het kleurpunt van de lichtbron”.

Kunnen nu ook *alle* punten, binnen de driehoek getekend, kleurpunten zijn?

Neen, beslist niet. Of punten van de driehoek kleurpunten kunnen zijn hangt immers samen met de gevoeligheid van de drie soorten receptoren voor de diverse spectrale lichtsoorten. Omdat de  $\bar{X}$ -factor voor geen enkele spectrale lichtsoort geheel nul is, zal geen enkel punt van de  $y$ -as een kleurpunt kunnen zijn. Ditzelfde geldt voor  $\bar{Y}$ -factor, en dus kan ook van  $x$ -as geen enkel punt een kleurpunt zijn. Met de  $Z$ -factor staat het anders; deze is voor een groot deel van het spectrum nul, zodat dus op de hypothetusa een groot aantal kleurpunten ligt.

In fig. 15 (zie uitslagblad achter in het boek) hebben we de kleurendriehoek getekend, met daarin de figuur waarbinnen zich alle bestaande kleurpunten bevinden. Het deel van de driehoek waarin geen bestaande kleurpunten liggen, hebben we dubbel gearceerd. Om de tekening groter te kunnen reproduceren, hebben we het deel van de driehoek met waarden voor  $x$  groter dan 0,76, dat toch dubbel gearceerd was, laten vervallen.

Het ongearceerde deel van de driehoek van fig. 15 is dus het gebied dat alle bestaanbare kleurpunten bevat. Omgekeerd kunnen we ook zeggen: ieder punt van dit gebied is het kleurpunt van een of meer lichtsoorten. De kleurpunten van alle spectrale lichtsoorten bevinden zich op de grenslijn van het gebied van de bestaanbare kleurpunten. Deze grenslijn bestaat uit een enigszins hoefijzervormig gebogen lijn V D F K H N R, die de kleurpunten van alle spectrale lichtsoorten bevat, en een rechte afsluitingslijn tussen de kleurpunten V en R van respectievelijk de spectrale lichtsoorten met golflengten 380 en 780  $m\mu$ . De enigszins hoefijzervormig gebogen lijn zullen we korthedshalve de „spectrumkromme” noemen, terwijl de naam van de rechte afsluitingslijn de „purperlijn” is. Op deze lijn liggen namelijk de kleurpunten van de *purpers* die mengsels zijn van de meest langgolelige rode spectrale lichtsoorten met de meest kortgolelige violette spectrale lichtsoorten.

Een belangrijke eigenschap van de punten van de kleuren-driehoek, waarvan we in de volgende hoofdstukken telkens gebruik zullen maken, geeft de mogelijkheid om op eenvoudige wijze het kleurpunt te bepalen van een mengsel van twee of meer lichtsoorten waarvan de kleurpunten bekend zijn. De hiervoor geldende regel is eenvoudig en toe-pasbaar op *alle* lichtsoorten, dus zowel op enkelvoudige spectrale lichtsoorten als op lichtsoorten waarvan de energie over vele spectrale lichtsoorten is verdeeld. Stel, dat de punten  $P_1$  en  $P_2$  van fig. 16 de kleurpunten zijn van twee lichtsoorten die gemengd worden. Het kleurpunt  $P_m$  van het mengsel ligt dan altijd op de verbindingslijn van  $P_1$  en  $P_2$ . Het is duidelijk, dat de plaats van  $P_m$  op deze verbin-

dingslijn afhankelijk is van de hoeveelheid stralingsenergie die het mengsel bevat van ieder van de lichtsoorten die gemengd worden. Als de stralingsenergie van de lichtsoort met kleurpunt  $P_1$  overheerst, zal  $P_m$  dicht bij  $P_1$  liggen.

\* In fig. 17 hebben we voor iedere golflengte de  $\bar{X}$ -,  $\bar{Y}$ - en  $\bar{Z}$ -factoren uitgezet. Deze factoren hebben geen dimensie, omdat het alleen getallen zijn waarmee voor iedere golflengte de stralingsenergie vermenigvuldigd moet worden om te komen tot de X (roodhoeveelheid),

Y (groenhoeveelheid), en Z (blauwhoeveelheid). Dit zijn dus de kleurgevoeligheidskrommen\*), waarop de X-Y-Z-kleurendriehoek gebaseerd is. De kromme van de  $\bar{Y}$ -factor komt geheel overeen met de ooggevoeligheidskromme voor licht, welke aan de fotometrie ten grondslag ligt.

\* Bij de bespreking van fig. 3 in Hoofdstuk II blz. 13 zagen we, dat de energie-golflengtekromme ook curve van de spectrale dichtheid van de stralingsenergie genoemd kan worden, omdat voor iedere golflengte de spectrale dichtheid van de stralingsenergie aangegeven wordt. Door nu deze spectrale dichtheid van de stralingsenergie van iedere golflengte te vermenigvuldigen met de daarbij behorende  $\bar{X}$ -factor, krijgen we een X-golf-

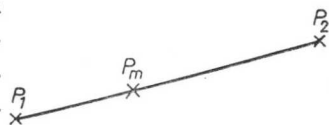


Fig. 16.

\*) In de literatuur worden deze kleurgevoeligheidskrommen vaak genoemd „distributiekrommen van het spectrum van gelijke energie“. Op de betekenis van deze weinig duidelijke naam, welke verband houdt met het historisch ontstaan van de kleurendriehoeken, zullen we niet ingaan.

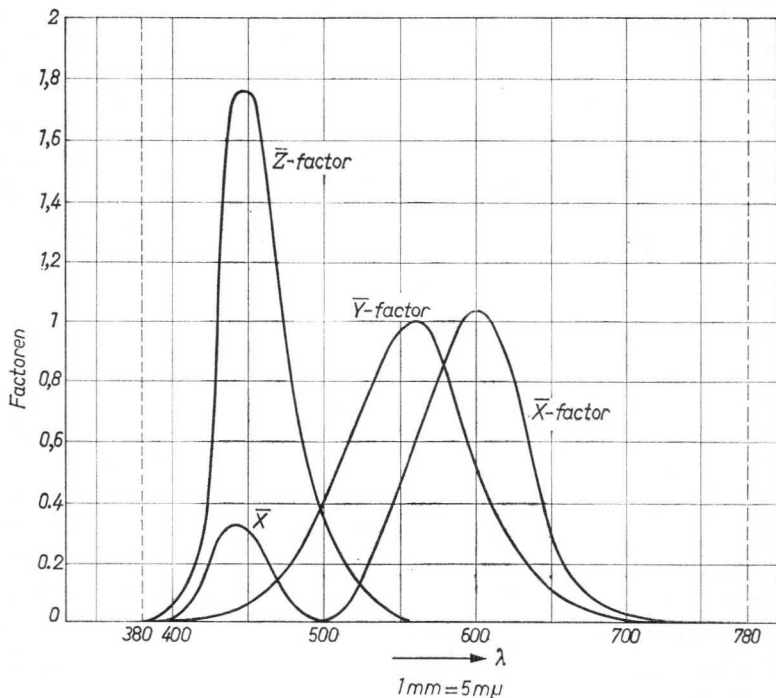


Fig. 17. Kleurgevoeligheidskrommen waarop de C.I.E.-kleurendriehoek gebaseerd is. De kromme van de  $\bar{Y}$ -factor komt geheel overeen met de ooggevoeligheidskromme voor licht, welke aan de fotometrie ten grondslag ligt.

lengtekromme, want de kromme geeft aan hoeveel X per  $m\mu$  er voor iedere golflengte aanwezig is. Het oppervlak van deze kromme geeft de totale X van de lichtsoort aan. In fig. 18 hebben we dit in beeld gebracht, zowel voor de X, de Y als de Z van de lichtbron, waarvan we in fig. 3 de energie-golflengtekromme gaven.



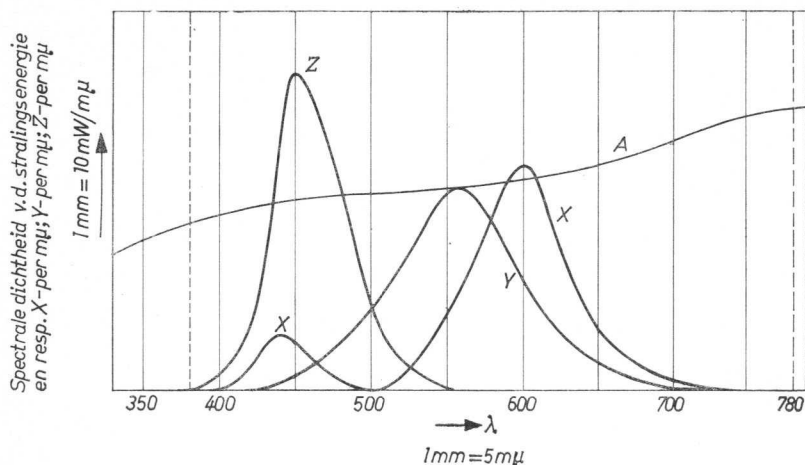


Fig. 18. X-, Y- en Z-golflengtekrommen van de lichtbron met energie-golflengtekromme A, die we ook reeds in fig. 3 gaven.

Men kan dus, door het oppervlak van die drie krommen op te meten, de X, Y en Z van die lichtbron bepalen. Deze X, Y en Z geven ons, zoals we in de hoofdstuk zagen, de x, de y en de z, dus het kleurpunt van de lichtbron.

\* In Hoofdstuk II bespraken we hoe lichtsoorten gemengd worden. Het voorbeeld van fig. 10 toonde hoe men uit de energie-golflengtekromme van de straling die door het mengscherm van ieder van de lichtsoorten wordt opgevangen, de energie-golflengtekromme van het door het mengscherm teruggekaatste licht kan vinden.

\* Uit deze energie-golflengtekromme kunnen we nu dus ook het kleurpunt van het lichtmengsel bepalen.

\* Met behulp van de C.I.E.-kleurendriehoek kunnen we dit echter gemakkelijker doen. In de hoofdtekst deelden we reeds mede, dat het kleurpunt van het mengsel van twee lichtsoorten altijd ligt op de verbindingslijn van de kleurpunten van de beide lichtsoorten (fig. 16). Deze eigenschap volgt uit het feit, dat de X-, Y- en Z-waarden van een lichtmengsel evenredig zijn met de gesommeerde X-, Y- en Z-waarden van de lichtsoorten waaruit het mengsel is samengesteld, en verder uit de mathematische opbouw van de kleurendriehoek. Op deze basis kan men ook berekenen, dat voor de afstanden  $P_1P_m$  en  $P_mP_2$  (zie fig. 16) de volgende formule geldt:

$$\frac{P_1 P_m}{P_m P_2} = \frac{X_2 + Y_2 + Z_2}{X_1 + Y_1 + Z_1} \quad (1)$$

waarin  $X_1, Y_1$  en  $Z_1$  en  $X_2, Y_2$  en  $Z_2$  respectievelijk de kleurhoeveelheden zijn van de door het mengscherm opgevangen straling van de beide lichtsoorten.

\* De C.I.E.-kleurendriehoek heeft nu het praktische voordeel, dat de kromme van de  $\bar{Y}$ -factor gelijk gekozen is aan de ooggevoeligheidskromme waarmee de spectrale verdeling van de *energie* omgerekend wordt op de spectrale verdeling van het *licht*. De Y van een bepaalde lichtsoort is daardoor gelijk aan de lichtstroom  $\emptyset$ .

\* Voor de straling van de beide te mengen lichtsoorten op het scherm weten we dus dat:

$$Y_1 : Y_2 = \emptyset_1 : \emptyset_2. \quad (2)$$

Nu is bekend dat, per definitie:

$$y_1 = \frac{Y_1}{X_1 + Y_1 + Z_1} \quad \text{en} \quad y_2 = \frac{Y_2}{X_2 + Y_2 + Z_2} .$$

Beide formules kunnen we omvormen tot:

$$\frac{X_2 + Y_2 + Z_2}{X_1 + Y_1 + Z_1} = \frac{Y_1}{y_2} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} ;$$

Met gebruikmaking van (2) kunnen we ook schrijven:

$$\frac{X_2 + Y_2 + Z_2}{X_1 + Y_1 + Z_1} = \frac{y_1}{y_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1} ,$$

en met gebruikmaking van (1):

$$\frac{P_1 P_m}{P_m P_2} = \frac{y_1}{y_2} \cdot \frac{\phi_2}{\phi_1} ; \tag{3}$$

- \* Dit betekent dus dat, wanneer we van twee lichtsoorten de kleurpunten kennen ( $x_1, y_1$  en  $x_2, y_2$ ), als ook de verhouding van de lichtstromen die van ieder van de beide lichtsoorten door het scherm worden opgevangen, de plaats van het kleurpunt  $P_m$  op de verbindinglijn  $P_1P_2$  door deze eenvoudige formule (3) is bepaald.

Fig. 15. X-Y-Z-kleurendriehoek van de C.I.E. met „spectrumkromme” VDFKHNR, witpunt E, en zwarte-lichaam lijn 2000-6500 °K.

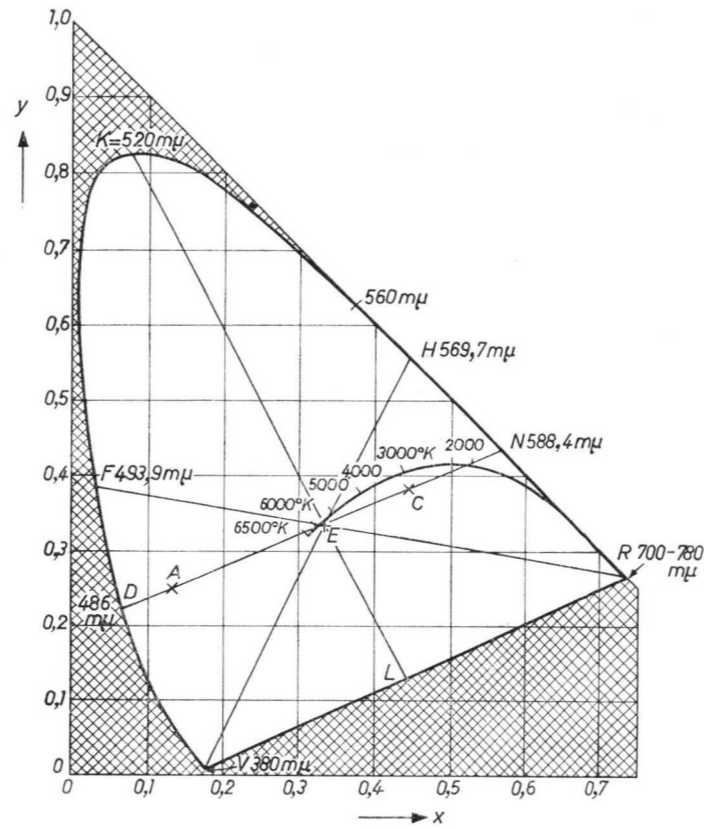


Fig. 15

Fig. 19. X-Y-Z-kleurendriehoek van de C.I.E. met aanduiding van de ligging van de „vakjes van Bouma” 4, 5, 6, 7 op de „spectrumkromme”.

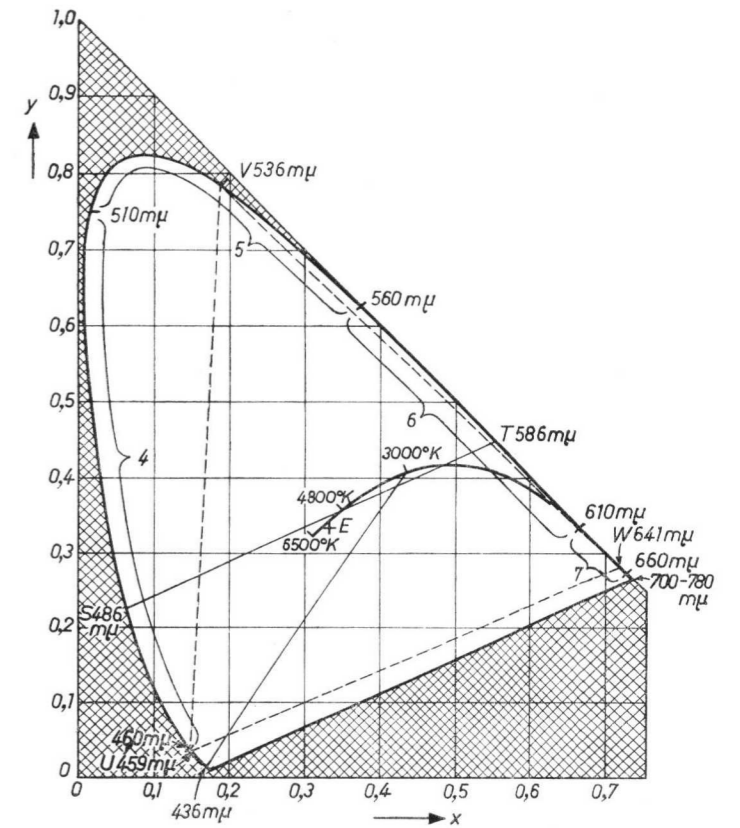


Fig. 19

Fig. 20. Het violette uiteinde van de „spectrumkromme” op de C.I.E.-kleurendriehoek met „vakjes van Bouma” 1, 2, 3.

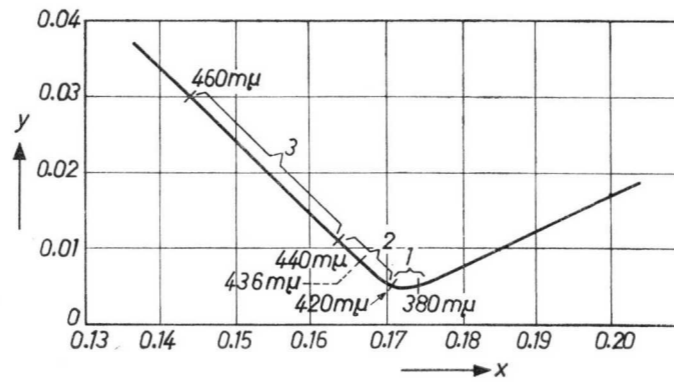


Fig. 20

Fig. 21. Het rode uiteinde van de „spectrumkromme” op de C.I.E.-kleurendriehoek met „vakjes van Bouma” 7 en 8.

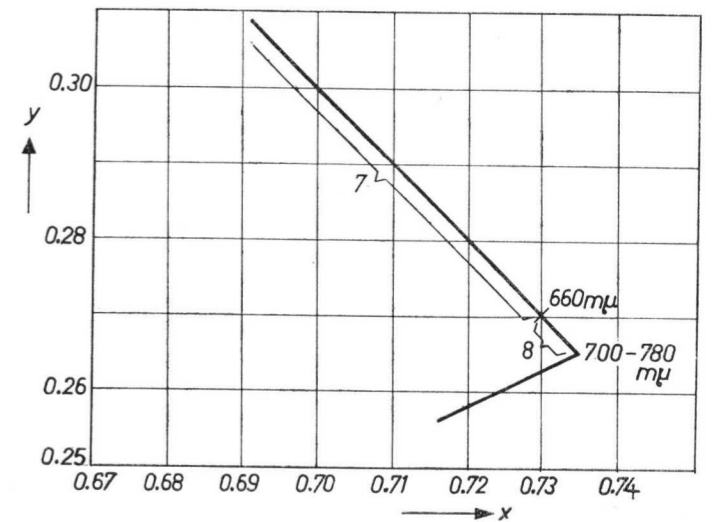


Fig. 21

## Hoofdstuk VI

### HET WITPUNT, EIGENSCHAPPEN VAN DE SPECTRUMKROMME EN COMPLEMENTAIRE LICHTSOORTEN

In het midden van de C.I.E.-kleurendriehoek (fig. 15) is een punt aangegeven met de letter E. Dit is het *witpunt*. Hiervan zijn de  $x$ , de  $y$  en de  $z$  aan elkaar gelijk, en dus is ieder  $1/3$ . Voor dit mengsel van spectrale lichtsoorten zijn dus de X-waarde, de Y-waarde en de Z-waarde aan elkaar gelijk. Een van de *zeer vele* lichtsoorten die dit punt als kleurpunt hebben is de lichtsoort die bestaat uit een mengsel van spectrale lichtsoorten die alle gelijke energie bezitten.

We onderstreepten in de vorige alinea de woorden *zeer vele*. Na hetgeen we in het vorige hoofdstuk gezegd hebben over het bepalen van het kleurpunt van een mengsel van lichtsoorten, zal het duidelijk zijn dat de kleurpunten die dicht bij het midden van de kleurendriehoek liggen, de grootste variatie bezitten voor wat betreft de spectrale samenstelling van de lichtsoorten waarvan de „kleur volgens het oog” door die kleurpunten wordt voorgesteld. Voor de meer aan de rand van de kleurendriehoek gelegen kleurpunten is deze variatie kleiner. Dit wordt het duidelijkst voor de punten die op de spectrumkromme liggen.

## H. VI. HET WITPUNT

Nemen we als voorbeeld het kleurpunt van de spectrale lichtsoort met golflengte  $520 \text{ m}\mu$  (gelegen geheel bovenaan in de spectrumkromme). Doordat de spectrumkromme hier sterk gekromd is, kan dit slechts het kleurpunt zijn van de spectrale lichtsoort met de genoemde golflengte. Het is immers onmogelijk door dit punt een rechte lijn te trekken, waarvan de beide einden bestaande kleurpunten bevatten. Door het mengen van lichtsoorten met andere kleurpunten kunnen we dus nooit tot dit kleurpunt komen.

We gaven dit punt als voorbeeld, omdat de spectrumkromme hier het sterkst gebogen is. Het betoog gaat echter precies zo op voor de punten waar de kromming van de spectrumkromme minder sterk is. Voor het praktisch rechte stuk van ongeveer  $560 \text{ m}\mu$  tot  $780 \text{ m}\mu$  geldt het echter niet. Alle lichtsoorten namelijk, die zijn samengesteld uit spectrale lichtsoorten met golflengten tussen de  $560$  en  $780 \text{ m}\mu$  (dit is dus de helft van het zichtbare spectrum) hebben hun kleurpunten op de spectrumkromme. Het is dus onmogelijk om met lichtsoorten die uitsluitend zijn samengesteld uit spectrale lichtsoorten van deze helft van het spectrum, het witpunt (E) als kleurpunt te bereiken.

Als men twee lichtsoorten met elkaar mengt, en het mengsel heeft E als kleurpunt, dan noemt men die twee lichtsoorten *complementaire lichtsoorten*.

We kunnen een enorm groot aantal paren complementaire lichtsoorten maken. Daarvoor behoeven we slechts binnen het oppervlak van de kleurendriehoek lijnen van een willekeurige lengte door het witpunt te trekken. De eindpunten van ieder van deze lijnen zijn de kleurpunten van een stel complementaire lichtsoorten. Als voorbeeld hebben we in fig. 15 de lijn AC getekend. Om door mengen

van twee complementaire lichtsoorten het witpunt te bereiken, moet men er wel op letten de juiste verhouding van de lichthoeveelheid van de beide soorten te nemen, zodat het mengsel ook werkelijk zijn kleurpunt in E krijgt.

Wanneer men deze lijnen door het witpunt doortrekt tot de spectrumkromme, bijvoorbeeld DN, dan krijgt men twee spectrale lichtsoorten, namelijk de lichtsoorten met een golflengte van  $486\text{ m}\mu$  (D) en  $588,4\text{ m}\mu$  (N) die elkaars complementaire *spectrale* lichtsoorten zijn. Een in juiste verhouding samengesteld mengsel van deze spectrale lichtsoorten heeft dus zijn kleurpunt in E. De „kleur volgens het oog” van dit mengsel van twee spectrale lichtsoorten is dus gelijk aan de „kleur volgens het oog” van alle lichtsoorten die hun kleurpunt in E hebben. Alhoewel ze dus voor het oog gelijk zijn, is er natuurkundig een enorm verschil tussen deze lichtsoorten.

Dit natuurkundige verschil springt direct naar voren als we de beide lichtsoorten gaan gebruiken, niet voor het verlichten van een *wit* scherm, maar voor het verlichten van gekleurde voorwerpen. Dan blijkt, zoals we nog nader in Hoofdstuk IX zullen zien, de *kleurweergave* van deze beide lichtsoorten volkomen te verschillen.

Lang niet alle spectrale lichtsoorten hebben een enkelvoudige complementaire spectrale lichtsoort. In fig. 15 hebben we de lijnen RF en VH getekend, waarmede de punten F en H worden bepaald, welke de kleurpunten zijn van de complementaire spectrale lichtsoorten voor respectievelijk het uiterst langgolvlige rood (golflengte van de complementaire kleur  $493,9\text{ m}\mu$ ) en het uiterst kortgolvlige violet (golflengte van de complementaire kleur  $569,7\text{ m}\mu$ ). Alle spectrale lichtsoorten tussen F en H ( $493,9\text{ m}\mu$  en  $569,7\text{ m}\mu$ )

## H. VI. HET WITPUNT

bezitten geen enkelvoudige spectrale lichtsoort als complementaire kleur. Voor al deze lichtsoorten eindigt immers een lijn die vanuit hun kleurpunt over het witpunt wordt getrokken in de purperlijn.

Als voorbeeld hebben we in fig. 15 de lijn KL getrokken. Men mag dus de „kleur volgens het oog” van het kleurpunt L beschouwen als een complementaire kleur van de spectrale lichtsoort met golflengte  $520 \text{ m}\mu$  (kleurpunt K). Het kleurpunt L is echter gelegen op de purperlijn die, zoals we reeds schreven, de kleurpunten bevat van de mengsels van de uiterst langgolvlige (rode) en de uiterst kortgolvlige (violette) spectrale lichtsoorten. Het kleurpunt L behoort dus ook bij een mengsel van de genoemde uiterste spectrale lichtsoorten, en er is geen enkelvoudige spectrale lichtsoort die complementaire kleur kan zijn voor de spectrale lichtsoort met kleurpunt K.



## Hoofdstuk VII

### KLEURTEMPERATUUR VAN LICHTBRONNEN

In fig. 15 hebben we nog een kromme lijn getekend, welke op korte afstand langs het witpunt loopt. Op deze lijn staan bij diverse punten de getallen 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 en 6500 vermeld. Dit is de z.g. „zwarte-lichaam lijn”. Op deze lijn liggen namelijk de kleurpunten van het zwarte lichaam. De vermelde getallen zijn de graden Kelvin \*) van de temperatuur waarop het zwarte lichaam de straling uitzendt, waarvan het kleurpunt het overeenkomstige punt van de kromme is.

Juist als voor het witpunt, geldt natuurlijk ook voor ieder van de punten van de zwarte-lichaam lijn, dat er *zeer vele* lichtsoorten zijn met onderling sterk afwijkende spectrale samenstelling, die alle hun kleurpunt hebben in dat betreffende punt van de zwarte-lichaam lijn. De spectrale verdeling van de energie van het zwarte lichaam is dus maar één van die *zeer vele*. Onder deze *zeer vele* verdelingen van de energie zijn er ook een groot aantal die slechts uit twee spectrale lichtsoorten bestaan.

---

\*) Zie voetnoot \*) op blz. 12.

## H. VII. KLEURTEMPERATUUR VAN LICHTBRONNEN

De kleurpunten van de verschillende bekende temperatuurstralers liggen alle zeer dicht in de buurt van de zwarte-lichaam lijn. Alhoewel dit lang niet betekent dat ook de spectrale verdeling van de energie van zo'n temperatuurstraler overeen zou komen met de spectrale verdeling van de energie van het zwarte lichaam, heeft men toch voor de temperatuurstralers het begrip „kleurtemperatuur” ingevoerd.

Deze kleurtemperatuur is de temperatuur die het zwarte lichaam moet hebben om ongeveer hetzelfde kleurpunt te hebben als de beschouwde temperatuurstraler. Het gloeilichaam van een gloeilamp heeft dus een werkelijke temperatuur en een kleurtemperatuur. De kleurtemperatuur van een gloeilamp ligt altijd ongeveer 30 à 50° boven de werkelijke temperatuur.

Voor "TL" lampen wordt het begrip kleurtemperatuur ook gebruikt. Daar is het verschil tussen de werkelijke temperatuur van het stralende deel van de lamp (de fluorescerende laag met een temperatuur van 40 °C, ofwel 313 °K) en de kleurtemperatuur die altijd hoger is dan 2800 °K, maar soms zelfs 6500 °K bedraagt, enorm groot.

Het begrip kleurtemperatuur van een lichtbron heeft dus niets te maken met de temperatuur die enig deel van de lichtbron bij het functioneren verkrijgt, en geeft slechts een indicatie omtrent de „kleur volgens het oog” van de lichtuitstraling. Deze wordt immers vastgelegd door vergelijking met de „kleur volgens het oog” van een goed gedefinieerde lichtbron (het zwarte lichaam) van een bepaalde temperatuur.

In plaats van de ingeburgerde gewoonte om van een lichtbron te zeggen dat deze bijvoorbeeld een „kleur-

temperatuur van 3000 °K" heeft, zou het dus correcter zijn te zeggen, dat de lichtbron een „3000 °K zwarte-lichaam kleur" heeft, wat afgekort ook genoemd zou kunnen worden „3000 °K kleur".

## Hoofdstuk VIII

### DOMINERENDE GOLFLENGTE EN VERZADIGINGSGRAAD

Deze beide begrippen zal men ongetwijfeld in de praktijk tegengekomen zijn. Het is daarom goed ook hieraan enkele woorden te wijden.

We zagen in Hoofdstuk V, dat de spectrumkromme en de purperlijn samen in de kleurendriehoek de gesloten grenslijn vormen tussen het gebied van de bestaansbare kleurpunten en het (in fig. 15 gearceerde) gebied van punten die geen kleur kunnen voorstellen.

De grens tussen een gebied waar iets bestaan kan en het gebied waar dit niet meer mogelijk is, is soms een geleidelijke overgang.

Men kan dan spreken van een geleidelijk afsterven. Een voorbeeld daarvan zijn de beide grenzen van de gevoeligheid van het oog, zowel naar het gebied van de lange golven (infrarood) als naar dat van de korte golven (ultraviolet). De ooggevoeligheid sterft daar geleidelijk af. In verscheidene publicaties worden dan ook de grenzen van het gebied van de zichtbare spectrale lichtsoorten niet altijd met dezelfde golflengten aangegeven.

De grenslijn van de kleurendriehoek toont een totaal

ander effect. Daar is geen sprake van geleidelijk afsterven van de kleur; omgekeerd: de meest felle kleuren komen juist aan de grenslijn voor.

De spectrale lichtsoorten, die hun kleurpunt hebben op de enigszins hoefijzervormig gebogen spectrumkromme, hebben dan ook alle felle en door iedereen als „mooi” betitelde „kleuren volgens het oog”. Dit geldt ook voor de purperlijn. Dit laatste lijkt zo zonder verklaring misschien iets wonderlijks, omdat:

- a) de ooggevoeligheid naar de beide einden van het spectrum geleidelijk afsterft, zodat er zelfs geen nauwkeurige begrenzing van het zichtbare spectrum aan te geven is, en
- b) de lichtsoorten die hun kleurpunt op de purperlijn hebben, juist mengsels zijn van de spectrale lichtsoorten van deze beide einden van het spectrum.

Om dit te begrijpen is het goed eens nader te beschouwen wat er aan de einden van het zichtbare spectrum gebeurt. Bekijken we bijvoorbeeld achtereenvolgens de spectrale lichtsoorten met een golflengte van respectievelijk 700, 740 en 780  $m\mu$ , dan zien we dat de ooggevoeligheid aan dit einde van het zichtbare spectrum sterk afneemt. Het blijkt zelfs, dat de hoeveelheden stralingsenergie die nodig zijn om voor de drie genoemde spectrale lichtsoorten een gelijke helderheid voor het oog te verkrijgen, zich verhouden als respectievelijk 1 : 16 : 270.

Het blijkt echter ook, dat de „kleur volgens het oog” van deze spectrale lichtsoorten praktisch dezelfde is. In de kleurendriehoek van fig. 15 kunnen we zelfs geen aparte kleurpunten meer aangegeven voor deze spectrale lichtsoorten.

## H. VIII. DOMINERENDE GOLFLENGTE EN VERZADIGINGSGRAAD

De ooggevoeligheid gaat dus in dit gebied wel snel achteruit (men heeft dus meer energie nodig van de lichtsoorten met langere golflengten); de kleur verbleekt echter geenszins: het blijft dezelfde felrode „kleur volgens het oog”. Ditzelfde geldt voor het andere einde van het spectrum; ook daar heeft men veel meer energie nodig voor de lichtsoorten met kortere golflengte, maar de „kleur volgens het oog” blijft ongeveer gelijk en duidelijk violet.

Dit alles is begrijpelijk wanneer men bedenkt, dat de „kleur volgens het oog” alleen wordt bepaald door de verhouding van de kleurhoeveelheden die door de drie soorten oogreceptoren gevonden worden, en niet door de absolute grootte van deze hoeveelheden.

De kleurpunten in het midden van de kleurendriehoek, dicht bij het witpunt, behoren dus bij lichtsoorten die geen sterk uitgesproken „kleur volgens het oog” hebben. Hoe dichter de kleurpunten echter bij de rand van het gebied van de bestaانبare kleurpunten komen, hoe feller de „kleur volgens het oog” van de bijbehorende lichtsoorten wordt.

Wanneer men zich van een bepaalde lichtsoort, waarvan het kleurpunt in  $x$ - en  $y$ -coördinaten gegeven wordt, een voorstelling omtrent de „kleur volgens het oog” wil maken, dan zeggen dus deze coördinaten heel weinig, en moet men eerst het kleurpunt in de driehoek tekenen.

Om tegemoet te komen aan het bezwaar van dit tekenwerk, bestaat er een andere methode van *kleurpuntaanduiding*, welke gebaseerd is op:

- a) de dominerende golflengte en
- b) de verzadigingsgraad.

De „kleur volgens het oog” van een lichtsoort die haar

kleurpunt in A (zie fig. 15) heeft, wordt in dit systeem als volgt omschreven. Een vanuit het witpunt E naar A getrokken lijn snijdt de spectrumkromme in D. Dit betekent dus, dat we de „kleur volgens het oog” van het kleurpunt A kunnen maken door licht met kleurpunt E (ongekleurd licht dus) en licht met kleurpunt D (licht van de spectrale lichtsoort met golflengte  $486 \text{ m}\mu$ ) te mengen. De „kleur volgens het oog” van kleurpunt A kan men zich dus opgebouwd denken uit een bepaald percentage wit (ongekleurd) licht en een percentage licht van een bepaalde spectrale lichtsoort. Deze spectrale lichtsoort domineert dus in dit mengsel en geeft er de „kleurtoon” aan. Haar golflengte noemen we daarom de „dominerende golflengte”.

De „verzadigingsgraad” nu is het percentage licht van de dominerende spectrale lichtsoort in de totale hoeveelheid licht.

Voor licht van het kleurpunt E is dus de verzadigingsgraad nul: geen enkele spectrale lichtsoort domineert daarin. Voor licht van kleurpunt D is de verzadigingsgraad één. Zo is voor alle punten van de spectrumkromme de verzadigingsgraad één.

Het voordeel van deze kleuraanduiding is duidelijk. Men krijgt onmiddellijk een indruk van de lichtsoort waar het om gaat, zowel wat betreft de felheid (de verzadigingsgraad) als de „kleurtoon” (dominerende golflengte). Dit voordeel is van zo grote betekenis, dat deze methode van kleuraanduiding zich heeft weten te handhaven naast het op ooggevoeligheid gebaseerde systeem van de C.I.E.; dit laatste is echter voor berekeningen en metingen toch beslist praktischer.

## Hoofdstuk IX

### KLEURWEERGAVE

Dit onderwerp hebben we reeds een paar maal aangeroerd. Daarbij kwamen een paar punten naar voren die zonder meer duidelijk waren, namelijk:

- a) een lichtsoort die geen rode spectrale lichtsoorten bevat, kan onmogelijk de „voorwerpskleur“ van een rood lichaam goed weergeven;
- b) als zeer veel energie geconcentreerd is in enkele spectraallijnen, dan is het gevaar groot, dat fijne nuances in de „voorwerpskleuren“ worden doodgeslagen.

Over de temperatuurstralers hebben we echter iets verteld dat niet zomaar begrijpelijk was. Daar constateerden we een zeer belangrijk verschil tussen de spectrale verdelingen van de energie, respectievelijk van het daglicht en van het gloeilampenlicht, met het gevolg dat rode „voorwerpskleuren“ beter tot hun recht kwamen onder het gloeilampenlicht en blauwe beter onder het daglicht, terwijl toch de kleurweergave van gloeilampenlicht nooit aanleiding geeft tot klachten.

Dit werd verklaard door de snelle aanpassing van onze ogen aan de spectrale samenstelling van het gloeilampen-



licht, waardoor het bovenomschreven verschil in kleurweergave niet als hinderlijk wordt ondervonden.

Buiten deze aanpassing speelt nog een ander effect hierbij een rol. De verlichtingssterkte van een kunstlichtinstallatie is nog altijd belangrijk lager dan die van daglicht. Nu blijkt, dat de meeste mensen voor die lagere verlichtingssterkte een iets rodere lichtsoort prefereren boven een iets blauwere. Men accepteert dus het minder goed tot hun recht komen van de blauwe „voorwerpskleuren” gaarne om door de rodere lichtsoort een gezelliger verlichting te verkrijgen. Het is interessant hierbij te bedenken, dat in de natuur, bij het vallen van de avond, ook het licht een rodere kleur krijgt. Dan gaat dus ook de afname van de verlichtingssterkte gepaard met een roder worden van het licht.

Wanneer we van kleurweergave spreken, moeten we ons overigens bewust zijn, dat er verschillende eisen worden gesteld aan de kleurweergave, al naar gelang het *doel* waarvoor het licht wordt gebruikt.

Wanneer bijvoorbeeld een textielfabrikant een kunstlichtinstallatie nodig heeft waarmee hij kan beoordelen hoe zijn stoffen er overdag uitzien, moet hij absolute gelijkheid van kleurweergave hebben met die van het daglicht. Deze eis blijkt zo scherp te zijn, dat er zelfs rekening gehouden moet worden met de kleurverschillen die er in het daglicht zijn: licht van een bewolkte hemel, het directe zonlicht en licht van een wolkenloze hemel waarbij de zon is afgeschermd hebben alle een verschillende spectrale samenstelling en dus ook nuances in de kleurweergave.

Speciale eisen, als die van de textielfabrikant, zijn echter veel zwaarder dan de eisen die men aan een gewone verlichtingsinstallatie stellen moet.

Daarbij is het immers voldoende dat we hinderlijke fouten in de kleurweergave vermijden, er dus voor zorgen dat alle stoffen er natuurlijk uitzien, en dat nuances in de „voorwerpskleuren” tot hun recht blijven komen.

Het is duidelijk, dat de overeenstemming in kleurpunt van twee lichtbronnen geheel onvoldoende is voor het verkrijgen van een gelijke kleurweergave.

Een volledige overeenstemming van de spectrale verdeling van de energie van de kunstlichtbron met die van daglicht, of met die van een voor de verlichting van het interieur reeds geaccepteerde temperatuurstraler, waarborgt natuurlijk wél de goede kleurweergave. Deze eis gaat echter erg ver, en zou bijvoorbeeld inhouden, dat voor de „TL” lampen de spectraallijnen weggewerkt zouden moeten worden, hetgeen alleen mogelijk is met opoffering van een groot deel van het nuttig effect van deze lampen.

Door verschillende onderzoekers is het vraagstuk behandeld in hoeverre de spectrale verdeling van de energie van twee lichtbronnen gelijk moet zijn om een goede overeenstemming in de kleurweergave te krijgen.

Het ligt voor de hand te veronderstellen, dat men een tekort van één spectrale lichtsoort mag compenseren met een overeenkomstig teveel van een andere spectrale lichtsoort, die in het spectrum betrekkelijk dicht bij de eerste gelegen is. Zowel de gevoeligheden van de drie oogreceptoren als de reflectiefactoren van de meeste in de praktijk voorkomende stoffen verschillen immers voor twee betrekkelijk dicht bij elkaar liggende spectrale lichtsoorten niet veel.

Deze veronderstelling is door verscheidene onderzoekers juist bevonden. Men mag inderdaad zonder schade voor de kleurweergave in het spectrum dicht bij elkaar

gelegen spectrale lichtsoorten elkaar laten vervangen. Deze conclusie is voor de spectrale verdeling van de energie van de "TL" lampen van groot belang. Men behoeft immers niet de moeilijk te realiseren eis te stellen, dat de spectraallijnen geheel uit de lichtuitstraling van deze lampen verdwenen zijn, mits men maar het teveel aan energie dat in de spectraallijn is geconcentreerd, compenseert door een te weinig aan energie in de spectrale lichtsoorten die in het spectrum op zeer korte afstand van de spectraallijn zijn gelegen. Dit zijn hier spectrale lichtsoorten die door de fluorescentiestoffen worden uitgestraald. Met andere woorden: het „teveel" in de spectraallijn moet *ter plaatse* gecompenseerd worden door een „te weinig" in de fluorescentie. Theoretisch zou men dus het best compenseren door over een bepaald golflengtegebied rondom de spectraallijn *geen* lichtstraling van de fluorescentiestoffen te hebben. De spectrale verdeling van de energie wordt dan op die plaats zo discontinu als men het zich maar denken kan, en toch is de kleurweergave, mits de compensatie maar goed is en zich over een voldoende kort deel van het spectrum uitstrekt, praktisch gelijk aan die van de continue spectrale verdeling van de energie.

Men kan zich dus een spectrale verdeling van de energie denken met een buitengewoon grillig verloop over de volle lengte van het spectrum, en waarvan toch de kleurweergave prachtig is. Het gaat er maar om of men telkens in kleine gebiedjes van het spectrum de afwijkingen onderling gecompenseerd heeft.

Deze wetenschap heeft de specialisten op het gebied van fluorescentiestoffen in staat gesteld de kleurweergave van de "TL" lampen belangrijk te verbeteren. In het vol-

gende hoofdstuk zullen we hierop ingaan.

Nadat men het in het internationale wetenschappelijke gesprek over kleurweergave volledig eens geworden was over het principe van het elkaar onderling laten vervangen van dicht in elkaars buurt gelegen spectrale lichtsoorten, heeft men getracht verder te komen. Het doel van dit internationale gesprek is immers het verkrijgen van *eenheid in de beoordeling*. Zo heeft men vroeger de eenheden van lengte en gewicht vastgelegd, waarvan het internationale handelsverkeer geprofiteerd heeft. In latere jaren werden op het gebied van het licht genormaliseerd: de ooggevoeligheidskromme, de internationale lumen en de X-Y-Z-kleurendriehoek, waarvan ieder die met licht heeft te maken, gebruik maakt.

Nu is het doel: een internationaal aanvaard systeem van *kleurweergave-beoordeling*. Men zou dus de mate van juistheid van de kleurweergave moeten kunnen aangeven in een bepaald *cijfer*, zoals het vetgehalte van de melk, of, als dit niet mogelijk is, in een bepaald *cijfersysteem*.

Hieraan is men nog lang niet toe. De materie is buitengewoon gecompliceerd, en er bestaan nog verscheidene tegenstrijdige meningen over.

Toch is men wel iets gevorderd. Er werd namelijk op het C.I.E.-Congres \*) in Parijs in 1948 vastgelegd, dat men voor het beoordelen van de overeenstemming van de kleurweergave van twee lichtbronnen de straling (in lumen) van ieder van die lichtbronnen moet meten in een aantal, nog vast te stellen, golflengtegebieden. Als er voor deze beide

---

\*) Internationaal Congres van de Commission Internationale de l'Eclairage.

lichtbronnen een redelijke overeenstemming is tussen de meetresultaten in ieder van deze golflengtegebieden, zal de kleurweergave van de lichtbronnen gelijkwaardig zijn.

Tevens werd op dit Congres een systeem van acht golflengtegebieden „voorlopig geaccepteerd”. Dit zijn nage-noeg dezelfde gebieden welke reeds in 1937 \*) door Dr. P. J. Bouma van het Philips Natuurkundig Laboratorium voorgesteld werden.

Deze gebieden zijn dan ook bekend onder de naam van de „acht vakjes van Bouma”. Over deze acht vakjes werd op het C.I.E.-Congres in Stockholm in 1951 weer gesproken. De kritiek was niet zodanig dat er in deze „voorlopig geaccepteerde” vakjes verandering kwam; wél bleek dat verscheidene laboratoria zich ernstig met dit voorstel hadden beziggehouden. Ook op het C.I.E.-Congres in Zürich in 1955 kwam hierin geen verandering. Momenteel ligt dus nog slechts de methode die men volgen wil (vergelijking van licht in gebieden van het spectrum) vast, en is men gekomen tot de „voorlopige aanvaarding” van de acht vakjes van Bouma.

Alhoewel dit een mager resultaat schijnt van al het gedane werk, is het toch de moeite waard nauwkeuriger kennis te nemen van de voorlopig aanvaarde vakjes. We kunnen hieruit namelijk reeds veel leren.

De grenzen van deze vakjes zijn aangegeven in de volgende tabel.

---

\*) Bouma P. J. De kleurweergave bij gebruik van verschillende „witte” lichtbronnen. Philips Technisch Tijdschrift 2 (1937), blz. 1-7.

H. IX. KLEURWEERGAVE

| Vakje nr. | Golflengtegrenzen<br>in $m\mu$ | Lengte van de<br>vakjes in $m\mu$ | Lichtstroom in<br>ieder vakje, indien<br>iedere spectrale<br>lichtsoort met<br>evenveel energie<br>zou stralen |
|-----------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1         | 380 tot 420                    | 40                                | 1  |
| 2         | 420 tot 440                    | 20                                | 13   |
| 3         | 440 tot 460                    | 20                                | 40   |
| 4         | 460 tot 510                    | 50                                | 220  |
| 5         | 510 tot 560                    | 50                                | 880  |
| 6         | 560 tot 610                    | 50                                | 780  |
| 7         | 610 tot 660                    | 50                                | 250  |
| 8         | 660 tot 780                    | 120                               | 10   |

In fig. 19 (zie uitslagblad achter in het boek) hebben we op de spectrumkromme deze vakjes aangegeven. Hetgeen direct opvalt, is het grote verschil in de lengte die de verschillende vakjes op de spectrumkromme innemen.

Dit wordt niet in de eerste plaats veroorzaakt doordat de vakjes aan de beide einden van het spectrum korter van lengte zouden zijn: in de tabel kan men zien dat dit alleen een rol speelt aan de kortgolvlige zijde. Deze verkorting is een eigenschap van de spectrumkromme zelf. Om de eerste drie en de laatste twee vakjes duidelijk te kunnen zien, hebben we in de fig. 20 en 21 (zie uitslagblad achter in het boek) deze delen van de driehoek nog eens op tienvoudig vergrote schaal aangegeven.

Het blijkt dus, dat de beide einden van het zichtbare

spectrum, die op de spectrumkromme in elkaar gedrongen liggen, voor de kleurweergave zó belangrijk zijn, dat daar eerder een groter dan een kleiner aantal vakjes door Bouma gekozen werd.

Om een goede kleurweergave te verkrijgen, is het dus nodig, dat er ook in de beide uiterste delen van het spectrum voldoende licht aanwezig is. Dit is „duur” licht, want de ooggevoeligheid in deze uiterste delen van het spectrum is klein. Hoe „duur” dit licht is, leert men het best uit de laatste kolom van de tabel, waarin is vermeld de lichtstroom die door de spectrale lichtsoorten van ieder vakje zou worden uitgestraald indien over de volle lengte van het spectrum iedere spectrale lichtsoort met evenveel energie zou stralen. Men ziet uit deze kolom, dat het leeuwenaandeel van het licht komt van de vakjes 5 en 6, dat 4 en 7 ook nog een behoorlijke bijdrage leveren, maar dat de vakjes 1, 2 en 3 en het vakje 8 voor het verkrijgen van lichtstroom praktisch waardeloos zijn. Voor de kleurweergave blijken we ze echter onmogelijk te kunnen missen.

Een belangrijk deel van de stralingsenergie van een lichtbron moet dus voor het verkrijgen van een goede kleurweergave uitgestraald worden in golflengten waarvoor het oog minder gevoelig is. In het algemeen zal dus een lamp met een betere kleurweergave een minder goed rendement (in lumens per watt) bezitten dan een lamp met een minder goede kleurweergave. De kleurweergave kost lumens, hetgeen men ook ziet uit de iets lagere lumen-per-watt waarden van de „de Luxe”- in vergelijking met de „standaard”- fluorescentielampen. Men zal dus in een installatie waaraan enige eisen van prettige verlichting worden gesteld, bij het gebruik van „de Luxe” lampen een groter vermo-

## H. IX. KLEURWEERGAVE

gen moeten installeren om hetzelfde verlichtingsniveau te bereiken als met de standaard "TL" lampen. Het verschil in effect door de betere kleurweergave is echter zo groot, dat men dit er gaarne voor over zal hebben.

Bij gloeilampen wordt vaak, en zeer terecht, het lichtrendement (de lumen per watt) als kwaliteitskriterium gebruikt. Voor gasontladingslampen is dit een criterium dat met grote voorzichtigheid moet worden gehanteerd, omdat een lamp met een lager lichtrendement vaak, terwille van het verlichtingsdoel, verre te verkiezen zal zijn boven een lamp met een hoger lichtrendement. Deze voorzichtigheid is reeds nodig als men verschillende typen fluorescentielampen van hetzelfde fabrikaat vergelijkt. Het spreekt vanzelf, dat bij het vergelijken van lampen van verschillend fabrikaat deze voorzichtigheid *dubbel* nodig is.



### KLEURWEERGAVE VAN DE WARMWIT DE LUXE „TL” LAMP (KLEUR 32)

Onze kennis van de kleurendriehoek en van de eisen die de kleurweergave stelt, maakt het mogelijk te begrijpen waarom de warmwit de Luxe "TL" lamp een zoveel betere kleurweergave bezit dan de warmwitte lamp met kleur 29. Deze laatste lamp heeft een kleurpunt in de buurt van dat van de gloeilamp (zwart lichaam met een kleurtemperatuur van 3000 °K), maar was voor interieurverlichting slecht te gebruiken omdat vele stoffen, bijvoorbeeld levensmiddelen, als boter, kaas, fruit, beschuit enz., en ook lichtgekleurde houtsoorten, er een onaangename groenige kleur door verkrijgen.

Men is natuurlijk geneigd te veronderstellen, dat de oorzaak hiervan is gelegen in de twee spectraallijnen van het kwikatoom met een golflengte van respectievelijk 546 m $\mu$  en 578 m $\mu$ , die aan de hoge-druk kwiklampen (type HO en HP) hun groenige kleur geven.

Toch zijn de resten van deze spectraallijnen, welke bij de zeer lage kwikdruk van de "TL" lamp helemaal niet sterk zijn, niet de oorzaak van deze fout.

Bij het, volgens de methode van Bouma, vergelijken van

de spectrale verdeling van de energie van enerzijds de "TL" lamp met kleur 29 en anderszijds het „zwarte lichaam" met een temperatuur van 3000 °K, blijkt, hoe vreemd het ook klinken mag, de *diepblauwe spectraallijn* met een golflengte van 436 m $\mu$  indirect de oorzaak te zijn van de *groenige kleurweergave*. Deze spectraallijn is namelijk zo sterk, dat daardoor de "TL" lamp naar verhouding 4,5 maal zoveel licht uitstraalt in vakje 2 als het zwarte lichaam. In de fig. 19 en 20 hebben we het kleurpunt van de spectrale lichtsoort van deze spectraallijn aangegeven. Tevens hebben we in fig. 19 een lijn getrokken, die dit kleurpunt verbindt met het kleurpunt van het zwarte lichaam met een temperatuur van 3000 °K. Deze verbindingslijn is lang, en het is dan ook begrijpelijk, na hetgeen we over het mengen van lichtsoorten met verschillende kleurpunten gezegd hebben (zie het laatste deel van Hoofdstuk V), dat er in het spectrum van de "TL" lamp met kleur 29 zeer veel stralingsenergie van spectrale lichtsoorten uit de vakjes 5, 6 en 7 aanwezig moet zijn om te zorgen dat het kleurpunt van deze lamp werkelijk op de gewenste plaats (kleurpunt van het zwarte lichaam van 3000 °K) komt te liggen. Deze stralingsenergie moet in hoofdzaak geleverd worden door de fluorescentie in de lamp.

Nu is het aantal fluorescentiestoffen die een goed nuttig effect geven bij de omzetting van de ultraviolette straling van de kwikontlading in zichtbaar licht, vrij beperkt. Verder strekt zich de spectrale verdeling van de energie van het door iedere fluorescentiestof uitgestraalde licht over een grote breedte van het spectrum uit, dus over meerdere vakjes van Bouma. Hierbij komt nog, dat er maar weinig fluorescentiestoffen zijn, die een behoorlijke

hoeveelheid rode straling (vakje 7 en 8) geven. Door al deze oorzaken overheerst in het spectrum van de "TL" lamp met kleur 29 de straling van de vakjes 5 en 6 (het geel-groene deel van het spectrum dus).

Ondanks deze overheersing, komt het kleurpunt van de lamp zelf overeen met het kleurpunt van het zwarte lichaam op 3000 °K, omdat deze overmaat aan straling in evenwicht wordt gehouden door de sterke *diepblauwe spectraallijn* met golflengte 436 m $\mu$ . Doordat echter het licht van deze spectraallijn praktisch niet door de hierboven genoemde levensmiddelen en houtsoorten gereflecteerd wordt, bestaat dit evenwicht bij het gereflecteerde licht niet meer en verkrijgt men de bekende onaangename groenige kleur.

In dit geval is de enige goede oplossing: het *door absorptie verminderen* van de straling van deze diepblauwe lijn. Dit is gedaan in de nieuwe lamp warmwit de Luxe (kleur 32), waarbij van de nood een deugd is gemaakt door een speciale fluorescentiestof te gebruiken, die de eigenschap bezit de straling van deze golflengte *om te zetten in rode straling*. Hierdoor kon een lamp worden gemaakt, waarvan de verdeling van de straling over de vakjes 5, 6 en 7 zeer nauw aansluit bij de overeenkomstige verdeling van de straling van het zwarte lichaam, zodat het door de genoemde kritische stoffen gereflecteerde licht zijn natuurlijke kleurnuances behoudt.

## Hoofdstuk XI

### DEMONSTRATIE VAN KLEURWEERGAVE

De meest overtuigende demonstratie van de kleurweergave van een lichtbron is het gebruik in de praktijk.

Wanneer men bijvoorbeeld twee gelijke uitstallingen van levensmiddelen maakt en de ene verlicht met een "TL" lamp met kleur 29 en de andere met een "TL" lamp met kleur 32, dan treedt de betere kleurweergave van de laatste lamp duidelijk aan de dag. Toch zijn de kleurverschillen bij deze demonstratie niet groot, en ze zouden niet belangrijk zijn als het niet ging om verlichting van levensmiddelen, wier kwaliteit we gewend zijn te beoordelen naar de kleur.

Men kan veel sprekender demonstraties maken van de verschillen in kleurweergave door te werken met interferentiefilters. Met deze filters zijn we immers in staat om praktisch monochromatische lichtbundels te maken van iedere gewenste golflengte. Door enkele van deze lichtbundels te mengen, kunnen we licht maken, waarvan het kleurpunt hetzelfde is als het kleurpunt van een of andere temperatuurstraler, terwijl er geen sprake is van een overeenstemming in de spectrale verdeling van de energie. Wanneer we nu van een wit opvangscherm de ene helft ver-

lichten met het mengsel van monochromatische lichtbundels, en de andere helft met licht van de temperatuurstraler, dan is de „kleur volgens het oog” van de beide delen van het opvangscherm gelijk. Wanneer we echter het witte scherm vervangen door opvangschermen van verschillende „voorwerpskleuren”, dan vertonen de beide helften vaak een enorm onderscheid in de „kleur volgens het oog”. De meest verrassende demonstratie verkrijgt men door een opvangscherm te maken met horizontale banen, waarvan er één wit is en de andere gekleurd zijn. Naast elkaar worden nu op dit scherm de twee lichtsoorten geworpen. De witte baan vertoont geen kleurverschil bij de overgang van de ene lichtbundel op de andere, in de gekleurde banen echter treedt wél kleurverschil op. Verschuift men dit scherm in horizontale richting, dan gebeurt er in de witte baan niets, in de gekleurde banen ziet men een plotselinge omslag in de „kleur volgens het oog” op de afscheiding van de beide lichtbundels.

Deze demonstratie is niet zo eenvoudig uit te voeren, omdat men er met behulp van interferentiefilters een apart toestel voor moet bouwen. We kunnen niet verwachten, dat vele van onze lezers dit zullen doen. Toch zouden we het niet prettig vinden, na alle aandacht die we voor dit probleem hebben gevraagd, ons betoog te besluiten zonder de lezer in staat te hebben gesteld zich een oordeel te vormen over de verschillen in „kleur volgens het oog”, welke bij verlichting door verschillende lichtbronnen kunnen optreden.

Daarom hebben we een kleurvergelijkingskast gemaakt, waarvan fig. 22 de doorsnede aangeeft. Door de opening O ziet men de achterwand van de kast, waar op de plaats A

## H. XI. DEMONSTRATIE VAN KLEURWEERGAVE

achtereenvolgend verschillend gekleurde plaatjes uit de Munsell-atlas \*) kunnen worden aangebracht. Deze plaatjes worden verlicht door de gloeilamp L, welke brandt op een gecontroleerde spanning. Iedere „kleur volgens het oog” die in het laboratorium waargenomen wordt, kunnen we nu vastleggen door net zo lang de Munsell-plaatjes in de kast te variëren tot daar dezelfde „kleur volgens het oog” wordt verkregen. De aldus vastgelegde „kleur volgens het oog” kunnen we nu ook buiten het laboratorium waarnemen, want de kast is transportabel.

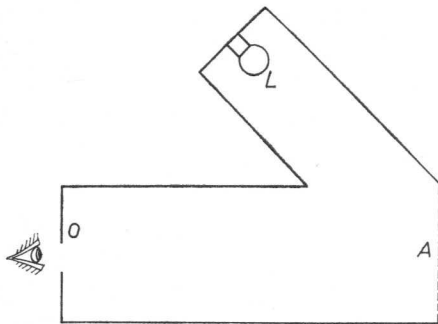


Fig. 22.

In het laboratorium hebben we een zestal gekleurde plaatjes bekeken onder verschillende verlichtingen. Deze plaatjes waren:

\*) Munsell Book of Color. Uitgave Munsell Color Company Inc., Baltimore - Maryland, U.S.A. Deze atlas, in 2 delen, bevat een groot aantal kleurenkaarten met zeer vele kleuren, welke regelmatig gerangschikt zijn naar kleurtoon (Hue), grijswaarde (Value), en kleurwaarde (Chroma). Het Munsell kleursysteem kan iedere bestaande kleur definiëren met een notatie in letters en cijfers, die Hue, Value en Chroma van die kleur aanduiden.

|         |           |  |
|---------|-----------|--|
| rood,   | gemerkt 1 | } Zie<br>kleurenplaat II<br>achterin het boek. |
| oranje, | gemerkt 2 |  |
| geel,   | gemerkt 3 |  |
| groen,  | gemerkt 4 |  |
| blauw,  | gemerkt 5 |  |
| violet, | gemerkt 6 |  |

We hebben deze verlicht met:

A. *Daglicht bij egaal bedekte hemel*, waarvan het kleurpunt in fig. 19 is aangegeven op de zwarte-lichaam lijn bij 6500 °K;

B. *Een vergelijkingslichtbron met een continu spectrum* en een kleurtemperatuur van 4800 °K; deze lichtbron wordt internationaal met „Standaardwit B” aangeduid en heeft een grote rol gespeeld in de studie en het internationale gesprek over kleurproblemen. Voor het kleurpunt is:  $x = 0,348$  en  $y = 0,352$ ; zie het punt 4800 °K op de zwarte-lichaam lijn (fig. 19).

C. *Een mengsel van twee praktisch monochromatische lichtbronnen*: een groen-blauwe (max. doorlating van interferentiefilter bij 486  $m\mu$ , kleurpunt S van fig. 19) en een geel-oranje (max. doorlating van interferentiefilter bij 586  $m\mu$ , kleurpunt T van fig. 19).

De lichtstroom van ieder van deze monochromatische lichtbronnen is zo gekozen, dat het mengsel hetzelfde kleurpunt heeft als B. Men ziet dan ook in fig. 19, dat de verbindingslijn tussen S en T loopt over het kleurpunt van het zwarte lichaam op 4800 °K.

D. *Een mengsel van drie praktisch monochromatische lichtbronnen*: een blauwe (max. doorlating van interferentiefilter bij 459  $m\mu$ , kleurpunt U van fig. 19),

## H. XI. DEMONSTRATIE VAN KLEURWEERGAVE

een groene (max. doorlating van interferentiefilter bij 536  $m\mu$ , kleurpunt V van fig. 19) en een rode (max. doorlating van interferentiefilter bij 641  $m\mu$ , kleurpunt W van fig. 19).

De lichtstroom van ieder van deze monochromatische lichtbronnen is zo gekozen, dat het mengsel hetzelfde kleurpunt heeft als B (zwart lichaam 4800 °K).

De „kleuren volgens het oog”, die de 6 gekleurde plaatjes verkregen bij verlichting met de vier beschreven lichtbronnen, hebben we vastgelegd in de kleurvergelijkingskast. Zo verkregen we 24 Munsell-plaatjes, die onder de constante verlichting van de kast dezelfde „kleuren volgens het oog” verkregen die we in het laboratorium aan de 6 gekleurde plaatjes hadden waargenomen. We zeiden reeds, dat de kast transportabel was, zodat het niet moeilijk was ze naar de reproductie-afdeling van de drukkerij te brengen. Voordat we de specialisten van deze reproductie-afdeling konden vragen om via hun kleurendrukprocédé deze kleuren op een kleurenblad te reproduceren, moesten we eerst afspreken, met welke lichtsoort dat kleurenblad verlicht zou moeten worden, om de „kleuren volgens het oog” te verkrijgen, die in het laboratorium waren waargenomen. Toen we het er over eens waren, dat dit zou zijn daglicht bij een egaal bedekte hemel, was alles bepaald, en kon het kleurenblad, dat als Plaat II uitvouwbaar achter in het boek is aangebracht, worden gedrukt.

Wanneer de gekleurde vakjes op dit kleurenblad worden bekeken onder daglicht bij een egaal bedekte hemel, ziet men de „kleuren volgens het oog” zoals we die in het laboratorium bij verlichting met de verschillende lichtbronnen hebben waargenomen.



Op het kleurenblad geeft serie A (eerste verticale kolom) de plaatjes, zoals ze worden gezien bij verlichting met daglicht bij egaal bedekte hemel, en serie B zoals ze worden gezien bij verlichting met de lichtbron „Standaardwit B”.

Om een indruk te krijgen van het kleurverschil van deze beide lichtbronnen zelf, hebben we bij het cijfer 0 in een horizontale rij de „kleur volgens het oog” gegeven, die een wit-reflecterend vlakje bij de verschillende verlichtingen aanneemt. Onder de lichtbron „Standaardwit B” wordt de „kleur volgens het oog” van het witte vlakje enigszins rose-achtig. Het verschil tussen de beide lichtbronnen komt verder naar voren in:

- a) de afstand van de beide kleurpunten in de kleurendriehoek: de afstand tussen het punt  $6500\text{ }^{\circ}\text{K}$  en  $4800\text{ }^{\circ}\text{K}$  van de zwarte-lichaam lijn (zie fig. 19), en
- b) een heel regelmatige verschuiving in de „kleur volgens het oog” van alle kleurplaatjes op kleurenblad II.

Doordat deze verschuiving zo regelmatig is, past ons oog zich erbij aan en zijn er geen klachten over een onnatuurlijke kleurweergave van „Standaardwit B”. Wanneer men zich in een ruimte bevindt, die uitsluitend verlicht is met „Standaardwit B”, bemerkt men dan ook niet dat een oppervlak met een witte „voorwerpskleur”, dat dus alle zichtbare golflengten even sterk reflecteert, een enigszins rose-achtige „kleur volgens het oog” heeft. In die omgeving ziet het oog dat oppervlak als volkomen wit. Toch moesten wij dat oppervlak op het kleurenblad (B, o) een enigszins rose-achtige „voorwerpskleur” geven, omdat we hebben afgesproken dat het kleurenblad bekeken zou worden bij daglicht met egaal bedekte hemel (zwart lichaam bij  $6500\text{ }^{\circ}\text{K}$ ). De kleurpunten van daglicht bij een egaal

## H. XI. DEMONSTRATIE VAN KLEURWEERGAVE

bedekte hemel (6500 °K) en „Standaardwit B” (4800 °K) liggen in de kleurendriehoek op een behoorlijke afstand van elkaar. De „kleuren volgens het oog” van serie B zijn dan ook vrij sterk naar rood verschoven.

Op het rechtergedeelte van het kleurenblad is de serie B van het linker gedeelte nog eens afgedrukt, om de kleurweergave van het licht van „Standaardwit B” gemakkelijker te kunnen vergelijken met die van de twee andere lichtsoorten, welke worden verkregen door menging van twee, respectievelijk drie monochromatische lichtsoorten. Links van deze serie B is aangegeven de „kleur volgens het oog” van de kleurplaatjes, wanneer deze verlicht worden met het mengsel van twee monochromatische lichtsoorten, golflengten 486 en 586  $\mu$  (serie C), en rechts deze kleurindruk wanneer verlicht wordt met het mengsel van drie monochromatische lichtsoorten, golflengten 459, 536 en 641  $\mu$  (serie D).

De lichtsoorten waarmee de gereproduceerde plaatjes van de series B, C en D verlicht werden, hebben hetzelfde kleurpunt, namelijk dat van het zwarte lichaam op 4800 °K, zodat het wit-reflecterende vlakje (horizontale rij bij cijfer 0) bij al deze drie lichtsoorten dezelfde, enigszins lichtrose „kleur volgens het oog” krijgt.

De verschillen in „kleur volgens het oog” van de gekleurde plaatjes zijn zo groot, dat er geen sprake is van een goede kleurweergave.

Met de twee monochromatische lichtbronnen (C) verdwijnen het groen en het rood volkomen, en wordt ook het blauw heel slecht weergegeven. Dit effect is begrijpelijk, want de gekleurde plaatjes ontvangen en reflecteren alleen maar licht dat in één of andere verhouding samen-

gesteld is uit de monochromatische lichtsoorten T en S (fig. 19). De kleurpunten van dit gereflecteerde licht moeten dus op de verbindingslijn van T en S liggen, en deze lijn ligt geheel buiten het groen en het rood in de kleurendriehoek.

Met de drie monochromatische lichtbronnen (D) wordt het groen veel helderder dan bij het „Standaardwit B”; het oranje wordt rood, en het blauw wordt sterker verzadigd.

Ook dit effect is begrijpelijk: de drie felle monochromatische lichtsoorten waaruit het licht is samengesteld, zetten zich door in het gereflecteerde licht.

Het mengsel van de twee monochromatische lichtbronnen maakt alle kleuren fletser. Het omgekeerde is het geval bij het mengsel van de drie monochromatische lichtsoorten. Daar zijn de „kleuren volgens het oog”, helderder en opvallender. Toch is de kleurweergave in beide gevallen onjuist.

\* In fig. 23 hebben we de energie-golflengtekrommen van de drie lichtsoorten met het gemeenschappelijke kleurpunt (zwart lichaam 4800 °K) gegeven. Omdat de lichtsoorten die met interferentiefilters werden samengesteld, geen doorlopende kromme geven, hebben we de kromme van de twee interferentiefilters gestippeld getekend, en die van de drie met een vol-getrokken lijn aangegeven.

\* Van ieder van de drie lichtsoorten wordt de energie-golflengtekromme gegeven voor 1000 lumen.

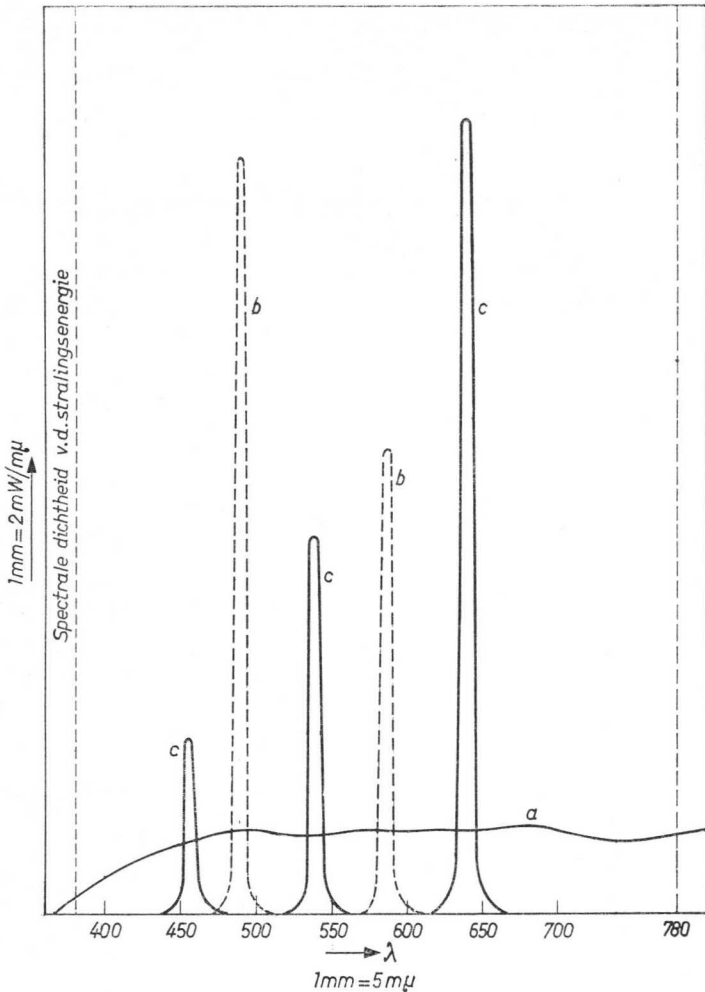


Fig. 23. Energie-golflengtekromme voor 1000 lumen van de drie lichtsoorten met gemeenschappelijk kleurpunt.

- a) Energie-golflengtekromme van „Standaardwit B”. Het oppervlak van deze kromme tussen 380 en 780  $m\mu$  bedraagt 690  $mm^2$ , hetgeen overeenkomt met 6900 mW.
- b) Energie-golflengtekromme van de lichtsoort, gemaakt met twee interferentiefilters. Het oppervlak van de kromme bedraagt 347  $mm^2$  (3470 mW).
- c) Energie-golflengtekromme van de lichtsoort, gemaakt met drie interferentiefilters. Het oppervlak van de kromme bedraagt 412  $mm^2$  (4120 mW).

## H. XI. DEMONSTRATIE VAN KLEURWEERGAVE

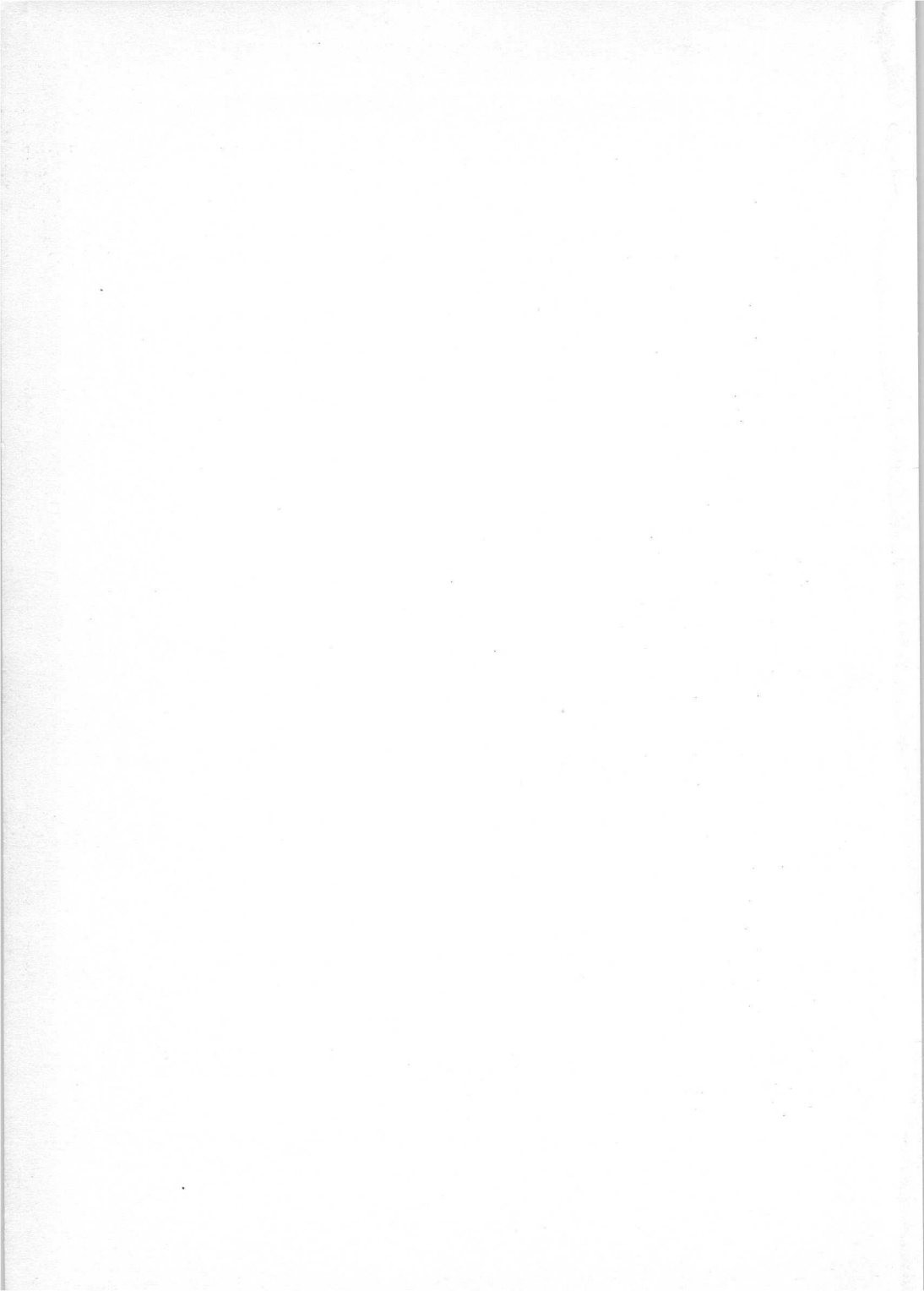
- \* Omdat we hier de energie-golflengtekromme van lichtbronnen samengesteld door middel van interferentiefilters aangeven, hebben we niet de kunstgreep toegepast die, zoals we zagen, voor spectraallijnen wordt gebruikt, waarbij de geconcentreerde energie-uitstraling wordt getekend op een standaardbreedte van bijv. 10  $m\mu$ , maar de werkelijke vorm gegeven. Bij de kleine schaal van de tekening was het moeilijk om dit nauwkeurig te doen. We menen echter op deze manier een tekening te hebben verkregen die, misschien niet zo nauwkeurig, toch een goed beeld geeft van de drie verdelingen van de energie die we voor deze demonstratie hebben gebruikt.

## APPENDIX

Als aanvulling van de inhoudsopgave worden hier nog enige woorden en begrippen aangegeven met verwijzing naar de bladzijden in het boek, waar deze te vinden zijn:

|   |            |
|---|------------|
| absorptie . . . . .                                   | 22         |
| blauwhoeveelheid . . . . .                            | 36         |
| blauwreceptoren . . . . .                             | 44         |
| continu spectrum . . . . .                            | 9          |
| continue spectrale verdeling van de energie . . . . . | 9, 11      |
| complementaire lichtsoorten . . . . .                 | 56         |
| dominerende golflengte . . . . .                      | 65         |
| energie-golflengte kromme . . . . .                   | 13, 20, 85 |
| enkelvoudige lichtsoorten . . . . .                   | 9          |
| filters . . . . .                                     | 23         |
| fluorescentielampen . . . . .                         | 19         |
| fluorescerende stoffen . . . . .                      | 18         |
| gasontladingslampen . . . . .                         | 17         |
| grenzen van het zichtbare spectrum . . . . .          | 13         |
| groengevoeligheid . . . . .                           | 36         |
| groenreceptoren . . . . .                             | 36, 44     |
| interferentiefilters . . . . .                        | 23, 78     |
| kleur . . . . .                                       | 6          |
| kleur als eigenschap van een voorwerp . . . . .       | 6          |
| kleurendriehoek . . . . .                             | 44         |
| kleurgevoelige receptoren . . . . .                   | 34         |
| kleurgevoeligheidskrommen . . . . .                   | 50, 51     |
| kleurindruk . . . . .                                 | 6          |
| kleurpunt . . . . .                                   | 41, 47     |
| kleurpuntbepaling . . . . .                           | 49         |
| kleurtemperatuur . . . . .                            | 60         |
| kleurtoon . . . . .                                   | 65         |
| kleur volgens het oog . . . . .                       | 7          |
| kleurweergave . . . . .                               | 13, 66     |
| mengen van lichtsoorten . . . . .                     | 27         |

|   |        |
|---|--------|
| monochromatisch licht . . . . .                       | 9, 23  |
| Munsell atlas . . . . .                               | 80     |
| ooggevoeligheidskromme voor licht . . . . .           | 51     |
| purperlijn . . . . .                                  | 49     |
| reflectie . . . . .                                   | 22     |
| reflectiefactor . . . . .                             | 25     |
| roodfactor . . . . .                                  | 36     |
| roodhoeveelheid . . . . .                             | 36, 45 |
| roodreceptoren . . . . .                              | 36, 44 |
| spectraallijnen . . . . .                             | 17     |
| spectrale dichtheid van de stralingsenergie . . . . . | 13     |
| spectrale kleuren . . . . .                           | 8      |
| spectrale lichtsoorten . . . . .                      | 9      |
| spectrale ontleding . . . . .                         | 8, 9   |
| spectrale reflectie kromme . . . . .                  | 25     |
| spectrale verdeling van de energie . . . . .          | 9, 11  |
| spectrum . . . . .                                    | 9      |
| spectrumkromme . . . . .                              | 49     |
| standaardwit B lichtbron . . . . .                    | 81     |
| temperatuurstralers . . . . .                         | 11     |
| vakjes van Bouma . . . . .                            | 71, 72 |
| verzadigingsgraad . . . . .                           | 65     |
| voorwerpskleur . . . . .                              | 7      |
| witpunt . . . . .                                     | 55     |
| $\bar{X}$ -factor . . . . .                           | 45     |
| $\bar{X}$ -gevoeligheid . . . . .                     | 44     |
| $\bar{X}$ -receptoren . . . . .                       | 44     |
| $\bar{Y}$ -gevoeligheid . . . . .                     | 44     |
| $\bar{Y}$ -receptoren . . . . .                       | 44     |
| $\bar{Z}$ -gevoeligheid . . . . .                     | 44     |
| $\bar{Z}$ -receptoren . . . . .                       | 44     |
| zwarte lichaam . . . . .                              | 11     |
| zwarte-lichaam lijn. . . . .                          | 59     |





## PLAAT II

Vergelijking van de kleurweergave van enige lichtbronnen. Alle kleurplaatjes moeten bekeken worden onder daglicht bij egaal bedekte hemel (kleurtemperatuur 6500 °K).

**Verticale kolom A** geeft de kleurplaatjes, zoals ze in werkelijkheid zijn (daglicht bij egaal bedekte hemel).

**Verticale kolom B** geeft de kleurplaatjes, zoals ze gezien worden bij verlichting met de lichtbron „Standaardwit B” (kleurtemperatuur 4800 °K).

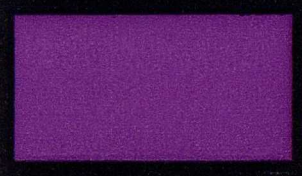
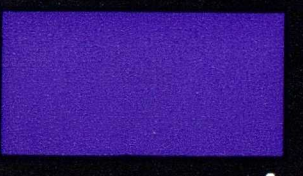
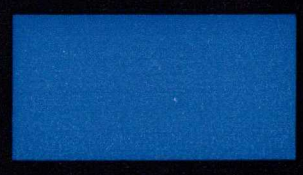
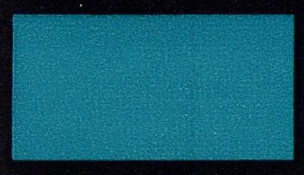
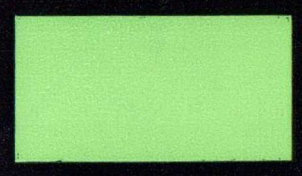
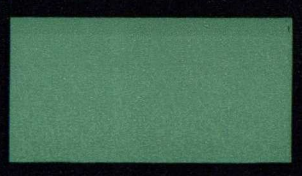
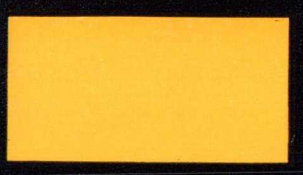
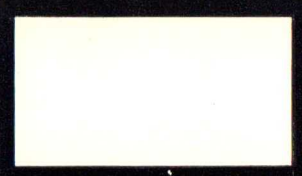
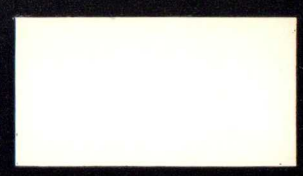
**Verticale kolom C** geeft de kleurplaatjes, zoals ze gezien worden bij verlichting met een mengsel van 2 praktisch monochromatische lichtsoorten (golflengten 486 en 586 m $\mu$ ). Kleurtemperatuur van het mengsel 4800 °K.

**Verticale kolom B** rechts is een herhaling van kolom B links. Deze kolom is nog eens afgedrukt om een gemakkelijke vergelijking met de kolommen C en D mogelijk te maken.

**Verticale kolom D** geeft de kleurplaatjes, zoals ze gezien worden bij verlichting met een mengsel van 3 praktisch monochromatische lichtsoorten (golflengten 459, 536 en 641 m $\mu$ ). Kleurtemperatuur van het mengsel 4800 °K.

De horizontale rij 0 boven aan het kleurenblad geeft de „kleur volgens het oog” van een wit diffuus reflecterend oppervlak bij verlichting met de genoemde lichtbronnen.

0  
1  
2  
3  
4  
5  
6



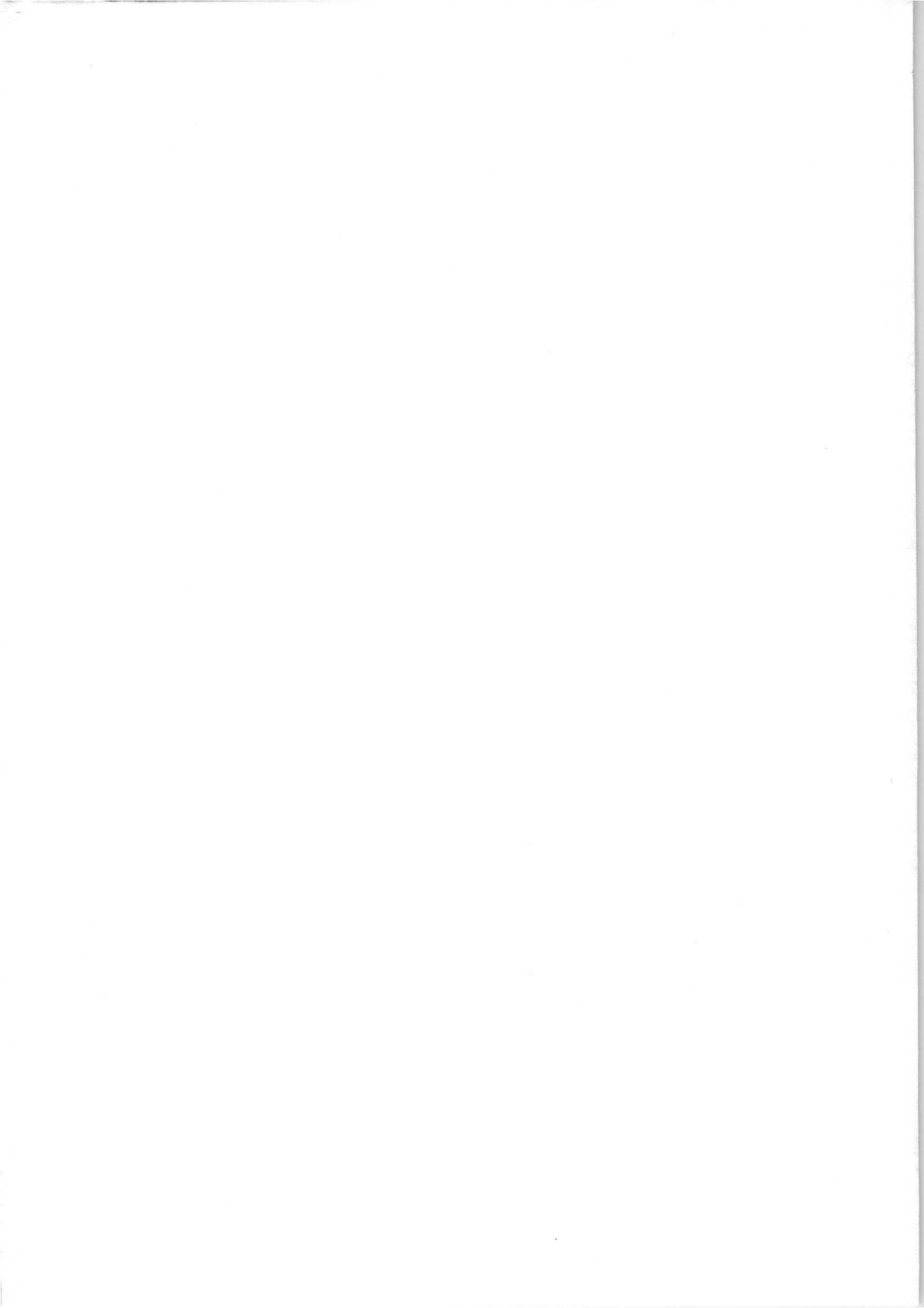
A

B

C

B

D



€450

P