

# Kleurperceptie en kleur meten

*het berekenen van kleurpunten in het CIELab systeem*

## 1 Inleiding

Dagelijks zien we om ons heen allerlei objecten die een kleur hebben. Kleurwaarneming is belangrijk voor ons voortbestaan, daarom is kleurwaarneming bij de mens goed ontwikkeld. We weten dat een appel met bruine plekken, waarop ook nog zacht blauw-groene structuren zitten, waarschijnlijk niet meer lekker zal smaken. Groen uitgeslagen vleeswaren kunnen we beter niet meer eten. Een kind met een bleek gezicht zal door ons onderzocht worden of het misschien ziek is. Zo helpt kleurwaarneming bij ons voortbestaan. Maar kleur is meer. We kunnen genieten van een kleurig boeket bloemen. De kleuren op een schilderij kunnen emoties in ons losweken. Met de kleur van kleding kunnen mensen laten zien of ze wel of niet met de mode meedoen (en eventueel of ze veel te besteden hebben). Zo speelt kleur een belangrijke rol in ons sociale leven.

Om kleuren te kunnen vastleggen en vergelijken bestaan er verschillende systemen waarin kleuren in getallen worden uitgedrukt. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe je de kleur van een object in zo'n systeem kunt vast leggen. Daarbij wordt er van uit gegaan dat er alleen diffuse lichtreflectie aan een glansloos oppervlak plaatsvindt.

Kleurwaarneming door diffuse reflectie is een bijzonder geval, want meestal zal ook glans een rol spelen in de kleurwaarneming. Kennelijk zijn we goed in staat onze kleurwaarneming te corrigeren voor glans. De auto die hieronder is afgebeeld zullen we als geheel 'rood' ervaren, terwijl de kleuren die we echt zien heel verschillend zijn, zoals de uitvergroete vlakjes laten zien.



**Figuur 1.** Ondanks de glans, die verschillende kleuren doet ontstaan, ervaren we deze auto als geheel rood.

Naast de glans van het oppervlak kunnen ook andere reflecties een rol spelen bij het ontstaan van kleur. Bij auto's kennen we bijvoorbeeld metallic lakken en parelmoereffecten. Ook bij auto's die met deze lakken zijn afgewerkt zijn we in staat de kleur als 'egaal' te ervaren, terwijl de kleuren die wij werkelijk zien helemaal niet gelijk zijn. We zullen later zien dat geel en blauw 'tegengestelde' of complementaire kleuren zijn. Toch zijn er lakken die deze beide kleuren kunnen vertonen, zoals de lak op de auto in figuur 2. De kleuren die dit soort lakken

teweeg brengen kunnen met de methode die in dit hoofdstuk wordt behandeld niet berekend worden.



**Figuur 2.** Auto afgewerkt met parelmoereffect lak, door verschillende combinaties van belichtingsrichting en waarnemingsrichting ten opzichte het metaaloppervlak kunnen complementaire kleuren worden waargenomen.

## 2 Kleurperceptie

Kleurperceptie is hoe je een kleur ervaart. Voor de kleurperceptie zijn een aantal zaken belangrijk: de lichtbron, de kleur-eigenschappen van het object met een bepaalde kleur en het waarnemingsvermogen van de waarnemer. Verder kunnen de kleuren van objecten in de omgeving ook een rol spelen.

### 2.1 De lichtbron

Wit licht bestaat eigenlijk uit licht van alle kleuren door elkaar. Dit licht kan gescheiden worden in verschillende kleuren.



**Figuur 3.** Dubbele regenboog. De binnenste boog heeft rood aan de buitenkant en violet aan de binnenkant, bij de buitenste regenboog is dat juist andersom.

Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer we een regenboog zien. Het witte daglicht wordt door kleine regendruppeltjes gescheiden in verschillende kleuren, en door die druppeltjes weerkaatst in de richting van onze ogen.

Wanneer we wit papiertje onder een gele lamp houden, zullen we zien dat het papiertje geel lijkt. Houden we hetzelfde papiertje onder een blauwe lamp, dan zal dit blauw lijken. De kleur van de lichtbron is dus van invloed op de kleurperceptie.

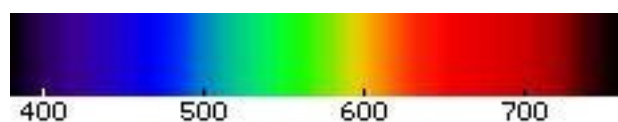


**Figuur 4.** De bovenstaande foto's zijn gemaakt met verschillend gekleurde lichtbronnen.

1: wit, 2: rood, 3: oranje, 4: geel, 5: groen, 6: blauw.

In figuur 4 zijn twee verpakkingen gefotografeerd onder verschillende gekleurde lampen. Opvallend is bijvoorbeeld dat er in de foto's 2 en 3 er helemaal geen blauw lijkt voor te komen. In foto 4 lijkt de kleur van het 'haar' van de rechter verpakking vrijwel gelijk aan de kleur van het 'gezicht', maar uit foto 1 blijkt dat de kleuren van deze vlakken (onder witte belichting) heel verschillend zijn. De kleur van de belichting is dus van invloed op de kleur die wij zien. Bij deze foto's zijn de verschillen heel groot, maar als je kleur nauwkeurig wilt meten zal je ook met de lichtbron rekening moeten houden.

Licht kan beschouwd worden als straling met een bepaalde golflengte. Bij golven op zee kunnen we de afstand tussen twee toppen van de golven meten, deze afstand noemen we de golflengte. De golflengte van watergolven op zee zullen enkele tientallen meters bedragen.



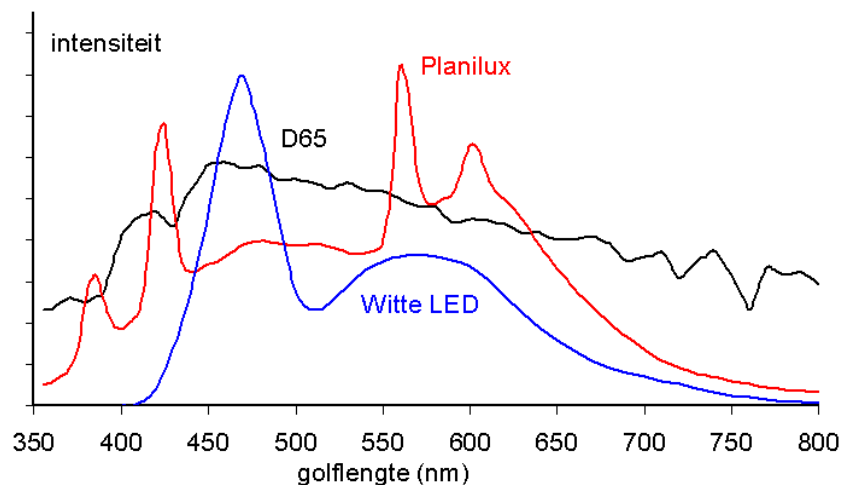
**Figuur 5.** Het spectrum van licht. *NB. Door de eigenschappen van het beeldscherm en/of de printer en de instellingen hiervan kunnen niet alle kleuren even goed weergegeven worden, dit spectrum geeft wel een globale indruk.*

Ook licht heeft een bepaalde golflengte, deze golflengte is echter veel kleiner. We drukken de golflengte uit in nanometer, afgekort als nm (één nanometer is het één miljoenste deel van een millimeter,  $1 \text{ nm} = 0.000\,001 \text{ mm}$ ). Voor de golflengte van licht gebruiken we meestal de letter  $\lambda$  (lambda). Het licht dat wij kunnen zien heeft golflengten van 480 - 780 nm. De samenhang tussen golflengte en kleur kunnen we zien in figuur 5. Licht met een golflengte van tussen 380 en 500 nm zien we als paars tot blauw, rond 550 nm is het licht groen en licht met golflengten groter dan de 620 nm zien we als rood.

Omgekeerd is het niet zo dat licht dat blauw van kleur is alleen golflengten van korter dan 500 nm bevat. Blauw licht kan ook het gehele zichtbare spectrum tussen 380 en 780 nm bevatten, maar de intensiteit van de 'blauwe' golflengten is dan relatief groter dan de intensiteit van de grotere golflengten.

Wit licht kan uit heel verschillende spectra bestaan. In figuur 6 zijn een paar voorbeelden van spectra weergegeven van lichtbronnen die wij als 'wit' ervaren. Verticaal staat de intensiteit in willekeurige eenheden, horizontaal de golflengte. De curve 'D65' geeft het spectrum van een standaard lichtbron zoals die door de CIE (Commission Internationale d'Eclairage) is gedefinieerd, en komt overeen met *daglicht*: een onbewolkte noordelijke hemel zonder direct zonlicht. De curve 'Planilux' geeft het spectrum van een lichtbak waarop Röntgen-foto's (gemaakt op film) kunnen worden beoordeeld. Verder is in figuur 6 het spectrum van een witte LED weergegeven.

Bij het beoordelen van de kleur van lichtbronnen is ons waarnemingsvermogen enigszins subjectief, kleine afwijkingen merken we niet op, omdat we ons aanpassen. Het grote verschil in het rode gebied tussen de beide lichtbronnen D65 en Planilux ervaren wij niet als zodanig, doordat onze ogen boven de 700 nm relatief ongevoelig zijn.



**Figuur 6.** Voorbeeld spectra van 'wit'-licht, D65: standaard daglicht, Planilux: een lichtbak waarop Röntgen foto's (nog op film) kunnen worden beoordeeld, en een witte LED.

## 2.2 Spectrale reflectie

Nadat het licht uit een lichtbron op een object is gevallen kan dit object het licht reflecteren. In het algemeen zal het licht voor een deel ook geabsorbeerd worden. Een groen voorwerp



absorbeert bijvoorbeeld vooral rood licht, zodat blauwe tot en met gele golflengten gereflecteerd worden. Wanneer een voorwerp alle golflengten kleiner dan 600 nm absorbeert zullen we dit voorwerp als rood ervaren.

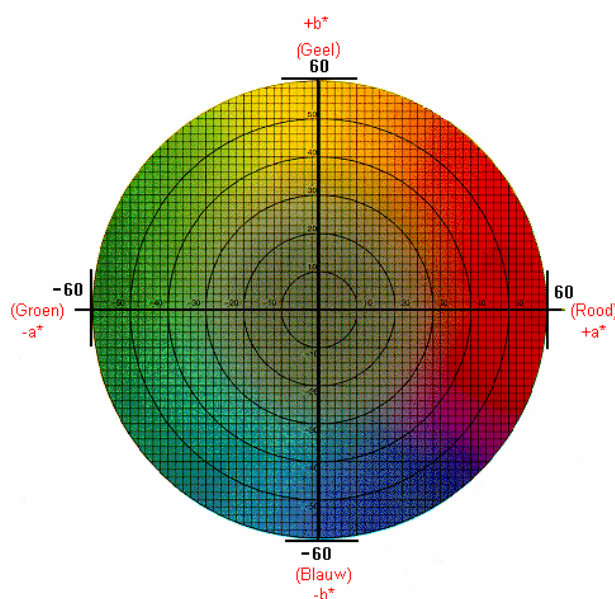
## 2.2 De ogen en het brein

Ons oog heeft maar vier soorten zintuigcellen die gevoelig zijn voor licht: staafvormige cellen en drie typen kegelvormige cellen. De staafjes zijn gevoelig voor alle kleuren licht, hiermee kunnen we geen kleur zien. De kegeltjes zijn kleurselectief, er zijn drie soorten: gevoelig voor rood, groen of blauw licht. Dat we hiermee toch veel meer kleuren kunnen zien, wordt veroorzaakt door het feit dat de gevoeligheid van deze cellen afhangt van de golflengte van het licht. Wanneer er een bepaalde signaalverhouding uit de rood- en de groen-gevoelige kegeltjes komt, zullen we het licht bijvoorbeeld als geel interpreteren. Deze signaal verwerking vindt in het brein plaats, dus hier ontstaat de kleurinterpretatie. We moeten ons er van bewust zijn dat *golflengte* van licht een *fysisch* gegeven is, maar kleur is slechts een menselijke interpretatie. De bouw van ons oog en ons brein stelt ons in staat verschillende licht spectra als verschillende kleuren waar te nemen. We hebben onderling afgesproken wat we verstaan onder 'rood', 'geel', 'groen' enzovoort, dit is geen fysisch gegeven.

## 3 Het meten van kleur bij objecten

Om kleur een nauwkeurig gedefinieerde objectieve waarde te geven is het CIE-Lab systeem ontwikkeld. Bij de komende berekeningen wordt alleen kleurvorming door reflectie beschouwd.

In het CIE-Lab systeem wordt een kleur weergegeven als een punt in een drie-dimensionale ruimte, met coördinaten  $L^*$ ,  $a^*$  en  $b^*$ . De  $L^*$ -as geeft de helderheid weer:  $L^* = 0$ : zwart;  $L^* = 100$ : wit;  $a^* = -60$ : groen,  $a^* = +60$ : rood;  $b^* = -60$ : blauw;  $b^* = +60$ : geel. De verzameling van alle mogelijke kleuren is niet kubisch, immers iets wat wit is kan niet tegelijkertijd blauw zijn. Er is dus een bepaalde samenhang tussen de maximale en minimale waarden op de drie assen.



**Figuur 7.** Kleuren weergegeven in het  $a^*b^*$ -vlak van het CIE-Lab-systeem.

Omdat de kleur van een object zal afhangen van de belichting, moet er bij een kleurmeting altijd gemeten worden tegen een referentie: een wit-standaard onder dezelfde belichting. Deze wit-standaard weerkatst eigenlijk alleen maar het spectrum van de lichtbron, daardoor kunnen we voor de belichting corrigeren. De kleur in het CIE-Lab systeem wordt meestal berekend onder D<sub>65</sub> belichting. Het gemeten reflectie-spectrum van de wit-standaard  $L_w(\lambda)$  is idealiter gelijk aan het spectrum van de lichtbron. Het gemeten reflectie-spectrum van het gekleurde object is  $L_s(\lambda)$ , beide spectra hebben als eenheid W/m<sup>2</sup>sr.

Het kleurpunt onder D<sub>65</sub> belichting wordt dan als volgt berekend:

$$\varphi(\lambda) = \frac{L_s(\lambda)}{L_w(\lambda)}$$

$$k_{10} = \frac{100}{\int E_{D65}(\lambda) \bar{y}_{10} d\lambda}$$

$$X_{10} = k_{10} \int \varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) d\lambda \quad X_{n10} = k_{10} \int \bar{x}_{10}(\lambda) d\lambda$$

$$Y_{10} = k_{10} \int \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda \quad Y_{n10} = k_{10} \int \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda$$

$$Z_{10} = k_{10} \int \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) d\lambda \quad Z_{n10} = k_{10} \int \bar{z}_{10}(\lambda) d\lambda$$

met  $\lambda$  is de golflengte in nm,  $E_{D65}(\lambda)$  is de relatieve spectrale irradiantie verdeling van de CIE standaard D<sub>65</sub> lichtbron,  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ , en  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  zijn de spectrale tristimulus waarden volgens CIE 1964. Deze spectra kunnen worden gevonden in tabel 1 en tabel 2. Vervolgens kunnen we berekenen:

$$\begin{aligned} X^* &= \sqrt[3]{X_{10} / X_{n10}} && \text{voor } X_{10} / X_{n10} > 0.008856 \\ X^* &= 7.787(X_{10} / X_{n10}) + 0.138 && \text{voor } X_{10} / X_{n10} \leq 0.008856 \end{aligned}$$

op een zelfde manier worden de waarden van  $Y^*$  en  $Z^*$  berekend. Deze waarden worden gebruikt om de CIELab (1976) kleurcoördinaten te berekenen:

$$L^* = 116Y^* - 16$$

$$a^* = 500 (X^* - Y^*)$$

$$b^* = 200 (Y^* - Z^*)$$

Soms is het van belang het verschil tussen twee kleurpunten te berekenen. Het kleurverschil  $dE$  tussen twee voorwerpen (1 en 2) met kleurpunten  $L_1^*$   $a_1^*$   $b_1^*$  en  $L_2^*$   $a_2^*$   $b_2^*$  wordt berekend als:

$$dE = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

In het algemeen wordt geaccepteerd dat twee voorwerpen dezelfde kleur hebben wanneer  $dE \leq 0.2$ .

#### 4 Opmerkingen

Kleurverschillen kunnen aanleiding geven tot geschillen. Zo was er eens een eetcafé-eigenaar die zes tafels van de zelfde kleur had besteld bij één leverancier. Na levering vond de café-eigenaar dat er tafels in twee verschillende kleuren geleverd waren. Hij vorderde een nieuwe levering of schadevergoeding van de leverancier. Wij zijn door eiser geconsulteerd om een aantal kleurmetingen te verrichten, om zo zijn argumentatie te onderbouwen. We konden echter geen kleurverschillen meten, maar we waren het ook niet geheel met de café-eigenaar oneens. Nader onderzoek wees uit dat er verschillen waren in de ruwheid van de tafel oppervlakken, waardoor onder bepaalde omstandigheden kleurverschillen zichtbaar waren.

**Tabel 1.** Spectrum van een  $D_{65}$  lichtbron, golflengte  $\lambda$  in nm

$\lambda$	$D_{65}$	$\lambda$	$D_{65}$	$\lambda$	$D_{65}$	$\lambda$	$D_{65}$	$\lambda$	$D_{65}$
355	45.8	450	117.0	550	104.0	650	80.0	750	63.6
360	46.6	455	117.4	555	102.0	655	80.1	755	55.0
365	49.4	460	117.8	560	100.0	660	80.2	760	46.4
370	52.1	465	116.3	565	98.2	665	81.2	765	56.6
		470	114.9	570	96.3	670	82.3	770	66.8
375	51.0	475	115.4	575	96.1	675	80.3	775	65.1
380	50.0	480	115.9	580	95.8	680	78.3	780	63.4
385	52.3	485	112.4	585	92.2	685	74.0	785	63.8
390	54.6	490	108.8	590	88.7	690	69.7	790	64.3
395	68.7	495	109.1	595	89.3	695	70.7	795	61.9
								800	59.5
400	82.8	500	109.4	600	90.0	700	71.6		
405	87.1	505	108.6	605	89.8	705	73.0		
410	91.5	510	107.8	610	89.6	710	74.3		
415	92.5	515	106.3	615	88.6	715	68.0		
420	93.4	520	104.8	620	87.7	720	61.6		
425	90.1	525	106.2	625	85.5	725	65.7		
430	86.7	530	107.7	630	83.3	730	69.9		
435	95.8	535	106.0	635	83.5	735	72.5		
440	104.9	540	104.4	640	83.7	740	75.1		
445	110.9	545	104.2	645	81.9	745	69.3		

**Tabel 2.** Waarden van  $\bar{x}_{10}$ ,  $\bar{y}_{10}$  en  $\bar{z}_{10}$  als functie van de golflengte  $\lambda$  in nm

$\lambda$	$\bar{x}_{10}$	$\bar{y}_{10}$	$\bar{z}_{10}$	$\lambda$	$\bar{x}_{10}$	$\bar{y}_{10}$	$\bar{z}_{10}$	$\lambda$	$\bar{x}_{10}$	$\bar{y}_{10}$	$\bar{z}_{10}$
380	0.0014	0.0000	0.0065	525	0.1096	0.7932	0.0573	675	0.0636	0.0232	0.0000
385	0.0022	0.0001	0.0105	530	0.1655	0.8620	0.0422	680	0.0468	0.0170	0.0000
390	0.0042	0.0001	0.0201	535	0.2257	0.9149	0.0298	685	0.0329	0.0119	0.0000
395	0.0076	0.0002	0.0362	540	0.2904	0.9540	0.0203	690	0.0227	0.0082	0.0000
				545	0.3597	0.9803	0.0134	695	0.0158	0.0057	0.0000
400	0.0143	0.0004	0.0679	550	0.4334	0.9950	0.0087	700	0.0114	0.0041	0.0000
405	0.0232	0.0006	0.1102	555	0.5121	1.0002	0.0057	705	0.0081	0.0029	0.0000
410	0.0435	0.0012	0.2074	560	0.5945	0.9950	0.0039	710	0.0058	0.0021	0.0000
415	0.0776	0.0022	0.3713	565	0.6784	0.9786	0.0027	715	0.0041	0.0015	0.0000
420	0.1344	0.0040	0.6456	570	0.7621	0.9520	0.0021	720	0.0029	0.0010	0.0000
425	0.2148	0.0073	1.0391	575	0.8425	0.9154	0.0018	725	0.0020	0.0007	0.0000
430	0.2839	0.0116	1.3856	580	0.9163	0.8700	0.0017	730	0.0014	0.0005	0.0000
435	0.3285	0.0168	1.6230	585	0.9786	0.8163	0.0014	735	0.0010	0.0004	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	590	1.0263	0.7570	0.0011	740	0.0007	0.0003	0.0000
445	0.3481	0.0298	1.7826	595	1.0567	0.6949	0.0010	745	0.0005	0.0002	0.0000
450	0.3362	0.0380	1.7721	600	1.0622	0.6310	0.0008	750	0.0003	0.0001	0.0000
455	0.3187	0.0480	1.7441	605	1.0456	0.5668	0.0006	755	0.0002	0.0001	0.0000
460	0.2908	0.0600	1.6692	610	1.0026	0.5030	0.0003	760	0.0002	0.0001	0.0000
465	0.2511	0.0739	1.5281	615	0.9384	0.4412	0.0002	765	0.0001	0.0000	0.0000
470	0.1954	0.0910	1.2876	620	0.8544	0.3810	0.0002	770	0.0001	0.0000	0.0000
475	0.1421	0.1126	1.0419	625	0.7514	0.3210	0.0001	775	0.0000	0.0000	0.0000
480	0.0956	0.1390	0.8130	630	0.6424	0.2650	0.0000	780	0.0000	0.0000	0.0000
485	0.0580	0.1693	0.6162	635	0.5419	0.2170	0.0000				
490	0.0320	0.2080	0.4652	640	0.4479	0.1750	0.0000				
495	0.0147	0.2586	0.3533	645	0.3608	0.1382	0.0000				
500	0.0049	0.3230	0.2720	650	0.2835	0.1070	0.0000				
505	0.0024	0.4073	0.2123	655	0.2187	0.0816	0.0000				
510	0.0093	0.5030	0.1582	660	0.1649	0.0610	0.0000				
515	0.0291	0.6082	0.1117	665	0.1212	0.0446	0.0000				
520	0.0633	0.7100	0.0782	670	0.0874	0.0320	0.0000				

**De auteur, de uitgever en/of hun medewerkers aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor schade, letsel, verwonding of verlies veroorzaakt door het gebruik van deze informatie.**