



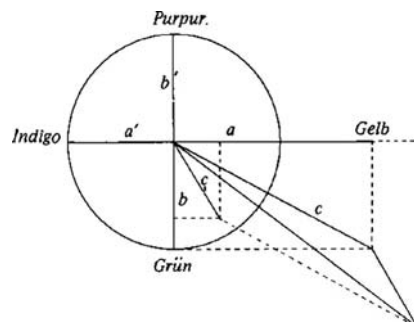
# CIE systemet, farvemåling

## Lyset og øjet 12

Farvedebilleder indgår i vor hverdag på utrolig mange og tiltagende måder. TV, video kamera, fotoapparat, PC med tilhørende printer og nu også i en digitaliseret form. Hvordan etablerer vi en forbindelse mellem en opfattet farve og de lysintensiteter, som apparaterne producerer? Hvordan kvantiterer vi både den opfattede og den udsendte farve? Prøver at gøre farven apparaturafhængig.

Opfattelsen af farverne er, som vi før har været inde på, strengt personlig og alligevel er det muligt at kvantitere denne specielle synsoplevelse.

Det lys eller lys flux, som sætter vores syn i gang, transmitteres som elektriske signaler af fotoreceptorerne, som i dagslys er de retinale tappe. De tre typer tappe hos de fleste mennesker har spektrale følsomheder i det korte (S for Short) Mellem (M) og Lange (L) bølgeområde af det synlige



Farven sammensættes af de tre dele af vektorretninger  $a, b$  og  $c$ .



Grassmann (1809-77) skabte den geometriske vektorregning, som er grundlaget for favernes addition i Grassmanns farvelov.

Samtiden var ikke moden til det. I stedet kastede han sig over sprogene og skabte en anden Grassmanns lov. Den lingvistiske lov om de indoeuropæiske sprogs udvikling.

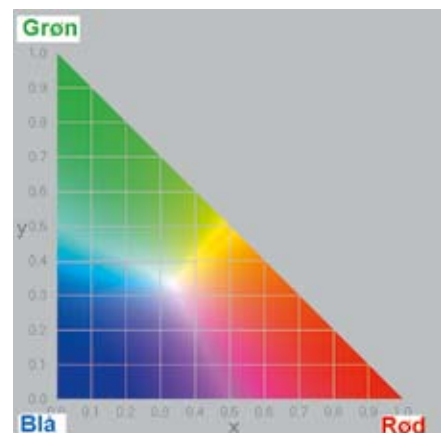
lys, vi er trikromater. Absorptionen af en foton fører til strukturelle ændringer i fotopigmentet, som ved en enzymatisk kaskade danner det elektriske tapsignal.

Herefter er al information om fotonets bølglængde stort set tabt. Mængden af fotoner, som absorberes af receptorerne af de tre typer, bestemmer den yderligere proces i retina og også den opfattede farve i hjernen. Bølglængden er reduceret til et samspil mellem de tre receptortyper. Den grundige iagtager vil jo også lægge mærke til, at den mellemvægede receptor, vi som stadig af

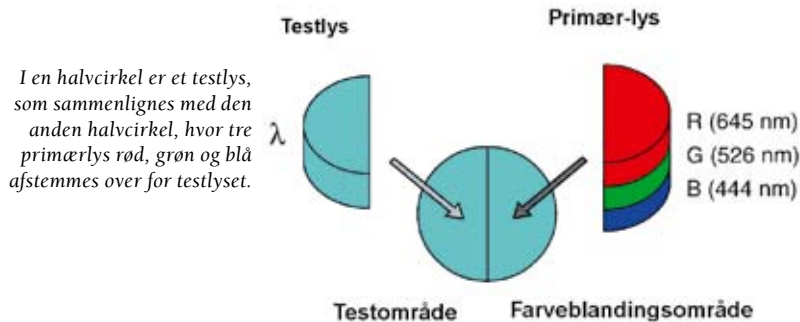


James Maxwell og hustruen Kathleen. Hustruen var forsøgsperson i de første farveblandingsforsøg.

mnemotekniske grunde kalder den 'grønne' receptor har absorptionsmaksimum i det gulgrønne spektrale område. Og den langbølgede receptor, den "røde" har absorptionsmaksimum i det orange område.



Maxwells farvetekant er udgangspunktet for CIE farvesystemet. Den enkelte farves udsendelse kan aflæses som en brøk.



Vi kan derfor beskrive farverne som et 3-dimensionelt farverum, som dannes af de tre receptortypers absorption og efterfølgende excitationer af nervecellerne. Men da farvemetriken blev udviklet, kendte man ikke tappens absorptionspektra. I stedet gik man indirekte til værks baseret på Helmholtz, Grassmanns og især Maxwells arbejder.

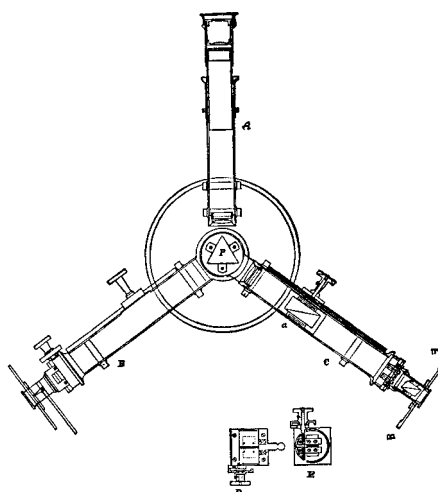
Først defineres tre primærfarver, som vælges fra det korte, mellem og langbølgede område.

Alle normale mennesker kan afstemme (matche) enhver farve, ligegyldigt hvilken intensitet den har med valgte primærfarver, med den lille men meget vigtige undtagelse, at i nogle tilfælde må en af primærfarverne tilsættes farveprøven for at få den til at fremstå mere umættet.

Det er forklaringen på forekomsten af negative farveblandingsværdier. (Negative påvirkninger og følelser er ikke kun forbeholdt adfærdspsykologien).

For eksempel, hvis vi ser på Maxwells farvetrekant, som kunne ligne en god repræsentation for et farvesystem, hvor koordinaterne er lette at finde. Her er siderne per defi-

nition de mest mættede farver, men hvis vi sammenligner farvepunkterne med de ekvivalente spektralfarver for eksempel farven cyan midtpå linien mellem blå og grøn, så er farven på dette punkt ikke så intens og mættet som spektra i farven. Den eneste måde at gøre de to farver identiske er ved at tilsætte den tredje primære blandingsfarve, rød, til spektralfarven. I matematikken er det det samme som at addere negativt rødt til farven i farvetrekanten og at flytte punktet uden for trekanten.



König og Dieterichs spektrale farveblender var meget nøjagtig for tiden, som det ses.

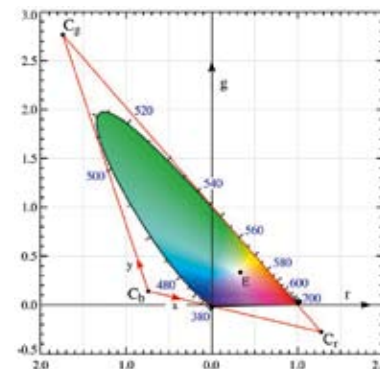
### Men hvilke farver skal være primære?

Det er muligt for forskellige spektrale energifordelinger at producere identiske farvefølelser. Det er det, som kaldes metamere farver, og som giver anledning til indkøb af en skjorte, som var blå i forretningen, og som blev pink hjemme på grund af forskellig belysning i forretningen og hjemme.

En orange følelse kan fås af såvel spektrallys ved 600 nm, men

også af lys fra to bølgelængder på 500 og 610 nm. Eller for den sags skyld også af et bredt bånd fra 550 til 700 nm.

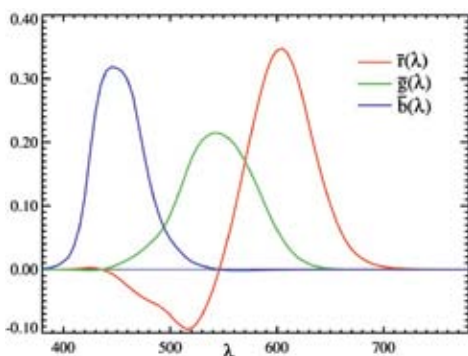
Blandingen af farve kan foregå som oprindeligt partitivt med en roterende skive med farvede felter, 'Maxwells disk', hvor Maxwell brugte



Afbildning af RGB farvetrekant. Farveblandingsfunktionerne RGB indholder negative værdier. I det transformerede xyz system er alle værdier positive.

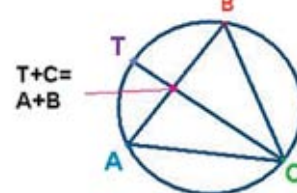
sin hustru Kathleen som forsøgsperson. Senere tre monokromatiske lys. Det kan også ske med tre projektorer rettet mod en skærm. De første videnskabelige forsøg er gjort med et kolorimeter, hvor de tre primære lys var 444,2, 526,3 og 645,2 nm., som projiceres til et halvcirkelformet område. Den anden halvcirkel er prøveområdet. Valget af primærfarver er et rent teknisk problem. Andre primærfarver havde givet lignende resultater. Lysene skal blot være uafhængige af hinanden, det vil sige, ingen af lysene kan blandes af de andre to.

Matchningen foretages ved, at observatøren justerer den mængde lys, der skal til for at ramme testfarven. Den mængde lys af de tre primærlys,

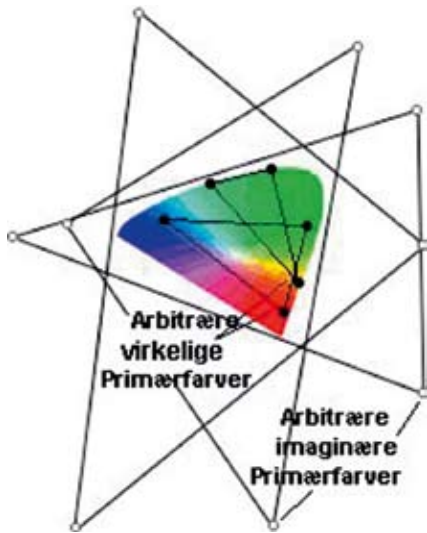


Farveblandingsfunktionerne  $r, b$  og  $g$ . Stregen over  $r, g$  og  $b$  betyder, at der er tale om en funktion.

Farveblandning hvor "negativ" lysmængde anvendes



Testlyset "T" ligger uden for trekanten, der dannes af blandingslysene ABC "T" matches kun ved en "negativ farve procedure", som danner en speciel blanding af T og C, som matches af en speciel blanding af A og B, som det vises i krydsningen mellem linierne AB og TC.



En demonstration af hvordan forskellige primærfarver vil ændre farvetrekanten. Både reelle primærfarver og arbitrære.

der skal til for at ramme matchen, kaldes tristimulus værdien, (tristimulusvalue) af den aktuelle farve. Når matchningen foregår gennem hele det synlige spektrum (fra 380 nm til ca. 740 nm), får man tre kurver, som kaldes Farveblandingsfunktionen, FBF eller som på engelsk colour-matching function. Farveblandingsfunktionerne repræsenterer således

de tristimulusværdier (mængden af de tre primærlys), som kræves for at matche en bestemt lysmængde ved hver bølglængde.

I farveblandingsforsøgene afstemmes f.eks. en given gul farve med spektrale primærfarver rød og grøn og blå: R,G,B. Resultatet kan da f. eks blive:

$$\text{"gul farve"} = C = 0,2075 R + 0,1543 G - 0,0001 B$$

Farveblandingsfunktionen er lidt forskellig for hvert sæt primærlys, og den varierer også lidt fra person til person.

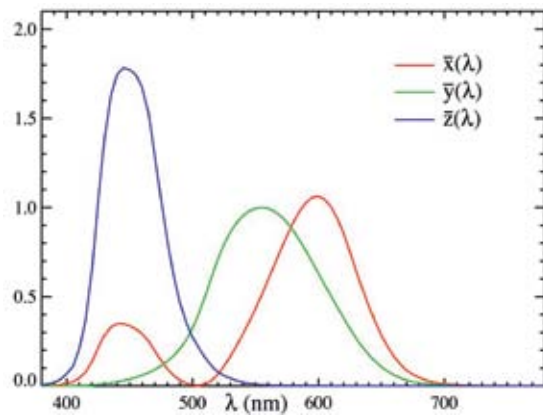
Genetisk farveblinde kan siges at have en reduceret form, idet en

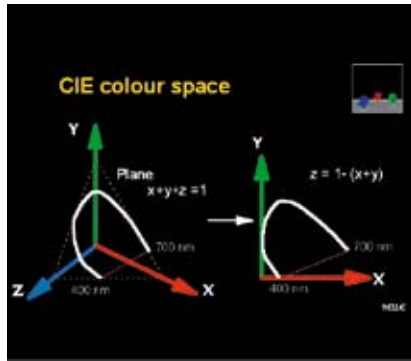
fotoreceptor helt eller delvis er sat ud, behøver kun to primær lys for at kunne blande alle farver, når det drejer sig om dikromater, men det er en anden historie, som vi senere kommer tilbage til.

Når vi ser kurven over farveblandingsfunktionen, ser vi at nogle tristimulusværdier er negative. Det skyldes, som før nævnt, at man i farveblandingsforsøget har været nødt til at addere lys fra et af primærlysene til testlyset. Der er f. eks 'uønsket rødt' lys i det 'blå område'.

Lys, der adderes testlyset, kan betragtes som at være subtraheret fra primærlysblendingen. Den mængde

De normaliserede farveblandingsfunktioner x, y og z



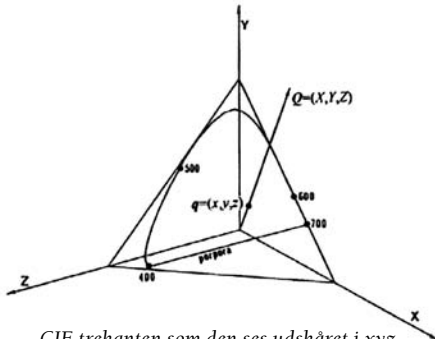


Den tredimensionelle afbildning gøres papirvenlig og todimensional ved at gøre  $z=1-(x+y)$ .

af ethvert primærlys, der adderes, registreres derfor som en negativ tristimulusværdi.

Det er vigtigt at forstå, at *enhver farveblandingsfunktion baseret på ethvert sæt af fysisk realiserbare primærfarver har negative værdier*. Det er indbygget i farveopfattelsen.

Dette faktum er grunden til, at de farvebilledsystemer, vi har og vil få, aldrig kan fremstille den spændvidde af farver, som vi kan se. Der vil altid være et begrænset omfang (eng. gamut), så annoncerne for digitalkameraet eller TV-skærmen med 'virkelige' farver er noget sludder.



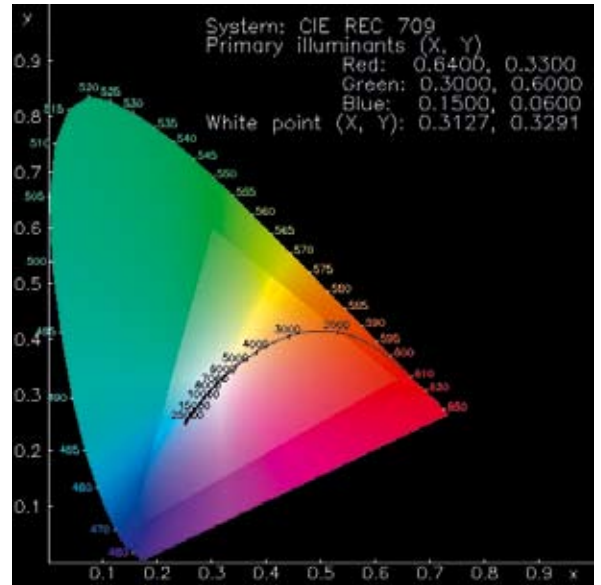
CIE trekanten som den ses udskåret i xyz rummet.

På TV, både Katode strålerøret (CRT) og fladskærmen (LCD og FTF) ser man tydeligt, at blågrønne farver omkring 500-510 nm er ret så dårlige.

### Indførelsen af ideale virtuelle primærfarver

Det vigtigste videnskabelige farvesystem er stadig CIE systemet, som udvikledes af Commission Internationale de l'Éclairage i 1931 (fr. Internationale belysningskommission) med John Guild og E.D. Wright som hovedkræfter.

CIE diagrammet. Y-aksen angiver lysheden. Hvidhedspunktet ligger centralt, og hvidhedspunktet varierer med lyskilden og farvetemperaturen og forskellige farvetemperaturer ses angivet.



I ethvert studie af farver er det nødvendigt at have kendskab til dette system og efterhånden også forstå det.

I CIE tog man hensyn til negative værdier og indrettede de tre primærlys sådan, at de negative værdier forsvandt. Det kunne lade sig gøre, fordi farverne adderes, og der er linearitet og proportionalitet imellem farverne. RGB tristimulusværdierne blev således erstattet af XYZ på en sådan måde, at Y værdien kom meget hensigtsmæssigt og snedigt til at angive luminansen, fordi de ideale imaginære primærlys har nul luminans.

Vi får altså i stedet:

$$\text{"gul farve"} = C = 0,8425 X + 0,9154 Y + 0,00018 Z$$

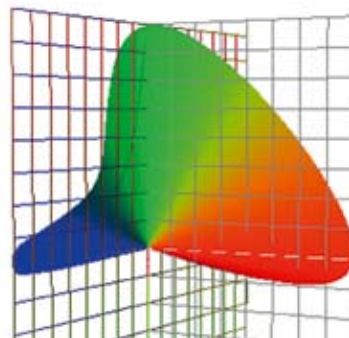
Se det er jo noget af et paradoks. Vi arbejder med farver, der kun eksisterer i den enkelte hjerne og anvender imaginære farver i et målesystem. Men for en matematiker er det krystalklart, idet der er tale om

simpel lineær algebra, matrix transformation, fra det ene system til det andet.

Rushton, som foretog de første in vivo bestemmelse af synspigmenternes absorption ved fundus reflektometri, beskrev de lidt besværlige måder, beregningen foregik på, når man anvendte forskellige primærfarver. Det er "som kvadratroden af -1 i vekselstrøm teorien. Den giver pæne og eksakte svar på kalkulationerne, men introducerer et næsten uforståeligt koncept af, hvad der egentlig foregår."

I CIE-systemet er der således akser svarende til tre primærfarver, X,Y,Z

Hver farve har et farvekoordinat (x,y,z), hvor X-aksen er "rød", Y-aksen "grøn" og Z-aksen "blå", og det er opbygget sådan, at  $x+y+z = 1$ . Det får den konsekvens, at vi kan afbilde det 3-dimensionelle system, 2-dimensionalt idet  $z = 1-(x+y)$ .

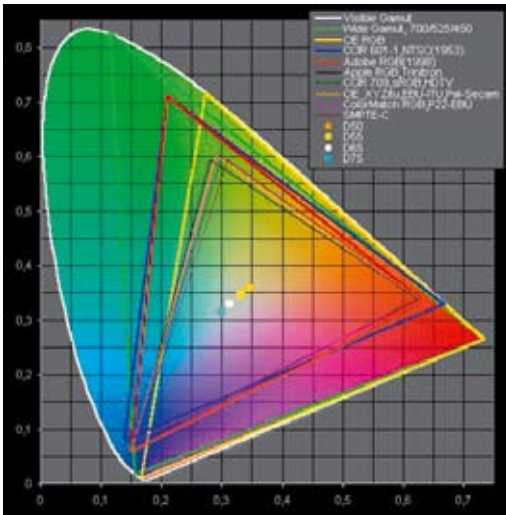


Afbildning af tristimulusværdierne i XYZ rummet.

Guild fra National Physical Laboratory og Wright fra Imperial College i London undersøgte 7 henholdsvis 10 personer, og resultaterne af forsøgene på disse i alt kun 17 personer defineres som "standardobservatøren" eller som på engelsk: standard-observer.

Vi behøver ikke derfor at gentage alle de omstændige farvefølsomhedsmålinger, som ligger til grund for standardobservatøren

Da farveblandingsfunktionen



Trekantene angiver den spændvidde (gamut), som forskellige afbildningsapparater har. Farver uden for trekanten afbildes ikke.

En stor fordel ved CIE systemet er, at Tristimulusværdien  $Y$  udtrykker øjets spektrale lysfølsomhed (I fagsproget: spektral photopic luminosity function,  $V$ ) og altså lysheden af en målt farveprøve.

CIE diagrammet har selvfølgelig også ulemper. Det kræver en stor indsats at forstå det. Forklaringen ovenfor er mere end forenklet.

I CIE er der ikke ens afstand mellem de farver, der

kan skelnes. Man har derfor foretaget andre matematiske transformationer og er nået frem til CIE LAB for subtraktive medier og CIE LUV for additive medier.

I de seneste år har man forsøgt sig med systemer, hvor grundlaget er selve den retinale receptors følsomhed, men de er stadig på udviklingsstadiet. Fælles for alle de nyere systemer er, at de alle refererer til CIE 1931 og nyeste revisioner, som har fundet sted ca. hvert tiende år.

Referencer: [www.ofthalmolog.com](http://www.ofthalmolog.com)

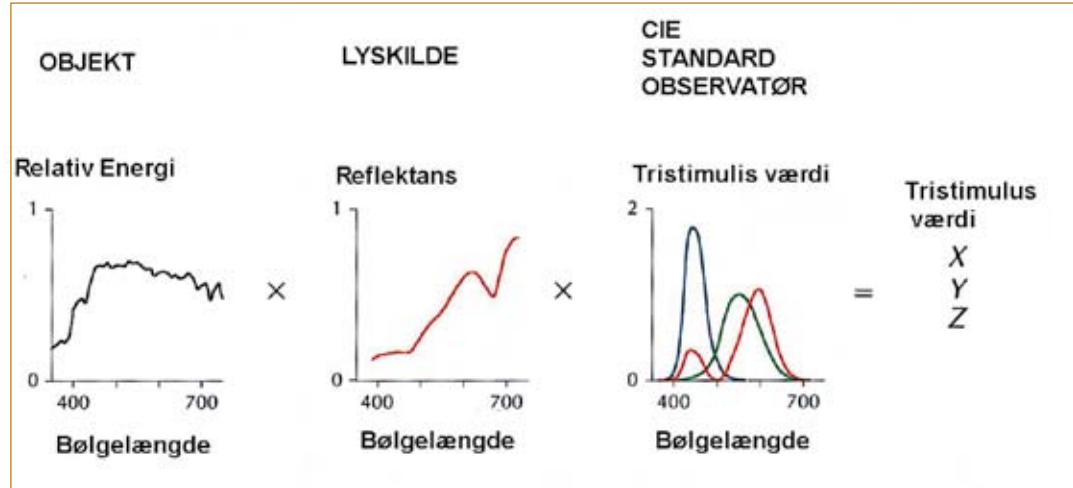
er fastlagt en gang for alle ved en fastlagt belysning, kan vi måle en farveprøves farve eentydigt ved at måle prøvens spektrale fordeling ved en kendt eller målt belysning.

Lyskildens og farveprøvens lysfordeling ganges med Standardobservatørens afstemningsfunktion, og vi får farvekoordinaterne fra:

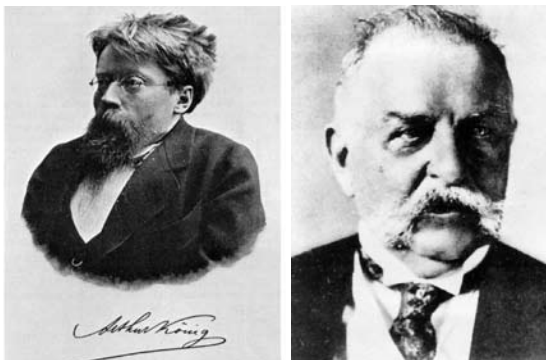
$$x = X / X+Y+Z, \quad y = Y / X+Y+Z \quad \text{og} \quad z = Z / X+Y+Z = 1 - (x+y)$$

I CIE diagrammet ses spektret som den buede linie. Den rette linie mellem yderpunkterne beskriver de farver, der ikke findes i spektret. Den kaldes derfor tit purpurlinjen, den nonspektrale linie.

Farven hvid har vi i 'hvidhedspunktet', som med en ideal lyskilde har koordinaterne 0,33;0,33,0,33. Hvordan hvidhedspunktet forskydes ved ændret farvetemperatur og belysningskilde ses af figuren.



Når tristimulusværdierne er fastlagt, kan en reflekteret farve bestemmes ved at multiplicere den spektrale fordeling af det aktuelle lys med reflektansen og med de tabelførte tristimulusværdier. Tilsvarende forholder det sig med en transmitteret farve.



König og Dieterich var begge elever af Helmholtz og arbejdede sammen i Berlin, hvor de foretog de første meget nøjagtige målinger af farveblandingen.

## Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum.<sup>1</sup>

Von  
ARTHUR KÖNIG und CONRAD DIETERICH.

### I. Einleitung.

§ 1. Präzisierung der Aufgabe. Die Einsicht in die Funktion der den Lichtreiz perzipierenden Elemente des Gesichtsinnes muß angebahnt werden durch Reduktion der unendlichen Menge von Farbenempfindungen auf eine möglichst kleine Anzahl von „Elementarempfindungen“, deren alleinige oder gleichzeitige Auslösung in wechselnder Intensität und wechselndem Verhältnis die übrigen Farbenempfindungen entstehen läßt, von denen aber gar nicht vorausgesetzt wird, daß