

# Von den Spektralwertkurven CIE 1931 zu den spektralen Zapfenfunktionen der menschlichen Augen-Kurze Betrachtung und Konsequenzen

Dr. Tran Quoc Khanh, ARRI AG, Forschungsabteilung, Türkenstr. 89, 80799 München

Diese Arbeit skizziert einige Probleme der heutigen Farbmeßtechnik, die mit der Definition der Normspektralwertkurven entstehen. Eine Lösung könnte durch die Betrachtung der Zapfen-Empfindlichkeitskurven ermöglicht sein.

## 1. Spektralwertkurven

Die Farbmeßtechnik ist nach dem Sinne von Wyszecki /1/ das Fachgebiet, das für die Vorhersage benutzt wird, ob zwei Strahlungsfelder (Stimuli) mit unterschiedlicher spektraler Verteilung für bestimmte Betrachtungsbedingungen in Farbe gleich aussehen oder nicht. Wenn die Normfarbwerte der beiden Strahlungsfelder identisch sind, sind die beiden Farben gleich für den mittleren Beobachter mit normalem Farbsehen.

Dieser Beobachter ist laut der Dreifarbentheorie /2,3/ mit seinen 3 Arten von Augenzapfen in der Lage, aus drei vorgegebenen primären Farben zu einer beliebigen Spektralfarbe zu mischen. Die drei damit verbundenen Funktionen, die die Verhältnisse der drei Primärfarben zu der Spektralfarbe beschreiben, sind die Spektralwertkurven. Ein System von Funktionen mit positiven Funktionswerten wurde von CIE 1931 als Normspektralwertfunktionen  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$  für den 2°-Normalbeobachter definiert, wobei die  $y(\lambda)$ -Funktion identisch mit der  $V(\lambda)$ -Funktion ist. Diese Funktionen wurden von Judd (1951) und Vos (1978) verbessert.

Bild 1 zeigt die CIE-Funktionen für den 2°-Beobachter und die Kurven von Judd und Vos.

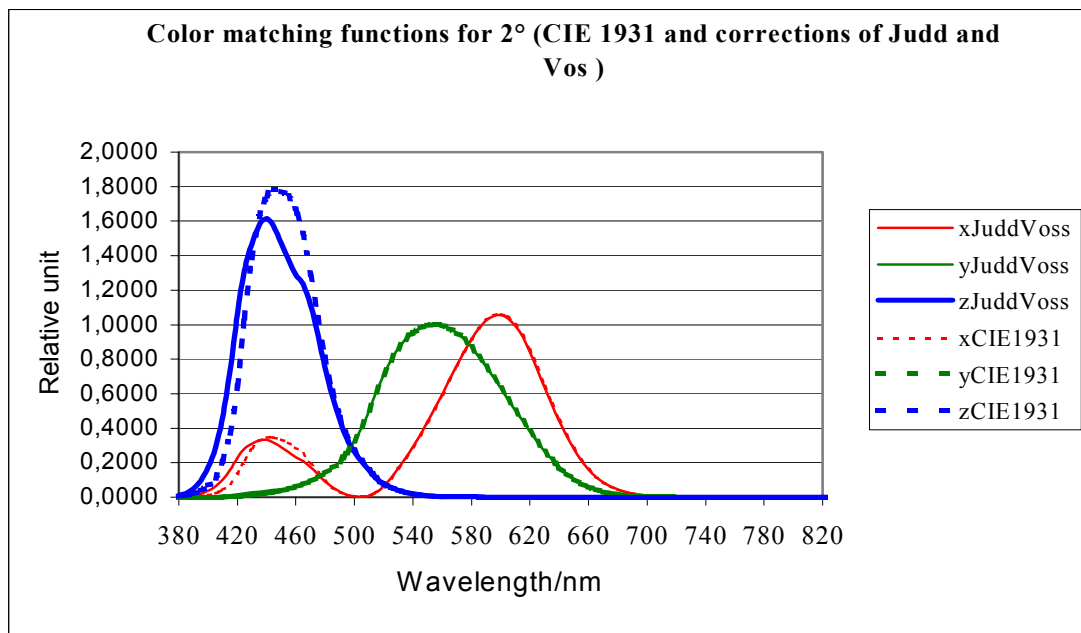


Bild 1: verschiedene Funktionen für 2°-Farbsehen von CIE 1931 und Judd& Vos

Die beiden Funktionssysteme unterscheiden sich relativ stark im blauen-violetten Bereich vor 480 nm.

Sowohl die CIE-Funktionen als auch die von Judd&Vos sind rekonstruierte Funktionen aus den Versuchen von Wright (1929) und Guid (1931). Direkte Meßergebnisse wurden durch Versuche von Stiles 1955 an 10 Versuchspersonen gewonnen (Bild 2).

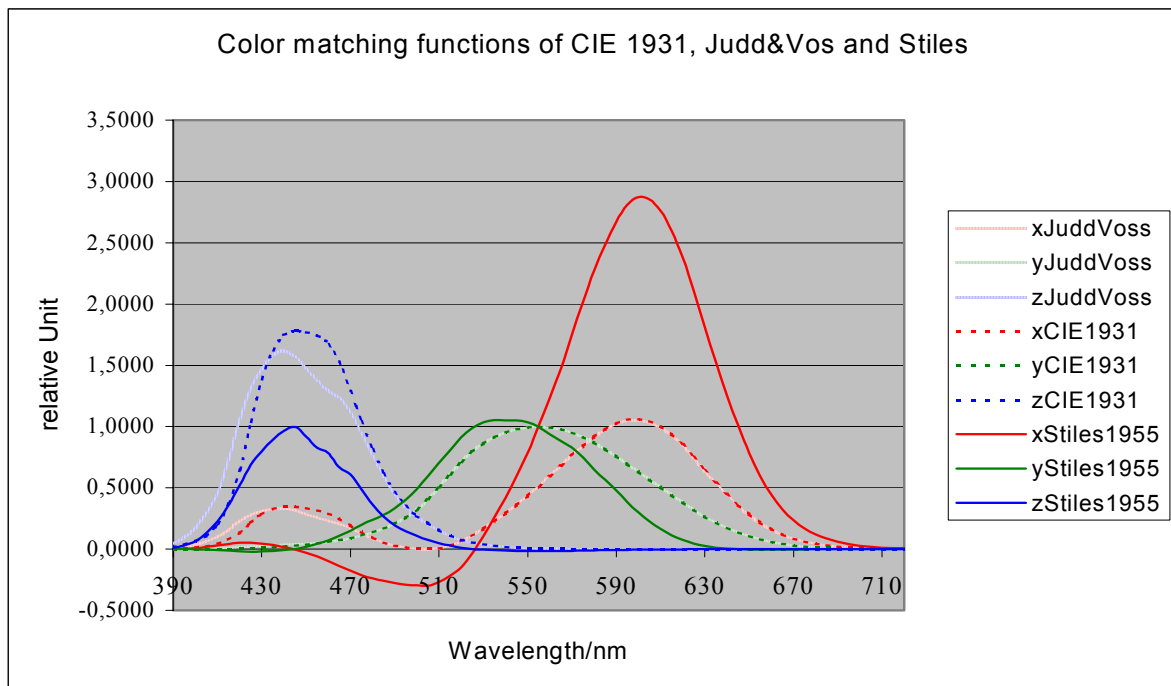


Bild 2: verschiedene Funktionen für 2°-Farbsehen von CIE, Stiles und Judd& Vos

Hier ist der Unterschied zwischen rekonstruierten und gemessenen Funktionen besonders in der y-Funktion zu sehen, wobei das Maximum der Stiles-Funktion bei 535 nm liegt, statt 555 nm wie bei der CIE-Funktion. Die umfangreichste und sehr sichere Testreihe von Stiles und Burch 1959 für das 10°-Sehfeld wurde mit 49 Personen von 392.2 bis 714.3 nm und mit 9 Personen von 714.3 bis 824.2 nm durchgeführt und zum großen Teil von CIE für die Definition von Großfeld-Normspektralwertfunktionen übernommen.

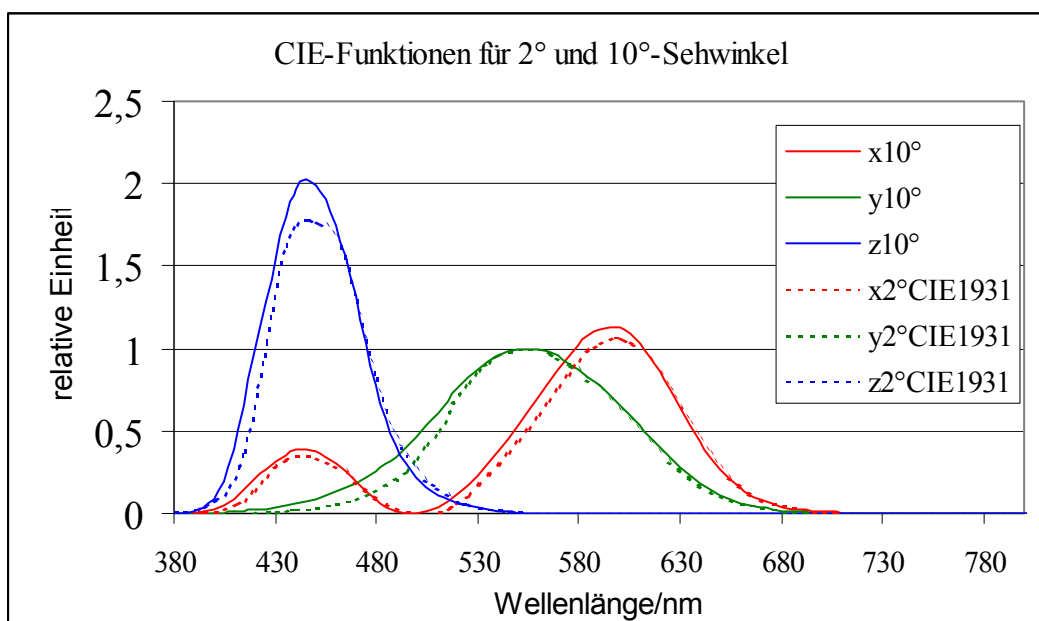


Bild 3: CIE Funktionen für 2° und 10° Sehwinkel

Die Augen sind gemäß Bild 3 mit 10°-Sehwinkel relativ empfindlicher jeweils in den kürzerwelligeren Bereichen als mit 2°-Sehwinkel, wenn man die linken Flanken der Kurven vergleicht, wobei die Maxima der beiden Funktionssysteme nahezu bei gleichen Wellenlängen liegen.

Da die Normspektralwertkurven für 2° verbesserungswürdig sind aber bisher keine Korrektur von der Seite von CIE gemacht wurde, sind häufig die Fälle berichtet, dass zwei Objekte mit gleichen Normfarbwerten nicht gleich aussehen. Man muß auch feststellen, dass eine mögliche Neudefinition der Kurven, verbunden mit besseren Testergebnissen, zwar zeitaufwendig, aber für die Konstruktion einer gesicherten Farbmeßtechnik notwendig ist. Es muß auch nach mehr als 70 Jahren seit der Einführung der Funktionen möglich sein, neue Testreihen mit besserer Technik durchzuführen.

Auch die Praxis der Farbreproduktion in der Graphik-Film-und Fernsehindustrie sowie im täglichen Leben hat gezeigt, dass meistens Farbobjekte unter Sehwinkel von weit mehr als 2° betrachtet werden (z.B. das Betrachten von einem Textilmuster am CRT-Monitor in einer Designabteilung oder die Farbbildkorrektur am Monitor durch die Coloristen in der Filmindustrie). Die Meßwerte, die der Farbbildkorrektur zugrundeliegen, sind mit einem Meßgerät (Farbmeßgerät, Spektroradiometer) für 2°-System gewonnen.

Es ist zum Teil der Grund auch, warum die Ergebnisse der Korrektur in der Farbreproduktion durch Farbmanagement im blauen und grünen Bereich nicht immer befriedigend sind. Während dieser Fehler im grünen Bereich leichter zu verkraften ist, durch die dort größeren MacAdam-Ellipsen, ist er im blauen-violetten Bereich leicht erkennbar.

## 2. Die Zapfenempfindlichkeit-Funktionen

Die nicht korrekten x,y,z-Funktionen werden weiter verwendet, um daraus L,a,b-Werte (CIE-Lab1976) zu gewinnen. Mit den Farbwerten X, Y, Z der zu betrachtenden Farbe und den Farbwerten des Referenzweiß: X<sub>s</sub>; Y<sub>s</sub>; Z<sub>s</sub> lassen sich L, a und b wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} L &= 116 * (Y/Y_s)^{1/3} - 16 \\ a &= 500 * ((X/X_s)^{1/3} - (Y/Y_s)^{1/3}) \\ b &= 200 * ((Y/Y_s)^{1/3} - (Z/Z_s)^{1/3}) \end{aligned} \quad L > 0,008856$$

Daraus wird die Farbdifferenz nach der CIELAB-ΔE-Formel berechnet. Die "empfindungsgemäße" Farbdifferenz (ΔE) zwischen einer Farbprobe und Bezugsfarbe ergibt sich aus den Werten L, a und b jeweils von Probe und Bezug. ΔE wird mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta E = [(L_P - L_B)^2 + (a_P - a_B)^2 + (b_P - b_B)^2]^{0,5}$$

Indexerläuterung: P -> Probe; B -> Bezug

Bei dieser ganzen obigen Berechnung nach CIELab1976 geht man davon aus, dass die Blau-Gelb sowie Grün-Rot-Empfindung sowie die Helligkeitsempfindung durch eine Normierung von X,Y,Z auf die entsprechenden Referenzwerte X<sub>s</sub>; Y<sub>s</sub>; Z<sub>s</sub> und anschließende Skalierung beschrieben werden kann. Dass es nicht gut bei der chromatischen Adaptation funktioniert, ist seit langem bekannt.

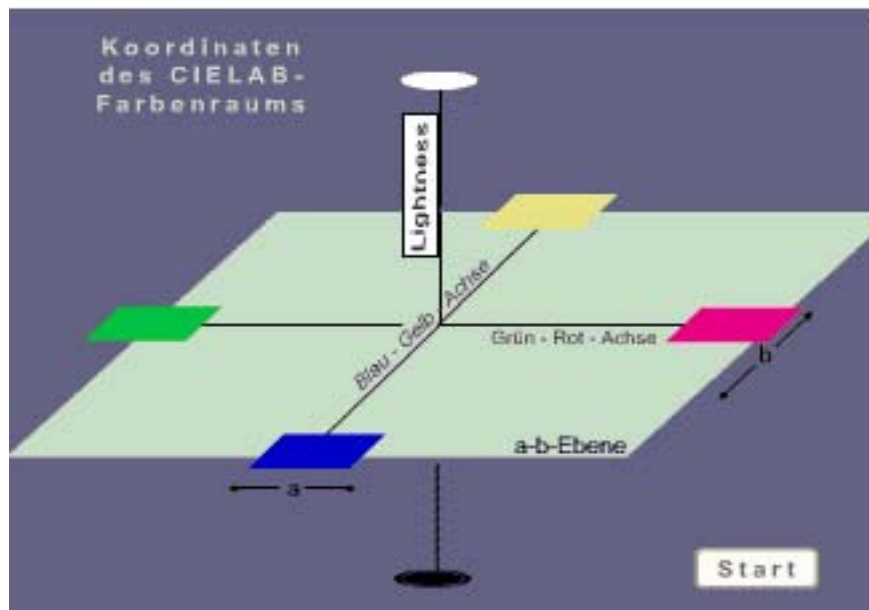
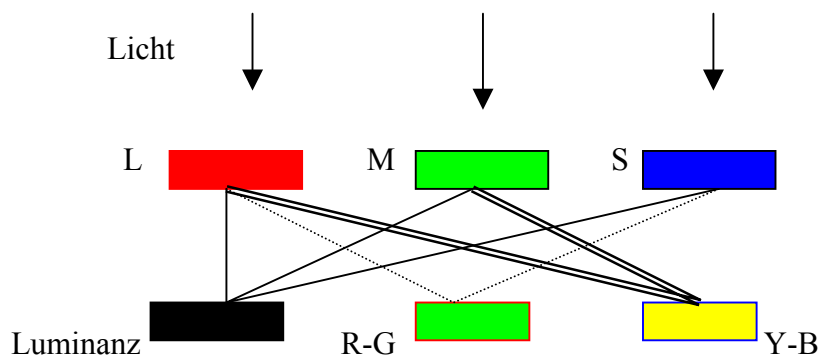


Bild 4 : Der CIELAB-Farbraum (Quelle: [www.Farbmetrik-Gall.de](http://www.Farbmetrik-Gall.de))

Die Normspektralwertfunktionen sind nicht die spektralen Empfindlichkeitskurven der Netzhautelemente sondern Rechenfunktionen und die Farbwerte X,Y,Z sind nicht den Zapfenstromsignalen gleich zu setzen. Die Gehirnverarbeitung beim Lichteinfall auf die Netzhaut funktioniert nach dem heutigen Stand der Kenntnisse wie folgt (s.Bild 5):



**Bild 5:** Netzhautnahe Stufen der Gehirnsignalverarbeitung

L,M,S sind dabei die Zapfenarten in den langen, mittleren und kurzen Spektralbereichen. Die spektralen Empfindlichkeitskurven dazu sind die  $L(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  und  $S(\lambda)$ -Funktionen. Die beim Lichteinfall mit dem Spektrum  $E(\lambda)$  generierten Zapfenstromsignale sind proportional zu den folgenden Integralwerten:

$$\begin{aligned} L &= k_l \int E(\lambda) * L(\lambda).d\lambda \\ M &= k_m \int E(\lambda) * M(\lambda).d\lambda \\ S &= k_s \int E(\lambda) * S(\lambda).d\lambda \end{aligned} \quad k_l, k_m, k_s \text{ sind Faktoren}$$

In den späteren Stufen der Gehirnsignalverarbeitung sind diese Zapfenstromsignale als Eingangsdaten verwendet. Es ist deshalb notwendig, mit den Zapfenspektraempfindlichkeitskurven zu arbeiten. Es gab in den letzten 30 Jahren bis heute viele Versuche um diese Funktionen entweder direkt oder durch rekonstruierende Berechnungen zu gewinnen. Die Bilder 6 und 7 stellen die Ergebnisse dieser Arbeiten dar /4,5,6/:

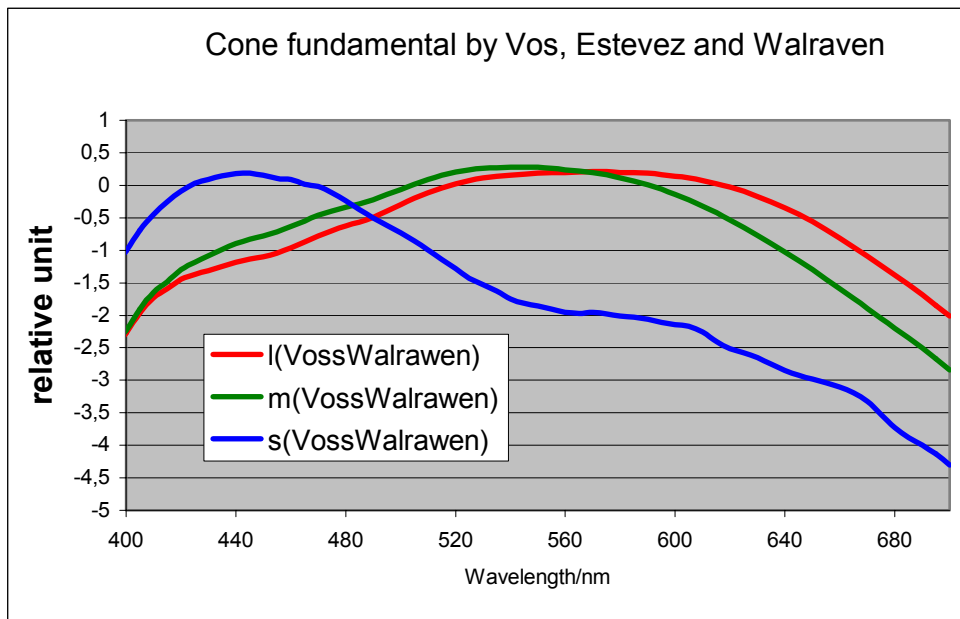


Bild 6: Zapfenspektraempfindlichkeitskurven nach Vos, Estevez und Walraven

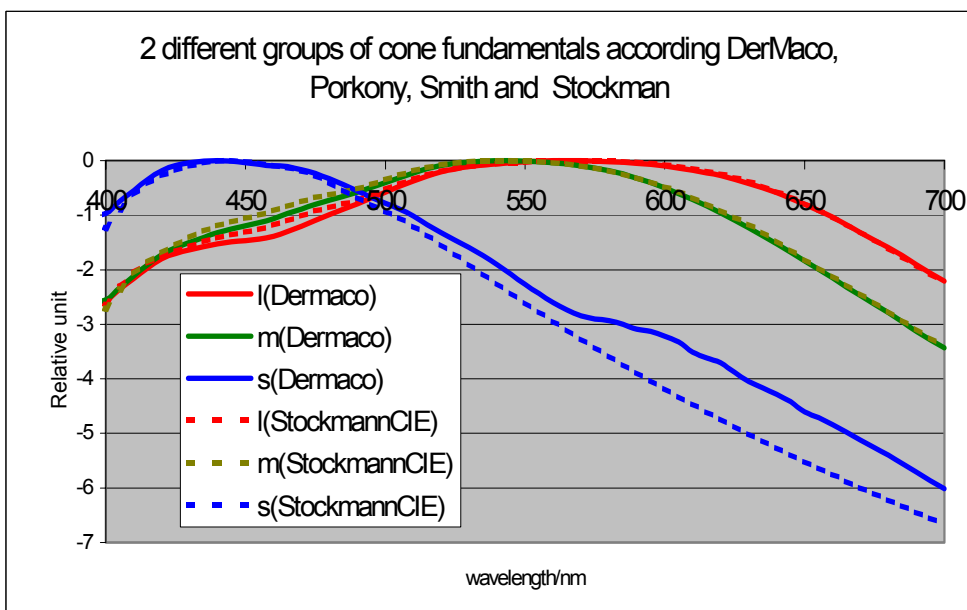


Bild 7: Zapfenspektraempfindlichkeitskurven nach Dermaco&Co sowie nach Stockman

Die Konsequenzen sind vielschichtig. Aus der Sicht der Farbmeßtechnik ist es ratsam, ein Farbmeßgerät nach den L,M,S-Funktionen zu entwickeln und danach ( wenn notwendig) durch eine Matrixumrechnung die X,Y,Z-Werte zu erhalten. Diese Entwicklung ist z.Zt. vom Author dieses Papiers durchgeführt und soll in einem späteren Papier berichtet sein. Der andere Vorteil liegt darin, statt in einem Farbmeßgerät mit 4 Sensoren zu arbeiten (die x-Funktion teilte man in den kurzen und langwelligen Bereich), wird nun nur ein Farbmeßgerät mit 3 Sensoren notwendig.

#### Literatur:

1/ M. Fairchild: Color Appearance Models, Addison-Wesley, 1998

- 2/ Helmholtz, H. (1866). *Handbuch der Physiologischen Optik, 1st ed.* Leipzig: Voss.
- /3/ König, A. & Dieterici, C. (1893). Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbensystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. *Z. Psychol. Physiol. Sinnesorg.* 4, 241-347.
- /4/ Stockman, A., Sharpe, L. T., & Fach, C. C. (1999). The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. *Vision Research*, 39, 2901-2927.
- /5/ Stockman, A., & Sharpe, L. T. (2000). Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40, 1711-1737.
- /6/ Wyszecki G, Stiles WS, Color Science. Wiley, New York, 1982