

CIECAM02

Standard Color Appearance Model

**Universität Koblenz-Landau
Fachbereich 4
Institut für Computervisualistik**

**Proseminar: Farbmanagement
Leiter: Prof. Dr. Steffan Müller**

vorgelegt von Emil Wasilewski und Nataliya Kostova

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung in Farberscheinungsmodelle und chromatische Adaption	2
2	Problemstellung und Ablauf	5
3	Von CIECAM97 zu CIECAM02	7
4	Eingabewerte	8
4.1	CIE-Normvalenzsystem (XYZ Farbraum)	8
4.2	CIE-Normalbeobachter	9
4.3	Angenommener Weißpunkt	10
4.4	Tabelle zur Wahl der Umgebungsparameter	10
4.5	Grundlegende Parameter	11
4.6	Zusätzliche Parameter	11
5	Chromatische Adaption des CIECAM02	12
6	Nachadaption	12
6.1	Hunt-Pointer-Estevéz-Farbraum	12
6.2	Kompressionsantwortfunktion	13
7	Farbbeschreibende Parameter	14
7.1	Vorberechnungen	14
7.2	Hue (h)	14
7.3	Lightness (J)	15
7.4	Brightness (Q)	15
7.5	Chroma (C)	16
7.6	Colorfulness (M)	16
7.7	Saturation (s)	16
7.8	Farbraumberechnung	16
8	Fazit	17

1 Einleitung in Farberscheinungsmodelle und chromatische Adaption

Das International Commission on Illumination (CIE - internationales Komitee für Beleuchtung/Kolorierung) wurde 1931 in Wien gegründet und ist weltweit anerkannt. Das CIE-System besitzt sieben Komitees, die sich mit verschiedenen Bereichen, darunter Licht, Beleuchtung, Farbe und Farbräume, beschäftigen. Laut CIE ist der Farbanreiz durch die angemessene Kombination von einer Lichtquelle, einem Objekt und einem Beobachter sichergestellt¹. Dieses Komitee führt eine Normierung für Quelle und Beobachter und eine Methodik zum Ausrechnen des Maßes einer Farbe, die unter einer Standardlichtquelle und von einem Standardbeobachter gesehen wird, ein.

Außer diesen Faktoren, die die Farbe eines Objekts beeinflussen, existieren auch die so genannten Farbkoordinaten. Es ist weit verbreitet, dass zum Beschreiben von Farben nur die drei Parameter "hue", "lightness" und "colorfulness" ausreichen. Obwohl sie oft verwendet werden, ist es möglich auch andere auszuwählen (wie alle berechnet werden, wird in Kapitel 6 gezeigt). Z.B. als Ersatz eines Parameters wird "brightness" gesetzt. Wenn man die Farberscheinung von Objekten genauer beschreiben möchte, müssen noch deren Größe, Glanz und Oberflächenstruktur berücksichtigt werden. Außerdem sind auch die Farben der Umgebung und der Gegenstände in dieser von Bedeutung.

In diesem Zusammenhang möchten wir darauf eingehen, was passieren könnte, wenn einer der Standardfaktoren geändert wird und wie die Eingabeparameter beeinflusst werden. Nehmen wir eine oft vorkommende Situation, in der das betrachtete Objekt und der Beobachter dieselben bleiben, aber die Lichtquelle gewechselt wird. Beispielsweise kauft man einen braunen Anzug und stellt danach im Tageslicht fest, dass er eine unangenehme grün-braune Farbe hat. Wenn die Beleuchtung geändert wird, kann das dazu führen, dass der Reiz in unserem Gehirn verändert wird und es ist möglich, dass die erkannte Farbe abweicht. Wir können auch sagen, dass die Farbkoordinaten geändert werden, wenn die Lichtquelle geändert wird. Dieser Effekt wird auch Farbwiedergabe genannt ("color rendition").

Das menschliche Auge hat die Eigenschaft, sich an die Lichtdichte² anzupassen. Wenn in einer neuen Lichtsituation eine andere Farbtemperatur herrscht, z.B. den Rotanteil einer weißen Fläche erhöht wird, dann werden die rot empfindlichen Zellen ihre Empfindlichkeit im Verhältnis zu den anderen verringern. Als Resultat sieht man weiter eine weiße Fläche vor sich. Dieser Weißabgleich des Auges nennt man chromatische Adaption.

Chromatische Adaption ist eigentlich das größte Mysterium der Farbwissenschaft³. Man weiß, dass die Farbwahrnehmung vom Zustand der Augenadaption abhängig ist und dies von allen Anreizen des visuellen Bereiches bedingt wird.

¹Vergl.[1](S.34)

²Lichtdichte ist ein fotometrisches Maß für Helligkeit. Es wird in Lichtstärke pro Flächeneinheit angegeben (cd/m^2)

³vergl.[1](S.21)

Farben sehen anders aus, wenn unterschiedliche Farben anliegend sind oder sie umfassen. Das kann sehr gut bei Abbildung 1 gesehen werden. Die Rechtecke in jeder Zeile haben denselben grauen Farbton.



Abbildung 1: Das Mysterium der chromatischen Adaption

Es wurden die so genannten CAMs entwickelt - Chromatic Adaption Models. Man versucht eine unabhängige Empfindlichkeit der drei Mechanismen des Farbsehens - die XYZ-Werte - festzulegen. Die chromatische Adaptionstransformation wird z.B. im XYZ-Farbraum durchgeführt - der Farbrechner transformiert eine Quellfarbe in eine Zielfarbe durch eine lineare Transformation von $X_{src}, Y_{src}, Z_{src}$ in $X_{dest}, Y_{dest}, Z_{dest}$ ⁴:

$$(X_{dest}, Y_{dest}, Z_{dest})^T = [M] (X_{src}, Y_{src}, Z_{src})^T \quad (01)$$

[M] ist eine lineare Transformationsmatrix, die von den Quell- und Zielfarben (dabei auch vom angenommenen Weiß) abhängig ist.

Johannes von Kries (1853-1928) gilt als der Vater der chromatischen Adaption und des Chromatic Adaption Models. Der deutsche Physiologe entwickelte eine Methode, bei der für jede Zapfenzelle des Auges eine Verstärkung der Farbempfindlichkeit hinzugefügt wird, um die Erscheinung der weißen Farbe zu behalten.

Außer der chromatischen Adaption, kennt man auch Hell-, Dunkel- und Transient Adaption. Bei der Hell- und Dunkeladaption wird die visuelle Empfindlichkeit des Auges verringert bzw. erhöht. Die Helladaption ist ein Spezialfall des Tagsehens, wenn sich das gesamte visuelle System an Lichtdichte oberhalb $3,4 \text{ cd/m}^2$ angepasst hat. Bei der Dunkeladaption sinkt die Lichtdichte bis $0,034 \text{ cd/m}^2$. Ein Beispiel dafür ist, wenn eine Person sich von der prallen Sonne in ein

⁴Vergl.[2](S24-25)

Gebäude hineinbewegt. Dann erscheint die visuelle Umgebung im Gebäude nahe schwarz. Nach einigen Minuten aber ist die Person wieder in der Lage Details zu erkennen. Der Spezialfall der Transient Adaption stellt die Eigenschaft des Auges dar, sich an ein wechselndes Lichtniveau anzupassen. Beispielsweise tritt es auf, dass sich ein Computermonitor mit Lichtdichte unter 200 cd/m^2 neben einem Sonnenschein mit über 5000 cd/m^2 befindet. Dieser hohe Kontrast führt zur Ermüdung des Auges.

2 Problemstellung und Ablauf

Das oben erwähnte Mysterium der chromatischen Adaption ist auch das Ausgangsproblem des CIECAM02. Da ein Rechner nicht die Fähigkeit des menschlichen Auges besitzt, Farben abhängig von ihrer Umgebung zu verändern um trotzdem die richtige Wirkung auf das menschliche Gehirn zu erzielen, müssen weitere Berechnungen diese Funktion übernehmen. Diese Berechnungen sind in dem Modell von CIECAM02 integriert, das am Ende die angeglichenen Farbwerte zurückgibt. Abbildung 2 und 3 sind noch zwei weitere Beispiele, die das Ausgangsproblem verdeutlichen:

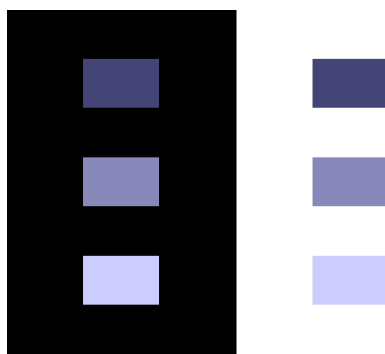


Abbildung 2: Problemstellung mit gleichen Farbwerten in blau

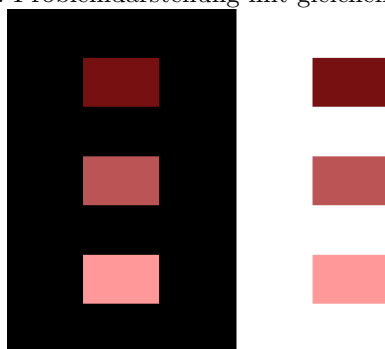


Abbildung 3: Problemstellung mit gleichen Farbwerten in rot

Auf den Grafiken sieht man deutlich, dass sich die Vierecke auf der rechten Seite sich von den auf der linken farblich unterscheiden, obwohl die Vierecke, die sich in derselben Höhe befinden gleiche RGB-Werte besitzen. Dies bewirkt die direkte Umgebung der Farben.

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich mit dem Vorgehen des CIECAM02 diese Fehldarstellung zu beheben.

Aufbauend auf den in Abschnitt 1 erwähnten Chromatic Adaption Modells werden, neben den weiteren Eingabewerten, auch hier Farbwerte im XYZ-

Farbraum⁵ für die Berechnungen benutzt. Nach einigen Vorberechnungen wird die chromatische Adaption⁶ des CIECAM02 auf die Werte angewendet. Die Ergebniswerte werden danach durch die Nachadaption⁷ auf die Berechnung der farbbeschreibenden Parameter⁸ vorbereitet. Aus diesen Werten kann dann ein Farbraum konstruiert werden, aus dem letztendlich der resultierende Farbwert errechnet werden kann.

Abbildung 4 zeigt den groben Ablauf der der Farbverarbeitung durch CIECAM02:

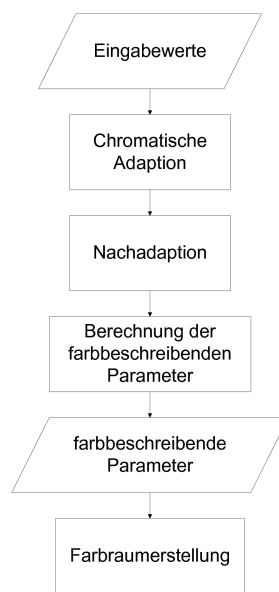


Abbildung 4: Ablauf einer CIECAM02-Farbberechnung

⁵siehe 4. Eingabewerte

⁶siehe 5. Chromatische Adaption des CIECAM02

⁷siehe 6. Nachadaption

⁸siehe 7. Farbbeschreibende Parameter

3 Von CIECAM97 zu CIECAM02

Im März 1997 hielt CIE ein Expertensymposium über das Thema „Farbstandards für die Bildtechnologie“ in Wien ab. Das Hauptproblem war der allgemeine Bedarf nach Farberscheinungsmodellen und ihre offizielle Festlegung. Diese Aufgabe wurde einem der sieben Komitees von CIE zugeordnet und im nächsten Jahr wurde “CIE 1997 Interim Color Appearance Model“(später CIECAM97) veröffentlicht. Dieses Modell ist auf die Einzelfarberscheinungsmodelle (“Single Color Appearance Models“) konzentriert. Allerdings ist CIECAM97 nicht universell in praktischen Anwendungen einsetzbar. Seine Komplexität macht es schwer, in die Praxis angewendet zu werden. CIE sah das Problem und entwickelte einen Styleguide für Verwendung, Implementierung und eventuelle Änderung von CIECAM97. Das Ziel dieser Arbeit war das Einsammeln von verschiedenen Vorschlägen für die Verbesserung von CIECAM97 und von neuen angebotenen Änderungen. Als Ergebnis sollte ein verbessertes Entwurfsmodell geliefert werden⁹.

Und tatsächlich nach der Veröffentlichung dieses Styleguides boten Forscher Ideen an, wie das Modell verbessert und vereinfacht werden konnte und diese wurden in fünf Bereichen zusammengefasst¹⁰:

1. Linearisierung der chromatischen Adaptionstransformation (um das Modell zu vereinfachen)
2. Ausbesserung des abweichenden Umgebungsausgleichs
3. Ausbesserung der Lichtanzeige (für perfekten Schwarzanzreiz)
4. Ausbesserung der “chroma“-Anzeigenausbreitung für Farben mit niedrigem “chroma“-Wert
5. Ausführung des Umgebungsausgleich kontinuierlich variabel behalten

Das neue Modell CIECAM02 basiert auf dem vorigen und beinhaltet viele Vereinfachungen und Änderungen im Vergleich zu dem aus 1997. Beispielsweise besitzt CIECAM02 eine lineare chromatische Adaptionstransformation und eine verbesserte nicht-lineare Kompressionsantwortfunktion, mit denen auch eine einfache Inversion der Werte möglich ist. Ein Farberscheinungsmodell bietet spezifische Betrachtungsbedingungen zum Umrechnen der drei XYZ-Werte in oder von Wahrnehmungsattributergänzungen an. Die zwei Hauptteile dieses neuen Modells sind die schon behandelte chromatische Adaptionstransformation und die Formeln zum Ausrechnen der Wahrnehmungsattribute (“brightness“, “lightness“, “chroma“, “saturation“, “colorfullnes“, “hue“ - werden im 6. Kapitel behandelt). In diesem Zusammenhang ist es auch sehr wichtig die nicht-lineare Kompressionsantwortfunktion zu erwähnen, die auf physikalische Daten und anderen Betrachtungen basiert¹¹.

⁹Vergl.[2](S.23)

¹⁰Vergl.[3](S.3)

¹¹vergl.[2](S.25)

4 Eingabewerte

4.1 CIE-Normvalenzsystem (XYZ Farbraum)

CIECAM02 benutzt als Eingabe die drei XYZ-Werte vom Stimulus (Anreizpunkt), XYZ-Werte des angenommenen Weißpunktes (“whitepoint“), den Hintergrund und Beleuchtungsinformation über die Umgebung (unabhängig davon, ob ein Beobachter das beleuchtete Objekt betrachtet). Dieses Modell kann dafür verwendet werden, diese Erscheinungsattribute oder entsprechende Farben vorzuberechnen (mit Hilfe der Anwendung verschiedener Betrachtungsbedingungen).

Es ist wünschenswert, dass sich die Eingabewerte im CIE-Normvalenzsystem (CIE color space) befinden. In diesem Farbraum werden die Farbwerte mit X, Y und Z Tristimulus Werten dargestellt. Diese Werte stellen eine Ableitung der drei Sorten der Zapfen im menschlichen Auge dar und stehen grob für die menschlichen Rezeptoren für lange(L oder Rot), mittellange (M oder Grün) und kurze (S oder Blau) Lichtwellen. Jedoch kann durch diese Werte ein viel größerer Farbraum dargestellt werden als der allbekannte RGB-Farbraum.

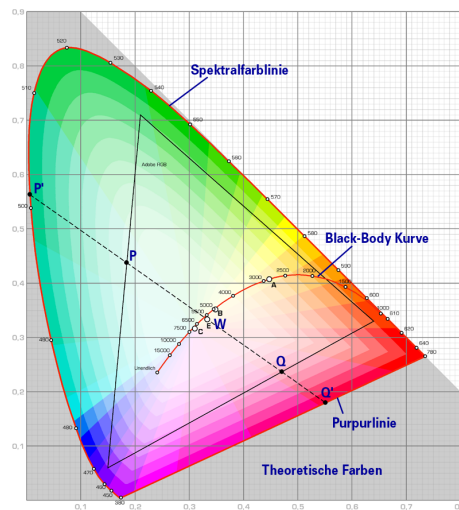


Abbildung 5: CIE-Normfarbtafel

Die Abbildung stellt den XYZ-Farbraum dar, der in ein 2D Bild umgerechnet wurde. Die durch das Dreieck in der Mitte eingrenzten Farben sind darstellbare RGB-Werte.

Neben dem Tristimulus gibt es noch eine Reihe weiterer wichtiger Punkte, die für die Berechnung des CIECAM02 nötig sind. Einer davon ist der CIE-Normalbeobachter, der auch in CIECAM97 integriert ist¹².

¹²Vergl.[3](S.12)

4.2 CIE-Normalbeobachter

Der CIE-Normalbeobachter wurde 1931 im Rahmen des CIE-Normvalenzsystems von der Internationalen Beleuchtungskommission entwickelt. Er bezieht sich auf das 2° Blickfeld des Menschen, das genau die Begrenzung der Zone im menschlichen Auge darstellt (Abbildung 3), in der die höchste Konzentration an Farbrezeptoren vorzufinden ist. In diesem Bereich werden die Tristimulus Werte (XYZ) berechnet.

1964 wurde ein weiterer Normalbeobachter entwickelt, der diesmal ein 10° Blickfeld benutzt um die XYZ-Werte zu berechnen. In den CIECAM02 Berechnungen stellt dieser Beobachter das direkte Umfeld bzw. den Hintergrund des 2° Beobachters dar. Er wird für die Berechnung aus dem Wert für die relative Luminanz (Y_b) benutzt¹³.

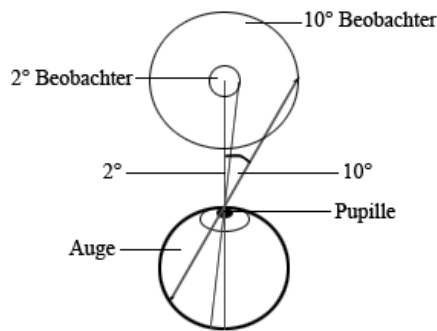


Abbildung 6: Darstellung des Betrachtungswinkels

Auch die weitere Umgebung spielt bei der Berechnung eine wichtige Rolle. Diese wird zur Hilfe genommen um über die durchschnittliche Beleuchtung der Szene zu entscheiden.

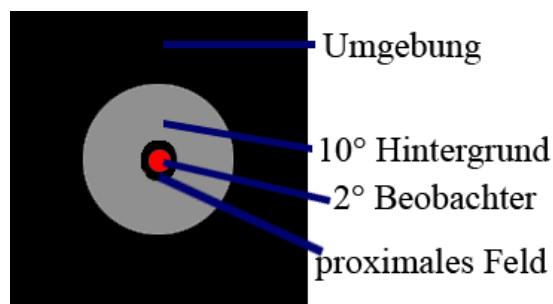


Abbildung 7: 2° und 10° CIE-Normalbeobachter und Umgebung

Betrachten wir Abbildung 4, die die Betrachtungsbedingungen veranschaulicht. Der innere Kreis ist der Stimulus von dem die XYZ-Werte abgemessen

¹³Vergl.[2](S.24)

werden. Der mittlere Kreis ist das proximale Feld (“nahes Feld“) und der äußere Kreis hinter dem - der 10° Hintergrund. Wenn das proximale Feld dieselbe Farbe annimmt wie der Hintergrund, wird behauptet, dass der Stimulus an den Hintergrund angepasst ist. Außen befindet sich die Umgebung.

4.3 Angenommener Weißpunkt

Damit alle Farben korrekt berechnet und dargestellt werden können ist es wichtig, eine Farbe für das hellste Weiß zu finden. Dies wird in den meisten Fällen durch die Wahl eines der vom CIE standardisierten Beleuchter gemacht, die jeweils mit einem Buchstaben und einer Zahl beschrieben werden. Der bekannteste dieser Beleuchter ist das D65 Weiß. Es handelt sich hierbei um eine mathematische Simulation von natürlichem Tageslicht mit einer Farbtemperatur von 6504K. Dieses Weiß wird sowohl für das Fernsbild als auch für den sRGB Farbraum benutzt¹⁴.

Neben dem D65 gibt er noch viele weitere Standardbeleuchter, die viele Beleuchtungssituationen simulieren¹⁵:

- A: Beleuchtung eines Innenraumes mit normalen Glühlampen.
- B: Direkte Sonneneinstrahlung im Mittag
(veraltet und in den meisten Fällen abgelöst von D65)
- C: Durchschnittliche Sonneneinstrahlung
(veraltet und in den meisten Fällen abgelöst von D75)
- D₅₀: Horizont Licht
- D₅₅: Vormittags- / Nachmittagssonne
- D₆₅: Mittagssonne
- D₇₅: Nordtageslicht
- E: Beleuchter mit Gleicher Energie auf allen drei Kanälen
(gebräuchlich als theoretischer Bezugspunkt)
- F1-F12: Fluoreszierende Beleuchtung

4.4 Tabelle zur Wahl der Umgebungsparameter

Das Modell aus 2002 definiert drei Typen von Umgebungen - “average“, “dim“ und “dark“. Diese drei Begriffe beschreiben den Helligkeitsgrad der Umgebung. “Average“ bedeutet durchschnittlich, mittelwertig d.h. es ist mit diesem Begriff eine normale Umgebung gemeint. “Dim Surround“ bezeichnet eine trübe Umgebung, “Dark surround“ - eine dunkle¹⁶.

Viewing Condition	c	N_c	F
Average Surround	0,69	1,0	1,0
Dim Surround	0,59	0,9	0,9
Dark Surround	0,525	0,8	0,8

Tabelle 1: Parameterentscheidungstabelle

¹⁴Vergl.[6]

¹⁵Vergl.[5](S.15)

¹⁶Vergl.[3](S.24)

- c: Umgebungsauswirkung
- N_c : Faktor für die chromatische Induktion
- F: Adaptionegrad

Man kann anhand dieser Parameter genau bezeichnen wie sich der Umgebungshelligkeitsgrad auf die Erscheinung eines Objektes auswirkt. Wie man aus der Tabelle schließen kann, ist die Wahrnehmung und die Adaption des Auges am besten, wenn das betrachtete Objekt gut beleuchtet ist ("Average Surround").

4.5 Grundlegende Parameter

Es gibt einige Eingabeparameter, die für die gesamte Berechnung wichtig sind und für viele Formeln benutzt werden:

- L_a : Luminanz des adaptierenden Feldes (angegeben in cd/m)
- X,Y,Z: Relative Tristimulus Werte des 2° Blickfeldes
- X_w, Y_w, Z_w : Relative Tristimulus Werte des anzunehmenden Weiß
- Y_b : Relative Luminanz des 10° Feldes bzw. Hintergrunds

4.6 Zusätzliche Parameter

Es werden noch zusätzliche Parameter errechnet, die für die späteren Gleichungen wichtig sind:

- F_L : Faktor der Adaption des Luminanz Levels

$$F_L = 0,2k^4(5L_A) + 0,1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3}$$

$$k = 1/(5L_A + 1)$$
- n: Faktor der Einarbeitung des Hintergrunds

$$n = Y_b/Y_w$$
- N_{bb}, N_{cb} : Faktor der Helligkeit und des chromatischen Hintergrunds

$$N_{bb} = N_{cb} = 0,725(1/n)^2$$
- z: grundlegende exponentielle Nichtlinearität

$$z = 1,48+n^{1/2}$$

5 Chromatische Adaption des CIECAM02

Im Falle von CIECAM02 wird die chromatische Adaption mit einer modifizierten Transformation in den Li et al R'G'B'-Farbraum durchgeführt (auch bekannt als modifizierte CMCCAT2000 Transformation)¹⁷. Diese Transformation ist genauso leistungsfähig, wie die nicht-lineare Bradford Transformation des CIECAM97 und lässt sich einfach invertieren. Die Transformationsmatrix ist¹⁸:

$$\mathbf{M}_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & 0,0136 & 0,9834 \end{bmatrix} \quad (02)$$

Um die chromatische Adaption vollständig zu machen muss noch jeder Farbkanal mit der Helligkeit des angenommenen Weißpunktes über eine Formel verrechnet werden. Zuvor wird ein benötigter Parameter D berechnet.

$$D = F \left[1 - \left(\frac{1}{3,6} \right) e^{\left(\frac{-L_A - 42}{92} \right)} \right] \quad (03)$$

$$R_c = \left[\left(Y_w \frac{D}{R_w} \right) + (1 - D) \right] R \quad (04)$$

Die Werte für die anderen Kanäle können analog berechnet werden.

6 Nachadaption

6.1 Hunt-Pointer-Estevez-Farbraum

Um die Werte für die lineare Kompressionsantwortfunktion vorzubereiten, müssen diese in den Hunt-Pointer-Estevez-Farbraum gebracht werden. Dies geschieht indem das Wertetupel in den XYZ-Farbraum und wieder zurück gerechnet wird.

$$(R', G', B')^T = M_H M_{CAT02}^{-1} (R_c, G_c, B_c)^T \quad (05)$$

Dabei ist $[M_{CAT02}]$ die lineare Transformationsmatrix, die oben angesprochen wurde. Jedoch wird hier mit ihrer Inversen gerechnet. Die beiden Matrizen haben folgende Werte¹⁹:

$$\mathbf{M}_{CAT02}^{-1} = \begin{bmatrix} 1,096124 & -0,278869 & 0,182745 \\ 0,454369 & 0,473533 & 0,072098 \\ -0,009628 & -0,005698 & 1,015326 \end{bmatrix} \quad (06)$$

¹⁷Vergl.[2](S.24)

¹⁸Vergl.[2](S.25)

¹⁹Vergl.[2](S.25)

$$\mathbf{M}_H = \begin{bmatrix} 0,38971 & -0,68898 & -0,07868 \\ -0,22981 & 1,18340 & 0,04641 \\ 0,00000 & 0,00000 & 1,00000 \end{bmatrix} \quad (07)$$

6.2 Kompressionsantwortfunktion

Nach der chromatischen Anpassung und der Konvertierung der Werte in den Hunt-Pointer-Estevéz Farbraum wird die nicht lineare Kompressionsantwortfunktion angewandt. In CIECAM97 handelte sich bei dieser Funktion um eine hyperbolische Funktion, die jedoch nicht ausreichend war. Es standen viele andere Funktionen zur Auswahl, die in CIECAM02 zum Einsatz kommen sollten. Letztendlich hat man sich für eine verbesserte hyperbolische Funktion entschieden, die auf einer verallgemeinerten Michaelis-Menten Gleichung basiert²⁰.

$$R'_a = \frac{400(F_L R'/100)^{0,42}}{[27,13 + (F_L R'/100)^{0,42}]} + 0,1 \quad (08)$$

Sollte ein Parameter R', G' oder B' negativ sein, muss das Vorzeichen des Ergebnisses auch negativ sein. Mit dieser Formel lassen sich analog die Werte für G'_a und B'_a und die Werte R'_{aw} , G'_{aw} und B'_{aw} des angenommenen Weiß errechnen.

²⁰Vergl.[2](S.25)

7 Farbbeschreibende Parameter

7.1 Vorberechnungen

Nach der Kompressionsfunktion müssen die Farbwerte in vorläufige kartesische Koordinaten (a für rot-grün und b für gelb-blau) eingerechnet werden, um daraus auch eine vorläufige Größe t zu berechnen.

Diese Parameter sind auch für die genaue Berechnung vom hue- und saturation-Wert wichtig. Die drei Formeln für die Berechnung lauten:

$$a = R'_a - \frac{12G'_a}{11} + \frac{B'_a}{11} \quad (09)$$

$$b = \left(\frac{1}{9}\right) (R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (10)$$

$$t = \frac{\left(\frac{50000}{13}\right) N_c N_{cb} e^{(a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}}}{R'_a + G'_a + \left(\frac{21}{20}\right) B'_a} \quad (11)$$

Eine weitere essentielle Formel ist:

$$A = \left[2R'_a + G'_a + \left(\frac{1}{20}\right) B'_a - 0,305 \right] N_{bb} \quad (12)$$

Mit dieser Formel wird die achromatische Antwort (A) berechnet. Sie unterscheidet sich von der Formel, die in CIECAM97 verwendet wurde. Unter der Vorgabe einen wirklichen Schwarzpunkt zu implementieren wurde der letzte Wert, der die minimale Helligkeit beschreibt, auf -0.305 gesetzt²¹. Dadurch ist es möglich A = 0 zu erreichen, wenn Helligkeit (Y) null ist.

Diese Schritte werden sowohl für das 2° Testfeld als auch für die Werte der angenommenen Weiß durchgeführt. Hiernach lassen sich die endgültigen Werte berechnen, die die Farbe des 2° Testfelds beschreiben.

7.2 Hue (h)

Wenn jede der Farben Rot, Gelb, Grün und Blau auf einem Kreis angeordnet werden, ist hue (h) der Winkel zwischen der Farbe und einer imaginären Grundlinie, die sich zwischen Rot und Blau befindet.

$$h = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (13)$$

²¹Vergl.[3](S.10)

Aus dieser Formel resultierend wird die Exzentrizität (e) berechnet, die dazu nötig ist um die Hue Quadratur (H) zu berechnen, die angibt in welchem Quadranten sich die jeweilige Farbe befindet.

$$e = \left[\cos \left(h \frac{\pi}{180} + 2 \right) + 3,8 \right] \quad (14)$$

Die einzelnen Farben werden in einer Tabelle zusammengefasst. Werte zwischen den angegebenen lassen sich linear Interpolieren²².

Rot:	$h = 20,14$	$e = 0,8$	$H = 0$ oder 400
Gelb:	$h = 90,00$	$e = 0,7$	$H = 100$
Grün:	$h = 164,25$	$e = 1,0$	$H = 200$
Blau:	$h = 237,53$	$e = 1,2$	$H = 300$

Tabelle 2: hue-Wertetabelle

Die folgenden Formeln können zur Interpolation benutzt werden. In den Formeln bezieht sich der Wert mit der 1 im Index auf den nahsten Wert, der in der Tabelle über dem gesuchten Wert steht und analog dazu bezieht sich der Wert mit der 2 im Index auf den Wert darunter.

$$e = e_1 + (e_2 - e_1)(h - h_1)(h_2 - h_1) \quad (15)$$

$$H = H_1 + \frac{\frac{100(h-h_1)}{e_1}}{\frac{h-h_1}{e_1} + \frac{h_2-h}{e_2}} \quad (16)$$

7.3 Lightness (J)

Lightness stellt die Helligkeit des Stimulus in Abhängigkeit zu der Helligkeit des angenommenen Weiß dar.

$$J = 100 \left(\frac{A}{A_w} \right)^{cz} \quad (17)$$

7.4 Brightness (Q)

Brightness steht für die Menge an wahrgenommenem Licht, das vom Stimulus abgegeben wird. Die Formel zur Berechnung wurde im Vergleich zu CIECAM97 um FL erweitert und vereinfacht.

²²Vergl.[3](S.15)

$$Q = \left(\frac{4}{c}\right) \left(\frac{J}{100}\right)^{0,5} (A_w + 4) F_L^{0,25} \quad (18)$$

7.5 Chroma (C)

Die Buntheit eines Stimulus in Abhängigkeit zu der Helligkeit eines Stimulus, der unter ähnlichen Bedingungen weiß erscheint wird Chroma genannt. Die Formel für Chroma wurde seit CIECAM97 überarbeitet und ist jetzt einfacher.

$$C = t^{0,9} \left(\frac{J}{100}\right)^{0,5} (1,64 - 0,29^n)^{0,73} \quad (19)$$

7.6 Colorfulness (M)

Aus der Chroma kann dann die Colorfulness berechnet werden, die die Menge an Hue eines Stimulus darstellt. Der Exponent dieser Gleichung wurde seit CIECAM97 auf 0.25 angehoben.

$$M = C F_L^{0,25} \quad (20)$$

7.7 Saturation (s)

Saturation ist Buntheit in relativer Abhängigkeit von der Helligkeit eines Stimulus. Auch diese Formel wurde im Vergleich zu CIECAM97 vereinfacht.

$$s = 100 \sqrt{\frac{M}{Q}} \quad (21)$$

7.8 Farbraumberechnung

Obwohl die Parameter dazu benutzt werden um eine Farbe zu beschreiben, spannen sie keinen eigenen Farbraum auf. Jedoch lässt sich mit jeweils drei der Werte ein zylindrischer Farbraum erstellen. Eine mögliche Kombination ist lightness, chroma und hue (JCh). Auch eine gute Alternative dazu wäre brightness, colorfulness und hue (QMh). Die Werte dienen hierbei als Koordinaten in einem zylindrischen Raum. Weitere Kombinationen wären: QMh, Qsh, Jsh.

Auch ist es möglich einen rechwinkligen Farbraum zu konstruieren. Dazu müssen Die Koordinaten aus den zylindrischen Farbräumen über bestimmte Formeln in die neuen Farbräume umgerechnet werden (z.B. J, Ccos(h) und Csin(h))²³.

²³Vergl.[3](S.17)

8 Fazit

Als letztes möchten wir das Thema CIECAM02 zusammenfassen. Dieses Farberscheinungsmodell aus dem Jahr 2002 ist im Vergleich zu dem aus dem Jahr 1997 deutlich vereinfacht worden. Man kann es leichter in der Praxis anwenden, da die Kompressionsantwortfunktion verbessert wurde und zurückgerechnet werden kann. Außerdem ist die Transformation der chromatischen Adaption genauso leistungsfähig wie die alte, lässt sich aber einfacher invertieren. Ebenso wurden die Berechnungen der farbbeschreibenden Parameter stark vereinfacht und es ist möglich einen echten Schwarzpunkt zu erreichen²⁴.

Letztendlich bleibt noch die Frage wie effektiv/effizient die Berechnungen des CIECAM02 in Hinblick auf unser Ausgangsproblem sind. Dazu wollen wir einige Beispiele einführen, mit dessen Hilfe der Effekt des Farberscheinungsmodells veranschaulicht wird. Im Fall von Abbildung 8 bis 11 haben wir uns nochmal auf die Abbildungen aus Abschnitt 2 bezogen.

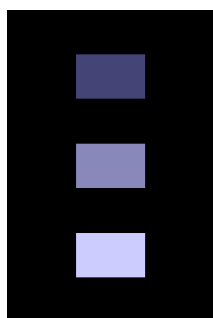


Abbildung 8: Vor der Bearbeitung mit CIECAM02

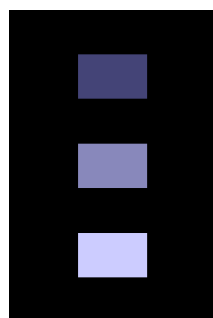


Abbildung 9: Nach der Bearbeitung mit CIECAM02

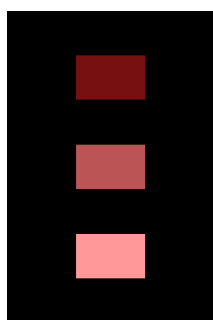


Abbildung 10: Vor der Bearbeitung mit CIECAM02



Abbildung 11: Nach der Bearbeitung mit CIECAM02

In Abbildung 8 und 10 besitzen die Vierecke in einer Höhe die selben RGB-Werte, jedoch sehen sie für das menschliche Auge unterschiedlich aus. Dies ändert sich in Abbildung 9 und 11. Dort sind die nebeneinander stehenden Vierecke nach CIECAM02-Norm gleich, haben aber verschiedene RGB-Werte. Sie ähneln sich aus der Beobachterperspektive mehr.

²⁴Vergl. Gleichung (12)

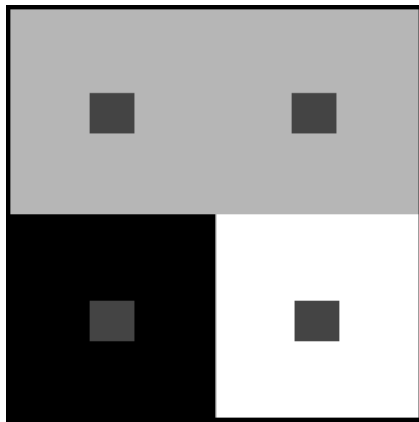


Abbildung 12: Vor der Bearbeitung mit CIECAM02

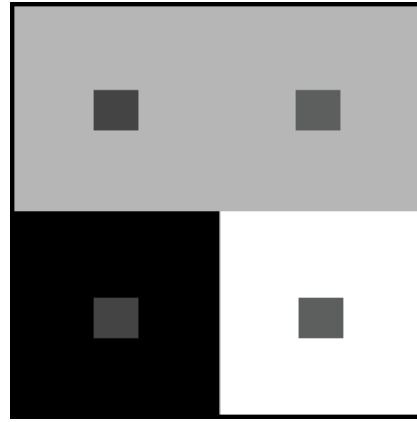


Abbildung 13: Nach der Bearbeitung mit CIECAM02

Die inneren Quadrate in der Abbildung 12 haben die gleichen RGB-Werte, deren Farben sehen bei verschiedenem Hintergrund aber für den Betrachter unterschiedlich aus. Sie scheinen bei Abbildung 13 gleichfarbig zu sein, obwohl die verschiedene, von CIECAM02 berechnete Farbwerte besitzen.

Selbstverständlich hat CIECAM02 auch Nachteile. Einerseits sind die Umrechnungen der Farbwerte immer noch sehr kompliziert und zeitaufwändig. Andererseits ist das Ergebnis nach der Anwendung vom Erscheinungsmodell nicht vollständig zufriedenstellend. Wenn man sich die Abbildungen 9,11 und 13 genauer ansieht, merkt man, dass die Farben immer noch leicht differieren. Außerdem ist die Anwendung von CIECAM02 von den Grafikeinstellungen des Monitors und den Einstellungen des Betriebssystems abhängig.

Aus diesen Gründen ist es eine Überlegung wert, ob das Modell nicht noch verbessert werden könnte; auch im Hinblick auf eine nicht nur wissenschaftliche Einsetzbarkeit. Unseres Erachtens nach ist das Modell für den durchschnittlichen Benutzer zu aufwändig und vor allem unnötig, da diese feinen Farbunterschiede eigentlich nicht wahrgenommen werden. Für Menschen, die im professionellen Bereich mit Bildern oder Farben arbeiten ist es vielleicht interessant. Zurzeit wird dieses Modell von Windows Vista für die Farbverwaltung benutzt.

Quellen:

1. „Principles of color technology“, Billmeyer and Saltzman. Berns. Wiley, 3. Ausgabe, 1981
2. „The CIECAM02 Color Appearance Model“, Nathan Moroney, M. Fairchild, 2002,
Url: http://www.polybytes.com/misc/Meet_CIECAM02.pdf (24.05.2009)
3. „A Revision of CIECAM97s for Practical Applications“, Mark Fairchild, 2000,
Url: <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PAP10.pdf> (24.05.2009)
4. „A Case for a CIECAM02 Colour Appearance Space“, Andrew N. Chalmers Snjezana Soltic, Radhika Jammalamadaka, 2007
Url: http://www.coda.ac.nz/cgi/viewcontent.cgi?article=1001&context=mit_ece_cp (24.05.2009)
5. „A Review of RGB color spaces.“, Danny Pascale. Babel Color. 2002-2003
Url: <http://www.babelcolor.com/download/A%20review%20of%20RGB%20color%20spaces.pdf> (24.05.2009)
6. „Equivalent White Light Sources, and CIE Illuminants.“, Vol.17 Nr.5. HunterLab. März 2008
Url: http://www.hunterlab.com/appnotes/an05_05.pdf (24.05.2009)
7. „Colour Appearance Models for Color Management Applications“
Url: <http://www.colour.org/tc8-01/> (24.05.2009)
8. „Notes on the CIECAM02 Colour Appearance Model“
Url: <http://scanline.ca/ciecam02/> (24.05.2009)

Bildquellen:

1. Abbildung 2 und 8: <http://scanline.ca/ciecam02/surround-blue.png> (24.05.2009)
2. Abbildung 3 und 10: <http://scanline.ca/ciecam02/surround-red.png> (24.05.2009)
3. Abbildung 5: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/4/49/CIE-Normfarbtafel.png> (24.05.2009)
4. Abbildung 9: <http://scanline.ca/ciecam02/surround-blue-ciecam02.png> (24.05.2009)
5. Abbildung 11: <http://scanline.ca/ciecam02/surround-red-ciecam02.png> (24.05.2009)

Die anderen Bilder sind Werke der Authoren dieser Ausarbeitung.