

# **Farbwahrnehmungsmodelle- Grundlagen und Applikationen in der Beleuchtungstechnik und Farbbildverarbeitung**

*PD Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, Arnold & Richter AG, Türkenstr. 89, 80799 München*

*Dipl.-Ing. Doreen Wunderlich, Gigahertz-Optik GmbH/München*

## **1. Einleitung**

Die CIE- Farbmeterik, wie wir sie seit 1931 kennen, hat sich in der farbtechnischen Praxis bewährt solange die Sehbedingungen gleich sind, unter denen Farbobjekte unterschiedlicher Medien betrachtet und verglichen werden. Wenn Farbobjekte unterschiedlicher Medien unter den unterschiedlichen Sehbedingungen betrachtet werden, gehen auf die Ergebnisse der Farbwahrnehmung folgende Parameter ein:

- unterschiedliche Weißpunkte
- unterschiedliche Spektren der Strahlungsquellen
- unterschiedliche Grade der chromatischen Adaptation
- unterschiedliche Leuchtdichten der bildwiedergebenden Medien
- unterschiedliche Leuchtdichteverteilungen der mittelbaren und unmittelbaren Umgebung der zu betrachten Farbobjekte

Farbwahrnehmungsmodelle sind vor allem in den farbtechnologisch führenden Nationen wie USA, England und Japan entwickelt und dazu benutzt, um die Farbwahrnehmung eines bestimmten Farbobjekts bestimmter physikalischer Eigenschaften unter bestimmten Sehbedingungen vorherzusagen. Seit sehr wenigen Jahren sind diese in die Praxis der farbgebenden Industrien (Druckindustrie, Film- und Fernseh-technik, Graphikindustrie...) eingeführt. Seit kurzem werden versuchsweise die Kenntnisse aus dem neuesten Farbwahrnehmungsmodell benutzt, um die Farbdifferenz und dadurch den Farbwiedergabeindex für die Beleuchtungstechnik besser zu beschreiben.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, nach einer kurzen Beschreibung des derzeitigen aktuellen Farbsystems CIELAB 1976 mit all seinen Vor- und Nachteilen und nach einer kurzen Formulierung des Prinzips des Farbmanagements hauptsächlich das Thema Farbwahrnehmungsmodell zu beschreiben. Farbwahrnehmungsmodelle berücksichtigen über das Farbmanagement hinaus die Beeinflussung der optischen Eigenschaften der Umgebung auf die Wahrnehmung des beobachteten Farbobjektes. Mehr zu den Themen Farbsysteme und Farbmanagement wird an dieser Stelle auf /1,2,3/ hingewiesen. Es wird danach ansatzweise die Anwendung der Farbwahrnehmungsmodelle auf die Beleuchtungstechnik erläutert, wohlwissend, dass einige psychophysische Versuche dazu unternommen werden müssen, um praktikable Lösungen zu erzielen. Diese Arbeit erhebt nicht den Anspruch, die Lösungen für die Probleme der Farbwiedergabeberechnung in der Beleuchtungstechnik anzubieten, sondern skizzenhaft darzulegen. Die Suche nach einer neuen Lösung beginnt mit der Lokalisierung der vorhandenen Defizite.

## 2. Farbbildverarbeitung in der digitalen Medientechnik

In der heutigen Zeit gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten zur digitalen Filmproduktion. Im Prozess der Filmproduktion werden verschiedene technische Geräte (Filmscanner, Monitore, Film- und Digitalprojektoren zur Farbwiedergabe, Filmbelichter, Digitalkamera) verwendet. Jedes dieser Geräte besitzt eine eigene technische Realisierung zur Farbwiedergabe und besitzt somit einen charakteristischen Farbraum (s. Abb.1). Um die Unterschiede in der Farbproduktion in den Griff

zu bekommen, ist ein Farbbildverarbeitungsprozess nötig, der die Farben zwischen den Geräten möglichst vorteilhaft transformiert.

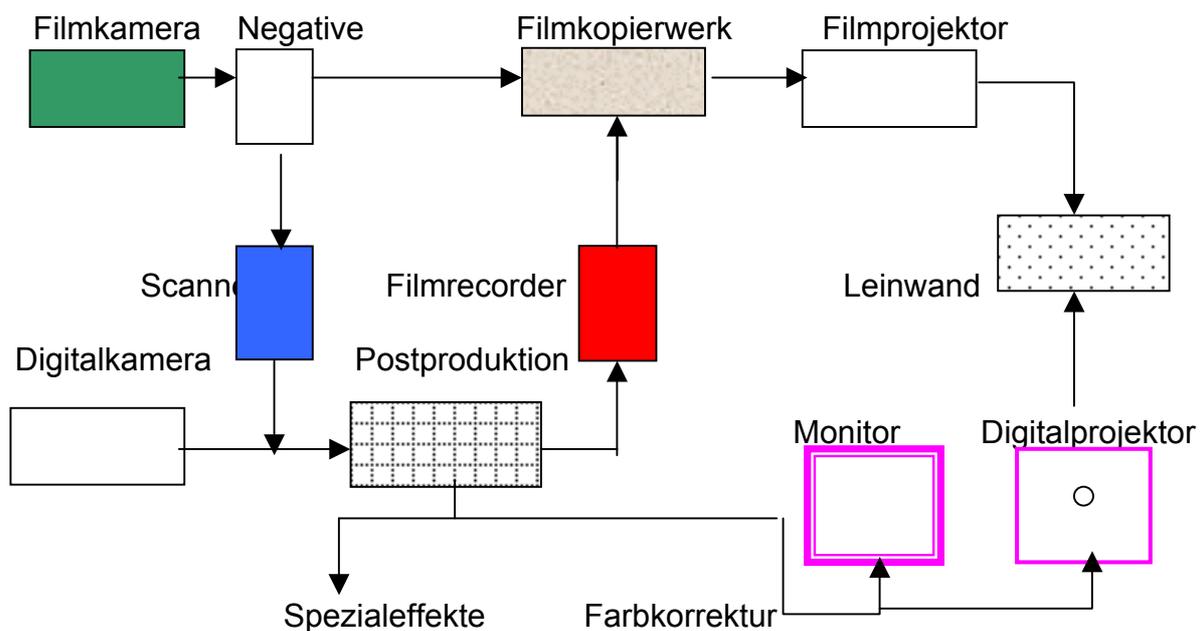


Bild 1: Ketten der Farbbildverarbeitungsprozesse in der Filmproduktion

Ein idealer Farbbildverarbeitungsprozess sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Anwendung eines Farbsystems, das die Kennzahlen der Farben (Helligkeit, Farbton, Farbsättigung) so beschreibt, wie der menschliche Farbsehapparat diese Farben unter der konkreten Sehbedingung wahrnimmt. Eine konkrete Sehbedingung umfasst die Lichtarten der Beleuchtung, die Helligkeit und das Leuchtdichtenniveau der vorherrschenden Szene, den Leuchtdichteverlauf der einzelnen Objekte in der Szene zueinander, den Sehwinkel aus der Sicht der Beobachter. Die Wahrnehmung des menschlichen Farbsehapparats umfasst die Detektion der Farben auf der Netzhautenebene, den Adaptationszustand, die Umwandlung der Signale von den Netzhautrezeptoren in die Gehirnsignalwerte und die Farbbildverarbeitung in den späteren Gehirnstufen.
- Eine Transformation, die die geräteabhängigen Eigenschaften vollständig in das geräteunabhängige Farbsystem umwandelt, wobei die Verarbeitungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielt. Da unterschiedliche Geräte unterschiedliche Farbräume haben, sollte in die Transformation auch die wahrnehmungsgerechte und applikationsbezogene Anpassung der Farbräume untereinander implementiert werden.

### 3. Farbsystem CIELAB 1976 /1,2/

Das Farbsystem CIELAB 1976 baute sich auf der Erkenntnis der Gegenfarbentheorie, wonach sich die Helligkeit der wahrgenommenen Farbe aus einem achromatischen Anteil und einem Rot-Grün sowie Gelb-Blau-Anteil zusammensetzt.

Beim Farbsystem CIELAB 1976 spannen die L, a, b-Werte ein räumliches Koordinatensystem auf, mit der a-Achse (Rot/Grün), der b-Achse (Blau/Gelb) und der senkrecht dazu stehenden L-Achse für die achromatische Helligkeitskomponente (siehe Bild 2).

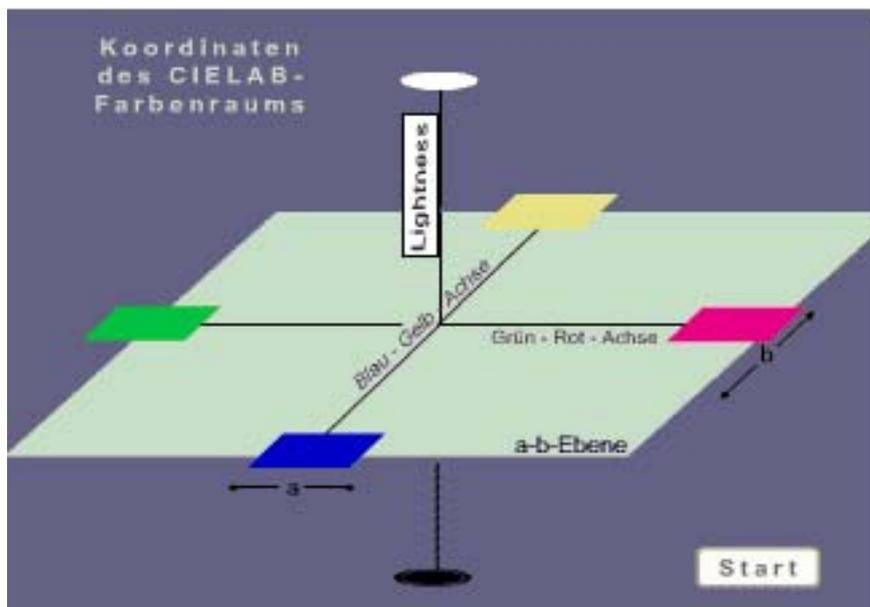


Bild 2: Der CIELAB-Farbraum (Quelle: [www.Farbmeterik-Gall.de](http://www.Farbmeterik-Gall.de))

Mit den Farbwerten X, Y, Z der zu betrachtenden Farbe und den Farbwerten des Referenzweiß  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$  lassen sich L, a und b wie folgt berechnen:

$$L = 116 * (Y/Y_s)^{1/3} - 16 \quad (1)$$

$$a = 500 * ((X/X_s)^{1/3} - (Y/Y_s)^{1/3}) \quad (2)$$

$$b = 200 * ((Y/Y_s)^{1/3} - (Z/Z_s)^{1/3}) \quad (3)$$

Diese drei Gleichung gelten bei  $L > 0,008856$ .

Die Vorteile des Farbsystems CIELAB 1976 sind:

- die einfache Handhabung
- die teilweise Berücksichtigung der Prozesse der Signalverarbeitung im menschlichen Sehapparat auf der Basis der Gegenfarbentheorie. Die Gleichung (1) z.B. beschreibt korrekt die Umwandlung der Signale des achromatischen Kanals Y in die unbunte Helligkeitswahrnehmung L.
- die teilweise Berücksichtigung der Farbumstimmung bei der Beleuchtung der Objekte mit unterschiedlichen Lichtarten. Das wird durch eine Bezugnahme auf die Farbwerte des Referenzweiß  $X_s$ ,  $Y_s$ ,  $Z_s$  in den Gleichungen 1 bis 3 realisiert.

Das Farbsystem CIELAB hat dennoch folgende Nachteile:

- Es berücksichtigt nicht die Einflüsse der Umgebung auf die Wahrnehmung des beobachteten Farbobjektes. Die Berücksichtigung der Farbumstimmung ist nicht komplett richtig, da die Bezugnahme auf das Referenzweiß über die Normfarbwerte X,Y,Z erfolgt, und nicht richtigerweise über die Stromsignale der drei Zapfenarten L,M,S auf der Netzhaut.
- Die Farbdarstellung im blauen Bereich ist nicht wahrnehmungsgerecht.

Diese Nachteile versuchen die aktuellen Farbwahrnehmungsmodelle zu minimieren. Das ist der Gegenstand des Kapitels 4.

#### **4. Farbmanagement in der digitalen Medientechnik /1,3,4/**

Mit Hilfe des sogenannten Farbmanagements werden die Daten eines geräteabhängigen Farbraums RGB in die eines geräteunabhängigen Farbraums transformiert. Von der ICC werden die Systeme CIELAB und CIEXYZ zur Beschreibung des geräteunabhängigen Farbraums vorgeschrieben. Es existieren zwei Möglichkeiten für die Farbraumtransformation. Am einfachsten erfolgt die Umrechnung mit einer 3x3-Matrix. Sie kann allerdings nur angewandt werden, wenn die Dimension des Quellfarbraums und des Zielfarbraums übereinstimmen und beide Farbräume ein lineares Verhalten aufweisen. Weiterhin müssen die Farbwerte des Quellfarbraums im Zielfarbraum bekannt sein und umgekehrt. Die Farbtransformation mit sogenannten Look-Up-Tables (LUT) ist aufwendiger. Sie können jedoch auf alle Farbräume angewandt werden unabhängig von ihrer Dimension. Auch ein nichtlineares Verhalten ist möglich. Eine LUT enthält die Beschreibung wie die Farbwerte des Quellfarbraums in den Zielfarbraum transformiert werden. Da sich diese vorliegende Arbeit das Farbmanagement nicht zum primären Ziel zählt, wird auf /1,3,4/ hingewiesen.

#### **5. Farbwahrnehmungsmodell- Eine Einführung /1,4/**

Seit Beginn der Forschung auf dem Gebiet der Farbwissenschaft entwickelten sich zahlreiche Farbsysteme, die die Wahrnehmung beschreiben. Sie eignen sich nicht für alle Anwendungen gleich gut. Daher werden in verschiedenen Industriezweigen unterschiedliche Systeme eingesetzt. Im digitalen Farbmanagement arbeitet man wie erwähnt zur Zeit hauptsächlich mit dem Farbsystem CIELAB. Doch dieses Modell beschreibt die Farbwahrnehmung aus den oben genannten Gründen nur unzureichend. Seit vielen Jahren wird deshalb verstärkt nach einem Farbwahrnehmungsmodell gesucht, das den Vorgang der Wahrnehmungsbildung besser abbildet und zudem einheitlich in der Industrie verwendet werden kann.

1996 wurde die CIE-Kommission TC 1-34 damit beauftragt, verschiedene Farbmodelle zu bewerten und das Modell zu finden, welches für einen einheitlichen Industriestandard am besten geeignet ist. Im Jahr 1997 wurde CIECAM97 offiziell als Farbwahrnehmungsmodell definiert. Eine überarbeitete Version veröffentlichte die CIE im November 2002. Das neue Modell trägt den Namen CIECAM02 und soll im Folgenden vorgestellt werden /5/. Das Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02 verbindet die Vorteile vieler international anerkannter Farbsysteme und wird ergänzt durch weitere Verbesserungen. So berücksichtigt es den Farbreiz selbst, der beschrieben wird durch Attribute wie Helligkeit, Farbton und Sättigung. Auch die Lichtart, bei der der Reiz präsentiert wird, ist wichtig. Der Mensch besitzt die Fähigkeit sich an unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse (Kunstlicht, Tageslicht) anzupassen. Ein Farbwahrnehmungsmodell sollte dies ebenfalls berücksichtigen.

Neben diesen zwei Eigenschaften, welche einfachere Farbsysteme wie CIELAB schon teilweise beachten, berücksichtigen Farbwahrnehmungsmodelle zusätzlich die Umgebungsbedingungen, bei denen die Betrachtung stattfindet. So fließen die Leuchtdichte von Hintergrund und Umgebung in die Berechnungen ein. Nach M.D. Fairchild /1/ erfolgt die Definition des Sehfeldes nach Abbildung 3.

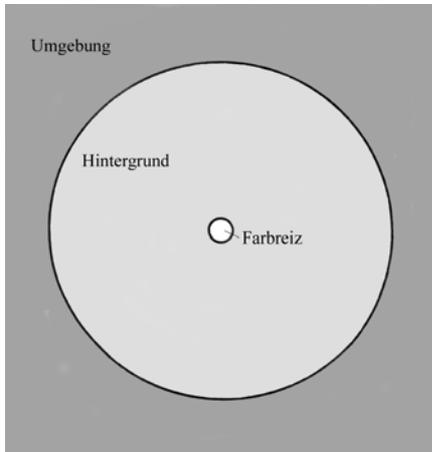


Abbildung 3: Definition von Reiz, Hintergrund und Umgebung

Der Reiz umfasst das 2°-Sehfeld. Er wird beschrieben durch die Normfarbwerte X, Y, Z. Sie dienen als Eingangsparameter für das Modell CIECAM02. Der Bereich außerhalb des Reizes und innerhalb des 10°-Sehfeldes wird als Hintergrund bezeichnet. Die durchschnittliche Leuchtdichte in diesem Gebiet wird  $Y_b$  genannt. Alles was sich außerhalb des 10°-Sehfeldes befindet, gehört zur Umgebung. Sie wird nicht durch die Leuchtdichte angegeben, sondern es wird ein Vergleich zur maximalen Leuchtdichte in der Szene gemacht:

$$s = \frac{L_w}{S_w} \quad \text{mit } L_w : \text{durchschnittliche Leuchtdichte der Umgebung}$$

$S_w$  : maximale Leuchtdichte der Umgebung

Aus dem berechneten Verhältnis der Leuchtdichten ergeben sich die Zustände dim, dark und average, aus denen sich verschiedene Parameter ableiten, die von CIECAM02 verwendet werden (siehe Tabelle 1). Durch lineare Interpolation zwischen den definierten Zuständen ist eine genauere Beschreibung der Umgebung möglich.

Vergleich	Beschreibung	C	F	N <sub>c</sub>
$s = 0$	dim	0.525	0.8	0.8
$0 < s < 0.2$	dark	0.590	0.9	0.9
$s \geq 0.2$	average	0.600	1.0	1.0

Tabelle 1: Definition der Umgebungsparameter

Die Berechnung von Farbwerten mit dem Modell CIECAM02 bietet die Möglichkeit, die farbmetrische Beschreibung eines Reizes zu berechnen, so dass *in verschiedenen Umgebungen dieselbe Wahrnehmung im menschlichen Sehapparat erzeugt wird*. Für folgendes Beispiel soll die Vorgehensweise zur Berechnung der Farbwerte erläutert werden.

Situation 1: Sie beschreibt die Farbwahrnehmung bei Betrachtung eines digitalen Photos am Monitor an einem hell beleuchteten Büroarbeitsplatz. Der Monitor ist auf D65 kalibriert.

Situation 2: Ein Ausdruck des Bildes soll in einer dunkleren Umgebung betrachtet werden. Die Beleuchtung erfolgt mit Halogenleuchtampenlicht.

Welche Farbwerte muss der Ausdruck besitzen, damit seine Betrachtung die gleiche Wahrnehmung erzeugt wie die Betrachtung des Monitorbildes? Die Berechnung erfolgt nach dem Schema in Abbildung 4.

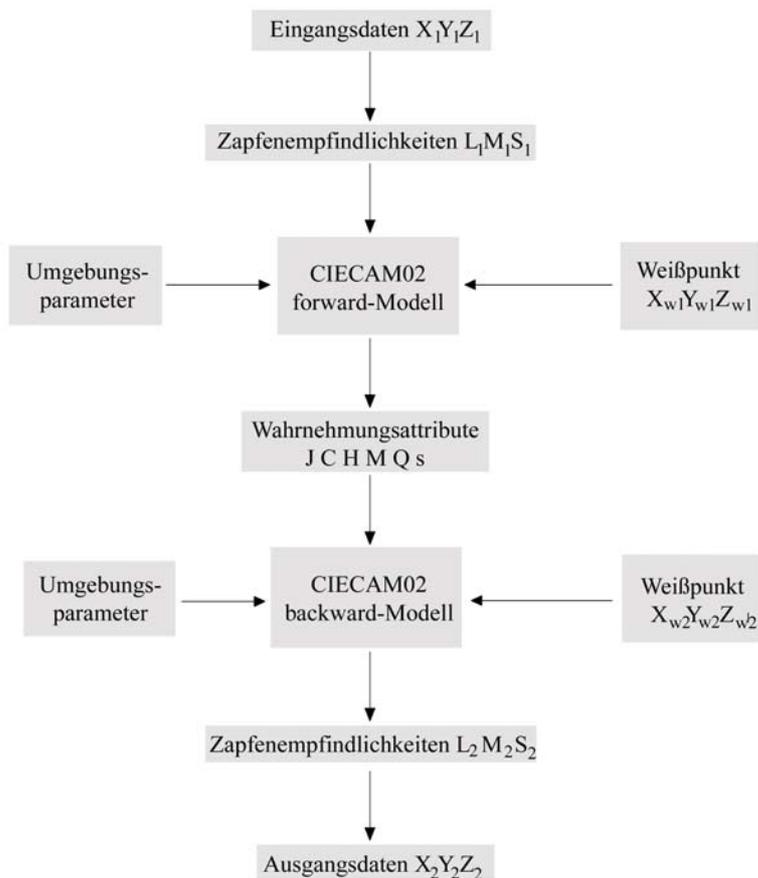


Abbildung 4: Funktionsweise des Farbwahrnehmungsmodells CIECAM02

Die Normfarbwerte  $X_1, Y_1, Z_1$  stellen die gemessenen Farbwerte des Reizes auf dem Monitor dar. Sie sind für jeden Bildpunkt gegeben. Die Lichtart, in diesem Fall der Weißpunkt, auf den der Monitor kalibriert wurde, wird beschrieben durch die Normfarbwerte  $X_{w1}, Y_{w1}, Z_{w1}$ . Durch eine Matrixtransformation werden die Normfarbwerte in die Empfindlichkeiten der drei Zapfenarten, L, M, S umgeformt. Erst auf die Zapfenstromsignale werden die Einflüsse, denen die Wahrnehmung unterliegt, berechnet. Hierbei fließt u. a. die chromatische Adaption ein, die Kompression der Signale auf dem Weg zum Gehirn wird berücksichtigt sowie viele weitere kognitive Effekte.

Es folgt die Berechnung der Wahrnehmungsattribute: Helligkeit (Q), relative Helligkeit (J), Farbton (H), Buntheit (C), Sättigung (s) und Farbigkeit (M). Sie beschreiben die Wahrnehmung durch den Menschen. Zur eindeutigen Beschreibung reicht es, drei Attribute anzugeben. Am häufigsten verwendet man J, C und H. Diese Polarkoordinaten können in kartesische Koordinaten transformiert werden. Das entstehende

Ja<sub>c</sub>b<sub>c</sub>-Modell ist direkt vergleichbar mit dem Farbsystem CIELAB, das eine Farbe durch die Werte L, a und b beschreibt.

Für die Berechnung der nötigen Normfarbwerte für die Situation 2 wird das Modell in inverser Form angewandt. Aus den gegebenen Wahrnehmungsattributen werden unter Berücksichtigung der neuen Umgebungsbedingungen und der veränderten Lichtart (Halogenleuchtstofflampenlicht) die Zapfenempfindlichkeiten berechnet. Nach Rücktransformation in die Werte  $X_2$ ,  $Y_2$  und  $Z_2$  sind die neuen Farbwerte gegeben, die der Ausdruck besitzen muss.

## 7. Visuelle Farbwahrnehmungsversuche- Farbbildverarbeitung

Zur Beurteilung des Farbwahrnehmungsmodells CIECAM02 wurden visuelle Farbwahrnehmungsversuche durchgeführt. Dabei sollten Probanden einen Vergleich zwischen einer Originalszene und eines mit CIECAM02 farbkorrigierten Monitorbildes anstellen. Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Versuches.



Abbildung 5: Aufbau zum visuellen Farbwahrnehmungsversuch: Tabletop (rechts), Monitorwiedergabe (links)

Die Erstellung des Bildes geschah folgendermaßen. Zunächst wurden Aufnahmen der Originalszene gemacht. Es wurde eine digitale Kamera mit 6 Megapixeln verwendet, wobei von der Digitalkamera die Rohdaten nach Gain- und Offsetkorrektur genommen wurden. Die Szene wurde beleuchtet mit Kunstleuchten der Farbtemperatur 3200 K. Die Aufnahmen wurden ins HDTV-Format mit der Auflösung 1920x1080 Pixel umgewandelt. Die Beschreibung der Farbe erfolgte durch die Werte R, G und B, die für jeden Bildpunkt vorlagen. Um mit dem Modell CIECAM02 zu rechnen, mussten die RGB-Daten in die Normfarbwerte X,Y,Z der Szene transformiert werden. Die Berechnung des Monitorbildes erfolgte nach dem Schema in Abbildung 4. Die verwendeten Parameter sind im Folgenden genannt.

### Aufnahmeseite (Tabletopseite):

- Eingangsdaten:  $X_1, Y_1, Z_1$  wurden aus den RGB-Daten der digitalen Kameraaufnahmen berechnet
- Hintergrund:  $Y_b = 22$
- surround:  $L_w = 1150 \text{ cd/m}^2$ ;  $S_w = 1150 \text{ cd/m}^2$ ; daraus folgt für  $s = 1 \rightarrow$  average Parameter:  $c = 0.6$ ;  $F = 1.0$ ;  $N_c = 1.0$
- adaptive Leuchtdichte:  $L_A = 230 \text{ cd/m}^2$
- Lichtart:  $X_{w1} = 105.117$ ;  $Y_{w1} = 100.0$ ;  $Z_{w1} = 46.603$

### Wiedergabeseite (Monitorseite):

- Hintergrund:  $Y_b = 20$
- surround:  $L_W = 0.5 \text{ cd/m}^2$ ;  $S_W = 80 \text{ cd/m}^2$ ; daraus folgt für  $s = 0.006 \rightarrow \text{dark}$   
Parameter:  $c = 0.525$ ;  $F = 0.8$ ;  $N_c = 0.8$   
Monitor ist auf D65 kalibriert und profiliert
- adaptive Leuchtdichte :  $L_A = 16 \text{ cd/m}^2$
- Lichtart :  $X_{W2} = 95.335$ ;  $Y_{W2} = 100.0$ ;  $Z_{W2} = 109.183$

Für den Versuch wurden drei Monitorbilder erstellt. Zwei von ihnen wurden mit CIE-CAM02 berechnet. Sie unterschieden sich nur in der Verwendung des Surround-Parameters. Das dritte Bild entstand unter Anwendung des herkömmlichen Farbmanagements, welches nur die unterschiedlichen Lichtarten berücksichtigt. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der verwendeten Monitorbilder.

Bild	Art des Farbmanagement	Parameter
Monitorbild 1	Anwendung von CIE-CAM02	surround: dim
Monitorbild 2	Einfaches Farbmanagement	/
Monitorbild 3	Anwendung von CIE-CAM02	surround: dark

Tabelle 2: Verfahren zur Erstellung der Monitorbilder für den visuellen Farbwahrnehmungsversuch

### Durchführung:

Für den Versuch wurden insgesamt 14 Probanden befragt. Alle Probanden sind normalsichtig und haben Erfahrungen bei der visuellen Bildanalyse. Sie hatten die Aufgabe, die Originalszene mit den Monitorbildern zu vergleichen und ihre subjektive Bewertung abzugeben. Bei der Betrachtung wurde das Verfahren „memory matching“ verwendet. Es wurde dieses Verfahren gewählt, da aufgrund der großen Farbtemperaturunterschiede zwischen Originalszene (Kunstlicht,  $T=3200 \text{ K}$ ) und Monitorwiedergabe (Kalibrierung auf D65) kein side-by-side Vergleich hätte stattfinden können. Es musste streng auf die Anpassung an die jeweilige Lichtart geachtet werden.

Die Versuchspersonen mussten sich zunächst die Farben auf dem Tabletop einprägen. Hierzu hatten sie 5 Minuten Zeit. Anschließend erfolgte eine Adaptionszeit von 2 Minuten auf den Weißpunkt des Monitors. Danach hatten die Probanden die Gelegenheit das Monitorbild mit ihrer Erinnerung der Originalszene zu vergleichen. Sie mussten nun zwei Dinge bewerten. Zunächst kam es auf die objektive Beurteilung des Übereinstimmungsgrades der Farbwiedergabe an. Die Probanden sollten wirklich nur die einzelnen Farben und Farbobjekte beurteilen, nicht ihr Zusammenwirken oder den Kontrast. Die anschließende subjektive Bewertung des Gesamteindrucks, den die Probanden von dem Bild haben, beinhaltet auch die Bewertung des Kontrastes. Er spielt eine große Rolle bei der Beurteilung des gesamten Bildes. Deshalb kann nicht nur auf die Farben allein geachtet werden. Die Beurteilungsskalen zeigt Abbildung 6.

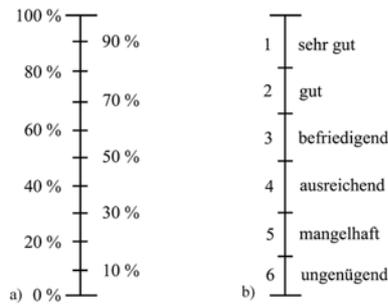


Abbildung 6: Skalen zur Beurteilung der Monitorbilder

Der beschriebene Vorgang wurde für alle Monitorbilder wiederholt. Am Anfang jedes Vergleichs hatten die Probanden die Gelegenheit sich die Objekte auf dem Tabletop noch einmal anzusehen und einzuprägen. So sollte der Einfluss des Gedächtnisses möglichst gering gehalten werden.

Ergebnisse:

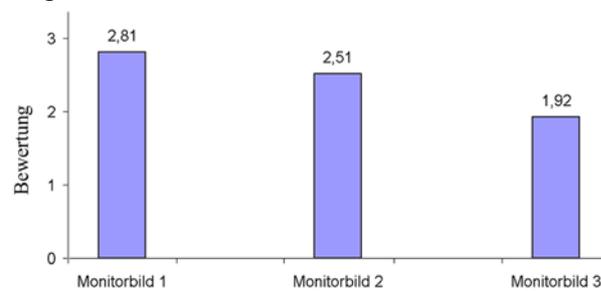


Abbildung 7a: subjektive Bewertung der Monitorbilder durch die Probanden durch Vergabe von Schulnoten

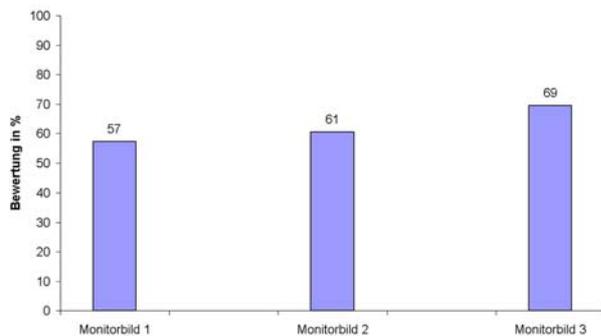


Abbildung 7b: Bewertung der Farbwiedergabe durch die Probanden

Die Bewertung durch die Probanden ist in Abbildung 7a und 7b zu sehen. Man erkennt, dass das Monitorbild 3 am besten bewertet wurde. Sowohl die Farbwiedergabe als auch der subjektive Gesamteindruck dieses Bildes gefiel den Versuchspersonen am besten. Das Bild ist durch das Modell CIECAM02 farbverändert. Jedoch kann man die Aussage, dass Modell verbessert die Farbwiedergabe nicht verallgemeinern. Denn auch das Monitorbild 1 wurde mit CIECAM02 erstellt. Es wurde aber am schlechtesten bewertet. Also muss man schlussfolgern, dass die Wahl der richtigen Umgebungsparameter einen großen Einfluss hat.

Im Anschluss an die visuellen Farbwahrnehmungsversuche wurden ausgewählte Objekte auf dem Tabletop farbmetrisch vermessen. Es wurde der Farbabstand  $\Delta E$  berechnet, um die Wiedergabequalität zu beurteilen. Für die Berechnung wurde die

Formel CIEDE2000 /6/ verwendet. Es wurde ein Vergleich durchgeführt zwischen der Originalszene und der Monitorwiedergabe. Hierzu wurden zunächst ausgewählte Objekte sowie der Colorchecker auf dem Tabletop spektral vermessen. Die gleichen Objekte wurden dann auf dem Monitor gemessen. Tabelle 3 zeigt eine Auswahl an Objekten, die Bemerkungen der Probanden sowie die berechneten Farbabstände.

Objekt	Kommentar der Probanden	Farbabstand: $\Delta E$ (CIEDE2000)
rotes Tuch	zu rot	3
lila Geschenkpapier	gut wiedergegeben	10
magenta Geschenkschleife	zu rot	8
Kunstrasten	zu dunkel	9
gelbes Tuch	gut wiedergegeben	15
grüne Gieskanne	zu dunkeln und zu gesättigt	16
blaue Kerze	gut wiedergegeben	12
grüne Pigmente im Glas	nicht als Grün zu erkennen	27
braunes Geschenkpapier	zu rot	11
Colorchecker: Grauachse	gut wiedergegeben, sehr neutral	Durchschnitt: 7
Colorchecker: blaue Felder A3/B2/C1	Verschiebung in Richtung Lila	Durchschnitt: 12

Tabelle 3: Vergleich der subjektiven Bewertung durch die Probanden und des berechneten Farbabstandes  $\Delta E$ -CIEDE2000

Die Gegenüberstellung in Tabelle 3 zeigt, dass die meisten Objekte, die einen großen Farbabstand besitzen, auch von den Probanden als schlecht wiedergegeben erkannt wurden. Dennoch gibt es auch Objekte, die von den Probanden als gut beschrieben wurden, obwohl sie einen großen Farbabstand besitzen. Dies trifft vor allem auf das gelbe Tuch zu. Visuell wurde es als sehr gut empfunden, doch das  $\Delta E=15$  müsste eigentlich deutlich zu sehen sein. Der Grund warum die visuelle Empfindung von der Farbmeterik so stark abweicht liegt wahrscheinlich darin, dass sich der Farbton bei der Monitorwiedergabe nur sehr gering von dem Original unterscheidet. Das große  $\Delta E$  resultiert hauptsächlich aus einer Helligkeits- und Sättigungsverringering. Da das gelbe Tuch auf dem Monitor jedoch immer noch sehr viel heller erscheint als die anderen Objekte, wurde der Unterschied im gelben Tuch nicht bewusst wahrgenommen. Auch die grauen Felder sind gut bewertet, obwohl ein durchschnittlicher Farbabstand von 7 messtechnisch erfasst wurde. Es liegt auch zum Teil daran, dass die ganze Farbwiedergabebeurteilung in einem komplexen Umfeld von mehreren Farbobjekten stattfindet und „Colour memory“ eine Rolle spielt.

Dies zeigt einmal mehr, dass man sich bei der Voraussage von Farben in bestimmten Situationen nicht allein auf die Farbvalenz des Reizes verlassen kann. Vielmehr muss das Objekt im Zusammenspiel mit den umliegenden Farben betrachtet werden. Sie üben einen Einfluss aus.

Aus Tabelle 3 ist weiterhin zu erkennen, dass die blauen Farben generell am schlechtesten wiedergegeben werden. Sie tendieren alle in Richtung lila. Grundsätzlich ist diese Verschiebung richtig, da man zunächst den Tabletop betrachtet, welcher mit Kunstlicht beleuchtet wird. Um dieses eher rotgelbe Licht der Glühlampe-

scheinwerfer zu kompensieren, müssen die Farben in Richtung Blau kompensiert werden, wenn sie unter Tageslicht (Monitor: D65) betrachtet werden. CIECAM02 verarbeitet somit die Farben tendenziell richtig, jedoch nicht im richtigen Maß.

## 8. Beleuchtungstechnik und Farbwahrnehmungsmodelle

Die Hauptaufgabe der modernen Beleuchtungstechnik besteht darin, die Lichtquellen mit einer bestimmten spektralen Verteilung und die passenden Leuchten mit bestimmten charakteristischen Lichtstärkeverteilungen zu wählen, so dass die Gegenstände in den zu beleuchtenden Innen- und Außeneinrichtungen durch die verwirklichte Leuchtdichteverteilung im Sehfeld, durch die Höhe der mittleren Leuchtdichte sowie durch die dadurch entstandenen Farbeindrücke bei der visuellen Wahrnehmung der dort arbeitenden Menschen eine hohe und langzeitige Akzeptanz finden. Da die Farbeindrücke vorwiegend durch die Farberinnerung und durch Vergleich der Farbwahrnehmung der typischen Gegenstände beim Beleuchten mit dem Tageslicht und mit den eingesetzten Lichtquellenspektren entstehen, spielt die Farbwiedergabe der Lichtquellen eine große Rolle.

Strenggenommen findet man heutzutage viele Lichtquellen, die an sich eine sehr ähnliche Lichtfarbe zu einer bestimmten Tageslichtphase bzw. zu einer Halogenglühlampe haben, so dass die Farbempfindung einer neutral weißen Oberflächenfarbe mit diesen Lichtquellen nicht gestört wird. Die Probleme entstehen erst, wenn farbige und gesättigtere Oberflächenfarben mit solchen Lichtquellen beleuchtet und bewertet werden müssen. Daher spielt der uns allen bekannte Farbwiedergabeindex nach CIE 13.3 (1995) /7/ und DIN 6169 /8/ eine große Rolle.

Der Farbwiedergabeindex ist eine Funktion des Farbabstandes  $\Delta E$ , der durch den Farbunterschied beim Beleuchten der Oberflächenfarben jeweils mit der Testlichtart und der Bezugslichtart entsteht, wobei die chromatische Adaption auf diese Lichtarten berücksichtigt wird. Korrekt bestimmte Farbwiedergabeindizes sind dadurch theoretisch durch folgende Voraussetzungen ermöglicht:

- a) zuerst durch einen wahrnehmungstechnisch begründeten Farbraum, der gleichabständig ist und die Farbwerte der Wahrnehmung entsprechend anordnet. Das Zustandekommen der Farbwerte in diesem Farbraum sollte die chromatische Adaptation korrekt mitenthalten.
- b) Eine Farbabstandsberechnungsweise und -prozedur, die gleichabständig und unabhängig vom Farbort ist. Der Farbunterschiedsschwellenwert sollte unabhängig vom Farbort immer  $\Delta E=1$  sein.

Gemessen an diesen Anforderungen ist die Berechnung der Farbwiedergabeindizes in der heutigen Form nicht korrekt und wahrnehmungsgerecht, da der verwendete  $U^*V^*W^*$ -Farbraum nicht gleichabständig und die chromatische Adaptationsformel veraltet sind.

Seit 1976 wird der Farbraum CIELAB verwendet, dessen Vor- und Nachteile speziell zur chromatischen Adaptation zum Teil im Kapitel 3 beschrieben wurden. Um die Farbdifferenz korrekt zu berechnen, gibt es prinzipiell seit etwa 10 Jahren zwei Ansätze, wie man die Farbdifferenz wahrnehmungsgerechter bilden kann. Diese zwei Möglichkeiten sind /9/:

- Man versucht, mit dem CIELAB-Farbraum als Startpunkt zu beginnen, d.h. die  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ -Werte sind die Ausgangswerte. Die  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ -Werte werden soweit transformiert, so dass aus dem ursprünglichen CIELAB-Farbraum ein neuer Farbraum entsteht, in dem die Farbdifferenz euklidisch berechnet werden kann. Das ist der Ansatz des gleichabständigen DIN 99 (DIN 6176) Farbraums /s.u.a. 9/.
- Bei dem anderen Ansatz bleibt man beim CIELAB-Farbraum mit all den Unzulänglichkeiten, und versucht, mit Korrekturfaktoren für die Gewichtung der perceptiven Attribute und mit Zusatzfunktionen zur Aufhebung der nicht optimalen Farbdarstellung im blauen Bereich des CIELAB-Farbraumes zu einer korrekten Farbdifferenzberechnung zu kommen. Das ist der Ansatz mit den CMC-, CIE94-Formelsätzen /10/ und neulich mit den CIEDE2000-Formeln /11/.

C.Hacker und Tran Quoc Khanh /12/ haben die Korrektheit der Farbdifferenzberechnungen nach CIELAB 1976, CIEDE2000 und DIN 99 durch umfangreiche visuelle Experimente überprüft. In allen Primärfarben zeigen die mit der CIEDE2000 berechneten Werte deutliche Unterschiede zu den  $\Delta E$ -Werten der herkömmlichen CIELAB-1976- $\Delta E$ -Formel. Sie harmonisieren viel besser mit den Testergebnissen der Probanden. Besonders im Blau zeigt sich eine deutliche Übereinstimmung mit den wahrgenommenen  $\Delta E$ . Es ist sogar möglich einen genauen Wert für die Erkennungsschwelle anzugeben, der bei ca.  $\Delta E = 1,0$  für fast alle Farben liegt. Nur bei Blau und Rot sind noch kleine Abweichungen zu erkennen. Im Großen und Ganzen ähneln die  $\Delta E$ -Werte nach DIN 99 denen mit der CIEDE2000 ermittelten Werten.

Diese Ergebnisse zeigen, dass ein möglicher Farbwiedergabeindex nach der Farbdifferenzformel nach CIEDE2000 oder DIN 99 viel bessere Ergebnisse als herkömmliche Formeln liefern können. Der Nachteil von solchen Formeln ist dennoch, wenn man an eine ideale Berechnung denkt, dass eigentlich der dafür verwendete CIELAB-Farbraum auch nur bedingt die chromatische Adaptation berücksichtigt und solche Farbdifferenzformeln nur für Paare der Farbproben gilt, die jeweils im Sehfeld der Betrachter eng aneinander anliegen müssen, mit einem grauen Hintergrund. Diese Bedingung findet in der realen Beleuchtung höchst selten statt.

Dennoch sollte man den Farbwiedergabeindex bereits nach CIEDE2000 oder DIN 99 berechnen, um bessere Ergebnisse als die nach dem heutigen CIE-Standard 13.3 berechneten Farbwiedergabeindizes zu erhalten.

Die besten Ergebnisse mit den Farbwiedergabeindizes findet man, wenn man die Farbdifferenz über die Farbwahrnehmungsmodelle berechnen kann. Man braucht im Grunde genommen ein gutes Farbwahrnehmungsmodell auszuarbeiten, das die Farbvalenz der Sehobjekte und die Sehbedingungsparameter berücksichtigt und davon die für eine Wahrnehmung der Farben wichtigen Attribute (Helligkeit, Sättigung, Farbton...) zu bilden und dann auf der Basis der Attribute eine Farbdifferenz zu berechnen, die dann auch tatsächlich unter dieser konkreten Sehbedingung wahrgenommen wird /13/. Das setzt voraus, dass ein Farbwahrnehmungsmodell dafür zur Verfügung gestellt wird und eine breite Akzeptanz findet. So ein Modell ist das oben beschriebene Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02. Es liefert auch die unmittelbare Voraussetzung für die Schaffung eines Farbraumes. Die Denkweise dazu kann man wie folgt schematisch beschreiben /9/ (s. Bild 8 und 9):

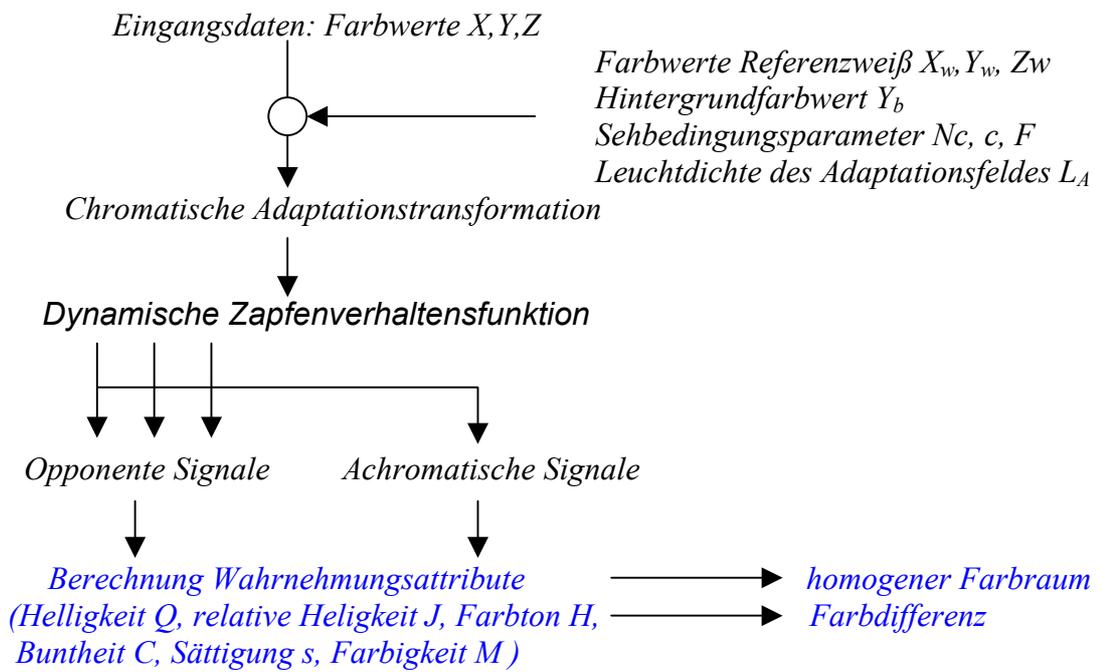


Bild 8: Die Struktur des Farbwahrnehmungsmodells

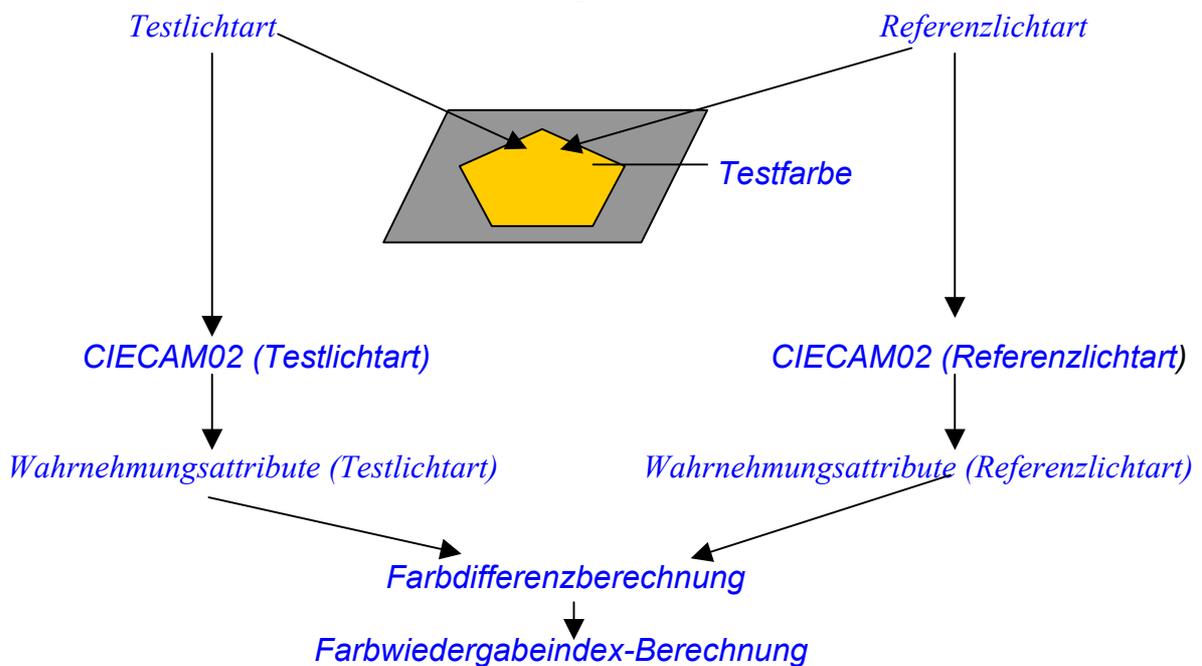


Bild 9: Farbwiedergabeindex auf der Grundlage des CIECAM02-Modells

Nach dem Schema im Bild 9 sollten zukünftig visuelle Versuche durchgeführt werden, um die Richtigkeit der Farbwiedergabeindizes auf der Grundlage von CIECAM02 zu verifizieren.

## 9. Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das Farbwahrnehmungsmodell CIECAM02 gute Ergebnisse liefert. Es beachtet bei der Berechnung nicht nur den Farbreiz selbst, sondern auch die Umgebungsbedingungen. Dies führt zu einem besseren subjektiven Eindruck als die Anwendung des zur Zeit verwendeten Farbmanage-

ments. Hier wird nur die Veränderung der Lichtart betrachtet. Das Modell verarbeitet eine Vielzahl an Einflüssen, denen die Wahrnehmung unterliegt.

Der Farbwiedergabeindex nach der heutigen Fassung entspricht nicht der wirklichen Farbwahrnehmung. Eine viele bessere Berechnung ist die auf der Grundlage der Farbdifferenzberechnung nach CIEDE2000 oder DIN99, wobei DIN 99 aufgrund der Einfachheit der Formel zu bevorzugen ist. Ideal ist eine Farbdifferenzberechnung, nachdem die Wahrnehmungsattribute mit einem Farbwahrnehmungsmodell berechnet wurden.

## Literaturverzeichnis

/1/ M.Fairchild: Color appearance models , Addison-Wesley, 1998

/2/ Wyszecki G, Stiles WS, Color Science. Wiley, New York, 1982

/3/ R.R.Buckley: The history of device independent Color- 10 Years later, proceedings of the 10<sup>th</sup> color Imaging Conference, November 12-15, 2002, Scottsdale, USA, p.41-46

/4/ D.Wunderlich: Analytische und experimentelle Untersuchung zur Verbesserung von farbge-managten Digitalbildern durch verschiedene Farbwahrnehmungsmodelle, Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, Dezember 2003

/5/ N.Moroney et al.: The CIECAM02 color appearance model, proceedings of the 10<sup>th</sup> color Imaging Conference, November 12-15, 2002, Scottsdale, USA, p.23-27

/6/ M.R. Luo et al.: the development of the CIE 2000 colour difference formula, Color Res. App. 26, p.340-350, 2001

/7/ CIE 13.3 (1995) Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources (Vienna)

/8/ DIN 6169, Blatt 2: Farbwiedergabe

/9/ T.Q.Khanh: Physiologische und psychophysische Aspekte der Photometrie, Colorimetrie und Farbbildverarbeitung, Habilitationsschrift, Technische Universität Ilmenau, Institut für Lichttechnik und Technische Optik, verteidigt im März 2005

/10/ M.D.Fairchild: Color appearance models, Addison Wesley Longman, Inc., Massachusetts, 1998

/11/ M. R. Luo, G. Cui and B. Rigg: The Development of the CIE 2000 Colour Difference Formula, Color Research and Applications 26, 2001, S.340-350

/12/ Hacker C., Khanh T.Q.: Wahrnehmung von Farbdifferenzen in der Film-und Fernseh-Postproduktion, Proceedings DfwG Jahrestagung 2003, 9-10. Okt, Esslingen

/13/ Sun P.L., Morovic J.: Inter-Relating Colour Difference metrics, proceedings IS&T/SID Tenth Color Imaging conference, Scottsdale, AZ, USA, 2002, S.55-60