Color Appearance Models

Arvid Hansen Díaz

Universität Koblenz

1 Einleitung

Wenn wir versuchen unsere Umwelt zu reproduzieren, sei es am Bildschirm oder auf dem Papier, müssen wir wissen, dass Farben in unserem Gehirn entstehen. Unser Sehsystem interpretiert die Farben und greift auf Erinnerungen zurück, um Farben möglichst konstant zu halten. Würde unser Auge so funktionieren wie ein Messgerät, dann hätten wir zu jeder Tageszeit eine andere Welt um uns. Die Farben würden sich wegen der verändernden Lichtverhältnisse während des Tages konstant verändern. Daher haben sich viele Wissenschaftler Gedanken darüber gemacht wie man die Eigenschaften unseres Sehsystems mathematisch darstellen kann. Das Problem was man sich vor Augen führen muss, ist, wenn man z.B. einen Bildschirm betrachtet, dass dieser vollkommen unabhängig von der Umgebung in der er steht, ein Bild darstellt. Die Lichtverhältnisse außerhalb haben keinen Einfluss auf das Bild auf dem Bildschirm. Dies ist nur eines der vielen Probleme, die man beim Reproduzieren haben kann.

In dieser Arbeit möchte ich eine kurze Einführung in die Welt der Color Appearance Models geben, die unser Sehsystem simulieren sollen. Um aber die Komplexität dieses Problems besser zu verstehen, werde ich im nächsten Kapitel die wichtigsten Sehphänomene vorstellen. Danach werde ich anhand des CIELAB-Farbraumes die Prozedur eines Color Appearance Modells aufzeigen und darauf die wichtigsten Modelle vorstellen.

2 Die wichtigsten Phänomene

Simultan-Kontrast
Zwei physikalisch identische Grautöne auf zwei verschiedenen Hintergründen, erscheinen unterschiedlich. Auf dem schwarzen Hintergrund erscheint der Grauton heller und auf dem weißen Hintergrund dunkler. Auf Abb. 1 kann man das Phänomen selber gut beobacthen. Dieser Effekt lässt sich mit einer bestimmten Eigenschaft unserer Retina erklären, die auch andere Phänomene hervorruft. Auf unserer Netzhaut befinden sich Neuronen, die ein rezeptives Feld von einem sogenannten Zentrum-Umfeld-Typ haben. Diese reagieren, je nach dem wie viel Licht im Zentrum oder in der Umgebung ankommt, unterschiedlich. So gibt es Neuronen mit einem rezeptiven Feld, die am stärksten reagieren, wenn das Zentrum stärker beleuchtet wird als die Umgebung und am schwächsten, wenn der ganze Bereich gleichzeitig beleuchtet wird. Es gibt andere Neuronen die genau umgekehrt reagieren und am stärksten reagieren, wenn das Umfeld am hellsten

ist. Diese beiden Merkmale führen dazu, dass unser Auge nach Kontrasten sucht und somit auf Kanten und Grenzen reagiert, wie z.B. an der Grenze eines grauen Feldes zum dunklen Hintergrund. Das führt dazu, dass das graue Feld heller erscheint. Ferner hebt rot grün, grün rot, gelb blau und blau gelb hervor. Dies erkennt man gut auf Abb. 2.

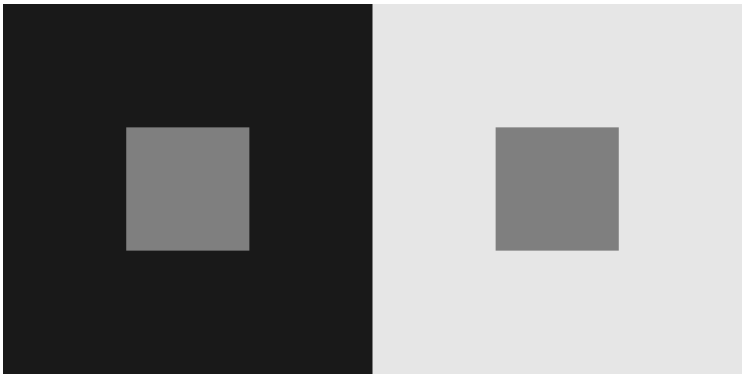

Abb. 1. Simultan-Kontrast: Das graue Kästchen auf schwarzem Hintergrund erscheint heller. [1];

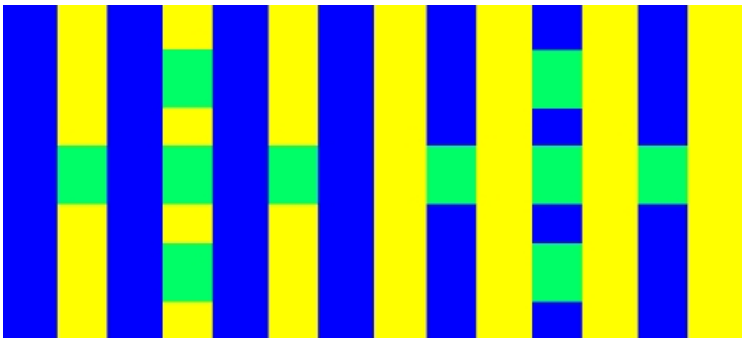

Abb. 2. Simultan-Kontrast mit Farben: Die grünen Kästchen, die in den blauen Streifen liegen erscheinen heller (gelber), da blau gelb hervorhebt. [2];

Spreading

Spreading beschreibt den Effekt, wenn man mehrere eng beieinander liegende Punkte noch deutlich sehen kann, aber die Farben sich bereits miteinander vermengen. So sieht man das bei Zeitungsbildern, bei denen aus einer bestimmten

Entfernung die Farbpunkte miteinander verschmelzen. Weiterhin gibt es noch das Neon Color Spreading, welches den obigen Effekt mit der Wahrnehmung der Transparenz kombiniert. Den Effekt kann man auf Abb. 3 sehen, hier wurden die schwarzen Linienzüge teilweise durch farbige ersetzt. Zwischen den farbigen Linien entsteht der Eindruck einer transparenten Oberfläche.

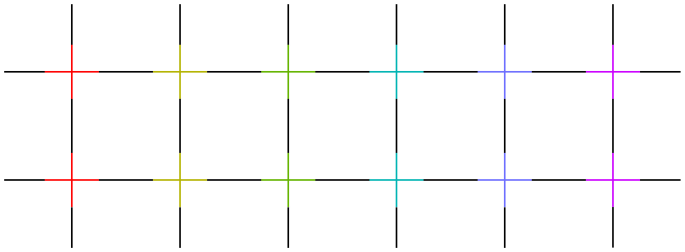

Abb. 3. Neon Color Spreading: Hier erkennt man verschiedenfarbige transparente Oberflächen. [16];

Bezold-Brücke Phänomen

Beim Betrachten monochromatischen Lichtes bleibt beim Verändern dessen Leuchtdichte der Farbton nicht konstant. Dies nennt man das Bezold-Brücke Phänomen. Somit beeinflusst auch die Intensität des Lichtes den Farbton und hängt nicht allein von dessen Wellenlänge ab.

Abney Effekt

Wenn man monochromatisches Licht mit weißem Licht mischt, verändert sich nicht nur die Sättigung, sondern auch der Farbton. Dieses Phänomen nennt man den Abney-Effekt. Daher ist es nicht korrekt, den Farbton nur über die gemessene Wellenlänge zu bestimmen.

Helmholtz-Kohlrausch Effekt

Dieser beschreibt den Effekt, dass bei gleichbleibender Leuchtdichte, die empfundene (absolute) Helligkeit durch zunehmende Sättigung zunimmt und vom Farbton beeinflusst wird. Somit ist die wahrgenommene Helligkeit nicht Eindimensional von der Leuchtdichte abhängig. So kann man auch zeigen, dass ein bunteres Bild bei konstanter Helligkeit heller wirkt als ein Einfarbiges. In den folgenden Bildern kann man gut diesen Effekt erkennen. Auf Abb. 4 Bild A sieht man verschiedene Quader mit einem grauen Kästchen in der Mitte umgeben von einer Farbe. Die Quader auf der rechten Seite sind zehnmal heller als die auf der Linken. Die Testpersonen mussten die Leuchtdichte (luminance) des rechten

grauen Kästchens so angleichen, dass beide graue Kästchen übereinstimmten. Auf Bild B sieht man eine ähnliche Anordnung, nur dass im Quader 24 verschieden farbige Kästchen enthalten sind. Die Farben aus dem ersten Bild sind jeweils sechsmal vertreten. Hier mussten die Testpersonen wieder die Leuchtdichte verändern, mit dem Ergebnis, dass die erforderliche Angleichung höher ausfiel, als bei den einfarbigen Mustern. Das buntere Muster muss daher den Testpersonen heller erschienen sein.

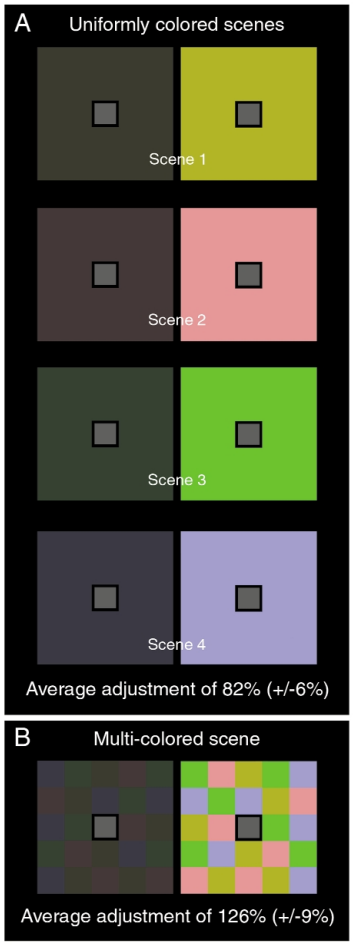

Abb. 4. Buntere Bilder wirken heller [3];

Hunt und Stevens Effekt

Die Farbwahrnehmung der Umwelt verändert sich deutlich, wenn sich die Helligkeit der Umgebung verändert. In der Dämmerung sieht man Farben nicht mehr so klar wie bei Sonnenschein. Diese Eigenschaft wird durch den Hunt und Stevens Effekt beschrieben. Auf Abb. 5 unten wird der Hunt Effekt vereinfacht dargestellt: Eine wenig gesättigte Farbe entspricht bei einer Leuchtdichte von 10000 cd/m^2 betrachtet, einer hoch gesättigten Farbe bei 1 cd/m^2. Dies bedeutet anders gesagt, dass die Farbenpracht mit steigender Leuchtdichte zunimmt. Der Stevens Effekt erklärt, dass mit steigender Leuchtdichte der Helligkeitskontrast mit steigt. Was letztendlich heißt, dass bei steigender Leuchtdichte dunkle Farben dunkler erscheinen und helle Farben heller.

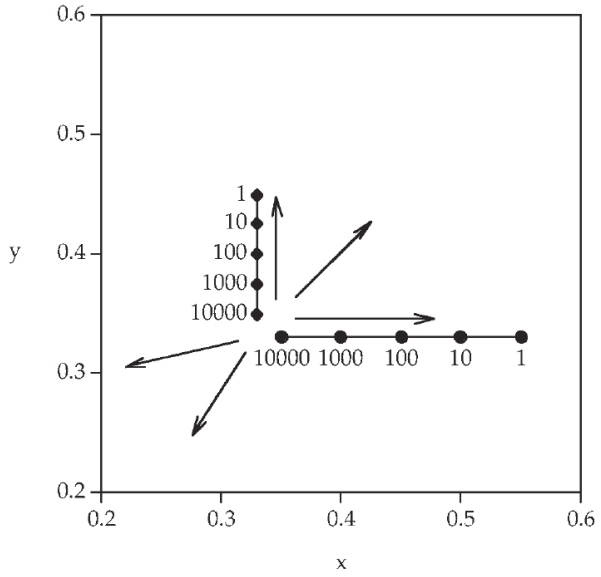

Abb. 5. Hunt Effekt [8];

Helson-Judd Effekt

Zufällige Muster, die mit einem starken monochromtischen Licht bestrahlt werden, nehmen den Farbton des Lichtes an, wenn sie heller als der Hintergrund sind. Sobald sie dunkler sind, nehmen sie den komplementären Farbton an. Sobald die Reize minimal komplexer werden, also das Licht leicht verunreinigt wird, fällt dieser Effekt nicht mehr auf. Zudem erscheint er nicht jedem Menschen.

Bartleson-Breneman Equations

Dies ist ein ähnlicher Effekt wie der obige Stevens-Effekt. Der empfundene Bildkontrast hängt auch von der Umgebungshelligkeit ab, in der das Bild betrachtet wird. So nehmen wir die Kontraste von Bildern mit steigender Umgebungshelligkeit besser wahr. Die Ursache liegt darin, dass die dunklen Bereiche auf dem Bild durch ein dunkleres Umfeld heller erscheinen, während die hellen Bereiche sich nicht so stark verändern. Wegen der größeren Auswirkung auf dunkle Bereiche, verändert sich somit der aufgenommene Kontrast. Dieses Phänomen kann man einfach selber austesten. Setzt man sich abends in einem dunklen Raum vor einem Monitor hinter dem eine Lampe leuchtet und die Umgebung erhellt, ohne Reflexionen auf dem Bildschirm zu erzeugen, ist der wahrgenommene Kontrast höher als in einer dunklen Umgebung.

Discounting the Illuminant

Unser Wahrnehmungssystem ist in der Lage, Objekten durch Deutung der Beleuchtung und der Umgebung eine gleichbleibende Farbe zuzuordnen. Somit sieht für uns die Farbe eines Gegenstandes, ungeachtet wechselnder Beleuchtungsverhältnisse immer gleich aus, weil unser Gehirn aufgrund seiner Erfahrung die Farbe konstant hält. Wichtig ist diese Kenntnis bei der Darstellung von Bildern auf Monitoren oder Projektionen, dessen Beleuchtung nicht mit der Umwelt des Betrachters zusammenhängt, womit die obige Fähigkeit nicht genutzt werden kann. In diesen Situationen ist es erforderlich den Effekt zu simulieren, damit ein natürliches Bild entsteht.

Beispiel für strukturelle und Kontext bezogene Effekte

Weiterhin haben bestimmte Strukturen und der Kontext Einfluss auf die Farbwahrnehmung. Auf Abb. 6 sieht man eine Serie von farblich identischen Diamanten. Auf den ersten drei Abbildungen haben die verschiedenen Variationen von Hintergründen und Überlappungen keine große Wirkung. Beim letzen Bild sieht man aber, dass es einen signifikanten Unterschied im Kontrast gibt. Die unteren Diamanten erscheinen heller und somit wird deutlich das auch der räumliche Aufbau das Farbempfinden beeinflussen kann.

Adaption

Durch Adaption ist es uns möglich, die Empfindlichkeit unserer Wahrnehmung auf Veränderungen in der Umwelt anzupassen. Für das Sehen sind folgende Adaptionen wichtig:

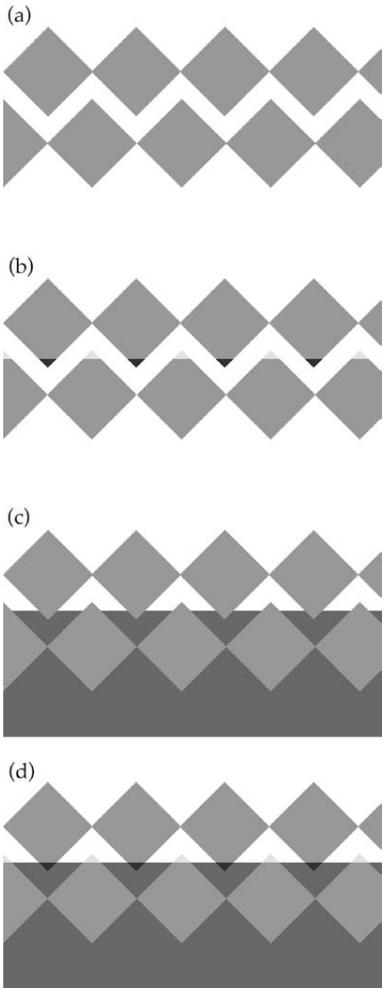

Abb. 6. Struktuelle Effekte: Bei d) erkennt man, dass die unteren Diamanten heller sind. [9];

Light Adaption

Wenn es hell wird, gewöhnt sich unser Auge daran, indem es seine Lichtempfindlichkeit verringert. Diese Hell-Adaption tritt z.B. auf, wenn man aus einem dunklen Tunnel fährt und für eine kurze Zeit nachdem man aus ihm heraus kommt, vom Licht geblendet wird. Nach einer kurzen Zeit, sind wir nicht mehr geblendet und können wieder normal sehen.

Dark Adaption

Dunkel-Adaption ist genau das Gegenteil und beschreibt die erhöhte Sensibilität des Auges, wenn es dunkler wird. Es dauert aber länger sich an das Dunkle zu gewöhnen, als an das Helle.

Chromatische Adaption

Chromatische Adaption ist eine wichtige Eigenschaft, die in nahezu allen Color Appeareance Models berücksichtigt wird. Diese Fähigkeit ist soetwas wie der automatische Farbausgleich unseres Sehsystems und kann auf den folgenden Bildern deutlich gemacht werden. Das erste Bild(a) auf Abb. 7 zeigt eine Landschaft bei Tageslicht. Auf dem folgenden Bild(b) sieht man die gleiche Landschaft bei anderen Lichtverhältnissen, so als ob man nicht chromatisch adaptieren könnte. Man erkennt einen starken gelben Farbstich. Solche Effekte können entstehen, wenn man in einer Fotokamera einen Film eingelegt hat, der nicht die zum Tageslicht passende Empfindlichkeit aufweist. Das dritte Bild zeigt die chromatisch adaptierte Version. Den Farbausgleich kann man auch experimentell wie folgt nachstellen: Wenn man sich lange genug auf den schwarzen Punkt im Muster auf Abb. 8 konzentriert und dann den Blick auf eine weiße Wand wendet, sieht man ein Nachbild des Musters, dessen Farben sich geändert haben. Unser Sehsystem hat z.B. im roten Bereich, während der Betrachtung, die Sensibilität für rote Farben reduziert. Sobald man auf die weiße Wand schaut ist die Rot-Empfindlichkeit nicht stark genug und man sieht statt der weißen Wand kurz ein cyan-farbiges Feld.

Abb. 7. Chromatische Adaption [10];

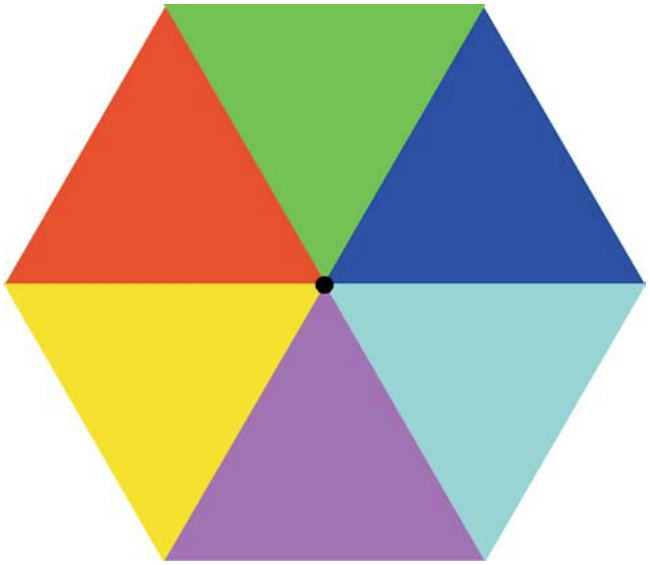

Abb. 8. Chromatische Adaption: Starren Sie 30 Sekunden den schwarzen Punkt an und wenden sie dann den Blick auf eine weiße Wand. [11];

3 Color Appeareance Models

Was ist ein CAM?

Das CIE Technical Committee 1-34, Testing Color Appearance Models hat sich auf folgende Definition geeinigt[13] :

> a color appearance model is any model that includes predictors of at least the relative color appearance attributes of lightness, chroma, and hue. For a model to include reasonable predictors of these attributes, it must include at least some form of a chromatic adaption transform. Models must be more complex to include predictors of brightness and colorfulness or to model other luminance dependent effects such as the Stevens effect or the Hunt effect.

In einem Color Appearance Model werden zunächst einmal die CIE XYZ Farbwerte des Reizes bestimmt. Dabei betrachtet man je nach Modell nur einen kleinen Sichtbereich oder den gesamten, bestehend aus dem zwei Grad großen Hauptfarbreiz im Sehzentrum und dem in etwa zehn Grad großen Hintergrund. Einige Modelle gehen noch weiter und definieren zwischen dem Sehzentrum und Hintergrund noch einen Sehbereich. Zudem kann man noch die ganze Umgebung sowie die Lichtquelle einbeziehen. Diese Werte werden dann in den LMS Farbraum umgerechnet, was die Handhabung vereinfacht. Mittels der verschiedenen Phänomene, die oben beschrieben wurden, und den gemessenen Farbwerten

wird ein Modell konzipiert, welches am Ende, je nach Umfang, die Leuchtdichte, Sättigung, den Farbton, die absolute und relative Helligkeit, Buntheit und andere Werte eines Reizes bestimmen kann.

CIELAB

Anhand des CIELAB Farbraumes kann man die obigen Schritte einfach darstellen. CIELAB ist dafür gedacht Farbabstände bestimmen zu können. So ist der Euklidische Abstand zweier Punkte im LAB Raum auch deren Farbabstand. Das Modell dient hier als Beispiel, da es gewisse Eigenschaften eines Color Appearance Modelles hat.

Im CIELAB Farbraum steht L^* für die relative Helligkeit und a^*, b^* beschreiben die Farbe. Berechnet werden sie aus den XYZ Farbwerten des Reizes, die mit dem Weißpunktwert (Referenzweiß) X_n Y_n Z_n normalisiert werden. Die Werte werden dann gemäß den Komplementärfarben hell-dunkel, rot-grün, und gelb-blau auf die L^*, a^*, b^* Dimensionen transformiert. Auf der kartesischen Darstellung sind diese Werte als Dreidimensionaler Farbraum dargestellt. Die L^* Achse hat einen Wertebereich von 0 für schwarz bis 100 für diffuses weiß. Die a^* und b^* Achse beschreiben die Farbtöne rot-grün und gelb-blau, wobei rot und gelb positiv und grün und blau negativ sind. Sobald a^* und b^* den Wert 0 haben, handelt es sich um einen achromatischen Farbton wie grau. Zudem kann man die Buntheit C^*_{ab} und den Farbton h_{ab} in Grad berechnen.

Der CIELAB Farbraum entspricht mit den XYZ Eingabewerten, die durch den Weißpunkt normalisiert und somit einem Weißabgleich unterzogen wurden sowie mit der Möglichkeit die relative Helligkeit, Buntheit und den Farbton zu berechnen, einem simplen Color Appearance Modell. Für ein gutes Color Appearance Modell bräuchte es aber noch einiger Verbesserungen. Zum einem wäre es besser, wenn man die XYZ Farbwerte in das Zapfenfarbsystem LMS transformieren würde, da es aufgrund der Normalisierung durch das Referenzweiß zu Ungenauigkeiten kommen kann. Zudem werden wichtige Effekte nicht beachtet welche von der Leuchtdichte abhängen (z.B. Hunt und Stevens Effekt). Der Hintergrund und die Umgebung werden nicht berücksichtigt, was die Vorhersage einiger Kontrasteffekte verhindert (z.B. Simultan-Kontrast). Ferner fehlt CIELAB die Möglichkeit die empfundene Buntheit und Helligkeit zu bestimmen.

Im Folgenden Teil werde ich einige wichtige Color Appearance Modelle vorstellen und deren Vor-und Nachteile kurz darstellen.

Hunt

Das Hunt Modell ist ein vollständiges Color Appearance Modell. Es kann alle wichtigen Farbwerte berechnen (absolute und relative Helligkeit, Buntheit, relative Sättigung, Sättigung und Farbton) und wurde für die Anforderungen der Bildwiedergabe entwickelt. Es ist fähig verwandte und unverwandte Farben mit verschiedenen Hintergründen, Umgebungen, Beleuchtungsfarben zu berechnen

und beachtet dabei eine breite Palette an Phänomenen, insbesondere die oben vorgestellten Bezold-Brücke, Abney, Helmholtz-Kohlrausch, Hunt, Helson-Judd, Stevens, Bartleson-Breneman und Simultan-Kontrast Eigenschaften. Dazu ist es in der Lage, mit allen Helligkeitsstufen zu rechnen, womit auch neben den Eigenschaften der Zapfen auch die der Stäbchen, welche für die Helligkeitswahrnehmung in der Dämmerung und Dunkelheit zuständig sind, einkalkuliert werden. Hinzu kommt noch die Fähigkeit den Prozess der Licht- und Farb-Adaption vorauszubestimmen. Es werden alle Bestandteile unseres Sichtfeldes (Sehzentrum, nahes Sichtfeld, Hintergrund und die Umgebung, s.o.) unabhängig voneinander in die Rechnung mit einbezogen. Das Modell hat aufgrund der umfangreichen Fähigkeiten eine lange Liste von Eingaben und ist somit sehr komplex und daher unhandlich; Worin der größte Nachteil des Modells liegt. Es kann zwar flexibel genutzt werden, indem man nicht vorhandene Messwerte durch Konstanten ersetzt, was aber nicht immer zu optimalen Ergebnissen führt. Zudem ist es sehr rechenaufwändig und das Invertieren ist sehr kompliziert. Trotzdem ist es ein sehr genaues Verfahren der Farbvorhersagen und einige Teile kann man in anderen Modellen wiederfinden.

Nayatani

Das Nayatani Modell wurde nicht für die Bildwiedergabe entwickelt, sondern für die Beleuchtungstechnik, was andere Anforderungen mit sich brachte. Die Hauptaufgabe lag daher darin die Beleuchtungseigenschaften von Lichtquellen zu berechnen. Das Modell kann viele Farberscheinungsphänomene vorausberechnen, wie den Stevens Effekt, Hunt Effekt, Helson-Judd Effekt und dazu berücksichtigt es die Chromatische Adaption. Außerdem ist das Modell invertierbar und kann alle wichtigen Farbwerte berechnen. Für umfangreiche Hintergrund-und Umgebungsbeleuchtung ist dieses Modell nicht geeignet, da es für einfache Farbfelder und einen mittel-bis hellgrauen Hintergrund konzipiert wurde. Hierin haben wir einen großen Nachteil. Ohne die Umgebung und den Hintergrund zu berücksichtigen, kann man kognitive Effekte, wie Discounting the Illuminant oder Chromatische Adaption, nicht bestimmen. Durch diese Limitierung ist das Nayatani Modell auf einfache Testbedingungen beschränkt. Dennoch hat das Modell Einfluss auf andere Modelle genommen.

RLAB

RLAB ist, im Gegensatz zu den obigen Modellen, dazu gedacht, die wichtigsten Phänomene einfach zu berechnen, damit es für praktische Anwendungen geeignet ist. RLAB baut auf das CIELAB Modell auf und ergänzt es mit Funktionen, welche die Nachteile von CIELAB (s.o.) verringern sollen. So wird auch die relative Leuchtdichte der Umgebung miteinkalkuliert. Da es nur mit einander verwandte Farben bestimmen kann, ist es nur dazu in der Lage die relative Helligkeit, relative Sättigung, Sättigung und den Farbton zu berechnen, aber nicht die absolute Helligkeit oder die Buntheit. Es beherrscht Chromatische Adaption

und Discounting the Illuminant. Insgesamt ist das Modell sehr handlich und wenig komplex. Dies macht es ungeeignet für umfangreichere Farberscheinungen, für die mehr Einflüsse und Phänomene eine Rolle spielen, weshalb man auf andere Modelle zurückgreifen muss.

CIECAM97s

Das CIECAM97s Modell ist das erste Color Appearance Modell der internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission internationale de l'éclairage). Ziel war es ein standardisiertes Modell zu entwickeln, welches einheitlich in der Industrie verwendet werden konnte, um die Kompatibilität zwischen den verschiedenen Anwendungen zu ermöglichen. Dafür sollten die besten Eigenschaften der verfügbaren Color Appearance Modelle zusammengetragen werden. Anfangs war gedacht ein einfaches Modell für praktische Anwendungen zu entwickeln, welches zu einem ausgedehnteren Modell erweitert werden konnte. Es wurde aber nur das einfache Modell veröffentlicht. Es kann aber dennoch einen weiten Bereich an Phänomenen bestimmen und ist nur bei ganz starken und niedrigen Lichtverhältnissen begrenzt. Durch die große Akzeptanz in der Industrie und der Möglichkeit das Modelle erweitern und verbessern zu können, entwickelten die Wissenschaftler mit der gemachten Erfahrung das CIECAM02 Modell; was auch daran lag, dass man sich nur noch auf ein Modell konzentrierte und so schnell voranschritt.

4 CIECAM02 und Zukunft

CIECAM02 ist die verbesserte Version von CIECAM97s. Es ist einfacher formuliert, besser invertierbar und ist mindestens so gut wie CIECAM97s. Es hat dieselben Eigenschaften und ist ebenfalls nicht dazu in der Lage niedrige und hohe Lichtverhältnisse zu simulieren. Wem das Modell nicht ausreicht und wer insbesondere den Einfluss der Stäbchen simulieren will, muss auf das Hunt-Modell zurückgreifen. Wenn es einem zu umfangreich ist, kann man RLAB oder für ganze einfache Verhältnisse CIELAB verwenden. CIECAM02 ist das letzte international empfohlene Modell. Es wird wohl in diesem Punkt wohl keine „größeren Veränderungen“ mehr geben. Vielmehr wird man das bisherige Konzept erweitern, indem räumliche und zeitliche Einflüsse in einer vergrößerten Umwelt miteinbezogen werden. Zudem sollen nun, unter anderem, die bisher separat betrachteten Farbdifferenzberechnungen in die Modelle integriert werden, damit Farberscheinungen und Farbmessungen mit einem Modell gemacht werden können. Die Idee dahinter ist, Messungen unabhängig von den Anwendungsbereichen, also Druckern, Bildschirmen usw., machen zu können. Das Modell soll natürlich auch praktisch anwendbar sein. Am Ende wäre es ideal, wenn man Werte wie Schärfe, Körnigkeit, Kontrast und Auflösung zusätzlich zu den anderen üblichen Werten (Helligkeit, Farbton, Sättigung etc.) berechnen könnte. Ein solches image Appeareance Modell, das iCAM, haben M.D. Fairchild und G.M.

Johnson entwickelt[14]. Das iCAM Modell befindet sich in der Entwicklung und ist als Framework konzipiert, der stetig erweitert werden kann.

Literatur

1. http://cogmaster.risc.cnrs.fr/exphum/a/projects/ica/images/simultaneous-contrast2.png (Stand: 26.04.2009).
2. http://www.colorcube.com/illusions/scstripe.htm (Stand: 26.04.2009).
3. Lotto, Beau R./Purves, Dale, The effects of color on brightness, in: nature neuroscience, Bd. 2(11), 1999 , S. 1010-1014, abrufbar unter: http://www.lottolab.org/pdf/publications/Lotto%20and%20Purves%20(1999).pdf (Stand: 26.04.2009).
4. Fairchild, Mark D., Color Appearance Models, Second Edition, Chichester, 2005.
5. Ohno, Yoshi, CIE Fundamentals for Color Measurements, Paper for IS and T NIP16 Conference, Vancouver, Canada, Oct. 16-20, 2000 (Final manuscript), abrufbar unter: http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/OhnoNIP16-2000.pdf (Stand: 26.04.2009).
6. Werner, John S./Pinna, Baingio/Spillmann, Lothar, Farbtäuschungen und Gehirn, in: Spektrum der Wissenschaft, August 2007, S. 32-37.
7. The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s, April 1998, abrufbar unter: http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/CIECAM97s_TC_Draft.pdf (Stand: 26.04.2009).
8. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 121.
9. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 129.
10. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 150.
11. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 151.
12. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 151.
13. Fairchild, a. a. O. (Fn. 4), S. 184.
14. Fairchild, Mark D./Johnson, Garrett M., The iCAM Framework for Image Appearance, Image Differences, and Image Quality, Journal of Electronic Imaging, 2004, abrufbar unter: http://www.cis.rit.edu/mcsl/icam/pub/JEIiCAM.pdf (Stand: 26.04.2009).
15. http://www.cis.rit.edu/mcsl/iCAM/(Stand: 26.04.2009).
16. http://platform.visiome.neuroinf.jp/modules/xoonips/detail.php?item_id=6023(Stand: 26.04.2009).