

Institut für Psychologie der Universität Regensburg

## Farbadaptation bei einem Gelblich-Bläulich-System: Prüfung einer einfachen numerischen Relation

**K.-H. Bäuml**

*Zusammenfassung:* Es werden drei Achsen im Farbraum ausgezeichnet: eine (reines) Gelb – (reines) Blau – Achse, eine (reines) Grün – Magenta – Achse und Helligkeit. Über die beiden chromatischen Achsen werden zwei lineare Gegenfarbensysteme definiert: ein Rot-Grün-System und ein Gelblich-Bläulich-System. Es wird eine numerische Relation zur Beschreibung von Farbadaptation für das Gelblich-Bläulich-System unter Adaptation an (reines) Gelb und (reines) Blau formuliert: zwei Paare von Farbreeizen – jeweils bestehend aus Test- und Adaptationsreiz – sind äquivalent in bezug auf das Gelblich-Bläulich-System gdw. die Quotienten der Gelblich-Bläulich-Koordinaten von Test- und Adaptationsreiz identisch sind. Dabei wird eine Kontrolle der Helligkeit und der Rot-Grün-Anteile vorausgesetzt. Für verschiedene (reines) Gelb- und (reines) Blauadaptationsreize wird geprüft, wie ein Testreiz, der weder gelblich noch bläulich erscheint, seine Lage auf der Geraden (reines) Gelb – (reines) Blau im Farbraum verändert. Drei Beobachter nehmen an dem Experiment teil. In Vorversuchen werden die individuellen Ebenen konstanter Helligkeit und die individuellen Gegenfarbenlinien geschätzt. Die Daten zeigen, daß die Quotienten aus den Gelblich-Bläulich-Koordinaten von Testreiz und Adaptationsreiz im wesentlichen konstant sind. Die Ergebnisse werden mit analogen Daten für das Rot-Grün-System verglichen. Die Befunde stützen die vorgenommene Auszeichnung der drei phänomenalen Achsen. Die vorgenommene Auszeichnung wird in bezug auf die Heringsche Gegenfarbentheorie und die Krauskopfschen „kardinalen“ Achsen [1982, *Vision Research*, 22, 1123 – 1131] diskutiert.

*Schlüsselwörter:* Farbwahrnehmung – Adaptation – Gegenfarbentheorie – Gelblich-Bläulich-System

*Summary:* Three axes in color space are specified: a (unique) yellow – (unique) blue axis, a (unique) green – magenta axis and brightness. Based on the two chromatic axes two linear opponent colors systems are defined: a red/green-system and a yellowish/bluish-system. A numerical relation is presented to describe color adaptation for the yellowish/bluish-system under adaptation to (unique) yellow and (unique) blue: two pairs of color stimuli are equivalent with regard to the yellowish/bluish-system – consisting of a test stimulus and an adaptation stimulus, respectively – if the ratios from the yellowish/bluish-coordinates of test stimulus and adaptation stimulus are identical. A control of brightness and the red/green-system is presupposed. For several (unique) yellow and (unique) blue adaptation stimuli it is examined how a test stimulus that appears neither yellowish nor bluish changes its location on the (unique) yellow – (unique) blue axis within color space. Three observers take part in the experiment. For each observer a plane of constant brightness and the opponent colors axes are estimated experimentally. The data show that the ratios from the yellowish/bluish coordinates of test stimulus and adaptation stimulus are essentially constant. The results are compared with analogous data for the red/green-system. The findings provide evidence for the specification of the three phenomenal axes. The specification is discussed with regard to Hering's opponent colors theory and Krauskopf's three "cardinal" axes [1982, *Vision Research*, 22, 1123 – 1131].

*Key words:* Color perception – adaptation – opponent colors theory – yellowish/bluish-system

*Korrespondenzanschrift:* Dr. K.-H. Bäuml, Universität Regensburg, Institut für Psychologie, Universitätsstraße 31, W-8400 Regensburg, Bundesrepublik Deutschland

### Fragestellung

Unter einem Farbreiz versteht man in der experimentellen Psychologie elektromagnetische Strahlung, spektral zusammengesetzt aus Wellenlängen zwischen etwa 360 und 830 nm. Unter kontrollierten Bedingungen [Wyszecki und Stiles, 1982] induzieren Farbreeizen bei einem farbtüchtigen Beobachter ganz bestimmte Farb-

erscheinungen. Z. B. induzieren kurzwellige Farbreize bläuliche, langwellige Farbreize rötliche Farberscheinungen. Die Zuordnung einer bestimmten Farberscheinung zu einem Farbreiz ist jedoch nicht fest. So kann sich die Farberscheinung eines Farbreizes bei zeitlicher oder räumlicher Darbietung eines andersfarbigen Umfeldes verändern: Betrachtet man etwa für längere Zeit eine gelbliche Wand und sieht danach auf eine vorher weiße Wand, so sieht diese bläulich aus; ähnliches läßt sich feststellen bei der räumlichen Umgebung eines weißen Farbreizes mit einem gelblichen Farbreiz. Solche Veränderungen der Farberscheinung eines Farbreizes bezeichnet man als Farbadaptation. Farbadaptation kann zu sehr drastischen Veränderungen der Farberscheinungen eines Farbreizes führen. Sie kann sogar zu Farberscheinungen führen – wie etwa Braun – die ohne sie gar nicht gesehen werden. Obwohl das Phänomen der Farbadaptation bereits sehr lange bekannt ist [Goethe, 1810], gibt es bis heute keine empirisch gültige theoretische Beschreibung dafür.

Moderne Theorien des Farbensehens gehen von (wenigstens) zwei Stufen der Verarbeitung von Farbinformation durch das visuelle System aus. Die erste Stufe ist eine Rezeptorstufe. Dabei kann es inzwischen als geklärt betrachtet werden, daß die Farbreize zunächst durch drei Rezeptortypen linear transformiert werden. Dies wird sowohl durch psychophysische als auch physiologische Befunde gestützt [Schnapf, Kraft und Baylor, 1987]. Dieser Rezeptorstufe wird eine wichtige Rolle bei der Farbadaptation zugeschrieben. Innerhalb des (linearen) v. Kriesschen Koeffizientensatzes [1905] wird sie sogar als alleinige Quelle der Farbadaptation angesetzt: Adaptation führt nur zu einer Desensitivierung der drei Rezeptortypen. Die Nichtgültigkeit des Koeffizientensatzes als einer Theorie der Farbadaptation ist inzwischen jedoch vielfach empirisch demonstriert worden [vgl. Wyszecki und Stiles, 1982]. Auch Varianten des Koeffizientensatzes, wie die Theorie von Walraven [1976], scheinen nicht zum Ziel zu führen [Shevell, 1978]. Walraven schaltet dem Koeffizientensatz einen subtraktiven Prozeß zwischen Testreiz und Adaptationsreiz auf Rezeptorebene vor. Vielen theoretischen Ansätzen zur Farbadaptation ist der Koeffizientensatz jedoch als Baustein inhärent [Jameson und Hurvich, 1972, Land, 1964]. Auf einer zweiten Stufe der Verarbeitung von Farbinformation wird angenommen, daß sich die Ausgaben der drei Rezeptortypen zu drei neuronalen Systemen verschalten. Bereits an dieser Stelle beginnen die Probleme für eine exakte Theorie des Farbensehens. Diese neuronalen Systeme werden häufig als Hering'sche Gegenfarbensysteme angesetzt: ein Rot-Grün-System, ein Gelb-Blau-System und ein Helligkeitssystem [z. B. Guth, Massof und Benzschawel, 1980]. Zwar gibt es starke Hinweise auf die Linearität des Rot-Grün-Systems und der Helligkeit. Das Gelb-Blau-System erweist sich jedoch als nichtlinear; mehr noch, bis heute konnten keinerlei interessante strukturelle Eigenschaften dieses Systems nachgewiesen werden [Elzinga und deWeert, 1984]. Ein anderes neuronales System schlagen Krauskopf, Williams und Heeley [1982] vor. Diese zeichnen als sog. kardinale Achsen im Farbraum neben der Helligkeit eine lineare Gelblich-Bläulich-Achse und eine lineare Rötlich-Grünlich-Achse aus. Hier handelt es sich um keine Gegenfarbentheorie im eigentlichen Sinne mehr, da die beiden chromatischen Achsen nicht mehr phänomenal ausgezeichnet sind. Eine Reihe von experimentellen Daten deuten auf eine wichtige Rolle einer zweiten Verarbeitungsstufe bei der Farbadaptation hin [Shevell, 1978, Larimer, 1981, Krauskopf und Mitarb., 1982]. So legen etwa die Befun-

de von Shevell und Larimer nahe, daß auf einer zweiten Stufe eine Art Gegenfarbeninduktion stattfindet: der Umfeldreiz „addiert“ sich in einer gewissen Weise zum Testreiz hinzu. Farbadaptation wird dabei auf zwei Stufen angesetzt: eine Desensitivierung auf Rezeptorstufe und eine Art Gegenfarbeninduktion auf neuronaler Stufe. Trotz der starken empirischen Hinweise auf die Beteiligung einer zweiten Stufe bei der Farbadaptation konnte das Problem der genauen Spezifikation ihrer drei Systeme im Detail noch nicht gelöst werden.

Hier wird ein neuer Vorschlag für das konkrete Aussehen der zweiten Stufe der Verarbeitung von Farbinformationen präsentiert. Der Suche nach den einzelnen Systemen dieser Stufe werden dabei zwei Restriktionen auferlegt: zum einen wird davon ausgegangen, daß sich die drei neuronalen Systeme linear aus den Ausgaben der drei Rezeptorantworten kombinieren, zum anderen, daß die drei neuronalen Systeme drei Achsen im Farbraum phänomenal auszeichnen. In einem ersten Schritt wird untersucht, wieviele Kandidaten für die zweite Stufe es unter diesen Restriktionen mit den Daten der Literatur gibt. Mit diesen Restriktionen – die man als Forderung einer linearen Gegenfarbentheorie auffassen kann (vgl. unten) – scheiden sowohl das Heringsche Gegenfarbensystem als auch der Krauskopfsche Ansatz als Kandidaten aus: Während wenigstens ein Heringsches System nichtlinear ist, sind zwei der drei Krauskopfschen Systeme nicht phänomenal ausgezeichnet. Bei diesem ersten Schritt wird sich zeigen, daß es nur einen einzigen Kandidaten für diese Stufe gibt. Auf diesem Befund aufbauend wird in einem zweiten Schritt ein neuer Vorschlag für das Aussehen der zweiten Stufe gemacht, der neben einem Rot-Grün-System und der Helligkeit ein Gelblich-Bläulich-System auszeichnet. Dieses stimmt nur noch approximativ mit dem Heringschen Gelb-Blau-System überein und weicht vor allem im rötlich-bläulichen Bereich des Farbraumes davon ab. Das Verhalten dieses Gelblich-Bläulich-Systems unter Farbadaptation wird experimentell untersucht. Daten von Cicerone und Mitarb. [1975] und Bäuml [1991] legen nahe, daß der Farbadaptation beim Rot-Grün-System unter bestimmten Adaptationsbedingungen sehr einfache Gesetzmäßigkeiten zugrundeliegen. Es wird getestet, ob sich das Gelblich-Bläulich-System unter analogen Adaptationsbedingungen identisch beschreiben läßt wie das Rot-Grün-System. Diesem Test liegt der Gedanke zugrunde, daß sich die drei Systeme einer zweiten Stufe unter Adaptation identisch verhalten. Zeigt sich beim Gelblich-Bläulich-System dieselbe Gesetzmäßigkeit wie beim Rot-Grün-System, so wird dies als Hinweis auf eine besondere Rolle dieses Systems bei der Farbinformationsverarbeitung interpretiert. Mit den Daten der Literatur wäre dann auch die vorgenommene Auszeichnung der drei phänomenalen Achsen empirisch gestützt.

## Theorie

### *Drei phänomenale Achsen im Farbraum*

Der Gedanke einer Gegenfarbentheorie geht auf Hering [1878] zurück. Hering weist auf die Möglichkeit hin, jede beliebige Farbe durch ihren Rot- bzw. Grünanteil, ihren Gelb- bzw. Blauanteil und ihre Helligkeit vollständig zu beschreiben. Die so begründeten drei Gegenfarbensysteme – das Rot-Grün-System, das Gelb-Blau-System und das Helligkeitssystem – konstituieren die Heringsche Gegenfarbentheorie. Jameson und Hurvich [1955] versuchen in Anlehnung an Hering und Brückner [1927] über die Definition sog. *Aufhebungsfunktionen* eine Quantifizierung der

beiden chromatischen Gegenfarbensysteme zu erreichen. Diese Aufhebungsfunktionen werden von Jameson und Hurvich linear angesetzt. Krantz [1975] legt offen, welche impliziten Annahmen mit einer solchen linearen Behandlung verbunden sind. Hierzu zeichnet er zwei Gleichgewichtsmengen  $A_1, A_2$  von Farbreizen aus – wobei  $A_1$  als die Menge der Farbreize interpretiert wird, die weder rot noch grün ist, und  $A_2$  als die Menge der Farbreize, die weder gelb noch blau sind – für die jeweils eine additive und eine multiplikative Abgeschlossenheit gefordert werden (dabei bezeichnet  $\oplus$  die additive Mischung von Farbreizen,  $*$  multiplikative Intensitätsveränderungen über alle Wellenlängen eines Farbreizes und  $Re^+$  die positiven reellen Zahlen):

**A1.** Wenn  $a \in A_i$  und  $t \in Re^+$ , dann  $t * a \in A_i$  ( $i = 1, 2$ ).

**A2.** Wenn  $a \in A_i$ , dann  $b \in A_i$  gdw.  $a \oplus b \in A_i$  ( $i = 1, 2$ ).

Krantz zeigt, daß die empirische Gültigkeit dieser beiden Axiome die Auszeichnung zweier phänomenaler Geraden im Farbraum gewährleistet, aus denen sich dann ein lineares Rot-Grün-System und ein lineares Gelb-Blau-System definieren lassen. Interpretiert man die Mengen  $A_1, A_2$  wie in der Heringschen Gegenfarbentheorie über das Nichtvorliegen bestimmter Farbanteile – wie etwa weder rot noch grün bzw. weder gelb noch blau – so ist die Heringsche Gegenfarbentheorie eindeutig ausgezeichnet [Krantz, 1975]. Betrachtet man z. B. als Gleichgewichtsmenge die Farbreize, die weder blaugrün noch orange sind, so läßt sich leicht demonstrieren, daß diese Menge keine Ebene im Farbraum auszeichnet, sondern von dreidimensionaler Mannigfaltigkeit ist. Gleichgewichtsmengen lassen sich aber auch direkt über Farbtöne identifizieren. So kann man in der Heringschen Theorie  $A_1$  als die Menge der Farbreize interpretieren, die entweder (rein) gelb oder (rein) blau oder achromatisch sind,  $A_2$  als die Menge, die entweder (rein) grün oder (rein) rot oder achromatisch sind. Zeichnet man die Gleichgewichtsmengen in dieser Weise über Farbtöne aus, so ist die Heringsche Gegenfarbentheorie keineswegs mehr eindeutig fixiert. Die Mengen lassen sich dann auch über nicht-Heringsche Farbtöne identifizieren. Stellt etwa  $A_1$  die Menge (bestimmter) orangener und (bestimmter) türkiser Farbreize,  $A_2$  die Menge (bestimmter) gelbgrüner und (bestimmter) purpurner Farbreize dar, so lassen sich über diese beiden Mengen bei Gültigkeit der Abgeschlossenheitseigenschaften zwei Geraden im Farbraum phänomenal auszeichnen. Die nun definierbaren Gegenfarbensysteme werden im Gegensatz zum Heringschen System im allgemeinen allerdings nicht mehr einfach interpretierbar sein. *A priori* gibt es aber keinen Grund, warum die Farbsysteme einer neuronalen Stufe einfach interpretierbar sein sollten.

Mit dieser Betrachtungsweise erfordert die Formulierung einer linearen Gegenfarbentheorie die Auszeichnung von vier unterschiedlichen Mengen von Farbreizen  $B_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ). Diese Mengen müssen zwei Bedingungen erfüllen: *i.* die Farbreize in jeder dieser Mengen müssen identischen Farbton besitzen; *ii.* jede dieser Mengen muß einen Farbton vollständig repräsentieren. Die beiden Gleichgewichtsmengen  $A_1, A_2$  lassen sich dann im wesentlichen als Vereinigung von je zwei dieser Mengen definieren. Formal betrachtet: Es wird eine zweistellige Äquivalenzrelation  $\sim_F$  auf der Menge der Farbreize  $A$  definiert. Bei Interpretation von  $\sim_F$  als empirischer Farbtongleichheit repräsentieren die einzelnen Äquivalenzklassen so die einzelnen

Farbtöne. Es werden beliebig vier Äquivalenzklassen  $B_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) ausgewählt. Unter Hinzunahme der Äquivalenzklasse der achromatischen Farbreize  $W$  lassen sich dann die beiden Gleichgewichtsmengen definieren über  $A_1 = B_1 \cup B_2 \cup W$  und  $A_2 = B_3 \cup B_4 \cup W$ . Erfüllen die so festgelegten Gleichgewichtsmengen die kritischen Axiome der additiven und multiplikativen Abgeschlossenheit, so liegt eine empirisch gültige lineare Gegenfarbentheorie vor. Für eine vollständige Gegenfarbentheorie wird die Auszeichnung noch einer weiteren Achse, Helligkeit, gefordert [Krantz, 1975].

Die Abgeschlossenheitsaxiome implizieren für jede der vier Mengen  $B_j$  von Farbreizen die Abney-(Farbton)-Invarianz und die Bezold-Brücke-Invarianz. Dabei ist ein Farbreiz genau dann Abney-invariant, wenn der Farbton dieses Farbreizes invariant ist gegenüber dem spektralen Hinzumischen achromatischen Lichts; d. h.  $a \sim_{Fa} t * w$  (wobei  $w$  einen achromatischen Farbreiz darstellt). Ein Farbreiz ist Bezold-Brücke-invariant genau dann, wenn der Farbton dieses Farbreizes invariant ist gegenüber Intensitätsveränderungen des Farbreizes; d. h.  $a \sim_{Ft} * a$ . Die Lösung des Problems der Formulierbarkeit einer linearen Gegenfarbentheorie ist somit eng an das Auffinden der Bezold-Brücke- und Abney-Invarianten im Farbraum gebunden. Die Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen demonstrieren, daß (reines) Grün, (reines) Gelb und (reines) Blau Bezold-Brücke-Invarianten sind [z. B. Larimer, Krantz und Cicerone, 1974, 1975, Nagy, 1979]. Darüber hinaus scheint es mit einem bläulichen Rot – Magenta – nur noch eine weitere, nichtspektrale Invariante zu geben [Purdy, 1931]. (Reines) Gelb, (reines) Grün und (reines) Rot sind Abney-invariant, (reines) Blau zumindest ab etwa 40 Trolands [Larimer und Mitarb., 1974, 1975, Burns, Elsner, Pokorny und Smith, 1984]. Weitere spektrale Invariante scheint es nicht zu geben [Purdy, 1931].

Mit diesen empirischen Befunden kann es maximal eine empirisch gültige lineare Gegenfarbentheorie geben. Gelb und Blau sind Bezold-Brücke-invariant und erfüllen die additive Abgeschlossenheit. Identifiziert man somit  $A_1$  als die Menge der (rein) gelben, (rein) blauen und achromatischen Farbreize, so läßt sich daraus ein lineares chromatisches System ( $\emptyset_1$ ) definieren. Dieses kann als (Heringsches) Rot-Grün-System interpretiert werden.  $A_2$  wird als die Menge der (rein) grünen, magentanen und achromatischen Farbreize identifiziert. Grün und Magenta sind Bezold-Brücke-invariant. Nimmt man zudem ihre additive Abgeschlossenheit an – d. h. für beliebige grüne und magentane Farbreize gilt, daß ihre additive Mischung grün, magenta oder achromatisch ist – so läßt sich aus  $A_2$  ein lineares chromatisches System ( $\emptyset_2$ ) definieren. Dieses System nenne ich Gelblich-Bläulich-System, da es nicht allzusehr vom Heringschen Gelb-Blau-System abweicht. Die Abweichung vom Gelb-Blau-System betrifft vor allem den bläulich-rötlichen Bereich des Farbraumes. Als drittes lineares System ( $\emptyset_3$ ) wird die Helligkeit ausgezeichnet. Damit liegt eine vollständige lineare Gegenfarbentheorie vor.

### *Farbadaptation beim Gelblich-Bläulich-System*

Das Rot-Grün-System ist unter Adaptation vielfach untersucht. Dabei zeigt sich, daß Farbadaptation bei diesem System im allgemeinen nichtlinear ist [Shevell, 1978, Larimer, 1981]. Jedoch gibt es starke Hinweise darauf, daß sich das Rot-Grün-System unter bestimmten Adaptationsbedingungen linear verhält. So zeigen

Cicerone, Krantz und Larimer [1975] die Linearität des Systems bei Adaptation an (reines) Gelb, (reines) Blau und (reines) Grün. Bäuml [1991] erweitert diesen Befund auf Magenta und prüft für Grün- und Magentaadaptation, wie ein Testreiz, der weder rot noch grün erscheint, seine Lage auf der Achse Grün-Magenta im Farbraum verändert. Die Daten zeigen, daß die Quotienten der Rot-Grün-Koordinaten von Test- und Adaptationsreiz im wesentlichen konstant sind. Dabei ist das Gelblich-Bläulich-System kontrolliert, ebenso die Helligkeit.

Das Gelblich-Bläulich-System ist unter Farbadaptation noch nicht untersucht. Hier soll die von Bäuml für das Rot-Grün-System gefundene Beziehung analog für das Gelblich-Bläulich-System geprüft werden. Es wird somit untersucht, ob bei Adaptation an (reines) Gelb und (reines) Blau ein Testreiz, der weder gelblich noch bläulich erscheint, seine Lage auf der Achse Gelb-Blau im Farbraum so verändert, daß die Quotienten der Gelblich-Bläulich-Koordinaten von Test- und Adaptationsreiz im wesentlichen konstant sind. Dabei ist das Rot-Grün-System kontrolliert, ebenso die Helligkeit. (Für eine formale Darstellung dieser Relation und einigen logischen Folgerungen daraus vgl. Bäuml, 1991). Unter Annahme, daß für die drei identifizierten Systeme unter Adaptation dieselben Gesetzmäßigkeiten gelten, würde die Gültigkeit obiger Beziehung beim Gelblich-Bläulich-System die vorgenommene Spezifikation dieses Systems stützen.

## Methoden

### 1. Versuchspersonen

An dem Experiment nehmen zwei Psychologiestudenten und der Autor selbst teil. Jeder der Beobachter nimmt an insgesamt 40 Sitzungen teil. Die ersten Sitzungen dienen dabei dem Vertrautwerden mit der Experimentalanordnung und dem Erreichen eines gewissen – bei Farbwahrnehmungsexperimenten notwendigen – Trainingsniveaus. Die Experimente erstrecken sich für jeden Beobachter insgesamt etwa über sechs Wochen. Der Autor selbst hat zu Beginn der Experimente bereits etwa 50 Sitzungen vorausgehendes Training hinter sich.

### 2. Generierung der Farbreize

Die Farbreize werden auf einem Farbmonitor (BARCO CDCT 51/3) generiert. Dieser ist an eine spezielle Graphikkarte (MATROX PIP 1024) angeschlossen und wird von einem Rechner aus gesteuert. Die erzeugbaren Farben entstehen dabei aus einer additiven Mischung der drei Bildschirmprimärfarben. Die Koordinaten dieser Bildschirmprimärfarben innerhalb des CIE- $xy$ -Diagramms [Wyszecki und Stiles, 1982] lauten: Bildschirmrot  $x = .634$ ,  $y = .340$ , Bildschirmgrün  $x = .303$ ,  $y = .613$ , Bildschirmblau  $x = .153$ ,  $y = .061$ . Die Farben werden über „Look-up“-Tabellen kontrolliert. Die den drei Bildschirmprimärfarben entsprechenden Farbkanäle des Monitors können unabhängig voneinander angesteuert werden. Der Bereich von minimaler zu maximaler Steuerspannung pro Farbkanal läßt sich dabei in 256 Stufen auflösen. Eine solche Auflösung reicht für eine subjektiv kontinuierliche Farbveränderung gut aus. Die Farbkanäle sind so normiert, daß sich bei gleichzeitiger Vollaussteuerung aller drei Kanäle ein genormtes Weiß ergibt. Die Koordinaten der drei Farbkanäle werden als R-, G- und B-Koordinaten bezeichnet. Diese Koordina-

ten lassen sich mittels einer Lineartransformation in die üblicheren XYZ-Koordinaten des CIE-Systems umrechnen [Wyszecki und Stiles, 1982]. Hier werden die Farbreize stets innerhalb des CIE-Koordinatensystems oder innerhalb individueller Gegenfarbenkoordinatensysteme beschrieben und nicht innerhalb des RGB-Koordinatensystems. Dieses wird nur programmintern zur Steuerung der Experimente verwendet [Bäuml, 1989].

### 3. Vorversuch 1

Zur Kontrolle der Helligkeit der Farbreize gilt es, innerhalb des Farbraumes Flächen konstanter Helligkeit auszuzeichnen. Dabei wird Helligkeit nicht mit Leuchtdichte gleichgesetzt. Mit der Linearität der Helligkeit stellen Flächen konstanter Helligkeit im Farbraum Ebenen dar. Ebenen sind eindeutig durch drei Punkte festgelegt. Zum Auffinden einer bestimmten Ebene konstanter Helligkeit werden so nur die Leuchtdichtewerte dreier Farbreize benötigt, die gleich hell sind. Es wird ein Flimmerverschmelzungsexperiment durchgeführt. Als Standardreiz wird der innerhalb des CIE- $xy$ -Diagramms festgelegte Weißpunkt ( $x = 1/3$ ,  $y = 1/3$ ) mit  $25 \text{ cd/m}^2$  gewählt. Vergleichsreize bilden die drei Bildschirmprimärreize. Mit hoher Frequenz wird jeder der drei Vergleichsreize abwechselnd mit dem Standardreiz präsentiert. Dadurch entsteht der Eindruck einer flimmernden Farbe. Der Beobachter kann durch Regelung der Leuchtdichte des Vergleichsreizes das Flimmern zum Verschwinden bringen. Die Leuchtdichten der beiden Reize werden dann als gleich hell festgelegt. Es wird eine Herstellungsmethode verwendet. 3 s nach dem Einstellen eines kontinuierlich dargebotenen Reizes wird der nächste Reiz präsentiert. Die Reize sind scheibenförmig mit  $6^\circ$  Sehwinkel. Die Versuchssituation ist monokular. Vor Beginn des Experiments findet eine Dunkeladaptation von 7 min statt. Pro Sitzung werden alle drei Vergleichsreize viermal in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Das arithmetische Mittel für die vier eingestellten Leuchtdichten gleicher Helligkeit bildet den Schätzwert. Diese Daten werden dann sowohl für den zweiten Vorversuch als auch für das Hauptexperiment verwendet.

Tabelle I zeigt die Ergebnisse. Es zeigt sich für alle drei Beobachter im wesentlichen derselbe Befund. Für gleiche Helligkeit wird für Bildschirmblau (B) weniger Leuchtdichte benötigt als für Bildschirmweiß, für Bildschirmgrün (G) etwas mehr Leuchtdichte als für Bildschirmweiß, während für Bildschirmrot (R) und Bildschirmweiß Leuchtdichte und Helligkeit nahezu zusammenfallen. Die Ebene konstanter Helligkeit liegt also nicht parallel zu einer Ebene konstanter Leuchtdichte.

Tab. I Geschätzte Leuchtdichten für die drei Primärreize des Bildschirmmonitors (R, G, B), so daß sie gleich hell wie ein Bildschirmweiß mit einer Leuchtdichte von  $25 \text{ cd/m}^2$  sind

Beob.	B	G	R
KHB	22.044	25.329	23.089
FG	22.145	26.127	24.821
AI	23.033	25.934	24.892

#### 4. Vorversuch 2

Für jeden Beobachter werden über eine Schätzung der Farbtonlinien für Gelb, Grün und Blau die beiden Gegenfarbenlinien bestimmt. Auf eine entsprechende Schätzung für Magenta wird verzichtet, da diese Aufgabe vermutlich ein Farbton-„matching“ erfordern würde. Dies wäre jedoch mit einem ausgesprochen hohen Trainingsaufwand verbunden [Purdy, 1931], so daß eine Behelfslösung verwendet wird. Dabei wird die Null-Linie für das Gelblich-Bläulich-System allein aus den Schätzungen für Grün bestimmt. Die Schätzung der Null-Linie für das Rot-Grün-System erfolgt aus den Schätzungen für Gelb und Blau.

Das Experiment findet für jeden Beobachter auf der im ersten Vorversuch geschätzten Ebene konstanter Helligkeit statt. Die Schätzungen für Grün werden auf jeweils vier unterschiedlichen Sättigungsstufen erhoben, die für Gelb und Blau auf jeweils zwei unterschiedlichen Sättigungsstufen (bei Beobachter KHB ebenfalls auf vier Stufen). Dabei hat der Beobachter für Grün zu entscheiden, ob die präsentierten Farbreize noch Gelb- und Blauanteile beinhalten, für Gelb und Blau, ob sie noch Grün- oder Rotanteile beinhalten. Das Experiment wird unter Verwendung von Polarkoordinaten programmiert mit Nullpunkt ( $x = 1/3, y = 1/3$ ) innerhalb des  $xy$ -Diagramms. Der Abstand vom Nullpunkt (Radius) stellt dabei in grober Näherung die Sättigung, der Winkel in grober Näherung den Farbton dar. Die jeweiligen Sättigungsstufen werden als Kreise um den Nullpunkt mit verschiedenen großen Abständen von diesem operationalisiert. Für eine bestimmte Gleichgewichtsfarbe bewegt sich der Beobachter mittels Tastenbetätigung dann in Abhängigkeit seiner Antworten auf diesen Kreisen. Dies ist gewährleistet durch den Umstand, daß alle vom Computer für diese Versuchssituation angebotenen Reize auf einem solchen Kreis liegen. Es wird das von Falmagne [1985] empfohlene adaptive Verfahren angewandt. Der Schinkel des Testreizes beträgt etwa  $2^\circ$ . Der Hintergrund ist dunkel. Die Versuchssituation ist monokular unter Verwendung desselben Auges wie im ersten Vorversuch. Es wird kein Fixationspunkt verwendet. Das Experiment beginnt mit 7 min Dunkeladaptation. Anschließend wird in periodischen Abständen jeweils für 1 s der Farbreiz präsentiert, gefolgt von 12 s Dunkelheit. 3 s vor Reizpräsentation kündigt ein akustisches Signal diesen an. Pro Sitzung werden Daten für nur eine Gleichgewichtsfarbe erhoben. Pro Sättigungsstufe werden wenigstens sechs Erhebungen gemacht.

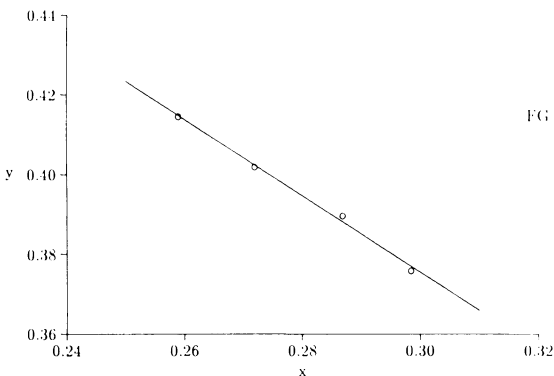


Abb. 1. Koordinatenpaare für Gleichgewichtsgrün innerhalb des  $xy$ -Diagramms mit Geradenanpassung über Kleinste-Quadrate-Methode für Beobachter FR

Tabelle II zeigt die  $xy$ -Koordinaten der für jeden Beobachter geschätzten Gleichgewichtsfarben. Abbildung 1 zeigt die geschätzten  $xy$ -Werte für Grün an einem Beobachter mit einer Geradenanpassung durch Kleinste-Quadrate-Methode. Für alle drei Beobachter läßt sich die Lage der Grünpunkte gut durch eine lineare Funktion beschreiben. Diese Daten bekräftigen die Abney-Invarianz von Grün. Dies steht im Einklang mit den meisten Befunden hierzu in der Literatur (vgl. oben).

Tab. II Geschätzte  $xy$ -Koordinaten der Beobachter für Blau, Gelb und Grün

Beob.	Blau		Gelb		Grün	
	x	y	x	y	x	y
KHB	0.225	0.215	0.345	0.423	0.264	0.419
	0.239	0.244	0.363	0.450	0.271	0.401
	0.259	0.267	0.375	0.477	0.290	0.392
	0.274	0.296	0.393	0.503	0.297	0.375
FG					0.259	0.414
	0.221	0.234	0.364	0.449	0.272	0.402
	0.238	0.260	0.370	0.479	0.287	0.390
					0.298	0.376
AI					0.249	0.403
	0.207	0.252	0.366	0.449	0.268	0.398
	0.228	0.275	0.367	0.479	0.288	0.390
					0.313	0.385

### 5. Experiment zur Prüfung der Quotientenrelation

Für jeden Beobachter wird folgende Normierung der chromatischen Achsen vorgenommen: das gesättigste Gelb erhält den  $\varnothing_2$ -Wert 1, das gesättigste Magenta den  $\varnothing_1$ -Wert 1. Zur Isolierung des Gelblich-Bläulich-Systems wird im Farbraum auf der geschätzten Ebene konstanter Helligkeit eine Bewegung auf der Gelb-Blau-Achse vollzogen. Für unterschiedliche Gelb- und Blauadaptationsvektoren wird die Lage des Gleichgewichtsvektors auf der Geraden Gelb-Blau geprüft. Vier Adaptationsvektoren werden für jeden der beiden Farbtöne ausgewählt. Dabei besteht der erste aus dem Vektor mit dem für diesen Farbton maximalen Farbanteil (z. B. für Gelb, wegen der Normierung, der Vektor mit dem  $\varnothing_2$ -Wert 1), der zweite aus dem Vektor mit  $3/4$  dieses maximalen Farbanteils, der dritte aus dem Vektor mit der Hälfte etc. Für jede dieser insgesamt acht Adaptationsbedingungen wird durch Bewegung auf der Gelb-Blau-Achse ein Vektor gesucht, der in bezug auf das Gelblich-Bläulich-System im Gleichgewicht ist. Dies ist nicht einfach realisierbar. Den präsentierten Vektoren könnten hierfür Heringsche Gelb- und Blauanteile zugeordnet werden, falls bei Gelb- und Blauadaptation von Gelb und Blau niemals Rotanteile auftreten. Dies trifft im allgemeinen leider nicht zu [Cicerone und Mitarb. 1975]. Allerdings zeigen die Daten von Cicerone et al., daß bei der Suche des Gleichgewichtsvektors stets nur mit sehr kleinen Rotanteilen zu rechnen ist. Da man im vorliegenden Experiment von Schätzfehlern in bezug auf die Grün-Magenta-Achse

ausgehen muß (vgl. oben), die Rotanteile bei den Adaptationsbedingungen zudem nur gering ausfallen sollten, wird aus Einfachheitsgründen der Vektor gesucht, der weder gelb noch blau ist. Damit kann ein aufwendiges Farbton- „matching“ umgangen werden.

Der Ablauf des Experiments wird in den Gegenfarbenkoordinaten der Beobachter programmiert. Der Beobachter bewegt sich mittels Tastenbetätigung in Abhängigkeit seiner Antworten auf der Gelb-Blau-Achse. Dies wird dadurch gewährleistet, daß vom Computer nur Reize präsentiert werden, die auf dieser Geraden liegen. Es wird wiederum das adaptive Verfahren von Falmagne [1985] angewandt. Der Sehwinkel des Testreizes beträgt  $2^\circ$ , der des Adaptationsreizes  $6^\circ$ . Es wird kein Fixationspunkt verwendet. Der Hintergrund ist dunkel. Alle Beobachter verwenden wiederum dasselbe Auge wie in den beiden Vorversuchen. Das Experiment beginnt mit 7 min Dunkeladaptation und anschließenden 7 min Farbadaptation. Nach diesen 14 min wird die Adaptation für 1 s unterbrochen. Während dieser Zeit wird der Testreiz präsentiert. Danach erscheint sofort wieder der Adaptationsreiz für 20 s. Das Experiment läuft in einem solchen 21-s-Zyklus fort: 20 s Adaptation gefolgt von 1 s Testreizpräsentation. Jeweils 3 s vor Präsentation des Testreizes kündigt ein akustisches Signal diesen an. In jeder Sitzung wird nur ein Adaptationsreiz verwendet. Es werden zwei verschachtelte adaptive Verfahren durchlaufen, die sich im gegensätzlichen Farbanteil des ersten Testreizes unterscheiden. Die Versuchspersonen führen das Experiment zuerst für Gelb und anschließend für Blau durch. Für jede der Adaptationsbedingungen werden wenigstens vier Erhebungen gemacht, so daß für jeden Beobachter wenigstens 16 Sitzungen resultieren. Die Schätzungen aus den einzelnen adaptiven Verfahren werden arithmetisch gemittelt. Die Programme zur Versuchssteuerung wurden unter Verwendung der Bibliothek PXL [Irtel, 1989] erstellt.

## Ergebnisse

Tabelle III beinhaltet die Gelblich-Bläulich-Koordinaten der Test- und Adaptationsvektoren, die für die drei Beobachter unter Gelb- und Blauadaptation in bezug auf das Gelblich-Bläulich-System im Gleichgewicht sind. Die Koordinierung ist in den individuellen Gegenfarbensystemen der Beobachter vorgenommen. Unter neutraler Adaptation ist der (Test-) Vektor mit der  $\varnothing_2$ -Koordinate 0 der Gleichgewichtsvektor. Unter Adaptation zeigen sich teilweise drastische Verschiebungen des Gleichgewichtsvektors für beide Adaptationsfarbtöne. Die Verschiebungen erfolgen in der erwarteten Richtung: der Gleichgewichtsvektor verändert seine Lage in Richtung des Adaptationsvektors. Sie fallen umso stärker aus, je größer der (absolute) Koordinatenwert des Adaptationsvektors ist. Für den größten verwendeten Gelb-Adaptationskoordinatenwert ( $\varnothing_2$ -Koordinate 1) etwa verändert der Gleichgewichtsvektor bei zwei Beobachtern (KHB, FG) seine Position von der Koordinate 0 bis etwa zur Koordinate .55, bei einem Beobachter (AI) bis zur Koordinate .75. Der frühere Gelbbereich von 0 bis .55 bzw. .75 ist nun blau, während der Gelbbereich unter dieser Adaptationsbedingung erst ab diesen Koordinaten beginnt. Entsprechendes gilt für den größten verwendeten Blau-Adaptationskoordinatenwert (für die Koordinatenwerte der Adaptationsvektoren vgl. Tab. III). Es ergeben sich Verschiebungen des Gleichgewichtsvektors von der Koordinate 0 bis zwischen  $-1.06$

und  $-1.27$ . Dies bedingt eine entsprechende Erweiterung des Gelbbereichs, während der Blaubereich erst ab diesen Koordinaten beginnt. Es zeigen sich für alle drei Beobachter im wesentlichen dieselben Charakteristika.

Tab. III. Koordinatenpaare, die unter Gelb- und Blau- Adaptation im Gleichgewicht sind (AV: Koordinate des Adaptationsvektors, TV: Koordinate des Testvektors; (Angabe in den  $\varnothing_2$ -Koordinaten der einzelnen Beobachter)

Beob.	Gelb AV	TV	Blau AV	TV
KHB	1.000	0.520	-1.516	-1.268
	0.750	0.385	-1.137	-0.953
	0.500	0.246	-0.785	-0.636
	0.250	0.112	-0.379	-0.315
FG	1.000	0.584	-1.232	-1.132
	0.750	0.401	-0.924	-0.848
	0.500	0.283	-0.616	-0.575
	0.250	0.096	-0.308	-0.346
AI	1.000	0.754	-1.030	-1.056
	0.750	0.604	-0.772	-0.826
	0.500	0.354	-0.515	-0.562
	0.250	0.151	-0.257	-0.342

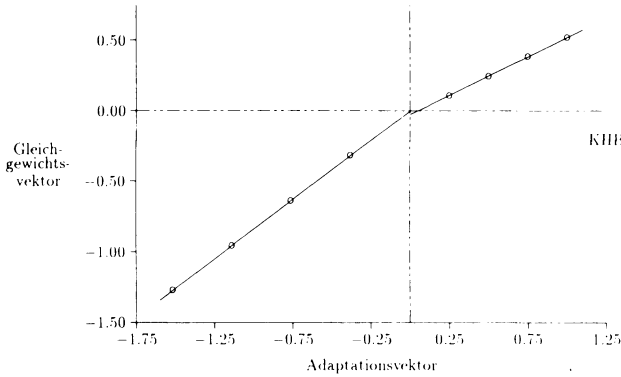


Abb. 2a. Abhängigkeit der Koordinate der Gleichgewichts(test-)vektoren von den Adaptationsvektoren bei Gelb- und Blauadaptation mit angepassten linearen Funktionen für Beobachter KHB

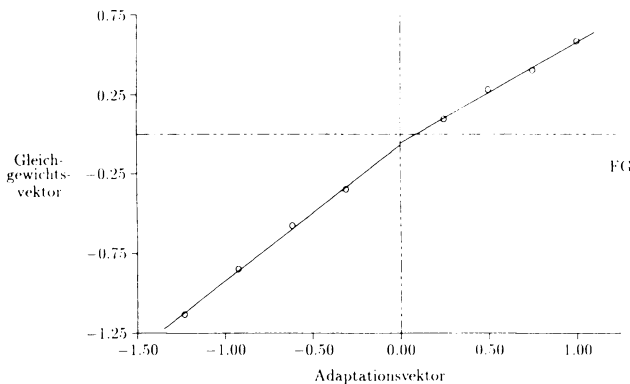


Abb. 2b. Abhängigkeit der Koordinate der Gleichgewichts(test-)vektoren von den Adaptationsvektoren bei Gelb- und Blauadaptation mit angepassten linearen Funktionen für Beobachter FG

Abbildung 2 zeigt graphisch die Abhängigkeit der Gelblich-Bläulich-Koordinaten der Gleichgewichtsvektoren von den Gelblich-Bläulich-Koordinaten der Adaptationsvektoren für Gelb- und Blauadaptation für jeweils zwei Beobachter. Sowohl für Gelb als auch für Blau können die Koordinatenpaare aller drei Beobachter durch lineare Funktionen beschrieben werden. Für einen Beobachter (KHB) verlaufen die Geraden nahezu perfekt durch den Ursprung und demonstrieren so die Quotientenrelation. Für zwei Beobachter (FG, AI) ergeben sich leichte Verschiebungen der Schnittpunkte der Geraden. Diese Daten sind als leichte systematische Abweichungen von der Quotientenrelation zu betrachten. Die Standardabweichungen fallen allgemein sehr gering aus, was auf die Reliabilität der Daten hinweist. Die Größe der Standardabweichungen ist dabei jedoch sowohl durch die nichteuklidische Metrik des Farbraums als auch durch eine mögliche Veränderung der Metrik in Abhängigkeit des Adaptationszustandes mitbestimmt.

Tabelle IV beinhaltet die Geradengleichungen für Gelb und Blau. Für alle drei Beobachter zeigt sich ein stärkerer Anstieg der Geraden für Blau gegenüber der für Gelb. Der Gleichgewichtsvektor erhält durch Blau eine deutlich stärkere Verschiebung als durch Gelb. Adaptationen an Blau hat also eine stärkere Wirkung.

Tab. IV Geradengleichungen für den funktionalen Zusammenhang zwischen den Koordinaten der Test- und Adaptationsvektoren des Gelblich-Bläulich-Systems bei Gelb- und Blauadaptation:  $\varnothing_{2T} = a + b\varnothing_{2A}$  (T: Testvektor, A: Adaptationsvektor)

Beob.	Gelb		Blau	
	a	b	a	b
KHB	-.025	.546	.001	.838
FG	-0.55	.634	-.067	.854
AI	-.049	.824	-.093	.939

## Diskussion

Über die phänomenale Auszeichnung dreier Achsen im Farbraum werden ein Rot-Grün-System, ein Gelblich-Bläulich-System und ein Helligkeitssystem definiert. Diese Farbsysteme werden als Linearkombinationen aus den Ausgaben der drei Rezeptortypen angesetzt. Sie können somit als Vorschlag für die drei neuronalen Systeme einer zweiten Stufe der Verarbeitung von Farbinformation aufgefaßt werden. Während verschiedene empirische Befunde die Existenz eines linearen Rot-Grün-Systems und eines linearen Helligkeitssystems nahelegen, ist die Annahme des definierten linearen Gelblich-Bläulich-Systems neu. Hier wird untersucht, ob die Auszeichnung dieses Systems farbtheoretisch von Interesse ist. Dies wird dann unterstellt, falls sich das Gelblich-Bläulich-System unter Adaptation identisch verhält wie das Rot-Grün-System. Bäuml [1991] zeigt, daß das Rot-Grün-System bei Adaptation an (reines) Grün und an Magenta einer einfachen Quotientenrelation genügt: Für verschiedene Adaptationsbedingungen erweist sich der Quotient aus den Rot-Grün-Koordinaten von Test- und Adaptationsreiz im wesentlichen als konstant. Mit diesen Adaptationsbedingungen ist das Gelblich-Bläulich-System kontrolliert. Hier wird analog das Gelblich-Bläulich-System bei Adaptation an (rei-

nes) Gelb und (reines) Blau geprüft. Mit diesen Adaptationsbedingungen ist das Rot-Grün-System kontrolliert. Adaptation sowohl an Gelb als auch an Blau bedingt beträchtliche Verschiebungen des Gleichgewichtsvektors in Richtung des Adaptationsvektors. Zumindest approximativ kann die funktionale Abhängigkeit der Gelblich-Bläulich-Koordinate des Gleichgewichtsvektors von der des Adaptationsvektors dabei durch eine Gerade durch den Ursprung beschrieben werden. Diese funktionale Beziehung ist äquivalent zur geforderten Quotientenbeziehung: Farbadaptation läßt sich durch eine einfache Relativierung der Gelblich-Bläulich-Koordinate des Testreizes durch die Gelblich-Bläulich-Koordinate des Adaptationsreizes ansetzen. Die der Farbadaptation zugrundeliegende Transformation ist somit durch einen einzigen, fixierten Koeffizienten bestimmt. Bei zwei Beobachtern ergeben sich leichte Abweichungen von der Quotientenrelation, indem die Gerade nicht exakt durch den Ursprung des Koordinatensystems verläuft. Die Abweichungen zeigen sich jedoch bei den beiden weniger trainierten Beobachtern. Die Verstöße sind somit möglicherweise durch Schätzfehler bei der Grün-Magenta-Achse bedingt, die nur aus Grün-Punkten geschätzt wird.

Die Adaptation an Gelb und Blau kann beim Gelblich-Bläulich-System somit identisch beschrieben werden wie die Adaptation an Grün und Magenta beim Rot-Grün-System. Die Ergebnisse fallen zumindest approximativ identisch aus zu den von Bäuml [1991] gefundenen für das Rot-Grün-System. Dieser Befund weist darauf hin, daß die Auszeichnung des Gelblich-Bläulich-Systems farbtheoretisch interessant ist. Cicerone und Mitarb. [1975] finden zudem eine Linearität des Rot-Grün-Systems bei Adaptation an Gelb und Blau. Setzt man wieder für ein theoretisches Interesse am Gelblich-Bläulich-System voraus, daß das Rot-Grün-System und das Gelblich-Bläulich-System unter Adaptation identisch beschreibbar sein sollten, so sollte das Gelblich-Bläulich-System analog bei Adaptation an Grün und Magenta linear sein. Für Grünadaptation geben die Daten von Cicerone und Mitarb. [1975] in der Tat Hinweise auf eine Linearität: sie finden eine Bezold-Brücke- und Abney-Invarianz von Grün bei Adaptation an Grün; dies ist eine logische Folgerung aus der angenommenen Linearität. Bei Adaptation an Magenta ist das Gelblich-Bläulich-System bis heute noch nicht empirisch geprüft. Sind die drei ausgezeichneten Gegenfarbensysteme identisch beschreibbar, so sollten sich analoge Befunde wie für das Rot-Grün-System und das Gelblich-Bläulich-System auch beim Helligkeitssystem zeigen. Die hier geprüfte Quotientenrelation ist jedoch bis heute noch nicht für das Helligkeitssystem untersucht worden. Allerdings ist eine logische Folgerung aus dieser Beziehung bereits getestet worden: die Relation impliziert, daß ein achromatisches Farbreizpaar seine Helligkeit nicht verändert, falls beide Farbreize identisch multiplikativ in ihrer Intensität verändert werden [Bäuml. 1991]. Heinemann [1955] zeigt, daß dies in der Tat über beträchtliche Bereiche gilt. Es sei jedoch auf ein experimentelles Problem beim Helligkeitssystem hingewiesen. In bezug auf das Helligkeitssystem können keine monokularen Experimente durchgeführt werden wie für die beiden chromatischen Systeme. Stattdessen ist ein „cross-context-matching“ nötig; dabei werden in den beiden Augen eines Beobachters unterschiedliche Adaptationszustände induziert. Hierbei können jedoch leicht Interaktionen zwischen den beiden Augen auftreten [Shevell und Humanski, 1984, Humanski und Shevell, 1985]. Daten zum Helligkeitssystem lassen sich aktuell also nicht so einfach mit denen für die beiden chromatischen Systeme vergleichen.

Mit den vorliegenden Daten gibt es einen weiteren Kandidaten für eine zweite Verarbeitungsstufe von Farbinformation. Dabei ist eine Stufe spezifiziert, die linear und zudem phänomenal ausgezeichnet ist. Die Heringsche Gegenfarbentheorie ist zwar phänomenal ausgezeichnet, beinhaltet mit dem Gelb-Blau-System jedoch ein nichtlineares System. Der Krauskopfsche Vorschlag ist zwar linear, führt aber mit den beiden chromatischen Achsen zu keinen phänomenal auszuzeichnenden Achsen. Die hier präsentierte Stufe scheint sich ferner dadurch auszuzeichnen, daß sich die drei spezifizierten Systeme – sowohl bei neutraler als auch bei nicht-neutraler Adaptation – identisch beschreiben lassen. Auch diese Eigenschaft wird von der Heringschen Theorie nicht erfüllt. Sie wird jedoch von der Krauskopfschen Theorie erfüllt. *A priori* gibt es natürlich keinen Grund, warum auch nur eine der formulierten Anforderungen an die einzelnen System einer zweiten Stufe erfüllt sein sollten. Setzt man jedoch mit diesen Annahmen an, so zeigt sich, daß eine ganze Reihe von Datensätzen, insbesondere zur Farbadaptation, sehr einfach beschreibbar werden. Dies zeigt sich sowohl beim Krauskopfschen Ansatz als auch beim hier vorliegenden, nicht jedoch beim Heringschen Ansatz.

Sowohl der Krauskopfsche Ansatz als auch der vorliegende lenken die Aufmerksamkeit auf die zweite Stufe der Verarbeitung von Farbinformation. Das theoretische Dilemma besteht darin, daß die spezifischen chromatischen Systeme der beiden Ansätze nicht identisch sind. So unterscheidet sich vor allem die Krauskopfsche Gelblich-Bläulich-Achse sehr deutlich von der hier spezifizierten Gelb-Blau-Achse, während der Unterschied zwischen der Krauskopfschen Rot-Grün-Achse und der hier spezifizierten Grün-Magenta-Achse eher gering ausfällt. Die Lösung dieses Problems ist aktuell offen. *A priori* muß zwischen den beiden Auszeichnungen jedoch kein Widerspruch bestehen. So könnte eine mögliche Auflösung darin bestehen, daß für unterschiedliche psychologische Relationen unterschiedliche Achsen im Farbraum von Bedeutung sind: die Krauskopfschen Daten beruhen auf Schwellenmessungen, während die vorliegenden und etwa die von Cicerone et al. erhobene Daten auf bestimmten Attributen von Farbreeizen beruhen. sollte sich dieser Verdacht in weiteren Untersuchungen bestätigen, so käme dies der Vorstellung einer einfachen Theorie der Farbwahrnehmung allerdings wenig entgegen.

Es zeigt sich noch ein weiteres interessantes Ergebnis in den Experimenten. Die Daten geben einen tendentiellen Hinweis darauf, daß sich das Gelblich-Bläulich-System unter Adaptation in zwei Teilsysteme zerlegt, die sich nicht völlig identisch verhalten. Die Zerlegung erfolgt durch die Null-Linie des Systems. Dabei weisen die Daten auf eine stärkere Adaptationswirkung für Blau als für Gelb hin. Dies könnte auf einem Reihenfolgeeffekt bei der Datenerhebung beruhen, zumal alle drei Beobachter die Experimente mit Gelb begannen. Andererseits erhält dieser Befund eine gewisse Bekräftigung durch Daten von Krauskopf, Williams und Heeley [1982]. Diese fanden eine höhere Schwellenerhöhung für ein grünliches Gelb als für ein rötliches Blau bei jeweils identischer Adaptation. Dieses Ergebnis wäre mit der Annahme konform, daß Adaptation für Bläulichanteile stärker ausfällt als für Gelblichanteile. Damit wird auf die Möglichkeit unterschiedlicher Wirkungen von Adaptation für die beiden qualitativ unterschiedlichen Farbanteile des Systems hingewiesen, bei jedoch gleichzeitiger Gültigkeit der Quotientenrelation. Ein analoges Ergebnis findet Bäuml [1991] für das Rot-Grün-System. Hier gibt es ebenfalls gewisse Hinweise auf eine unterschiedliche Adaptationsstärke für die beiden unter-

schiedlichen Farbanteile. Wiederum könnte dies durch einen Reihenfolgeeffekt erklärt werden. Auch dieses Ergebnis stimmt jedoch mit Befunden von Krauskopf und Mitarb. überein.

## Literatur

- Bäumli, K.-H.: Eine theoretische und experimentelle Untersuchung der Farbadaptation. Unveröffentlichte Dissertationsarbeit. Universität Regensburg 1989.
- Bäumli, K.-H.: Eine einfache Beschreibung von Farbadaptation beim Rot-Grün-System. *Z. exp. ang. Psychol.* 38 (1991) 343 – 364.
- Brückner, A.: Zur Frage der Eichung von Farbsystemen. *Z. Sinnesphysiol.* 58 (1927) 322 – 362.
- Burns, S.A.; Elsner, A.E.; Pokorny, J.; Smith, V.C.: The Abney effect: Chromaticity coordinates of unique and other constant hues. *Vision Research* 24 (1984) 479 – 489.
- Cicerone, C.M.; Krantz, D.H.; Larimer, J.: Opponent-Process Additivity – III. Effect of moderate Chromatic Adaptation. *Vision Research* 15 (1975) 1125 – 1135.
- Elzinga, C.W.; de Weert, C.M.M.: Nonlinear codes for the yellowblue mechanism. *Vision Research* 24 (1984) 911 – 922.
- Falmagne, J.-C.: *Elements of Psychophysical Theory*. New York: Oxford University Press 1985.
- Goethe, J.W.: *Zur Farbenlehre*. Tübingen, 1810.
- Heinemann, E.G.: Simultaneous brightness induction as a function of inducing- and test-field luminance. *J. Exp. Psychol.* 50 (1955) 89 – 96.
- Hering, E.: *Zur Lehre vom Lichtsinn*. Wien: C. Gerolds Sohn 1878.
- Humanski, R.A.; Shevell, S.K.: Color perception with binocularly fused adaptive fields of different wavelength. *Vision Research* 25 (1985) 1923 – 1935.
- Irtel, H.: PXL: Eine Bibliothek zur Steuerung psychologischer Experimente. Poster auf der 31. Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Bamberg, 1989.
- Jameson, D.; Hurvich, L.M.: Some quantitative aspects of an opponent colors theory. III. Changes in brightness, saturation and hue with chromatic adaptation. *J. Optic. Soc. Am.* 46 (1955) 405 – 415.
- Jameson, D.; Hurvich, L.M.: Color adaptation: sensitivity, contrast, after-images. In: D. Jameson and L.M. Hurvich (Eds.), *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4, Visual Psychophysics. New York: Springer-Verlag 1972.
- Krantz, D.H. Color Measurement and Color Theory: II. Opponent-Colors Theory. *J. Mathem. Psychol.* 12 (1975) 304 – 327.
- Krauskopf, J.; Williams, D.R.; Heeley, D.W.: Cardinal Directions of color space. *Vision Research* 22 (1982) 1123 – 1131.
- Land, E.H.: The retina. *Am. Sci.* 52 (1964) 247 – 264.
- Larimer, J.; Krantz, D.H.; Cicerone, C.C.: Opponent process additivity – I. Red/green equilibria. *Vision Research* 14 (1974) 1127 – 1140.
- Larimer, J.; Krantz, D.H.; Cicerone, C.C.: Opponent process additivity – II. Yellow/blue equilibria and nonlinear models. *Vision Research* 15 (1975) 723 – 731.
- Nagy, A.L.: Unique hues are not invariant with brief stimulus durations. *Vision Research* 19 (1979) 1427 – 1432.
- Purdy, D.M.: Spectral hue as a function of intensity. *Am. J. Psychol.*, 49 (1931) 313 – 315.
- Schnapf, J.L.; Kraft, T.; Baylor, D.A.: Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. *Nature*, 325 (1987) 439 – 441.
- Shevell, S.K.: The dual role of chromatic backgrounds in color perception. *Vision Research* 18 (1978) 1649 – 1661.
- Shevell, S.K.; Humanski, R.A.: Color perception under contralateral and binocularly fused chromatic adaptation. *Vision Research* 24 (1984) 1011 – 1019.
- v. Kries, J.: Die Gesichtsempfindungen. In W. Nagel (Ed.), *Handbuch der Physiologie des Menschen* (Vol. 3, pp. 109 – 279). Braunschweig: Vieweg 1905.
- Walraven, J.: Discounting the background – the missing link in the explanation of chromatic adaptation. *Vision Research* 16 (1976) 289 – 295.
- Wyszecki, G.; Stiles, W.S.: *Color Science* (2nd ed). New York: Wiley 1982.
- Yellot, J.I.; Wandell, B.A.; Cornsweet, T.N.: The beginning of visual perception: the retinal image and its initial coding. In: I. Darian-Smith (Ed.), *Handbook of Physiology* (III, Part I). Bethesda: American Physiological Society 1984.