

**Experimentelle Untersuchung
zur Tetrachromasie
beim Farbsehen**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Philosophischen Fakultät II
(Psychologie und Pädagogik)
der
Universität Regensburg

vorgelegt von
Carolin Ströhle
aus München

Regensburg

2001

Erstgutachter: Prof. Dr. J. Drösler

Zweitgutachter: Prof. Dr. K.-H. Bäuml

Danksagung

Für die große Unterstützung bei meiner Arbeit gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Jan Drösler und Dr. Rainer Zwisler.

Inhaltsverzeichnis

1	Die Hypothese der Tetrachromasie	1
1.1	Farbe und Farbsehen	2
1.1.1	Messtheoretische Betrachtung der Farben	4
1.1.2	Das Normfarbsystem	6
1.1.3	Unterschiede zwischen Farben	8
1.1.4	Physiologische Grundlagen des Farbsehens	12
1.1.5	Theorie der Trichromasie	13
1.2	Individuelle Unterschiede des Farbsehens	19
1.2.1	Farbschwächen	19
1.2.2	Allele Gene für das Farbsehen	21
1.2.3	Weibliche Heterozygote	23
1.2.4	Trichromasie bei dichromatischen Affenarten	25
1.2.5	Tetrachromasie bei Menschen	25
1.3	Fragestellung und Hypothesen	28
2	Experimentelles Vorgehen	31
2.1	Der Vorversuch	31
2.1.1	Versuchspersonen	31
2.1.2	Versuchsaufbau	32
2.1.3	Instruktion	34
2.1.4	Ablauf des Vorversuches	35
2.1.5	Auswertung der Daten	36
2.2	Hauptversuch	36
2.2.1	Versuchspersonen	36
2.2.2	Versuchsaufbau	37
2.2.3	Reizmaterial	45

2.2.4	Ablauf des Hauptversuches	47
2.2.5	Auswertung der Daten	49
3	Ergebnisse	51
3.1	Ergebnisse des Vorversuches	51
3.1.1	Klassifikation der Versuchspersonen	51
3.1.2	Ergebnisse des Ishihara-Tests	52
3.1.3	Ergebnisse des Farnsworth-Munsell-100-Hue Tests	52
3.1.4	Einteilung des Spektrums	53
3.2	Hauptversuch	55
3.2.1	Gedächtniseffekte	56
3.2.2	Merkmale der Einstellungen	57
3.2.3	Lerneffekte	72
3.2.4	Betrachtung der Rohdaten im Schrittmotor-Raum	83
4	Diskussion	87
4.1	Diskussion der Ergebnisse des Vorversuches	87
4.1.1	Ishihara-Test und Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test	88
4.1.2	Einteilung des Spektrums	88
4.1.3	Fazit des Vorversuches	91
4.2	Diskussion der Ergebnisse des Hauptversuches	91
4.2.1	Gedächtniseffekte	92
4.2.2	Merkmale der Einstellungen	93
4.2.3	Lerneffekte	94
4.2.4	Rohdaten im Schrittmotor-Raum	96
4.2.5	Eignung des Versuchsaufbaues	96
4.3	Fazit	98
5	Zusammenfassung	99
	Literaturverzeichnis	101
A	Instruktionen	111
A.1	Instruktion im Vorversuch	111
A.2	Instruktion im Hauptversuch	112

B	Ergänzende Tabellen	115
B.1	Vorversuch	115
B.2	Hauptversuch	115
C	Diskriminationsellipsoide	129
D	Autokorrelationsfunktionen	136

Kapitel 1

Die Hypothese der Tetrachromasie

Farbe ist einer der wesentlichen Aspekte der menschlichen Wahrnehmung. Der physikalische Farbreiz wird jedoch erst durch ein menschliches Individuum zu dem, was wir Farbempfindung oder Farbe nennen. Daher ist Farbe ein psychologisches Phänomen.

Im Auge werden durch den Farbreiz die Rezeptoren für das Farbsehen, die Zapfen, gereizt. Die Empfindlichkeit dieser Rezeptoren ist bei jedem Menschen leicht unterschiedlich und hängt im wesentlichen von den darin enthaltenen Sehfärbstoffen (Photopigmenten) ab. Die bisher bekannten drei Sehfärbstoffe verfügen über maximale Empfindlichkeit im kurz-, mittel- und langwelligen Bereich. Die Tatsache, dass es drei unterschiedliche Arten von Photopigmenten gibt, wurde oft als physiologische Begründung dafür herangezogen, dass das menschliche Farbsehen dreidimensional (trichromatisch) ist (Brindley, 1970; Helmholtz, 1896; Young, 1802a, 1802b). Als Bestätigung dafür wurde die Tatsache angesehen, dass zu jeder beliebigen Farbe aus genau drei verschiedenen Grundfarben eine metamere Mischung hergestellt werden kann (siehe z.B. Graßmann, 1853; Maxwell, 1855, 1860; Wyszecki & Stiles, 1982). Diese drei Grundfarben dürfen nicht auseinander ermischtbar sein.

Obwohl schon früher Vermutungen über die Existenz von mehr als drei unterschiedlichen Zapfen-Sehfärbstoffen angestellt wurden (z.B. Ingling, 1969), wurden solche Hypothesen erst in den letzten fünfzehn Jahren systematisch untersucht. Mit der Weiterentwicklung der Genanalyse haben sich Hinweise ergeben, dass in den menschlichen Genen mehr als drei Sehfärbstoffe für das Farbsehen kodiert sein können. Außerdem existieren von den Mittel- und Langwellen-Zapfen auch in der farbnormalsichtigen Bevölkerung mehrere unterschiedliche Formen (z.B. Nathans, Thomas & Hogness, 1986; M. Neitz & J. Neitz, 1992). Diese neuen Befunde lassen es möglich erscheinen, dass aus vier (oder mehr) Sehpigmenten auch vier oder mehr Arten von Farbrezeptoren resultieren, die sich in ihrer Empfindlichkeit von den drei bekannten unterscheiden. Dies würde bedeuten, dass es farbnormalsichtige Menschen gibt, die über einen Farbraum mit mehr als drei Dimensionen verfügen.

Diese „Tetrachromasie“ soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Eine Überprüfung dieser Hypothese ist durch Vorgabe von vier Primärreizen im Farbmischungsexperiment möglich, eine Technik, die schon von Wyszecki und Stiles (1982) vorgeschlagen wird. Im Folgenden sollen zunächst grundlegende Begriffe des Farbensehens und seiner physiologischen Grundlagen geklärt werden, dem folgt eine Darstellung wichtiger Befunde, die zur Aufstellung der Tetrachromasie-Hypothese geführt haben.

1.1 Farbe und Farbsehen

Farbe kann als die durch den Sehsinn vermittelte visuelle Wahrnehmung definiert werden, die es erlaubt, zwischen strukturlosen Objekten gleicher Form und Größe zu unterscheiden (Drösler, 1989; Wyszecki & Stiles, 1982).

Grundlage der Farbempfindung sind die physikalischen Farbreize, elektromagnetische Strahlung im Bereich zwischen 380 nm^1 und 800 nm (Drösler, 1989). Sie gelangen in das menschliche Auge und erregen dort spezielle Rezeptoren, die Zapfen, wodurch die Grundlage der *Farbwahrnehmung* entsteht. Für die Wahrnehmung von Farbe ist jedoch ein Mensch nötig, der die Impulse der Rezeptoren verarbeitet. Nur durch Reizung von Zapfen ohne Verbindung zum menschlichen Bewusstsein wäre keine Sinnesempfindung Farbe möglich.

Die Untersuchung des menschlichen Farbsehens beruht im wesentlichen auf *Farbmischungsexperimenten*. Dabei wird einer Versuchsperson meist ein zweigeteiltes kreisförmiges Farbfeld präsentiert. In die eine Hälfte des Feldes wird eine Mischung aus drei vorgegebenen Farben, den *Primärfarben*, projiziert. Im zweiten Feld wird ein *Zielreiz* vorgegeben. Als Primärfarben können beliebige drei Farben verwendet werden, sie müssen jedoch linear unabhängig sein, dürfen sich also nicht auseinander ermischen lassen (Wyszecki & Stiles, 1982). Die drei Komponenten dieses *Primärreiztripels* wirken im Farbmischungsexperiment gemeinsam auf den Beobachter, da sie auf denselben Teil der Netzhaut projiziert werden (Hurvich, 1981). Daher spricht man auch von *additiver Farbmischung*. Aufgabe der Versuchsperson ist es, die Intensitäten der drei Primärfarben mit Hilfe dreier Regler so einzustellen, dass sich eine Farbe ergibt, die genauso aussieht wie der Zielreiz. Die Farben in den beiden Kreishälften werden dann als *metamer* (gleich aussehend) bezeichnet. Dabei kann entweder in *eigentlicher Farbmischung* eine Testfarbe aus allen drei Primärfarben ermischt werden, oder eine oder zwei werden zum Testreiz in der sogenannten *uneigentlichen Farbmischung* hinzugemischt.

Alle unterscheidbaren Farben können so durch das Mischungsverhältnis dreier Primärreize charakterisiert werden, das zur Herstellung einer Metamerie zur vorgegebenen Testfarbe nötig ist. Diese drei Kennwerte einer Farbe werden *Farbwerte* genannt. Mit Hilfe der Farbwerte ist eine zahlenmäßige Repräsentation von Farben möglich. Durch Vorgabe *schmalbandiger* oder *monochromatischer* Testreize, deren Wellenlängen λ systematisch über den gesamten sichtbaren Bereich hinweg variieren, können dann die *spektralen Farbwertkurven* $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$ bestimmt werden (siehe z.B. Stiles & Burch, 1959).

Bei der Durchführung von Farbmischungsexperimenten sind verschiedene Faktoren zu

¹Nanometer, 10^{-9} Meter

berücksichtigen, die die Herstellung der Metamerie beeinflussen können. Instruktionseffekte sind vor allem bei der Erstellung kontextübergreifender Farbabgleiche von Bedeutung. Obwohl sie sich im vorliegenden Experiment kaum auswirken, werden die Versuchspersonen instruiert, das farbliche Aussehen des Zielreizes möglichst exakt zu reproduzieren (*hue match*).

Bedingt durch die Versuchsanordnung sind für den Versuch vor allem Gedächtniseffekte bei der Erstellung des Farbabgleichs zu berücksichtigen. Prinzipiell können die beiden Reize im Farbmischungsexperiment auf zwei unterschiedliche Arten dargeboten werden: Beim *simultanen Farbabgleich* (*simultaneous color matching*) werden Standard- und Testreiz gleichzeitig gezeigt, so dass die Möglichkeit besteht, sie direkt miteinander zu vergleichen. Es erfolgt ein *wahrnehmungsmäßiger Farbabgleich* (*perceptual matching*), die gefundene metamere Farbe entspricht weitgehend der Zielfarbe (z.B. Pérez-Carpinell, Baldoví, de Fez & Castro, 1998). Beim *sukzessiven* oder *verzögerten Farbabgleich* liegt zwischen den beiden Reizdarbietungen ein deutlicher zeitlicher oder räumlicher Abstand, es erfolgt ein Abgleich aus dem Gedächtnis (*memory matching*). Bei Anwendung dieser Methode ergeben sich deutlich größere Unterschiede zwischen der Zielfarbe und der als metamer betrachteten Mischung als beim wahrnehmungsmäßigen Farbabgleich: Insgesamt verschlechtert sich das Farbunterscheidungsvermögen (z.B. Bartleson, 1959), die Sättigung der Gedächtnisfarben verändert sich hin zu höherer Sättigung (siehe auch Bartleson, 1959; Newhall, Burnham & Clark, 1957), es werden jedoch keine systematischen Veränderungen im Farbton beobachtet (siehe auch Newhall, Burnham & Clark, 1957). Außerdem zeigt sich eine zwei- bis dreimal höhere Varianz der Farbabgleiche (z.B. Pérez-Carpinell, Baldoví, de Fez & Castro, 1998; Pérez-Carpinell, de Fez, Baldoví & Soriano, 1998).

Dabei spielen jedoch auch der Grad der Vertrautheit der Versuchspersonen mit den Reizen sowie die Übung im Erzeugen von Farbabgleichen eine Rolle. Zu den Effekten von größerer Geübtheit im Umgang mit Farbabgleichen gibt es widersprüchliche Befunde, meist können keine Schlüsse gezogen werden (z.B. Burnham & Clark, 1955; Hamwi & Landis, 1955; Siple & Springer, 1983). Nur Cohen, Welch und Fisichelli (1951) und Woods (1952) geben an, dass erfahrene Beobachter eine höhere visuelle Verarbeitungskapazität haben. Bei Hamwi und Landis (1955) zeigt sich jedoch für erfahrene wie unerfahrene Versuchspersonen ein Übungseffekt: Innerhalb eines Experiments werden im ersten Durchgang überzufällig mehr Fehler gemacht als im zweiten. Auch Brown (1957) kann Trainingseffekte bei anfangs ungeübten Beobachtern nachweisen: Neben einer größeren Übereinstimmung zwischen den MacAdam-Ellipsen unterschiedlicher Beobachter nach 17 Sitzungen nimmt die durchschnittliche Größe der Ellipsen deutlich ab.

Mit Hilfe des Farbabgleichsexperiments kann jedoch nicht nur die spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren (indirekt) erfasst werden, sondern mit Hilfe der so bestimmten Farbwerte können den wahrgenommenen Farben Zahlenwerte zugeordnet werden. Das genaue Vorgehen bei diesem auch als *messtheoretischer Ansatz* bezeichneten Vorgehen soll in den nächsten Abschnitten dargestellt werden.

1.1.1 Messtheoretische Betrachtung der Farben

Farben können durch drei im Farbmischungsexperiment erhobene Zahlenwerte in eindeutiger Weise gekennzeichnet werden (siehe Abschnitt 1.1). Die messtheoretische Betrachtung von Farben erfolgt erstmals durch Graßmann (1853), der Farben als Elemente eines dreidimensionalen Vektorraumes charakterisiert. Durch Krantz (1975a) wird dieser Ansatz im Rahmen der Messtheorie von Krantz, Luce, Suppes und Tversky (1971) axiomatisiert. Hier repräsentieren unendlich-dimensionale Vektoren die physikalischen Farbreize, die mit Hilfe einer geeigneten Äquivalenzrelation in einen Vektorraum der wahrgenommenen Farben eingebettet werden können. Dieser ist, entsprechend Young (1802a, 1802b) und Helmholtz (1896), lediglich dreidimensional.

Grundlage der Darstellung von Farben als Vektoren sind zwei Abbildungen \oplus und $*$ und eine Relation \sim . Die Abbildung $\oplus : \mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ bezeichnet die (*additive*) *Mischung* (Übereinanderprojektion) zweier Reize, die Abbildung $* : \mathbb{R}^+ \times \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ die Veränderung der *Reizintensität*. Es handelt sich also im Falle der beiden Abbildungen um physikalische Veränderungen des Farbreizes. Die Relation $\sim \subseteq \mathcal{A} \times \mathcal{A}$, nach der Bezeichnung für empfundene Farbgleichheit (*Metamerie*) auch *Metamerierelation* genannt, kann als psychologische Beurteilung zweier Reize aufgefasst werden. Krantz (1975a) zeigt, dass additive Farbmischungen als positive Halbgruppe mit Aufhebungseigenschaft und Intensitätsveränderung als skalarer Multiplikation dargestellt werden können, wenn die Bedingungen der *Graßmann-Struktur* erfüllt sind.

Definition 1 Eine *Graßmann-Struktur* ist ein Quadrupel $\langle A, \oplus, *, \sim \rangle$, wobei A eine Menge, \oplus eine Abbildung auf $A \times A$, $*$ eine Abbildung auf $\mathbb{R}^+ \times A$ und \sim eine beliebige Relation auf A ist, die die Axiome 1 bis 5 erfüllt.

1. $\langle A, \oplus \rangle$ ist eine kommutative Halbgruppe mit Aufhebungseigenschaft, das heißt, für alle $a, b, c \in A$ gilt:

$$(a) \quad a \oplus b \in A$$

$$(b) \quad (a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c) \quad (\text{Assoziativität})$$

$$(c) \quad \text{aus } a \oplus c = b \oplus c \text{ folgt: } a = b \quad (\text{Aufhebungseigenschaft})$$

$$(d) \quad a \oplus b = b \oplus a \quad (\text{Kommutativität})$$

2. $*$ ist eine Skalarmultiplikation auf $\langle A, \oplus \rangle$, das heißt, für alle $a, b \in A$ und alle $t, u \in \mathbb{R}^+$ gilt:

$$(a) \quad t * a \in A$$

$$(b) \quad t * (u * a) = (tu) * a \quad (\text{Assoziativität})$$

$$(c) \quad t * (a \oplus b) = (t * a) \oplus (t * b)$$

$$(d) \quad (t + u) * a = (t * a) \oplus (u * a) \quad (\text{Distributivität})$$

$$(e) \quad 1 * a = a \quad (\text{Neutrales Element})$$

3. Gesetz der Äquivalenz: \sim ist eine Äquivalenzrelation auf A , das heißt, für alle $a, b, c \in A$ gilt:

- (a) $a \sim a$ (Reflexivität)
 (b) aus $a \sim b$ folgt $b \sim a$ (Symmetrie)
 (c) gilt $a \sim b$ und $b \sim c$, dann gilt auch $a \sim c$ (Transitivität)

4. Gesetz der Additivität: Für alle $a, b, c \in A$ gilt $a \sim b$ gdw. $a \oplus c \sim b \oplus c$.

5. Gesetz der skalaren Multiplikation: Für alle $a, b \in A$ und alle $r \in \mathbb{R}^+$ gilt: Wenn $a \sim b$, dann $r * a \sim r * b$.

Die Dimensionalität des Farbsehens wird durch die folgende Definition charakterisiert:

Definition 2 Eine Graßmann-Struktur nach Definition 1 wird als m -chromatisch bezeichnet, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

1. Zu allen $a_0, a_1, \dots, a_m \in A$ existieren $r_0, r_1, \dots, r_m, u_0, u_1, \dots, u_m \in \mathbb{R}^+$ mit $r_i \neq u_i$ für wenigstens ein $i \in \{0, 1, \dots, m\}$, so dass gilt $\bigoplus_{i=0}^m r_i * a_i \sim \bigoplus_{i=0}^m u_i * a_i$.
2. Es gibt a_1, \dots, a_m aus A , so dass für alle $r_1, \dots, r_m, u_1, \dots, u_m \in \mathbb{R}^+$ aus $\bigoplus_{i=0}^m r_i * a_i \sim \bigoplus_{i=0}^m u_i * a_i$ folgt, daß für alle i gilt $r_i = u_i$.

Liegt eine m -chromatische Graßmann-Struktur vor, gibt es nach dem ersten Teil der Definition bei Vorgabe von $m + 1$ Primärreizen immer verschiedene Möglichkeiten, sie zu einer bestimmten Farbe zu mischen. Bei genau m Primärreizen dagegen gibt es genau ein Mischungsverhältnis der Primärfarben, das als metamer zum vorgegebenen Standardreiz bezeichnet wird. Sind die sieben Axiome der Graßmann-Struktur erfüllt, können Farben nach Krantz (1975a) durch m -dimensionale Vektoren repräsentiert werden:

Theorem 1 (Repräsentationssatz): Es sei $\langle A, \oplus, *, \sim \rangle$ eine Graßmann-Struktur. Dann existieren ein Vektorraum V über \mathbb{R} , ein konvexer Kegel $C \in V$ und eine Abbildung ϕ von A nach C , so dass für alle $a, b \in A$, $r \in \mathbb{R}^+$ und $v \in V$ gilt:

1. $\phi(a \oplus b) = \phi(a) + \phi(b)$ (Additivität)
2. $\phi(r * a) = r \cdot \phi(a)$ (Homogenität)
3. $a \sim b$ genau dann, wenn $\phi(a) = \phi(b)$ (Bildung von Äquivalenzklassen)
4. Es existieren $c, d \in A$, so dass $v = \phi(c) - \phi(d)$ (Differenzbildung)

Die Abbildung ϕ ist ein Homomorphismus der Graßmann-Struktur $\langle A, \oplus, *, \sim \rangle$ auf $\langle C, +, \cdot, = \rangle$, wobei C ein konvexer Kegel in V ist. Wegen Eigenschaft 4 handelt es sich bei V um einen minimalen Vektorraum, da sich jedes Element von V als Differenz von Elementen $\phi(c)$ und $\phi(d)$ aus C erzeugen lässt (siehe Krantz, 1975a).

Theorem 2 Der Vektorraum V aus Theorem 1 ist genau dann m -dimensional, wenn die Graßmann-Struktur $\langle A, \oplus, *, \sim \rangle$ m -chromatisch ist.

Theorem 3 (*Eindeutigkeitssatz*): Sei $\langle A, \oplus, *, \sim \rangle$ eine Graßmann-Struktur mit zwei Homomorphismen ϕ, ϕ' auf konvexen Kegeln C, C' in den Vektorräumen V, V' , die die Bedingungen 1 bis 4 des Theorems 1 erfüllen. Dann existiert eine nichtsinguläre lineare Abbildung T von V auf V' , so dass für alle $a \in A$ gilt:

$$T(\phi(a)) = \phi'(a).$$

Die Abbildung ϕ ist damit eindeutig bis auf nichtsinguläre lineare Transformationen. Wie durch Theorem 1 gezeigt wird, lässt sich die Menge der Farben strukturerhaltend in einen Vektorraum einbetten.

Nach Drösler (1989) besteht der psychologische Teil des Gedankengangs darin, die Farb- reize auf einen Vektorraum von Äquivalenzklassen von Reizen abzubilden. Der so erzeugte Farbraum kann dann auf den numerischen Vektorraum \mathbb{R}^3 abgebildet werden. Die zulässigen Transformationen aus Theorem 3 drücken aus, dass die drei Primärreize, die die Basis des Vektorraumes bilden, jeweils beliebig gewählt werden können. Durch die Herstellung einer Metamerie zwischen Farbreizen im Farbmischungsexperiment wird die große Anzahl unterschiedlicher physikalischer Farbreizspektren auf eine deutlich geringere Anzahl vom farbnormalsichtigen Menschen unterscheidbarer Farben abgebildet. Eine *Farbe* im wissenschaftlichen Sinne wird daher als eine *Äquivalenzklasse visueller Spektren* bezeichnet.

Ein Beispiel für die praktische Realisation einer numerischen Repräsentation der Farben entsprechend den dargestellten theoretischen Anforderungen ist das im nächsten Abschnitt beschriebene Normfarbsystem.

1.1.2 Das Normfarbsystem

Es hat sich in der Praxis als sinnvoll erwiesen, zur Feststellung der Farbwertkoordinaten einer Farbe nicht ein beliebiges Primärreiztripel zu verwenden, sondern nur bestimmte, obwohl die mit Hilfe eines Primärreiztripels bestimmten Koordinaten einer Farbe in die Mischungsverhältnisse dreier anderer Primärfarben umgerechnet werden können. Meist wird zur Kennzeichnung von Farben das *XYZ-Normfarbsystem* verwendet. Klassischerweise werden unterschiedliche Farben durch ihre wahrnehmbaren Attribute *Helligkeit* (*brightness*), *Farbton* (*hue*) und *Sättigung* (*saturation*) gekennzeichnet (siehe auch Wyszecki & Stiles, 1982, S.487). Diese drei elementaren Kategorien zur Kennzeichnung von Farben beruhen jedoch auf eher physikalischen als auf psychologischen Versuchsanordnungen und sind daher zur Kennzeichnung der Farben in der vorliegenden Arbeit weniger gut geeignet.

Das *Normfarbsystem* basiert auf den drei Primärreizen X, Y und Z , die auch *Normfarbwerte* genannt werden. Dieses Primärreiztripel bildet die Basisvektoren eines Vektorraumes, innerhalb dessen Farben durch diejenigen Mischungsverhältnisse der drei Primärreize charakterisiert sind, die zur Herstellung einer Metamerie führen. Die *Einheitsebene*, auch *chromaticity diagram* genannt, wird durch $X = (1, 0, 0)$, $Y = (0, 1, 0)$ und $Z = (0, 0, 1)$ aufgespannt, sie lässt sich daher durch $X + Y + Z = 1$ definieren.

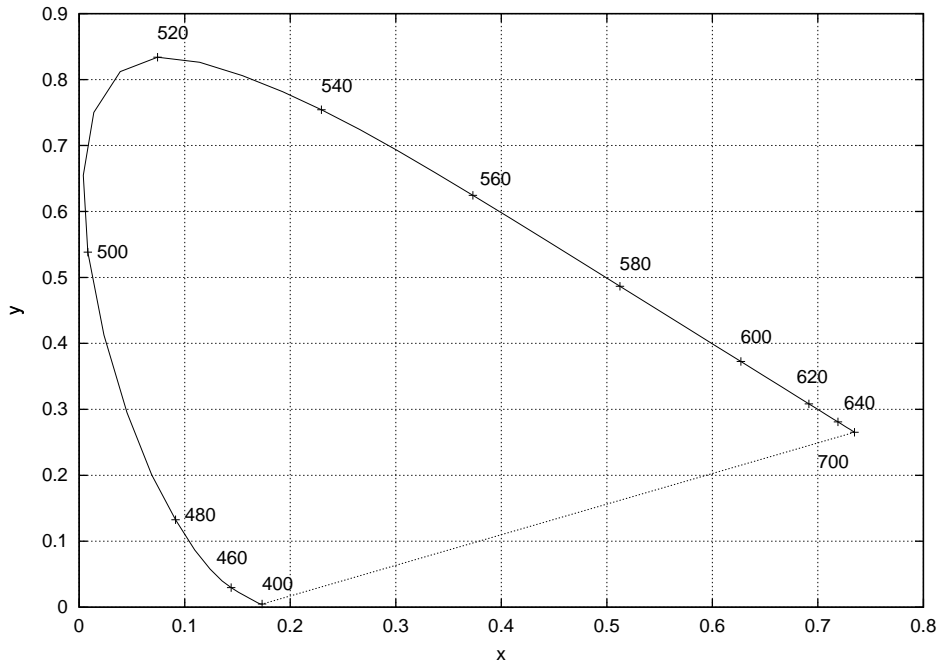


Abbildung 1.1: Normfarbtafel mit dem hufeisenförmigen Spektralzug und der (punktierten) Purpurlinie. Die Farborte der monochromatischen Reize von 400 nm bis 780 nm Wellenlänge bilden den hufeisenförmigen Spektralzug, der durch die Purpurlinie abgeschlossen wird. Im XYZ-Normfarbsystem gibt es keine negativen Spektralwerte. Nach Wyszecki und Stiles (1982, Tabelle II(3.3.1), S. 736-737).

Der Punkt, in dem der Farbvektor Q einer beliebigen Farbe (oder seine Verlängerung) die Einheitsebene schneidet, wird *Farbort* oder *chromaticity point* genannt. Dieser Punkt ist eindeutig durch die drei Normfarbwerte $X(a)$, $Y(a)$ und $Z(a)$ bestimmt. Sie nehmen nur positive Werte an, da mit Hilfe dieses Primärreiztripels alle Farben in eigentlicher Mischung erzeugt werden können. Werden diese Normfarbwerte so normiert, dass sich ihre Summe zu Eins ergänzt, spricht man von *Normfarbwertanteilen* x , y und z .

Sie werden in die sogenannte *Normfarbtafel* (*CIE-1931-Farbtafel*) eingetragen (siehe Abbildung 1.1). Hierbei handelt es sich um eine zweidimensionale Darstellung der Einheitsebene, bei der bei z ein rechter Winkel liegt. In dieser Farbkarte bilden die Farborte schmalbandiger Reize von 400 nm bis 700 nm den parabelförmigen *Spektralzug* (*spectrum locus*). Die Gerade, die die beiden Endpunkte der Parabel verbindet, wird *Purpurlinie* (*purple line*) genannt, da hier die Farborte der Purpur erscheinenden Farben liegen. Außerhalb des Spektralzuges liegen die sogenannten *virtuellen Farbvalenzen*, zu denen es keine physikalisch realisierbare Entsprechung gibt (Richter, 1981). Der Punkt des *energiegleichen Spektrums* (*Weißpunkt*) wird durch die Normfarbwertanteile $x = y = z = \frac{1}{3}$ bestimmt.

Das Normfarbsystem bietet gegenüber anderen Darstellungen von Farben mehrere Vorteile: Die Normfarbwerte sind immer positiv (siehe Abbildung 1.1.2), außerdem können auch für außerhalb des Farbkegels liegende Vektoren Farbgleichungen gebildet werden, die

jedoch nicht physikalisch im Farbmischungsexperiment realisierbar sind. Zudem stimmt die Funktion $\bar{y}(\lambda)$ mit der photopischen Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ überein, so dass die Normfarbwerte Informationen über die Helligkeit der Reize enthalten (siehe auch Irtel, 1991).

1.1.3 Unterschiede zwischen Farben

Die Diskriminationsfähigkeit eines menschlichen Beobachters für einzelne Farbattribute ist im wesentlichen vom Farbreiz abhängig, der betrachtet wird. Dies gilt auch für die Wahrnehmungsschwelle für Unterschiede im *Farbton* (z.B. Bedford & Wyszecki, 1958): Sie liegt besonders in den Randbereichen des sichtbaren Spektrums wesentlich höher als im mittleren Bereich. Zudem nehmen die Unterschiedsschwellen mit der Reizintensität und der Reizgröße ab. Bei ca. 590 nm ist die menschliche Wahrnehmung am empfindlichsten. Auch die Wahrnehmung von Unterschieden in der *Sättigung* ist abhängig von der jeweiligen Farbe bzw. von deren bunttongleicher Wellenlänge².

In der Untersuchung von Priest und Brickwedde (1938) ergibt sich eine systematische Abhängigkeit der Größe des ebenmerklichen Sättigungsunterschiedes von der Wellenlänge λ des präsentierten Spektralreizes. Für Reize mit einer bunttongleichen Wellenlänge aus den Randbereichen des sichtbaren Spektrums ist die Unterschiedsschwelle relativ niedrig, während Reize mit bunttongleicher Wellenlänge in der Mitte des sichtbaren Bereiches (bei ca. 570 nm) hinsichtlich ihrer Sättigung am leichtesten unterscheidbar sind (siehe auch Jones & Lowry, 1926; Martin, Warburton & Morgan, 1933; Wright & Pitt, 1937). Auch für monochromatische Reize ergeben sich Unterschiede in der Sättigung. In den Versuchen von Wright und Pitt (1935) zeigt sich, dass die entsprechende Unterschiedsschwelle für alle Wellenlängen relativ konstant ist. Besonders empfindlich ist das visuelle System für Unterschiede in der Helligkeit eines Reizes. Dabei hängt der gerade eben wahrnehmbare Leuchtdichteunterschied vom Ausgangsniveau der Leuchtdichte ab. Die maximale Empfindlichkeit für Leuchtdichteunterschiede liegt im Bereich zwischen 80 und 300 $\frac{cd}{m^2}$ (Lowry, 1931).

Wahrgenommene Unterschiede zwischen Farben können nicht nur erfasst, sondern auch numerisch quantifiziert werden.

CIE-1976-(L*a*b*)-Raum

Eine Möglichkeit zur Beschreibung wahrgenommener *Farbdifferenzen* ist die Berechnung des euklidischen Abstands zwischen den zu vergleichenden Farben im xyL -Raum der Normfarbwertanteile x und y und der Leuchtdichte L (z.B. Lucassen & Walraven, 1993). Unter der Annahme, dass der Farbwahrnehmung drei Systeme zugrundeliegen, die linear mit den Normfarbwerten der entsprechenden Farbe zusammenhängen (siehe Abschnitt 1.1.4), scheint es jedoch sinnvoller, als Abstandsmaß zweier Farben die euklidische Distanz aus den Normfarbwerten zu errechnen:

$$\Delta_{XYZ} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (1.1)$$

²Die *bunttongleiche Wellenlänge (dominant wavelength)* bezeichnet die Wellenlänge eines monochromatischen Reizes, dessen Farbton als gleich aussehend (metamer) empfunden wird.

Dabei bezeichnet ΔX die Differenz der X -Koordinaten der beiden Farben, ΔY die Differenz der Y -Koordinaten und ΔZ die Differenz der Z -Koordinaten. Die Benutzung dieses Maßes ist jedoch aufgrund der fehlenden Längentreue des XYZ -Raumes problematisch, da Gleichung 1.1 keine entsprechende Gewichtung der Abstände innerhalb des Raumes vornimmt.

Ein weiterer Ansatz zur Aufstellung eines Farbraumes, in dem geometrische Entfernungen auch wahrnehmbaren Unterschieden entsprechen, besteht in der Festlegung des *CIE-1976-($L^*a^*b^*$)-Raumes* (siehe Wyszecki & Stiles, 1982, S. 166 ff.). Dieser Farbraum wird oft zur Beschreibung von Farbunterschieden eingesetzt. Er besitzt die drei Dimensionen L^* , a^* und b^* , die sich aus den Normfarbwerten $X(a)$, $Y(a)$ und $Z(a)$ nach den folgenden Formeln berechnen lassen:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (1.2)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (1.3)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (1.4)$$

Dabei muss gelten: $\frac{X}{X_n}$, $\frac{Y}{Y_n}$ und $\frac{Z}{Z_n} > 0.01$. Die Werte X_n , Y_n und Z_n bezeichnen die Farbwerte des Weißpunktes, der sich aus dem Strahlungsspektrum der verwendeten Beleuchtung oder des Umfeldes ergibt. Hier ist L^* das Korrelat zur *relativen Helligkeit* (*lightness*). Den Kennwert C_{ab}^* für die *Buntheit* (*chroma*) erhält man durch Umrechnung von a^* und b^* in zylindrische Koordinaten:

$$C_{ab}^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \quad (1.5)$$

Den *Farbwinkel* h_{ab} (in Grad) zur numerischen Kennzeichnung des *Farbtons* (*hue*) erhält man durch

$$h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (1.6)$$

Auf diesem annähernd gleichabständigen Farbraum basiert das auch für größere Farbunterschiede geeignete Maß ΔE_{ab}^* für den Unterschied zwischen zwei Farben (siehe Wyszecki & Stiles, 1982):

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Dabei bezeichnet das Symbol Δ für den Unterschied der beiden zu vergleichenden Farben in der jeweiligen Dimension. L^* , a^* und b^* werden wie in den Gleichungen 1.2 bis 1.4 beschrieben berechnet. Diese Formel, die auch als *CIE-1976-($L^*a^*b^*$)-Farbunterschiedsformel* bezeichnet wird, gilt allerdings nur unter bestimmten standardisierten Beobachtungsbedingungen. Eine weitere Verbesserung dieser Formel (siehe Alman, 1993) stellen die daraus entwickelten *CIE ΔE_{94}^* -Gleichungen* (CIE, 1995) dar. Hier ist die Gleichabständigkeit besser gewährleistet, außerdem können die Gleichungen mit Hilfe verschiedener Parameter an die Beobachtungssituation angepasst werden:

$$\Delta E_{94}^* = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.7)$$

$$S_L = 1 \quad (1.8)$$

$$S_C = 1 + 0.045 C_{ab}^* \quad (1.9)$$

$$S_H = 1 + 0.015 C_{ab}^* \quad (1.10)$$

Hierbei ist ΔL^* die Differenz der beiden nach Gleichung 1.6 berechneten Helligkeitswerte L^* der zu vergleichenden Farben, ΔC_{ab}^* bezeichnet die Differenz der beiden Farbigeitswerte C^* , die nach Gleichung 1.5 berechnet wird. ΔH_{ab}^* errechnet sich für kleine Farbunterschiede nach

$$\Delta H_{ab}^* = \frac{C_{ab}^* \Delta h_{ab} * \pi}{180}$$

aus den beiden Farbtonwerten h_{ab} nach Gleichung 1.6. Für C_{ab}^* kann man das geometrische Mittel der beiden C^* -Werte einsetzen. Die Parameter k_L , k_C und k_H ermöglichen die Korrektur des Einflusses von Störvariablen, wie zum Beispiel Reizgröße, Struktur der Reizoberfläche oder räumliche Anordnung der zu vergleichenden Reize, die sich aufgrund des experimentellen Aufbaus ergeben können. Die CIE (1995) gibt die folgenden Referenzbedingungen an, unter denen diese drei Werte gleich Eins gesetzt werden können: Beleuchtung durch die Lichtart D_{65} , Beleuchtungsstärke 1000 Lux, farbnormalsichtiger Beobachter, Beobachtungsart im Objektmodus, Reizgröße mehr als 4° Sehwinkel, Reizverteilung bei minimalem Abstand und direkt aneinandergrenzenden Begrenzungskanten, Größe der Farbunterschiede zwischen 0 und 5 CIE- $L^*a^*b^*$ -Einheiten und homogene Reizstruktur. Das ΔE_{94}^* -Maß erfasst die wahrgenommene Gesamtdifferenz zwischen zwei Farben am genauesten.

Diskriminations-Ellipsoide

Das Normfarbsystem (siehe Abschnitt 1.1.2) beruht ausschließlich auf der im Farbmischungsexperiment (siehe Abschnitt 1.1) konstruierten Metamerie-Relation. Die euklidischen Abstände zwischen Farborten in der Normfarbtafel repräsentieren keine wahrnehmbaren Unterschiede zwischen den Farben. Der klassische Ansatz, einen Überblick darüber zu erhalten, wie sich die Unterscheidbarkeit von Farben in verschiedenen Regionen der Normfarbtafel verändert, ist die Bestimmung von *MacAdam-Ellipsen* (z.B. MacAdam, 1942).

Sie werden erfasst, indem eine Versuchsperson bei konstanter Leuchtdichte eine Metamerie zwischen zwei (annähernd) monochromatischen Lichtstrahlen, die in veränderlichen Verhältnissen gemischt werden können, und einem vorgegebenen Standardreiz herstellen muss. Die beiden zu mischenden Reize sind so ausgewählt, dass bei einem bestimmten Mischungsverhältnis Farbgleichheit zum vorgegebenen Standard möglich ist. Aus jeweils 50 solcher Einstellungen wird die Standardabweichung der Normfarbwertanteile berechnet, sie wird dann auf der Verbindungsgeraden zwischen den Farborten der beiden zu mischenden Reize in der Normfarbtafel eingetragen. Die bei verschiedenen Reizpaaren bestimmten Standardabweichungen um denselben Standardreiz werden von MacAdam (1942) durch eine Ellipse beschrieben, die angibt, ab welchen Differenzen Farben unterschieden werden können. Brown und MacAdam (1949) bestimmen die in Abbildung 1.2 gezeigten Diskriminationsellipsen durch Mischung von drei Primärreizen, wobei auch die Leuchtdichte der Mischung variieren kann.

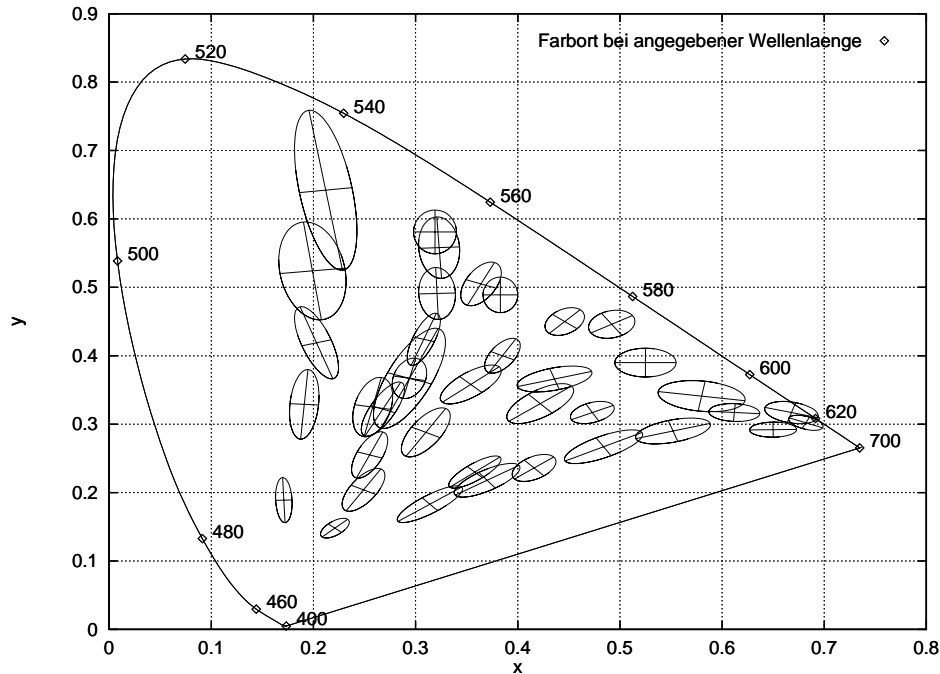


Abbildung 1.2: *Diskriminationsellipsoide nach Brown und MacAdam (1949)*: In dieser Abbildung sind 38 der von Brown und MacAdam (1949) bei der Versuchsperson WRJB erhobenen Diskriminationsellipsen (in zehnfacher Vergrößerung) sowie deren Hauptachsen zu sehen. Grundlage der Darstellung sind die von Brown und MacAdam (1949, S.824 f.) in ihrer Tabelle V veröffentlichten Schätzungen der Ellipsenparameter. Die monokular präsentierten, 2° großen Reize können von den Versuchspersonen auf allen drei Dimensionen verändert werden.

Die Unterscheidbarkeit von Farben im Farbraum kann auch bestimmt werden, indem die Streuungen, die bei wiederholten Farbabgleichen zu vorgegebenen Standardreizen auftreten, analysiert werden: Diese Streuungen können mit Hilfe von Ellipsoiden im dreidimensionalen Farbraum beschrieben werden, deren Zentroid beim Standardreiz liegt und deren Radien durch die Standardabweichung der Daten in die jeweilige Richtung gegeben sind. Da diese Ellipsoide als Konturen ebenmerklicher Unterschiede interpretiert werden können, heißen sie *Diskriminationsellipsoide*.

Voraussetzung für die Bestimmung von Diskriminationsellipsoiden ist eine multivariate Normalverteilung der betreffenden Variablen, von der nach Brown (1952) bei den durch Farbabgleiche erhobenen Farborten ausgegangen werden kann (siehe auch Silberstein & MacAdam, 1945). Tatsuoka (1971) stellt die multivariate Normalverteilung und die Bestimmung der Diskriminationsellipsoide zu einer gegebenen oder zu schätzenden Verteilung dar. Die allgemeine Form der multivariaten Normalverteilung lautet im p -dimensionalen Fall für die Dichtefunktion $f(x)$ eines Zufallsvektors $\mathbf{X}^T = [X_1, X_2, \dots, X_p]$

$$f(x) = (2\pi)^{-p/2} |\Sigma|^{-1/2} e^{(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)} \quad (1.11)$$

Dabei steht μ für den Erwartungswertvektor (auch *Zentroid*) und Σ für die Varianz-Kovarianz-Matrix. Bei Betrachtung der Dichtefunktion der mehrdimensionalen Normal-

verteilung in Gleichung 1.11 erkennt man, dass die Daten x nur in der quadratischen Form im Exponenten der Dichtefunktion vorkommen. Daraus ergibt sich, dass für jede Konstante $C \geq 0$ aus \mathbb{R} die Menge aller x , für die gilt

$$C = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu) \quad (1.12)$$

auch denselben Wert von $f(x)$ und somit dieselbe Wahrscheinlichkeitsdichte besitzt. Solche Konturen gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte (*Isodensiten*) umschließen eine Fläche bzw. einen Raum, der als Konfidenzintervall um den Mittelwertsvektor aufgefasst werden kann. Der zu diesem Konfidenzintervall gehörende Wahrscheinlichkeitswert hängt dabei monoton von C ab. Oft ist die Dichtefunktion der Daten aber nicht a priori gegeben, so dass die Varianz-Kovarianz-Matrix aus den Daten folgendermaßen geschätzt werden muss:

$$S = \frac{n}{n-1} \hat{\Sigma}$$

Man erhält in diesem Fall von aus den Daten zu schätzender Varianz-Kovarianz-Matrix nach Fahrmeir und Hamerle (1996) die sogenannte *Mahalanobis-Distanz*

$$D^2 = (\bar{x} - \mu)^T S^{-1} (\bar{x} - \mu), \quad (1.13)$$

mittels derer man den $(1 - \alpha)$ -Vertrauensbereich um eine p -variate normalverteilte Zufallsvariable durch

$$D^2 \leq \frac{(n-1)p}{(n-p)n} f_{(p, n-p; 1-\alpha)}$$

bestimmen kann. Auch durch diese Mahalanobis-Distanz wird wieder ein Ellipsoid mit Mittelpunkt \bar{x} definiert.

Von den dargestellten Möglichkeiten zur Erfassung von Farbabständen ist das ΔE_{94}^* -Maß die neueste Entwicklung. Mit Hilfe dieses Maßes können wahrgenommene Unterschiede zwischen Farben am genauesten numerisch erfasst werden. Nach dieser Einführung in die experimentelle Untersuchung des Farbensehens und die numerische Repräsentation von Farben und Farbabständen folgt nun eine Beschreibung der physiologischen Systeme, die der menschlichen Farbwahrnehmung zugrundeliegen.

1.1.4 Physiologische Grundlagen des Farbensehens

Wenn Licht auf die Photorezeptoren in der *Retina* fällt, absorbieren die Moleküle des *Sehfarbstoffes* oder *Opsins* in den Rezeptoren die Lichtquanten und verändern dabei ihre Struktur (Hurvich, 1981). Ein farbnormalsichtiger Beobachter verfügt über drei Arten von Sehfarbstoffen im Auge. Jeder dieser Sehfarbstoffe liegt in einem speziellen Rezeptor (Brown & Wald, 1964). Die maximale Empfindlichkeit λ_{max} der Sehfarbstoffe liegt jeweils im kurzwelligen (*short wave*), im mittelwelligen (*middle wave*) und im langwelligen (*long wave*) Bereich des Spektrums (Kaiser & Boynton, 1996). Die Photorezeptoren, in denen sie liegen, werden als S-, M- und L-Zapfen bezeichnet. Das Sehpigment besteht aus einem Chromophor und einem Protein, dem Opsin, die gemeinsam das Absorptionsmaximum λ_{max} des Pigmentes bestimmen. Da die Struktur des Chromophores für alle drei Sehfarbstoffe dieselbe ist, hängen Unterschiede in λ_{max} im wesentlichen von Veränderungen im Opsin ab. Die Struktur des Opsins wird durch eine Aminosäuresequenz bestimmt,

Tabelle 1.1: Absorptionsmaxima der Farbrezeptoren des Normalbeobachters

Studie	Methode	Empfindlichkeitsmaximum λ_{max}		
		S-Zapfen	M-Zapfen	L-Zapfen
Smith und Pokorny (1972)	Psychoph.	435 nm	534 nm	560 nm
Bowmaker und Dartnall (1980)	Mikrospektroph.	420.3 nm ± 4.7 nm	533.8 nm ± 3.7 nm	562.8 nm ± 4.7 nm
Dartnall, Bowmaker und Mollon (1983)	Mikrospektroph.	419.0 \pm 3.6 nm	530.8 \pm 3.5 nm	558.4 \pm 5.2 nm
Merbs und Nathans (1992a, 1992b, 1992c)	Geklonte	426 nm	530 nm	552 nm
	Opsine			557 nm
Schnapf, Kraft und Baylor (1987)	Suction Electroph.		~ 530 nm	~ 560 nm

die auf dem Opsin-Gen kodiert ist, daher ist das spektrale Empfindlichkeitsmaximum der Photopigmente der Zapfen größtenteils genetisch determiniert (Sanocki et al., 1993).

Die Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit (λ_{max}) der bisher identifizierten drei Arten von Zapfen-Opsinen kann Tabelle 1.1 entnommen werden. Die Zapfen-Pigmente werden meist lediglich durch λ_{max} charakterisiert, da es sich gezeigt hat, dass die Absorptionsspektren aller drei Pigmente ungefähr dieselbe charakteristische Glockenform aufweisen, wenn man sie auf einer Wellenzahl-Skala plottet (Dartnall, 1953; siehe auch Abbildung 1.6). Dieses rein empirische Ergebnis kann theoretisch nicht begründet werden (Kaiser & Boynton, 1996; Stiles & Wyszecki, 1974). Daher ist das sogenannte *Dartnall-Nomogramm* zwar nützlich, bleibt jedoch nur eine Näherung an das wirkliche Spektrum des Pigments. Nur in der Nähe der Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit des Rhodopsins kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die Dartnall-Glockenkurve und das reale Spektrum des Sehfärbstoffes übereinstimmen. Neuere Studien ergeben, dass die Invarianz der Form der Kurve verbessert werden kann, wenn man statt Dartnalls Wellenzahl-Skala eine andere Skala, z.B. die vierte Wurzel der Wellenlänge (Barlow, 1982) oder die logarithmierte Frequenz (Mansfield, 1985), benutzt.

1.1.5 Theorie der Trichromasie

Nach dieser Einführung in die physiologischen Grundlagen des Farbsehens sollen nun ausgewählte Theorien zur Farbwahrnehmung dargestellt werden. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf den Rezeptorkurven-Theorien, die für die vorliegende Arbeit von wichtiger Bedeutung sind.

Bestimmung spektraler Empfindlichkeitskurven

Die sogenannten *Rezeptorkurven-Theorien* widmen vor allem der Bestimmung der Absorptionsspektren der verschiedenen Rezeptoren in der Retina große Aufmerksamkeit. Ziel ist es, durch den Vergleich der Rezeptorkurven (erhoben mit Hilfe unterschiedlicher Methoden) mit objektiven Eigenschaften der Zapfen Modelle zu entwickeln, mit deren Hilfe die Funktionsweise der retinalen Rezeptoren erklärt werden kann. Die trichromatische Theorie des Farbensehens, auch als Young-Helmholtz-drei-Komponenten-Theorie bezeichnet, nimmt die Existenz von drei unabhängigen Zapfenarten an, die jeweils unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit haben (z.B. Young, 1802a, 1802b, siehe auch Abschnitt 1.1.4).

Diese Trichromasie ist keine physikalische Eigenschaft des Lichts, sondern eine physiologische Einschränkung des Auges (Helmholtz, 1896; Young, 1802a, 1802b, 1807). Jede Farbwahrnehmung wird von nur drei physiologischen Antwortsystemen bestimmt. Zudem muss es eine lineare Transformation zwischen den Farbwertkurven (siehe Abschnitt 1.1) und den spektralen Empfindlichkeiten der drei physiologischen Systeme geben (Maxwell, 1855). Diesen Zusammenhang nutzen als erste König und Dieterici (1886) bei der Bestimmung der sogenannten *König-Fundamentals*. Diese spektralen Empfindlichkeitskurven für jede der drei Arten von Zapfen-Opsinen können in einem psychophysischen Farbabgleichsexperiment bestimmt werden. Sie geben die Wahrscheinlichkeit einer Photonenabsorption in Abhängigkeit von der Wellenlänge an. Die König-Fundamentals sind ein Versuch, einen Satz von drei spektralen Empfindlichkeitskurven für die Zapfen zu finden, die den realen Zapfen-Empfindlichkeiten möglichst genau entsprechen. Die klassischen König-Fundamentals nach Smith und Pokorny (1975) sind Abbildung 1.3 zu entnehmen. Sie basieren auf Farbwertkurven und Verwechslungslinien von Dichromaten (siehe Abbildung 1.5). Sie werden durch folgende Transformation der Judd/Vos modifizierten CIE-XYZ Farbwertkurven gewonnen (siehe Smith & Pokorny, 1975; Wyszecki & Stiles, 1982, S. 615):

$$\begin{aligned} S(\lambda) &= 0.00801\bar{z}(\lambda) \\ M(\lambda) &= -0.15514\bar{x}(\lambda) + 0.45684\bar{y}(\lambda) + 0.03286\bar{z}(\lambda) \\ L(\lambda) &= 0.15514\bar{x}(\lambda) + 0.54312\bar{y}(\lambda) - 0.03286\bar{z}(\lambda) \\ L(\lambda) + M(\lambda) &= V(\lambda) \end{aligned}$$

Mit Hilfe der trichromatischen Theorie lassen sich experimentelle Daten aus fovealen Farbabgleichen mit Hilfe additiver Farbmischung erklären, mit einigen zusätzlichen Annahmen auch experimentelle Daten zur Farbdiskrimination im Schwellenbereich (Wyszecki & Stiles, 1982). Die Theorie kann jedoch nicht erklären, wie Farbreize auf den Beobachter wirken. Dies kann durch die sogenannte *Gegenfarben-Theorie* besser erklärt werden. Die erste Gegenfarben-Theorie wird von E. Hering vorgeschlagen. Das farbliche Aussehen eines Reizes wird im Rahmen dieser Theorien nicht nur von der Erregung der drei Rezeptorarten bestimmt, sondern auch durch die Weiterverarbeitung der Rezeptorsignale beeinflusst. Dabei wird von antagonistischen Farbmechanismen auf höherer neuraler Ebene ausgegangen. Hering (1920) postuliert beispielsweise drei antagonistische Prozesse als Grundlage des Farbensehens, einen Rot-Grün-Prozess, einen Gelb-Blau-Prozess und einen Weiß-Schwarz-Prozess, wobei keine Farbe gleichzeitig beide Farbtöne des jeweiligen

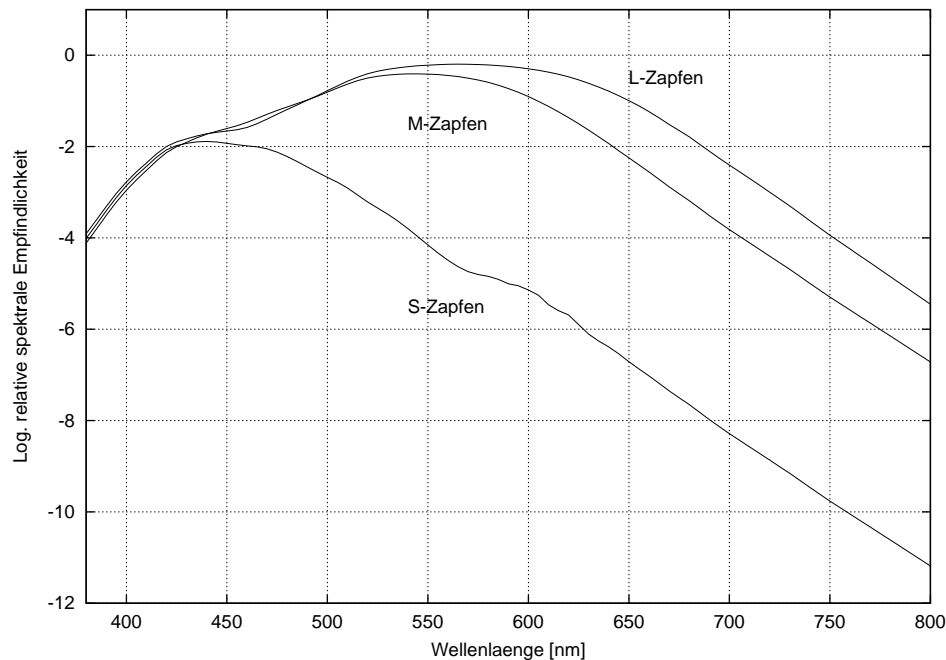


Abbildung 1.3: Die König-Fundamentals (spektrale Hellempfindlichkeitskurven) nach Smith und Pokorny (1975). Die logarithmische Skalierung der Ordinaten dient der Darstellung der großen Unterschiede zwischen den Empfindlichkeitsmaxima der Rezeptoren. Die relativen Maxima entsprechen in etwa den relativen Häufigkeiten der drei Rezeptorarten in der Fovea, dem Ort des schärfsten Sehens.

Antagonisten-Paaren annehmen kann. Diese drei Subsysteme erlauben drei Arten von Unterscheidungen: Hell-Dunkel, Gelb gegenüber Blau und Rot versus Grün. In Abhängigkeit von der Wellenlänge erzeugen diese Prozesse einander entgegengesetzte neurale Signale.

Dadurch kann die visuelle Erfahrung des Sehens einer Vielzahl von Farbtönen unterschiedlicher Helligkeit und Sättigung erklärt werden, die jedoch hinsichtlich der möglichen Kombinationen beschränkt sind: Die Eigenschaft Farbtöne und kann mit Hilfe der Farbnamen Rot, Gelb, Grün und Blau sowie durch die Zwischenfarbtöne Rotgelb, Gelbgrün, Blaugrün etc. beschrieben werden. Die Gegenfarben erklären die Tatsache, dass es andere Farbtöne, wie zum Beispiel rötliche Grüntöne oder gelbliche Blautöne, nicht gibt. Die von D. Jameson und Hurvich (1955, 1956) und Hurvich und D. Jameson (1955) ausführlich dargestellte Gegenfarben-Theorie wird unter anderem von D. Jameson und Hurvich (1964) und Shevell (1978, 1982) belegt, eine Axiomatisierung der Gegenfarben-Theorie kann Krantz (1975b) entnommen werden.

Für sich gesehen kann weder die ursprüngliche Theorie von Young und Helmholtz noch die Gegenfarbentheorie alle wichtigen Phänomene des Farbsehens erschöpfend erklären. Wenn man sie jedoch zu einer einzigen Theorie mischt, der *Zonentheorie*, dann können gute Vorhersagen für Farbabgleiche, Farbunterscheidung, Farbadaptation und weitere Experimente sowohl für Farbnormalsichtige als auch (von Geburt an) farbschwache Beobachter gemacht werden. Die Zonentheorie nimmt an, dass es in der ersten Zone drei

unabhängige Arten von Zapfen gibt. Diese Zone stimmt mit der grundlegenden Annahme der Trichromasie in der Young-Helmholtz-Theorie überein. In der zweiten Zone werden die Signale der Zapfen in einem neuronalen Netz kodiert, das drei neue Signale generiert: Ein achromatisches und zwei antagonistische chromatische Signale. Diese zweite Zone entspricht den Gegenfarbenprozessen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit gibt es noch weitere Zonen, über die jedoch noch keine Hypothesen bestehen.

Die realen Absorptionskurven der Zapfen-Photopigmente müssen aufgrund des Prinzips der Univarianz³ (Kaiser & Boynton, 1996; Rushton, 1972) linear mit den im Farbabgleichsexperiment bestimmten spektralen Hellempfindlichkeitskurven zusammenhängen, da Metamerie impliziert, dass für Test- und Vergleichsreiz alle drei Zapfenpigmente die selbe Anzahl von Photonen absorbieren (siehe Kaiser & Boynton, 1996; Wyszecki & Stiles, 1982). Unterschiedliche Herangehensweisen bei der direkten Charakterisierung der Zapfen durch ihre spektralen Empfindlichkeiten oder Absorptionsspektren sollen im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

Erfassung der Absorptionsspektren der Photopigmente

Die direkte Untersuchung dieser Sehpigmente hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht, nachdem zunächst lediglich indirekt von psychophysischen Farbmischungsexperimenten auf die Absorptionsspektren der Zapfen rückgeschlossen werden konnte. Bei Fischen und Schildkröten können mit Hilfe direkter Untersuchungsmethoden drei unterschiedliche Klassen von Farbrezeptoren isoliert werden. Experimente mit Hilfe der Methode der Suction Electrophysiology (siehe auch Abschnitt 1.1.5) stützen die Hypothese von drei Photopigmenten für das menschliche Farbsehen (Marks, Dobbie & MacNichol, 1964). Im folgenden sollen die drei wichtigsten direkten Verfahren zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit der Zapfen-Opsine näher erläutert werden: Die retinale Densitometrie, die Mikrospektrophotometrie und die Suction Electrophysiology.

Der Teil des Lichtes, der in das Auge einfällt und nicht von den Rezeptoren absorbiert wird, durchquert das Auge und wird von der Rückseite des Augapfels reflektiert. Wenn dieses Licht auf seinem Rückweg wiederum nicht von den retinalen Rezeptoren absorbiert wird, dann tritt ein Teil dieses Lichtes durch die Pupille wieder aus, wo es mit Hilfe eines Photometers gemessen werden kann. Da bei vollständig gebleichten Sehfärbstoffen nicht mehr weiter absorbiert werden kann, kann die Intensität des austretenden Lichtstrahles als Index für die Konzentration der Photopigmente in der Retina benutzt werden. Mit Hilfe dieser Technik der retinalen Densitometrie kann die Existenz der M- und der L-Photopigmente nachgewiesen werden (z.B. Campbell & Rushton, 1955; Rushton, Campbell, Hagins & Brindley, 1955; Weale, 1953), trotzdem handelt es sich um keine besonders empfindliche Methode: Beispielsweise gelingt keine Nachweise von S-Rezeptoren, außerdem können mit Hilfe dieser Technik lediglich die oberen Teile der spektralen Absorptionsfunktionen der Zapfen ermittelt werden.

Die retinale Densitometrie misst die spektrale Absorption der Zapfen *in situ*. Mit Hilfe der Mikrospektrophotometrie kann die Empfindlichkeit einzelner Zapfen *in vitro* ge-

³Das Prinzip der Univarianz besagt, dass die gleiche Anzahl absorbierter Photonen immer zu der selben Wahrnehmung führen muss, egal, welche Wellenlängen die Photonen hatten (Kaiser & Boynton, 1996).

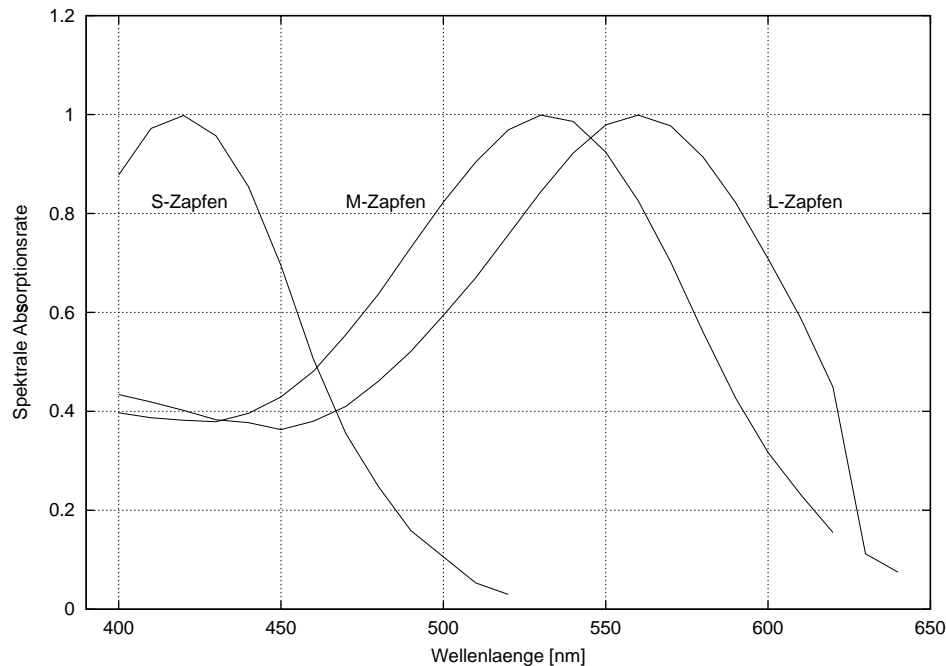


Abbildung 1.4: *Absorptionsspektren von menschlichen Zapfen*. Sie werden mit Hilfe der Methode Mikrospektrophotometrie *in vitro* aufgrund der Daten von sieben Versuchspersonen bestimmt. Die Empfindlichkeitsmaxima liegen bei 419.0 nm für die Kurzwellen-Zapfen, 530.8 nm für die Mittel- und 558.4 nm für die Langwellen-Zapfen. Nach Dartnall, Bowmaker & Mollon, 1983, Tabelle 2).

messen werden. Für eine Messung werden zwei dünne Lichtstrahlen durch ein Stück der Retina hindurchgeleitet, einer durch einen Rezeptor, der ungebleichten Sehfärbstoff enthält, der andere durch einen Bereich ohne Photopigment. Der Unterschied zwischen der Lichtmenge, die durch das Photopigment absorbiert wird und der des anderen Lichtstrahles kann dann als Maß für die spektrale Absorptionsrate des Zapfen-Opsins dienen. Durch *transversale* Messungen kann vermieden werden, dass der Lichtstrahl durch ein äußeres Segment fällt und dann weitere retinale Zellen reizt. Jedoch fallen Lichtstrahlen natürlicherweise *axial* ins Auge, daher müssen die Ergebnisse entsprechend korrigiert werden (Kaiser & Boynton, 1996). Die ersten Messungen an den Retinae von Primaten haben ergeben, dass es drei unterschiedliche Arten von Sehfärbstoffen gibt (Marks et al., 1964). Bowmaker und Dartnall (1980) können nachweisen, dass die drei unterschiedlichen Photopigmente auch in drei unterschiedlichen Arten von Zapfen liegen. Mit Hilfe der Mikrospektrophotometrie erheben Dartnall, Bowmaker und Mollon (1983) an sieben Menschen die Absorptionskurven aus Abbildung 1.4. Absorptionsmaxima ergeben sich bei 558.4 nm ($SD = 5.2$ nm) für 58 L-Zapfen, 530.8 nm ($SD = 3.5$ nm) für 45 M-Zapfen und 419.0 nm ($SD = 3.6$ nm) für 5 S-Zapfen. Die Übereinstimmung zwischen den mikrospektrophotometrischen Messungen und psychophysischen Ergebnissen ist für die L- und die M-Zapfen-Sehfärbstoffe relativ gut, für die S-Photopigmente jedoch weniger überzeugend. Es handelt sich bei den Werten für die Kurzwellen-Pigmente jedoch lediglich um die gemittelten Messungen an fünf Zapfen (Dartnall et al., 1983).

Tabelle 1.2: Häufigkeit von Farbfehlsichtigkeiten (nach Richter, 1981).

	Männer	Frauen
Monochromasie (beide Formen)	0.003%	
Protanopie	1.0 %	0.02 %
Deutanopie	1.1 %	0.02 %
Tritanopie	0.002 %	0.001 %
Protanomalie	1.0 %	0.02 %
Deuteranomalie	4.9 %	0.4 %
Tritanomalie	?	?

Die neueste direkte Methode zur Untersuchung der spektralen Absorptionseigenschaften der Photorezeptoren ist die Suction Electrophysiology. Dabei wird die elektrophysiologische Antwort, die elektrische Aktivität, des Rezeptors bei Reizung durch Licht gemessen (z.B. Kraft et al., 1990; Schnapf, Kraft & Baylor, 1987; Schnapf, Nunn, Meister & Baylor, 1990). Mit Hilfe dieses Verfahrens soll es möglich sein, sogar die Auswirkung einzelner absorbiertes Photonen auf den Rezeptor zu erfassen, ohne ihn zu beschädigen (Baylor, 1987). Baylor, Nunn und Schnapf (1987) nehmen an 5 S-Zapfen, 20 M-Zapfen und 16 L-Zapfen von *Macaca Fascicularis* mit Hilfe eines transversal durch die äußeren Segmente der Zapfen fallenden Lichtstrahls Messungen der spektralen Sensibilität vor. Die Werte für das Absorptionsmaximum λ_{max} sind 561 nm für L-Zapfen, 531 nm für die M-Zapfen und 430 nm für die S-Zapfen. Die mit Hilfe dieser Methode erhobenen Absorptionsspektren scheinen nicht nur weniger variabel zu sein, sie stimmen auch gut mit den Ergebnissen psychophysischer Experimente überein (Kaiser & Boynton, 1996).

Es hat sich eine weitgehende Übereinstimmung der Ergebnisse nicht nur unterschiedlicher physiologischer (indirekter) Messungen, sondern auch zwischen direkten und indirekten Verfahren ergeben (siehe z.B. Tabelle 1.1). Beispielsweise stimmen die König-Fundamentals nach Smith und Pokorny (1975) gut mit den spektralen Empfindlichkeiten der π -Mechanismen⁴ von Stiles (1959) überein, und auch die von Baylor, Nunn und Schnapf (1987) und Schnapf, Kraft und Baylor (1987) berichteten Absorptionsspektren der verschiedenen Zapfen-Pigmente ähneln ihnen stark.

Daraus kann geschlossen werden, dass (mindestens) drei unterschiedliche Mechanismen die Grundlage des Farbsehens bilden. Es wird normalerweise angenommen, dass es sich bei den drei Antwortsystemen um die drei Arten retinaler Photorezeptor-Zellen handelt. Bei direkter Erfassung der Absorptionskurven in vitro ergeben sich Empfindlichkeitsmaxima λ_{max} von 420 nm (S-Zapfen), 530 nm (M-Zapfen) und 558 nm (L-Zapfen). Wenn sie in vivo geschätzt werden, sind die λ_{max} in Richtung des langwelligen Bereiches verschoben und liegen bei ca. 440 nm für die S-, 545 nm für die M- und 565 nm für die L-Zapfen.

⁴Die π -Mechanismen (Stiles, 1959) sind aus den Schwellen für wahrnehmbare Inkremente abgeleitete retinale Reaktionssysteme, die mehrere verschiedene Pigmente enthalten können. Stiles (1959) nennt Belege dafür, dass mehr als drei verschiedene Arten von Farbpigmenten existieren.

Verschiedenste Arten, diese fundamentalen Empfindlichkeitsfunktionen von Zapfen zu bestimmen, führen also zu sehr ähnlichen Ergebnissen, deren geringe Unterschiede von Wyszecki und Stiles (1982, S. 633) diskutiert werden.

Trotz der vielfältigen Übereinstimmungen zwischen den auf unterschiedliche Weise bestimmten Absorptionsspektren der Zapfen-Pigmente gibt es zwischen den Individuen Unterschiede, die im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden sollen.

1.2 Individuelle Unterschiede des Farbensehens

Unter den möglichen individuellen Abweichungen des Farbensehens sind für die vorliegende Arbeit vor allem diejenigen Unterschiede zwischen Beobachtern von Interesse, die auf genetische Ursachen zurückgeführt werden können (siehe z.B. Nathans, Thomas et al., 1986; M. Neitz, J. Neitz & Jacobs, 1991). Die *Gene* (auch *Erbfaktoren* oder *Erbanlagen*) bilden den Genotypus eines Menschen, der den Phänotypus, das äußere Erscheinungsbild eines Individuums, entscheidend beeinflusst.

Es gibt sowohl bei Menschen als auch bei Affen Studien, die darauf hindeuten, dass im Falle des Farbensehens ein enger Zusammenhang zwischen dem Genotyp und dem Phänotyp eines Individuums besteht (z.B. Balding, Sjöberg, J. Neitz & M. Neitz, 1998; J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993). Mit Hilfe genetischer Analysen ist es also bis zu einem gewissen Grade möglich, Vorhersagen über das phänotypische Erscheinungsbild zu machen (Bieber, Werner, Knoblauch, J. Neitz & M. Neitz, 1998). Besonders deutlich wird dies bei der Vererbung von angeborenen Schwächen des Farbensehens.

1.2.1 Farbschwächen

Ein klassisches Beispiel für den Einfluss des Genotyps auf das phänotypische Farbsehen sind angeborene Farbschwächen. Dabei werden, entsprechend den drei Arten von Zapfen, auch drei Arten von Farbschwächen unterschieden, die in jeweils zwei unterschiedlichen Schweregraden auftreten können. Die vollständig ausgeprägte *Farbfehlsichtigkeit* führt zu dichromatischem Farbsehen, da angenommen wird, dass ein Zapfentyp ausfällt oder völlig fehlt. Dabei kommt es zu charakteristischen Verwechslungen bestimmter Farben, da sie für den Dichromaten gleich aussehen. Menschen, die die Farben auf den Linien in Abbildung 1.5 (oben links) als gleich aussehend bezeichnen, werden *Protanopen* genannt. Es wird angenommen, dass bei ihnen die L-Zapfen fehlen (Richter, 1981). Die zweite Gruppe von Farbfehlsichtigen, die *Deutanopen*, weisen die Verwechslungslinien in Abbildung 1.5 (unten links) auf, es wird jedoch angenommen, dass bei ihnen die M-Zapfen fehlen. Tritanopen können die Farben nicht unterscheiden, die in Abbildung 1.5 (oben rechts) auf einer Linie liegen, da ihnen vermutlich die S-Zapfen fehlen oder geschädigt sind. *Farbanomalien* mit geringerem Schweregrad führen zwar zu trichromatischem Farbsehen, es weicht jedoch in charakteristischer Weise von der Wahrnehmung Farbnormalsichtiger ab. Es wird angenommen, dass eine der drei Arten von Zapfen zwar vorhanden, aber nur eingeschränkt funktionsfähig ist. Farbschwächen und -anomalien sind im Farbmischungsexperiment gut erkennbar. Während anomale Beobachter lediglich andere Mischungsverhältnisse erzeugen als Normalbeobachter, stellen Dichromaten

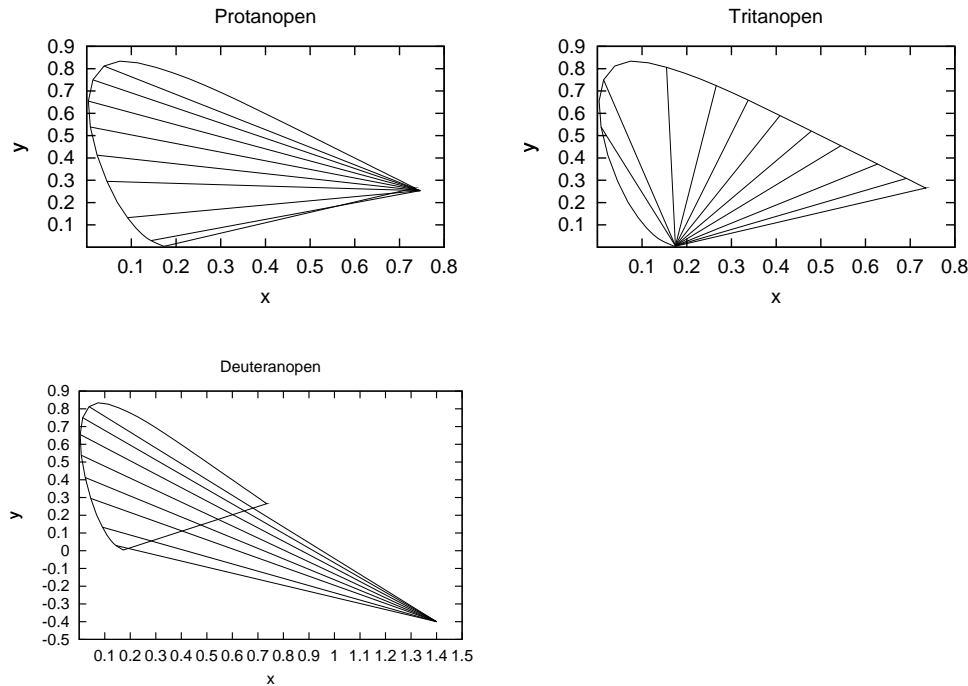


Abbildung 1.5: Verwechslungslinien von Protanopen, Tritanopen und Deuteranopen in der Normfarbtafel. Farben, die auf einer Verwechslungslinie liegen, werden von den Farbfehlsichtigen Probanden als gleich aussehend beurteilt.

eine Metamerie zu einer gegebenen nicht mit immer denselben Anteilen der Primärfarben, sondern durch viele verschiedene her, die für den Normalbeobachter nicht gleich aussehen.

Anhand von Tabelle 1.2 ist erkennbar, dass die verschiedenen Farbschwächen unterschiedlich häufig sind. Ursache dafür sind unterschiedliche Mechanismen, über die Farbschwächen vererbt werden. Die Opsine für die M- und die L-Zapfen sind auf dem X-Chromosom kodiert. Die Übertragung von Protanopie und Protanomalie sowie der Deuteranopie und der Deuteranomalie erfolgt daher als geschlechtsgebundene, jedoch rezessive Vererbung (Hurvich, 1981; Winderickx, Lindsey et al., 1992). Für die Deuteranomalie ist ein enger Zusammenhang zwischen der Farbschwäche und Veränderungen in den Genen festgestellt worden, die die M- und L-Opsine kodieren (Nathans, Piantanida, Eddy, Shows & Hogness, 1986). Die Schwere des Defektes hängt vom Grad der Ähnlichkeit zwischen den verbleibenden Photopigmenten ab (J. Neitz, M. Neitz & Kainz, 1996; Shevell, He, Kainz, J. Neitz, & M. Neitz, 1998): Je näher die Absorptionsmaxima λ_{max} der Photopigmente beieinander liegen, um so stärker ist die Beeinträchtigung der Farbwahrnehmung. Die Gene für die S-Opsine liegen nicht auf den Geschlechtschromosomen, was die annähernd gleiche Häufigkeit der Tritanopie bei Frauen und Männern erklären könnte.

Nachdem in diesem Kapitel die genetisch bedingten Unterschiede des Farbsehens bei

farbschwachen Beobachtern dargestellt worden sind, soll nun näher auf Unterschiede in der Farbwahrnehmung farbnormalsichtiger Personen eingegangen werden.

1.2.2 Allele Gene für das Farbsehen

Im Gegensatz zur genetischen Grundlage von Farbfehlsichtigkeiten sind individuelle Unterschiede in der Farbwahrnehmung bei farbnormalsichtigen Beobachtern eine relativ neue Entdeckung und noch weitgehend unerforscht. Unterschiedliche Studien haben ergeben, dass es zwar kleine, aber dennoch konsistente Unterschiede im Farbsehen von Beobachtern ohne erkennbare Farbschwächen gibt (z.B. Alpern, 1987; Jordan & Mollon, 1988).

Da sich in den meisten dieser Studien signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen bezüglich der Muster der Farbabweichungen ergeben (z.B. J. Neitz & Jacobs, 1986, 1990), wird vermutet, dass ähnlich dem Erbgang bei Farbschwächen (siehe Abschnitt 1.2.1), ein X-chromosomal vererbter genetischer Mechanismus für diese Abweichungen verantwortlich ist. Dabei stehen vor allem die auf dem X-Chromosom kodierten Gene für die M- und L-Zapfen-Photopigmente im Mittelpunkt des Interesses, da sie durch aneinander angrenzende Gene auf dem X-Chromosom kodiert werden (Nathans, Thomas et al., 1986; M. Neitz & J. Neitz, 1992, 1995). Schon durch Austausch weniger Aminosäuren in den Gensträngen können allelische Formen der Opsin-Gene erzeugt werden. An Position 180 von Exon 3 der menschlichen L- und M-Opsin-Gene können jeweils zwei unterschiedliche Aminosäuren vorkommen, entweder Serin oder Alanin (Merbs & Nathans, 1992a; Nathans, Thomas et al., 1986; J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993; Winderickx, Lindsey et al., 1992). Der Polymorphismus an Stelle 180 führt zu zwei Arten von L- und zwei Arten von M-Pigment in der farbnormalsichtigen Bevölkerung. Für das L-Opsin ist bei 56.3% der Menschen ist an Position 180 Serin (TCT), bei 43.7% der Menschen Alanin (GCT) kodiert (M. Neitz & J. Neitz, 1998; Winderickx, Lindsey et al., 1992; Winderickx, Battisti, Motulsky & Deeb, 1992). Höhere Sensibilität für rotes Licht korreliert hoch mit der Kodierung von Serin (J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993; Sanocki et al., 1993; Winderickx, Lindsey et al., 1992), daher wird angenommen, dass die Ersetzung von Ser¹⁸⁰ anstelle von Ala¹⁸⁰ für das L-Opsin eine Verschiebung des spektralen Maximums λ_{max} um ca. 6 nm in Richtung des langwelligen Bereiches verursacht (He & Shevell, 1994; Mollon, 1992; J. Neitz & Jacobs, 1986; M. Neitz, J. Neitz & Jacobs, 1991; Sanocki et al., 1993; Sanocki, Shevell & Winderickx, 1994). Es wird davon ausgegangen, dass die spektralen Empfindlichkeitsmaxima der L-Pigmente mit Alanin oder Serin an Position 180 bei 552 nm (Alanin) und 557 nm (Serin) liegen (siehe auch Tabelle 1.3).

Die Unterschiede in den Farbabweichungen farbnormalsichtiger Beobachter kommen mit hoher Wahrscheinlichkeit durch diese unterschiedliche Positionierung des Empfindlichkeitsmaximums der Zapfenpigmente zustande (Dartnall, Bowmaker & Mollon, 1983; J. Neitz & Jacobs, 1986, 1990). In der Studie von J. Neitz, M. Neitz und Jacobs (1993) kann anhand des Anteils an X-chromosomal vererbten Genen, die anstelle von Serin Alanin an Position 180 enthalten, 89% der beobachteten Varianz der Farbabweichungen der (männlichen) Versuchspersonen vorhergesagt werden. Dies stützt die Hypothese, dass der Polymorphismus an Position 180 für diese Stichprobe die einzige Ursache der Unterschiede zwischen den spektralen Positionen von M- und L-Zapfenpigmenten darstellt. Dies hat

sich für den Fall der L-Pigmente schon in der Studie von M. Neitz, J. Neitz und Jacobs (1991) gezeigt, in der die beiden polymorphen L-Pigmente als einzigen nicht-homologen Unterschied eine Serin/Alanin-Substitution an Position 180 aufweisen. Dies alles deutet darauf hin, dass es mindestens zwei Unterklassen von L- (und M-)Opsinen gibt, die nicht nur in den Genen kodiert sind, sondern auch synthetisiert werden und sich in den Farbrezeptoren der Retina ausprägen (z.B. Sjöberg, M. Neitz, Balding & J. Neitz, 1998). Da bei Farbnormalsichtigen ein hoher Anteil hybrider Gene vorhanden ist, handelt es sich offensichtlich um normale Variationen der Opsine, die nicht zu Farbschwächen oder Farbfehlsichtigkeiten führen (M. Neitz, J. Neitz & Grishok, 1995).

In der vorliegenden Arbeit werden lediglich allelische Formen der L-Zapfen-Opsin-Gene berücksichtigt, da der Alanin-Serin-Polymorphismus im Falle der L-Opsine besser untersucht ist (z.B. Merbs & Nathans, 1992a; M. Neitz, J. Neitz & Jacobs, 1991; J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993; Winderickx, Lindsey et al., 1992). Zudem liegen nur für die Allele des L-Opsin-Gens Befunde vor, die nicht mit Hilfe von Rayleigh-Farbabgleichen erhoben worden sind (siehe Abschnitt 1.2.5). Diese neuen Ergebnisse deuten auf Unterschiede im Verhalten hin, die mit hoher Wahrscheinlichkeit mit den beiden Formen des L-Opsins zusammenhängen (z.B. K.A. Jameson, Highnote & Wasserman, 2001, siehe auch Abschnitt 1.2.5).

Viele Studien, die die phänotypischen Auswirkungen genetischer Unterschiede in den Photopigmenten untersuchen, setzen den *Rayleigh-Farbabgleich* ein, um eine mögliche Verschiebung des Empfindlichkeitsmaximums λ_{max} nachzuweisen (z.B. Alpern, 1987; He & Shevell, 1994; Jordan & Mollon, 1988; J. Neitz & Jacobs, 1986, 1990). Der Beobachter soll in einem zweigeteilten, kreisförmigen Feld auf der einen Seite eine Mischung von zwei monochromatischen Primärfarben (Wellenlänge 650 nm und 550 nm), auf der anderen einen Vergleichsreiz von 590 nm Wellenlänge so einstellen, dass die Halbfelder hinsichtlich Farbe und Helligkeit genau übereinstimmen (Wyszecki & Stiles, 1982). Das Verhältnis von rotem zu grünem Licht hängt beim Rayleigh-Abgleich von den spektralen Empfindlichkeiten der L- und M-Zapfen ab. Mit Hilfe dieser Methode kann jedoch nicht zwischen einer Verschiebung des Empfindlichkeitsmaximums des M-Zapfen-Photopigmentes um 6 nm in Richtung des langwelligen Bereiches und einer 6-nm-Verschiebung von λ_{max} des L-Pigmentes in den langwelligen Bereich unterschieden werden. Es ist also anhand solcher Untersuchungen nicht erkennbar, welches der beiden X-chromosomal kodierten Pigmente in mehrfacher Ausführung vorhanden ist, ob der Proband nicht über vier unterschiedliche Pigmente verfügt und wie groß die Verschiebung des spektralen Empfindlichkeitsmaximums ist. Beispielsweise ergeben sich in der Untersuchung von J. Neitz und Jacobs (1986) lediglich Hinweise auf die Existenz zweier unterschiedlicher Zapfenmechanismen für den langwelligen Bereich, jedoch keine individuellen Unterschiede in den M-Zapfen-Pigmenten. Daher müssen zusätzlich zum Rayleigh-Abgleich immer genetische Analysen durchgeführt werden, um individuelle Unterschiede in den Farbabgleichen von Farbnormalsichtigen in Abhängigkeit von der genetischen Kodierung ihrer Opsine zu untersuchen (z.B. He & Shevell, 1994; Jordan & Mollon, 1988; J. Neitz & Jacobs, 1986, 1990). Jedoch ist die genetische Basis anderer Unterschiede zwischen den Pigmenten außer der Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit (z.B. die optische Dichte), die ebenfalls zum phänotypischen Farbsehen beitragen, noch weitgehend unerforscht.

1.2.3 Weibliche Heterozygote

Da die Gene für die Sehfärbstoffe auf dem X-Chromosom kodiert sind, kann es vorkommen, dass weibliche Individuen, die zwei X-Chromosomen besitzen, von ihren bezüglich des L-Opsins genetisch verschiedenen Eltern unterschiedliche Allele des L-Zapfen-Opsins erben. Diese für das Opsin-Gen als *heterozygot* bezeichneten Frauen verfügen in 50 % der X-Chromosomen über Serin an Position 180, in der anderen Hälfte über Alanin, da in jeder Zelle eines der beiden X-Chromosomen zufällig inaktiviert wird (Lyon, 1961). M. Neitz, Kraft und J. Neitz (1998) können für fünf von neun heterozygoten Frauen nachweisen, dass sie auf retinaler Ebene beide Allele des L-Opsins zu gleichen Teilen ausbilden. Der Nachweis von Unterschieden gelingt auch mit Hilfe des Rayleigh-Farbabgleiches: Tatsächlich stellen manche Frauen Farbabgleiche ein, die zwischen denen der beiden Gruppen von männlichen und homozygoten weiblichen Versuchspersonen liegen (J. Neitz & Jacobs, 1986, 1990). Obwohl die Unterschiede zwischen den Farbabgleichen der unterschiedlichen Gruppen nicht groß sind, überlappen die Abgleichsbereiche der Individuen aus den unterschiedlichen Gruppen nicht. Es ist also anzunehmen, dass heterozygote Frauen in der Retina zwei unterschiedliche Arten von L-Opsinen besitzen, bei denen an Position 180 entweder Serin oder Alanin liegt (Winderickx, Lindsey et al., 1992). Aufgrund dieser Befunde muss Tabelle 1.1 für Frauen, die für das L-Opsin heterozygot sind, entsprechend Tabelle 1.3 verändert werden.

Ein Grund, warum lediglich für das L-Zapfen-Opsin heterozygote Probandinnen in der vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden, ist die Tatsache, dass sie vermutlich wesentlich häufiger in der normalsichtigen Bevölkerung zu finden sind: Schätzungen zufolge haben lediglich 6% der Normalbeobachter Serin, jedoch 94% Alanin an Position 180 des M-Opsin-Gens, gegenüber einem Verhältnis von annähernd 1:1 im Falle des L-Opsin-Gens (M. Neitz & J. Neitz, 1998; Sharpe et al., 1998; Winderickx, Battisti et al., 1992; Winderickx, Lindsey et al., 1992). Dies führt zu Schätzungen, wonach bis zu 47% der weiblichen Bevölkerung für das L-Zapfen-Opsin heterozygot sind. Außerdem scheint die Ersetzung von Serin durch Alanin im L-Opsin zu einer größeren Verschiebung von λ_{max} zu führen, als die Ersetzung von Serin durch Alanin im M-Opsin (Sanocki et al., 1993). Es wären daher für den Fall alleler L-Photopigmente nicht nur größere Unterschiede zwischen den Probanden zu erwarten, sondern der Abstand zwischen den Empfindlichkeitsmaxima der Photopigmente wäre möglicherweise groß genug, um einen vierdimensionalen Farbraum für heterozygote Probandinnen (siehe Abschnitt 1.2.3) zu begründen.

Mit Hilfe des Dartnall-Nomogramms, das in Abschnitt 1.1.4 näher beschrieben ist, können die Absorptionsspektren von Opsinen mit beliebigem λ_{max} graphisch veranschaulicht werden. In Abbildung 1.6 werden die Empfindlichkeitsmaxima aus Tabelle 1.3 verwendet, um die unterschiedliche Lage der angenäherten Absorptionskurven der Zapfen-Pigmente darzustellen.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass zusätzlich zum Vorhandensein der beiden allelischen Formen der L-Opsin-Gene bestimmte Gruppen von farbnormalsichtigen Beobachtern über mehr als drei Gruppen retinaler Farbrezeptoren verfügen. Dann kann die Hypothese von drei unterschiedlichen Zapfen-Photopigmenten im menschlichen Auge nicht als Erklärung für das trichromatische Farbsehen dienen. Im nächsten Abschnitt wird aufgezeigt, wie stark sich schon solche vergleichsweise kleinen genetischen

Tabelle 1.3: Farbrezeptoren weiblicher Heterozygoter für das L-Opsin (nach Winderickx, Lindsey et al., 1992).

Zapfenart	Bereich der höchsten Empfindlichkeit	λ_{max}
S-Zapfen	Kurzwelliger Bereich	440 nm
M-Zapfen	Mittlerer Wellenlängenbereich	530 nm
L-Zapfen (Alanin)	Langwelliger Bereich	552 nm
L-Zapfen (Serin)	Langwelliger Bereich	557 nm

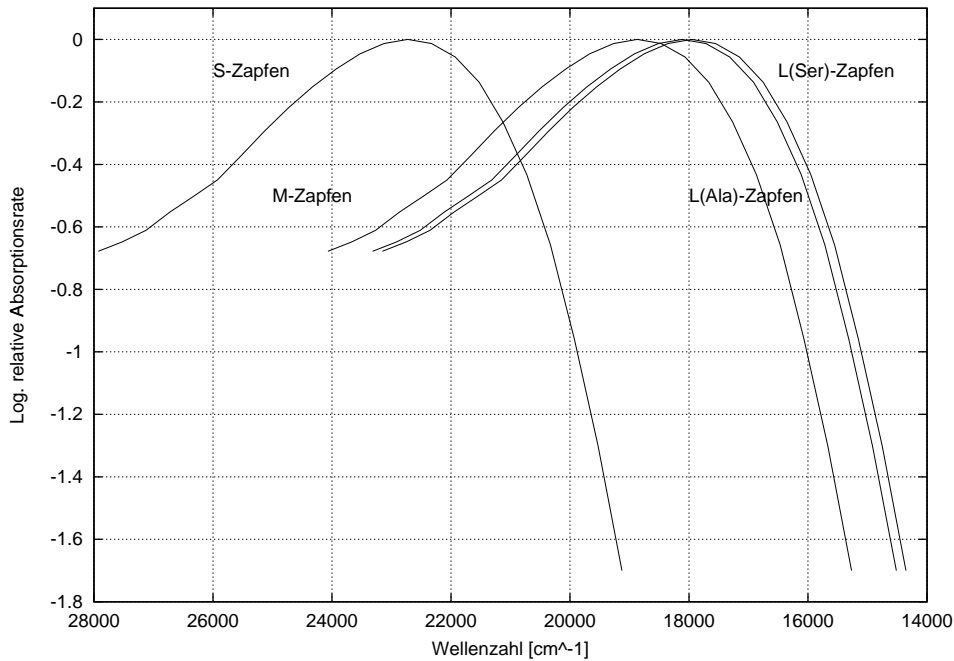


Abbildung 1.6: *Approximierte spektrale Absorptionsraten für die Photopigmente der Zapfen.* Angegeben sind die Absorptionsraten für die Photopigmente der S-Zapfen, der M-Zapfen und der L-Zapfen mit Alanin und Serin an Position 180. Die Empfindlichkeitsmaxima der Pigmente liegen hier bei 440 nm (S-Zapfen), 530 nm (M-Zapfen), 552 nm (L^{Ala} -Zapfen) und 557 nm (L^{Ser} -Zapfen). Die Approximation ist Hilfe des Dartnall-Nomogramms für Rhodopsin (Dartnall, 1953, nach Tabelle 1(8.2.3) in Wyszecki & Stiles, 1982) durchgeführt.

Unterschiede auf das phänotypische Farbsehen auswirken können. Die dargestellten Befunde zeigen, dass der Austausch von nur einer Aminosäure dazu führen kann, dass sich das Farbsehen enorm verändert: Bei den weiblichen heterozygoten Individuen bestimmter Affenarten kommt es sogar zu einer Erweiterung des Farbsehens um eine Dimension, es ist nicht mehr di-, sondern trichromatisch. Auch im Falle menschlicher Versuchspersonen zeigen sich genetisch bedingt deutliche Veränderungen der Farbwahrnehmung, die unter Umständen bei heterozygoten weiblichen Probanden zu einer erwei-

terten Farbwahrnehmung führen könnten (siehe Abschnitt 1.2.5).

1.2.4 Trichromasie bei dichromatischen Affenarten

Die meisten Säugetiere sind Dichromaten, verfügen also lediglich über einen zweidimensionalen Farbraum. Ihr Farbsehen wird durch den Vergleich der Signale von zwei Klassen von Rezeptoren erreicht: S-Zapfen (maximale Empfindlichkeit λ_{max} im kurzwelligen Bereich) und M-/L-Zapfen mit maximaler Empfindlichkeit λ_{max} im Bereich zwischen 500 und 570 nm (Dulai, Bowmaker, Mollon & Hunt, 1994).

Das trichromatische Farbsehen bei Affen wird durch zwei unterschiedliche genetische Mechanismen vermittelt (Hunt et al., 1998): Bei den Altwelt- oder Schmalnasenaffen (Catarrhini), die in Afrika und Asien leben und zu denen auch die Menschenaffen gehören, wird der dreidimensionale Farbraum durch eine Kombination von *drei* Arten von Farbrezeptoren erreicht: Kurzwellen-(S-)Zapfen, M-Zapfen, deren größte Empfindlichkeit λ_{max} im mittleren Wellenlängenbereich bei ungefähr 530 nm liegt, und Sensoren für den langwelligen Bereich ($\lambda_{max} \approx 560$ nm) (Dulai et al., 1994; Nathans, Thomas et al., 1986).

Die Neuwelt- oder Breitennasenaffen (Platyrrhini) mit Verbreitungsgebiet Mittel- und Südamerika verfügen jedoch nur über ein Gen für die Photopigmente mit maximaler Empfindlichkeit im mittel- und langwelligen Bereich des Spektrums. Von diesem Gen gibt es drei Allele mit unterschiedlichen Empfindlichkeitsmaxima (Dulai et al., 1994; Hunt et al., 1998). Bei diesen Spezies, zu denen beispielsweise die Krallenaffen und die Kapuzineraffen gehören, ist trichromatisches Farbsehen nur bei weiblichen Tieren möglich, da nur sie über zwei X-Chromosomen verfügen, auf denen jeweils ein anderes Allel des M/L-Pigments kodiert sein kann. Diese weiblichen Affen sind also für das M/L-Opsin-Gen heterozygot (siehe auch Abschnitt 1.2.3). Die zufällige Inaktivierung eines der beiden X-Chromosomen in jeder Zelle (Lyon, 1961) führt dann dazu, dass die Tiere über zwei unterschiedliche M-/L-Photopigmente verfügen (z.B. Hunt et al., 1998; Tovée, Bowmaker & Mollon, 1992), in jeweils der Hälfte der retinalen Zellen über das eine, in der anderen Hälfte über das andere Photopigment. Solche Tiere haben nicht nur drei genetisch festgelegte Sehfärbstoffe, sondern sie verhalten sich auch wie Affen mit trichromatischem Farbsehen (Tovée et al., 1992). Bei männlichen Tieren mit nur einem X-Chromosom ist in den Genen lediglich ein S-Opsin und eines der drei polymorphen M-/L-Opsine kodiert. Daher bilden sie nur zwei unterschiedliche Zapfen-Sehfärbstoffe aus und sind Dichromaten (Hunt et al., 1998). Auch bei diesen Affen unterscheiden sich, ähnlich wie beim Menschen (siehe Abschnitt 1.2.2), die polymorphen Varianten der M-/L-Opsin-Gene nur in einem einzigen Genort voneinander (Tovée et al., 1992).

Unter Berücksichtigung der Befunde bei weiblichen dichromatischen Affen scheint es durchaus möglich, dass ähnliche Mechanismen auch beim Menschen dazu führen, dass weibliche Heterozygote über ein um eine Dimension erweitertes, also tetrachromatisches Farbsehen verfügen.

1.2.5 Tetrachromasie bei Menschen

Ähnlich wie im Falle der Affen könnte es auch bei Menschen unter bestimmten Umständen zur Erweiterung des Farbsehens um eine Dimension kommen. Schon relativ früh wur-

den bei der Bestimmung der Absorptionsspektren der Zapfen große Parallelen zwischen dem visuellen System der Makaken, die ebenfalls zu den Altweltaffen gehören, und dem des Menschen entdeckt (DeValois & Jacobs, 1968; DeValois, Morgan, Polson, Mead & Hull, 1974). Es können in diesem Zusammenhang nicht nur große physiologische Ähnlichkeiten nachgewiesen werden, es ergeben sich auch hohe Übereinstimmungen zwischen psychophysischen Experimenten an Makaken und an Menschen. Außerdem kann mit Hilfe der Suction Electrophysiology gezeigt werden, dass die M- und L-Zapfen bei Menschen und Makaken sehr ähnliche spektrale Empfindlichkeiten aufweisen (Kraft et al., 1990; Schnapf, Kraft & Baylor, 1987). Aufgrund dieser Übereinstimmungen besteht die Möglichkeit, dass es, entsprechend den Mechanismen bei trichromatischen weiblichen Neuweltaffen, auch bei menschlichen Heterozygoten für das L-Opisin zu vierdimensionalem Farbsehen kommen kann, das sich in verändertem Verhalten der Probanden manifestiert.

Entgegen der landläufigen Meinung, dass auch bei Vorhandensein eines vierten Zapfen-Photopigments vollständiges vierdimensionales Farbsehen nicht möglich ist, da die postrezeptoralen Systeme unfähig sind, mehr als drei unabhängige Farbsignale zu übertragen (siehe z.B. Sharpe, Stockman, Jägle & Nathans, 1999), wurde immer wieder nach potentiellen Tetrachromaten gesucht. Der Hauptgrund für die Annahme, dass es unabhängig von eventuellen Einschränkungen auf höherer Ebene zu einer Erweiterung des Farbsehens kommen kann, sind die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Experimente mit dichromatischen Affen. Bei einigen Spezies gibt es einen hohen Anteil weiblicher heterozygoter Individuen mit trichromatischem Farbsehen (Tovée et al., 1992), abhängig davon, wie viele Allele der Farbrezeptoren mit unterschiedlichen Empfindlichkeitsmaxima es gibt. Dies lässt es möglich erscheinen, dass sich auch bei Menschen ähnliche Mechanismen auswirken könnten.

Zunächst wurde angenommen, dass die weiblichen Überträgerinnen von Farbschwächen, die selbst über weitgehend normales Farbsehen verfügen, *Tetrachromaten* sein könnten. Auf einem der X-Chromosomen dieser Frauen ist das geschädigte Gen für das Farbsehen kodiert, auf dem anderen liegt ein gesundes Gen. Daher bestünde die Möglichkeit, dass sie auf retinaler Ebene über vier unterschiedliche Farbrezeptoren verfügen. Diese Hypothese kann jedoch in der Studie von Jordan und Mollon (1993) nicht bestätigt werden.

In neuerer Zeit sieht man die in Abschnitt 1.2.3 ausführlich beschriebenen weiblichen Heterozygoten für das L-Opisin als möglicherweise tetrachromatisch an. Schon in einem Experiment von Smeulders, Campbell und Andrews (1994) zeigt sich, dass Frauen unter Umständen über ein besseres Farbdiskriminationsvermögen verfügen als Männer: Dazu wird das Spektrum durch dünne schwarze Linien unterteilt. Die Versuchspersonen werden gefragt, ob zwei markierte, aneinander angrenzende Farbtöne gleichfarbig aussehen oder nicht. Wenn die Probanden angeben, sie sähen gleich aus, wird eine Markierung ein Band weiter in Richtung kürzerer Wellenlänge verschoben, die andere bleibt fest. Die Anzahl der Bänder, zwischen denen ein Farbunterschied wahrgenommen worden ist, wird gezählt, über fünf Durchgänge gemittelt und gegen die Anzahl der vorhandenen Linien geplottet. Es zeigt sich, dass in Abhängigkeit von der Anzahl der vorgegebenen Einteilungen mehr und mehr Farbbänder unterschieden werden können: Die durchschnittliche Anzahl wahrgenommener Farbtöne steigt anfangs annähernd linear mit der Anzahl der

vorgegebenen Einteilungen. Mit zunehmender Dichte der vorgegebenen Einteilungen jedoch erreicht die Krüve ein Maximum, das bei ungefähr 30 Farbtönen liegt (Smeulders et al., 1994). Der Graph ist für einen protanopen männlichen Beobachter signifikant flacher und die Gesamtzahl der wahrgenommenen Farbtöne deutlich geringer als die der anderen Probanden. Weiterhin fällt auf, dass die einzige weibliche Probandin signifikant mehr unterschiedliche Farbtöne im Spektrum wahrnimmt als die drei männlichen farbnormalen Probanden. Auch hier wird die Hypothese aufgestellt, das abweichende Verhalten der weiblichen Probandin könne genetisch bedingt sein.

Die Studie von K.A. Jameson, Highnote und Wasserman (2001) erweitert die frühere Studie von Smeulders et al. (1994). Es zeigen sich Unterschiede im Farbsehen zwischen für das L-Opsin-Gen heterozygoten und homozygoten Frauen. Dieser Nachweis gelingt unter Benutzung einer vergleichsweise einfachen Versuchsanordnung, die sich an Smeulders et al. (1994) anlehnt: Mit Hilfe eines Brechungsgitters wird Licht in seine spektralen Komponenten zerlegt und als „Regenbogen“ auf einer Projektionsfläche abgebildet. Aufgabe der Probanden ist es, in dem Spektrum die Grenzen zwischen den von ihnen wahrgenommenen Farbtönen mit Hilfe horizontaler Striche zu kennzeichnen. Es wird angenommen, dass die Fähigkeit, im Spektrum unterschiedliche Bereiche gleichen Farbtönen wahrzunehmen und zu kennzeichnen, direkt mit der Entdeckung und Unterscheidung wahrnehmbarer Unterschiede (*noticeable differences*) zusammenhängt. Bei sämtlichen Versuchspersonen werden vor Beginn der Versuche mit Hilfe von Genanalysen festgestellt, ob sie genetisch homo- oder heterozygot für die L-Zapfen-Pigmente sind. Weder sie selbst noch die Versuchsleiter werden über die Ergebnisse der Analysen informiert. Im Nachhinein werden die Versuchspersonen entsprechend ihrer Gene für die L-Opsine in drei Gruppen eingeteilt: Weibliche Heterozygote für das L-Opsin, weibliche Homozygote für das L-Opsin und männliche Probanden. Außerdem wird eine Gruppe von farbenblinden Männern untersucht. Es zeigt sich, dass die farbenblinden Männer signifikant weniger Farbtöne wahrnehmen als die anderen Probanden. Auch zwischen den homozygoten Frauen und den Trichromaten (männlich und weiblich) können signifikante Unterschiede nachgewiesen werden. Besonders wichtig ist jedoch, dass sich auch zwischen weiblichen Homozygoten und weiblichen Heterozygoten signifikante Unterschiede ergeben. Es wird daher von den Autorinnen angenommen, dass die Anzahl der markierten spektralen Bänder systematisch mit der Anzahl der ausgeprägten Photopigmente variiert.

Diese Studien legen nahe, dass sich auch im Farbabgleichsexperiment Unterschiede zeigen könnten, falls man den Frauen mit vier Sehfärbstoffen entsprechend mehr Primärreize zur Verfügung stellt. Dass sich bisher noch keine solchen Unterschiede gezeigt haben, könnte auch auf ein methodisches Problem zurückgeführt werden: Im klassischen Farbmischungsexperiment können normalerweise nur drei Primärreize in ihrer Intensität variiert werden. Die Zufriedenheit mit dem hergestellten Abgleich wird zudem oft nicht mit erhoben. Daher könnten heterozygote Frauen, die zwar eindeutige, reproduzierbare Abgleiche mit drei Primärfärbstoffen herstellen können, diese aber nicht als metamer zum Testreiz beurteilen würden, auch aus diesem Grunde unentdeckt geblieben sein.

Eine weitere Ursache, warum ein möglicherweise abweichendes Verhalten von Probandinnen mit mehr als drei Sehfärbstoffen übersehen worden ist, könnte nach Meinung von K.A. Jameson et al. (2001) auch in den eingeschränkten Beobachtungsbedingungen im

klassischen Farbmischungsexperiment zu suchen sein: Meist werden die Farbreize mit nur einem Auge betrachtet, statt beidäugig, wie bei K.A. Jameson et al. (2001). Außerdem geben sie an, dass in den meisten Farbabgleichsexperimenten eine zu wenig komplexe Reizgrundlage dargeboten wird: Die Darbietung eines Standard- und eines Vergleichsreizes in getrennten Feldern, zwischen denen ein Abgleich hergestellt werden muss, erlaubt keine gute Näherung an die visuelle Verarbeitung, die bei Betrachtung komplexer Szenen in der Natur stattfindet. Das Spektrum als komplexer Farbreiz von unterschiedlicher Leuchtdichte ist nach K.A. Jameson et al. (2001) deutlich realitätsnäher.

Daher ist eine Untersuchung heterozygoter Probandinnen mit weitergehenden Wahrnehmungsexperimenten unter Zugrundelegung der im nächsten Abschnitt formulierten Hypothesen lohnenswert.

1.3 Fragestellung und Hypothesen

Mit Hilfe eines Vorversuches, der sich an K.A. Jameson et al. (2001) anlehnt, sollen geeignete Probanden ausgewählt werden, die dann im Hauptversuch hinsichtlich ihres Verhaltens im Farbmischungsexperiment näher untersucht werden. Mit Hilfe der vier Durchgänge des Vorversuches soll zwischen Versuchspersonen, die besonders wenige Bereiche innerhalb des Spektrums erkennen (unterdurchschnittlich spektralempfindliche Probandinnen) und solchen, die besonders viele Grenzen im Spektrum erkennen können (überdurchschnittlich spektralempfindlich) unterschieden werden.

Von den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen weiblichen Probanden wird angenommen, dass sie normale Trichromaten sind (K.A. Jameson et al., 2001). Die Tatsache, dass besonders viele Bereiche im Spektrum gekennzeichnet werden, korreliert nach K.A. Jameson et al. (2001) hoch mit vier in den Genen kodierten Rezeptoren. Die (vermuteten) weiblichen Homozygoten sollen ähnlich viele Farbtöne wahrnehmen können wie die (nicht-farbenblinden) männlichen Probanden. Die (vermuteten) weiblichen Heterozygoten sollen das Spektrum in deutlich mehr wahrgenommene Bereiche einteilen als die männlichen Versuchspersonen. Ein Teil der so in Gruppen eingeteilten Versuchspersonen soll dann im Hauptversuch in einem Farbmischungsexperiment näher untersucht werden.

Im Hauptversuch soll geklärt werden, ob die vermutete Tetrachromasie der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Gruppe auch zu verändertem Verhalten im Farbmischungsexperiment führt. Eventuell mischen diese (vermuteten) Tetrachromaten nicht nur anders als die (vermuteten) Trichromaten, sondern verfügen sogar über einen vierdimensionalen Farbraum, der es ihnen ermöglicht, eindeutige und reproduzierbare Farbabgleiche mit Hilfe von vier Primärfarben zu erzeugen. Solche *tetrachromatischen Farbabgleiche* schlagen schon Wyszecki und Stiles (1982) vor, systematische Untersuchungen tetrachromatischer Farbabgleiche zur Untersuchung des Einflusses der Stäbchen liegen bereits von Trezona (z.B. 1973, 1974) vor. Die Vergleichsgruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden sollte nur mit drei Primärfarben eindeutige Abgleiche erzeugen, vier Primärfarben sollten nicht in reproduzierbarer Weise benutzt werden können. Dies sollte sich vor allem durch eine deutlich größere Varianz der Farbabgleiche zeigen.

Unter Umständen führen Unterschiede in der Anzahl der genetisch kodierten Rezeptoren

selbst dann nicht zu einem mehr als dreidimensionalen Farbraum, wenn aus ihnen ausreichend viele Rezeptoren mit ausreichend großem Abstand des Empfindlichkeitsmaximums in der Retina resultieren: Es wäre möglich, dass nur auf retinaler Ebene vier Arten von Rezeptoren vorkommen, die sich dann jedoch nicht mehr auswirken, da die entsprechenden neuronalen Verschaltungen auf höherer Ebene nicht mehr vorliegen. Eventuell zeigen sich jedoch weitere Verhaltensunterschiede zwischen den Versuchspersonengruppen, die auf ein verändertes Verhalten der potentiellen Tetrachromaten schließen lassen.

Diese Hypothesen sollen mit Hilfe der im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuchsausrüstung untersucht werden.

Kapitel 2

Experimentelles Vorgehen

2.1 Der Vorversuch

Mit Hilfe des Vorversuches soll eine Einteilung der Versuchspersonen in Gruppen von unterdurchschnittlich spektralempfindlichen und überdurchschnittlich spektralempfindlichen weiblichen Probanden erfolgen. Die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden kennzeichnen besonders wenige Bereiche im Spektrum. Dies korreliert hoch mit drei unterschiedlichen genetisch kodierten Opsinen für das Farbsehen (K.A. Jameson et al., 2001). Die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden kennzeichnen überdurchschnittlich viele Bereiche im Spektrum, was nach K.A. Jameson et al. (2001) hoch mit vier unterschiedlichen, in den Genen kodierten Zapfenopsinen korreliert. Die männlichen Probanden werden nicht näher untersucht, da davon ausgegangen wird, dass sie aufgrund des fehlenden zweiten X-Chromosoms nicht bezüglich der L-Opsine-Gene heterozygot sein können und die Einbeziehung männlicher Probanden in der Gruppe der unterdurchschnittlich Spektralempfindlichen eine zusätzliche Varianzquelle darstellen würde. Der Vorversuch wird in Anlehnung an K.A. Jameson et al. (2001) und Smeulders et al. (1994) durchgeführt. Mit Hilfe der hier erhobenen Daten sollen mögliche Tetrachromaten von Trichromaten unterschieden werden können.

2.1.1 Versuchspersonen

Am Vorversuch nehmen 74 Versuchspersonen teil, davon sind 53 weiblich und 21 männlich. Ihr Alter liegt zwischen 19 und 58 Jahren. Der Median des Alters der Versuchspersonen liegt bei 22.

Dabei handelt es sich vorwiegend um Studentinnen und Studenten der Psychologie an der Universität Regensburg. Jeder Proband absolviert vier Versuchsdurchgänge, während derer die wahrgenommenen Grenzen zwischen den Farben im Spektrum gekennzeichnet werden. Außerdem wird im Rahmen des Vorversuchs eine Testung des Farbsehens mit Hilfe der Ishihara-Tafeln 1 bis 17 (Ishihara, 1968) und des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests (Farnsworth, 1957) vorgenommen.

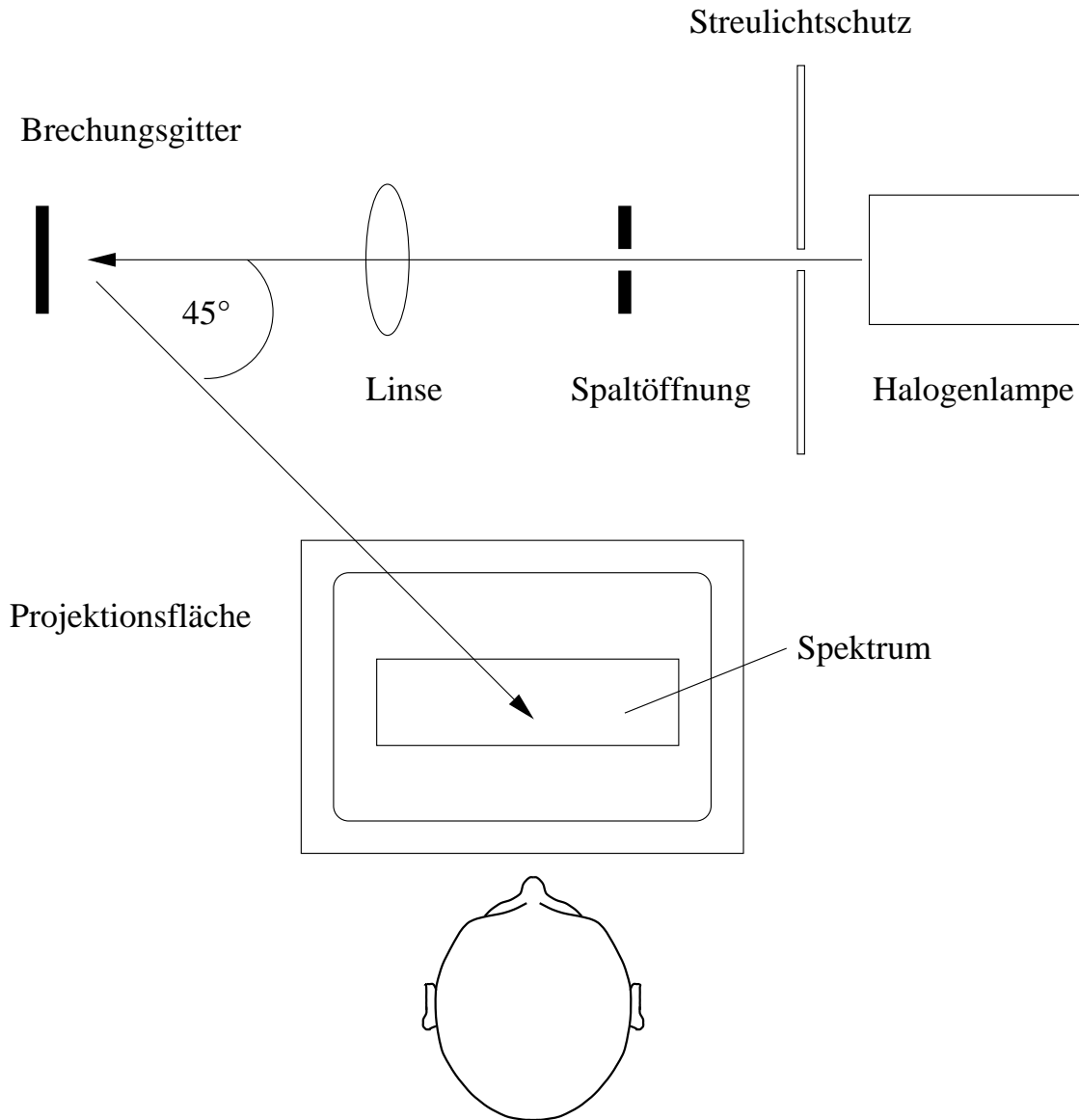


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für den Vorversuch. Die Abbildung zeigt die wichtigsten Bestandteile des Versuchsaufbaus. Die Versuchsperson betrachtet ein auf ein Blatt Papier projiziertes Spektrum, das von ihr als „Regenbogen“ wahrgenommen wird. Das Spektrum wird aus dem Licht einer Halogenlampe mit Hilfe eines Brechungsgitters erzeugt.

2.1.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau im Vorversuch kann Abbildung 2.1 entnommen werden. In dieser Versuchsanordnung wird das gebündelte Licht einer Halogenlampe, das durch eine 0,5 mm breite Spaltöffnung fällt, mit Hilfe einer optischen Linse auf ein Brechungsgitter abgebildet. Durch das Brechungsgitter wird das weiße Licht in seine spektralen Komponenten zerlegt, die dann auf ein weißes, nichtreflektierendes Blatt Papier projiziert werden. Vor dieser senkrechten Projektionsfläche sitzt die dunkeladaptierte Versuchsperson. Ihre Auf-

gabe ist es, mit Hilfe eines feinen (Druck-)Bleistiftes ohne weitere Hilfsmittel die Grenzen zwischen den von ihr im Spektrum wahrgenommenen Farbbereichen einzuzeichnen.

Bei der *Lichtquelle* handelt es sich um eine Quarz-Wolfram-Halogenlampe mit 100 Watt Leistung, die auch im Hauptversuch verwendet wird (siehe auch Abschnitt 2.2.2). Eine solche Lampe wird gewählt, weil sie in unterschiedlicher Hinsicht nur geringen Schwankungen unterliegt: Ihre spektrale Leistung schwankt nur wenig, die zeitliche Veränderung der Lichtausbeute ist ebenfalls begrenzt. Die Strahlstärke steigt jedoch im sichtbaren Bereich systematisch an (siehe Abbildung 2.4). An der Austrittsöffnung für das Licht befindet sich ein Pyrex-Kondensator F/0.85 vom Hersteller *L. O. T. Oriol* mit einem Durchmesser von 33 mm. Damit soll das austretende Licht zu parallelen Strahlen gebündelt werden. Da das Spektrum des erzeugten Lichtes von der Betriebsspannung der Lampe abhängt, erfolgt die Stromversorgung der Lampe über ein spezielles stabilisiertes Netzteil (*Schaltnetzteil SPS 9001* von *ELV*).

Durch den *Streulichtschutz*, eine schwarze Blende mit einer rechteckigen Öffnung (Höhe 5 cm, Breite 1 cm) für den Lichtstrahl, soll der Querschnitt des das optische System durchsetzenden Lichtbüschels begrenzt werden beziehungsweise Randstrahlen abgeblendet werden. Da in Abhängigkeit vom Ort, an dem die Blende steht, auch die Abbildung unterschiedlich ausfällt, wird die Blende im Abstand von 6 cm von der Lichtquelle zwischen Lichtquelle und Spaltöffnung aufgestellt. Der Abstand zwischen Blende und Spalt beträgt 3 cm.

Durch die Größe der eigentlichen *Spaltöffnung* wird zusammen mit der Entfernung der Projektionsfläche vom Gitter die Feinheit der Auflösung des Spektrums in unterschiedliche Komponenten bestimmt. Je enger der Spalt, desto feiner wird die Auflösung. Für die vorliegende Arbeit wird eine Spaltbreite von 0.5 mm gewählt, da das resultierende Spektrum so eine Breite von ca. 30 cm und eine Länge von ca. 19 cm hat, also bequem auf ein DIN-A-4 Blatt abgebildet werden kann. Dies wird für den vorliegenden Zweck als ausreichend erachtet, da lediglich interpretiert werden soll, welche der weiblichen Probanden hinsichtlich der Anzahl der wahrgenommenen Farbtöne im Spektrum den männlichen Probanden entsprechen, und welche deutlich mehr Farben wahrnehmen.

Bei der *Abbildungslinse*, die im Abstand von 9 cm von der Spaltöffnung entfernt aufgestellt ist, handelt es sich um eine Sammellinse vom Hersteller *Rodenstock* mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Brennweite von $f = 90$ mm. Ca. 17 cm von der Linse entfernt ist das gewinkelte *Brechungsgitter* ($\theta_{Blaze} = 45^\circ$ bei 500 nm, Hersteller *Edmund Scientific*, Auflösung 1200 Striche pro mm) aufgestellt. Es zerlegt das Licht in seine spektralen Komponenten und lenkt den Lichtstrahl um einen Winkel von 45° bei 550 nm ab.

Dann fällt das Licht auf eine ca. 70 cm entfernte, weiße *Projektionsfläche*, die aus hochwertigem, nicht glänzendem Papier (Format DIN A 4) der Marke *Quorum* besteht und in einer Höhe von 1.20 m (Augenhöhe der sitzenden Versuchsperson) angebracht ist. Diese Papiersorte wird gewählt, da sie alle Komponenten des sichtbaren Spektrums in annähernd gleicher Art und Weise reflektiert (siehe Abbildung 2.2). Dadurch sollen Verfälschungen der Versuchsergebnisse durch Variationen der Remission der Projektionsfläche in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen weitgehend ausgeschlossen werden. Das Transmissionsspektrum der Projektionsfläche kann Abbildung 2.2 entnommen wer-

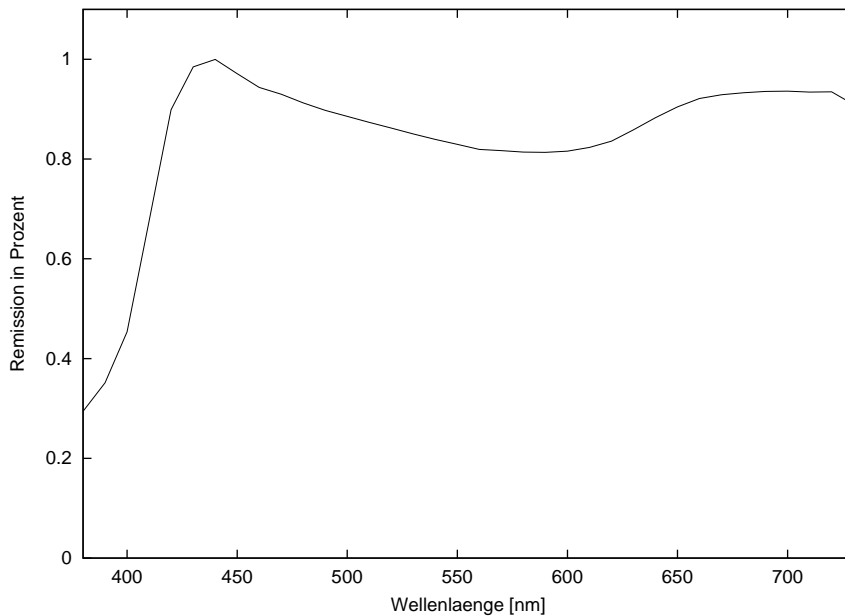


Abbildung 2.2: *Remissionsspektrum der Projektionsfläche im Vorversuch* Als Projektionsfläche für das Spektrum wird weißes Papier der Marke *Quorum* verwendet. Es ist in Augenhöhe vor der Versuchsperson platziert. Mit Hilfe eines Druckbleistiftes kennzeichnet die Versuchsperson darauf die von ihr wahrgenommenen Bereiche unterscheidbarer Farben im Spektrum.

den. Diese Messungen werden mit Hilfe eines Spektrophotometers Typ *SPM 50* vom Hersteller *GRETAG* durchgeführt.

Das auf der Projektionsfläche abgebildete *Spektrum* wird von den Versuchspersonen als ein horizontaler „Regenbogen“ wahrgenommen, mit „Rot“ ganz links und „Violett“ ganz rechts. Für die Versuchsperson, die im Abstand von 40 cm mittig vor der Projektionsfläche sitzt, erscheint das Spektrum unter einem horizontalen Sehwinkel von 42.36° und einem vertikalen Sehwinkel von 28.75° . Die Leuchtdichte des Spektrums beträgt je nach Wellenlänge zwischen $0.17 \frac{cd}{m^2}$ und $3.8 \frac{cd}{m^2}$. Diese Messungen werden mit Hilfe eines Photometers vom Hersteller *Lichtmesstechnik, Berlin* vom Typ *LMT-1003* vorgenommen.

Sämtliche Komponenten dieser Versuchsanordnung mit Ausnahme der an einer weißen Wand befestigten Projektionsfläche sind auf einer optischen Bank (Hersteller *Spindler & Hoyer*) angeordnet, die aus einer Metallschiene besteht, auf der die Komponenten mit Hilfe von verschiebbaren Reitern befestigt sind. Die optische Bank hat den Vorteil, dass nicht nur hinreichende Stabilität des Versuchsaufbaus gewährleistet ist, sondern dass auch eine Feinjustierung in alle Richtungen erfolgen kann.

2.1.3 Instruktion

Aufgabe der Versuchspersonen ist in Anlehnung an K.A. Jameson et al. (2001), die von ihnen wahrgenommenen Grenzen zwischen den Farbtönen sowie die beiden Enden des von ihnen wahrgenommenen Spektrums durch Bleistiftstriche zu kennzeichnen. Die schriftliche Instruktion kann Anhang A.1 entnommen werden.

2.1.4 Ablauf des Vorversuches

Es findet für jede Versuchsperson eine Sitzung statt, die sich aus drei Teilen zusammensetzt: Zunächst werden nach Instruktion der Versuchsperson und einer mindestens 5-minütigen Dunkeladaptation zwei Durchgänge absolviert, in denen die im Spektrum wahrgenommenen Farbbereiche durch Bleistiftstriche voneinander abgegrenzt werden sollen. Dann werden in einem Raum, der den empfohlenen Bedingungen für den Ishihara-Test (Ishihara, 1968) und den Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) entspricht, die beiden Tests, in Übereinstimmung mit den Testmanualen, durchgeführt. Zurück im vollständig abgedunkelten Farblabor werden nach weiterer, mindestens 5-minütiger Dunkeladaptation nochmals 2 Durchgänge des Vorversuches mit Einteilung des Spektrums in die wahrgenommenen Farbtöne absolviert.

Vor dem ersten Teil der Experimentalsitzung liest die Versuchsperson zunächst die schriftliche Instruktion (siehe Anhang A.1), danach wird der Versuchspersonenbogen mit Name und Geburtsdatum sowie der Versuchspersonennummer ausgefüllt. Dem folgt im nun vollständig abgedunkelten Farblabor eine Dunkeladaptation von mindestens 5 Minuten, die aufgrund der geringen Leuchtdichte der Reize (wegen der geringen Leistung der verwendeten Lichtquelle) eingehalten werden muss. Dann findet der erste Versuchsdurchgang statt.

In allen vier Versuchsdurchgängen betrachten die Probanden das Spektrum beidäugig und sollen ohne Zeitbegrenzung in dem auf der Projektionsfläche sichtbaren Spektrum die von ihnen wahrgenommenen Grenzen zwischen den Farbtönen markieren. Dies geschieht mit Hilfe von freihändig gezeichneten feinen Bleistiftstrichen (Druckbleistift, Dicke 0.35), die direkt auf der Projektionsfläche angebracht werden. Es ist dabei gewährleistet, dass das Spektrum bei allen Versuchspersonen und während jedem der vier Durchgänge gleich groß ist. Nach Entfernen des Papiers und Kennzeichnung mit Richtung, Versuchspersonennummer, Nummer des Durchgangs und ungefährender Zeitdauer wird ein neues, weißes Blatt angebracht und der Versuch wiederholt. Dann wird der Raum gewechselt und eine Untersuchung des Farbsehens mit Hilfe der Ishihara-Tafeln Nr. 1 bis Nr. 17 (Ishihara, 1968) sowie eine Testung des Farbunterscheidungsvermögens mit Hilfe des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests (Farnsworth, 1957) vorgenommen.

Mit Hilfe des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests (Farnsworth, 1957) soll zusätzlich zu den bei der Einteilung des Spektrums gesammelten Daten das Farbunterscheidungsvermögen erhoben werden, der Test berücksichtigt jedoch keine retinalen Tetrachromaten und dient daher als von dem Verfahren nach K.A. Jameson et al. (2001) unabhängige zusätzliche Informationsquelle. Mit Hilfe dieses Tests und der Ishihara-Tafeln (Ishihara, 1968) sollen farbschwache Beobachter erkannt werden.

Der dritte Teil des Experiments findet wiederum im Farblabor statt. Wenn nötig, wird die Instruktion (siehe Anhang A.1) aus dem ersten und zweiten Durchgang wiederholt. Dem dritten und vierten Teil des Versuchsdurchgangs geht wiederum eine mindestens fünfminütige Dunkeladaptation voraus. Der dritte und der vierte Teil des Versuches laufen analog zu den ersten beiden Erhebungen ab.

Für den ersten Durchgang benötigen die Versuchspersonen im Durchschnitt 3 Minuten, für den zweiten 2, für den dritten zweieinhalb und für den vierten 2 Minuten. Der

gesamte Vorversuch dauert im Durchschnitt 45 Minuten. Den Versuchspersonen wird eine Versuchspersonenstunde oder Forschungsstunde gutgeschrieben, die im Rahmen der Diplomprüfungsordnung vorgeschrieben ist.

2.1.5 Auswertung der Daten

Auf den Blättern, auf denen die Versuchspersonen die Grenzen zwischen den von ihnen wahrgenommenen Farbtönen markiert haben, werden die Zwischenräume zwischen zwei Grenzen gezählt. Dadurch ergibt sich ein Kennwert für die Anzahl der wahrgenommenen Farbtöne, *nicht* für die Anzahl der eingezeichneten Grenzen. Diese Kennwerte werden getrennt für jeden der vier Durchgänge für jede Versuchsperson ermittelt. Aus den so erhaltenen 4 Werten für jeden der Versuchsteilnehmer wird für jede Versuchsperson das arithmetische Mittel bestimmt. Die statistische Auswertung der Daten erfolgt mit dem Statistik-Paket SPSS für Windows (Version 10.0) sowie mit SPSS für Unix (Version 6.14) und Unixstat.

2.2 Hauptversuch

Im Hauptversuch sollen die in Abschnitt 1.3 aufgestellten Hypothesen näher untersucht werden. Dies geschieht anhand einer Stichprobe von Versuchspersonen (siehe Tabelle B.1), die mit Hilfe der im Vorversuch erhobenen Daten ausgewählt worden sind. Im Hauptversuch sollen vermutete Tetrachromatinnen, die im Spektrum überdurchschnittlich viele Farbtöne unterscheiden können, hinsichtlich ihres Verhaltens im Farbmischungsexperiment mit normalen Trichromatinnen, die im Vorversuch als unterdurchschnittlich spektralempfindlich klassifiziert worden sind, verglichen werden.

2.2.1 Versuchspersonen

Entsprechend den Ergebnissen des Vorversuches werden die Versuchspersonen in drei Gruppen eingeteilt: Männliche Probanden, über- und unterdurchschnittlich spektralempfindliche weibliche Probanden. Im Hauptversuch werden lediglich die weiblichen Probanden näher untersucht, da der Vergleich zwischen den im Vorversuch über- bzw. unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen den direktesten Test der Hypothesen erlaubt. Die Einbeziehung männlicher Probanden wäre eine zusätzliche Varianzquelle, die ausgeschlossen werden soll. Dabei werden bevorzugt diejenigen (weiblichen) Probanden ausgewählt, die im Ishihara-Test unauffällig sind und im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test über ein gutes beziehungsweise sehr gutes Farbunterscheidungsvermögen verfügen (Fehlerwert kleiner als 50). Alle Versuchspersonen verfügen über ausreichende Sehschärfe, was teilweise durch Sehhilfen gewährleistet wird.

Am Hauptversuch nehmen schließlich 14 weibliche Versuchspersonen (siehe Tabelle B.1 in Anhang B.1) im Alter zwischen 19 und 34 Jahren teil. Der Median liegt bei 22.5. Dabei handelt es sich um Studentinnen der Psychologie an der Universität Regensburg. Sie bekommen Versuchspersonen- bzw. Forschungsstunden gutgeschrieben, die im Rahmen der Prüfungsordnung vorgeschrieben sind, oder Geld als Entlohnung.

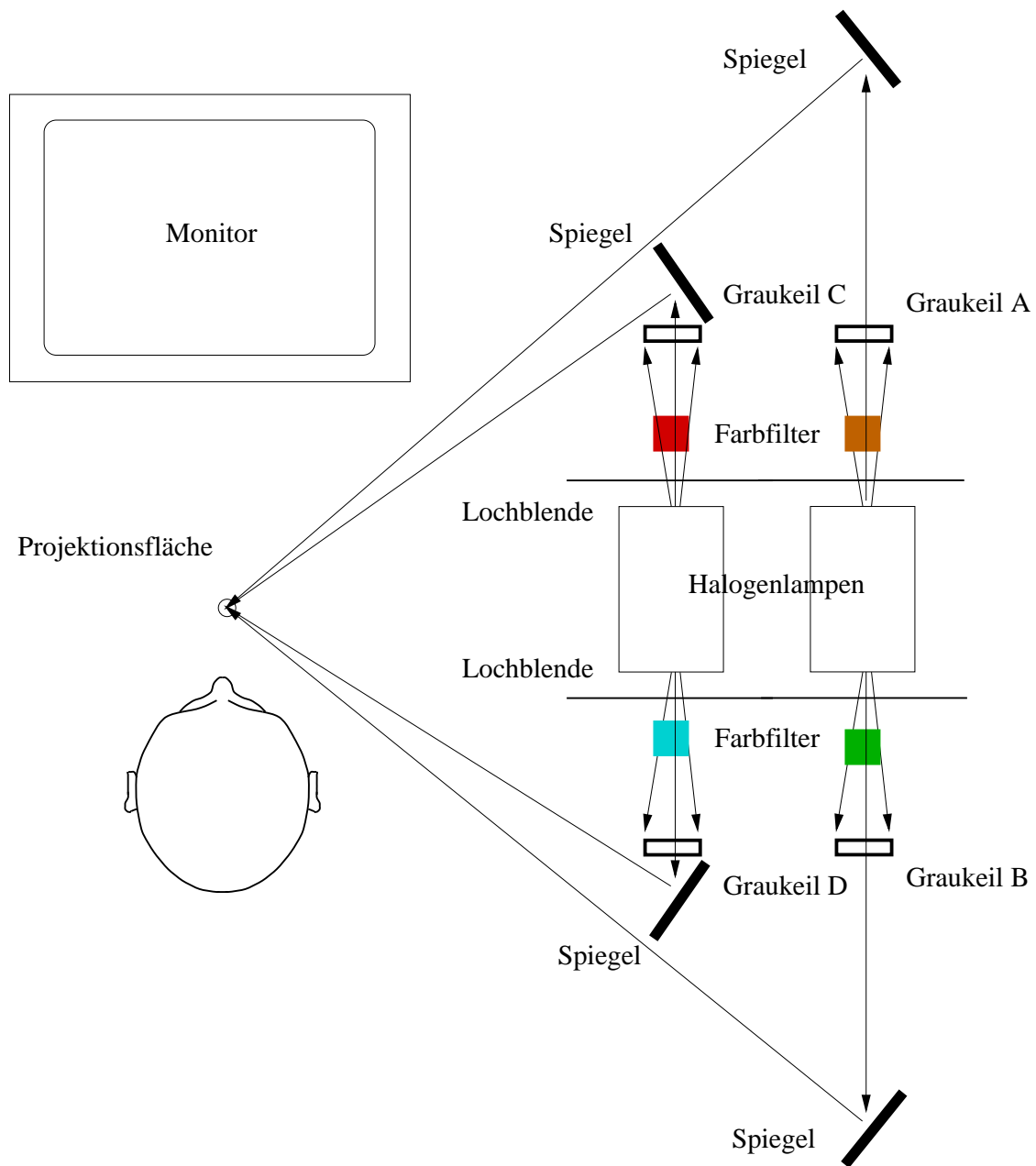


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für den Hauptversuch. Die Versuchsperson betrachtet den runden Zielreiz. Dieser wird erzeugt, indem vier mit Hilfe von Narrow Bandpass Interferenzfiltern erzeugte Lichtstrahlen übereinanderprojiziert werden. Weitere Erläuterungen im Text.

2.2.2 Versuchsaufbau

Mit Hilfe des im folgenden beschriebenen Versuchsaufbaus soll untersucht werden, ob sich die im Vorversuch erkannten Verhaltensunterschiede zwischen über- und unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen auch beim Mischen von Farben zeigen.

Um die Tetrachromasie-Hypothese zu überprüfen, stehen den Probandinnen statt der üblichen drei vier Primärfarben zur Verfügung, mit deren Hilfe sie einen Farbabgleich erzeugen sollen.

Der Versuchsaufbau kann Abbildung 2.3 entnommen werden. Mit Hilfe von zwei Halogenlampen mit jeweils zwei Austrittsöffnungen und vier Farbfiltern werden vier farbige Lichtstrahlen erzeugt. Diese vier Lichtstrahlen stellen die Primärreize dar, mit deren Hilfe die Versuchspersonen metamere Mischungen zu den vorgegebenen Reizen herstellen sollen. Die Intensität der Primärreize kann unabhängig voneinander mit Hilfe von vier Graukeilen verändert werden, die drehbar auf Schrittmotoren angebracht sind. Die Schrittmotoren werden über einen Computer mit Hilfe eines Gamepads von der Versuchsperson gesteuert. Ein Nachteil dieser Apparatur ist es, dass lediglich ein Farbabgleich aus dem Gedächtnis erfolgen kann, da Test- und Vergleichsreiz nicht gleichzeitig präsentiert werden können.

Die Lichtquelle

Bei den beiden Lichtquellen (siehe auch Abschnitt 2.1.2) handelt es sich um zwei weitgehend identische Quarz-Wolfram-Halogenlampen des Herstellers *L.O.T. Oriel* mit 100 Watt Leistung. Sie besitzen im Inneren eines abgeschlossenen Quarzkolbens einen Wolframdraht, der durch elektrischen Strom zum Glühen gebracht wird. Bei solchen Lampen nehmen Lichtausbeute und Farbtemperatur mit steigender Temperatur zu, die Lebensdauer der Lampen nimmt jedoch ab.

Der Vorteil solcher Lichtquellen ist, dass es sich bei Halogenlampen um sogenannte *Kontinuumsstrahler* handelt, deren Leistung nur relativ geringfügigen unsystematischen Schwankungen unterworfen ist. Allerdings steigt die Strahlstärke im sichtbaren Bereich systematisch an (siehe Abbildung 2.4). Die Lichtausbeute von Halogenlampen unterliegt ebenfalls keinen größeren zeitlichen Schwankungen, was sie gegenüber den in Farbexperimenten oft verwendeten Bogenlampen auszeichnet, deren Spektrum zudem Spektrallinien und andere Unregelmäßigkeiten aufweist. Die hier verwendeten Halogenlampen besitzen nach Herstellerangaben (L.O.T. Oriel, 1992) eine Farbtemperatur von 3300 K bzw. die Farbkoordinaten $x = 0.4017$ und $y = 0.3935$. Das Leuchtmittel befindet sich in einem speziellen Gehäuse vom Typ *Oriel 6000 Serie Q*, das es ermöglicht, auf zwei gegenüberliegenden Seiten Licht austreten zu lassen. An den beiden Austrittsöffnungen befindet sich jeweils ein kollimierender Pyrex-Kondensator F/0.85 (Durchmesser 33 mm) vom Hersteller *L.O.T. Oriel*.

Mit Hilfe dieser Kondensoren kann das austretende Licht zu parallelen Strahlen gebündelt werden, indem von Hand eine Feinjustierung vorgenommen wird. Da das Spektrum des erzeugten Lichtes von der Betriebsspannung der Lampe abhängt, muss diese exakt eingestellt und auch aufrechterhalten werden. Die Stromversorgung der beiden Lampen erfolgt deshalb über zwei weitgehend identische stabilisierte Netzteile (*Schaltnetzteil SPS 9000* bzw. *Schaltnetzteil SPS 9001* der Firma *ELV Electronics*). Sie ermöglichen die Einstellung der Spannung in sehr feinen Abstufungen. An den Geräten wird die Spannung in Volt mit einer Genauigkeit von einer Nachkommastelle angezeigt, die Anzeige der Stromstärke in Ampère mit zwei Nachkommastellen Genauigkeit. Für die Lebensdauer

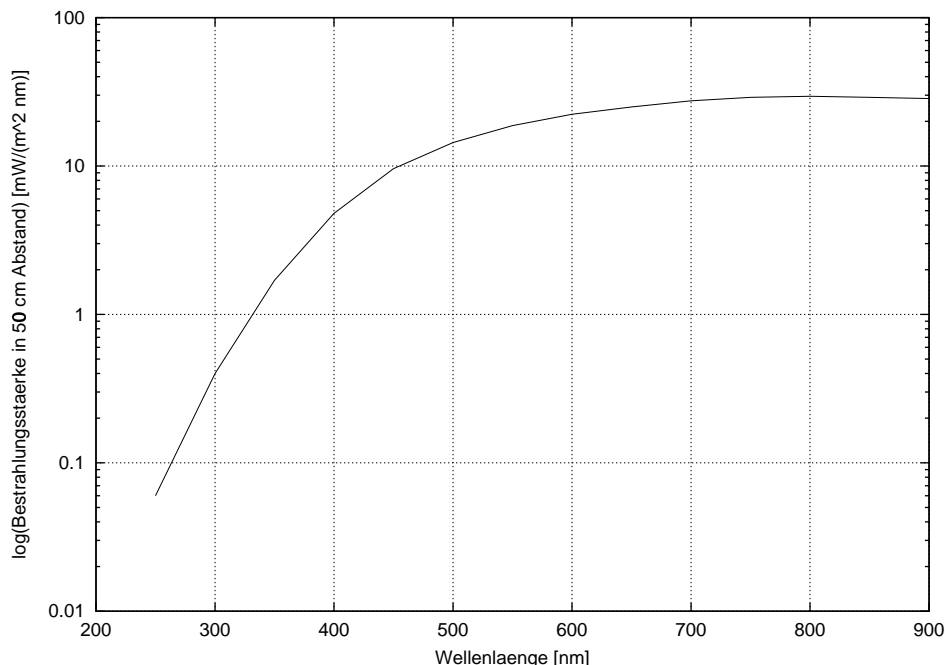


Abbildung 2.4: *Spektrum der Lichtquelle im Vor- und Hauptversuch.* Spektrum der Bestrahlungsstärke der in den Versuchen verwendeten Quarz-Halogen-Lampen mit einer Leistung von 100 Watt: Diese Abbildung zeigt die Herstellerangaben (Oriel Corporation, 1994) zur Bestrahlungsstärke der verwendeten Laborlampen in einer Entfernung von 50 cm. Sie beträgt bei einer Wellenlänge von 400 nm etwa $4.8 \text{ mWm}^2\text{nm}^{-1}$ und bei einer Wellenlänge von 700 nm etwa $27.5 \text{ mWm}^2\text{nm}^{-1}$ (Oriel Corporation, 1994).

der Glühlampen ist es wichtig, dass die Spannung beim Einschalten der Lampen langsam bis zum gewünschten Wert von 12 V gesteigert werden kann.

Primärreize

Prinzipiell können beliebige linear unabhängige Kombinationen von drei oder vier Farb-
reizen als Primärreiztripel benutzt werden. Da aber mit Hilfe der vorliegenden Versuchs-
anordnung keine uneigentliche Farbmischung möglich ist, müssen die Primärfarben so
gewählt werden, dass sich möglichst viele Farben in eigentlicher Mischung herstellen las-
sen. Mögliche Primärreiztripel, die in Untersuchungen des Farbmischungsverhaltens mit
unterschiedlichen Zielsetzungen verwendet worden sind, sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Primärreize mit Hilfe von Interferenzfiltern er-
zeugt, die das Licht der Halogenlampe entsprechend einfärben. Dabei handelt es sich um
Narrow Bandpass Interferenzfilter von der Firma *Edmund Scientific*, die nur Licht ei-
ner bestimmten Wellenlänge passieren lassen. Die hier verwendeten Filter sind rechteckig
mit einer Seitenlänge von 50.8 mm, die Filterschichten sind durch zwei Glasscheiben
geschützt, wobei an der Außenseite ein Rand von ca. 1.5 mm klar bleibt. Diese Filter
gelten als sehr langlebig. Sie können nach Herstellerangaben bei Temperaturen von -
50°C bis +75°C eingesetzt werden, ohne ihre Transmissionseigenschaften zu verändern.

Tabelle 2.1: Einige mögliche Primärreiztripel im Farbmischungsexperiment

λ_L	λ_M	λ_{S1}	λ_{S2}	Studie
644 nm	526 nm	444 nm	-	Stiles (1955)
650 nm	550 nm	450 nm	-	Kaiser und Boynton (1996)
645 nm	526 nm	444 nm	-	Wright (1946)
700 nm	546 nm	436 nm	-	Kaiser und Boynton (1996)
644 nm	588 nm	509 nm	468 nm	Trezona (1973, 1974)

Sie verfügen über eine verspiegelte Seite, die zusätzlich Temperatureffekte verringert. Sie sind für die Filterung von kollimiertem Licht geeignet, da sie nicht winkelempfindlich sind. Das Blocking ist nach Herstellerangaben kleiner als 0.1%.

Entsprechend vorangegangenen Untersuchungen, vor allem von Trezona (1973, 1974), werden für die vorliegende Untersuchung Farbfilter mit einer zentralen Wellenlänge (Wellenlänge, bei der die maximale Transmission des Filters liegt) von 470 nm, 550 nm, 600 nm und 650 nm gewählt. Diese Wellenlänge ist normalerweise der Mittelpunkt desjenigen Wellenlängenbereiches, der mit 50% der maximalen Transmission hindurchgelassen wird, dem sogenannten Full Width-Half Maximum (FWHM)-Bereich. Der FWHM-Bereich beträgt nach Herstellerangaben (Edmund Scientific, 1998) bei den gewählten Filtern 10 nm mit einer Toleranz von ± 2 nm. Jedoch ist bei Interferenzfiltern nicht in jedem Fall davon auszugehen, dass es sich bei der zentralen Wellenlänge um den Mittelpunkt des FWHM-Bereiches handelt, daher ist es unabdingbar, die Transmissionseigenschaften der vier Filter gesondert mit Hilfe eines Photometers zu erfassen. Die Ergebnisse der Messungen können Abbildung 2.5 entnommen werden.

Die so erzeugten vier Reize haben sich unter entsprechend unterschiedlicher Annahmen über die Gestalt des vierdimensionalen Farbraumes als linear unabhängig erwiesen. Sowohl unter der Annahme, dass sich die vier Zapfenpigmente bei Tetrachromaten anhand der Absorptionsspektren der menschlichen Zapfenpigmente nach Merbs und Nathans (1992b, 1992c) charakterisieren lassen, als auch unter Zugrundelegung des verschobenen Dartnall-Nomogramms (siehe Abschnitt 1.2.3 und Abbildung 1.6) erweisen sich die vier Farbfilter als linear unabhängig. Die so spezifizierten Reize sind daher entsprechend dem momentanen Kenntnisstand als Primärreize auch im vierdimensionalen Farbraum geeignet.

Da der Raum der wahrnehmbaren Farben entsprechend den Überlegungen aus Abschnitt 1.1.1 in einen Vektorraum eingebettet werden kann, sind die Sätze der linearen Algebra auch auf den Farbraum übertragbar. Da vier linear unabhängige Vektoren in einem vierdimensionalen Vektorraum, als die die oben spezifizierten Primärreize zu sehen sind, in einem dreidimensionalen Vektorraum in beliebigen Dreierkombinationen ebenfalls linear unabhängige Vektoren darstellen (siehe z.B. Lipschutz, 1977), können die Filter in beliebigen Dreierkombinationen als Primärreize in einem Farbmischungsexperiment mit drei Primärreizen eingesetzt werden. Auf diese Weise wird mit Hilfe der Interferenzfilter und

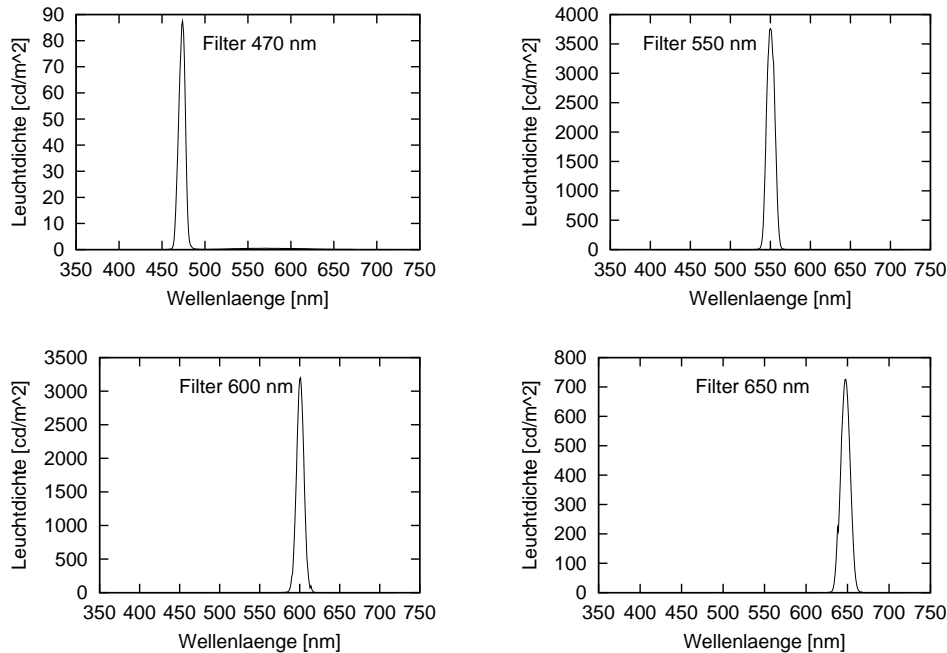


Abbildung 2.5: *Transmissionsspektren der im Experiment verwendeten Narrow Bandpass Interferenzfilter:* Die Abbildung zeigt für jeden der vier verwendeten Filter mit einer zentralen Wellenlänge von 470 nm, 550 nm, 600 nm und 650 nm das jeweilige Transmissionsspektrum, da bei Interferenzfiltern nicht immer davon auszugehen ist, dass am Ort der zentralen Wellenlänge auch das Transmissionsmaximum liegt.

dem Licht der Halogenlampe auf der Projektionsfläche Licht mit einer Wellenlänge von 470 nm, Licht mit 550 nm, Licht von 600 nm sowie Licht mit einer Wellenlänge von 650 nm in unterschiedlicher Intensität übereinanderprojiziert. Dabei verhalten sich die vier Reize additiv.

Die Graukeile

Die Intensitäten der Primärreize werden durch vier runde Graukeile (auch als *Verlaufskeile* oder *Verlaufsfilter* bezeichnet) geregelt, die direkt auf die Achsen von vier Schrittmotoren (Hersteller *Oriental Motor*, Typ *Vexta PK244-03A*) aufgesteckt sind. Die Graukeile können den durch sie hindurchtretenden Lichtstrahl gezielt abschwächen, indem sie in die entsprechende Stellung gedreht werden. Bei den Spezialanfertigungen der Firma *Göttlinger Farbfilter* handelt es sich um Glasscheiben, zwischen denen Folienfilter verkittet sind. Ihr Durchmesser beträgt ca. 12 cm, in ihrer Mitte liegt eine Bohrung zur Aufnahme der Schrittmotorachse. Nach Herstellerangaben besitzen sie eine optische Dichte von $D = 0-0.05$ beim Winkel 0° und $D = 3.0$ beim Winkel 360° . Dies entspricht einer minimalen Transmission von 0.1% und einer maximalen Transmission zwischen 89.1% und 100%. Die Graukeile sind so gefertigt, dass ihre Transmission über den gesamten sichtbaren Bereich hinweg gleichmäßig ist. Die Veränderung der Transmission beim schrittweisen Drehen der Verlaufskeile ist annähernd logarithmisch (siehe Abbildung 2.6).

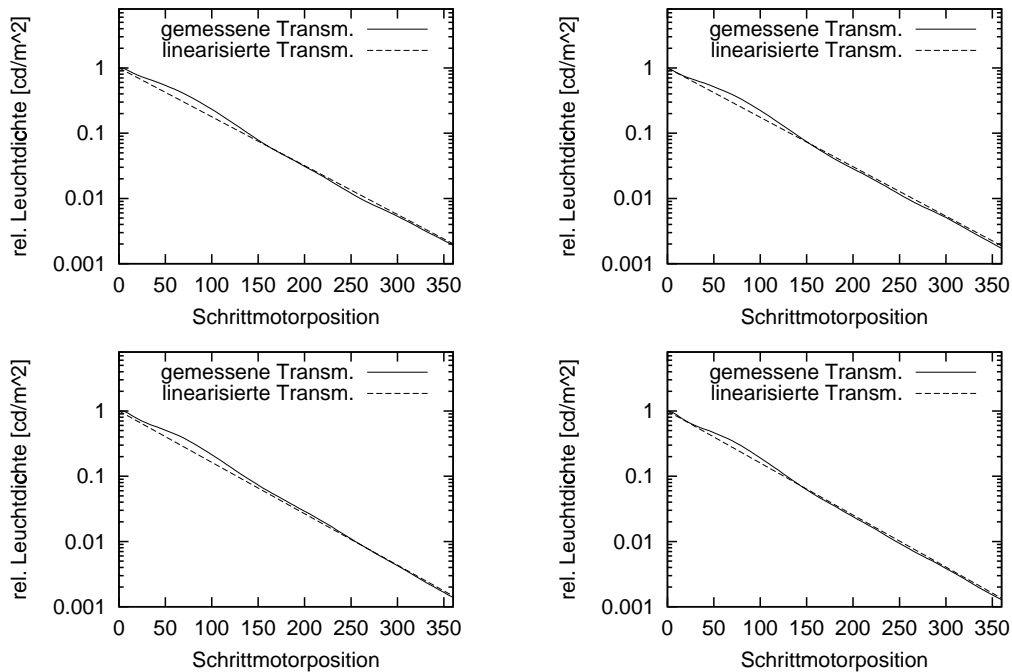


Abbildung 2.6: *Transmission der Graukeile A bis D*: Die Abbildung zeigt die relativen Transmissionen der vier Graukeile im Experiment in Abhängigkeit von der Schrittmotorposition. Angegeben sind für jeden Graukeil die gemessene Transmission sowie die für die Berechnungen verwendete linearisierte Transmission. Als Ausgangsposition wird jeweils die Position der höchsten Transmission gewählt.

Der kleinste mögliche Winkel einer Achsendrehung der Schrittmotoren beträgt $0^\circ 54'$. Dies entspricht einer Änderung der Leuchtdichte des hindurchtretenden Lichtstrahls von 0.83% ¹. Die Schrittmotoren werden durch zwei an den parallelen Schnittstellen des Computers angeschlossene Schrittmotor-Steuerkarten vom Hersteller *EMIS* (Typ *SMC 1500*) gesteuert, die von zwei externen Netzteilen mit einer Spannung von 12 V versorgt werden. Diese Steuerkarten regeln die Motoren durch Ausgabe von positiven und negativen Impulsen, wobei sich der Schrittmotor bei einem positiven Impuls in Richtung höherer, bei einem negativen Impuls Richtung niedrigerer Transmission bewegt. Für alle vier Verlaufskeile wird die Stellung mit der maximalen Transmission als Referenzposition verwendet, da sie im Experiment leicht auffindbar ist.

Die Projektionsfläche

Der Zielreiz wird dadurch erzeugt, dass der mit der optischen Apparatur erzeugte Lichtstrahl von einer kreisförmigen Projektionsfläche reflektiert wird, die aus relativ festem weißem und nicht glänzendem Papier (weißes Tonpapier) besteht. Die Projektionsfläche

¹Nach Wyszecki und Stiles (1982, S. 569) kann für Leuchtdichteunterschiede von einem Weber-Bruch von $\Delta L/L = 0.01$ ausgegangen werden, so dass eine Änderung der Leuchtdichte um 1% gerade wahrnehmbar ist. Die hier realisierte minimale Leuchtdichteänderung liegt geringfügig unter dieser Schwelle.

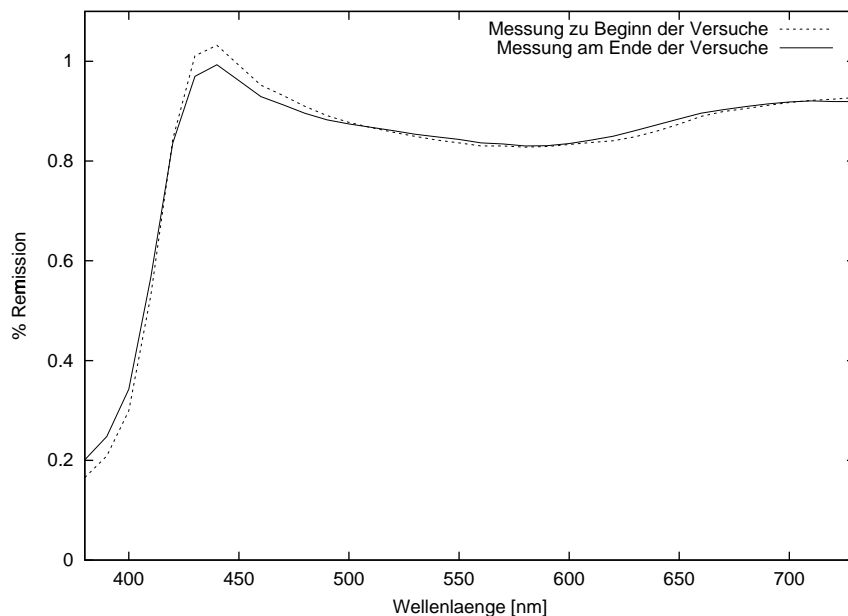


Abbildung 2.7: *Remissionspektrum der Projektionsfläche im Hauptversuch.* Die Projektionsfläche für die im Hauptversuch präsentierten Reize besteht aus weißem Tonpapier. Die Messung erfolgt durch ein Spektralphotometer vom Typ *GRETAG SPM 50*, das die Remission für den Bereich von 380 nm bis 730 nm in Schritten von 10 nm erfasst.

hat einen Durchmesser von 4 cm und ist auf einem dünnen, mattschwarz lackierten Metallstab angebracht. Die farbigen Lichtstrahlen werden mit Hilfe von Spiegeln exakt auf die Projektionsfläche gelenkt (siehe Abbildung 2.3). Dabei wird darauf geachtet, dass nicht nur die Entfernung zwischen Lichtaustrittsöffnung der Lampen und den Spiegeln gleich weit ist, sondern auch der Abstand zwischen Spiegel und Projektionsfläche zumindest für jeweils zwei der Lichter gleich lang ist. Die Versuchsperson befindet sich im Abstand von 90 cm von der Projektionsfläche, sie erscheint also in einem Sehwinkel von 2.55° .

Das Transmissionsspektrum der Projektionsfläche kann Abbildung 2.7 entnommen werden. Diese Messungen werden mit Hilfe eines Spektrophotometers Typ *SPM 50* vom Hersteller *GRETAG* durchgeführt. Die Messung zeigt, dass die Remission im Bereich der für das Experiment verwendeten Wellenlängen zwischen ca. 455 nm und ca. 600 nm relativ gleichmäßig ist. Schwankungen liegen deutlich unter 10% und sind damit verhältnismäßig gering. Auch die Projektionsfläche ist mit einem entsprechenden Reiter auf einer optischen Bank montiert, damit sie sich während der Durchführung der Experimente nicht verschiebt. Die spektrale Remissionskurve der Projektionsfläche verändert sich im Laufe der vier Monate dauernden Hauptversuche kaum, wie Abbildung 2.7 entnommen werden kann.

50 cm über der Projektionsfläche steht der Monitor, auf dem die Anweisungen an die Versuchsperson erscheinen. Sämtliche Hinweise erscheinen in weißer Schrift auf schwarzem Hintergrund, wobei der Monitor so eingestellt ist, dass die Schrift nur so hell wie nötig ist, um die Lesbarkeit nicht zu beeinträchtigen.

Alle Komponenten dieser Versuchsanordnung sind, ebenso wie im Vorversuch, auf einer

optischen Bank (Hersteller *Spindler & Hoyer*) befestigt, um die nötige Stabilität des Versuchsaufbaus zu gewährleisten und eine genaue Justierung sämtlicher Komponenten zu ermöglichen.

Kennkurven der Farbfilter und Graukeile

Zur Bestimmung der Koordinaten der präsentierten bzw. eingestellten Reize muss die Charakteristik der Farbfilter und der runden Verlaufskeile bekannt sein. Dazu werden die Transmissionsspektren im sichtbaren Spektrum bzw. zu jeder Schrittmotorposition mit Hilfe eines hochpräzisen Photometers der Firma *Lichtmesstechnik, Berlin* vom Typ *LMT-1003* erfasst. Die entsprechenden Transmissionsspektren für die Farbfilter sind Abbildung 2.5 zu entnehmen, die Transmissionsspektren für die Graukeile sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

Die Transmission der verwendeten vier Farbfilter wird mit Hilfe des Photometers (siehe auch Abschnitt 2.2.2) und eines durchstimmbaren Flüssigkristallfilters (*Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF)*, Modell *Varispec Tunable Filter VS-VIS2-05-HC-SQ*) des Herstellers *Cambridge Research & Instrumentation* (siehe auch Zwisler, 1998) ermittelt. Mit Hilfe dieses Filters kann monochromatisches Licht mit einer Bandbreite von jeweils 5 nm in einem Bereich zwischen 400 und 720 nm erzeugt werden. Die Transmission außerhalb des eingestellten Wellenlängenbereiches beträgt durchschnittlich weniger als 0.01%. Die Farbfilter werden durch einen Vergleich mit dem Spektrum des LCTF vermessen. Dazu wird nach dem LCTF der zu vermessende Farbfilter in den Strahlengang eingebracht. Mit Hilfe des mitgelieferten Programms wird der LCTF zwischen 420 nm und 720 nm in 5-nm-Schritten weitergeschaltet, die entsprechenden Leuchtdichten am Photometer abgelesen und in einer Ergebnisdatei abgespeichert. Die so ermittelten Spektren für die vier Farbfilter können Abbildung 2.5 entnommen werden.

Zur *Bestimmung der Transmission der Graukeile* wird der entsprechende Verlaufsfilter in den Strahlengang eingebracht. Nach dem Graukeil folgt eine Lochblende von 2 cm Durchmesser, dann ein zweiter Graukeil, da sonst die Leuchtdichte im Strahlengang für das Photometer zu hoch wäre. Der zweite Graukeil wird vor Beginn der Messung auf minimale Transmission eingestellt, so dass bei maximaler Transmission des ersten Verlaufsfilters die höchste vom Photometer messbare Leuchtdichte nicht überschritten wird. Der exakte Wert ist unwichtig, da nur relative Transmissionen bestimmt werden. Nun kann die Transmission für jede einzelne Schrittmotorstellung am Photometer abgelesen und in einer Ergebnisdatei gespeichert werden. In einem letzten Schritt werden die so erhaltenen absoluten Leuchtdichten in relative Transmissionen umgerechnet, indem die einzelnen Messwerte durch das Maximum der Leuchtdichte geteilt werden.

Die auf diese Weise für alle vier Graukeile erzeugte Datei ist so geordnet, dass die Position mit der maximalen Transmission, die auch Ausgangsposition des Experiments ist, am Anfang steht. Ausgehend von dieser Referenzstellung wird vom Graukeil mit jedem (positiven) Schrittmotorimpuls etwas weniger Licht hindurchgelassen, bis der Endbereich der Scheibe erreicht ist. Dreht man die Scheibe dennoch weiter, so nimmt die Transmission rapide zu, da nun der Anfang wieder in den Strahlengang rückt. Dieser Endbereich der Regelstrecke (ca. 5 Schrittmotoreinheiten) wird im Versuch nicht verwendet. Die entsprechenden Transmissionsspektren sind Abbildung 2.6 zu entnehmen. Die in Abhängigkeit

von der Schrittmotorposition bestimmte Transmission der Graukeile verändert sich bei wiederholten Messungen im Abstand von acht Monaten nicht.

2.2.3 Reizmaterial

Die Zielreize werden mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Versuchsapparatur erzeugt und von der Projektionsfläche reflektiert. Auf diese Art können lediglich solche Reize erzeugt werden, die sich in additiver eigentlicher Mischung der vier Primärfarben in veränderlichen Anteilen herstellen lassen. Weiterhin besteht keine Möglichkeit, die Helligkeit des hergestellten Reizes unabhängig von den Anteilen der additiven Mischung der Primärfarben zu verändern. Sowohl die vorgegebenen als auch die von den Versuchspersonen eingestellten Farbreize werden hinsichtlich ihrer Lage im Farbraum charakterisiert. Dies geschieht in Ermangelung anderer Metriken bzw. entsprechender Messgeräte im dreidimensionalen Farbraum (siehe Abbildung 2.8). Die Probandin, deren Kopf mit Hilfe einer Kinnstütze fixiert ist, kann beidäugig frei auf die Reize blicken. Eine lokale Adaptation an den Zielreiz ist daher weitgehend ausgeschlossen, da er zudem noch verhältnismäßig klein ist.

Die Auswahl der Reize wird nicht nur von der verwendeten Apparatur bestimmt, sondern auch dadurch, dass die Wahrnehmung der präsentierten Reize in möglichst geringem Umfang von Unregelmäßigkeiten betroffen sein soll. Der von Purdy (1931) quantitativ untersuchte *Bezold-Brücke-Effekt* besteht in der Veränderung des Farbtons eines monochromatischen Reizes, dessen Leuchtdichte verändert wird. Hunt (1989) stellt allerdings fest, dass dieser Effekt nicht bei isoliert dargebotenen Farben auftritt, also für die vorliegende Apparatur nicht von Bedeutung ist. Auch die bekannten *Brindley-Farbgleichheiten* (*Brindley-Isochromes*, siehe Brindley, 1955), Paare metamerer monochromatischer Reize unterschiedlicher Wellenlängen, spielen für das hier besprochene Experiment keine Rolle, da die höchste Wellenlänge (bzw. bunttongleiche Wellenlänge) der ausgewählten Reize bei 600 nm liegt. Die Wahl der experimentellen Reize ist folglich nur durch die Möglichkeiten der Apparatur beschränkt. Aus den herstellbaren Reizen werden 10 ausgewählt, die von den Versuchspersonen möglichst gut unterscheidbar sind.

Im Experiment werden zwei Arten von Reizen präsentiert: Reize, die sich aus allen vier Primärfarben in ausreichend großen Anteilen zusammensetzen (*4er-Reize*, siehe Tabelle 2.2) und Reize, die lediglich eine Mischung aus drei Primärfarben sind, die vierte Primärfarbe ist in ihnen nicht enthalten (*3er-Reize*, siehe Tabelle 2.2). Die Reize aus vier Primärfarben sollen immer mit Hilfe aller vier Primärreize erzeugt werden, bei den 3er-Reizen gibt es zwei unterschiedliche Instruktionen: In einigen Durchgängen sollen sie mit Hilfe von drei, in anderen mit Hilfe von vier Primärreizen erzeugt werden. Unter der Instruktion „Nur mit drei Reizen mischen“ kann die Intensität des Primärreizes, der nicht in der Farbe enthalten ist, mit Hilfe des Gamepads nicht verändert werden. Erscheint ein 3er-Reiz mit der Anweisung „Bitte mit allen vier Primärreizen mischen“, dann sind zwar alle vier Primärreize veränderbar, jedoch wird, wenn sich der Zielreiz zufallsgesteuert zum Ausgangsreiz des Farbabgleichs verändert, der Anteil des entsprechenden Primärreizes nicht verändert, sondern der Graukeil bleibt in der Stellung minimaler Transmission. Es wird darauf geachtet, dass zwischen dem Erscheinen desselben 3er-Reizes unter der einen und der anderen Instruktion ein ausreichend großer zeitlicher Abstand liegt. Die 3er-

Tabelle 2.2: Bunttongleiche Wellenlängen, XYZ-Koordinaten und Schrittmotorstellungen der im Experiment verwendeten Primär- und Zielreize. In Klammern ist für die Zielreize angegeben, aus wie vielen Primärreizen sie sich zusammensetzen.

Reiz	Bunttongleiche/ kompensative Wellenlänge	X	Y	Z	Stellung Motor			
					1	2	3	4
Primärreiz 1	600 nm	5.61	3.26	0.11	0	350	350	350
Primärreiz 2	550 nm	5.32	11.50	0.22	350	0	350	350
Primärreiz 3	650 nm	5.75	3.25	0.21	350	350	0	350
Primärreiz 4	470 nm	3.20	1.25	16.74	350	350	350	0
Zielreiz 1(3)	567 nm	7.94	10.51	1.30	20	20	350	150
Zielreiz 2(4)	590 nm	8.29	6.54	0.93	36	88	20	175
Zielreiz 3(4)	540 nm	6.16	3.51	7.49	130	200	20	45
Zielreiz 4(3)	541 nm	6.19	3.28	7.49	115	350	20	45
Zielreiz 5(4)	600 nm	3.06	2.11	0.78	160	175	50	175
Zielreiz 6(4)	455 nm	4.30	2.98	11.66	133	127	100	20
Zielreiz 7(4)	493 nm	7.62	9.92	11.80	120	20	100	20
Zielreiz 8(4)	555 nm	4.47	8.38	1.57	175	21	175	135
Zielreiz 9(3)	557 nm	5.22	8.93	1.25	87	20	350	150
Zielreiz 10(3)	465 nm	3.79	2.75	11.66	350	123	100	20

Reize sollten von allen Probanden in eindeutiger Weise ermischbar sein, die Herstellung desselben Reizes aus drei bzw. vier Primärfarben dient zur Überprüfung der Hypothese, ob die Benutzung von vier Primärreizen auch bei der Ermischung eines Reizes, der sich nur aus drei Primärreizen zusammensetzt, schon zu einer Veränderung des Farbmischverhaltens führt. Im Experiment werden also zehn unterschiedliche Zielreize präsentiert, die vier 3er-Reize sollen je nach Anweisung mit drei oder mit vier Primärreizen hergestellt werden (siehe auch Tabelle 2.2).

Die im Experiment verwendeten Reize werden durch ihre XYZ-Koordinaten charakterisiert, obwohl klar ist, dass dies im Falle der aus vier Primärreizen zusammengesetzten Reize unter Umständen nicht adäquat ist. Die Messungen werden mit Hilfe eines Chromameters (Modell *CS-100* der Firma *Minolta*) vorgenommen, es werden sowohl die Farbkoordinaten der vier Primärreize als auch die Koordinaten der acht im Experiment verwendeten Zielreize sowie der nur aus drei Primärfarben bestehenden Zielreize im ersten Teil des Experiments erfasst. Sie sind Tabelle 2.2 und Abbildung 2.8 zu entnehmen. Die XYZ-Koordinaten der ausgewählten Reize sowie die entsprechenden Schrittmotorstellungen sind Tabelle 2.2 zu entnehmen, die Farborte der Reize in der Normfarbtafel sind anhand von Abbildung 2.8 erkennbar.

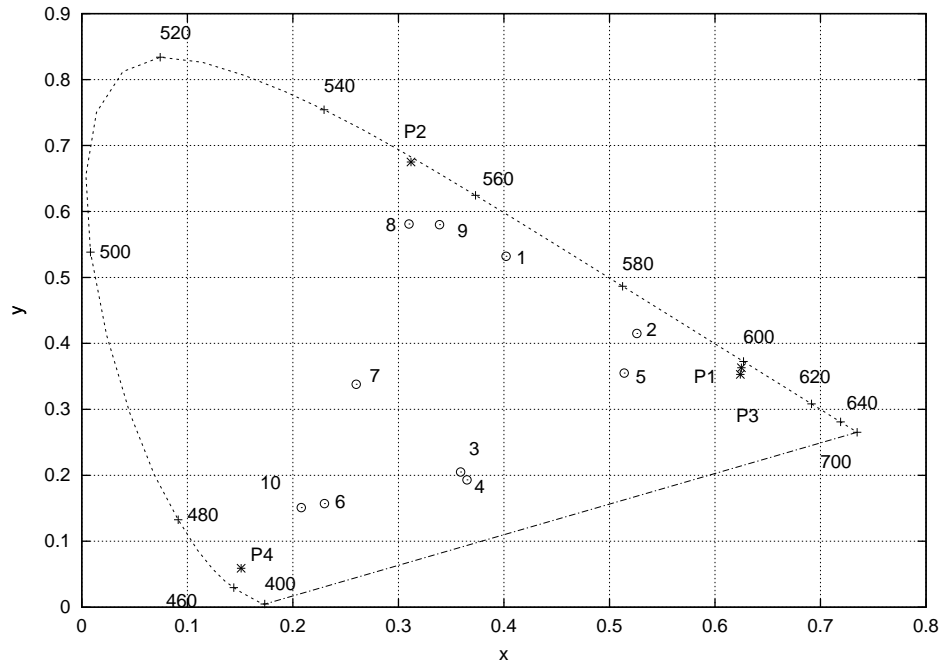


Abbildung 2.8: *Farbörter der 10 vorgegebenen Zielreize im Experiment in der Normfarbtafel.* Weiterhin sind die vier Primärreize eingezeichnet. Die in eigentlicher Mischung aus drei Primärreizen erzeugbaren Farben liegen innerhalb und auf den Linien eines Dreiecks in der Normfarbtafel, die aus vier Primärreizen erzeugbaren Farben liegen innerhalb und auf den Linien eines Vierecks.

2.2.4 Ablauf des Hauptversuches

Im Versuchsraum wird zunächst wird die Höhe des Stuhles, auf dem die Versuchsperson sitzt, so eingestellt, dass sie bequem sitzt, wenn ihr Kinn in der Kinnstütze liegt. Dann liest die Probandin die Instruktion, eventuelle Fragen zum Versuchsablauf werden geklärt. Dann folgt eine mindestens fünfminütige Dunkeladaptation. Dann bleibt die Probandin allein im Laborraum und führt in ihrer eigenen Geschwindigkeit die Farbabgleiche durch.

Dazu erscheint zunächst der Zielreiz auf der Projektionsfläche, zusammen mit der Aufforderung auf dem Bildschirm, ihn sich gut einzuprägen. Die Probandin kann ihn so lange betrachten, wie sie möchte. Dann kann sie durch Druck auf den Steuerhebel das Erscheinen des zufällig aus dem Zielreiz variierten Ausgangsreizes auslösen. Der Ausgangsreiz ist eine zufällige Variation des Testreizes, so dass die Versuchspersonen sich nicht an eventuellen Unregelmäßigkeiten (z.B. Flackern) in der Apparatur orientieren können. Außerdem ist es so nicht möglich, durch bestimmte Zählstrategien den Zielreiz herzustellen, da bei jedem Abgleich aus einem anderen Ausgangsreiz der Zielreiz wiederhergestellt werden muss.

Zusammen mit dem Ausgangsreiz (auf der Projektionsfläche) erscheint ein Textfeld (auf dem Monitor), in dem angegeben ist, ob mit drei oder vier Primärreizen gemischt werden soll. In der Bedingung *Mischung mit drei Primärreizen* bestehen auch Ziel- und Ausgangsreiz aus jeweils nur drei Primärreizen, einer der vier Graukeile ist auf minimale Transmission eingestellt und kann auch nicht verändert werden. Wird versucht, ihn zu

verändern, ertönt für 150 Millisekunden ein 200-Hertz-Ton. Der entsprechende Graukeil wird auch beim Übergang vom Ziel- auf den Ausgangsreiz nicht zufällig variiert, sondern bleibt immer in derselben Position minimaler Transmission. In der Bedingung *Mischung mit vier Primärreizen* kommen sowohl Reize vor, die aus drei Primärreizen bestehen, als auch Reize, die sich aus vieren zusammensetzen. Die Versuchsperson kann in dieser Bedingung alle vier Graukeile nach Belieben steuern, um den Ausgangsreiz zu variieren. Setzt sich der Reiz jedoch nur aus drei Primärfarben zusammen, werden nur diese drei zufallsgesteuert verändert, wenn vom Ziel- auf den Ausgangsreiz übergegangen wird. Der vierte Primärreiz, der in der Farbe nicht enthalten ist, bleibt weiterhin bei der Intensität 0. Nur dann, wenn sich der Zielreiz aus vier Primärfarben zusammensetzt, können im Experiment nicht nur alle vier Graukeile nach Belieben verändert werden, sondern der Reiz verändert sich beim Übergang vom Ziel- auf den Ausgangsreiz ebenfalls zufallsgesteuert auf allen vier Dimensionen.

Der je nach Versuchsbedingung zufällig aus drei oder vier Reizen erzeugte Ausgangsreiz soll nun von der Versuchsperson so verändert werden, dass er dem von ihr wahrgenommenen Zielreiz möglichst exakt entspricht. Auch dafür bleibt der Probandin so viel Zeit, wie sie wünscht. Durch Hebeldruck kann sie anzeigen, dass der Abgleich beendet ist. Sowohl die Zahl der Aktionen, getrennt nach den vier Graukeilen, als auch die Zeit, die zum Erstellen des Abgleichs benötigt wird, wird neben den eingestellten Werten der vier Graukeile mitprotokolliert.

Dann wird der Versuchsperson nochmals der Zielreiz gezeigt, gemeinsam mit der Anweisung, die Güte des Abgleichs auf einer Skala von *Sehr gut* über *Gut*, *Mittelmäßig* und *Schlecht* bis *Sehr schlecht* zu beurteilen. Dann ist der Abgleich beendet, und es erscheint der nächste Zielreiz. Ein Zielreiz erscheint viermal hintereinander, so dass die Versuchsperson eine gewisse Übung im Erstellen eines Abgleichs zu einem konstanten Zielreiz bekommt. Insgesamt erscheinen in einer Sitzung zwischen drei und acht unterschiedliche Zielreize, je nach Geübtheit der Versuchsperson.

Die Steuerung der Versuchsapparatur erfolgt über ein Gamepad der Marke *Ultra Racer PC* vom Hersteller *InterAct*. Eine Abbildung des Gamepads ist in der Instruktion zum Hauptversuch in Anhang A.2 enthalten. Das Gamepad wird ausgewählt, weil es (als einziges) über vier gleich große Druckknöpfe verfügt, die kreuzförmig angeordnet sind. Weiterhin besitzt es ein größeres Steuerrad sowie einen Hebel an der Unterseite, der von der Versuchsperson genutzt wird, um sich durch das Experiment zu bewegen und Eingabe zu bestätigen. Dabei ertönt für 200 Millisekunden ein Ton von 500 Hertz. Die vier Druckknöpfe dienen zusammen mit dem Steuerrad dazu, die Intensität der vier Primärreize zu variieren: Durch Druck auf einen der Knöpfe und gleichzeitiges Drehen des Steuerrades nach rechts wird die Intensität der entsprechenden Farbe vergrößert, durch Drehen nach links verkleinert. Der oberste Knopf steht dabei für Primärreiz 3, der links daneben für Primärreiz 4, der unterste kontrolliert Primärreiz 2 und mit Hilfe des letzten Knopfes kann die Intensität von Primärreiz 1 (siehe auch Tabelle 2.2) in der Mischung verändert werden.

Beim Betätigen des Knopfes gleichzeitig mit dem Steuerrad wird der entsprechende Schrittmotor um jeweils einen Winkel von ca. $\pm 0^{\circ}54''$ gedreht. Dabei wird von den Lautsprechern des Computers für 50 Millisekunden ein Ton mit einer Frequenz von 450 Hertz ausgegeben. Nachdem eine solche Aktion durchgeführt worden ist, reagiert der Rechner

für 150 Millisekunden nicht auf weitere Eingaben. Daher kann durch Gedrückthalten des Knopfes bei gleichzeitigem Drehen des Steuerrades keine undefinierte Anzahl an Aktionen ausgelöst werden, die von der Schrittmotorsteuerkarte nicht mehr einwandfrei verarbeitet werden kann. Bei Erreichen des Endes einer Regelstrecke ertönt der eingebaute Warnton des Rechners. Außerdem ist eine adaptive Steuerung der Graukeile implementiert: wenn mehrmals hintereinander derselbe der vier Knöpfe gedrückt und gleichzeitig das Steuerrad in dieselbe Richtung gedreht wird, erhöht sich schrittweise auch die Anzahl der Schrittmotorschritte, die bei einer Aktion ausgeführt werden. Dadurch ist es möglich, schnell auch größere Veränderungen am Schrittmotor vorzunehmen. Wenn ein Mal ein anderer Knopf gedrückt, also ein anderer Schrittmotor verändert wird, wird die Schrittweite wieder auf den Wert 1 zurückgesetzt, so dass die Genauigkeit der Einstellungen weiterhin gewährleistet ist.

Damit die Probanden sich an den Versuchsablauf und die Bedienung der Versuchsausrüstung gewöhnen können, werden vor Beginn der eigentlichen Datenerhebung insgesamt achtstündige Vorversuche durchgeführt, in denen 160 Farbabgleiche erstellt werden sollen.

2.2.5 Auswertung der Daten

Die statistische Auswertung der Daten des Hauptversuches erfolgt mit SPSS für Unix (Version 6.14) und Unixstat. Bei Durchführung von t -Tests kommen nicht-ganzzahlige Freiheitsgrade durch einen Korrekturterm bei Verletzung der Annahme gleicher Varianzen zustande. Der Vergleich zwischen den drei Versuchsbedingungen innerhalb einer Versuchsperson erfolgt mit Hilfe von Tests für unabhängige Stichproben, da sie deutlich voneinander abweichende Anforderungen an die Probanden stellen. Als nichtparametrischer Test zum Vergleich von Kennwerten der Versuchsbedingungen wird aufgrund der nicht erfüllten Normalverteilungsannahme der U -Test verwendet.

Da die Einstellungen der Versuchspersonen in Schrittmotoreinheiten vorliegen, müssen diese zur Berechnung von Abstandsmaßen im Farbraum in XYZ -Farbkoordinaten umgerechnet werden. Dazu wird auf die entsprechend Abschnitt 2.2.2 erzeugten Dateien für die Graukeile zurückgegriffen. Sie enthalten für jede Schrittmotorposition die Transmission des entsprechenden Graukeiles in 5er-Schritten, die mit Hilfe eines Photometers gemessen werden. Da die Messungen relativ stark schwanken, wird eine Linearisierung der Werte vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass zwischen der Schrittmotorposition und der logarithmierten Transmission ein linearer Zusammenhang besteht. Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten logarithmierten Transmissionswert in der Datei wird durch die Anzahl der dazwischenliegenden Schritte geteilt. Dies ergibt den logarithmierten Leuchtdichtezuwachs für einen Schritt des entsprechenden Schrittmotors. Dieser Wert wird dann zur Interpolation der fehlenden Werte vom höchsten Transmissionswert in der Datei abgezogen. Dann wird die Logarithmierung rückgängig gemacht, und diese absoluten Leuchtdichten werden durch die maximale Leuchtdichte geteilt, um eine Datei zu erhalten, in der jeder Schrittmotorposition ein relativer Transmissionswert zugeordnet ist.

Um die XYZ -Koordinaten der Einstellungen der Versuchspersonen zu erhalten, werden zunächst die den Positionen der vier Schrittmotoren zugeordneten relativen Transmissionswerte aus den Dateien für die vier Graukeile ausgelesen. Mit diesen Faktoren werden

dann die XYZ -Koordinaten der vier Primärreize multipliziert, die mit Hilfe des Chromameters (Modell *CS-100* der Firma *Minolta*) gemessen werden. Die resultierenden vier X -Werte der in der Intensität verminderten Primärreize werden dann aufsummiert und ergeben den X -Wert der resultierenden Farbe. Analog wird bei der Berechnung der Y - und der Z -Werte der Mischung der Primärreize vorgegangen. Um eine Vergleichbarkeit der so berechneten XYZ -Koordinaten der Einstellungen der Probandinnen mit den XYZ -Koordinaten der Zielreize zu erhalten, werden auch diese nach obigem Verfahren berechnet. Kontrollmessungen ergeben nur geringfügige Abweichungen.

Die entsprechend der in diesem Abschnitt erläuterten Vorgehensweise erhobenen Daten sind dem nächsten Kapitel zu entnehmen.

Kapitel 3

Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sollen nun die Ergebnisse dargestellt werden, die mit Hilfe der in Abschnitt 2 beschriebenen Vorgehensweise erhoben worden sind. Dabei werden zunächst die Ergebnisse des Vorversuches (siehe auch Abschnitt 2.1), dann die der Haupterhebung (siehe auch Abschnitt 2.2) berücksichtigt.

3.1 Ergebnisse des Vorversuches

Der Vorversuch lehnt sich hinsichtlich des methodischen Vorgehens an K.A. Jameson et al. (2001) und Smeulders et al. (1994) an und soll, wie schon in den Abschnitten 1.3 und 2.1 ausführlich erläutert, der Vorauswahl von Versuchspersonen dienen, die im Hauptversuch näher untersucht werden sollen.

Im Vorversuch werden der Ishihara-Test (Ishihara, 1968) und der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests (Farnsworth, 1957) durchgeführt, um nicht nur farbschwache von farbnormalen Beobachtern zu trennen, sondern auch, um Versuchspersonen mit möglichst gutem Farbunterscheidungsvermögen für den Hauptversuch auszuwählen. Weiterhin wird vier Mal die in Abschnitt 1.2.5 ausführlich beschriebene Einteilung des Spektrums entsprechend K.A. Jameson et al. (2001) vorgenommen. Zunächst soll die Einteilung der Versuchspersonen in zwei Gruppen für den Hauptversuch dargestellt werden, es folgen die Ergebnisse der beiden Tests der Farbtüchtigkeit und des Farbunterscheidungsvermögens. Dann folgt eine Darstellung der Ergebnisse der Einteilungen des Spektrums.

3.1.1 Klassifikation der Versuchspersonen

Im Vorversuch sollen sich entsprechend den Untersuchungen von K.A. Jameson et al. (2001) Unterschiede zwischen den Versuchspersonen hinsichtlich der Anzahl der gekennzeichneten Bereiche im Spektrum ergeben. Die Zahl der eingezeichneten Bereiche korreliert nach K.A. Jameson et al. (2001) hoch mit der Anzahl der unterschiedlichen, in den Genen kodierten Photopigmente: Für das L-Opsin homozygote weibliche und alle männlichen Probanden sollten signifikant weniger Bereiche im Spektrum abgrenzen können als die weiblichen Heterozygoten. Diese sind möglicherweise auch phänotypische

Tetrachromaten. Sie sollten aufgrund des zusätzlichen Photopigments über deutlich bessere Diskriminationsfähigkeiten verfügen, also eine größere Anzahl an Unterteilungen im Spektrum anbringen als die trichromatische Vergleichsgruppe.

Anhand der unterschiedlichen Anzahlen von gekennzeichneten Bereichen im Spektrum wird eine vorläufige Einteilung der Probanden in zwei Gruppen vorgenommen. Anhand des arithmetischen Mittels über vier Durchgänge der gekennzeichneten Bereiche der Frauen, das bei $M = 13.91$ ($SD = 5.66$) liegt, werden die weiblichen Probanden in eine Gruppe mit im Mittel mehr als 14 (Gruppe *überdurchschnittlich spektralempfindlich*, $N = 20$) und eine Gruppe mit im Mittel weniger als 14 eingetragenen Bereichen (Gruppe *unterdurchschnittlich spektralempfindlich*, $N = 33$) eingeteilt. Männliche Probanden werden bei dieser Einteilung nicht berücksichtigt, da in der vorliegenden Arbeit davon ausgegangen wird, dass sie nicht über mehr als drei unterschiedliche Zapfen-Opsine verfügen können (siehe jedoch auch M. Neitz & J. Neitz, 1995).

Aufgrund der Vorgehensweise bei der Einteilung der weiblichen Probanden in unter- und überdurchschnittlich spektralempfindliche Frauen ist davon auszugehen, dass sich die Gruppen signifikant unterscheiden. Der Vollständigkeit halber werden dennoch die entsprechenden Tests durchgeführt. Im Mittel aller 4 Durchgänge kennzeichnen unterdurchschnittlich spektralempfindliche Frauen $M = 10.17$ ($N = 33$, $SD = 2.55$) Bereiche im Spektrum, überdurchschnittlich spektralempfindliche Frauen $M = 20.09$ ($N = 20$, $SD = 3.54$, siehe auch Abschnitt 3.1.4 und Tabelle 3.1). Die beiden Gruppen unterscheiden sich signifikant bezüglich der arithmetischen Mittel der als voneinander abgegrenzt wahrgenommenen Bereiche in allen vier Durchgängen ($t = -11.82$, $df = 51$, $p \leq .001$).

3.1.2 Ergebnisse des Ishihara-Tests

Der Ishihara-Test (Ishihara, 1968) zur Erfassung genetisch bedingter Farbschwäche ergibt bei zwei männlichen Versuchspersonen Hinweise auf genetisch bedingte Farbfehlsichtigkeit. Diese Versuchspersonen unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anzahl der von ihnen gekennzeichneten Bereiche im Spektrum nicht von den anderen männlichen Versuchspersonen ($t = -0.85$, $p = .407$), und sind auch innerhalb der Gesamtstichprobe nicht auffällig ($t = 1.08$, $p = .283$). Daher wird davon ausgegangen, dass es sich bei ihnen um anomale Trichromaten und nicht um Dichromaten handelt. Sie werden daher in den restlichen Auswertungen als männliche Trichromaten behandelt. Keine der weiblichen Versuchspersonen weist in diesem Test auffällige Daten auf.

3.1.3 Ergebnisse des Farnsworth-Munsell-100-Hue Tests

Aus den mit Hilfe des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) erhobenen Daten wird, wie im Testmanual (Farnsworth, 1957) beschrieben, ein Fehlerwert berechnet. Die Error-Scores liegen in der Gesamtstichprobe zwischen 0 und 176 Fehlerpunkten, im Mittel bei $M = 45.12$ ($SD = 35.05$). Dabei liegt der mittlere Fehlerwert des weiblichen Teils der untersuchten Stichprobe bei $M = 40.42$ ($SD = 28.20$), der der männlichen Versuchspersonen bei $M = 57.00$ Fehlerpunkten ($SD = 46.99$). Der t -Test für unabhängige Stichproben ergibt keinen signifikanten Unterschied der Mittelwerte der beiden Gruppen ($t = -1.51$, $df = 25.91$, $p = .142$).

Der mittlere Error-Score des als unterdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Teils der weiblichen Stichprobe liegt bei $M = 41.64$ ($N = 33$, $SD = 29.84$). Der mittlere Fehlerwert der als überdurchschnittlich spektralempfindlich eingestuften weiblichen Probanden liegt bei $M = 38.40$ Fehlerpunkten ($N = 20$, $SD = 25.89$). Der Mittelwertsvergleich mit Hilfe des t -Tests ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($t = 0.40$, $df = 51$, $p = .690$). Es ergeben sich folglich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Gruppen hinsichtlich des Fehlerwertes im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957).

3.1.4 Einteilung des Spektrums

Das Spektrum wird von allen Versuchspersonen, gemittelt über alle 4 Durchgänge, durch Bleistiftstriche in $M = 13.45$ ($SD = 5.57$) unterschiedliche Farbtöne eingeteilt. Dabei liegt das Minimum bei 4.25, das Maximum bei 26.75. Im ersten Durchgang können $M = 11.99$ Bereiche ($SD = 4.58$) im Spektrum erkannt werden, mindestens 4 und höchstens 25. Im zweiten Durchgang liegt das arithmetische Mittel der erkannten Bereiche bei $M = 12.34$ ($SD = 5.17$). Es werden mindestens 4 und höchstens 26 unterschiedliche Bereiche eingezeichnet. Die entsprechenden Werte für den dritten bzw. den vierten Durchgang liegen bei $M = 15.11$ ($SD = 7.13$), Minimum 4 und Maximum 32, sowie bei $M = 14.36$ ($SD = 6.62$), 4 und 30. Der t -Test für gepaarte Stichproben ergibt, dass sich die Ergebnisse im dritten Durchgang signifikant von denen in den restlichen drei Durchgängen unterscheiden. Für Unterschiede zwischen der Zahl der gekennzeichneten Abschnitte im Spektrum im ersten und dritten Durchgang ergibt sich ein t -Wert von -6.30 bei $df=73$ und einem p -Wert kleiner als $.001$. Für Unterschiede in der Anzahl der erkannten Bereiche zwischen dem zweiten und dem dritten Durchgang zeigt sich ein ähnliches Bild: $t=-6.10$, $df=73$, $p \leq .001$, ähnlich sieht es hinsichtlich der Unterschiede zwischen dem vierten und dem dritten Durchgang aus: $t=-2.82$, $df = 73$, $p = .006$.

Geschlechtsspezifische Unterschiede

Gemittelt über alle Durchgänge kennzeichnen die weiblichen Versuchspersonen ($N = 53$) $M = 13.92$ unterschiedliche Bereiche im Spektrum ($SD = 5.67$). Dabei ergeben sich in den einzelnen Durchgängen die in Tabelle 3.1 aufgeführten Mittelwerte. Die männlichen Probanden ($N = 21$) teilen das Spektrum im Durchschnitt über alle Durchgänge in $M = 12.27$ unterschiedliche Abschnitte ein ($SD = 5.26$). Die Mittelwerte für die einzelnen Durchgänge sowie die zugehörigen Standardabweichungen sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Anhand der Gesamtmittelwerte und der Mittelwerte der Einzeldurchgänge ist erkennbar, dass nur geringe Unterschiede zwischen den männlichen und den weiblichen Versuchsteilnehmern bestehen. Dies wird auch durch den t -Test für unabhängige Stichproben für die Unterschied im Gesamtmittel bestätigt, der bei einem Wert von $t = 1.145$ ($df = 72$, $p = .256$) keinen signifikanten Unterschied ergibt.

Das arithmetische Mittel der erkannten Bereiche über alle Durchgänge liegt für die als unterdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Frauen ($N = 33$) bei 10.17 ($SD = 2.55$). Dabei ergeben sich in den einzelnen Durchgängen die in Tabelle 3.1 aufgeführten Mittelwerte. Auch bezüglich dieser Unterschiede zwischen unterdurchschnitt-

Tabelle 3.1: Mittelwerte der gekennzeichneten Farbtöne im Spektrum. Die Werte sind für Männer und Frauen insgesamt sowie für die beiden Frauengruppen *unterdurchschnittlich spektralempfindlich* und *überdurchschnittlich spektralempfindlich* in allen 4 Durchgängen getrennt angegeben. Weiterhin ist zu jedem Wert die entsprechende Standardabweichung angegeben.

Gruppe	Durchgang							
	1. Durchg.		2. Durchg.		3. Durchg.		4. Durchg.	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Frauen(gesamt)	12.26	4.80	12.62	5.34	15.83	7.31	14.94	6.64
Männer(gesamt)	11.29	3.99	11.62	4.79	13.29	6.47	12.90	6.51
Frauen								
unterd. spempf.	9.61	2.56	9.52	2.69	11.00	3.21	10.58	2.69
überd. spempf.	16.65	4.40	17.75	4.61	23.80	4.62	22.15	4.53

lich spektralempfindlichen Frauen und Männern ist erkennbar, dass sich die Mittelwerte der beiden Gruppen nicht stark voneinander unterscheiden. Dies wird durch den *t*-Test für unabhängige Stichproben mit $t = -1.705$ ($df = 26.075$, $p = .100$) bestätigt: Die beiden Gruppen unterscheiden sich nicht überzufällig stark voneinander.

Das arithmetische Mittel der erkannten Bereiche über alle Durchgänge liegt für die als überdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Frauen ($N = 20$) bei 20.09 ($SD = 3.54$). Dabei ergeben sich in den einzelnen Durchgängen die in Tabelle 3.1 aufgeführten Mittelwerte. Anhand dieser Mittelwerte ist erkennbar, dass sich die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen und die Gruppe der Männer deutlich voneinander unterscheiden, wobei die Männer im Mittel weniger Bereiche im Spektrum kennzeichnen. Der *t*-Test für unabhängige Stichproben bestätigt dieses Vermutung: Es ergibt sich mit $t = 5.60$ ($df = 35.18$, $p \leq .001$) ein statistisch bedeutsamer Unterschied der Mittelwerte der beiden Gruppen.

Aus statistischen Gründen sollte jedoch die Extremgruppe der Frauen auch mit einer Extremgruppe der Männer verglichen werden. Daher wird auch die männliche Stichprobe anhand ihres arithmetischen Mittels, das bei $M = 12.27$ ($SD = 5.26$) liegt, in eine Gruppe überdurchschnittlich spektralempfindlicher ($N = 9$, $M = 17.44$, $SD = 3.13$) und eine Gruppe unterdurchschnittlich spektralempfindlicher Beobachter ($N = 12$, $M = 8.40$, $SD = 2.22$) eingeteilt. Diese beiden männlichen Extremgruppen werden mit den weiblichen Extremgruppen verglichen. Die Ergebnisse dieser Vergleiche sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

In Tabelle 3.2 ist erkennbar, dass sich die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen hinsichtlich des arithmetischen Mittels der voneinander abgrenzbaren Bereiche nicht signifikant von den überdurchschnittlich spektralempfindlichen männlichen Probanden unterscheiden. Die beiden als unterdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Gruppen unterscheiden sich jedoch signifikant, genauso, wie sich erwartungsgemäß

Tabelle 3.2: t -Test zum Vergleich des arithmetischen Mittels der erkannten Farbtöne (gemittelt über alle vier Versuchsdurchgänge) für die vier Extremgruppen überdurchschnittlich spektralempfindliche Frauen, unterdurchschnittlich spektralempfindliche Frauen, überdurchschnittlich spektralempfindliche Männer und unterdurchschnittlich spektralempfindliche Männer.

Gruppe	M	SD	Vergleich mit	t	df	p
Überd. weiblich	20.09	3.54	Überd. männlich	1.92	27	.065
Unterd. weiblich	10.17	2.55	Unterd. männlich	2.13	43	.039
Überd. männlich	17.44	3.13	Unterd. weiblich	7.22	40	$\leq .001$
Unterd. männlich	8.40	2.22	Überd. weiblich	-10.25	30	$\leq .001$

signifikante Unterschiede zwischen den überdurchschnittlich spektralempfindlichen männlichen und den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen weiblichen Probanden und den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen männlichen und den überdurchschnittlich spektralempfindlichen weiblichen Versuchspersonen ergeben.

Unterschiede zwischen normalen und überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachtern

Schließlich werden die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen und die männlichen Probanden zu einer Gruppe der *normalen Beobachter* zusammengefasst, die mit den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen (*spektralempfindliche Beobachter*) verglichen werden sollen. Dabei sind vor allem die Vergleiche hinsichtlich des Fehlerwertes im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) und hinsichtlich der im Durchschnitt wahrgenommenen Anzahl unterschiedlicher Bereiche im Spektrum wichtig.

Im Mittel weisen die normalen Beobachter ($N = 54$) einen Fehlerwert von $M = 47.61$ auf ($SD = 37.79$), die spektralempfindlichen Beobachter ($N = 20$) einen Fehlerwert von $M = 38.40$ ($SD = 25.89$). Der t -Test ergibt mit $t = 1.00$ ($df = 72$, $p = .319$) keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die arithmetischen Mittel der wahrgenommenen Abschnitte im Spektrum in allen 4 Durchgängen betragen für die normalen Beobachter $M = 10.99$ ($SD = 3.93$), für die spektralempfindlichen Beobachter $M = 20.09$ ($SD = 3.54$). Der t -Test ergibt hier erwartungsgemäß einen signifikanten Mittelwertsunterschied ($t = -9.07$, $df = 72$, $p \leq .001$).

3.2 Hauptversuch

Im Hauptversuch werden 14 weibliche Probanden aus dem Vorversuch im Farbmischungsexperiment näher untersucht. Dabei handelt es sich um sieben anhand der Ergebnisse des

Vorversuches als unterdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierte Versuchspersonen und sieben als überdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierte. Die Ergebnisse des Vorversuches für die Probandinnen sind Tabelle B.1 in Anhang B.1 zu entnehmen.

Der Mittelwert der erkannten Bereiche im Spektrum für die Gruppe der sieben unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen (im Hauptversuch) liegt bei $M = 9.46$ ($SD = 2.22$), der der anderen Gruppe bei $M = 20.68$ ($SD = 4.00$). Die entsprechenden t -Tests zeigen, dass sich die beiden Gruppen nicht nur hinsichtlich der durchschnittlichen Anzahl der im Spektrum erkannten Bereiche signifikant unterscheiden ($t = -6.49$, $df = 12$, $p \leq .001$, bei gleichen Varianzen). Auch die Fehlerterme der beiden Gruppen im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) unterscheiden sich signifikant: Der durchschnittliche Fehlerwert der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter liegt bei $M = 10.86$ ($SD = 7.90$), der der überdurchschnittlich spektralempfindlichen bei $M = 24.43$ ($SD = 14.28$; $t = -2.20$, $df = 12$, $p = .048$), die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter weisen im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) einen signifikant geringeren Fehlerwert auf. Hinsichtlich der weiteren Variablen Alter (in Jahren, $M_{unt} = 24.71$, $M_{ueb} = 23.00$, $t = .69$, $df = 12$, $p = .505$) bestehen jedoch keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

3.2.1 Gedächtniseffekte

Der Unterschied zwischen den vorgegebenen Reizen und den mittleren von einer Versuchsperson eingestellten Abgleichen erlaubt eine Schätzung der *Gedächtniseffekte*. Dazu wird angenommen, dass das Zentroid der Einstellungen zu einem Standardreiz der Gedächtnisfarbe (siehe Abschnitt 1.1) entspricht. Für jede Versuchsperson sind im Anhang B.2 in Tabelle B.2 und Tabelle B.2 die XYZ-Koordinaten der Mittelwerte ihrer Einstellungen zu den einzelnen Standardreizen angegeben. Anhand dieser Werte kann man feststellen, dass es teilweise zu relativ großen Abweichungen der im Mittel eingestellten Farbe von der Vorgabe kommt.

Die Abweichungen der vorgegebenen von der eingestellten Farbe sind anhand von jeweils zwei der insgesamt sieben Versuchsperson bei jedem Zielreiz den Abbildungen 3.1 und 3.2 für die unter- und den Abbildungen 3.3 und 3.4 für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zu entnehmen. Es ist erkennbar, dass sich die Koordinaten der mittleren Einstellungen tendenziell in Richtung Spektralzug verändern. Die Gedächtnisfarben sind also gegenüber den vorgegebenen Farbreizen stärker gesättigt. Dieser Effekt ist im Einklang mit den Ergebnissen von Bartleson (1959) und Newhall, Burnham und Clark (1957), die in Abschnitt 1.1 näher dargestellt sind: Die aus dem Gedächtnis reproduzierten Einstellungen weisen eine höhere Sättigung auf als die vorgegebenen Reize. Dieser Gedächtniseffekt wirkt sich jedoch unabhängig von der Versuchspersonengruppe aus.

Weitere systematische Tendenzen in den Streuungen der Einstellungen kann man anhand der Diskriminationsellipsoide erkennen, deren Bedeutung in Abschnitt 1.1.3 genauer beschrieben ist. Zu ihrer Berechnung ist es notwendig, eine mehrdimensionale Normalverteilung der Daten vorauszusetzen. Sie sind für vier von insgesamt 14 Versuchspersonen in den Abbildungen C.5 und C.6 in Anhang C für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen, in den Abbildungen C.7 und C.8 in Anhang C für die überdurchschnittlich

spektralempfindlichen Versuchspersonen dargestellt. Ihre Darstellungen in der XY -, XZ - und YZ -Ebene sind ebenfalls Anhang C zu entnehmen.

Diese Ellipsoide beschreiben die 95%-Konfidenzbereiche für den Erwartungswert der Einstellungen zum jeweiligen Standardreiz. Dabei ist zu beachten, dass die Ellipsoide für die Reize 1, 4, 9 und 10 jeweils alle Einstellungen zu diesen Reizen berücksichtigen, also sowohl diejenigen mit Hilfe von drei, als auch die mit Hilfe von vier Primärreizen erstellten. Daher sind diese Ellipsoide tendenziell größer. Gleiches gilt für die Abbildungen der Diskriminationsellipsoide im Anhang.

Da die Umrechnung zwischen XYZ -Koordinaten und xyL -Koordinaten nicht linear ist, und daher nicht von einer multivariaten Normalverteilung der Daten im xyL -System ausgegangen werden kann, sind die Darstellungen der Diskriminationsellipsen in der Normfarbtafel mit Vorsicht zu interpretieren. Sie sind aber dennoch in Anhang C aufgenommen, um die Ergebnisse mit anderen, üblicherweise in der Normfarbtafel dargestellten Befunden (siehe Abschnitt 1.1.3) vergleichbar zu machen.

Bei Betrachtung der Abbildungen der Diskriminationsellipsoide in der Normfarbtafel erkennt man, dass sie eine relativ kleine Fläche haben. Die größere der beiden Hauptachsen liegt meist parallel zum Spektralzug, die kleinere verschwindet oft fast vollständig. Ein solches Bild kommt zustande, wenn bei Vorgabe eines monochromatischen Zielreizes immer sehr stark gesättigte Abgleiche eingestellt werden, so dass die Farborte der Einstellungen nur noch entlang des Spektralzuges variieren. Die Probandinnen sind bei Anwendung der Gedächtnismethode zu konsistenteren Einstellungen fähig, wenn die Reize stärker gesättigt sind, da bei diesen Reizen leichter eine eindeutige Gedächtnisfarbe gebildet werden kann (siehe auch Brown, 1957; Brown & MacAdam, 1949; MacAdam, 1942b). Lediglich bei Reiz 8 sind sie im Vergleich zu den anderen etwas vergrößert. Dies ist jedoch ein Bereich, in dem sich allgemein die Diskriminationsellipsoide vergrößern, wie aus Abbildung 1.2 ersichtlich ist. Ihre relative Größe ist jedoch über die Versuchspersonen hinweg, unabhängig von der Gruppe, relativ konstant, so dass diese Streuung eher für die einzelnen Reize kennzeichnend zu sein scheint und weniger für die Versuchspersonengruppe. Mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen diesem Phänomen Gedächtniseffekte zugrunde, die über die Versuchspersonengruppen hinweg für den einzelnen Reiz charakteristisch sind.

3.2.2 Merkmale der Einstellungen

Im Folgenden sollen unterschiedliche Merkmale der Einstellungen der Versuchspersonen betrachtet werden. Dabei werden zunächst zur Quantifizierung der Abweichungen von der Reizvorgabe Farbabstände betrachtet, dann wird auf die Bearbeitungszeiten für die Erstellung der Abgleiche sowie die benötigte Anzahl an Aktionen eingegangen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Reize in den drei unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

Abweichung von der Reizvorgabe

Zur Quantifizierung der Größe der mittleren Abweichungen der Einstellungen von den vorgegebenen Zielreizen werden Farbabstände betrachtet: Für jede Versuchsperson und

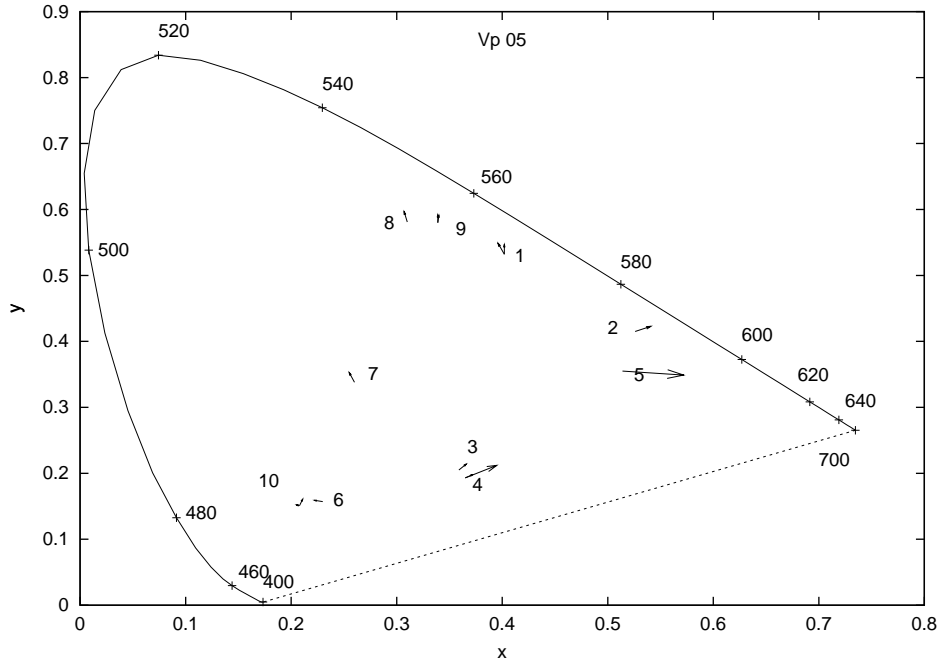


Abbildung 3.1: *Gedächtniseffekte für Vp 05 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Die Gedächtniseffekte bei den 10 vorgegebenen Reizen sind jeweils durch einen Pfeil dargestellt. Die Fußpunkte der Pfeile liegen bei den Koordinaten der vorgegebenen Farbe, die Spitzen liegen beim Mittelwert der eingestellten Koordinaten. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgt als arithmetisches Mittel der XYZ-Koordinaten der Farben. Von den vier Reizen, die sowohl in der Bedingung „Abgleich mit 3 Primärreizen“ als auch in der Bedingung „Abgleich mit 4 Primärreizen“ unverändert dargeboten werden, gehen jeweils zwei Pfeile aus.

jeden Reiz ist in Anhang B.2 der mittlere ΔE_{94}^* -Abstand (siehe Tabelle B.4 und B.5) sowie dessen Standardfehler angegeben, da die Distanz im XYZ-Raum als Farbabstandsmaß wegen der fehlenden Längentreue nicht geeignet ist. Das ΔE_{94}^* -Maß schwankt für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zwischen 6.04 und 20.91, bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen zwischen 6.15 und 22.6. Bemerkenswert ist, dass in beiden Gruppen zu den Reizen, die lediglich aus drei Primärreizen bestehen, mit wenigen Ausnahmen die besten Abgleiche erstellt werden können, während Abgleiche mit Hilfe von vier Primärreizen zu Farben, die sich aus vier Primärreizen zusammensetzen, weniger genau zu gelingen scheinen: In der Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen gelingen allen sieben Beobachtern die genauesten Abgleiche bei Reizen, die aus drei Primärreizen zusammengesetzt sind. Die Betrachtung der schlechtesten Übereinstimmung zwischen vorgegebener und eingestellter Farbe ergibt ein weniger eindeutiges Bild. Das Farbabstandsmaß ist sowohl bei solchen Reizen sehr groß, die aus vier Primärfarben bestehen, als auch bei Reizen, die aus dreien bestehen, jedoch mit Hilfe von vier Primärreizen hergestellt werden sollen. Auch die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter erzielen meist für solche Reize die beste Übereinstimmung zwischen Vorgabe und Abgleich, die aus drei Primärreizen bestehen. Lediglich eine Probandin erzielt bei einem Reiz das beste Ergebnis, der aus vier Primärreizen besteht (Reiz Nr. 3 (4/4, $\lambda_b = 540$ nm)). Die schlechteste Übereinstimmung zwischen

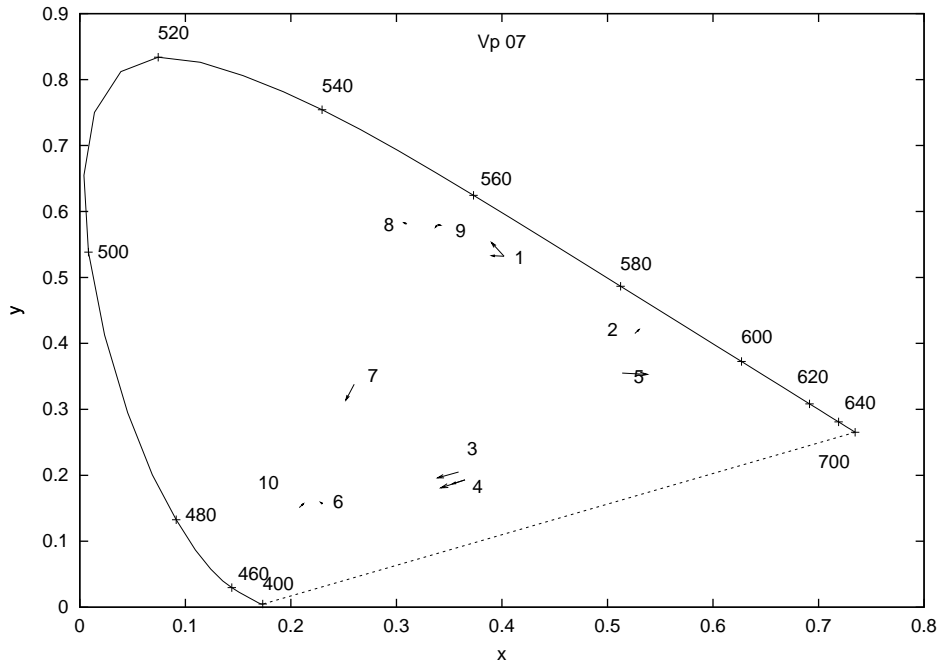


Abbildung 3.2: Gedächtniseffekte für Vp 07 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich): Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung 3.1.

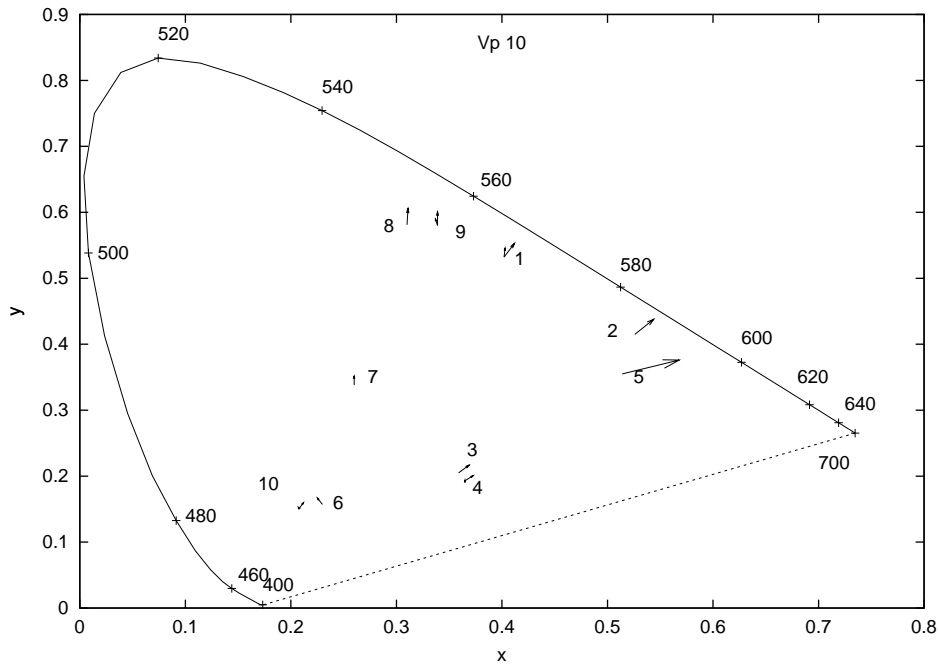


Abbildung 3.3: Gedächtniseffekte für Vp 10 (überdurchschnittlich spektralempfindlich): Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung 3.1.

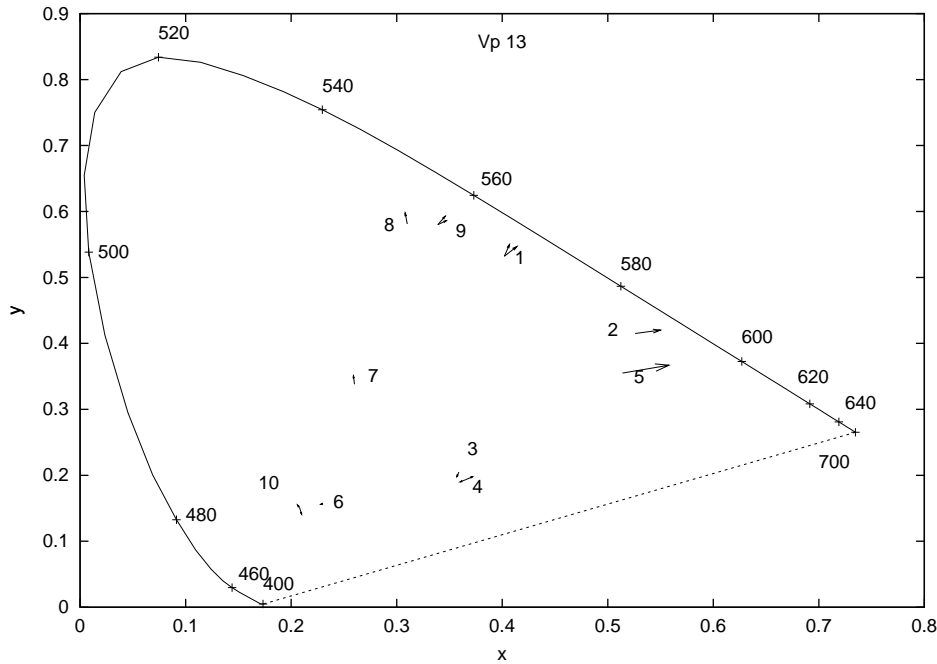


Abbildung 3.4: *Gedächtniseffekte für Vp 13 (überdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung 3.1.

vorgegebener und eingestellter Farbe ergibt sich mit nur einer Ausnahme bei Reizen, die aus vier Primärreizen bestehen. Lediglich eine Probandin weist bei Reiz Nr. 1 (3/4, $\lambda_b = 567$ nm), der aus drei Primärreizen besteht, aber mit vieren hergestellt werden soll, die schlechteste Übereinstimmung zwischen vorgegebenem und eingestelltem Reiz auf.

Anhand der Tabellen 3.3, 3.4 und 3.5 kann überprüft werden, ob diese Unterschiede statistisch bedeutsam sind. Hier sind die Ergebnisse der statistischen Vergleiche der ΔE_{94}^* -Abstände in den drei unterschiedlichen Versuchsbedingungen aufgeführt. Die entsprechenden Tests werden nur dann durchgeführt, wenn die parameterfreie einfaktorische Varianzanalyse (siehe Tabelle 3.3) signifikante Unterschiede ergibt. Anhand der Tabelle 3.3 ist erkennbar, dass die Unterschiede im ΔE_{94}^* -Abstand zwischen den Versuchsbedingungen nicht in allen Fällen auch statistisch bedeutsam sind: Bei den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zeigt die Varianzanalyse nur in drei von sieben Fällen Unterschiede, bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zeigt sich dieser Befund ebenfalls nur in vier von sieben Fällen. Die t -Tests in den Tabellen 3.4 und 3.5 deuten darauf hin, dass hinsichtlich der Genauigkeit der Abgleiche zwischen den beiden Versuchspersonengruppen kaum Unterschiede bestehen: Statistisch bedeutsame Unterschiede der ΔE_{94}^* -Abstände ergeben sich, wenn überhaupt, meist zwischen Versuchsbedingung 4/4 und 3/3, wobei der Abgleich zu Reizen, die aus vier Primärreizen bestehen und die auch mit Hilfe von vieren hergestellt werden sollen, von keiner der beiden Gruppen so genau erstellt werden kann wie Abgleiche in der Bedingung 3/3. Wenn Unterschiede in der Genauigkeit zwischen den Versuchsbedingungen bestehen, dann sind die Unterschiede im ΔE_{94}^* -Abstand zwischen Bedingung 4/4 und 3/4 in beiden Gruppen meist ebenfalls signifikant. Der mittlere ΔE_{94}^* -Abstand ist ausnahmslos in der Versuchs-

Tabelle 3.3: Ergebnisse der parameterfreien einfaktoriellen Varianzanalyse beim Vergleich der durchschnittlichen ΔE_{94}^* -Abstände in den drei Versuchsbedingungen 4/4, 3/3 und 3/4 für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen (oben) und die überdurchschnittlich spektralempfindlichen (unten) Versuchspersonen.

Unterdurchschnittlich spektralempfindlich							
	Mittelwerte(SD)			df_1	df_2	F-Wert	p
	4/4	3/3	3/4				
Vp 01	13.12 (8.37)	12.96 (7.24)	11.92 (6.93)	2	673	.8953	.4090
Vp 02	12.09 (8.40)	9.44 (5.71)	9.60 (5.69)	2	673	7.6296	$\leq .001$
Vp 03	10.72 (7.53)	9.24 (5.34)	9.02 (5.56)	2	673	3.5830	.0283
Vp 04	11.37 (7.33)	10.19 (5.89)	10.20 (6.38)	2	673	1.9346	.1453
Vp 05	12.33 (9.00)	9.82 (4.21)	9.74 (4.50)	2	673	7.0253	.0010
Vp 06	14.44 (9.53)	13.24 (8.37)	13.76 (9.26)	2	673	.7707	.4631
Vp 07	10.85 (7.47)	9.06 (6.09)	9.98 (6.88)	2	673	2.7442	.0650

Überdurchschnittlich spektralempfindlich							
	Mittelwerte(SD)			df_1	df_2	F-Wert	p
	4/4	3/3	3/4				
Vp 08	12.31 (7.79)	9.84 (6.72)	12.31 (8.55)	2	673	4.1582	0.160
Vp 09	16.03 (11.04)	13.67 (8.89)	16.355 (9.73)	2	673	2.1868	.1131
Vp 10	10.77 (6.52)	8.64 (5.49)	8.71 (5.60)	2	673	7.2368	$\leq .001$
Vp 11	10.99 (6.74)	9.24 (5.56)	9.16 (5.49)	2	673	5.35	.0049
Vp 12	14.13 (9.58)	12.30 (7.96)	12.11 (8.12)	2	673	3.0291	.0490
Vp 13	12.49 (7.83)	9.41 (6.25)	12.69 (8.50)	2	673	6.7210	.0013
Vp 14	11.68 (8.03)	10.51 (6.32)	11.22 (6.88)	2	673	.9936	.3708

bedingung 3/3 am geringsten und in Bedingung 4/4 am größten. Meist liegt der mittlere Abstand in Bedingung 3/4 dazwischen. Es ergeben sich auch keine Unterschiede in der Genauigkeit der Abgleiche zwischen Bedingung 3/3 und 3/4. Dies war zu erwarten, da in beiden Bedingungen dieselben Reize präsentiert werden, nur die Instruktion bzw. die Anzahl der zur Verfügung stehenden Primärreize ändert sich. Einzige Ausnahme ist Vp 13, die keine Genauigkeitsunterschiede zwischen Bedingung 4/4 und 4/3, jedoch zwischen den Bedingungen 3/3 und 3/4 aufweist.

Insgesamt wird also bei Betrachtung des ΔE_{94}^* -Abstands deutlich, dass, wenn sich Unterschiede in der Genauigkeit der Abgleiche zwischen den Versuchsbedingungen ergeben, die Abgleiche zu Reizen, die sich aus drei Primärreizen zusammensetzen, deutlich genauer

Tabelle 3.4: Vergleich der durchschnittlichen ΔE_{94}^* -Abstände für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit Hilfe von 4 Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und aus 3 Farben hergestellt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	M	Vergleich mit	M	<i>t</i>	<i>df</i>	<i>p</i>
Vp 01	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						
Vp 02	4/4	12.09	3/3	9.44	3.81	187.12	≤.001
	4/4	12.09	3/4	9.60	3.59	187.85	≤.001
	3/3	9.44	3/4	9.60	-.19	190	.850
Vp 03	4/4	10.72	3/3	9.24	1.84	578	.066
	4/4	10.72	3/4	9.02	2.57	172.14	.011
	3/3	9.24	3/4	9.02	.28	190	.781
Vp 04	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						
Vp 05	4/4	12.33	3/3	9.82	4.23	296.70	≤.001
	4/4	12.33	3/4	9.74	4.21	272.13	≤.001
	3/3	9.82	3/4	9.74	.12	190	.903
Vp 06	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						
Vp 07	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						

Tabelle 3.5: Vergleich der durchschnittlichen ΔE_{94}^* -Abstände für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit Hilfe von 4 Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und aus 3 Farben hergestellt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	M	Vergleich mit	M	t	df	p
Vp 08	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						
Vp 09	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						
Vp 10	4/4	10.77	3/3	8.64	2.89	578	.004
	4/4	10.77	3/4	8.71	2.79	578	.005
	3/3	8.64	3/4	8.71	-.09	190	.930
Vp 11	4/4	10.99	3/3	9.24	2.72	155.69	.007
	4/4	10.99	3/4	9.16	2.86	157.32	.005
	3/3	9.24	3/4	9.16	.10	190	.924
Vp 12	4/4	14.13	3/3	12.30	1.75	578	.80
	4/4	14.13	3/4	12.11	2.15	152.30	.033
	3/3	12.30	3/4	12.11	.16	190	.872
Vp 13	4/4	12.49	3/3	9.41	3.64	578	$\leq .001$
	4/4	12.49	3/4	12.69	-.22	578	.826
	3/3	9.41	3/4	12.69	-3.04	174.50	.003
Vp 14	Keine sig. Unterschiede (siehe Tabelle 3.3)						

gelingen als zu Reizen, die aus vier Primärreizen bestehen. Jedoch zeigen sich lediglich bei der Hälfte der Probanden überhaupt Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen. Zudem zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich der Genauigkeit der Abgleiche.

Bearbeitungszeiten

Die Messung der Bearbeitungszeiten in Sekunden erfolgt zwischen dem Zeitpunkt, zu dem die Versuchsperson mit dem Verändern des Ausgangsreizes hin zum Zielreiz beginnt, und dem durch Hebeldruck signalisierten Ende des Mischungsvorganges. In Tabelle B.6 und Tabelle B.7 in Anhang B.2 sind die mittleren für eine Einstellung benötigten Zeiten sowie deren Standardfehler für alle Zielreize und alle Versuchspersonen, getrennt nach Gruppen, aufgeführt. Anhand der Tabelle ist erkennbar, dass sich für beide Versuchspersonengruppen die Tendenz fortsetzt, die sich bereits bei der Betrachtung der Genauigkeit der Abgleiche im vorangegangenen Abschnitt gezeigt hat: Diejenigen Reize, für deren Ermischung am wenigsten Zeit benötigt wird, bestehen lediglich aus drei der vier Primärfarben. Hinsichtlich der am längsten dauernden Abgleiche zeigt sich für die unterdurchschnittlich spektralempfindliche Gruppe ein uneinheitliches Bild, meist ist es jedoch ein Reiz aus der Versuchsbedingung 4/4, für den am meisten Zeit benötigt wird. Bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zeigt sich ebenfalls die Tendenz zu einer schnelleren Erstellung der 3/3-Reize und einer längeren Zeitdauer beim Erstellen des Abgleichs, wenn es sich um einen 4/4-Reiz handelt.

Den Tabellen 3.6 und 3.7 sind die *U*-Tests zum Vergleich der drei Bedingungen im Experiment zu entnehmen. Sie werden nur dann durchgeführt, wenn die parameterfreie einfaktorielle Varianzanalyse einen signifikanten Unterschied zwischen den drei Reizbedingungen (Reiz besteht aus drei Primärreizen und soll mit drei (3/3) oder vier (3/4) Primärreizen hergestellt werden, Reiz besteht aus vier Primärreizen und soll auch mit vieren ermischt werden (4/4)) ergibt. Anhand der Tabellen ist erkennbar, dass bei allen Versuchspersonen, unabhängig von der Gruppe, ein statistisch bedeutsamer Unterschied zwischen den 4/4-Reizen und den 3/3-Reizen hinsichtlich der für den Abgleich benötigten Zeit besteht. Der Abgleich zu den 3/3-Reizen lässt sich, wie schon anhand der Tabellen B.6 und B.7 im Anhang ersichtlich, signifikant schneller erstellen als ein Abgleich zu den 4/4-Reizen. Der Median der benötigten Zeit für die 3/4-Reize liegt erwartungsgemäß zwischen dem für die 3/3-Reize und dem für die 4/4-Reize. Einzige Ausnahme ist Vp 03, die für den 3/4-Abgleich etwas länger braucht als für den 4/4-Abgleich. Zwischen den 4/4-Reizen und den 3/4-Reizen ergeben sich bei drei von sieben unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen signifikante Unterschiede. Dieser Befund zeigt sich bei allen überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden, mit Ausnahme von Vp 14. Der Median der benötigten Zeit unterscheidet sich zwischen Bedingung 3/3 und 3/4 bei fünf von sieben unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden signifikant, dies ist lediglich bei drei von sieben überdurchschnittlich spektralempfindlichen Gruppe der Fall. Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, da in beiden Bedingungen die gleichen Zielreize vorgegeben werden.

Es zeigt sich also auch bei der Betrachtung der für die einzelnen Abgleiche benötigten Zeit dieselbe Tendenz wie bei der Analyse des Farbabstandsmaßes. Abgleiche zu Rei-

Tabelle 3.6: Vergleich der Bearbeitungszeiten (in Sekunden) der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit vier Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und mit Hilfe von 3 Farben ermischt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	Median	Vergleich mit	Median	U'	z(U')	p
Vp 01	4/4	36.0	3/3	32.0	17270.0	-3.977	≤.001
	4/4	36.0	3/4	35.0	21306.0	-1.285	.1989
	3/3	32.0	3/4	35.0	3815.0	-2.061	.0393
Vp 02	4/4	47.5	3/3	39.0	12217.0	-7.347	≤.001
	4/4	47.5	3/4	41.0	15860.5	-4.917	≤.001
	3/3	39.0	3/4	41.0	3892.0	-1.862	.0626
Vp 03	4/4	47.0	3/3	41.0	16286.0	-4.633	≤.001
	4/4	47.0	3/4	48.0	21924.5	-0.872	.3832
	3/3	41.0	3/4	48.0	3222.5	-3.600	≤.001
Vp 04	4/4	51.0	3/3	42.0	13316.0	-6.613	≤.001
	4/4	51.0	3/4	49.5	20887.0	-1.564	.1178
	3/3	42.0	3/4	49.5	2913.5	-4.4037	≤.001
Vp 05	4/4	50.0	3/3	34.0	9602.0	-9.0896	≤.001
	4/4	50.0	3/4	45.0	18430.5	-3.202	.0014
	3/3	34.0	3/4	45.0	2285.5	-6.037	≤.001
Vp 06	4/4	29.0	3/3	24.5	16970.5	-4.177	≤.001
	4/4	29.0	3/4	25.0	19675.5	-2.373	.0177
	3/3	24.5	3/4	25.0	4084.0	-1.363	.1730
Vp 07	4/4	45.0	3/3	39.0	15629.5	-5.071	≤.001
	4/4	45.0	3/4	43.0	20590.5	-1.762	.0781
	3/3	39.0	3/4	43.0	3685.5	-2.398	.0165

zen, die lediglich aus drei Primärreizen bestehen und auch mit Hilfe von dreien erzeugt werden sollen, sind leichter, das heißt hier, schneller möglich als Abgleiche in der 4/4-Versuchsbedingung.

Anzahl der Aktionen

Als drittes Merkmal der Abgleiche der Versuchspersonen wird die Anzahl der für einen Abgleich benötigten Aktionen analysiert. Während des Experimentes werden die vor-

Tabelle 3.7: Vergleich der Bearbeitungszeiten (in Sekunden) der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit vier Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und mit Hilfe von 3 Farben ermischt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	Median	Vergleich mit	Median	U'	z(U')	p
Vp 08	4/4	38.0	3/3	32.0	14675.5	-5.710	≤.001
	4/4	38.0	3/4	35.0	18267.0	-3.314	≤.001
	3/3	32.0	3/4	35.0	3673.5	-2.430	.0151
Vp 09	4/4	44.0	3/3	38.0	17954.5	-3.519	≤.001
	4/4	44.0	3/4	38.0	18868.5	-2.910	.0036
	3/3	38.0	3/4	38.0	4411.0	-0.512	.6086
Vp 10	4/4	47.0	3/3	34.0	7925.0	-10.210	≤.001
	4/4	47.0	3/4	43.0	18135.5	-3.400	≤.001
	3/3	45.0	3/4	33.5	2226.0	-6.191	≤.001
Vp 11	4/4	38.0	3/3	33.0	15335.0	-5.268	≤.001
	4/4	38.0	3/4	35.5	19317.0	-2.612	.0090
	3/3	33.0	3/4	35.5	3874.5	-1.907	.0566
Vp 12	4/4	52.0	3/3	45.0	17973.0	-3.507	≤.001
	4/4	52.0	3/4	48.5	19904.5	-2.219	.0265
	3/3	45.0	3/4	48.5	4227.5	-0.9886	.3228
Vp 13	4/4	38.0	3/3	33.0	18228.0	-3.337	≤.001
	4/4	38.0	3/4	33.5	19619.5	-2.415	.0157
	3/3	33.0	3/4	33.5	4474.5	-0.347	.7286
Vp 14	4/4	35.0	3/3	28.0	12730.5	-7.006	≤.001
	4/4	35.0	3/4	33.0	21320.5	-1.275	.2023
	3/3	28.0	3/4	33.0	2788.0	-4.733	≤.001

gegebenen Ausgangsreize von den Probandinnen mit Hilfe eines Gamepads in Richtung Zielreiz verändert. Dabei zählt jeder Druck auf einen Knopf bei gleichzeitigem Drehen des Steuerrades als eine Aktion. Durch den Vergleich der Anzahl der Aktionen, die in einem Durchgang durchgeführt werden müssen, lassen sich gewisse Rückschlüsse auf die Vorgehensweise der Versuchspersonen beim Erstellen eines Farbabgleichs ziehen: Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, ist für die vier Schrittmotoren eine adaptive Steuerung implementiert, die bei mehrmaliger aufeinanderfolgender Betätigung die Schrittweite vorübergehend bis auf das Fünffache erhöht. Auch das Auslösen von solch größeren Schritten wird im Folgenden als eine einzige Aktion gezählt. Die durchschnittlich Anzahl der für einen Abgleich benötigten Aktionen (siehe Tabellen B.8 und B.9 im Anhang) ist also vorsichtig zu interpretieren, da, eine Veränderung zwischen einer und fünf Schrittmotoreinheiten als eine einzige Aktion gezählt wird.

In Tabelle B.8 und Tabelle B.9 im Anhang B.2 ist für jeden Standardreiz die durchschnittliche Anzahl von Aktionen angegeben. Es zeigt sich hier ein Bild, das mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Abschnitt übereinstimmt: Die Abgleiche zu Farben, die lediglich aus drei Primärfarben zusammengesetzt sind, erfordern erwartungsgemäß auch die geringste Anzahl an Aktionen, unabhängig davon, welcher Gruppe die Probanden zugeordnet sind. Die Reize, die die meisten Aktionen erfordern, sind in der Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden parallel zu den Ergebnissen der Betrachtung der Bearbeitungszeiten sehr unterschiedlich. Für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zeigt sich auch hier, dass Reiz Nr. 3 ($\lambda_b = 540 \text{ nm}$, 4/4) in sechs von sieben Fällen die meisten Aktionen erfordert. Einzige Ausnahme hier ist Vp 11, die für den aus nur drei Primärfarben zusammengesetzten Reiz Nr. 10 (3/4) am meisten Aktionen benötigt.

In Tabelle 3.8 ist für jede Versuchsperson die Anzahl der durchschnittlich für einen Farbabgleich benötigten Aktionen für jede der vier Steuerungsmöglichkeiten angegeben. Es ist zu beachten, dass die tatsächliche Anzahl der Aktionen großen Schwankungen unterliegt, wie anhand der in Tabelle 3.8 eingetragenen Standardabweichungen erkennbar ist. Sie sind auch im Vergleich zu den Mittelwerten relativ hoch. Da jeder dieser Mittelwerte aus 676 Einstellungen berechnet wird, ist der Standardfehler jedoch relativ gering. Tabelle 3.8 zeigt weiterhin, dass, unter Berücksichtigung der großen Streuungen der Anzahl von Aktionen, über alle Zielreize hinweg die vier Variationsmöglichkeiten, die den Probandinnen zur Verfügung stehen, gleich intensiv genutzt werden. Anhand der hohen Gesamtzahl an Aktionen für einen Abgleich ist die hohe Motivation der Probandinnen erkennbar. Lediglich Vp 06 weist einen Summenwert von weniger als 100 Aktionen auf, was jedoch auch an der Art liegen könnte, wie sie ihre Abgleiche erstellen: Wenn eine Versuchsperson im wesentlichen jede der vier Primärfarben mit nur wenigen Wechseln zu den anderen einstellt, dann werden aufgrund der adaptiven Steuerung viele Veränderungen von mehr als einem Schritt als nur eine Aktion gezählt. Bei einer Versuchsperson, die jede der Primärfarben immer nur ein wenig verändert, dann zur nächsten Farbe wechselt, wieder nur geringfügige Veränderungen vornimmt und dann wieder zu ersten zurückkehrt, wird eine höhere Anzahl an Aktionen gezählt.

Bei Betrachtung der in den Tabellen 3.9 und 3.10 aufgeführten inferenzstatistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen hinsichtlich der Anzahl der benötigten Aktionen ist erkennbar, dass sich erwartungsgemäß relativ große Paral-

Tabelle 3.8: Durchschnittliche Anzahl der für einen Farbabgleich benötigten Aktionen für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 01 bis Vp 07 (oben) sowie die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 08 bis Vp 14 (unten). Angegeben sind jeweils das arithmetische Mittel der Aktionen, die für einen Farbabgleich benötigt werden, sowie die entsprechende Standardabweichung.

Unterdurchschnittlich spektralempfindlich										
Vp	Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motor 4		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Vp 01	22.2	17.3	35.0	15.8	26.5	17.4	30.3	17.2	114.1	43.5
Vp 02	31.7	16.5	38.9	15.6	34.4	15.9	34.7	14.0	139.7	36.6
Vp 03	27.3	25.4	36.4	17.4	34.1	25.4	34.1	20.5	131.8	61.4
Vp 04	44.7	23.6	39.6	18.7	31.8	20.5	37.9	16.3	154.0	50.8
Vp 05	39.4	26.9	40.1	23.3	33.8	21.5	33.5	19.1	146.8	60.2
Vp 06	15.0	13.4	28.9	11.7	24.7	15.7	19.1	13.8	87.8	31.5
Vp 07	35.5	17.7	38.2	16.9	34.8	18.1	40.3	16.2	148.7	47.1
Überdurchschnittlich spektralempfindlich										
Vp	Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motor 4		Gesamt	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Vp 08	29.8	12.7	31.2	11.6	26.9	13.2	30.6	12.4	118.5	26.1
Vp 09	22.9	17.4	34.6	17.0	33.0	21.4	28.3	20.6	118.9	54.1
Vp 10	34.9	16.7	33.3	12.3	32.3	16.4	32.4	12.8	132.8	33.5
Vp 11	25.0	14.5	32.0	13.9	25.4	15.6	24.4	14.3	106.8	36.5
Vp 12	37.6	23.9	39.6	22.7	33.4	23.5	37.3	22.5	147.9	64.7
Vp 13	32.7	28.2	33.8	19.6	21.5	20.1	28.3	19.4	116.3	59.0
Vp 14	24.7	15.5	32.9	14.2	26.6	14.9	24.9	12.0	109.1	32.3

Tabelle 3.9: Vergleich der durchschnittlichen Anzahl der Aktionen der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit Hilfe von 4 Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und aus 3 Farben hergestellt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	Median	Vergleich mit	Median	U'	z(U')	p
Vp 01	4/4	110.0	3/3	94.0	16601.5	-4.421	≤.001
	4/4	110.0	3/4	105.5	21296.0	-1.291	.1968
	3/3	94.0	3/4	105.5	3682.0	-2.405	.0162
Vp 02	4/4	140.5	3/3	113.0	10090.5	-8.762	≤.001
	4/4	140.5	3/4	124.0	15248.5	-5.323	≤.001
	3/3	113.0	3/4	124.0	3472.0	-2.951	.0032
Vp 03	4/4	124.0	3/3	109.0	16489.5	-4.496	≤.001
	4/4	124.0	3/4	120.5	22679.5	-0.368	.7126
	3/3	109.0	3/4	120.5	3432.5	-3.054	.0023
Vp 04	4/4	150.5	3/3	119.0	12459.0	-7.183	≤.001
	4/4	150.5	3/4	145.0	20714.0	-1.679	.0932
	3/3	119.0	3/4	145.0	2747.0	-4.834	≤.001
Vp 05	4/4	144.0	3/3	97.5	8838.5	-9.597	≤.001
	4/4	144.0	3/4	128.0	17731.0	-3.668	≤.001
	3/3	97.5	3/4	128.0	2229.0	-6.180	≤.001
Vp 06	4/4	87.5	3/3	73.0	15973.0	-4.840	≤.001
	4/4	87.5	3/4	80.5	19443.0	-2.526	.0115
	3/3	73.0	3/4	80.5	3924.5	-1.776	.0758
Vp 07	4/4	144.5	3/3	123.0	15777.5	-4.970	≤.001
	4/4	144.5	3/4	139.5	20947.0	-1.524	.1276
	3/3	123.0	3/4	139.5	3674.0	-2.426	.0153

Tabelle 3.10: Vergleich der durchschnittlichen Anzahl der Aktionen der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit Hilfe von 4 Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und aus 3 Farben hergestellt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4).

	Reize	Median	Vergleich mit	Median	U'	z(U')	p
Vp 08	4/4	120.0	3/3	101.5	13812.5	-6.281	≤.001
	4/4	120.0	3/4	110.5	18010.5	-3.482	≤.001
	3/3	101.5	3/4	110.5	3565.0	-2.710	.0067
Vp 09	4/4	117.5	3/3	98.0	17681.5	-3.701	≤.001
	4/4	117.5	3/4	101.0	18178.5	-3.369	.0008
	3/3	98.0	3/4	101.0	4481.5	-0.329	.7424
Vp 10	4/4	137.0	3/3	97.5	6620.5	-11.076	≤.001
	4/4	137.0	3/4	126.0	17945.5	-3.525	≤.001
	3/3	97.5	3/4	126.0	2086.0	-6.552	≤.001
Vp 11	4/4	104.0	3/3	88.0	15490.0	-5.162	≤.001
	4/4	104.0	3/4	96.5	19473.0	-2.506	.0122
	3/3	88.0	3/4	96.6	3921.0	-1.785	.0743
Vp 12	4/4	141.0	3/3	119.0	16950.5	-4.188	≤.001
	4/4	141.0	3/4	129.0	19266.5	-2.644	.0082
	3/3	119.0	3/4	129.0	4161.0	-1.161	.2456
Vp 13	4/4	107.5	3/3	94.0	18022.5	-3.474	≤.001
	4/4	107.5	3/4	92.0	18922.0	-2.874	.0041
	3/3	94.0	3/4	92.0	4574.5	-0.087	.9307
Vp 14	4/4	109.0	3/3	87.0	12184.0	-7.367	≤.001
	4/4	109.0	3/4	103.5	21206.5	-1.351	.1768
	3/3	87.0	3/4	103.5	2671.0	-5.032	≤.001

lelen zwischen der benötigten Zeit und der Anzahl der Aktionen ergeben. Wie schon bei den Bearbeitungszeiten erkennbar, besteht auch hier bei allen Versuchspersonen ein signifikanter Unterschied zwischen den 3/3-Reizen und den 4/4-Reizen, wobei für die 4/4-Reize signifikant mehr Aktionen pro Abgleich nötig sind. Beim Vergleich der Anzahl an Aktionen, die für einen 4/4-Abgleich beziehungsweise einen 3/4-Abgleich nötig sind, zeigen sich für die beiden Versuchspersonengruppen unterschiedliche Ergebnisse: Bei den unterdurchschnittlich Spektralempfindlichen ergibt sich nur bei zwei von sieben ein signifikanter Unterschied, bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen dagegen in sechs von sieben Fällen. Einzige Ausnahme stellt Vp 14 dar. Beim Vergleich der 3/3- mit den 3/4-Reizen ist in der Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen in sechs von sieben Fällen ein signifikanter Unterschied erkennbar, einzige Ausnahme stellt Vp 06 dar. In der anderen Gruppe zeigt sich genau das Gegenteil: Hier zeigen sich nur bei Vp 08 und Vp 14 signifikante Unterschiede, in allen anderen Fällen nicht.

Auch die Analyse der Anzahl der benötigten Aktionen bestätigt also, was anhand des Abstandsmaßes und vor allem der benötigten Zeit schon zu vermuten war: Abgleiche zu Reizen, die lediglich aus drei Primärreizen bestehen und mit Hilfe von dreien hergestellt werden sollen, sind schneller und mit Hilfe von weniger Aktionen möglich. Wenn Unterschiede zwischen den drei Versuchsbedingungen zu erkennen sind, dann in Richtung eines signifikant genaueren Abgleichs. Diese Befunde zeigen sich über die Versuchspersonengruppen hinweg in annähernd gleicher Weise.

Im folgenden Abschnitt sollen zu Ergänzung der hier dargestellten Merkmale der Abgleiche noch die Zufriedenheitsurteile der Versuchspersonen betrachtet werden, die im Anschluss an die Abgleiche erhoben worden sind.

Zufriedenheit mit den Einstellungen

Von den Probandinnen wird nach Beendigung eines jeden Farbabgleichs ein Urteil darüber erhoben, für wie gut sie die Übereinstimmung zwischen dem Zielreiz und dem von ihnen erstellten Abgleich halten. Dazu wird der Zielreiz direkt nach dem von der Probandin eingestellten Reiz nochmals präsentiert. Dann kann aus fünf Aussagen gewählt werden, denen für die statistische Auswertung Zahlenwerte von 1 (für *Sehr schlecht*) bis 5 (für *Sehr gut*) zugeordnet werden. Ein höherer Zahlenwert bedeutet eine größere Zufriedenheit der Probandin mit dem Farbabgleich. Es wird von einer Ordinalskalierung dieser Werte ausgegangen. Als Maß der zentralen Tendenz wird dennoch das arithmetische Mittel berechnet, da der Median in einigen untersuchten Fällen bei 3 liegt und somit keine hinreichend genaue Unterscheidung zulässt.

Im Anhang B.2 sind für die einzelnen Versuchspersonen die durchschnittlichen Zufriedenheitsurteile für die 14 Zielreize zu finden (siehe Tabellen B.10 und B.11). Die Zufriedenheitsurteile streuen nicht besonders stark, sie liegen zwischen 4.9 und 2.7. Obwohl oft mehreren Reizen dieselben Urteile zugeordnet werden, lassen sich einige Tendenzen erkennen: In beiden Gruppen werden die Abgleiche zu denjenigen Reizen als am besten gelungen beurteilt, die lediglich aus drei Primärreizen bestehen. Dies ist im Einklang mit den Befunden aus Abschnitt 3.2.2. Die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter beurteilen eher solche Reize als am schlechtesten gelungen, die aus vier Primärreizen bestehen und auch mit Hilfe von vier Primärreizen erstellt werden sollen. In

der Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen beurteilen fünf von sieben Versuchspersonen die Abgleiche zu Reiz 10 als am schlechtesten gelungen. Dieser Reiz besteht zwar aus nur drei Primärreizen, ist jedoch nur schwach gesättigt und daher eventuell schwieriger zu erstellen.

In Tabelle 3.11 sind die Zufriedenheitsurteile in Abhängigkeit von der Art des vorgegebenen Reizes aufgeführt. Auch diese Ergebnisse sind ähnlich wie die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen: Die 3/3-Reize werden meist als am besten gelungen beurteilt, während die 4/4-Reize, die als am wenigsten gelungen angesehen werden. Die Zufriedenheitsurteile zu den 3/4-Reizen liegen meist dazwischen. Da die Zufriedenheitsurteile zu den einzelnen Reizen nicht nur relativ wenig streuen, sondern auch recht häufig unterschiedlichen Reizen dieselben Werte zugeordnet werden, wird auf eine inferenzstatistische Prüfung der Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen verzichtet. Es soll nur vermerkt werden, dass die Zufriedenheitsurteile in der vorliegenden Arbeit nicht als ein geeignetes Maß für die Schwierigkeit des Farbabgleichs verwendet werden können, da sie eher eine generelle Eigenschaft der Versuchspersonen wiederzuspiegeln scheinen als eine realistische Beurteilung der Qualität des Abgleichs. Dies ist auch anhand der nur geringen bis mittelgradigen negativen Spearman-Rangkorrelationen zwischen dem ΔE_{94}^* -Abstandsmaß und den Zufriedenheitsurteilen der Versuchspersonen zu den Reizen im Hauptversuch (siehe Tabelle 3.11). Hinzu kommt, dass die Probandinnen den von ihnen eingestellten Reiz und den vorgegebenen Zielreiz nie gleichzeitig nebeneinander sehen können, sondern nur nacheinander (siehe auch Abschnitt 1.1), was eine objektive Beurteilung der Qualität des Abgleichs zusätzlich erschwert.

3.2.3 Lerneffekte

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie sich das Verhalten der Versuchspersonen bei der Erstellung der Farbabgleiche im Verlauf des Experiments verändert. Vor Beginn des (Haupt-)Experiments müssen die Versuchspersonen bereits ausgiebige (insgesamt achtstündige) Vorversuche absolvieren, daher ist zu erwarten, dass im Verlauf der 22 experimentellen Sitzungen keine nennenswerten systematischen Verhaltensänderungen mehr auftreten.

Zunächst soll betrachtet werden, ob sich innerhalb eines Durchganges (vier Abgleiche zum gleichen vorgegebenen Zielreiz) Lerneffekte nachweisen lassen, dann wird auf Lerneffekte im Verlauf des gesamten Experiments eingegangen.

Lerneffekte innerhalb eines Durchgangs

Ein einzelner Durchgang besteht aus vier aufeinanderfolgenden Farbabgleichungen zum selben Zielreiz. Die für einen Abgleich benötigte Zeit in Abhängigkeit davon, ob zum ersten, zweiten, dritten oder vierten Mal hintereinander eine Metamerie zu einem vorgegebenen Zielreiz erstellt wird, ist Abbildung 3.5 für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen, Abbildung 3.6 für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zu entnehmen.

Anhand von Abbildung 3.5 (unterdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchspersonen) ist erkennbar, dass die benötigte Zeit beim vierten Abgleich zu einer Farbe im Ver-

Tabelle 3.11: Arithmetisches Mittel der Zufriedenheitsurteile für die beiden Gruppen der unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen bei den Abgleichen zu Reizen, die aus 4 Farben bestehen und mit Hilfe von 4 Farben ermischt werden sollen (4/4), die aus 3 Farben bestehen und aus 3 Farben hergestellt werden sollen (3/3) und Reize, die aus drei Farben bestehen, aber mit Hilfe von vier Farben ermischt werden sollen (3/4). Weiterhin ist die Spearman-Rangkorrelation zwischen dem ΔE_{94}^* -Abstandsmaß und dem entsprechenden Zufriedenheitsurteil angegeben.

Unterd. spektralempfindlich					Überd. spektralempfindlich						
Reize	Mittelwert			Rangkorr.		Reize	Mittelwert			Rangkorr.	
	4/4	3/3	3/4	ρ	p		4/4	3/3	3/4	ρ	p
Vp 01	3.5	3.8	3.7	-.230	$\leq .001$	Vp 08	3.9	4.2	4.0	-.536	$\leq .001$
Vp 02	2.9	3.4	3.0	-.528	$\leq .001$	Vp 09	3.5	3.5	3.6	-.307	$\leq .001$
Vp 03	3.5	4.2	3.5	-.399	$\leq .001$	Vp 10	3.0	3.7	3.2	-.314	$\leq .001$
Vp 04	2.8	3.1	3.1	-.360	$\leq .001$	Vp 11	4.2	4.4	4.4	-.354	$\leq .001$
Vp 05	3.1	3.5	3.5	-.165	$\leq .001$	Vp 12	3.6	3.5	3.4	-.320	$\leq .001$
Vp 06	3.9	4.2	4.2	-.544	$\leq .001$	Vp 13	3.3	3.8	3.4	-.392	$\leq .001$
Vp 07	3.1	3.7	3.1	-.511	$\leq .001$	Vp 14	4.1	4.1	4.0	-.329	$\leq .001$

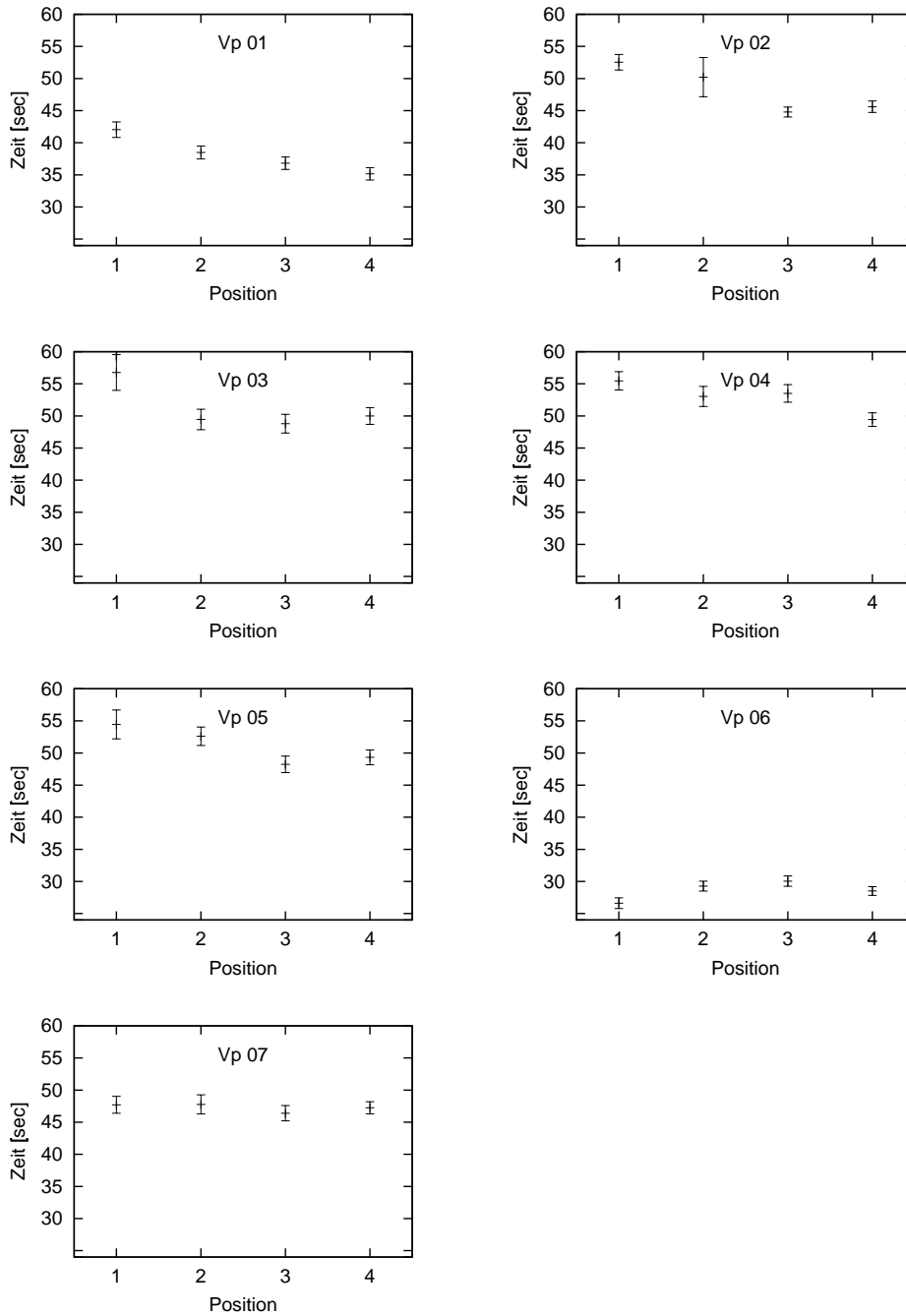


Abbildung 3.5: *Die mittlere für einen Farbgleich benötigte Zeit:* Diese Abbildung zeigt für jede der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen die mittlere für einen Farbgleich benötigte Zeit in Abhängigkeit von dessen zeitlicher Position innerhalb eines Durchgangs: Dazu wird die mittlere Bearbeitungszeit für alle ersten, ..., vierten Einstellungen bestimmt. Zu diesen Mittelwerten ist auch der Standardfehler eingezeichnet.

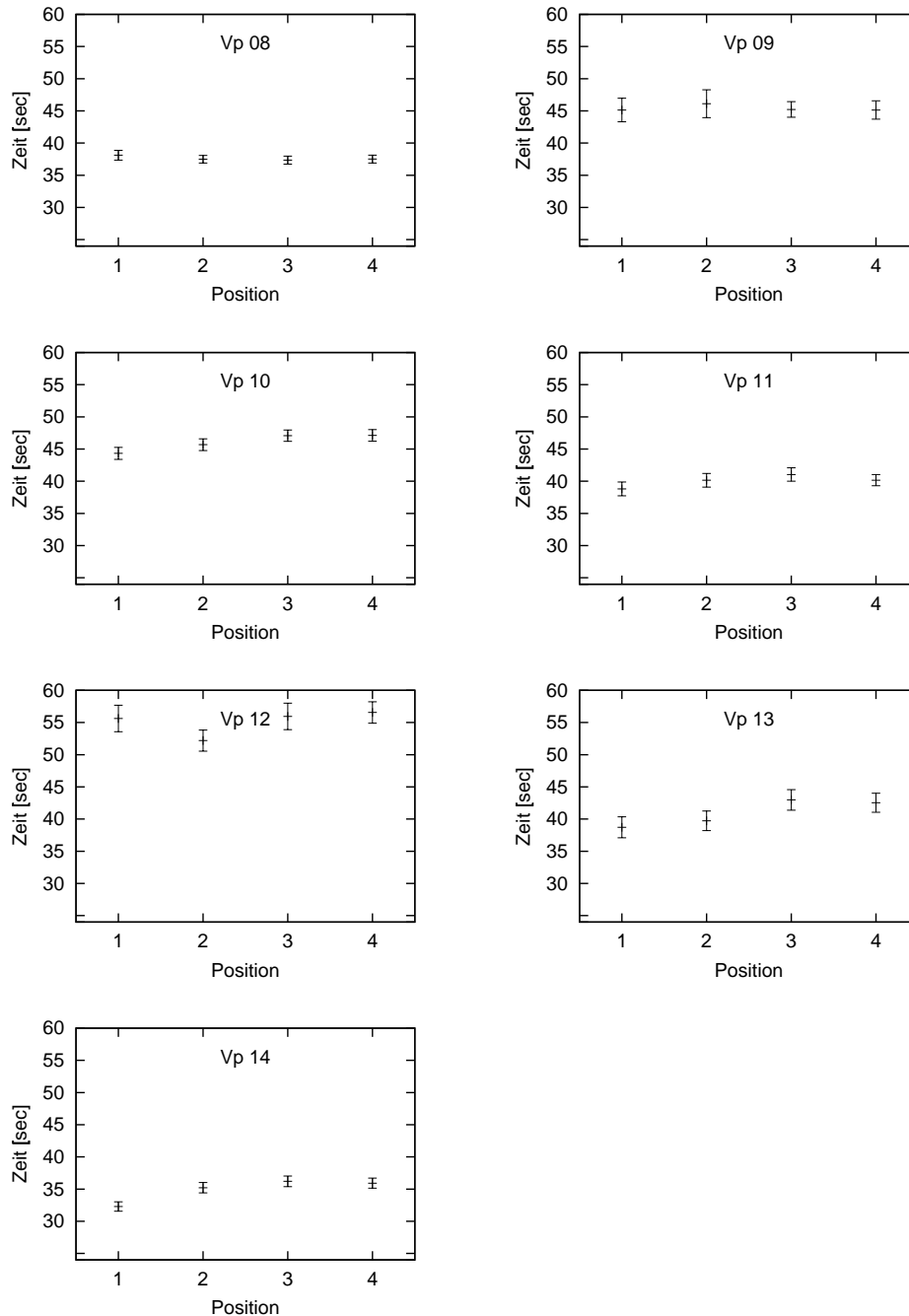


Abbildung 3.6: Die mittlere für einen Farbvergleich benötigte Zeit: Diese Abbildung zeigt für jede der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen die mittlere für einen Farbvergleich benötigte Zeit in Abhängigkeit von dessen zeitlicher Position innerhalb eines Durchgangs: Dazu wird die mittlere Bearbeitungszeit für alle ersten, ..., vierten Einstellungen bestimmt. Zu diesen Mittelwerten ist auch der Standardfehler eingezeichnet.

gleich zum ersten tendenziell abnimmt. Ausnahmen sind die Versuchspersonen Vp 06 und Vp 07, die für jeden Abgleich ungefähr gleich viel Zeit benötigen, egal, um den wievielten Durchgang es sich handelt. Die entsprechenden Daten für die Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen sind Abbildung 3.6 zu entnehmen. Es ist zu sehen, dass es in dieser Gruppe zu keinem Übungseffekt kommt: Sie benötigen für den vierten Match in Folge zur selben Zielfarbe im Mittel genauso lange wie für den ersten. Einige der Versuchspersonen scheinen sogar mit der Zeit langsamer zu werden.

Diese Lerneffekte innerhalb eines Durchganges sind von den über den gesamten Verlauf des Experiments auftretenden zu trennen, die im folgenden Abschnitt analysiert werden sollen.

Lerneffekte im Verlauf des gesamten Experiments

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, ob auch während des Hauptexperimentes noch systematische Veränderungen im Farbmischungsverhalten der Versuchspersonen stattfinden. Eine solche Verbesserung der Qualität der Abgleiche kann dadurch zustande kommen, dass im Verlauf des Experimentes von den Probanden neue Bearbeitungsstrategien erworben werden. Ein Hinweis auf die Anwendung effizienter Strategien wäre zum Beispiel eine Verringerung der für einen Farbabgleich benötigten Zeit und der Anzahl der dazu benötigten Aktionen.

Im folgenden soll untersucht werden, ob ausreichend viele Übungsdurchgänge absolviert worden sind. Die durchschnittlich für einen Abgleich benötigte Zeit (in Sekunden) ist für alle insgesamt 30 experimentellen Sitzungen (die acht Übungsdurchgänge eingeschlossen) in den Abbildungen 3.7 und 3.8 dargestellt. Anhand von Abbildung 3.7 für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zeigt sich, dass die Probandinnen erwartungsgemäß nach ca. 7 bis 8 Sitzungen ein stabiles Niveau erreicht haben. Die durchschnittlich für einen Abgleich benötigte Zeit schwankt kaum noch, mit zunehmender Zahl der Durchgänge nimmt lediglich die Streuung ab. Einzige Ausnahme ist Vp 03, es scheint, als ob sie noch mehr Übungsdurchgänge benötigt hätte.

Ein etwas anderes Bild zeigt sich in Abbildung 3.8 für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen. Sie werden, mit Ausnahme der Versuchsperson Vp 09, nicht erst nach 7 bis 8 Sitzungen schneller. Im Vergleich mit der anderen Gruppe benötigen sie (mit Ausnahme von Vp 09) von Anfang an im Mittel deutlich weniger Zeit für die einzelnen Abgleiche. Meist brauchen sie von Anfang an eine konstante Zeit für die einzelnen Abgleiche, unabhängig von der experimentellen Sitzung, wie z.B. Vp 08, Vp 10, Vp 11 und Vp 14. Vp 12 und Vp 13 brauchen auch im Laufe der Datenerhebung immer wieder deutlich mehr Zeit für die Abgleiche in einer experimentellen Sitzung.

Den Abbildungen 3.9 und 3.10 ist die durchschnittlich pro Farbabgleich benötigte Anzahl von Aktionen (Aktionen wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben definiert) für jede Versuchsperson und jede der 30 experimentellen Sitzungen (einschließlich der Übungsdurchgänge) zu entnehmen. Abbildung 3.9 zeigt die Daten der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen, Abbildung 3.10 die Daten der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen. In Abbildung 3.9 zeigt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 3.7: Nach der achten Sitzung bleibt die Anzahl der pro Abgleich benötigten

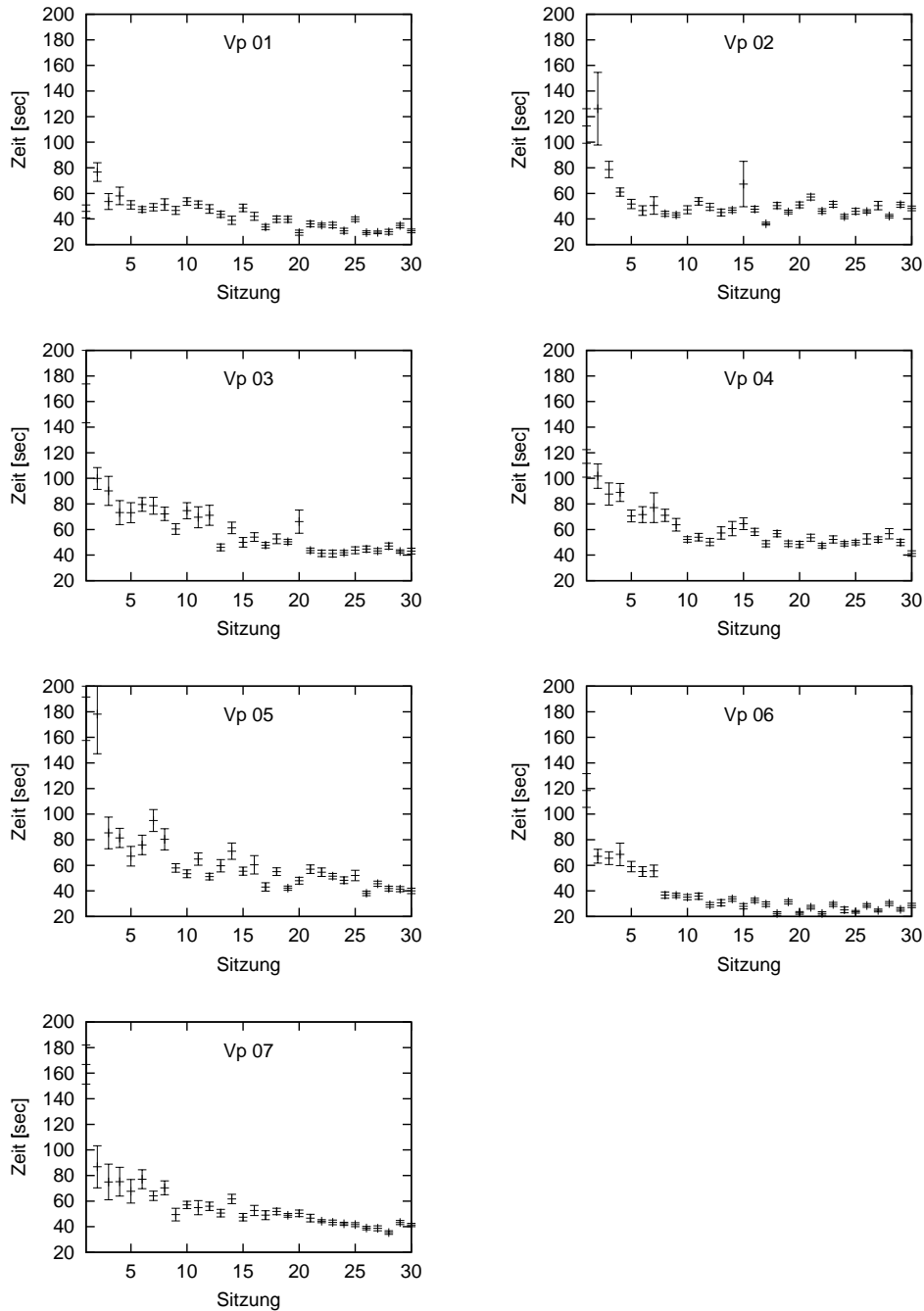


Abbildung 3.7: Die mittlere für einen Farbabgleich benötigte Zeit (unterdurchschnittlich spektral-empfindliche Versuchspersonen): Diese Abbildung zeigt für jede Versuchsperson die mittlere für einen Farbabgleich benötigte Zeit in Abhängigkeit von der Sitzung. Zu den Mittelwerten ist auch der Standardfehler eingezeichnet.

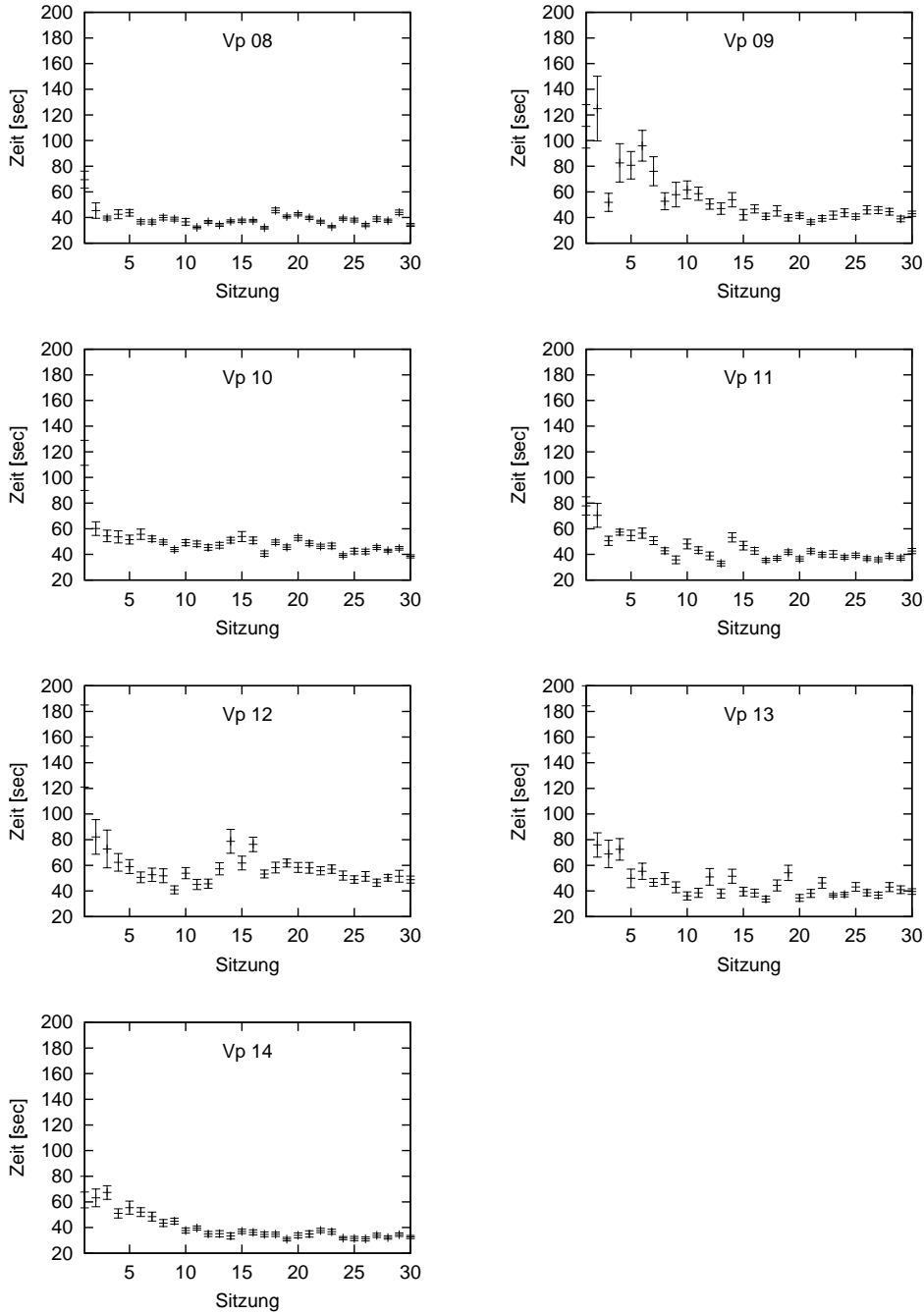


Abbildung 3.8: Die mittlere für einen Farbvergleich benötigte Zeit (überdurchschnittlich spektral-empfindliche Versuchspersonen): Diese Abbildung zeigt für jede Versuchsperson die mittlere für einen Farbvergleich benötigte Zeit in Abhängigkeit von der Sitzung. Zu den Mittelwerten ist auch der Standardfehler eingezeichnet.

Aktionen auf einem relativ konstanten Niveau. Es kommt jedoch bei einigen Versuchspersonen, z.B. Vp 03 und Vp 05, immer wieder zu einzelnen Sitzungen, in denen plötzlich mehr Aktionen benötigt werden. Die Versuchspersonen aus der Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen verhalten sich auch hinsichtlich der benötigten Aktionen anders, was anhand von Abbildung 3.10 erkennbar ist: Vp 08, Vp 10, Vp 11 und Vp 14 bleiben, wie schon bei der von ihnen pro Abgleich benötigten Zeit, während der gesamten Datenerhebung auf relativ konstantem Niveau. Vp 12 und Vp 13 weisen im Laufe der Datenerhebung immer wieder unregelmäßige Schwankungen in der Anzahl der benötigten Aktionen pro Abgleich auf. Diese Schwankungen nehmen jedoch nicht, wie bei den meisten Versuchspersonen aus der Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen, nach der 8. Sitzung ab, sondern sind immer wieder zwischen Sitzungen mit geringerer Aktionenanzahl eingestreut. Lediglich Vp 09 scheint hinsichtlich der beiden Aspekte „benötigte Zeit“ und „benötigte Zahl von Aktionen“ den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen zu ähneln und erst nach der achten Sitzung deutlich weniger Aktionen zu benötigen.

Es zeigt sich anhand dieser Befunde, dass die meisten Probandinnen ausreichend viele Übungsdurchgänge absolviert haben, so dass sie mit der Apparatur und dem Versuchsaufbau bei Beginn der eigentlichen Datenerhebung für den Hauptversuch genügend vertraut sind.

Weitere Hinweise auf eventuelle Veränderungen in den Abgleichen über das gesamte Experiment hinweg kann die Betrachtung der Korrelationen zwischen Durchgangsnummer und verschiedenen Reizmerkmalen geben. In die folgenden Analysen werden nur noch die Abgleiche der 22 Sitzungen des Hauptversuches aufgenommen, die acht Übungsdurchgänge bleiben unberücksichtigt. Die einzelnen Farbabgleiche im Experiment lassen sich für jede Versuchsperson chronologisch durchnummerieren, man erhält so die Nummern 1 bis 676. Bei Betrachtung der Spearman-Rangkorrelation zwischen der Durchgangsnummer und dem Wert des ΔE_{94}^* -Farbabstandsmaßes ergibt sich für die beiden Gruppen ein leicht unterschiedliches Bild: Die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden weisen nur geringe negative statistisch signifikante Korrelationen auf. Lediglich bei Vp 03 und Vp 05 kommt es zu einem statistisch signifikanten negativen Zusammenhang zwischen der Durchgangsnummer und dem Farbabstand. Im Gegensatz dazu zeigen fünf von sieben Probandinnen aus der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Gruppe einen statistisch signifikanten negativen Zusammenhang in der Größenordnung zwischen .15 und .25. Lediglich bei Vp 14 erreicht der Korrelationskoeffizient keine statistische Signifikanz, bei Vp 12 liegt er niedriger, lediglich im Bereich von .08.

Bei Betrachtung der Rangkorrelation zwischen der Nummer des Farbabgleichs und der benötigten Zeit bzw. der Anzahl der dazu benötigten Aktionen (siehe Tabelle 3.12), ergibt sich wiederum ein unterschiedliches Bild, je nachdem, welcher der beiden Gruppen die Probanden angehören: Bei Betrachtung der Rangkorrelation zwischen der Abgleichsnummer und Bearbeitungszeit (siehe Tabelle 3.12) zeigen sich für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter (mit Ausnahme von Vp 02) signifikante niedrige bis mittlere negative Zusammenhänge. Bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachtern ergeben sich lediglich für drei von sieben Probandinnen niedrige negative Korrelationen.

Für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter zeigen sich mit nur ei-

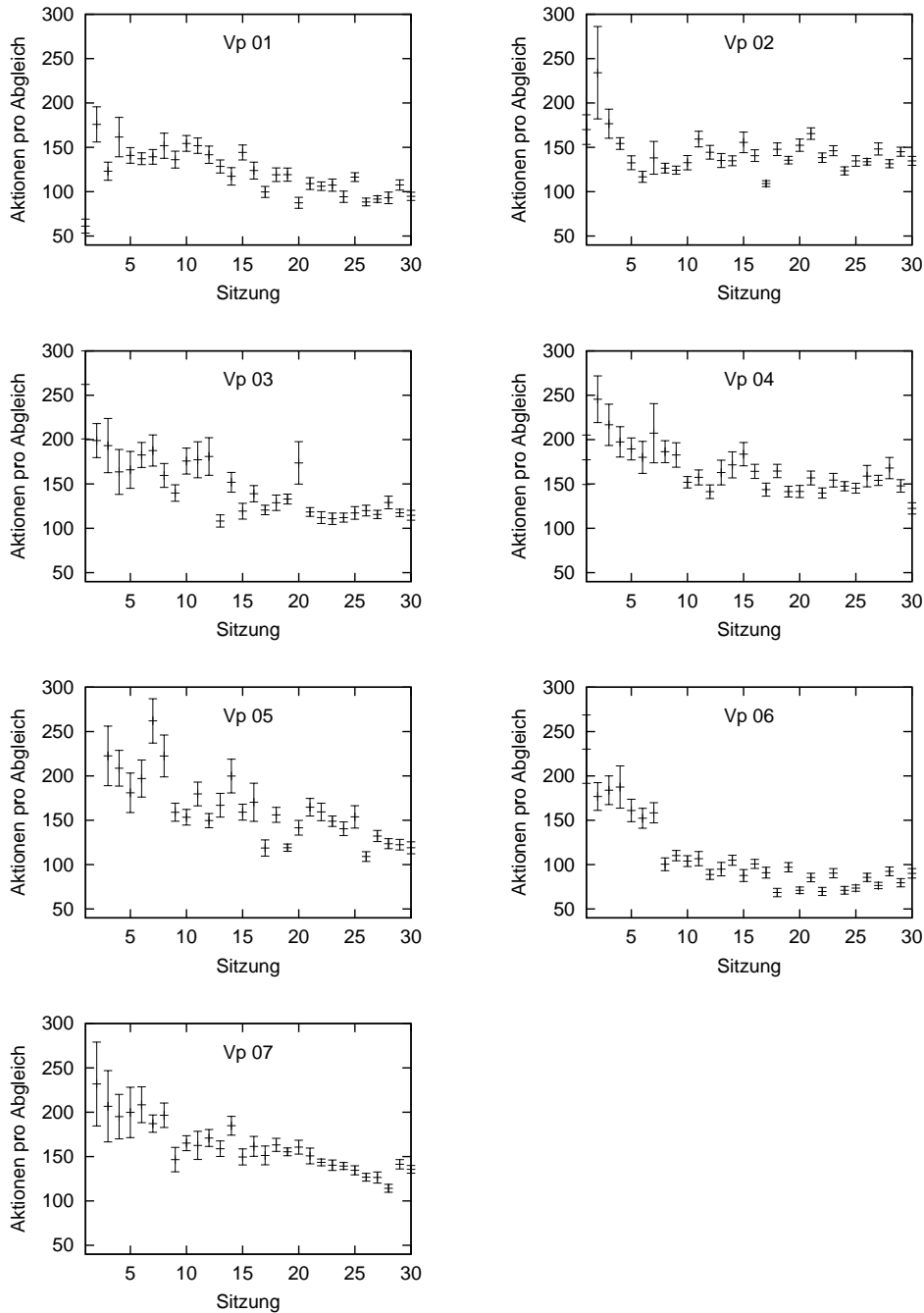


Abbildung 3.9: Im Mittel für einen Farbabgleich benötigte Aktionen (unterdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchspersonen): Diese Abbildung zeigt für jede Versuchsperson die mittlere für einen Farbabgleich benötigte Zahl von Aktionen in Abhängigkeit von der Sitzung. Zu diesen Mittelwerten ist auch die jeweilige Standardabweichung eingezeichnet.

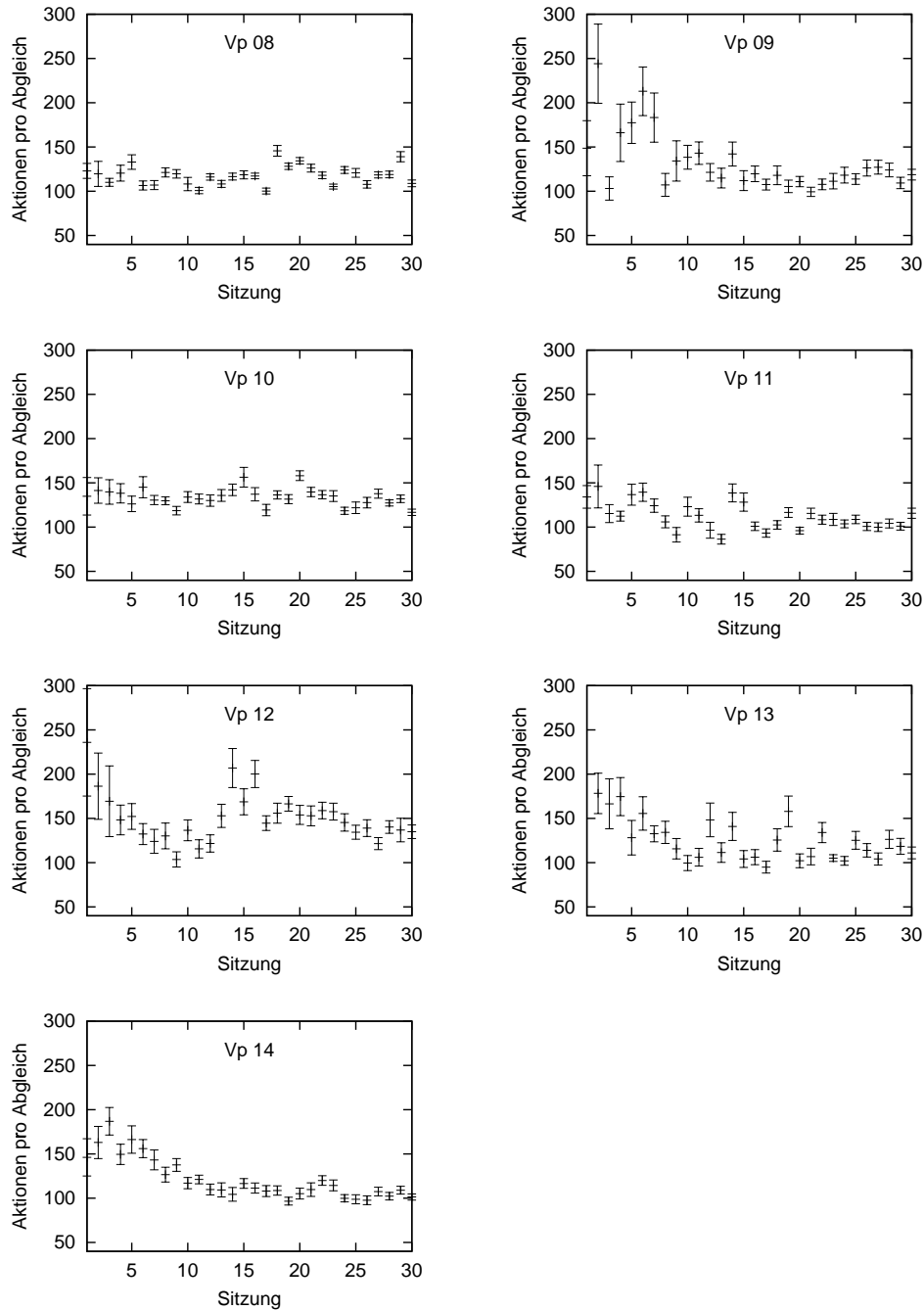


Abbildung 3.10: Im Mittel für einen Farbabgleich benötigte Aktionen (überdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchspersonen): Diese Abbildung zeigt für jede Versuchsperson die mittlere für einen Farbabgleich benötigte Zahl von Aktionen in Abhängigkeit von der Sitzung. Zu diesen Mittelwerten ist auch die jeweilige Standardabweichung eingezeichnet.

Tabelle 3.12: Spearman-Rangkorrelationen zwischen der Nummer des Farbabgleichs und dem ΔE_{94}^* -Abstand, der für einen Farbabgleich benötigten Zeit bzw. der Anzahl der benötigten Aktionen, getrennt nach unterdurchschnittlich (oben) und überdurchschnittlich spektralempfindlichen (unten) Versuchspersonen.

Unterdurchschnittlich spektralempfindlich						
	ΔE_{94}^* -Abstand		Zeit		Aktionen	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Vp 01	.001	.982	-.411	$\leq .001$	-.357	$\leq .001$
Vp 02	-.110	.004	-.032	.401	.041	.288
Vp 03	-.257	$\leq .001$	-.321	$\leq .001$	-.183	$\leq .001$
Vp 04	-.048	.215	-.179	$\leq .001$	-.128	$\leq .001$
Vp 05	-.130	$\leq .001$	-.337	$\leq .001$	-.278	$\leq .001$
Vp 06	-.087	.024	-.228	$\leq .001$	-.206	$\leq .001$
Vp 07	-.050	.198	-.356	$\leq .001$	-.250	$\leq .001$

Überdurchschnittlich spektralempfindlich						
	ΔE_{94}^* -Abstand		Zeit		Aktionen	
	ρ	p	ρ	p	ρ	p
Vp 08	-.174	$\leq .001$.069	.072	.105	.006
Vp 09	-.216	$\leq .001$	-.129	$\leq .001$	-.009	.811
Vp 10	-.162	$\leq .001$	-.172	$\leq .001$	-.057	.136
Vp 11	-.256	$\leq .001$	-.050	.194	.022	.565
Vp 12	-.087	.023	-.049	.200	.003	.948
Vp 13	-.217	$\leq .001$.023	.550	.053	.167
Vp 14	.016	.685	-.196	$\leq .001$	-.173	$\leq .001$

ner Ausnahme (wiederum Vp 02) geringe bis mittlere negative Korrelationen zwischen der Durchgangsnummer und der Anzahl der durchgeführten Aktionen (siehe Tabelle 3.12, oben), die auch signifikant sind. Die Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter zeigt geringe, in nur zwei Fällen signifikante Korrelationen zwischen der Anzahl der Aktionen und der Durchgangsnummer (siehe Tabelle 3.12, unten). Diese Korrelationen sind jedoch nur in einem Fall, bei Vp 14, negativ und statistisch bedeutsam. Diese Befunde deuten darauf hin, dass die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden im Laufe des Experimentes die Genauigkeit ihrer Abgleiche stärker verbessern können als die Vergleichsgruppe. Diese benötigt im Laufe des Experimentes jedoch weniger Zeit und weniger Aktionen für die Erstellung eines Abgleichs.

3.2.4 Betrachtung der Rohdaten im Schrittmotor-Raum

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ergebnisse basieren im wesentlichen auf aus den Rohdaten der Schrittmotorstellungen berechneten Statistiken, zum Beispiel auf Farbabstandsmaßen. Nun sollen die Rohdaten, also die Schrittmotorstellungen der Versuchspersonen am Ende eines Farbabgleichs betrachtet werden. Dazu werden zunächst die mittleren Schrittmotoreinstellungen und die entsprechenden Streuungen dargestellt, es folgt eine Darstellung der Autokorrelationsfunktionen der Einstellungen der vier Motoren für unterschiedliche Reize. Dann erfolgt die direkte Analyse der Dimensionalität der Einstellungen mit Hilfe der kleinsten (vierten) Eigenwerte der unrotierten Korrelationsmatrix der Schrittmotorwerte.

In den Tabellen B.12 bis B.13 in Anhang B.2 sind die gemittelten Rohdaten, die mittleren Stellungen der Schrittmotoren zu den einzelnen Farbreizen sowie die zugehörigen Standardabweichungen angegeben. Der Vergleich mit den vorgegebenen Schrittmotorstellungen aus Tabelle 2.2 zeigt, wie schon anhand der abgeleiteten Maße (siehe z.B. Abschnitt 3.2.2) erkennbar, dass es teilweise zu deutlichen Abweichungen der Einstellungen der Versuchspersonen vom vorgegebenen Reiz kommt. Da es bei hohen mittleren Schrittmotorwerten aufgrund der Einstellung der Versuchsanordnung (siehe Abschnitt 2.2.2) auch zu hohen Streuungen kommt, sind diese Angaben mit Vorsicht zu interpretieren.

Um die Konsistenz der Einstellungen weiter zu untersuchen, sind in den Abbildungen D.1 und D.2 in Anhang D die Autokorrelationsfunktionen bei verschiedenen Reizen für eine unter- und eine überdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchsperson dargestellt. Die Abbildung D.1 zeigt Autokorrelationsfunktionen für einen Reiz, der aus vier Primärreizen besteht. Erkennbar ist, dass sich die Autokorrelationen nach mittleren bis niedrigen Werten bei geringen Verschiebungen der Schrittmotorstellungen bei größeren Lags immer geringer werden. Die Einstellungen beider Versuchspersonen sind relativ wenig konsistent. Ähnliches zeigt sich auch bei Betrachtung der Autokorrelationen für einen Reiz, der lediglich aus drei Primärreizen besteht und auch mit dreien ermischt werden soll (siehe Abbildung D.2). Obwohl die Einstellungen zu diesem Reiz insgesamt konsistenter sind, die Autokorrelationen also höher, kommt es auch hier im Laufe der Zeit zu immer stärkeren Schwankungen. Die Schrittmotorstellungen, die bei der ersten Darbietung des Reizes eingestellt werden, hängen nur noch geringfügig mit den Einstellungen bei späteren Reizpräsentationen zusammen. Diese geringe Reliabilität der Einstellungen ist unabhängig von der Versuchspersonengruppe erkennbar. Die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zeigen keine reliableren Ergebnisse als die Vergleichsgruppe, unabhängig davon, welche Reize betrachtet werden.

Mit Hilfe einer Faktorenanalyse kann festgestellt werden, wie viele Komponenten zur Erklärung der Daten benötigt werden. Da dieses statistische Verfahren im Falle der Schrittmotoreinstellungen wegen der zu geringen Anzahl an Variablen nicht die gewünschten Informationen erbringt, werden lediglich die kleinsten, vierten Eigenwerte für alle Versuchspersonen und alle Reize betrachtet. Um die Eigenwerte vergleichbar zu machen, wird aus den Rohdaten, den Schrittmotorstellungen zu einem einzelnen Reiz, zunächst die Korrelationsmatrix berechnet und aus ihr die Eigenwerte bestimmt. Von den vier so erhaltenen Eigenwerten werden nur die jeweils kleinsten betrachtet. Sie sind ein Maßstab

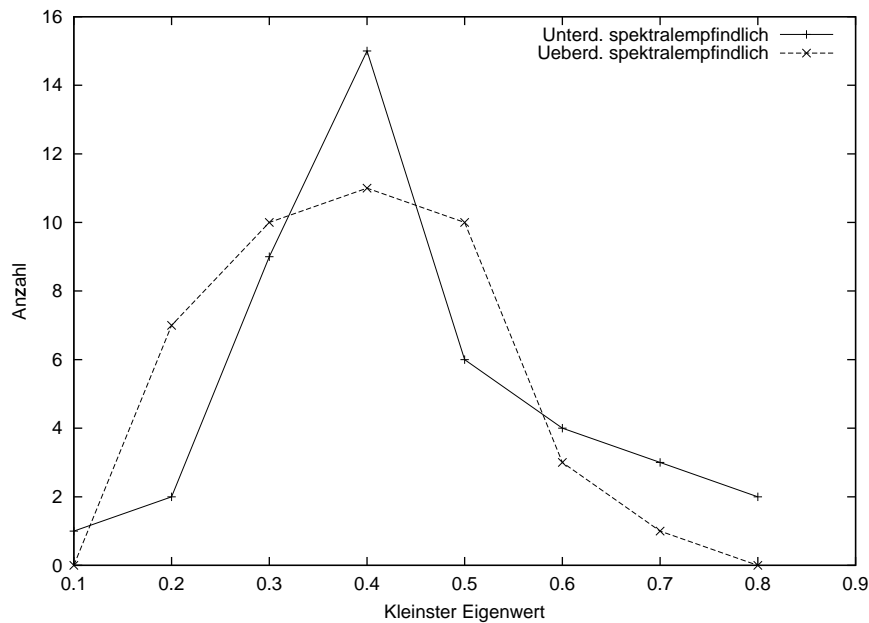


Abbildung 3.11: *Kleinste (vierte) Eigenwerte der normierten Schrittmotoreinstellungen.* Die Abbildung zeigt die jeweils kleinsten der insgesamt vier aus den Schrittmotoreinstellungen bestimmten Eigenwerte der Versuchspersonen zu den Reizen, die aus vier Primärreizen bestehen, getrennt nach unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachtern. Die Eigenwerte erlauben eine Abschätzung der durch Hinzunahme einer vierten Dimension beim Farbmischen aufklärten Varianz.

für die durch den jeweiligen Faktor (hier die Dimension) erklärte Varianz der Beobachtungswerte. Bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden sollte der durch die vierte Dimension beigetragene Anteil zur Erklärung der Varianz deutlich größer sein als bei den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen, falls erstere über einen mehr als dreidimensionalen Farbraum verfügen. Dann sollten die vierten Eigenwerte im Mittel in der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Gruppe deutlich größer sein als in der Vergleichsgruppe.

In Abbildung 3.11 sind die kleinsten Eigenwerte aller Versuchspersonen zu allen Reizen, die aus vier Primärreizen ermischt werden sollen, getrennt nach Gruppen, aufgeführt. Es ist erkennbar, dass die beiden Verteilungen der Eigenwerte der unter- und der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden annähernd übereinanderliegen. Die erwarteten Unterschiede zwischen den Gruppen ergeben sich also auch bei Betrachtung der Rohdaten nicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich gesuchten Unterschiede zwischen den Versuchspersonengruppen nicht ergeben, sondern vorwiegend Unterschiede zwischen den Ver-

suchsbedingungen für jeweils eine Versuchsperson. Lediglich bei Betrachtung der Lerneffekte (siehe Abschnitt 3.2.3) wird ein verändertes Verhalten der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen im Vergleich mit den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden deutlich. Diese deuten jedoch nicht auf einen um eine vierte Dimension erweiterten Farbraum bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden hin. Dieser Befund wird auch durch den Vergleich der Dimensionalität der Farbräume der beiden Gruppen bestätigt, der keine Unterschiede ergibt. Im nun folgenden Abschnitt sollen die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse diskutiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Fragestellung aus Abschnitt 1.3 beurteilt werden.

Kapitel 4

Diskussion

Im folgenden Abschnitt sollen die im vorangegangenen Kapitel dargestellten Ergebnisse im Hinblick auf die Hypothesen aus Abschnitt 1.3 diskutiert werden. Dabei sollen vor allem die beiden folgenden Fragestellungen berücksichtigt werden:

1. Sind Unterschiede im Farbmischungsverhalten zwischen unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen zu erkennen?
2. Lassen diese Unterschiede Rückschlüsse auf einen möglicherweise mehr als dreidimensionalen Farbraum der als überdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Versuchspersonen zu?

Dazu werden zunächst die Ergebnisse des Vorversuches diskutiert, anhand derer die Gruppeneinteilung der Probanden für den Hauptversuch vorgenommen wird, dem folgt die Diskussion der Ergebnisse des Hauptexperimentes, einer Abwandlung des klassischen Farbmischungsexperimentes (siehe Kapitel 2). Schließlich wird die Eignung des Versuchsaufbaues zur Untersuchung der vorliegenden Fragestellung betrachtet.

4.1 Diskussion der Ergebnisse des Vorversuches

Der Vorversuch dient der Einteilung der Versuchspersonen in unter- und überdurchschnittlich spektralempfindliche Probanden, die dann im Hauptexperiment näher untersucht werden. Als *unterdurchschnittlich spektralempfindlich* werden diejenigen weiblichen Probanden klassifiziert, die bei der Einteilung des Spektrums besonders wenige Grenzen zwischen wahrgenommenen Farben kennzeichnen. Als *überdurchschnittlich spektralempfindlich* werden solche weiblichen Versuchspersonen bezeichnet, die besonders viele voneinander abgegrenzte Farben im Spektrum markieren. Um eine solche Gruppeneinteilung vorzunehmen, werden im Vorversuch mehrere Tests durchgeführt: Zunächst eine Untersuchung genetisch bedingter Farbschwächen mit Hilfe der Ishihara-Tafeln 1 bis 17 (Ishihara, 1968), dann eine Erfassung des Farbunterscheidungsvermögens durch den Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) sowie eine Einteilung des Spektrums nach K.A. Jameson et al. (2001). Das genaue Vorgehen bei der Durchführung

dieser Tests ist Kapitel 2 zu entnehmen. Im folgenden Abschnitt sollen die in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse des Vorversuches hinsichtlich ihrer Aussagekraft für den Hauptversuch bewertet werden. Dabei werden zunächst die anhand des Ishihara- und des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests gewonnenen Erkenntnisse diskutiert, dem folgt die Interpretation der Ergebnisse der Einteilung des Spektrums.

4.1.1 Ishihara-Test und Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test

Genetisch bedingte Farbschwächen, die mit Hilfe des Ishihara-Tests (Ishihara, 1968) erfasst werden, können für sämtliche weiblichen Teilnehmerinnen am Vorversuch ausgeschlossen werden (siehe auch Abschnitt 3.1.2). Dies entspricht der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit von Farbschwächen im weiblichen Teil der Bevölkerung (siehe auch Tabelle 1.2). Weiterhin wird der Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) durchgeführt, um das Farbunterscheidungsvermögen der Probanden zu erfassen. Auch diese Ergebnisse (siehe Abschnitt 3.1.3) entsprechen den Erwartungen an eine farbnormalsichtige Population.

Erkennbar ist eine gute Übereinstimmung zwischen Ishihara- und Farnsworth-Munsell-Test: Die beiden männlichen Probanden, die mit Hilfe des Ishihara-Tests als genetisch bedingt farbschwach diagnostiziert worden sind, weisen auch ein sehr schlechtes Farbunterscheidungsvermögen auf. Es ergeben sich jedoch in bezug auf das Farbunterscheidungsvermögen keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den untersuchten männlichen und weiblichen Probanden.

Wichtig für die Interpretation der Ergebnisse des Vorversuches ist auch die Tatsache, dass sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den im Vorversuch als unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlich klassifizierten Frauen hinsichtlich ihrer Fehlerscores im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test ergeben (siehe Abschnitt 3.1.3). Dadurch können Unterschiede in der Anzahl der im Spektrum wahrgenommenen Bereiche nicht einfach auf Unterschiede im Farbunterscheidungsvermögen zurückgeführt werden.

4.1.2 Einteilung des Spektrums

Die Einteilung in Gruppen erfolgt anhand der Ergebnisse der Einteilung des Spektrums, wobei berücksichtigt wird, dass im Hauptversuch nur solche (weiblichen) Versuchspersonen untersucht werden, die einen Fehlerwert von weniger als 50 Punkten im Farnsworth-Munsell-Test aufweisen, also laut Testmanual (Farnsworth, 1957) über mindestens durchschnittliches bis überdurchschnittliches Farbunterscheidungsvermögen verfügen (siehe auch Tabelle B.1 und Abschnitt 4.2). Durch die Anzahl der wahrgenommenen und durch Bleistiftstriche abgegrenzten Bereiche im Spektrum (siehe Abschnitt 3.1.4) sollen sich nach K.A. Jameson et al. (2001) weibliche Probanden mit drei genetisch kodierten Photopigmenten in der Retina von weiblichen Probanden trennen lassen, in deren Genen vier unterschiedliche Sehfärbstoffe festgelegt sind. Diese Personen sind möglicherweise auch phänotypische Tetrachromaten. Die Personen mit vier unterschiedlichen Opsinen sollten signifikant mehr Bereiche im Spektrum markieren als die vermuteten trichromatischen Frauen oder Männer (K.A. Jameson et al., 2001). Männliche Probanden sind, entspre-

chend den in der vorliegenden Arbeit getroffenen Einschränkungen, immer Trichromaten, da sie nicht über ein zweites X-Chromosom verfügen.

Zwischen den untersuchten männlichen und weiblichen Probanden ist eine deutliche Streuung der Anzahl der als unterscheidbar gekennzeichneten Farben im Spektrum zu erkennen: Gemittelt über alle vier Durchgänge werden zwischen 4.25 und 26.75 unterschiedliche Farben im Spektrum gekennzeichnet (siehe Abschnitt 3.1.4). Diese deutliche Streuung macht deutlich, dass es große individuelle Unterschiede in der Zahl der erkannten Farben im Spektrum gibt. Ob diesen interindividuellen Unterschieden jedoch tatsächlich Unterschiede in der Anzahl der unterschiedlichen genetisch kodierten Zapfen-Sehfarbstoffe zugrundeliegen, kann aufgrund der vorliegenden Ergebnisse nicht geklärt werden. Dazu wären umfangreiche Genanalysen notwendig. Da der Vorversuch nicht den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit bildet, sondern nur Anhaltspunkte für eine mögliche Gruppeneinteilung liefern soll, wurde auf eine solche weitergehende Analyse verzichtet. Zumindest dann, wenn der Versuch, abweichend vom ursprünglichen Vorgehen, entsprechend der in Abschnitt 2 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt wird, scheinen noch andere Faktoren als nur genetische Unterschiede für die Ergebnisse dieses Versuches eine Rolle zu spielen.

Dies wird besonders bei Betrachtung der als unterschiedlich gekennzeichneten Farbenzahl in den vier Durchgängen deutlich: Es ist auffällig, dass im Durchschnitt im dritten Durchgang am meisten Farben erkannt werden (siehe auch Tabelle 3.1). Dieses statistisch signifikante Ergebnis beruht vermutlich darauf, dass zwischen dem zweiten und dritten Durchgang die Erfassung des Farbunterscheidungsvermögens mit Hilfe des Farnsworth-Munsell-100-Hue-Tests (Farnsworth, 1957) erfolgt. Dabei sollen farbige Testhütchen in eine Reihenfolge gebracht werden, so dass sich ein kontinuierlicher Farbübergang ergibt. Die Testhütchen unterscheiden sich jedoch nur minimal in ihrer Farbe. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Versuchspersonen für kleinste Farbunterschiede sensibilisiert werden und demnach im direkt darauffolgenden dritten Durchgang ebenfalls signifikant mehr voneinander abgegrenzte Bereiche im gezeigten Spektrum wahrnehmen. Die fünfminütige Dunkeladaptation, die vor dem dritten Durchgang erfolgt, scheint daran nichts geändert zu haben. Auch auf Befragung geben die Probanden an, durch den Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test auf feinere Unterschiede zwischen den Farben aufmerksam gemacht worden zu sein. Bei einer Wiederholung des Versuchs sollte darauf geachtet werden, die Einteilung des Spektrums vor den weiteren Tests durchzuführen. Dieser Befund deutet jedoch darauf hin, dass neben der von K.A. Jameson et al. (2001) vermuteten genetisch kodierten Zahl von Photopigmenten auch andere Faktoren, wie z.B. Vorerfahrungen mit Farben, Motivation oder die Instruktion die Anzahl der erkannten Bereiche im Spektrum stark zu beeinflussen scheinen.

Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei Betrachtung der Ergebnisse der Einteilungen des Spektrums getrennt nach Geschlechtern (siehe Tabelle 3.1): Beim weiblichen wie beim männlichen Teil der untersuchten Probanden können im dritten Durchgang am meisten Farben im Spektrum unterschieden werden. Gleiches gilt für die Mittelwerte der Gruppen der unterdurchschnittlich- und der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen. Insgesamt bestehen kaum Unterschiede zwischen Männern und Frauen hinsichtlich der Mittelwerte in den einzelnen Durchgängen. Dieses Ergebnis wird durch den *t*-Test für den Vergleich der Gesamtmittel von Männern und Frauen für alle 4 Durchgänge bestätigt,

der keinen signifikanten Unterschied ergibt.

Die Einteilung des weiblichen bzw. des männlichen Teils in unter- bzw. überdurchschnittlich spektralempfindliche Probanden kann Abschnitt 3.1.1 entnommen werden, der Vergleich der Ergebnisse männlicher und weiblicher Probanden Abschnitt 3.1.4. Ein Vergleich der Extremgruppen der Männer und der Frauen ergibt für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen und Männer einen signifikanten Unterschied im Mittel der erkannten Bereiche. Dabei liegt der Mittelwert der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Männer, entgegen den Ergebnisse von K.A. Jameson et al. (2001), deutlich unter dem der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Frauen (siehe Tabelle 3.2). Grund dafür sind mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die als farbschwach erkannten Männer, da sie sich, wie in Abschnitt 3.1.2 gezeigt, in der Anzahl der erkannten Bereiche nicht von den übrigen Männern oder von der Gesamtstichprobe unterscheiden. Eventuell spielen hier einige der schon erwähnten weiteren Faktoren, wie beispielsweise Motivationsprobleme, Instruktionseffekte oder ein seltenerer Umgang mit Farben bei den Männern eine Rolle.

Die Tatsache, dass sich auch bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden entgegen den Hypothesen von K.A. Jameson et al. (2001) aufgestellten Hypothesen keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen Männern und Frauen zeigen (siehe Tabelle 3.2), deutet wiederum darauf hin, dass nicht nur genetische Unterschiede mit Hilfe dieses Untersuchungsverfahrens erfasst werden. Jedoch könnten hier auch die kleine männliche Stichprobe, sowie die abweichende Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung in der vorliegenden Arbeit von Bedeutung gewesen sein.

Die von K.A. Jameson et al. (2001) beschriebenen Daten werden im Rahmen eines größeren Experimentes erhoben, das nicht nur auf die Kennzeichnung der unterscheidbaren Farben im Spektrum beschränkt ist. Zusätzlich zu der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Instruktion, die in sechs Durchgängen gegeben wird, soll auch die prototypische Farbe (siehe K.A. Jameson et al., 2001) für insgesamt sieben Farbkategorien, die beiden äußersten Ränder des wahrgenommenen Regenbogens, sowie die 1., 2., bis 7. erkennbare Farbe im Spektrum gekennzeichnet werden. Das Experiment umfasst insgesamt 80 Durchgänge, auf die die unterschiedlichen Instruktionen zufällig verteilt sind, und dauert ca. 90 Minuten.

Die Probanden in der vorliegenden Untersuchung verfügen im Durchschnitt über mehr Zeit für den einzelnen Durchgang als die Probanden von K.A. Jameson et al. (2001), zudem können sie sich ganz auf die Einteilung des Spektrums in die wahrnehmbaren Farben konzentrieren, da keine weiteren Instruktionen gegeben werden. Dies könnte, zusammen mit der deutlich weniger leistungsstarken Halogenlampe im vorliegenden Versuch, dazu geführt haben, dass die Ergebnisse der beiden Studien nur noch bedingt vergleichbar sind.

Eventuell ist es jedoch tatsächlich so, dass, wie M. Neitz und J. Neitz (1995) vermuten, sich auch bei männlichen Beobachtern unterschiedliche Arten der genetisch kodierten Photopigmente auf das Farbsehen auswirken. Dies kann jedoch, genauso wie die Anzahl und Art der genetisch kodierten Photopigmente bei den weiblichen Probanden, aufgrund der fehlenden Genanalysen nicht näher untersucht werden. Jedoch kann auch bei vorliegenden Genanalysen nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass Genotyp und Phänotyp übereinstimmen, das heißt, dass sich die genetischen Anlagen auch ausprägen:

In der in Abschnitt 1 bereits erwähnten Studie von M. Neitz, Kraft und J. Neitz (1998) gelingt nur bei fünf von neun genetisch heterozygoten Frauen ein Nachweis beider zu gleichen Teilen ausgebildeten Allele des L-Opsins in der Retina.

4.1.3 Fazit des Vorversuches

Da in der vorliegenden Arbeit der Vorversuch lediglich ein Hilfsmittel zur Einteilung der weiblichen Versuchspersonen in Extremgruppen sein soll, bleibt der nicht signifikante Unterschied zwischen den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachtern männlichen und weiblichen Geschlechts unberücksichtigt. Aufgrund der nicht bestätigten Hypothesen für den Vorversuch ist es jedoch möglich, dass die im Hauptversuch untersuchten weiblichen Versuchspersonen falsch klassifiziert worden sind, eine Vermutung, die bei der Interpretation der Ergebnisse des Farbmischungsexperiments im folgenden Abschnitt berücksichtigt werden muss.

4.2 Diskussion der Ergebnisse des Hauptversuches

Bei der nun folgenden Diskussion der Ergebnisse des Hauptversuches, die in Abschnitt 3.2 dargestellt sind, soll zunächst die Klassifikation der Versuchspersonen betrachtet werden, dann die Ergebnisse des Farbmischungsexperimentes.

Wie schon im vorangegangenen Abschnitt diskutiert, ist die in Abschnitt 3.1.1 beschriebene Einteilung der Versuchspersonen in unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlich nicht unproblematisch: Die nähere Betrachtung der Ergebnisse des Vorversuches hat ergeben, dass Rückschlüsse auf die Anzahl der genetisch kodierten Photopigmente nach der von K.A. Jameson et al. (2001) vorgeschlagenen Methode nicht ohne weiteres möglich sind: Die vermuteten Unterschiede zwischen dem männlichen und einem Teil der weiblichen Stichprobe haben sich nicht ergeben (siehe Tabelle 3.2). Trotzdem werden die Probanden in zwei Gruppen von jeweils sieben potentiellen Tetrachromatinnen und sieben potentiellen Trichromatinnen eingeteilt, die im Rahmen des Farbmischungsexperimentes im Hauptversuch näher untersucht werden.

Anhand Tabelle B.1 im Anhang 3.2 sind die Daten der Versuchspersonen im Hauptversuch dargestellt. Die entsprechenden statistischen Tests können Abschnitt 3.2 entnommen werden. Die Analyse dieser Daten zeigt, dass die beiden Gruppen im Hauptversuch sich, wie erwartet, deutlich hinsichtlich der im Mittel erkannten Anzahl der gekennzeichneten Bereiche im Spektrum unterscheiden. Die Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen erkennt mit $M = 20.68$ ($SD = 4.00$) signifikant mehr Farben im Spektrum, während die zweite Gruppe mit $M = 9.46$ ($SD = 2.22$) deutlich darunter liegt. Die Mittelwerte der Probanden im Hauptversuch liegen für die unterdurchschnittlich spektralempfindliche Gruppe im Bereich der entsprechenden Gruppe aller Versuchspersonen im Vorversuch, für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter im Hauptversuch gilt ähnliches (siehe auch Tabelle 3.2).

Die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter im Hauptversuch weisen signifikant geringere Fehlerwerte im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test (Farnsworth, 1957) auf als die Vergleichsgruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden.

Sie verfügen mit einer Ausnahme (Vp 03) über ein überdurchschnittlich gutes Farbunterscheidungsvermögen (siehe auch Tabelle B.1), ihre Fehlerwerte liegen zwischen 0 und 20. Im Gegensatz dazu verfügen nur drei der insgesamt sieben überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter auch über ein überdurchschnittliches Farbunterscheidungsvermögen. Die Fehlerscores dieser Gruppe reichen von 8 bis 48. Auch dieser Befund stützt die schon in Abschnitt 4.1.1 aufgestellte Hypothese, dass Unterschiede in der Anzahl der im Spektrum wahrgenommenen Bereiche nicht auf Unterschiede im Farbunterscheidungsvermögen zurückgeführt werden können, sondern andere, möglicherweise auch genetische, Ursachen haben müssen.

Mögliche Unterschiede in den Ergebnissen des Farbmischungsexperiments der Versuchspersonen in den beiden Gruppen (siehe Abschnitt 3.2) sollen in den folgenden Abschnitten näher beleuchtet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei oft um aus den Rohdaten der Schrittmotorstellungen berechnete, also unter bestimmten Annahmen abgeleitete, Kennwerte handelt. Zunächst soll auf die Auswirkungen der angewandten Gedächtnismethode eingegangen werden, dem folgt eine nähere Diskussion der Merkmale der eingestellten Reize und möglicher Lerneffekte. Dann werden ergänzend auch die Rohdaten im Schrittmotorraum betrachtet. Schließlich werden einige der Grundannahmen, die in die Klassifikation der Probanden und die Entwicklung des Versuchsaufbaues eingegangen sind, näher diskutiert.

4.2.1 Gedächtniseffekte

Die Auswirkungen der Gedächtnismethode, die aufgrund der technischen Einschränkungen der Apparatur angewandt werden muss, zeigen sich an der Abweichung der mittleren Einstellungen vom vorgegebenen Reiz (siehe Tabellen B.2 und B.2 in Anhang B.2). Sie sind in den Abbildungen 3.1 bis 3.4 für zwei unterdurchschnittlich und zwei überdurchschnittlich spektralempfindliche Probanden graphisch dargestellt. Diese Abweichung des eingestellten vom vorgegebenen Reiz wird auch durch das Abstandsmaß bestätigt, das den Tabellen B.4 und B.5 zu entnehmen ist. Unabhängig von der Versuchspersonengruppe zeigen sich teilweise deutliche Abweichungen vom vorgegebenen Standardreiz. Dieses Phänomen kann auf die Bildung von Gedächtnisfarben (siehe auch Abschnitt 1.1) zurückgeführt werden: Die Entstehung von Gedächtnisfarben wird meist damit begründet, dass die Probanden zu einem vorgegebenen Reiz eine prototypische Farbe bilden. Die Farbabweiche werden dann nicht zum vorher präsentierten Zielreiz, sondern zu der stabil im Gedächtnis verankerten Gedächtnisfarbe erstellt.

Die bei Gedächtnisfarben oft beobachtete Verschiebung hin zu größerer Sättigung (siehe auch Abschnitt 1.1) zeigt sich auch in der vorliegenden Arbeit (siehe Abbildungen 3.1 bis 3.4). Auf Befragung gibt der Großteil der Versuchspersonen tatsächlich an, die „Farbe zu lernen“, bzw. sie mit bekannten Objekten ähnlicher Farbe in Verbindung zu bringen. Aufgrund solcher Effekte kann sich die Gedächtnisfarbe je nach Reiz in verschiedene Richtungen verschieben (siehe Siple & Springer, 1983).

Nach Zimmer (1980) führt die Tatsache, dass eine Wahrnehmung mit einem vertrauten Objekt in Verbindung gebracht werden kann, zu einer höheren inter- und intraindividuellen Konstanz. Dies führt in der vorliegenden Arbeit dazu, dass die Anwendung der

Gedächtnismethode zwar deutlich erkennbare Auswirkungen auf die Qualität des Farbabgleichs hat, die Streuung der Einstellungen einer Versuchsperson zu einem Zielreiz jedoch nur gering ist. Diese geringe Streuung ist anhand der in den Abbildungen C.5 bis C.8 dargestellten Diskriminationsellipsoide erkennbar, die eine vergleichsweise geringe Größe haben (siehe jedoch auch die Autokorrelationen in Abschnitt 3.2.4 und Anhang D). Ein Vergleich mit Abbildung 1.2 zeigt, dass die Ergebnisse des Farbmischungsexperimentes auch mit diesen Resultaten in Einklang stehen: In Bereichen, die in Abbildung 1.2 durch größere Ellipsoide gekennzeichnet sind, kommt es auch bei den Probanden des vorliegenden Experimentes zu höheren Streuungen.

Die Abbildungen 3.1 bis 3.4 und C.5 bis C.8 unterscheiden sich kaum für unter- und überdurchschnittlich spektralempfindliche Probanden. Die Anwendung der Gedächtnismethode wirkt sich folglich auf alle Versuchspersonen in annähernd gleichem Maße aus. Daher sollen im nächsten Abschnitt vor allem Merkmale der eingestellten Reize betrachtet werden, die möglicherweise Rückschlüsse auf eventuelle Unterschiede zwischen den Experimentalgruppen zulassen.

4.2.2 Merkmale der Einstellungen

Unter solche Merkmale der eingestellten Reize fallen das Abstandsmaß (siehe Tabellen B.4 und B.5 im Anhang), die Bearbeitungszeiten (siehe Tabellen B.6 und B.7 im Anhang) sowie die Anzahl der Aktionen, die mit jedem der vier Schrittmotoren durchgeführt werden (siehe Tabellen B.8 und B.9 im Anhang). Zusammenfassungen der Ergebnisse können Abschnitt 3.2.2 entnommen werden.

Die Ergebnisse der Betrachtung des ΔE_{94}^* -Abstandsmaßes, das die unterschiedliche Empfindlichkeit der Wahrnehmung über den sichtbaren Bereich hinweg berücksichtigt, zeigen die gleichen Tendenzen wie die weiteren betrachteten Merkmale der Einstellungen: Es zeigt sich sowohl bei Betrachtung des ΔE_{94}^* -Abstands als auch bei Auswertung der benötigten Zeit und der Anzahl der Aktionen, dass Abgleiche zu Farben, die lediglich aus drei Primärfarben bestehen, unabhängig von der Versuchspersonengruppe leichter zu erstellen sind. Solche Abgleiche sind mit wenigen Ausnahmen tendenziell nicht nur genauer, das heißt, die Werte des Abstandsmaßes sind geringer, sondern erwartungsgemäß auch signifikant schneller und mit signifikant weniger Aufwand zu erstellen. Dies ist auch den Tabellen mit den entsprechenden statistischen Tests zu entnehmen (siehe Tabellen 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9 und 3.10). Dies gilt besonders für die Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen, aber auch für die meisten der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden. Die Einführung einer weiteren Dimension beim Farbenmischen macht die Erstellung eines Farbabgleichs deutlich aufwändiger und schwieriger.

Für die meisten der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen sind sogar Abgleiche zu Reizen, die lediglich aus drei Primärreizen zusammengesetzt sind, mit Hilfe von vier Primärreizen schwieriger: Sie sind zwar nicht weniger genau, dauern jedoch länger und erfordern eine größere Anzahl von Aktionen. Bei den aus vier Primärreizen zusammengesetzten und mit vier Primärreizen abzugleichenden Farben ergeben sich für diese Versuchspersonen nochmals größere Probleme. Dies deutet darauf hin, dass es sich bei diesen Probanden tatsächlich um reine Trichromaten handelt, die lediglich mit drei

Primärreizen eindeutig mischen können. Bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zeigen sich ähnliche Befunde nur in zwei von sieben Fällen, bei Vp 08 und bei Vp 14.

Die Tatsache, dass sich beim inferenzstatistischen Vergleich (siehe Tabellen 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.9 und 3.10) der Versuchsbedingung 4/4 mit 3/4 und 3/3- mit 3/4-Reizen für die beiden Versuchspersonengruppen ein gegenteiliges Bild ergibt, ist bemerkenswert: Es scheint so, als ob die Zeitdauer und die Anzahl der benötigten Aktionen für die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden eher von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Variationsmöglichkeiten beziehungsweise der Primärreize abhängig ist als von der Anzahl der Reize, aus denen sich die vorgegebene Farbe tatsächlich zusammensetzt.

4.2.3 Lerneffekte

Neben den im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Merkmalen der Abgleiche sollen in der vorliegenden Arbeit auch Lerneffekte berücksichtigt werden, die im Verlauf des Hauptversuches auftreten können. Als Lerneffekte werden in der vorliegenden Arbeit alle diejenigen Phänomene zusammengefasst, die zu einer Verbesserung der Fähigkeit zum Erstellen von Farbabweichen führen. Außerdem sollen in diesem Abschnitt eventuelle Motivationseffekte diskutiert werden.

Unabhängig von der Versuchspersonengruppe scheint das Erstellen von Farbabweichen mit Hilfe von vier Primärfarben eine schwierige Aufgabe zu sein, bei der nur in geringem Maße effiziente Bearbeitungsstrategien erworben werden können. Dies ist unter anderem anhand der für einen Abgleich im Durchschnitt benötigten Zeit sowie der Summe der benötigten Aktionen erkennbar: Die Probandinnen müssen zwischen 26.5 Sekunden und 1 Minute 21.0 Sekunden (siehe Tabellen B.6 und B.7 im Anhang) beziehungsweise zwischen 64.3 Aktionen und 206.2 Aktionen (siehe Tabellen B.8 und B.9 im Anhang) für einen einzigen Abgleich aufwenden. Die Probandinnen sind also motiviert, einen möglichst zufriedenstellenden Abgleich zu erzeugen.

Dabei kommt es innerhalb eines Durchganges, der aus vier aufeinanderfolgenden Abgleichen zum selben Zielreiz besteht, jedoch nur zu geringfügigen Lerneffekten, die sich anhand kürzerer Bearbeitungszeiten erfassen lassen: Eine geringfügige Reduktion der Bearbeitungszeiten zeigt sich vor allem in der Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden (siehe Abbildung 3.5), die überdurchschnittlich spektralempfindlichen bleiben eher auf demselben Niveau (siehe Abbildung 3.6). Dieser Befund zeugt einerseits ebenfalls von der Schwierigkeit des Abgleichs, da die Versuchspersonen auch mit zunehmender Übung nur geringfügig schneller werden. Andererseits zeigt er auch, dass es bei den Probandinnen innerhalb eines Abgleichs nicht zu einer Verringerung der Motivation kommt, da sie bereit sind, jeden der vier Abgleiche mit annähernd gleich großer Sorgfalt zu erstellen.

Weiterhin ist wichtig, ob ausreichend viele Übungsdurchgänge absolviert worden sind. Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen, dass dies der Fall ist: Nach sieben bis acht Übungsdurchgängen erreichen die Probandinnen sowohl hinsichtlich der für einen Abgleich benötigten Zeit als auch hinsichtlich der erforderlichen Aktionen ein verhältnismäßig stabiles Niveau. Sie scheinen nun mit der Apparatur und dem Versuchsablauf vertraut zu

sein. Einzige Ausnahme ist in beiden Fällen Vp 03, der dies erst nach ca. 12 Durchgängen zu gelingen scheint. Dieser Befund ist im Einklang mit den Ergebnissen von Brown (1957), in dessen Experimenten Trainingseffekte bei der Erstellung von Farbabgleichen nachgewiesen werden können. Mit zunehmender Erfahrung der Beobachter werden die Diskriminationsellipsoide der Einstellungen nicht nur im Durchschnitt kleiner, sondern die Übereinstimmung zwischen den Versuchspersonen bezüglich Größe und Orientierung der Ellipsoide nimmt deutlich zu.

Mögliche Lerneffekte über das gesamte Hauptexperiment hinweg (ohne Berücksichtigung der Übungsdurchgänge) werden mit Hilfe der Rangkorrelationen zwischen der Nummer des Farbabgleichs und dem Farbabstandsmaß, der benötigten Zeit bzw. der Anzahl der Aktionen untersucht (siehe Tabelle 3.12). Die Betrachtung der Rangkorrelation zwischen der Nummer des Durchganges und dem ΔE_{94}^* -Abstandsmaß zeigt, dass meist geringe negative Zusammenhänge vorliegen. Die Probanden können also, wenn es überhaupt zu einer systematischen Veränderung kommt, mit zunehmender Anzahl an Durchgängen die Genauigkeit der Abgleiche steigern.

In der Gruppe der unterdurchschnittlich empfindlichen Probanden ist der Zusammenhang lediglich in drei von sieben Fällen statistisch bedeutsam. Für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden nimmt die Rangkorrelation deutlich höhere Werte an als in der Vergleichsgruppe, zudem wird mit nur einer Ausnahme bei allen Probanden statistische Signifikanz erreicht. Die spektralempfindlichere Gruppe kann also die Qualität ihrer Abgleiche deutlich stärker steigern als die Vergleichsgruppe, in der sich oft gar kein systematischer Zusammenhang ergibt. Die Betrachtung der Rangkorrelation zwischen Durchgangsnummer und benötigter Zeit deutet ebenfalls auf Unterschiede zwischen den beiden Gruppen hin: Die unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen scheinen mit nur einer Ausnahme im Laufe des Experiments schneller zu werden, also weniger Zeit für einen einzelnen Abgleich zu benötigen. Im Einklang damit steht der Befund, dass auch die Anzahl der benötigten Aktionen für diese Gruppe im Laufe des Hauptversuches abnimmt.

Ein anderes Bild ergibt sich für die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter: In dieser Gruppe ergeben sich nur in drei von sieben Fällen überzufällige Zusammenhänge zwischen der benötigten Zeit und der Durchgangsnummer. Diese Korrelationen sind jedoch deutlich niedriger als bei den unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachtern. Die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter werden also im Laufe des Experimentes nur noch unwesentlich schneller. Bei ihnen ist auch nur in einem Fall ein signifikanter negativer Zusammenhang zwischen der Anzahl der benötigten Aktionen und der Durchgangsnummer zu erkennen. Dieser Zusammenhang ist bei Vp 08 sogar positiv, die Probandin benötigt im Laufe des Hauptversuches mehr Aktionen für einen Farbabgleich.

Aus der Betrachtung der Spearman-Rangkorrelationen (siehe Tabelle 3.12) ergibt sich insgesamt, dass die überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden die Genauigkeit ihrer Abgleiche in geringem Maße verbessern können. Dies erklärt möglicherweise auch die Tatsache, warum sie tendenziell für den einzelnen Abgleich nicht weniger Zeit und auch keine geringere Anzahl an Aktionen benötigen. Die unterdurchschnittlich spektralempfindliche Gruppe kann die benötigte Zeit und die Anzahl an Aktionen für einen Abgleich im Laufe des Hauptexperimentes zwar geringfügig verringern, dabei werden die

Abgleiche jedoch, wenn überhaupt, nicht in dem Maße genauer als bei der Vergleichsgruppe.

4.2.4 Rohdaten im Schrittmotor-Raum

Auch die Betrachtung der Rohdaten im Experiment, der Schrittmotoreinstellungen der Versuchspersonen, zeigt keine Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen, die auf eine Erweiterung des Farbraumes der überdurchschnittlich spektralempfindlichen, potentiellen Tetrachromaten hindeuten würde. Es zeigt sich lediglich, dass die Schrittmotoreinstellungen zu 3/3-Reizen konsistenter erfolgen als zu den 4/4-Reizen: Ein Vergleich der entsprechenden Autokorrelationen ergibt für die einfacheren Reize unabhängig von der Versuchspersonengruppe höhere Korrelationswerte (siehe Anhang D). Bemerkenswert ist, dass sich bei Betrachtung der Diskriminationsellipsoide in Abschnitt 3.2.1 und Anhang C ein ganz anderes Bild bezüglich der Konsistenz der Einstellungen der Versuchspersonen ergibt als bei Berücksichtigung der Rohdaten in Anhang D: Die Autokorrelationen der Schrittmotoreinstellungen der Probanden zeigen eine relativ geringe Reliabilität der Einstellungen. Die geringen Autokorrelationen selbst bei kleinem Lag zeigen, daß es zu sehr großen Schwankungen der wiederholten Einstellungen zum selben Zielreiz kommt. Dies ist anhand der Diskriminationsellipsoide, die aus den xyL - beziehungsweise XYZ -Koordinaten bestimmt werden, kaum ersichtlich. Dies zeigt, daß die Reduktion der vier Dimensionen der Rohdaten auf den dreidimensionalen Farbraum unter Umständen zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen kann.

Die direkte Überprüfung möglicher Unterschiede zwischen den Versuchspersonengruppen hinsichtlich der Dimensionalität ihrer Abgleiche erfolgt durch die Betrachtung der kleinsten (vierten) Eigenwerte. Sie werden aus den normierten Korrelationsmatrizen der Einstellungen der einzelnen Versuchspersonen zu den unterschiedlichen Zielreizen bestimmt. Die grafische Darstellung dieser Befunde (siehe Abbildung 3.11 zeigt, dass die Verteilungen der beiden Gruppen direkt übereinanderliegen. Es ergeben sich also wiederum keine Hinweise auf eine Erweiterung des Farbraumes bei den vermuteten Tetrachromaten.

Diese Befunde könnten jedoch zumindest teilweise durch methodische Mängel der Untersuchung oder nicht zutreffende Grundannahmen bei der Durchführung des Experiments verursacht sein. Einige sollen im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

4.2.5 Eignung des Versuchsaufbaues

In diesem Abschnitt sollen einige Überlegungen hinsichtlich der Eignung des entwickelten Versuchsaufbaues zur Untersuchung der Tetrachromasie-Hypothese angestellt werden. Zunächst soll auf die Klassifikation der Probanden eingegangen werden, dem folgt die kritische Betrachtung der Versuchsapparatur, der Verfahren zur Datenauswertung sowie einiger im Voraus getroffener Einschränkungen.

Da von den Versuchspersonen keine Genanalysen vorliegen, kann nicht mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass es sich bei den unter- beziehungsweise bei den überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden auch tatsächlich um Personen mit drei oder

vier kodierten Sehfärbstoffen handelt. Zwar wäre auch bei vorhandener Genanalyse nicht sicher, ob sich vier in den Genen kodierte Sehfärbstoffe auch in der Retina ausprägen, jedoch wäre das Risiko von Fehlklassifikationen deutlich reduziert worden.

Auch die Rangkorrelationen aus Tabelle 3.12 liefern Hinweise auf mögliche Fehlklassifikationen: Vp 14, die hinsichtlich aller drei Spearman-Rangkorrelationen aus der Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden herausfällt, könnte möglicherweise aufgrund der Ergebnisse des Vorversuches fehlklassifiziert worden sein. Wie anhand von Tabelle B.1 im Anhang zu sehen ist, hat Vp 14, ähnlich wie Vp 09, im Vergleich zu den restlichen überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen eher wenige Bereiche im Spektrum gekennzeichnet. Auch Vp 02 könnte eventuell versehentlich der Vergleichsgruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden zugeordnet worden sein, da auch ihre Rangkorrelationen von der sonst in der Gruppe vorherrschenden Tendenz abweichen.

Der in Abschnitt 2.2.2 beschriebene Versuchsaufbau, dessen wesentliche Bestandteile zwei Quarz-Wolfram-Halogenlampen und vier unterschiedliche Interferenzfilter sind, könnte aus mehreren Gründen für die Untersuchung der vorliegenden Fragestellung ungeeignet sein. Zunächst besteht die Möglichkeit, dass es sich bei den ausgewählten Primärreizen nicht um linear unabhängige Primärreize im vierdimensionalen Farbraum handelt. Anhand von Abbildung 2.8 ist erkennbar, dass die Primärreize 1 und 3 in der Normfarbtafel relativ nahe beieinander liegen. Ein Blick auf die MacAdam-Ellipsen aus Abbildung 1.2 zeigt zwar, dass es sich dabei um einen Bereich der Normfarbtafel handelt, in dem Menschen über ein sehr gutes Diskriminationsvermögen verfügen, trotz der vorangegangenen Überlegungen bei der Wahl der Primärreize könnte dieser zu geringe Unterschied möglicherweise dazu geführt haben, dass Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen und zwischen den Probandengruppen nicht erkannt worden sind.

Weiterhin könnte die im Experiment verwendete Reizsituation trotz beidäugiger Betrachtung und ausreichender Größe des Reizes immer noch zu wenig komplex sein: Sämtliche Reize werden isoliert auf der Projektionsfläche dargeboten (siehe auch Abschnitt 2.2.2). Dabei handelt es sich nicht um eine Reizkonfiguration, die den Anforderungen an die visuelle Verarbeitung in der Realität entspricht. Im Vergleich zu dem im Vorversuch präsentierten Spektrum handelt es sich bei den Reizen im Hauptversuch weiterhin um eine sehr reduzierte Reizsituation, die den Beobachtungsbedingungen in der wirklichen Welt kaum entspricht. K.A. Jameson et al. (2001) begründen die Tatsache, dass sich in ihrer Untersuchung Verhaltensunterschiede zwischen potentiellen Tri- und möglichen Tetrachromaten ergeben, jedoch unter anderem mit der Komplexität und Näherung an natürliche Beobachtungsbedingungen des präsentierten Reizes. Folglich besteht die Möglichkeit, dass sich auch aufgrund der reduzierten Wahrnehmungssituation im Hauptversuch keine Unterschiede zwischen den Versuchspersonengruppen ergeben. Unter Umständen wäre eine Erweiterung des Experiments auf eine komplexere Beobachtungssituation, beispielsweise die *Mondrian world* (siehe z.B. Bäuml, 1997), besser geeignet, eventuelle Unterschiede zwischen unter- und überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden aufzudecken.

Zudem könnten auch die Verwendung eines auf einem dreidimensionalen Farbraum basierenden Farbabstandsmaßes und die Klassifikation sämtlicher Reize durch dreidimensionale XYZ-Koordinaten dazu beigetragen haben, dass mögliche Unterschiede im Farbmi-

schungsverhalten in den Versuchsbedingungen unerkannt geblieben sind. Da sich jedoch auch bei Betrachtung der Rohdaten, die nicht auf einen dreidimensionalen Farbraum beschränkt sind, keine Hinweise auf die Existenz von Probanden mit vier- oder mehrdimensionalem Farbraum ergeben, scheint die Verwendung von Farbabstandsmaßen für den dreidimensionalen Farbraum unproblematisch zu sein. Ähnliches gilt für die Anwendung der Gedächtnismethode.

Weiterhin stellt sich die Frage, ob die sowohl in der vorliegenden Arbeit als auch in der Studie von K.A. Jameson et al. (2001) vorgenommene Beschränkung der Untersuchung auf die L-Zapfen-Opsine sinnvoll ist: Die Annahme einer Verschiebung von λ_{max} um 5-6 nm sollte einigen Autoren zufolge einen größeren minimalen Unterschied zwischen Individuen bewirken als im Experiment tatsächlich beobachtet wird (z.B. J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993; He & Shevell, 1994). Sie gehen daher davon aus, dass die Probanden entweder über beide L-Pigmente gleichzeitig verfügen, oder dass die M-Pigmente ebenfalls nicht denen des Normalbeobachters entsprechen. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit ist die Annahme, dass, entgegen der Young-Helmholtz-Theorie (Young, 1802a, 1802b), viele farbnormalsichtige Menschen über mehr als drei Zapfepigmente mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitskurven verfügen (z.B. J. Neitz & Jacobs, 1990; J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993).

4.3 Fazit

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit legen nahe, dass sich zwar tendenziell Unterschiede zwischen vermuteten für das L-Opsin heterozygoten und homozygoten Probanden zeigen, diese jedoch nicht auf eine Erweiterung des Farbensehens auf vier Dimensionen schließen lassen.

Die Untergruppen von L- und M-Pigmenten, die bei Normalsichtigen vorkommen, unterscheiden sich in ihrem spektralen Empfindlichkeitsmaximum um 5 nm bis 7 nm. Wenn sich zwei solcher Pigmente in verschiedenen Zapfen befinden würden und es entsprechende neurale Verbindungen gäbe, wären diese zusätzlichen Pigmente bei Menschen mit normalen Farbsehen sind ausreichend unterschiedlich, um Tetra- oder sogar Pentachromasie zu bewirken (J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993). Die Tatsache, dass sie dies nicht tun, deutet darauf hin, dass die Trichromasie des Farbensehens ihren Ursprung auf einer Ebene der Sehbahn hat, die nach den Rezeptor-Pigmenten liegt, mit hoher Wahrscheinlichkeit sogar nach den Rezeptoren (J. Neitz, M. Neitz & Jacobs, 1993). Daher ist davon auszugehen, dass die Hypothese von drei unterschiedlichen Zapfen-Photopigmenten im menschlichen Auge nicht als Erklärung für das trichromatische Farbsehen dienen kann.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Seit Young und Helmholtz gilt die Trichromasie des Farbsehens als Tatsache. In neuerer Zeit hat sich gezeigt, dass in den Retinae bestimmter Menschen nicht drei Opsine für das Farbsehen vorkommen, sondern vier oder mehr unterschiedliche Sehfärbstoffe gegeben sind. Wenn das Vorhandensein von drei unterschiedlichen Photopigmenten in der Netzhaut als physiologische Bedingung für die Trichromasie herangezogen werden soll, dann müssten solche Personen über einen Farbraum mit mehr als drei Dimensionen verfügen, also Tetrachromaten sein. Bei dichromatischen Affenarten ist eine Erweiterung des Farbsehens auf drei Dimensionen für weibliche Heterozygote beobachtet worden (Tovée et al., 1992).

Die strenge Überprüfung der Tetrachromasie-Hypothese, die bis jetzt nicht vorgenommen worden ist, geschieht im Farbmischungsexperiment mit vier statt drei Primärreizen. Tetrachromaten sollten mit Hilfe von vier Primärreizen eindeutige Farbabweichungen erzeugen können, normalen Trichromaten sollte dies nicht gelingen.

Die Probanden werden nach dem Verfahren von K.A. Jameson, Highnote und Wasserman (2001) in zwei Gruppen eingeteilt. Es basiert auf der Möglichkeit, von der Anzahl der wahrgenommenen Farben im Spektrum auf die genetische Ausstattung rückzuschließen: Probanden, die überdurchschnittlich viele Farben kennzeichnen, sind mit hoher Wahrscheinlichkeit Heterozygote (potentielle Tetrachromaten), eine unterdurchschnittliche Anzahl an Einteilungen korreliert hoch mit Homozygotie (möglicher Trichromasie). Trotz einiger Unklarheiten bei der Klassifikation werden jeweils sieben weibliche vermutete Tri- und Tetrachromaten im Farbmischungsexperiment mit vier Primärreizen untersucht.

Die Versuchsanordnung besteht aus vier unterschiedlichen Farbfiltern, durch die das Licht einer Quarz-Wolfram-Halogenlampe fällt. Die Lichtstrahlen können durch vier computergesteuerte Graueile abgeblendet werden. Es werden sowohl Reize vorgegeben, die sich aus drei Primärreizen zusammensetzen, als auch solche, die aus vier Primärreizen bestehen.

Obwohl die Autokorrelationsfunktionen der Rohdaten darauf hindeuten, daß die Einstellungen der Probanden nicht sehr konsistent sind, können beide Versuchspersonengruppen Reize, die aus drei Primärreizen bestehen, deutlich leichter abgleichen als Reize aus vier

Primärreizen. Lediglich bei Untersuchung der Lerneffekte zeigt sich, dass die vermuteten Tetrachromaten die Genauigkeit ihrer Abgleiche geringfügig steigern können. Die möglichen Trichromaten benötigen im Laufe des Experiments signifikant weniger Zeit und Aktionen für einen Abgleich. Die direkte Überprüfung der Dimensionalität des Farbraumes erfolgt mit Hilfe der Analyse der kleinsten Eigenwerte. Sie sind ein Maßstab für die durch Hinzunahme einer vierten Dimension beim Farbsehen erklärte Varianz der Beobachtungswerte. Es ergeben sich keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

Diese Ergebnisse zeigen tendenzielle Unterschiede zwischen den beiden Versuchspersonengruppen. Man kann jedoch nicht auf eine Erweiterung des Farbraumes auf vier Dimensionen für die vermuteten Heterozygoten schließen. Ehe man die Tetrachromasie-Hypothese endgültig als erledigt betrachtet, sollten mögliche Inkonsistenzen bei der Klassifikation der Probanden und methodische Probleme diskutiert werden, die die Auswirkungen potentieller Tetrachromasie überlagert haben könnten.

Literaturverzeichnis

Alman, D.H. (1993). CIE Technical Committee 1-29, Industrial color-difference evaluation progress report. *Color Research and Application*, **18**, 137-139.

Alpern, M. (1987). Variation in the visual pigments of human dichromats and normal human trichromats. In *Frontiers of visual science* (pp.169-193). Washington DC: National Academy Press.

Balding, S.D., Sjöberg, S.A., Neitz, J. & Neitz, M. (1998). Pigment gene expression in protan color vision defects. *Vision Research*, **38**, 3359-3364.

Barlow, H. B. (1982). What causes trichromacy? A theoretical analysis using comb-filter spectra. *Vision Research*, **22**, 635-643.

Bartleson, C.J. (1959). Memory colors of familiar objects. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 73-77.

Bäumel, K.-H. (1997). *Sensory and perceptual mechanisms of color constancy*. Unveröffentlichte Habilitationsschrift, Universität Regensburg.

Baylor, D.A. (1987). Photoreceptor signals and vision. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **28**, 34-49.

Baylor, D.A., Nunn, B.J. & Schnapf, J.L. (1987). Spectral sensitivity of cones of the monkey *Macaca fascicularis*. *Journal of Physiology*, **390**, 145-160.

Bedford, R.E. & Wyszecki, G. (1958). Wavelength discrimination for point sources. *Journal of the Optical Society of America*, **48**, 129-135.

Bieber, M.L., Werner, J.S., Knoblauch, K., Neitz, J. & Neitz, M. (1998). M- and L-cones in early infancy: III. Comparison of genotypic and phenotypic markers of color vision in infants and adults. *Vision Research*, **38**, 3293-3297.

Bowmaker, J.K & Dartnall, H.J.A. (1980). Visual pigments of rods and cones in a human retina. *Journal of Physiology*, **298**, 501-511.

Brindley, G.S. (1955). The colour of light of very long wavelength. *Journal of Physiology (London)*, **130**, 35-44.

- Brindley, G.S. (1970). *Physiology of the retina and visual pathway*, 2nd Edition. London: Camelot.
- Brown, P.K. & Wald, G. (1964). Visual pigments in single rods and cones of the human retina. *Science, N. Y.*, **144**, 45-52.
- Brown, W.R.J. (1952). Statistics for color-matching data. *Journal of the Optical Society of America*, **42**, 252-256.
- Brown, W.R.J. (1957). Color discrimination of twelve observers. *Journal of the Optical Society of America*, **47**, 137-143.
- Brown, W.R.J. & MacAdam, D.L. (1949). Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. *Journal of the Optical Society of America*, **39**, 808-834.
- Burnham, R.W. & Clark, J.K. (1955). A test of hue memory. *Journal of Applied Psychology*, **39**, 164-172.
- Campbell, F.W. & Rushton, W.A.H. (1955). Measurement of the scotopic pigment in the living human eye. *Journal of Physiology*, **130**, 131-147.
- CIE (1995). *Industrial color difference evaluation*. CIE Technical Report 116. Vienna: Author.
- Cohen, J.S., Welch, L. & Fisichelli, V.R. (1951). An objective test of visual retention capacity. *Journal of Psychology*, **32**, 43-47.
- Dartnall, H.J.A. (1953). The interpretation of spectral sensitivity curves. *British Medical Bulletin*, **9**, 24-30.
- Dartnall, H.J.A., Bowmaker, J.K. & Mollon, J.D. (1983). Human visual pigments: Microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. *Proceedings of the Royal Society of London B*, **220**, 115-130.
- DeValois, R.L. & Jacobs, G.H. (1968). Primate color vision. *Science*, **162**, 533-540.
- DeValois, R.L., Morgan, H.C., Polson, M.C., Mead, W.R. & Hull, E.M. (1974). Psychophysical studies of monkey vision: 1. Macaque luminosity and color vision tests. *Vision Research*, **14**, 53-67.
- Drösler, J. (1989). *Quantitative Psychology*. Göttingen: Hogrefe & Huber.
- Dulai, K.S., Bowmaker, J.K., Mollon, J.D. & Hunt, D.M. (1994). Sequence divergence, polymorphism and evolution of the middle-wave and long-wave visual pigment genes of great apes and Old World monkeys. *Vision Research*, **34**(19), 2483-2491.
- Edmund Scientific (1998). *1999 Optics and optical instruments Catalog*. Barrington, NJ: Author.

- Fahrmeir, L. & Hamerle, A. (1996). Grundlegende multivariate Schätz- und Testprobleme. In L. Fahrmeir, A. Hamerle & G. Tutz (Hrsg.), *Multivariate statistische Verfahren* (2. überarbeitete Auflage, S. 49-92). Berlin: Walter de Gruyter.
- Farnsworth, D. (1957). *The Farnsworth-Munsell 100 hue test for the examination of color discrimination*. Baltimore, Md.: Munsell Color.
- Graßmann, H. (1853). Zur Theorie der Farbmischung. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie*, **89**, 69-84.
- Hamwi, V. & Landis, C. (1955). Memory for Color. *The Journal of Psychology*, **39**, 183-194.
- He, J.C. & Shevell, S.K. (1994). Individual differences in cone photopigments of normal trichromats measured by dual Rayleigh-type color matches. *Vision Research*, **34**, 367-376.
- Helmholtz, H. v. (1896). *Handbuch der Physiologischen Optik*, 2. Auflage. Hamburg: Voss.
- Hering, E. (1920). Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. Sonderabdruck aus A. von Gräfe & T. Sämische (Hrsg.), *Handbuch der gesamten Augenheilkunde, Teil I, Kapitel 12*. Berlin: Julius von Springer.
- Hunt, R.W.G. (1989). Hue shifts in unrelated and related colors. *Color Research and Application*, **14**, 235-239.
- Hunt, D.M., Dulai, K.S., Cowing, J.A., Julliot, C., Mollon, J.D., Bowmaker, J.K., Li, W.H. & Hewett-Emmett, D. (1998). Molecular evolution of trichromacy in primates. *Vision Research*, **38**, 3299-3306.
- Hurvich, L.M. (1981). *Color Vision*. Sunderland, MA: Sinauer.
- Hurvich, L.M. & Jameson, D. (1955). Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. II. Brightness, saturation, and hue in normal and dichromatic vision. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 602-616.
- Ingling, C.R. (1969). A tetrachromatic hypothesis for human color vision. *Vision Research*, **9**, 1131-1148.
- Irtel, H. (1991). *Psychophysische Invarianzen in der Farb- und Helligkeitwahrnehmung*. Berlin: Springer.
- Ishihara, S. (1968). *The series of plates designed as a test for colour-blindness*. 24 Plates Edition. Tokyo: Kanehara Shuppan.
- Jameson, D. & Hurvich, L.M. (1955). Some quantitative aspects of an opponent colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 546-552.

- Jameson, D. & Hurvich, L.M. (1956). Some quantitative aspects of an opponent colors theory. III. Changes in brightness, saturation, and hue with chromatic adaptation. *Journal of the Optical Society of America*, **46**, 405-415.
- Jameson, D. & Hurvich, L.M. (1964). Theory of brightness and color contrast in human vision. *Vision Research*, **4**, 135-154.
- Jameson, K.A., Highnote, S.M. & Wasserman, L.M. (2001). Richer color experience in observers with multiple photopigment opsin genes. *Psychonomic Bulletin & Review*, **8**, 244-261.
- Jones, L.A. & Lowry, E.M. (1926). Retinal sensibility to saturation differences. *Journal of the Optical Society of America and Review of Scientific Instruments*, **13**, 25-34.
- Jordan, G. & Mollon, J.D. (1988). Two kinds of men?. *Investigative Ophthalmology and Visual Science* (Suppl.), **29**, 164.
- Jordan, G. & Mollon, J.D. (1993). A study of women heterozygous for colour deficiencies. *Vision Research*, **33**, 1495-1508.
- Kaiser, P.K. & Boynton, R.M. (1996). *Human color vision*, 2nd ed. . Washington, DC: Optical Society of America.
- König, A. & Dieterici, C. (1886). Die Grundempfindungen und ihre Intensitäts-Vertheilung im Spectrum. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Kapitel 3 und 7, 805-829.
- Kraft, T.W., Makino, C.L., Mathies, R.A., Lugtenburg, J., Schnapf, J.L. & Baylor, D.A. (1990). Cone excitations and color vision. *Cold Harbor Symposium on Quantitative Biology LV*, 635-641.
- Kraft, T.W., Neitz, J. & Neitz, M. (1998). Spectra of human L cones. *Vision Research*, **38**, 3663-3670.
- Krantz, D.H. (1975a). Color measurement and color theory: I. Representation theorem for Grassmann structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **12**, 283-303.
- Krantz, D.H. (1975b). Color measurement and color theory: II. Opponent colors theory. *Journal of Mathematical Psychology*, **12**, 304-327.
- Krantz, D.H., Luce, R.D., Suppes, P. & Tversky, A. (1971). *Foundations of measurement: Vol. I. Additive and polynomial representations*. New York: Academic Press.
- Lipschutz, S. (1977). *Lineare Algebra*. Hamburg: McGraw-Hill Book Company.
- L.O.T. Oriel (1992). *Lichtquellen*. [Katalog]. Darmstadt: Autor.
- Lowry, E.M. (1931). The photometric sensibility of the eye and the precision of photometric observations. *Journal of the Optical Society of America*, **21**, 132-136.

- Lucassen, M.P. & Walraven, J. (1993). Quantifying color constancy: evidence for non-linear processing of cone-specific contrast. *Vision Research*, **33**, 739-757.
- Lyon, M.F. (1961). Gene action in the X-chromosome of the mouse (*Mus musculus* L.). *Nature*, **190**, 372-373.
- MacAdam, D.L. (1942). Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*, **32**, 247-274.
- Mansfield, R. J. W. (1985). Primate photopigments and cone mechanisms. In A. Fein & J. S. Levine (Eds.), *The visual system* (pp.89-106). New York: Alan R. Liss.
- Marks, W.B., Dobbie, W.H. & MacNichol, M.F. Jr. (1964). Visual pigments of single primate cones. *Science*, **143**, 1181-1183.
- Martin, L.C., Warburton, F.L. & Morgan, W.J. (1933). Determination of the sensitivities of the eye to differences in the saturation of colors. *Medical Research Council: Special Report*, **188**. London: Her Majesty's Stationery.
- Maxwell, J.C. (1855). Experiments on colours, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness. A letter to Dr. G. Wilson. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **21**, 275-298.
- Maxwell, J.C. (1860). On the theory of compound colours and the relations of the colours of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, **150**, 57-84.
- Merbs, S.L. & Nathans, J. (1992a). Absorption spectra of human cone pigments. *Nature*, **356**, 433-435.
- Merbs, S.L. & Nathans, J. (1992b). Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for anomalous color vision. *Science*, **258**, 464-466.
- Merbs, S.L. & Nathans, J. (1992c). Photobleaching difference absorption spectra of human cone pigments: quantitative analysis and comparison to other methods. *Photochemistry and Photobiology*, **56**, 869-881.
- Mollon, J. (1992). Colour Vision. Worlds of difference. *Nature*, **356**, 378-379.
- Nathans, J., Piantanida, T.P., Eddy, R.L., Shows, T.B. & Hogness, D.S. (1986). Molecular genetics of inherited variation in human color vision. *Science*, **232**, 203-210.
- Nathans, J., Thomas, D. & Hogness, D.S. (1986). Molecular genetics of human color vision: The genes encoding blue, green, and red pigments. *Science*, **232**, 193-202.
- Neitz, J. & Jacobs, G.H. (1986). Polymorphism of the long-wavelength cone in normal human colour vision. *Nature*, **323**, 623-625.

- Neitz, J. & Jacobs, G.H. (1990). Polymorphism in normal human color vision and its mechanism. *Vision Research*, **30**, 621-636.
- Neitz, J., Neitz, M. & Jacobs, G.H. (1991). Matches from normal trichromatic males suggest that some eyes contain more than three cone types. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, **32**, 1092.
- Neitz, J., Neitz, M. & Jacobs, G.H. (1993). More than three different cone pigments among people with normal color vision. *Vision Research*, **33**, 117-122.
- Neitz, J., Neitz, M. & Kainz, P.M. (1996). Visual pigment gene structure and the severity of color vision defects. *Science*, **274**, 801-804.
- Neitz, M., Kraft, T.W. & Neitz, J. (1998). Expression of L cone pigment gene subtypes in females. *Vision Research*, **38**, 3221-3225.
- Neitz, M. & Neitz, J. (1992). Males usually have more than one L pigment gene. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **33**, 754.
- Neitz, M. & Neitz, J. (1995). Numbers and ratios of visual pigment genes for normal red-green color vision. *Science*, **267**, 1013-1016.
- Neitz, M. & Neitz, J. (1998). Molecular genetics and the biological basis of color vision. In W.G. Backhaus, R. Kliegl & J.S. Werner (Eds.), *Colour vision: perspectives from different disciplines* (pp.101-119). Berlin: Walter de Gruyter.
- Neitz, M., Neitz, J. & Grishok, A. (1995). Polymorphism in the number of genes encoding long-wavelength-sensitive cone pigments among males with normal color vision. *Vision Research*, **35**, 2395-2407.
- Neitz, M., Neitz, J. & Jacobs, G.H. (1991). Spectral tuning of pigments underlying red-green color vision. *Science*, **252**, 971-974.
- Newhall, S.M., Burnham, R.W. & Clark, J.R. (1957). Comparison of successive with simultaneous matching. *Journal of the Optical Society of America*, **47**, 43-56.
- Oriel Corporation (1994). *Light sources, monochromators & spectrographs, detectors & detection systems, fiber optics*. Stratford, CT: Author.
- Pérez-Carpinell, J., Baldoví, R., de Fez, M.D. & Castro, J. (1998). Color memory matching: Time effect and other factors. *Color Research and Application*, **23**, 234-247.
- Pérez-Carpinell, J., de Fez, M.D., Baldoví, R. & Soriano, J.C. (1998). Familiar Objects and memory Color. *Color Research and Application*, **23**, 416-427.
- Priest, I.G. & Brickwedde, F.G. (1938). The minimum perceptible colorimetric purity as a function of dominant wavelength. *Journal of the Optical Society of America*, **28**, 133-139.

Purdy, D.M. (1931). Spectral hue as a function of intensity. *American Journal of Psychology*, **43**, 541-559.

Richter, M. (1981). *Einführung in die Farbmeterik*, 2. Auflage. Berlin: De Gruyter.

Rushton, W.A.H. (1972). Visual pigments in man. In H. Autrum (Series Ed.) & H.J.A. Dartnall (Ed.), *Handbook of sensory physiology, Vol. VII/1, Photochemistry of vision* (pp. 364-394). New York: Springer.

Rushton, W.A.H., Campbell, F.W., Hagins, W.A. & Brindley, G.S. (1955). The bleaching and regeneration of rhodopsin in the living eye of the albino rabbit and of man. *Optica Acta*, **1**, 183-190.

Sanocki, E., Lindsey, D.T., Winderickx, J., Teller, D.Y., Deeb, S.S. & Motulsky, A.G. (1993). Serine/Alanine amino acid polymorphism of the L and M cone pigments: Effects on Rayleigh matches among deuteranopes, protanopes and color normal observers. *Vision Research*, **33**, 2139-2152.

Sanocki, E., Shevell, S.K. & Winderickx, J. (1994). Serine/Alanine amino acid polymorphism of the L-Cone photopigment assessed by dual Rayleigh-Type color matches. *Vision Research*, **34**, 377-382.

Schnapf, J.L., Kraft, T.W. & Baylor, D.A. (1987). Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. *Nature*, **325**, 439-441.

Schnapf, J.L., Nunn, B.J., Meister, M. & Baylor, D.A. (1990). Visual transduction in cones of the monkey *Macaca fascicularis*. *Journal of Physiology*, **427**, 681-713.

Sharpe, L.T., Stockman, A., Jägle, H., Knau, H., Klausen, G., Reitner, A. & Nathans, J. (1998). Red, green, and red-green hybrid pigments in the human retina: correlations between deduced protein sequences and psychophysically-measured spectral sensitivities. *Journal of Neuroscience*, **18**, 10053-10069.

Sharpe, L.T., Stockman, A., Jägle, H. & Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness. In K.R. Gegenfurtner & L.T. Sharpe (Eds.). *Color Vision. From genes to perception* (pp.3-51). Cambridge: Cambridge University Press.

Shevell, S.K. (1978). The dual role of chromatic backgrounds in color perception. *Vision Research*, **18**, 1649-1661.

Shevell, S.K. (1982). Color perception under chromatic adaptation: equilibrium yellow and long-wave adaptation. *Vision Research*, **22**, 279-292.

Shevell, S.K., He, J.C., Kainz, P., Neitz, J. & Neitz, M. (1998). Relating color discrimination to photopigment genes in deutan observers. *Vision Research*, **38**, 3371-3376.

- Silberstein, L. & MacAdam, D.L. (1945). The distribution of color matchings around a color center. *Journal of the Optical Society of America*, **35**, 32-39.
- Siple, P. & Springer, R.M. (1983). Memory and preference for the colors of objects. *Perceptual Psychophysiology*, **34**, 363-370.
- Sjoberg, S.A., Neitz, M., Balding, S.D. & Neitz, J. (1998). L-cone pigment genes expressed in normal colour vision. *Vision Research*, **38**(21), 3213-3219.
- Smeulders, N., Campbell, F.W. & Andrews, P.R. (1994). The role of delineation and spatial frequency in the perception of the colours of the spectrum. *Vision Research*, **34**, 927-936.
- Smith, V.C. & Pokorny, J. (1972). Spectral sensitivity of color-blind observers and the cone photopigments. *Vision Research*, **12**, 2059-2071.
- Smith, V.C. & Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 und 500 nm. *Vision Research*, **15**, 161-171.
- Stiles, W.S. (1955). 18th Thomas Young Oration: The basic data of colour-matching. In *Physical Society Year Book* (pp. 44-65). London: Physical Society.
- Stiles, W.S. (1959). Color vision: the approach through increment threshold sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **45**, 100-114.
- Stiles, W. S. & Burch J.M. (1955). Interim report to the Commission Internationale de l'Eclairage Zurich 1955 on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching. *Optica Acta*, **2**, 168-181.
- Stiles, W.S. & Burch, J.M. (1959). NPL colour-matching investigation: final report. *Optica Acta*, **6**, 1-26.
- Stiles, W.S. & Wyszecki, G. (1974). Colour-matching data and the spectral absorption curves of visual pigments. *Vision Research*, **14**, 195-207.
- Tatsuoka, M.M. (1971). *Multivariate analysis: techniques for educational and psychological research*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Tovée, M.J., Bowmaker, J.K. & Mollon, J.D. (1992). The relationship between cone pigments and behavioural sensitivity in a New World monkey (*Callithrix jacchus jacchus*). *Vision Research*, **32**, 867-878.
- Trezona, P.W. (1973). The tetrachromatic colour match as a colorimetric technique. *Vision Research*, **13**, 9-25.
- Trezona, P.W. (1974). Additivity in the tetrachromatic colour matching system. *Vision Research*, **14**, 1291-1303.

- Weale, R.A. (1953). Photochemical reactions in the living cat's retina. *Journal of Physiology*, **122**, 322-331.
- Winderickx, J., Battisti, L., Motulsky, A.G. & Deeb, S.S. (1992). Selective expression of human X chromosome-linked green opsin genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **89**, 9710-9714.
- Winderickx, J., Lindsey, D.T., Sanocki, E., Teller, D.Y., Motulsky, A.G. & Deeb, S.S. (1992). Polymorphism in red photopigment underlies variation in colour matching. *Nature*, **356**, 431-433.
- Woods, W.A. (1952). *The Color Aptitude Test*. Color Division, Industrial Psychology Laboratory, Sparta, N.J. (Box 318).
- Wright, W.D. (1946). *Researches on normal and defective colour vision*. London: Henry Kimpton.
- Wright, W.D. & Pitt, F.G.H. (1935). The colour vision characteristics of two trichromats. *Proceedings of the Physical Society*, **47**, 205-217.
- Wright, W.D. & Pitt, F.G.H. (1937). The saturation-discrimination of the trichromats. *Proceedings of the Physical Society*, **49**, 329-331.
- Wyszecki, G. & Stiles, W.S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, 2nd ed. . New York: Wiley.
- Young, T. (1802a). The Bakerian lecture: On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **92**, 12-48.
- Young, T. (1802b). An account of some cases of the production of colours not hitherto described. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **92**, 387-397.
- Young, T. (1807). *A course of lectures on natural philosophy and and the mechanical arts*. London: J. Johnson.
- Zimmer, A.C. (1980). Eine Formalisierung mnestisch stabilisierter Bezugssysteme auf der Grundlage von Toleranzsystemen. In A. Thomas & R. Brackhane (Hrsg.), *Wahrnehmen, Urteilen, Handeln: Forschungen im Spannungsfeld von allgemeiner und angewandter Psychologie* (S. 159-178). Bern: Huber.
- Zwisler, R. (1998). *Experimentelle Untersuchung zu Kontexteffekten bei hochgesättigten Farben*. Aachen: Shaker Verlag.

Anhang A

Instruktionen

A.1 Instruktion im Vorversuch

Instruktion für den Vorversuch

Liebe Versuchsperson!

Hier handelt es sich um ein Experiment zum Farbsehen.

Dabei sollst Du in einem „Regenbogen“, der an die Wand projiziert wird, die Grenzen zwischen den von Dir wahrgenommenen Farben einzeichnen. Dazu sollst Du in den Regenbogen mit Hilfe des Bleistiftes Trennungslinien einzeichnen. Markiere bitte auch den Beginn und das Ende des Regenbogens durch Bleistiftlinien.

Nimm Dir dazu so viel Zeit, wie Du möchtest.

Das Experiment besteht aus drei Teilen:

1. Zuerst sollst Du zweimal die Grenzen zwischen den Farben im Regenbogen einzeichnen.
2. Dann wechseln wir den Raum, und es folgt eine Testung Deines Farbunterscheidungsvermögens und Deines Farbsehens.
3. Zurück im Farblabor sollst Du wiederum zweimal die Grenzen zwischen den Farben im Regenbogen markieren.

Wenn das Experiment ausgewertet worden ist, werden wir Kontakt mit Dir aufnehmen und Dich über die Ergebnisse informieren.

Vielen Dank für die Teilnahme am Experiment!

A.2 Instruktion im Hauptversuch

INSTRUKTION

Liebe Versuchsteilnehmerin, lieber Versuchsteilnehmer!

Deine Aufgabe ist es im folgenden Experiment, am Computer Farben zu mischen. Du kannst Dich in Deiner eigenen Geschwindigkeit durch das Experiment bewegen, indem Du jeweils zweimal auf den Hebel unten am Joystick drückst, wenn es weitergehen soll (siehe Skizze). Dann ertönt jeweils ein Signalton als Rückmeldung, dass die Hebeldrucke verarbeitet werden.

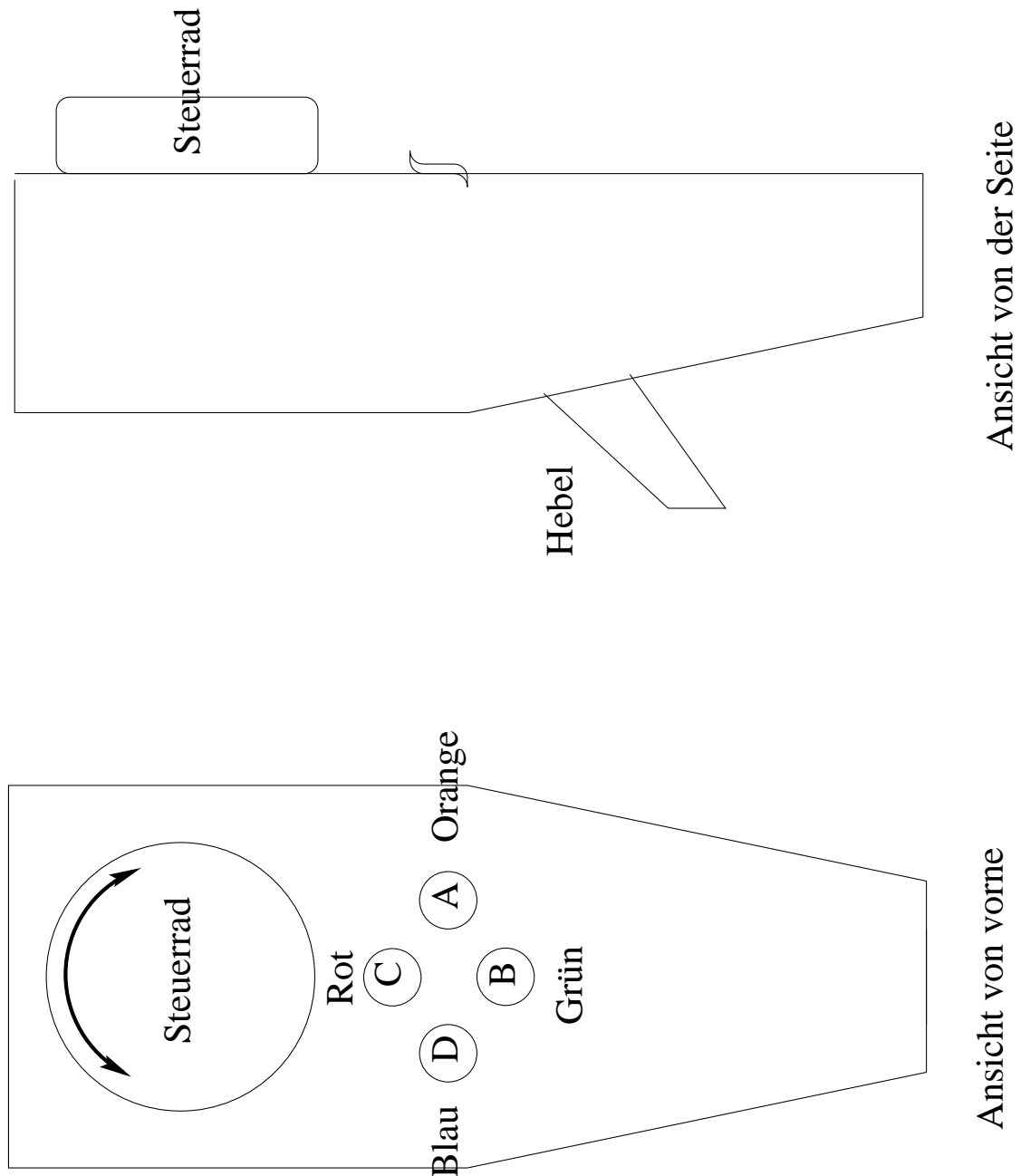
Nach fünf Minuten, in denen sich Deine Augen an das wenige Licht gewöhnen sollen, wird Dir zunächst eine Farbe, der *Zielreiz*, gezeigt. Diese Farbe sollst Du genau betrachten und Dir möglichst gut einprägen. Nimm Dir dazu so viel Zeit, wie Du möchtest!

Nach zweimaligem Hebeldruck verschwindet diese Farbe, und eine neue erscheint. Diese neue Farbe sollst Du so verändern, dass sie möglichst exakt mit der vorher gezeigten Zielfarbe übereinstimmt. Dazu kannst Du mit Hilfe des Joysticks die Intensität von orangem, grünem, rotem und blauem Licht in der Mischung verändern. Dazu drückst Du auf einen der Knöpfe A (Orange), B (Grün), C (Rot) oder D (Blau) (siehe Skizze) und drehst das Steuerrad nach links für geringere, nach rechts für stärkere Intensität der Farbe in der Mischung. Dabei ertönt bei jeder Aktion ein leiser Ton als Rückmeldung, dass nun das Mischungsverhältnis der Farben verändert wird.

Nach dem Verschwinden des Zielreizes erscheint ein Hinweis, ob Du mit allen vier oder nur mit drei der vier Farben mischen sollst. In der Bedingung „Mischung mit drei Farben“ reagiert einer der Knöpfe auf dem Joystick nicht, sondern es ertönt lediglich ein tiefer, dumpfer Signalton. Die Intensität dieser Farbe in der Mischung kann dann nicht verändert werden. Dabei kann es sich um jeden der vier Knöpfe handeln!

Wenn die von Dir erstellte Mischung Deiner Meinung nach exakt mit dem Zielreiz übereinstimmt, drückst Du bitte zweimal auf den Hebel. Dann erscheint der Zielreiz nochmal, und Du sollst angeben, wie gut Dir die Mischung gelungen ist.

Dann erscheint wieder der Zielreiz von vorher, den Du Dir wiederum genau einprägen sollst. Nach zweimaligem Hebeldruck erscheint eine etwas veränderte neue Farbe, die Du wieder so einstellen sollst, dass sie exakt mit dem Zielreiz übereinstimmt. Insgesamt erscheint der identische Zielreiz viermal hintereinander, dann erscheint ein neuer Zielreiz, wiederum viermal hintereinander usw. .



Wenn bei dem Versuch, die Intensität einer Farbe zu verändern, ein hoher, schriller Piepston ertönt, dann bist Du entweder beim Minimum der Intensität der Farbe angelangt oder beim Maximum. Dann kann keine Veränderung in diese Richtung mehr vorgenommen werden, sondern der Anteil der Farbe in der Mischung muss entweder konstant belassen oder durch Drehen des Steuerrades in die andere Richtung verändert werden.

Bitte nimm Dir für das Experiment so viel Zeit, wie Du benötigst, um wirklich die

genauest mögliche Übereinstimmung Deiner Mischung mit dem Zielreiz zu erzeugen. Es ist sehr wichtig, dass Du so sorgfältig wie möglich arbeitest! Du bekommst entsprechend der Zeit, die Du Farben gemischt hast, VP- oder Forschungsstunden gutgeschrieben.

Bei weiteren Fragen stehe ich gerne zur Verfügung, selbstverständlich wirst Du nach Abschluss der Datenauswertung über die Ergebnisse informiert.

Vielen Dank für die Teilname am Experiment!

Anhang B

Ergänzende Tabellen

B.1 Vorversuch

In diesem Anhang sind die Ergebnisse im Vorversuch der Versuchspersonen, die am Hauptversuch teilgenommen haben, aufgeführt. Die Tabelle führt alle Ergebnisse des Vorversuches, getrennt nach Versuchsgruppen, auf.

B.2 Hauptversuch

Die folgenden Tabellen sollen die Unterschiede zwischen den im Experiment verwendeten Reizen aufzeigen. Die Daten für einen 4er basieren auf jeweils 80 Einstellungen, die Daten für die 3er-Reize wurden entsprechend aus 24 Einstellungen gemittelt. Für jeden der zehn Zielreize werden folgende Merkmale, getrennt nach Versuchspersonengruppen, aufgelistet:

- Die XYZ-Koordinaten der Zielreize und der mittleren Einstellungen der Versuchspersonen
- Die durchschnittliche ΔE_{94}^* -Distanz¹ zwischen Reizvorgaben und Einstellungen der Versuchspersonen
- Die durchschnittliche Dauer eines Farbabgleichs
- Die Anzahl der Aktionen, die für einen Farbmach benötigt werden
- Die durchschnittlichen Zufriedenheitsurteile der Versuchspersonen bezüglich der Güte ihrer Einstellungen
- Die gemittelten Schrittmotoreinstellungen ausgewählter Versuchspersonen

¹Zur Berechnung des Farbabstandsmaßes, wie in Abschnitt 1.1.3 beschrieben, wird für die drei Parameter k_L , k_C und k_H der Wert Eins gesetzt, da die Standardbedingungen annähernd erfüllt sind. Als Koordinaten der Beleuchtung werden die Koordinaten des ungefilterten Lichtes der Halogenlampen verwendet.

Tabelle B.1: Übersicht über die Versuchspersonen im Hauptversuch. Angegeben sind die Versuchspersonennummer und das Alter der Probandinnen sowie die Ergebnisse, die die Versuchspersonen aus dem Hauptversuch im Vorversuch erzielt haben (Anzahl der abgegrenzten Bereiche im Spektrum in den Einzeldurchgängen und im Mittel, durchschnittlich für einen Durchgang benötigte Zeit in Minuten und Fehlerwert im Farnsworth-Munsell-100-Hue-Test).

Unterdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchspersonen								
	Alter	Durchgang				M	ca.Zeit	FM100- Error
		1	2	3	4			
Vp 01	27	9	9	8	10	9.00	0.5	4
Vp 02	19	10	8	11	11	10.00	4.5	4
Vp 03	34	8	6	10	8	8.00	1.0	20
Vp 04	27	5	5	7	7	6.00	1.5	16
Vp 05	27	12	14	13	14	13.25	1.0	0
Vp 06	20	10	9	10	10	9.75	3.0	16
Vp 07	19	11	9	12	9	10.25	1.0	16

Überdurchschnittlich spektralempfindliche Versuchspersonen								
	Alter	Durchgang				M	ca.Zeit	FM100- Error
		1	2	3	4			
Vp 08	19	19	19	28	17	20.75	2.0	28
Vp 09	23	15	14	16	15	15.00	1.0	24
Vp 10	26	25	24	26	24	24.75	4.0	8
Vp 11	29	16	18	24	20	19.50	7.0	11
Vp 12	20	17	18	23	23	20.25	3.0	48
Vp 13	22	22	25	32	28	26.75	4.5	16
Vp 14	22	13	15	22	21	17.75	2.5	36

Tabelle B.2: XYZ-Koordinaten der Zielreize und der Einstellungen der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen 01 bis 07. In der ersten Spalte ist die Nummer des Reizes aufgeführt sowie die Information, ob mit 3 oder 4 Farben ermischt werden sollte. Dann folgen die XYZ-Koordinaten des vorgegebenen Zielreizes sowie die XYZ-Koordinaten der gemittelten Einstellungen der Versuchspersonen.

Nr.	Vorgabe			Vp 01			Vp 02			Vp 03			Vp 04			Vp 05			Vp 06			Vp 07		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1(3)	7.94	10.51	1.30	7.46	10.13	1.10	8.68	11.54	1.73	8.35	11.23	1.27	8.40	10.58	1.18	8.87	12.05	1.12	7.31	10.60	0.51	7.25	9.90	1.43
1(4)	7.94	10.51	1.30	6.94	9.96	1.30	8.85	11.73	1.26	7.75	10.68	1.05	8.58	11.11	1.22	8.72	12.09	1.20	6.51	9.39	0.51	7.29	10.35	1.07
2(4)	8.29	6.54	0.93	6.06	4.73	0.50	10.06	7.87	0.78	7.04	5.59	0.44	8.68	6.52	0.75	9.54	7.46	0.64	5.89	4.83	0.39	7.60	6.04	0.70
3(4)	6.16	3.51	7.49	6.26	3.52	8.38	8.15	4.63	11.69	6.84	4.02	7.94	7.44	4.36	8.38	7.32	4.22	8.20	5.83	3.44	6.35	6.34	3.67	8.71
4(3)	6.19	3.28	7.49	4.52	2.39	5.65	7.29	3.80	10.57	6.88	3.66	7.89	6.30	3.35	7.30	7.16	3.85	7.12	4.93	2.61	6.13	5.52	2.92	7.19
4(4)	6.19	3.28	7.49	4.76	2.51	6.69	6.92	3.72	9.33	5.93	3.14	7.48	6.35	3.42	7.15	6.85	3.64	7.93	3.65	1.99	4.07	4.89	2.58	6.82
5(4)	3.06	2.11	0.78	2.53	1.73	0.51	4.63	3.07	0.74	3.15	2.11	0.48	3.69	2.39	0.71	5.08	3.10	0.70	3.17	2.19	0.39	3.44	2.26	0.70
6(4)	4.30	2.98	11.66	4.08	2.83	11.69	5.00	3.49	14.29	4.23	2.93	12.00	4.23	2.98	11.42	4.55	3.26	12.73	3.40	2.52	8.93	3.70	2.58	9.94
7(4)	7.62	9.92	11.80	6.14	7.84	10.84	8.26	10.95	13.24	7.19	9.57	11.72	7.39	9.08	12.41	7.61	10.54	11.74	5.79	8.00	8.66	6.55	8.16	11.26
8(4)	4.47	8.38	1.57	4.15	8.27	1.14	5.00	9.59	1.28	4.30	8.55	1.08	4.64	8.85	1.68	5.03	9.78	1.56	3.78	7.47	0.98	4.57	8.67	1.64
9(3)	5.22	8.93	1.25	5.34	9.50	0.90	6.14	10.39	1.52	5.16	9.46	0.53	6.23	10.71	1.39	6.08	10.62	1.24	4.60	8.26	0.57	5.91	10.00	1.35
9(4)	5.22	8.93	1.25	4.86	8.91	0.76	5.62	9.95	1.22	5.04	9.26	0.85	6.41	10.57	1.19	6.21	10.80	1.26	4.88	9.02	0.73	5.16	8.81	1.32
10(3)	3.79	2.75	11.66	3.86	2.73	12.61	5.13	3.65	16.14	3.84	2.74	12.10	3.87	2.80	11.89	3.65	2.78	10.86	3.21	2.40	9.03	3.72	2.70	11.47
10(4)	3.79	2.75	11.66	3.19	2.31	9.96	4.61	3.28	14.38	4.00	2.86	12.68	3.99	2.92	11.95	4.16	3.10	13.08	3.80	2.83	11.06	3.46	2.57	10.31

Table B.3: XYZ-Koordinaten der Zielreize und der Einstellungen der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Versuchspersonen 08 bis 14. In der ersten Spalte ist die Nummer des Reizes aufgeführt sowie die Information, ob mit 3 oder 4 Farben ermischt werden sollte. Dann folgen die XYZ-Koordinaten des vorgegebenen Zielreizes sowie die XYZ-Koordinaten der gemittelten Einstellungen der Versuchspersonen.

Nr.	Vorgabe			Vp 08			Vp 09			Vp 10			Vp 11			Vp 12			Vp 13			Vp 14		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1(3)	7.94	10.51	1.30	6.94	9.37	0.93	6.87	9.39	0.75	7.73	10.47	0.96	7.89	11.41	0.64	7.14	9.46	1.13	7.78	10.53	0.82	7.20	10.40	0.78
1(4)	7.94	10.51	1.30	6.17	8.42	0.60	6.20	8.43	0.56	7.68	10.32	0.66	7.30	10.72	0.58	6.71	8.92	0.95	6.70	8.84	0.63	7.10	10.67	0.81
2(4)	8.29	6.54	0.93	6.91	5.35	0.35	5.91	4.94	0.36	7.54	6.07	0.26	6.99	5.41	0.47	7.18	5.52	0.33	7.64	5.83	0.42	6.32	5.00	0.38
3(4)	6.16	3.51	7.49	6.18	3.50	7.66	6.31	3.71	8.00	6.53	3.85	7.34	6.29	3.60	7.63	5.68	3.14	7.32	7.80	4.32	9.74	6.36	3.66	7.58
4(3)	6.19	3.28	7.49	6.08	3.20	8.03	4.87	2.56	6.63	5.76	3.06	6.98	6.13	3.30	6.76	5.41	2.89	6.18	5.32	2.83	6.15	4.98	2.67	5.47
4(4)	6.19	3.28	7.49	5.05	2.67	6.20	4.22	2.24	4.99	5.63	3.04	6.42	6.22	3.30	7.66	5.79	3.10	6.39	5.50	2.91	6.88	4.89	2.62	5.86
5(4)	3.06	2.11	0.78	2.91	1.89	0.50	2.10	1.41	0.29	3.76	2.49	0.37	3.52	2.31	0.41	3.66	2.37	0.56	3.39	2.23	0.46	3.00	2.02	0.48
6(4)	4.30	2.98	11.66	3.40	2.24	9.77	2.91	2.08	7.67	3.52	2.61	9.54	4.49	2.99	13.09	3.50	2.49	9.05	4.04	2.76	10.94	3.48	2.63	8.94
7(4)	7.62	9.92	11.80	5.98	7.97	8.97	5.42	7.06	8.86	6.93	9.38	10.35	7.27	9.99	11.28	6.00	7.94	8.89	6.90	9.34	10.36	6.57	9.31	9.35
8(4)	4.47	8.38	1.57	4.27	8.35	1.12	3.74	7.44	1.02	4.43	8.64	1.19	4.86	9.77	0.94	4.28	8.21	1.41	4.16	8.07	1.26	4.43	8.68	1.21
9(3)	5.22	8.93	1.25	5.05	8.98	0.74	4.21	7.21	0.61	5.21	9.13	1.13	5.50	9.92	0.73	5.24	9.27	0.94	5.50	9.29	1.06	5.14	8.97	0.77
9(4)	5.22	8.93	1.25	5.02	8.93	0.78	4.04	7.08	0.61	5.14	9.13	0.91	5.35	10.13	0.66	5.26	9.34	0.93	5.50	9.43	0.96	4.92	8.83	0.76
10(3)	3.79	2.75	11.66	3.73	2.54	12.22	2.93	2.15	8.68	3.38	2.54	9.99	4.31	3.05	14.05	3.37	2.55	9.58	3.60	2.70	11.16	3.37	2.54	10.03
10(4)	3.79	2.75	11.66	3.36	2.38	10.55	2.56	1.93	7.30	3.40	2.50	10.49	4.23	2.92	14.04	2.87	2.14	7.95	4.09	2.75	12.62	3.26	2.58	9.21

Tabelle B.4: Die durchschnittliche Distanz ΔE_{94}^* zwischen den Einstellungen der Versuchspersonen und dem Zielreiz für die Gruppe der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen. In der Tabelle ist in der ersten Spalte die Nummer des Zielreizes aufgeführt sowie die Information, ob er mit drei oder vier Farben ermischt werden sollte, dann folgen jeweils die mittlere ΔE_{94}^* -Distanz und der entsprechende Standardfehler.

Reiz	Vp 01		Vp 02		Vp 03		Vp 04	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	13.01	1.46	7.37	0.67	8.37	1.16	11.19	1.18
1 (4)	10.87	1.32	10.38	1.44	11.13	1.43	11.56	1.66
2 (4)	17.37	0.99	13.36	0.95	14.61	1.04	9.20	0.74
3 (4)	11.34	0.63	14.17	0.72	11.17	0.66	11.80	0.57
4 (3)	16.28	1.38	8.37	1.40	10.54	1.06	9.65	1.32
4 (4)	14.76	1.33	10.50	1.22	10.40	1.33	7.38	0.73
5 (4)	10.86	0.63	16.10	1.51	10.76	0.67	13.17	0.87
6 (4)	9.45	0.71	8.47	0.68	7.06	0.56	8.83	0.66
7 (4)	18.14	1.16	10.48	0.63	10.88	1.06	13.72	1.02
8 (4)	11.08	0.84	10.26	0.53	9.92	0.72	11.41	0.80
9 (3)	13.16	1.69	10.39	1.30	10.67	1.03	11.85	1.27
9 (4)	10.83	1.25	8.34	0.91	8.49	0.70	13.77	1.26
10 (3)	9.39	1.04	11.64	1.01	7.35	1.00	8.07	0.92
10 (4)	11.20	1.66	9.17	1.01	6.04	0.58	8.09	0.98

Reiz	Vp 05		Vp 06		Vp 07		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	10.46	0.58	14.32	1.67	11.44	1.26	
1 (4)	11.00	0.69	16.30	2.41	8.20	1.43	
2 (4)	14.63	1.37	17.11	1.00	11.30	0.82	
3 (4)	10.36	0.65	12.31	0.66	9.76	0.60	
4 (3)	11.28	0.95	12.58	1.51	10.72	1.51	
4 (4)	8.65	0.97	20.22	1.45	13.15	1.50	
5 (4)	20.91	1.15	12.78	0.79	10.67	0.75	
6 (4)	8.56	0.74	12.64	0.92	9.42	0.76	
7 (4)	8.72	0.60	16.74	1.36	14.60	1.17	
8 (4)	10.97	0.44	14.56	1.30	9.26	0.65	
9 (3)	10.81	0.83	15.30	2.14	7.70	1.06	
9 (4)	11.48	0.70	8.94	0.75	9.78	1.48	
10 (3)	6.74	0.75	10.78	1.37	6.38	0.80	
10 (4)	7.84	1.08	9.57	1.56	8.78	1.02	

Tabelle B.5: Die durchschnittliche ΔE_{94}^* -Distanz zwischen den Einstellungen der Versuchspersonen und dem Zielreiz für die Gruppe der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probandinnen. In der Tabelle ist in der ersten Spalte die Nummer des Zielreizes aufgeführt sowie die Information, ob er mit drei oder vier Farben ermischt werden sollte, dann folgen jeweils die mittlere ΔE_{94}^* -Distanz und der entsprechende Standardfehler.

Reiz	Vp 08		Vp 09		Vp 10		Vp 11	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	13.94	1.81	12.90	1.26	8.50	0.87	8.94	0.39
1 (4)	16.67	2.35	15.76	1.93	11.15	1.45	12.63	1.38
2 (4)	13.21	0.69	17.01	1.09	13.39	0.60	13.72	0.78
3 (4)	8.95	0.49	10.57	0.64	7.87	0.46	11.16	0.67
4 (3)	7.87	0.95	14.59	1.79	9.75	1.44	7.09	0.98
4 (4)	9.58	1.06	17.01	2.06	8.23	0.97	8.57	1.14
5 (4)	10.72	0.50	16.71	0.70	13.79	0.74	13.36	0.84
6 (4)	12.36	0.86	15.57	0.97	9.13	0.56	8.80	0.69
7 (4)	16.74	1.33	22.60	1.93	10.11	1.06	8.55	0.77
8 (4)	11.33	0.75	13.55	1.23	10.54	0.77	10.48	0.52
9 (3)	11.41	1.06	15.78	2.46	6.60	0.65	11.46	1.39
9 (4)	13.13	1.67	16.83	2.26	7.04	0.83	9.30	0.79
10 (3)	6.15	0.93	11.40	1.53	9.70	1.29	9.47	1.36
10 (4)	9.85	1.31	15.82	1.78	8.41	1.13	6.15	0.66

Reiz	Vp 12		Vp 13		Vp 14		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	14.96	2.12	9.70	0.70	10.59	1.13	
1 (4)	16.05	2.33	17.28	2.07	10.99	1.37	
2 (4)	16.53	0.82	14.12	0.82	16.98	1.05	
3 (4)	12.30	0.80	11.77	0.65	8.88	0.65	
4 (3)	10.65	1.18	11.10	1.71	13.54	1.51	
4 (4)	9.58	1.30	11.18	1.31	14.31	2.02	
5 (4)	13.30	0.90	13.27	0.87	11.94	0.72	
6 (4)	10.79	0.82	11.50	0.83	12.03	0.85	
7 (4)	19.55	1.64	14.53	1.18	11.18	1.08	
8 (4)	12.22	0.88	9.98	0.75	9.21	0.67	
9 (3)	11.59	1.15	9.55	1.44	8.36	0.95	
9 (4)	8.64	0.50	12.07	1.58	8.35	0.71	
10 (3)	12.00	1.79	7.30	0.97	9.54	1.33	
10 (4)	14.19	1.52	10.23	1.63	11.22	0.95	

Tabelle B.6: Durchschnittlich für den Match benötigte Zeiten (in Sekunden) der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 01 bis Vp 07.

Reiz	Vp 01		Vp 02		Vp 03		Vp 04	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	34.0	2.1	37.3	0.9	44.1	2.8	42.0	2.1
1 (4)	41.4	2.7	41.4	1.3	81.0	10.2	48.8	2.3
2 (4)	33.5	1.0	44.7	0.9	44.3	1.3	59.9	2.3
3 (4)	46.9	1.7	52.4	1.5	59.1	3.7	54.4	2.0
4 (3)	25.5	1.4	40.0	1.5	42.0	2.3	43.4	4.1
4 (4)	31.8	2.8	49.0	2.8	44.1	3.2	45.0	1.7
5 (4)	36.8	1.5	49.4	1.9	49.0	1.8	53.6	1.8
6 (4)	46.2	1.7	50.7	1.2	58.9	2.9	54.4	2.4
7 (4)	42.9	1.9	66.6	6.1	54.2	3.0	57.2	2.2
8 (4)	30.6	1.4	40.6	0.8	45.3	2.2	50.8	1.9
9 (3)	34.6	2.5	38.4	1.0	39.0	2.4	46.3	1.9
9 (4)	31.5	2.2	37.3	0.9	45.1	3.7	53.2	3.2
10 (3)	36.7	1.8	47.1	2.9	45.1	3.0	44.0	2.6
10 (4)	43.6	2.5	46.0	2.0	60.6	4.8	55.8	2.4

Reiz	Vp 05		Vp 06		Vp 07		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	33.7	1.0	22.5	1.2	43.6	3.0	
1 (4)	48.0	2.7	24.6	2.0	45.6	2.8	
2 (4)	47.4	1.7	26.1	0.9	47.9	1.7	
3 (4)	56.3	2.6	33.9	1.1	46.1	1.6	
4 (3)	41.0	5.6	26.0	1.2	35.2	2.3	
4 (4)	50.3	1.8	25.8	1.3	36.9	1.8	
5 (4)	56.5	2.0	29.4	1.4	53.2	2.0	
6 (4)	58.1	2.4	31.6	1.2	51.5	2.6	
7 (4)	59.1	2.4	30.5	1.1	49.1	1.6	
8 (4)	48.7	3.0	26.7	1.3	45.0	1.1	
9 (3)	41.9	3.0	21.5	1.1	45.8	2.0	
9 (4)	41.4	1.6	25.1	1.6	47.3	1.5	
10 (3)	43.2	3.7	29.4	1.4	39.7	1.8	
10 (4)	47.2	2.2	31.8	2.0	55.4	5.5	

Tabelle B.7: Durchschnittlich für den Match benötigte Zeiten (in Sekunden) der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 08 bis Vp 14.

Reiz	Vp 08		Vp 09		Vp 10		Vp 11	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	31.9	2.1	40.4	2.6	34.8	1.2	31.6	0.8
1 (4)	33.1	1.0	41.3	2.0	46.3	2.2	32.3	1.1
2 (4)	38.1	0.6	42.2	2.3	48.8	1.0	35.8	1.0
3 (4)	43.0	0.9	57.6	1.8	55.9	1.3	41.8	1.4
4 (3)	33.9	1.8	37.2	2.5	35.7	1.7	30.4	1.3
4 (4)	33.6	1.0	35.8	2.5	43.3	1.7	32.8	1.6
5 (4)	38.5	0.8	38.2	2.4	45.8	1.2	39.2	1.3
6 (4)	36.4	0.8	44.9	1.6	49.1	1.3	52.4	1.9
7 (4)	39.2	1.1	56.2	4.3	47.9	1.4	44.1	1.2
8 (4)	37.5	1.1	45.5	2.3	43.4	1.2	34.8	0.9
9 (3)	32.4	1.5	37.3	2.1	35.7	2.1	31.6	1.5
9 (4)	37.3	1.7	37.3	2.5	42.3	2.1	31.8	1.4
10 (3)	36.7	1.4	43.9	3.4	37.0	1.8	45.6	2.5
10 (4)	39.9	1.3	49.5	4.8	44.7	1.5	56.6	3.2

Reiz	Vp 12		Vp 13		Vp 14		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	51.2	4.3	36.5	4.0	26.5	0.9	
1 (4)	49.8	6.0	29.5	3.4	35.7	1.7	
2 (4)	49.3	1.5	36.4	1.6	31.0	1.1	
3 (4)	63.0	2.3	57.6	2.5	46.1	1.0	
4 (3)	45.8	4.3	27.9	1.5	26.7	1.5	
4 (4)	47.7	3.0	35.7	2.5	32.5	2.2	
5 (4)	58.0	2.8	36.6	1.8	36.1	1.2	
6 (4)	57.5	2.6	47.5	2.6	35.1	1.1	
7 (4)	59.4	3.8	43.6	2.1	35.2	1.0	
8 (4)	53.7	2.7	33.0	1.7	33.3	0.9	
9 (3)	52.8	6.2	38.6	2.6	30.3	1.2	
9 (4)	50.7	4.7	38.0	4.3	30.9	1.8	
10 (3)	49.7	4.0	37.0	1.8	32.3	2.0	
10 (4)	60.5	5.2	55.9	6.9	39.6	2.0	

Tabelle B.8: Durchschnittliche Anzahl der für einen Farbabgleich benötigten Aktionen der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 01 bis Vp 07.

Reiz	Vp 01		Vp 02		Vp 03		Vp 04	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	98.8	6.0	107.5	2.3	113.3	5.9	122.2	6.3
1 (4)	124.0	8.2	123.3	3.9	206.2	25.5	139.3	6.6
2 (4)	99.5	2.9	133.5	2.4	115.7	3.5	169.4	6.0
3 (4)	142.5	5.0	147.0	3.7	152.8	9.5	157.4	5.7
4 (3)	74.10	4.1	115.2	3.9	110.3	5.8	125.2	11.9
4 (4)	96.2	8.5	139.8	8.0	115.4	8.2	133.7	4.7
5 (4)	110.0	4.5	147.6	5.0	127.1	4.5	161.2	5.5
6 (4)	137.9	4.8	147.5	3.4	150.5	7.3	158.1	7.0
7 (4)	129.3	5.6	182.6	4.4	139.5	7.3	166.4	6.0
8 (4)	91.4	4.3	121.7	2.7	114.7	5.7	152.3	5.6
9 (3)	99.0	6.7	111.9	3.1	103.0	6.2	134.5	5.4
9 (4)	93.6	6.5	112.3	2.5	117.1	9.0	154.2	8.2
10 (3)	113.2	5.8	129.0	6.4	116.5	7.2	123.6	7.7
10 (4)	132.1	7.8	133.9	5.4	144.7	10.1	162.7	6.3

Reiz	Vp 05		Vp 06		Vp 07		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	96.0	3.0	66.5	3.3	138.5	9.0	
1 (4)	139.5	8.0	73.5	6.0	144.3	8.7	
2 (4)	137.8	4.7	80.7	2.9	150.1	4.8	
3 (4)	161.1	7.5	103.9	3.3	144.2	4.7	
4 (3)	113.5	15.6	77.2	3.8	113.3	7.4	
4 (4)	143.8	5.4	80.3	4.3	118.6	5.9	
5 (4)	166.0	6.1	91.8	4.2	168.0	5.9	
6 (4)	166.8	6.8	98.2	3.7	158.8	7.3	
7 (4)	167.6	7.1	94.2	3.5	153.5	4.6	
8 (4)	141.2	9.0	79.2	3.6	143.4	3.3	
9 (3)	119.4	9.1	64.3	3.5	143.3	5.8	
9 (4)	121.4	4.6	76.3	5.2	152.2	5.3	
10 (3)	119.2	10.2	92.0	4.7	126.8	5.8	
10 (4)	127.7	5.8	97.8	6.1	172.3	15.7	

Tabelle B.9: Durchschnittliche Anzahl der für einen Farbabgleich benötigten Aktionen der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 08 bis Vp 14.

Reiz	Vp 08		Vp 09		Vp 10		Vp 11	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	98.8	6.6	105.1	7.1	100.9	3.4	85.5	2.0
1 (4)	102.4	3.639	107.7	5.3	136.7	7.2	82.7	3.6
2 (4)	120.1	1.852	109.7	5.4	139.3	2.7	92.9	2.5
3 (4)	135.5	3.039	153.4	4.6	157.7	3.4	115.0	3.8
4 (3)	103.6	4.858	95.8	6.0	100.8	5.5	81.3	4.0
4 (4)	106.1	3.324	91.0	6.8	128.9	5.6	87.5	5.0
5 (4)	123.6	2.756	97.7	5.6	135.1	3.3	105.3	3.5
6 (4)	115.0	2.623	118.6	4.2	142.6	3.5	140.8	5.3
7 (4)	122.8	2.972	144.6	9.5	138.7	4.1	117.3	3.0
8 (4)	118.6	3.335	121.7	6.3	127.8	3.5	89.8	2.6
9 (3)	101.2	4.961	97.8	5.6	97.0	4.0	81.1	4.0
9 (4)	116.7	4.833	100.2	7.0	123.3	6.7	85.8	4.1
10 (3)	114.5	4.363	119.1	9.9	102.3	5.8	123.0	7.1
10 (4)	126.9	4.357	125.0	12.1	124.3	4.7	157.4	8.9

Reiz	Vp 12		Vp 13		Vp 14		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	132.9	11.1	102.0	11.4	81.5	2.8	
1 (4)	134.0	16.8	82.5	10.5	112.0	5.6	
2 (4)	134.2	4.2	101.1	4.5	95.0	3.3	
3 (4)	171.3	6.6	162.5	7.6	144.2	3.1	
4 (3)	120.6	10.9	78.9	4.7	81.7	4.8	
4 (4)	122.9	7.7	95.4	7.3	101.2	6.9	
5 (4)	161.8	8.0	107.4	5.5	114.2	3.8	
6 (4)	151.3	6.7	136.6	7.8	111.7	3.4	
7 (4)	153.5	8.9	123.8	6.0	110.8	3.1	
8 (4)	149.2	7.6	95.7	5.2	102.9	2.8	
9 (3)	140.9	16.5	109.3	7.3	94.2	3.8	
9 (4)	142.0	14.1	103.2	8.7	97.2	5.7	
10 (3)	125.2	10.7	105.1	5.4	99.8	5.5	
10 (4)	156.2	13.8	158.0	20.5	123.3	6.1	

Tabelle B.10: Zufriedenheitsurteile der unterdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 01 bis Vp 07.

Reiz	Vp 01		Vp 02		Vp 03		Vp 04	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	4.0	0.2	3.7	0.1	4.2	0.1	3.0	0.2
1 (4)	3.6	0.1	3.00	0.1	3.1	0.2	3.3	0.2
2 (4)	3.7	0.1	3.0	0.1	3.6	0.1	3.2	0.1
3 (4)	3.4	0.1	2.7	0.1	3.4	0.1	2.7	0.1
4 (3)	3.8	0.1	3.5	0.2	4.1	0.1	2.9	0.1
4 (4)	3.7	0.1	2.8	0.1	3.8	0.1	3.2	0.2
5 (4)	3.6	0.1	2.8	0.1	3.6	0.1	2.8	0.1
6 (4)	3.4	0.1	2.9	0.1	3.6	0.1	2.7	0.1
7 (4)	3.4	0.1	3.2	0.1	3.3	0.1	2.7	0.1
8 (4)	3.9	0.1	3.0	0.1	3.7	0.1	2.8	0.1
9 (3)	3.8	0.1	3.4	0.1	4.3	0.1	3.5	0.1
9 (4)	3.9	0.1	3.0	0.1	3.5	0.1	3.1	0.2
10 (3)	3.5	0.1	3.1	0.1	4.1	0.1	3.0	0.2
10 (4)	3.5	0.2	3.1	0.1	3.8	0.2	2.9	0.2

Reiz	Vp 05		Vp 06		Vp 07		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	4.2	0.1	4.3	0.2	3.6	0.2	
1 (4)	3.5	0.1	4.3	0.2	3.4	0.2	
2 (4)	3.1	0.1	4.2	0.1	3.5	0.1	
3 (4)	2.9	0.1	3.9	0.1	3.4	0.1	
4 (3)	3.0	0.2	4.5	0.1	3.5	0.2	
4 (4)	3.4	0.1	3.8	0.1	3.1	0.2	
5 (4)	2.9	0.1	4.0	0.1	2.7	0.1	
6 (4)	2.8	0.1	3.3	0.1	2.7	0.1	
7 (4)	3.1	0.1	3.6	0.1	2.9	0.1	
8 (4)	3.6	0.1	4.3	0.1	3.5	0.1	
9 (3)	3.5	0.2	4.1	0.1	3.9	0.2	
9 (4)	3.8	0.1	4.8	0.1	3.3	0.1	
10 (3)	3.3	0.2	4.1	0.2	3.7	0.2	
10 (4)	3.3	0.2	3.4	0.3	2.6	0.2	

Tabelle B.11: Zufriedenheitsurteile der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Beobachter Vp 08 bis Vp 14.

Reiz	Vp 08		Vp 09		Vp 10		Vp 11	
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>
1 (3)	4.0	0.2	3.9	0.1	3.792	0.1	4.9	0.1
1 (4)	3.7	0.2	3.8	0.1	3.1	0.2	4.5	0.2
2 (4)	4.0	0.1	3.6	0.1	3.2	0.1	4.1	0.1
3 (4)	4.4	0.1	3.0	0.1	2.9	0.1	4.1	0.1
4 (3)	4.5	0.1	3.3	0.2	3.8	0.1	4.5	0.1
4 (4)	4.5	0.1	3.7	0.1	3.3	0.1	4.5	0.1
5 (4)	3.9	0.1	3.5	0.1	3.0	0.1	4.0	0.1
6 (4)	3.5	0.1	3.2	0.1	2.4	0.1	3.7	0.1
7 (4)	3.6	0.1	3.3	0.1	3.3	0.1	4.3	0.1
8 (4)	4.0	0.1	4.1	0.1	3.4	0.1	4.9	0.1
9 (3)	4.1	0.1	3.5	0.1	4.1	0.1	4.6	0.1
9 (4)	3.8	0.1	3.9	0.2	3.5	0.2	4.8	0.1
10 (3)	4.2	0.2	3.5	0.2	2.9	0.2	3.5	0.3
10 (4)	3.9	0.1	3.0	0.2	2.8	0.2	3.9	0.2

Reiz	Vp 12		Vp 13		Vp 14		
	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>M</i>	<i>SE</i>	
1 (3)	3.5	0.2	3.9	0.2	4.3	0.1	
1 (4)	3.4	0.2	3.3	0.2	4.1	0.2	
2 (4)	3.6	0.1	3.6	0.1	4.2	0.1	
3 (4)	3.4	0.1	3.0	0.1	4.2	0.1	
4 (3)	3.5	0.2	3.9	0.2	4.0	0.1	
4 (4)	3.5	0.2	3.9	0.1	4.2	0.1	
5 (4)	4.0	0.1	3.5	0.1	4.0	0.1	
6 (4)	3.1	0.1	3.0	0.1	3.8	0.1	
7 (4)	3.6	0.1	3.0	0.1	4.1	0.1	
8 (4)	3.8	0.1	3.9	0.1	4.4	0.1	
9 (3)	4.0	0.1	3.8	0.2	4.5	0.1	
9 (4)	4.0	0.1	3.9	0.2	4.3	0.1	
10 (3)	3.0	0.2	3.6	0.2	3.9	0.2	
10 (4)	2.7	0.2	2.7	0.2	3.3	0.1	

Tabelle B.12: Durchschnittliche Schrittmotoreinstellung für Vp 05 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich). Angegeben ist die von der Versuchsperson eingestellte mittlere Schrittmotorposition sowie die entsprechende Standardabweichung. Die fett gedruckten Werte sind von der Versuchsanordnung vorgegeben und können nicht verändert werden.

Reiz	Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motor 4	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
1 (3)	18.7	21.7	11.2	3.3	350	0	168.5	27.0
1 (4)	26.0	21.9	10.4	6.6	251.5	94.0	164.4	33.4
2 (4)	7.1	17.9	93.8	34.2	46.0	39.2	220.9	46.2
3 (4)	277.5	91.7	195.8	45.7	4.5	10.5	45.1	23.8
4 (3)	147.5	65.9	350	0	8.5	19.8	51	18.9
4 (4)	289.7	101.5	350.6	27.7	7.0	13.1	45.1	18.8
5 (4)	83.5	78.7	239.9	60.4	68.1	47.4	195.0	37.3
6 (4)	261.7	71.8	125.1	39.4	85.4	20.5	16.7	13.3
7 (4)	260.0	80.9	15.1	10.8	103.7	42.2	22.2	16.4
8 (4)	217.3	66.2	11.8	7.9	213.3	47.2	145.3	41.7
9 (3)	95.5	43.3	9.6	3.1	350	0	172.1	58.2
9 (4)	85.3	25.6	8.7	3.0	316.4	31.3	159.1	32.2
10 (3)	350	0	130.9	52.4	104.3	22.3	26.4	17.1
10 (4)	366.6	9.8	114.9	15.0	104.0	20.0	14.9	12.9

Tabelle B.13: Durchschnittliche Schrittmotoreinstellung für Vp 10 (überdurchschnittlich spektralempfindlich). Angegeben ist die von der Versuchsperson eingestellte mittlere Schrittmotorposition sowie die entsprechende Standardabweichung. Die fett gedruckten Werte sind von der Versuchsapparatur vorgegeben und können nicht verändert werden.

Reiz	Motor 1		Motor 2		Motor 3		Motor 4	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
1 (3)	26.2	21.1	20.0	9.3	350	0	191.8	60.9
1 (4)	31.0	32.5	21.9	13.2	282.1	108.5	231.3	69.6
2 (4)	29.0	24.7	92.7	16.2	46.4	26.0	345.1	33.6
3 (4)	308.8	65.6	179.2	22.7	10.3	10.4	48.9	16.7
4 (3)	154.4	59.0	350	0	24.1	16.7	50.8	14.6
4 (4)	238.5	75.9	294.2	40.8	18.5	12.2	56.0	16.8
5 (4)	141.6	48.6	186.2	25.4	43.2	19.5	261.2	61.5
6 (4)	271.2	71.1	128.4	13.8	100.7	26.8	33.1	15.2
7 (4)	130.4	46.8	23.8	15.8	149.1	73.9	29.4	16.1
8 (4)	200.5	66.5	19.8	13.7	258.3	66.9	158.2	26.7
9 (3)	93.5	11.5	18.5	7.6	350	0	161.5	23.4
9 (4)	101.5	16.1	18.3	8.0	278.6	73.2	179.2	32.4
10 (3)	350	0	126.6	14.7	112.0	37.0	32.0	20.4
10 (4)	340.1	38.7	130.0	18.0	114.0	34.9	27.7	14.7

Anhang C

Diskriminationsellipsoide

In diesem Anhang sind für ausgewählte Versuchspersonen aus beiden Versuchsgruppen die Diskriminationsellipsoide dargestellt, die Konturen gleicher Unterscheidbarkeit. Es handelt sich dabei um 95%-Konfidenzbereiche für den Erwartungswert der Einstellungen zu den einzelnen Zielreizen. Als Grundlage dieser Berechnungen dient die Varianz-Kovarianz-Matrix der Einstellungen im XYZ -Raum, die aus den Daten geschätzt werden muss. Dazu wird die Mahalanobis-Distanz (siehe Fahrmeir & Hamerle, 1996) in Abhängigkeit von der Anzahl der Datenpunkte n und der Dimension 3 des Raumes nach

$$D^2 \leq \frac{(n-1)3}{(n-3)n} F(3, n-3; 1-\alpha)$$

Für die dargestellten Ergebnisse wird $\alpha = 0.05$ gesetzt, es wird also der 95%-Konfidenzbereich um das Mittel der Einstellungen der einzelnen Probanden für die unterschiedlichen Zielreize bestimmt. Wegen der besseren Übersichtlichkeit sind die Ellipsoide in drei Abbildungen dargestellt, einmal in der XY -Ebene, in der XZ -Ebene und in der YZ -Ebene. Dem folgen vier Weitere Abbildungen, in denen die Ellipsoide im xyL -Raum dargestellt sind.

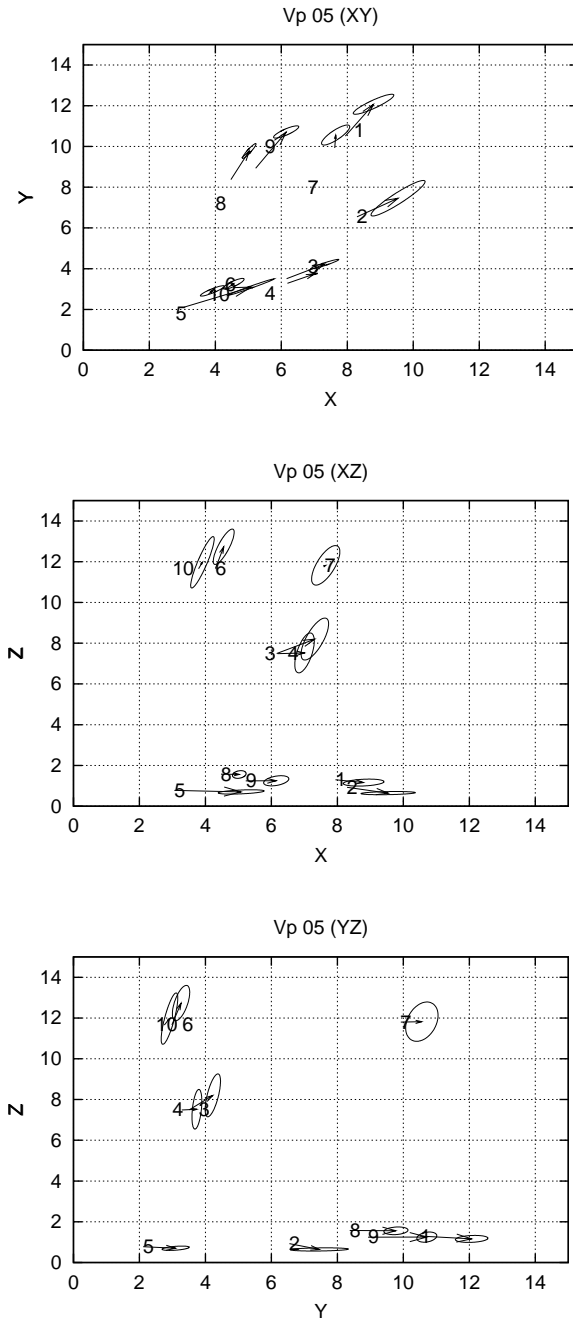


Abbildung C.1: *Diskriminationsellipsoide im CIE-XYZ-Raum für Vp 05 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Hier sind für jeden der 10 vorgegebenen Reize im Experiment die zweidimensionalen Darstellungen (oben: XY-Ebene, mitte: XZ-Ebene, unten: YZ-Ebene) der Diskriminationellipsoide für die Versuchsperson Vp 05 dargestellt. Außerdem gibt es für jeden Reiz einen Pfeil, dessen Fußpunkt bei den vorgegebenen Koordinaten des Reizes liegt. Die Spitze des Pfeils liegt auf den mittleren, von der Versuchsperson eingestellten Koordinaten.

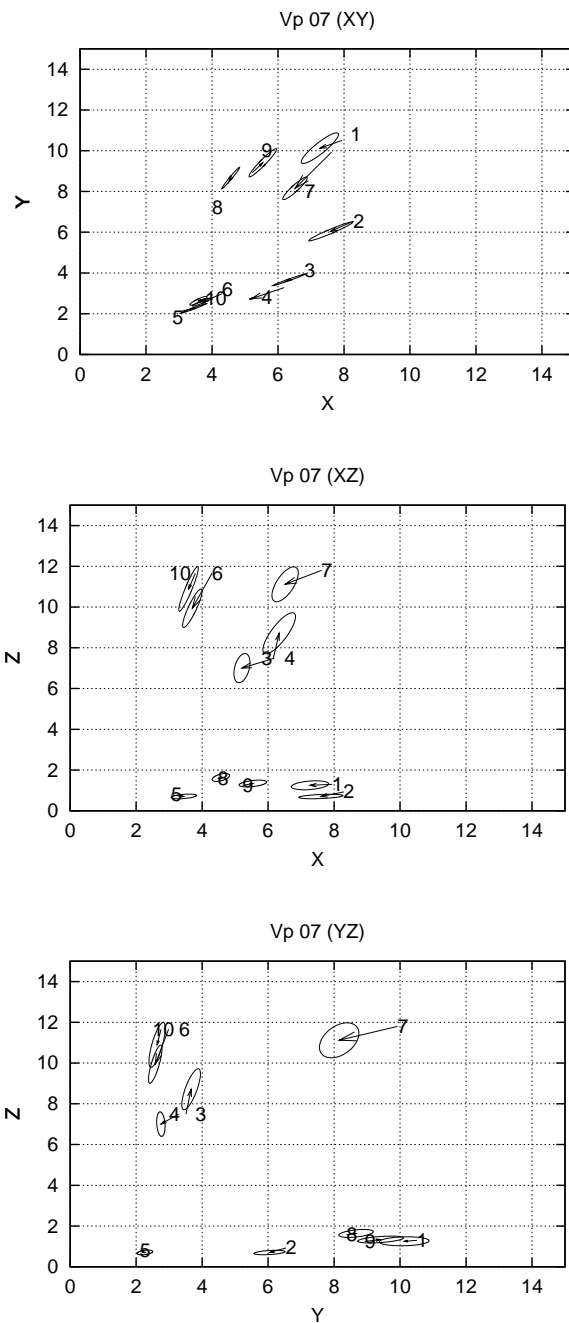


Abbildung C.2: Diskriminationsellipsoide im CIE-XYZ-Raum für Vp 07 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich): Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.1.

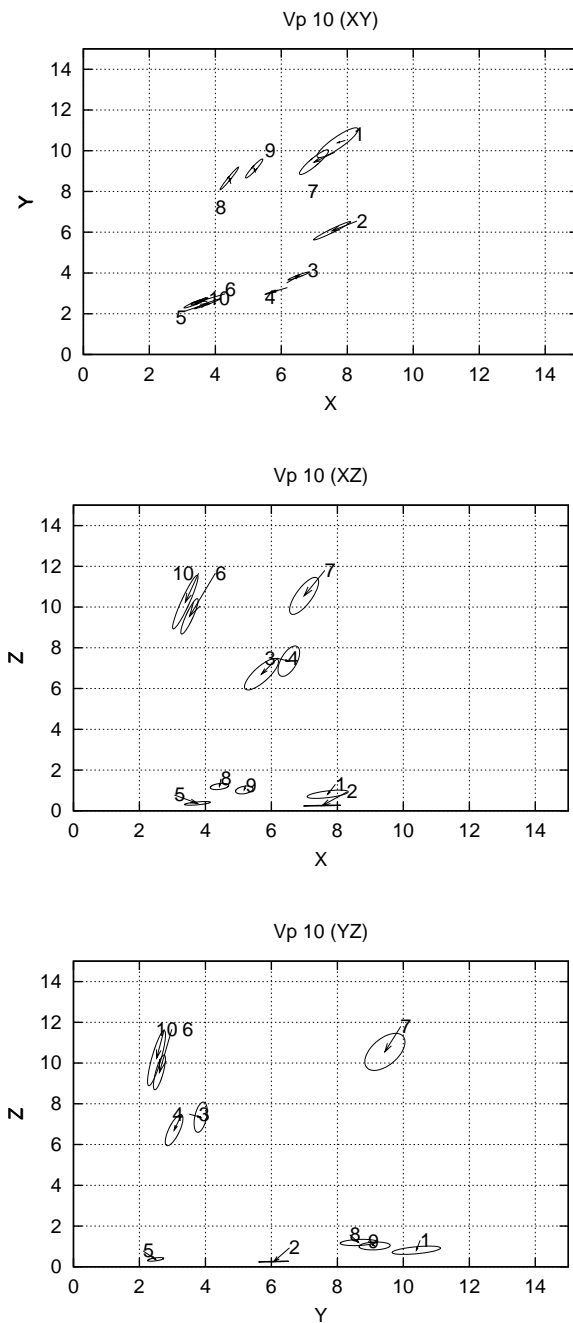


Abbildung C.3: Diskriminationsellipsoide im CIE-XYZ-Raum für Vp 10 (überdurchschnittlich spektralempfindlich): Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.1.

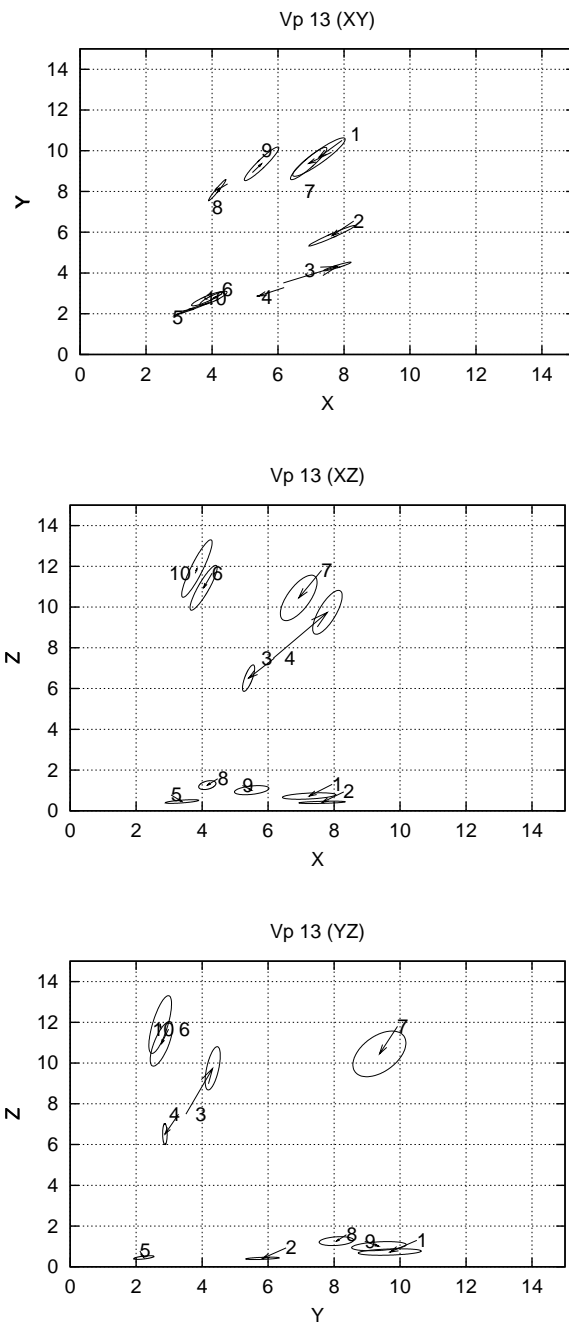


Abbildung C.4: Diskriminationsellipsoide im CIE-XYZ-Raum für Vp 13 (überdurchschnittlich spektralempfindlich): Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.1.

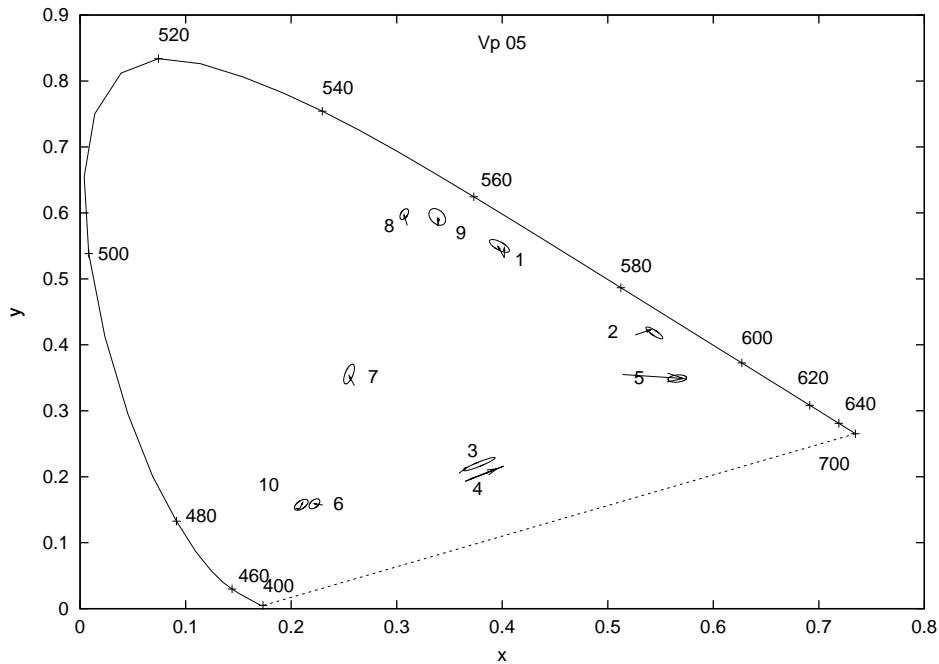


Abbildung C.5: *Diskriminationsellipsoide in der Normfarbtafel für Vp 05 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Für jeden der 10 vorgegebenen Reize im Experiment ist die entsprechende Diskriminationsellipse in der Normfarbtafel eingezeichnet. Außerdem gibt es für jeden Reiz einen Pfeil, dessen Fußpunkt bei den vorgegebenen Koordinaten des Reizes liegt. Die Spitze des Pfeils liegt auf den mittleren, von der Versuchsperson eingestellten Koordinaten.

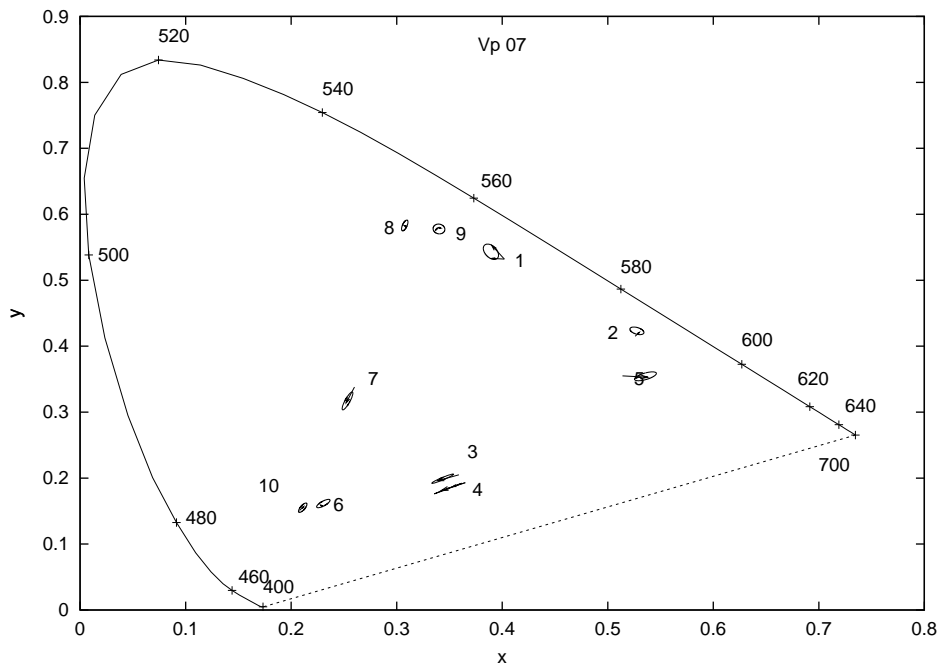


Abbildung C.6: *Diskriminationsellipsoide bei Vp 07 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.5.

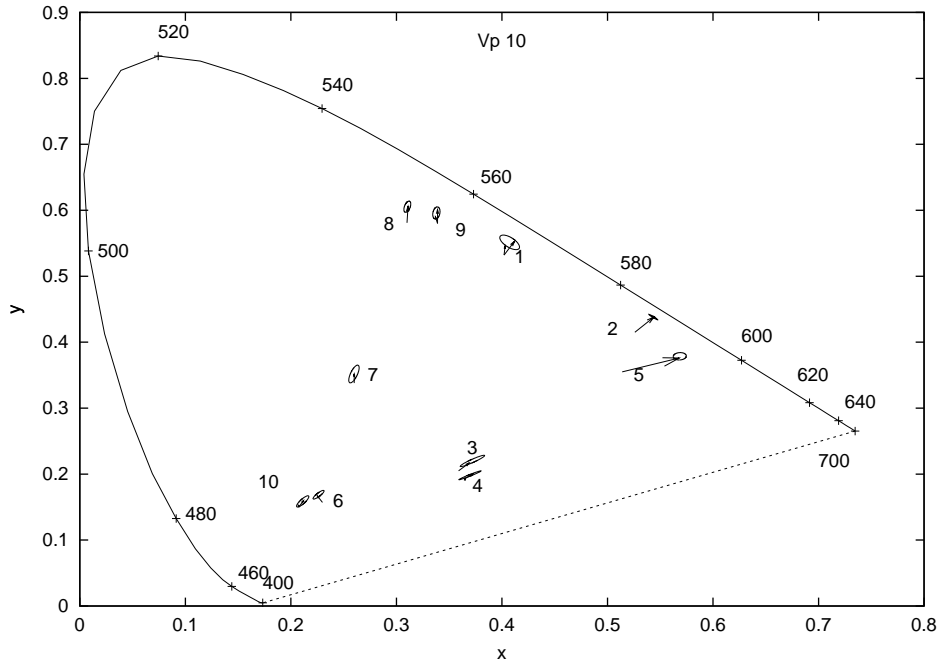


Abbildung C.7: *Diskriminationsellipsoide in der Normfarbtafel für Vp 10 (überdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.5.

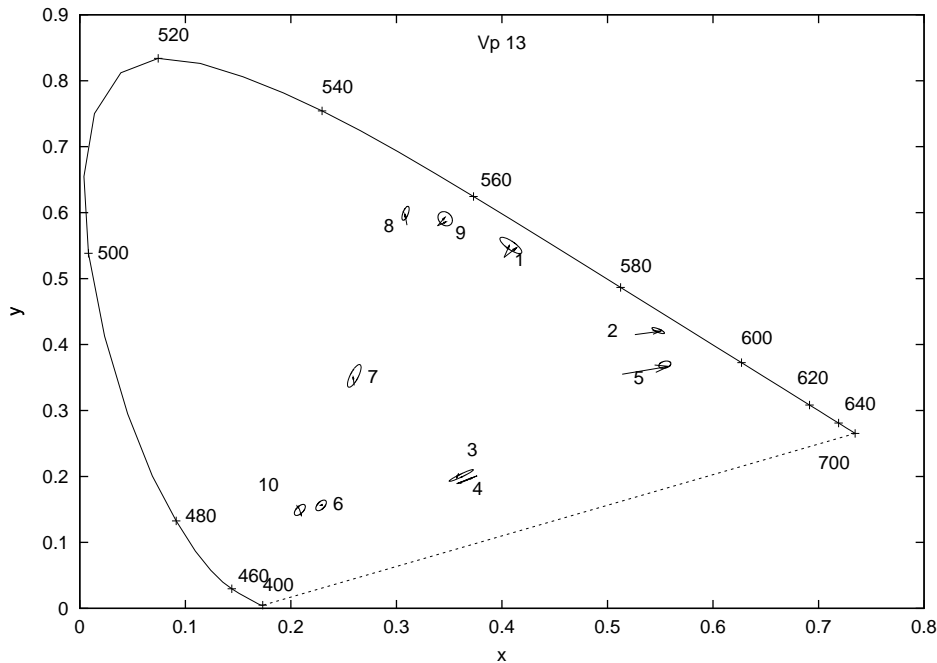


Abbildung C.8: *Diskriminationsellipsoide in der Normfarbtafel für Vp 13 (überdurchschnittlich spektralempfindlich)*: Der Aufbau der Grafik entspricht Abbildung C.5.

Anhang D

Autokorrelationsfunktionen

In diesem Anhang sind die Autokorrelationsfunktionen der Schrittmotoreinstellungen für jeden der vier Motoren getrennt zu ausgewählten Reizen abgebildet. Zur Berechnung dieser Autokorrelationsfunktionen wird die Datenreihe der Einstellungen eines Motors zu einem Reiz (24 Werte für 3er-Reize, 80 Werte für 4er-Reize) mit sich selbst korreliert, dabei jedoch gegenüber der ursprünglichen Reihe um einen, zwei, drei, vier... Werte verschoben. Dieser *Lag* ist die Zahl der Werte, um die gegenüber der Ursprungsreihe verschoben wird. Die Autokorrelation der Reihe erlaubt eine Abschätzung der Konsistenz der Einstellungen der Versuchspersonen zu den Reizen.

Im Folgenden sind die Autokorrelationsfunktionen für jeweils eine ausgewählte Versuchspersonen aus der Gruppe der unter- und der überdurchschnittlich spektralempfindlichen Probanden dargestellt. Bei den Reizen handelt es sich einmal um einen Reiz, der aus vier Primärreizen besteht und auch mit Hilfe von vieren abgeglichen werden muss (siehe Abbildung D.1), der zweite Reiz besteht aus drei Primärreizen und soll auch mit Hilfe von dreien hergestellt werden (siehe Abbildung D.2).

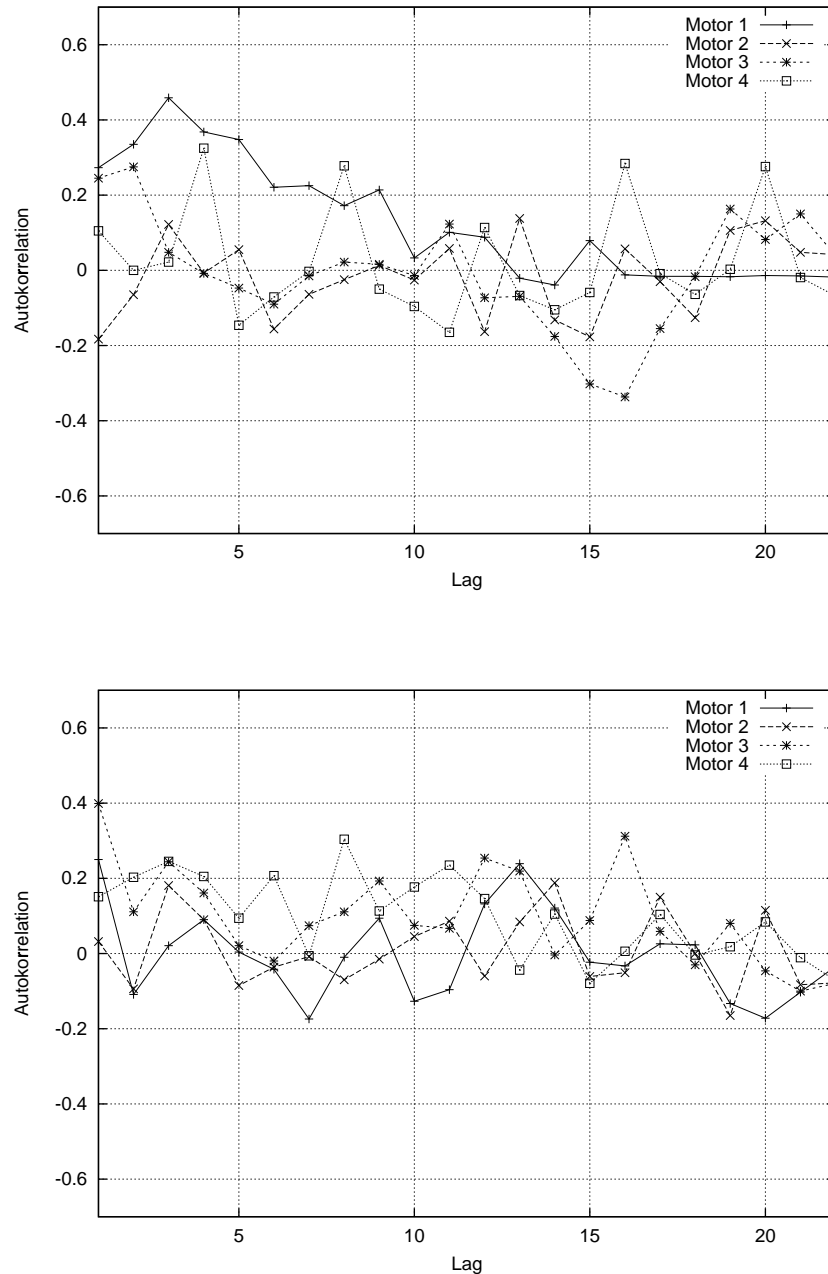


Abbildung D.1: *Autokorrelationsfunktionen für Vp 05 (unterdurchschnittlich spektralempfindlich, oben) und Vp 10 (überdurchschnittlich spektralempfindlich, unten) bei Zielreiz 2 für verschiedene Lags. Zielreiz 2 besteht aus vier Primärreizen und hat eine bunttongleiche Wellenlänge von 590 nm. Die Autokorrelationsfunktion gibt die Korrelation der Rohdaten bei Verschiebung (Lag) um 1, 2, 3 ... bis 22 Stellen gegenüber der Ausgangsposition an.*

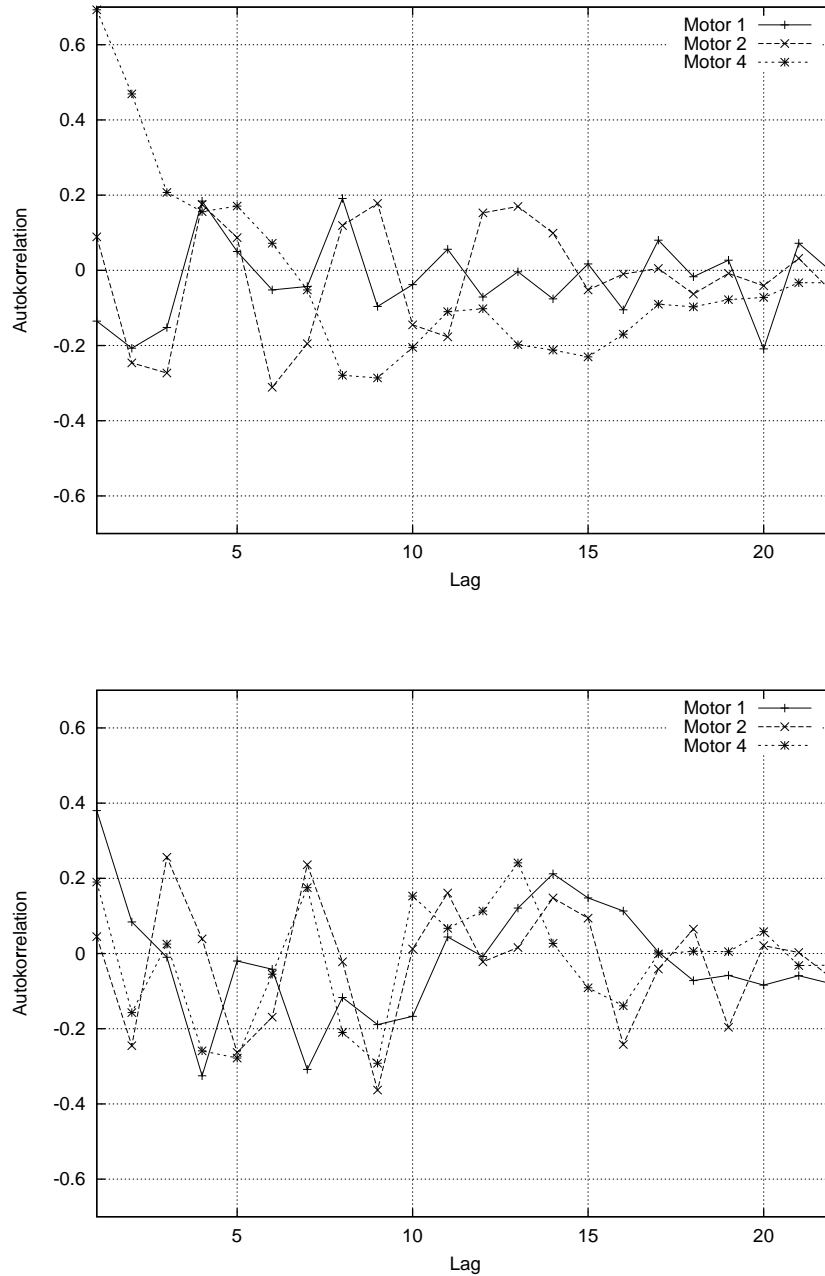


Abbildung D.2: Autokorrelationsfunktionen für *Vp 05* (unterdurchschnittlich spektralempfindlich, oben) und *Vp 10* (überdurchschnittlich spektralempfindlich, unten) bei Zielreiz 9. Zielreiz 9 besteht aus drei Primärreizen und soll auch mit Hilfe von 3 Primärreizen hergestellt werden. Er hat eine bunttongleiche Wellenlänge von 557 nm. Weitere Erläuterungen siehe Abbildung D.1.

Lebenslauf

Name: Carolin Ströhle

Geburtsdatum: 04.01.1975

Geburtsort: München

09/1985 – 07/1994 Besuch des Gymnasiums Erding (Abitur)

10/1994 – 04/1999 Studium der Psychologie (Diplom) an der Universität Regensburg

11/1996 - 03/1999 Studentische Hilfskraft am Institut für Psychologie
der Universität Regensburg bei Prof. Dr. R. Pekrun

08/1998 - 02/1999 Anfertigung meiner Diplomarbeit „Emotion und
Hemisphärenlateralität: Analyse von EEG-Indikatoren kortikaler
Aktivierung“ am Institut für Psychologie der
Universität Regensburg unter Anleitung
von Prof. Dr. R. Pekrun

ab 05/1999: Übernahme einer Stelle als wissenschaftliche Hilfskraft
am Institut für Psychologie der Universität Regensburg
bei Prof. Dr. J. Drösler und Anfertigung meiner
Dissertation „Experimentelle Untersuchung zur
Tetrachromasie beim Farbsehen“ unter seiner Anleitung

