

Wahrnehmung von Rauschen abhängig von Bildfrequenz und Kontrast unter Zuhilfenahme des CIE-Lab Farbraums

**Diplomarbeit
an der Fachhochschule Köln**

vorgelegt von

**Nicole Kidawa
Matr.-Nr. 11020289**

und

**Christina Simon
Matr.-Nr. 11020510**

**Referent
Prof. Dr. Manfred Schrey**

**Koreferent
Dipl.-Ing. Dietmar Wüller, Image Engineering**

Köln, im Juli 2003

Perception of noise depending on spatial frequency and contrast with the aid of the CIE-Lab color space

**Thesis
at the Departement
of
Imaging Science and Media Technology
University of Applied Sciences Cologne**

Author

**Nicole Kidawa
Matr.-Nr. 11020289**

and

**Christina Simon
Matr.-Nr. 11020510**

**First Reviewer
Prof. Dr. Manfred Schrey**

**Second Reviewer
Dipl.-Ing. Dietmar Wüller, Image Engineering**

Cologne, July 2003

1. EINLEITUNG	1
2. GRUNDLAGEN	2
2.1 DAS AUGE.....	2
2.1.1 <i>Aufbau des Auges</i>	2
2.1.2 <i>Signalverarbeitung im visuellen System</i>	3
2.2 DARSTELLUNG VON FARBE	5
2.2.1 <i>Farbton, Sättigung und Helligkeit</i>	5
2.2.2 <i>CIE-Farbendreieck</i>	6
2.2.3 <i>CIE-Lab System</i>	8
2.2.4 <i>Farbabstandsformeln</i>	10
2.3 KONTRAST UND FREQUENZ.....	14
2.3.1 <i>Definition von Kontrast und Ortsfrequenz</i>	14
2.3.2 <i>Modulationsübertragungsfunktion MTF (Modulation Transfer Function)</i>	15
2.3.3 <i>Vergleich von Rechteck- und Sinusgitter</i>	17
2.3.4 <i>Aliasing</i>	18
2.3.5 <i>Weber-Fechner-Gesetz</i>	18
2.3.6 <i>Kontrastwahrnehmung</i>	19
2.3.7 <i>Kontrastempfindlichkeit</i>	21
2.4 RAUSCHEN.....	23
2.4.1 <i>Rauscharten</i>	23
2.4.2 <i>Signal-Rausch-Verhältnis</i>	24
2.4.3 <i>Rauschverteilung (Gauß'sche Normalverteilung)</i>	24
2.4.4 <i>Farbrauschen</i>	26
2.5 COLORMANAGEMENT.....	27
2.5.1 <i>Grundlagen</i>	27
2.5.2 <i>Farbraumtransformation</i>	27
2.5.3 <i>ICC-Farbprofil</i>	30
3. VERSUCHSAUFBAU	34
3.1 DER ARBEITSPLATZ	34
3.2 VERWENDETE GERÄTE	38
3.3 VERWENDETE FARBEN, KONTRASTE UND FREQUENZEN	39
3.4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	44
3.5 DAS PROGRAMM	45
3.5.1 <i>Installation</i>	46

3.5.2	<i>Die Fenster von Shiraz</i>	50
3.5.2.1	Farbauswahl	50
3.5.2.2	Frequenzauswahl	51
3.5.2.3	Kontrastauswahl	53
3.5.2.4	Bildauswertung	54
3.5.3	<i>Das Verrauschen</i>	55
3.5.4	<i>Die Auswertung</i>	57
4.	ERGEBNISSE	59
4.1	GRUNDLEGENDES ZUR AUSWERTUNG	59
4.2	BETRACHTUNG EINZELNER KOMPONENTEN	61
4.2.1	ΔL , ΔC und Δh	61
4.2.2	<i>Kontrast und Frequenz</i>	64
4.2.3	<i>Sehr kleiner und sehr großer Kontrast</i>	66
4.2.4	<i>Helligkeit (Luminanz)</i>	67
4.2.5	<i>a*- und b*-Wert</i>	72
4.2.6	<i>Chrominanz</i>	73
4.2.7	<i>Farbtonwinkel</i>	78
4.2.8	<i>Ähnliche Farben</i>	79
4.3	BETRACHTUNG DER FARBABSTANDSFORMELN	80
5.	ZUSAMMENFASSUNG	87
6.	AUSBLICK	93
	ANHANG	97

Aufgabenaufteilung

Die Erweiterung des Programms „Shiraz“, sowie die Testdurchführung und Auswertung erfolgte durch beide Diplomanden.

Die schriftliche Ausarbeitung wurde wie folgt aufgeteilt:

Nicole Kidawa: Kapitel 2.1, Kapitel 2.3, Kapitel 2.4, Kapitel 3.5

Christina Simon: Kapitel 2.2, Kapitel 2.5, Kapitel 3.1 – 3.4

1. Einleitung

Die Genauigkeit der Farbreproduktion spielt schon seit einigen Jahren eine große Rolle. Um Farbwiedergabe auf Monitoren reproduzierbar zu machen und um Ein- und Ausgabe von Farben z.B. beim Druck einander anzugleichen, wurden Colormanagement Systeme entwickelt.

Farbverfälschungen können nicht nur durch fehlerhafte Farbreproduktion sondern auch durch Farbrauschen entstehen. Als Farbrauschen bezeichnet man Störungen im Bild, die sich sowohl in Helligkeit als auch in Farbe visuell bemerkbar machen. Diese Störungen sind nicht durch das fotografierte Objekt oder das abbildende System bedingt. Die Auswirkung dieses Rauschens auf die Farbwahrnehmung ist ein wichtiger Aspekt in der heutigen „digitalisierten Welt“.

Mit Farbrauschen beschäftigt sich auch die Diplomarbeit „Untersuchung der Farbabstandsformeln des CIELAB Farbraums auf ihre Eignung, Farbrauschen quantitativ und physiologisch richtig zu beschreiben“ von Jan Fischer und Michael Bantel. Sie wurde deshalb als Grundlage genutzt.

Es ist zu vermuten, dass die Wahrnehmung des Rauschens in direktem Zusammenhang mit im Bild auftretenden Kontrasten und Frequenzen steht. Nehmen diese zu, werden die Störungen wahrscheinlich später bemerkt. Die Ausarbeitung dieser Zusammenhänge ist Ziel dieser Arbeit.

Während der Bearbeitung der Themenstellung stellte sich heraus, dass die Ergebnisse der zugrunde gelegten Diplomarbeit nicht in vollem Umfang übernommen werden konnten. Deshalb wurden die Zusammenhänge zwischen Rauschwahrnehmung und Farbton, wie auch die Nutzung der Farbabstandsformeln, erneut betrachtet.

Für die Testreihen wurde das von Jan Fischer entwickelte Shiraz-Programm entsprechend der Aufgabenstellung erweitert. Daraus gewonnene Erkenntnisse sollen hinsichtlich der Themenstellung ausgewertet werden.

2. Grundlagen

2.1 Das Auge

Nahezu die Hälfte aller Informationen nimmt der Mensch über das Sinnesorgan Auge auf. Die abbildenden Elemente des Auges und die Dichte der Photorezeptoren auf der Netzhaut legen das maximale Auflösungsvermögen des Auges fest.

2.1.1 Aufbau des Auges

Das Auge ist ein komplexes Organ, bei dem Hornhaut, Iris, Pupille, Linse und Netzhaut die wichtigsten Bestandteile sind.

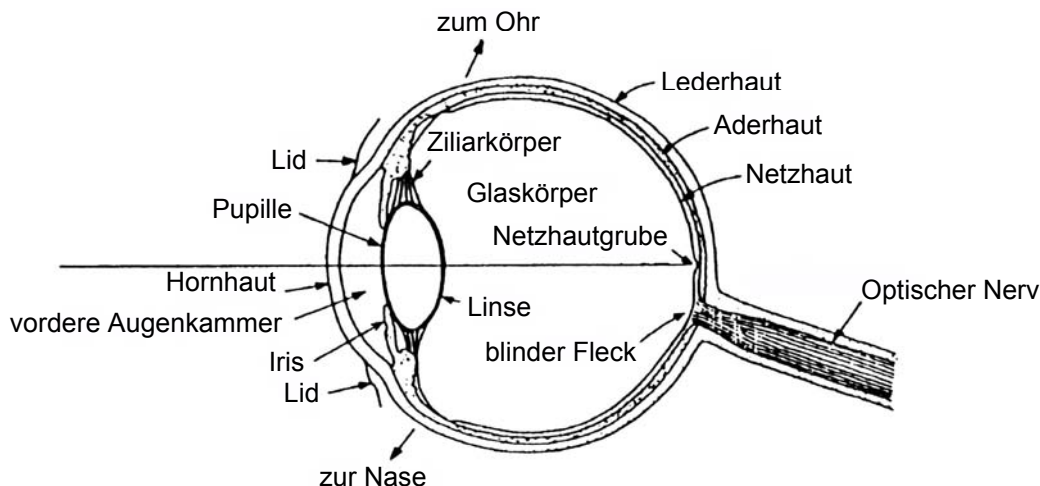


Abbildung 2-1: Horizontaler Schnitt durch einen rechten Augapfel

Als Schutzmechanismus vor äußerlichen Einwirkungen ist das Auge auf der Vorderseite mit einer durchsichtigen Schicht, der Hornhaut, überzogen. Diese ist das am stärksten fokussierende Element des Auges.

Die Iris ist eine farbige Scheibe, die strahlenförmig angeordnete Muskeln beinhaltet. Diese Muskeln ermöglichen je nach Lichteinfall eine Größenveränderung der Pupille zwischen 3 und 7 mm. Nur das auf die Pupille fallende Licht trifft auf die Augenlinse. Diese dient der Akkomodation. Durch Brennweitenveränderung der Linse entsteht ein scharfes Abbild der betrachteten Gegenstände auf der Netzhaut. Der Fokussierbereich eines normalsichtigen Auges reicht von

Unendlich bis 10 cm. Allerdings nimmt der Mindestbetrachtungsabstand mit dem Alter immer mehr zu.

Die Netzhaut ist ein Nervengewebe unter anderem bestehend aus Stäbchen und Zapfen.

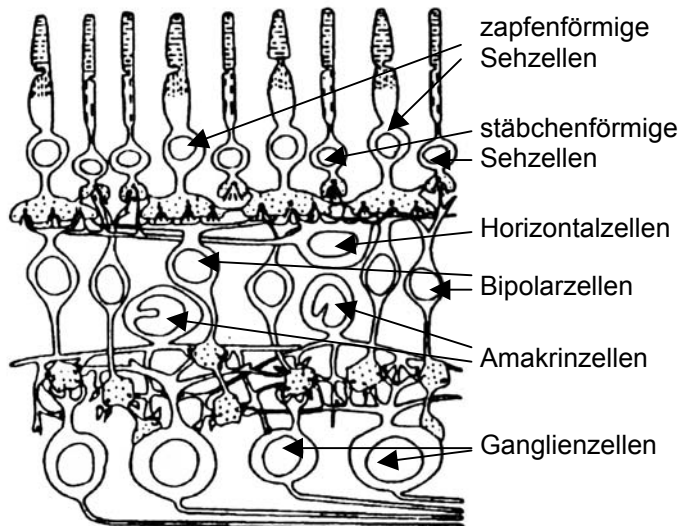


Abbildung 2-2: Schematischer Schnitt durch die Netzhaut

Die 110 – 125 Millionen Stäbchen sind für die Hell-Dunkel-Empfindung (skotopisches Sehen) verantwortlich. Die Zapfen treten in einer Anzahl von nur 4 – 7 Millionen auf. Sie sind weniger empfindlich als die Stäbchen und dienen dem Farbsehen (photopisches Sehen). Im Punkt des schärfsten Sehens

(Netzhautgrube) treten sie vermehrt auf. Es gibt drei verschiedene Arten von Zapfen, die jeweils ein anderes Absorptionsmaximum im sichtbaren Spektrum haben (Rot-, Grün- und Blauviolett-rezeptoren).

Im blinden Fleck laufen die Nervenfasern zusammen und verlassen den Augapfel. Hier gibt es weder Stäbchen noch Zapfen. [1] [2]

2.1.2 Signalverarbeitung im visuellen System

Das einfallende Licht trifft auf die Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) und wird von diesen in elektrische Impulse umgewandelt. Diese sensorische Erregung gelangt über Bipolarzellen zu den Ganglienzellen und von dort über die Axone weiter zum Gehirn. Da es weitaus mehr Photorezeptoren als Ganglienzellen gibt, sind einer Ganglienzelle mehrere Photorezeptoren zugeordnet. Nur in der Netzhautgrube ist genau ein Zapfen mit einer Ganglienzelle verbunden und folglich ist das Auflösungsvermögen hier maximal. Denn je größer die Fläche ist,

welche die Photorezeptoren, die derselben Ganglienzelle zugeordnet sind, auf der Netzhaut bilden, desto unschärfer wird das Bild. Alle mit einer Ganglienzelle verbundenen Rezeptoren bilden jeweils ein rezeptives Feld.

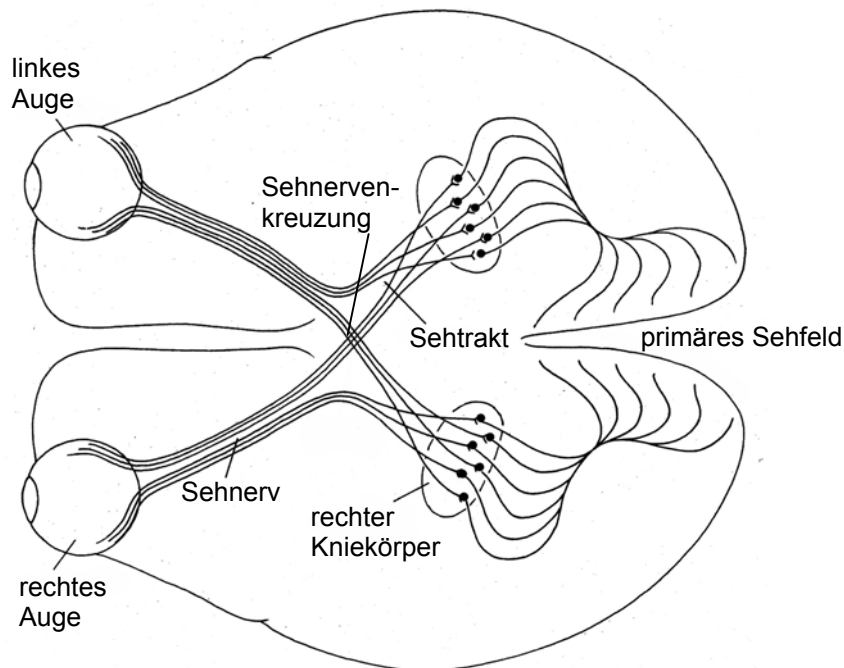


Abbildung 2-3: Schema der Sehbahn im Gehirn des Menschen

Die Nervenfasern laufen vom Auge nicht auf direktem Weg zum primären Sehfeld, sondern treffen in der Sehnervenkreuzung aufeinander. Hier kreuzen sich die linken Nervenfasern des linken Auges mit den rechten Nervenfasern des rechten Auges, so dass das linke Gesichtsfeld beider Augen zur rechten Gehirnhälfte geleitet wird und umgekehrt. [3]

2.2 Darstellung von Farbe

2.2.1 Farbton, Sättigung und Helligkeit

Um Farben genau zu beschreiben ist die Angabe von Farbton, Sättigung und Helligkeit nötig.

Definition Farbton:



Abbildung 2-4: Farbton

Durch diese Größe wird die Buntheit einer Farbe beschrieben. Farben mit gleichem Farbton befinden sich auf vom Unbuntpunkt ausgehenden Geraden mit gleicher Wellenlänge.

Definition Sättigung:



Abbildung 2-5: Sättigung

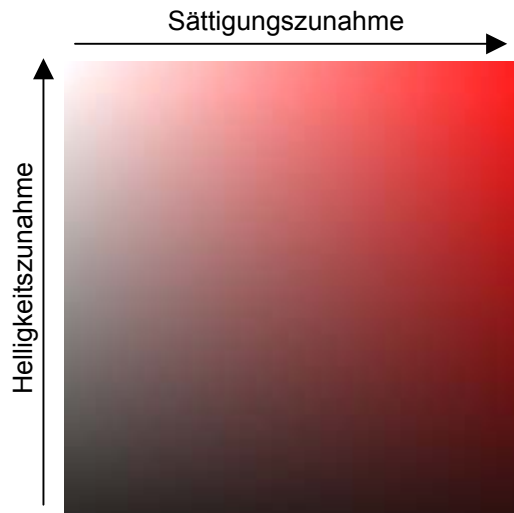
Der Weißanteil einer Farbe gibt Auskunft über deren Sättigung. Weißliche, blasse Farben sind dabei weniger gesättigt.

Definition Helligkeit:



Abbildung 2-6: Helligkeit

Die Helligkeit einer Farbe beschreibt, ob eine Farbe, im Vergleich zu einer zweiten, heller oder dunkler ist. Sie ist folglich ein Maß für das Licht, das von einem Körper reflektiert, durchgelassen oder ausgesendet wird.



Die Helligkeit ist vom Farbton unabhängig. Es lassen sich zwei verschiedene Farben wie beispielsweise Gelb und Rot bezüglich ihrer Helligkeit vergleichen. Das Aussehen jedes Farbtons wird jedoch durch Helligkeit und Sättigung beeinflusst, wie auch in Abbildung 2-7 zu sehen ist.

Abbildung 2-7: Abhängigkeit des Farbtons von Sättigung und Helligkeit

Bei einer Farbdarstellung muss in einer Dimension der Farbton, in einer zweiten die Sättigung und in der dritten die Helligkeit aufgetragen werden. Es wurden unterschiedliche Modelle zur dreidimensionalen Darstellung entwickelt. Dazu gehören u.a. das Yxy-Farbmodell und das CIE-Lab System. [4] [5] [6]

2.2.2 CIE-Farbendreieck

Zur genauen und einheitlichen Farbbeschreibung werden Primärvalenzen benutzt. Dabei handelt es sich um ein System von Bezugsfarben.

1931 legte die CIE (Comission Internationale de l'Eclairage) spektrale Funktionen der Primärvalenzen R, G und B fest. Durch Definition der imaginären Primärvalenzen X (Rot), Y (Grün) und Z (Blau) sollte die Handhabung und der Umgang mit den Werten vereinfacht werden. Es können alle Farben des sichtbaren Spektrums aus diesen Primärvalenzen erzeugt werden. [7]

„Die auf diese Normvalenzen bezogenen Spektralwerte nennt man Normspektralwerte und die daraus berechneten Farbwerte Normfarbwerte.“ [8]

Unter Normfarbwertanteilen x , y , z versteht man das Verhältnis der Normfarbwerte zueinander. Es gilt:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.1)$$

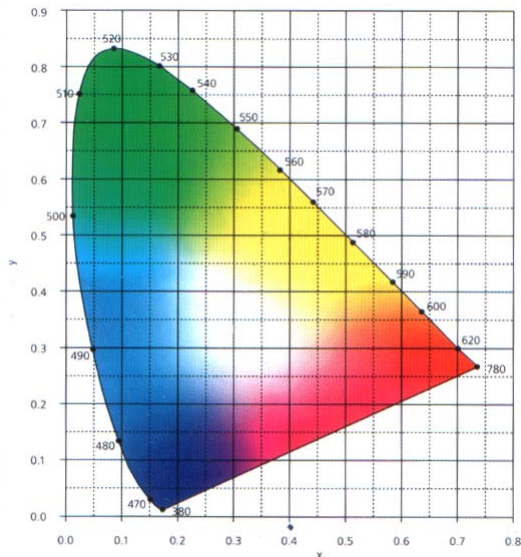


Abbildung 2-8: CIE Farbendreieck

Die Summe der drei Normfarbwertanteile ergibt immer 1. Eine eindeutige Beschreibung ist also durch die Angabe von zwei der drei Normfarbwertanteile möglich.

Bei dem CIE-Farbendreieck, auch als CIE-Schuhsohle bezeichnet, werden die Normfarbwertanteile x und y aufgetragen. Diese geben Auskunft über Sättigung und Farbton. Jeder Farbort im Farbendreieck ist ein Farbort zugeordnet. Die schuhsohlenförmige

Darstellung entsteht bei einer Markierung der realen Farbvalenzen. [9]

Beim Auftragen der maximal möglichen Helligkeit über Farbton und Sättigung fällt auf, dass sich

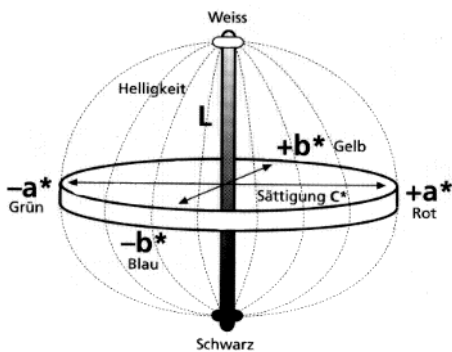
„... im Bereich der gelben und grünen Farben bei hoher Sättigung eine deutlich größere Helligkeit erzielen (lässt).“ [9]

Zusätzlich zu den Normfarbwertanteilen kann als dritte Dimension die Helligkeit Y aufgetragen werden. Diese Achse steht senkrecht zu den x - und y -Koordinaten. Diese Darstellung wird auch als Yxy -Modell bezeichnet.

Obwohl sich dieses Modell nicht dazu eignet, visuelle Farbunterschiede abzulesen, kann der Gamut (Farbumfang) von Geräten wie Monitor und Drucker abgeschätzt werden.

2.2.3 CIE-Lab System

1976 führte CIE den dreidimensionalen CIE-Lab Farbraum ein. Ein wichtiger Grund für die Einführung war, Formeln zur Messung von Farbunterschieden zu vereinheitlichen. Farbabstände sollen möglichst den wahrgenommenen Unterschieden entsprechen. Mit dem System soll also eine visuelle Gleichabständigkeit bei der Beurteilung von Farbunterschieden geschaffen werden. [10]



Farben gleicher Helligkeit liegen auf der von der grün-roten a^* - und der blau-gelben b^* -Achse gebildeten flachen, kreisförmigen Ebene. [7]

Abbildung 2-9: Modell des CIE-Lab Farbraums

Mathematisch können die Leuchtdichte L^* , a^* und b^* auf folgende Weise aus den XYZ Normvalenzen berechnet werden:

$$\begin{aligned} L^* &= 116Y^* - 16 \\ a^* &= 500(X^* - Y^*) \\ b^* &= 200(Y^* - Z^*) \end{aligned} \quad (2.2)$$

mit

$$\begin{aligned} X^* &= \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} && \text{für } X/X_n > 0,008856 \\ X^* &= 7,787 \left(\frac{X}{X_n} \right) + 0,138 && \text{für } X/X_n \leq 0,008856 \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$Y^* = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \quad \text{für } Z/Z_n > 0,008856$$

$$Y^* = 7,787 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) + 0,138 \quad \text{für } Z/Z_n \leq 0,008856$$
(2.4)

$$Z^* = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}$$

$$Z^* = 7,787 \left(\frac{Z}{Z_n}\right) + 0,138$$
(2.5)

„ X_n , Y_n , und Z_n sind die Normfarbwerte der vollkommen mattweißen Fläche für die Lichtart und den Normalbeobachter, auf die sich die Normfarbwerte X , Y und Z beziehen.“ [11]

Darüber hinaus sind auch andere Größen wie Buntheit C_{ab}^* und Bunttonwinkel h_{ab} errechenbar:

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$h_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$
(2.6)

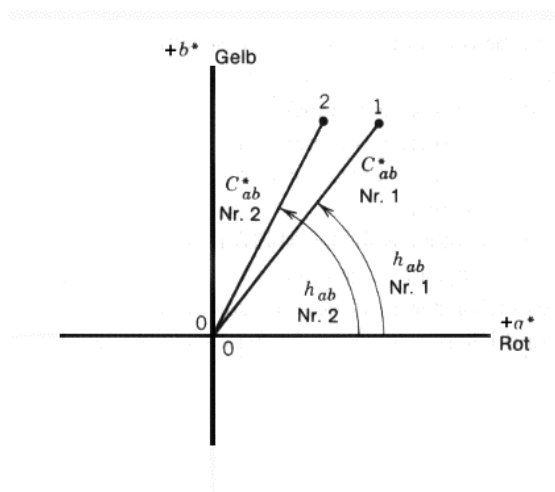


Abbildung 2-10: Buntheit und Bunttonwinkel

Der Winkel h_{ab} wird ausgehend von der positiven a^* -Achse gegen den Uhrzeigersinn aufgetragen.

2.2.4 Farbabstandsformeln

Oft müssen farbliche Unterschiede zweier Farben bestimmt werden. Dies ist im CIE-Lab System durch folgende Formeln möglich:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (2.7)$$

und:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2} \quad (2.8)$$

Beim Benutzen der Indizes P (Probe) und B (Bezug) gilt:

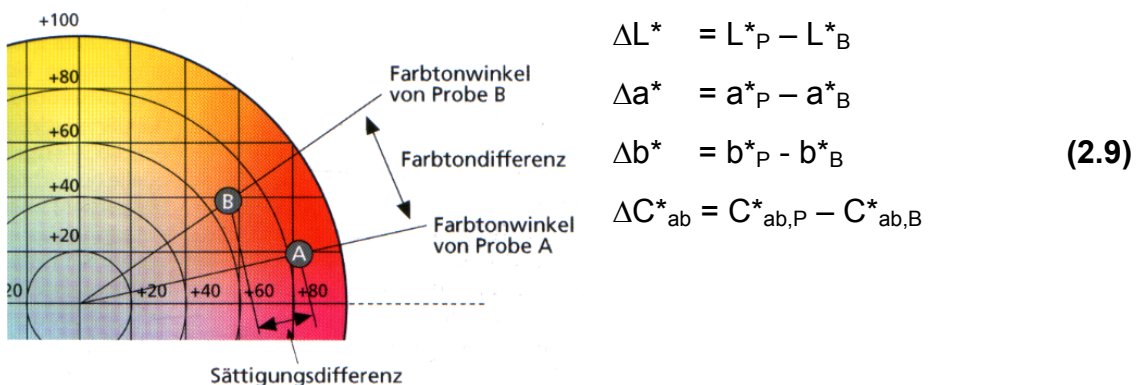


Abbildung 2-11: Darstellung von Farbwertunterschieden

Bei dem Farbabstand ΔE_{ab}^* handelt es sich um einen Abstand im Farbraum, dieser ist vorzeichenlos. Die anderen Größen müssen mit entsprechenden Vorzeichen in die Gleichung eingesetzt werden.

$$\Delta H^*_{ab} = \sqrt{(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2} = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2} \quad (2.10)$$

$$\Delta h_{ab} = h_{ab,P} - h_{ab,B}$$

ΔH^*_{ab} wird als Bunttonbeitrag bezeichnet. Diese Größe entspricht nicht dem Bunttonwinkelbeitrag Δh_{ab} . [12]

Es gilt:

ΔH^*_{ab} positiv für $a_P^* b_B^* - a_B^* b_P^* \leq 0$

ΔH^*_{ab} negativ für $a_P^* b_B^* - a_B^* b_P^* > 0$

CIE94

Da die zum Ziel gesetzte Gleichabständigkeit im CIE-Lab Farbraum nicht vollständig erreicht wurde, definierte die CIE 1995 das sogenannte CIE-1994 Modell, kurz CIE94 genannt. Dabei lassen sich Farbabstände nach folgender Formel berechnen:

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2} \quad (2.11)$$

mit:

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0,045 C^*_{ab} \quad (2.12)$$

$$S_H = 1 + 0,015 C^*_{ab}$$

Die Parameter k_L , k_C und k_H ermöglichen eine Gewichtung des Helligkeits-, Buntheits- und Buntton-Beitrags. Hiermit kann eine Anpassung der Formel an Betrachtungsbedingungen erfolgen, die von den Standardbedingungen [13] abweichen. Bei Standardbedingungen gilt $k_L = k_C = k_H = 1$. Zusätzlich ist der Skalierungsfaktor S eingeführt worden.

CIEDE2000

Mit der CIE 2000 (als CIEDE2000 bezeichnet) wurde eine weitere Farbdifferenzformel verabschiedet. Neben den Parametern zur Gewichtung, die bereits in der CIE94-Formel verwendet werden, enthält sie auch einen interaktiven Term zur Skalierung der Sättigungs- und Farbwinkelunterschiede, durch den besonders im blauen Farbbereich bessere Ergebnisse erzielt werden sollen. Die

Darstellung der Grautöne wird durch einen Skalierungsfaktor der a^* -Achse begünstigt. **[14]**

Die Berechnung der CIE 2000 Formel lässt sich in folgende Schritte gliedern:

1. Schritt: Berechnung von L^* , a^* b^* und C^*

2. Schritt: Berechnung von a' , C' und h'

$$L' = L^*$$

$$a' = (1 + G) a^*$$

$$b' = b^*$$

$$C'_{ab} = \sqrt{(a')^2 + (b')^2} \quad (2.13)$$

mit

$$G = 0,5 \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C^*_{ab}}^7}{\overline{C^*_{ab}}^7 + 25^7}} \right) \quad (2.14)$$

$\overline{C^*_{ab}}$ ist das arithmetische Mittel der Sättigung von Probe und Bezug

3. Schritt: Berechnung $\Delta L'$, $\Delta C'$ und $\Delta H'$

$$\Delta L' = L'_{P} - L'_{B}$$

$$\Delta C'_{ab} = C'_{ab,P} - C'_{ab,B}$$

$$\Delta H'_{ab} = 2 \sqrt{C'_{ab,P} C'_{ab,B}} \sin \left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2} \right) \quad (2.15)$$

mit

$$\Delta h'_{ab} = h_{ab,P} - h_{ab,B} \quad (2.16)$$

Die Indizes stehen für Probe (P) und Bezug (B).

4.Schritt: Berechnung CIEDE2000

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right)^2} + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{k_H S_H}\right) \quad (2.17)$$

mit

$$S_L = 1 + \frac{0,015 (\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0,045 \overline{C'_{ab}}$$

$$S_H = 1 + 0,015 \overline{C'_{ab} T}$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(\overline{h'_{ab}} - 30^\circ) + 0,24 \cos(2 \overline{h'_{ab}}) + 0,32 \cos(3 \overline{h'_{ab}} + 6^\circ) - 0,20 \cos(4 \overline{h'_{ab}} - 63^\circ)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{(\overline{h'_{ab}} - 275^\circ)/25}{2}\right]^2\right\}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\overline{C'_{ab}}^7}{\overline{C'_{ab}}^7 + 25^7}} \quad (2.18)$$

$\overline{L'}$, $\overline{C'_{ab}}$ und $\overline{h'_{ab}}$ sind die arithmetischen Mittel von L' , C'_{ab} und h'_{ab} , von Probe und Bezug. Bei Farben, die in unterschiedlichen Quadranten liegen, muss bei der Berechnung von $\overline{h'_{ab}}$ aufgepasst werden. Bei einer Differenz zweier Winkel, die kleiner als 180° ist, kann das arithmetische Mittel benutzt werden, sonst muss vom größeren Farbwinkel 360° subtrahiert und erst dann das arithmetische Mittel berechnet werden. [14]

2.3 Kontrast und Frequenz

Zwei wichtige Größen, um die Erkennbarkeit von Details in der Natur zu beschreiben, sind Kontrast und Ortsfrequenz. Anhand dieser beider Faktoren kann der Grenzwert der Kontrastempfindlichkeit bestimmt werden. [15]

2.3.1 Definition von Kontrast und Ortsfrequenz

Kontrast:

Der Kontrast lässt sich auf verschiedene Arten definieren.

$$\text{A) } K = L_{\max} - L_{\min} \quad (2.19)$$

mit L_{\max} = Leuchtdichtemaximum

L_{\min} = Leuchtdichteminimum

Anhand eines Beispiels kann man erkennen, dass sich diese Definition wegen des Weber-Fechner-Gesetzes (siehe Kapitel 2.3.5) nicht gut eignet.

$$\text{Beispiel: } \begin{array}{ll} 1) L_{\max} = 40 & 2) L_{\max} = 110 \\ L_{\min} = 30 & L_{\min} = 100 \end{array}$$

Rechnerisch ist der Kontrast in beiden Fällen gleich, doch empfindungsgemäß ist er nicht gleichabständig.

$$\text{B) } K = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \quad (2.20)$$

L_{\min} wird in diesem Fall überbewertet.

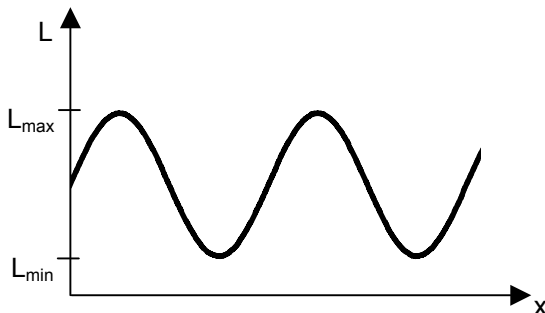
$$\text{C) } K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (2.21)$$

Diese Definition ist am besten geeignet, den Kontrast zu beschreiben, denn hier wird mit der mittleren Helligkeit gerechnet. Sie wird auch als Michelson-Kontrast bezeichnet.

[16]

Ortsfrequenz:

„Anzahl der Linien eines Rechteckgitters oder der Perioden eines Sinusgitters pro Grad des Seh winkels oder pro Millimeter.“ [17]



Eine vollständige Periode der Ortsfrequenz umfasst einen hellen und einen dunklen Streifen, d.h. Leuchtdichteminimum und -maximum.

Abbildung 2-12: Leuchtdichteverteilung

2.3.2 Modulationsübertragungsfunktion MTF (Modulation Transfer Function)

Zur Ermittlung der MTF eines optischen Systems (z.B. Kameraobjektiv) wird die Helligkeitsverteilung eines Gitters (Objektkurve) gemessen. Das Gitter wird durch das optische System abgebildet. Durch die optische Abbildung wird das Signal verändert (moduliert) und man erhält die Bildkurve. Das Signal hat sich in der Amplitude verändert. Die verringerte Amplitude der Bildkurve entspricht einem geringeren Kontrast des Signals nach der Abbildung.

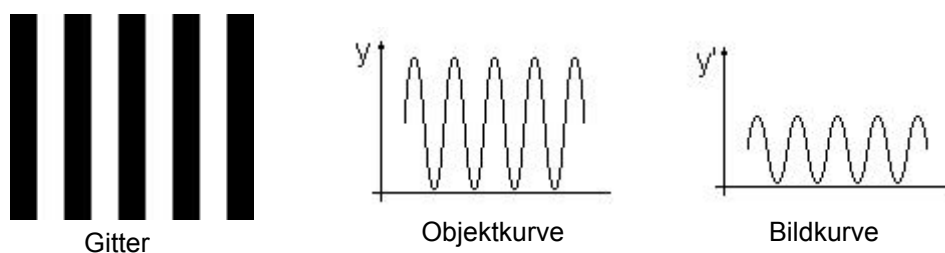


Abbildung 2-13: Helligkeitsverteilung eines Gitters vor (Objektkurve) und nach (Bildkurve) der Abbildung

$$\text{Modulationsgrad} = \frac{y'}{y} \quad (2.22)$$

Bei einer verlustfreien Wiedergabe ist der Modulationsgrad gleich 1.

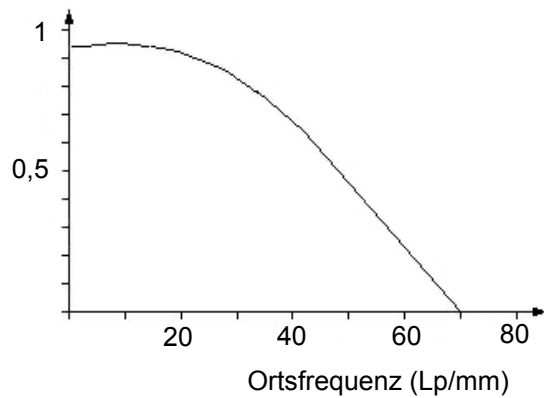


Abbildung 2-14: Beispiel einer MTF

Die MTF ist eine Kurve, die den Zusammenhang zwischen dem Modulationsgrad und der Ortsfrequenz beschreibt. Mit zunehmender Ortsfrequenz wird der Modulationsgrad immer kleiner, bis er an der Auflösungsgrenze Null wird. Abbildung 2-14 zeigt eine mögliche MTF. **[18]**

Genau wie ein Kameraobjektiv ist auch das Auge ein optisches System. Deshalb kann auch vom Auge eine Modulationsübertragungsfunktion erstellt werden.

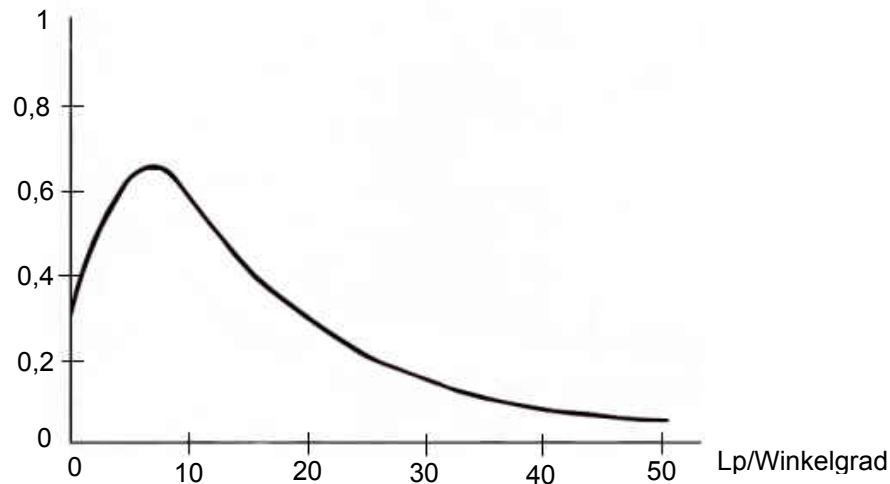


Abbildung 2-15: MTF des Auges

Aus Abbildung 2-15 lässt sich erkennen, dass die Empfindlichkeit bei 3-6 Perioden pro Sehwinkelgrad am höchsten ist.

2.3.3 Vergleich von Rechteck- und Sinusgitter

Der Kontrast bei einem Rechteckgitter ist im Gegensatz zum Sinusgitter höher, da der Wechsel zwischen Leuchtdichteminimum und -maximum abrupt erfolgt. Das Sinusgitter hat einen fließenden Übergang vom Minimum zum Maximum und ist daher kontrastärmer. [15]

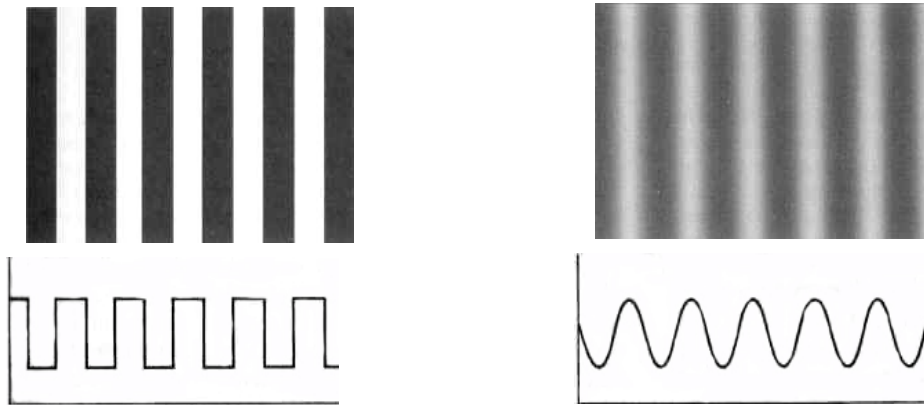


Abbildung 2-16: Vergleich von Sinus- und Rechteckschwingung

Durch Addition vieler Sinusschwingungen kann ein Rechteckgitter entstehen. Dazu werden nur die ungeradzahigen Harmonischen aufsummiert.

Fourierreihe einer Rechteckschwingung:

$$y(x) = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\sin x}{1} + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \frac{\sin 7x}{7} + \dots + \frac{\sin nx}{n} \right) \quad (2.23)$$

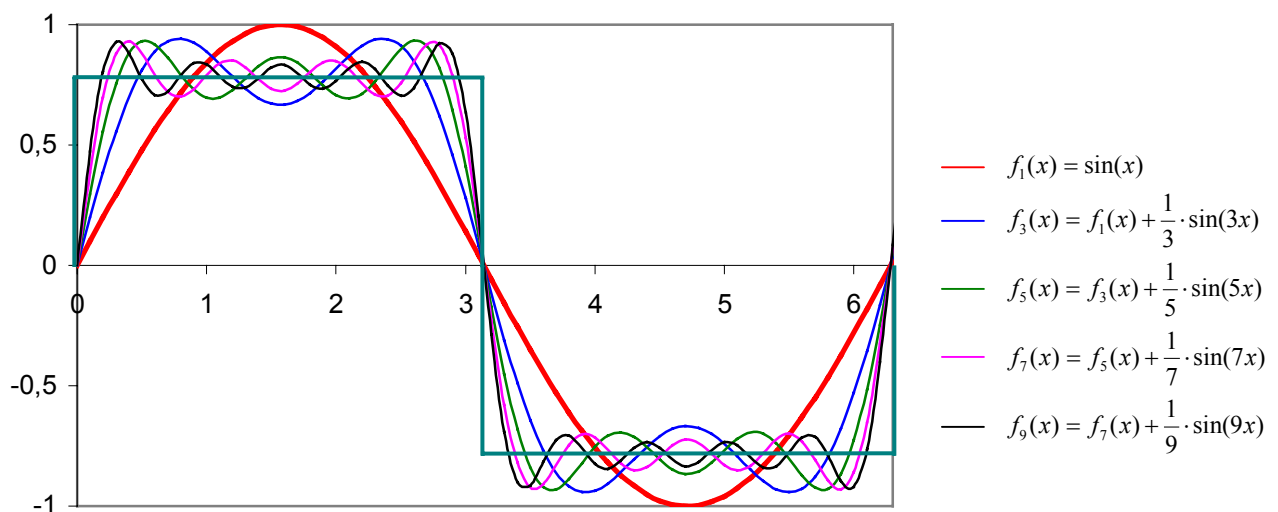


Abbildung 2-17: Fouriersynthese Rechteck

Die Kontrastempfindlichkeit beim Rechteckgitter ist um den Faktor $4/\pi$ höher als beim Sinusgitter. [17]

2.3.4 Aliasing

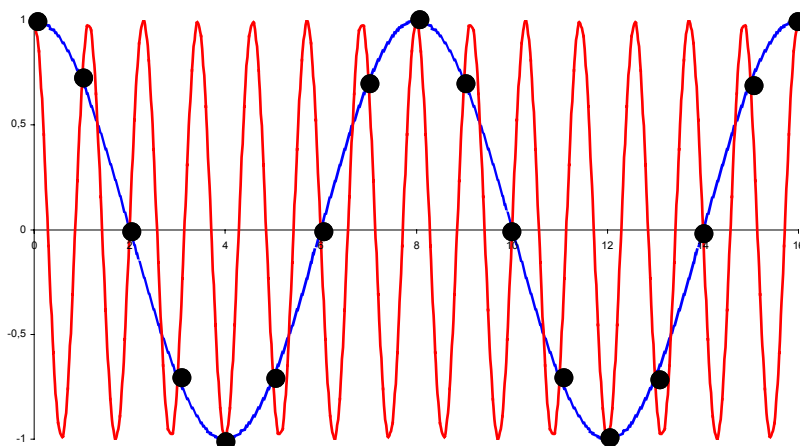
Um Signale nach einer Abtastung wieder optimal reproduzieren zu können, ist je nach Signal eine unterschiedliche Anzahl von Abtastpunkten notwendig.

Das Abtasttheorem besagt, dass mindestens zwei Messpunkte pro Periode benötigt werden. Dies gilt für die höchste im Signal vorkommende Frequenz.

$$f_A > 2 f_G \quad (2.24)$$

Die Abtastfrequenz f_A muss also mindestens doppelt so groß sein wie die Grenzfrequenz f_G . Die Grenzfrequenz wird auch als Nyquist-Frequenz bezeichnet.

Wenn das Abtasttheorem verletzt wird, tritt Aliasing auf. Dieser Effekt ist in Abbildung 2-18 dargestellt. Das hochfrequente Eingangssignal wird wegen



Verletzung des Abtasttheorems nach der Abtastung als niederfrequentes Signal dargestellt, da die Frequenzen nicht mehr richtig zugeordnet werden können. [19]

Abbildung 2-18: Alias-Effekt

2.3.5 Weber-Fechner-Gesetz

Die Helligkeitsempfindlichkeit des Auges ist logarithmisch, d.h., wenn der Reiz logarithmisch ansteigt, wächst die Empfindung linear. Diesen Zusammenhang bezeichnet man als das Weber-Fechner-Gesetz.

$$H \approx \log \frac{L}{L_0} \quad (2.25)$$

Das Weber-Fechner-Gesetz ist eine Verbindung von Weber-Gesetz und Fechner-Gesetz. Ersteres besagt, dass die Empfindlichkeit bei den meisten Sinnesorganen unabhängig von der Reizstärke ist. Nach Fechner ist die Änderung der Empfindung abhängig von der Reizänderung. [17]

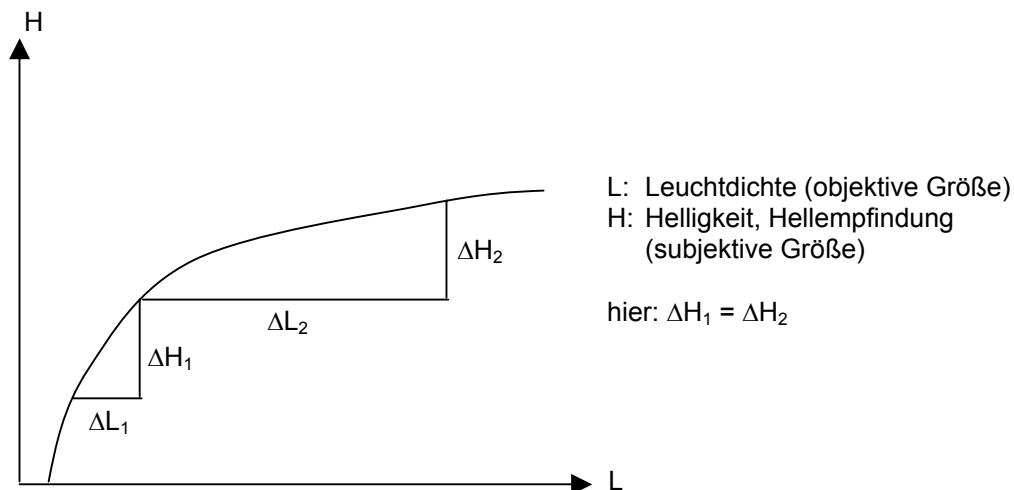


Abbildung 2-19: Weber-Fechner-Gesetz

2.3.6 Kontrastwahrnehmung

Die Wahrnehmung von Details hängt zum einen davon ab, wie gut das visuelle System Kontraste unterscheiden kann, zum anderen von der Größe des Netzhautbildes. Die Netzhautgrube ist besonders für hohe Ortsfrequenzen empfindlich, während die Peripherie der Netzhaut die niedrigen Ortsfrequenzen besser auflösen kann. [17] [20]

Bei der Kontrastwahrnehmung wird zwischen perzeptuellem Kontrast und physikalischem Kontrast unterschieden. Der perzeptuelle Kontrast sagt aus, dass die Intensitäten zweier Flächen lediglich unterschiedlich wahrgenommen werden, während der physikalische Kontrast den reellen Intensitätsunterschied der Flächen angibt. [21]

Die Mach'schen Streifen sind ein Phänomen des perzeptuellen Kontrasts. An der Kante zweier aneinander grenzenden Flächen wird die Intensität der jeweiligen Fläche verstärkt wahrgenommen, d.h., die dunkle Fläche erscheint dort noch dunkler und die helle Fläche noch heller.

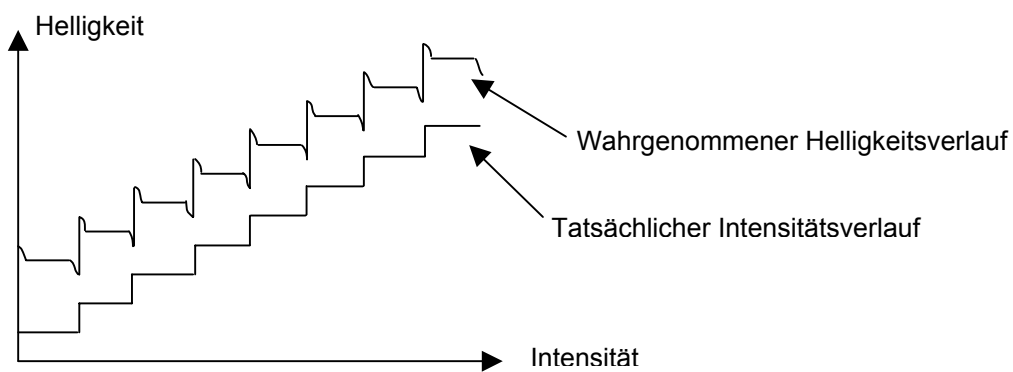
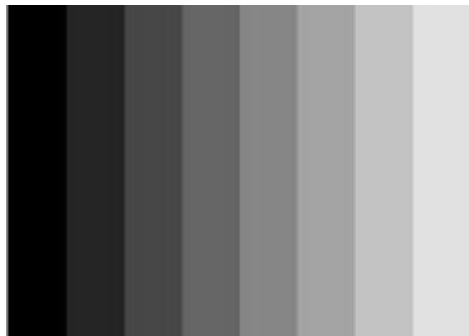


Abbildung 2-20: Das Phänomen der Mach'schen Streifen

Ein anderes Beispiel zur Kontrastwahrnehmung ist der Simultankontrast. Eine konstant graue Fläche wird auf unterschiedlich hellem Hintergrund in der Helligkeit unterschiedlich wahrgenommen. Je dunkler die Umgebung, desto heller erscheint die graue Fläche.

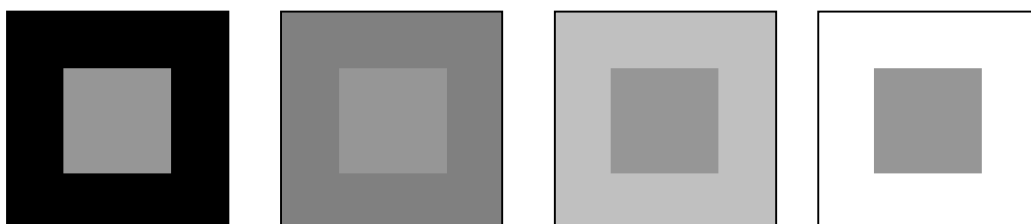


Abbildung 2-21: Simultankontrast

2.3.7 Kontrastempfindlichkeit

Der Zusammenhang zwischen Kontrast und Frequenz kann anhand der Kontrastempfindlichkeitskurve beschrieben werden. Aus ihr lässt sich ablesen, welche Kontrastschwelle erreicht werden muss, um bestimmte Ortsfrequenzen zu erkennen.

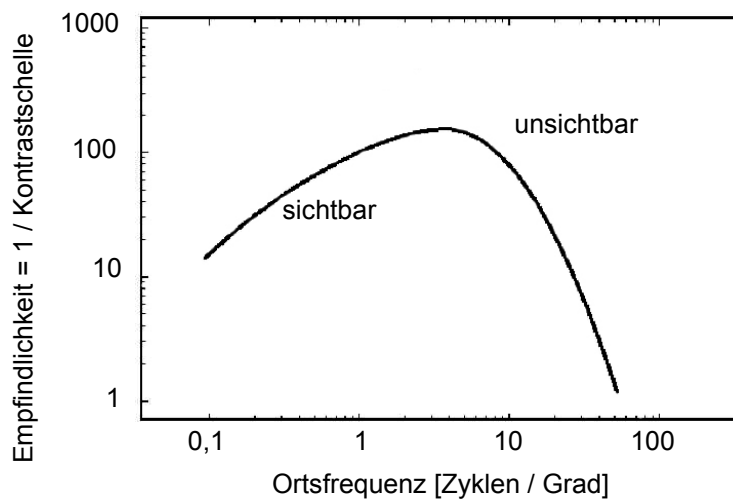


Abbildung 2-22: Kontrastempfindlichkeitskurve

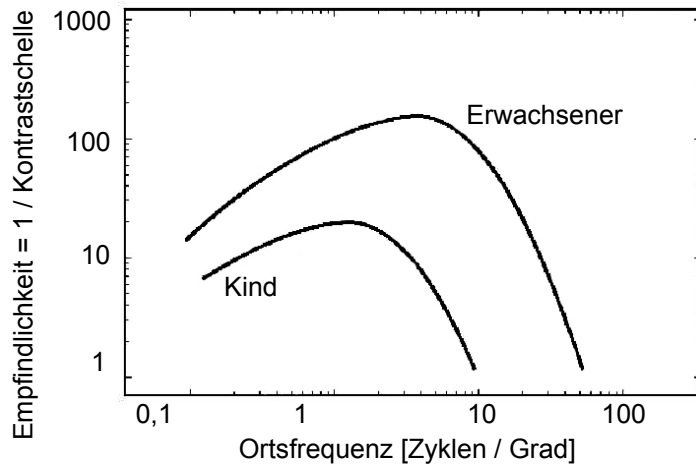
Der Verlauf der Kurve macht deutlich, dass das menschliche Auge am empfindlichsten für mittlere Ortsfrequenzen ist. Hingegen muss die Kontrastschwelle bei sehr geringen und sehr hohen Ortsfrequenzen sehr viel höher sein, um noch Bilddetails zu

erkennen. Man spricht hier von der Bandpasscharakteristik des Auges.

50 Perioden pro Sehwinkelgrad ist die höchste noch wahrnehmbare Frequenz. Doch um diese noch auflösen zu können, muss der Kontrast sehr hoch sein. Am empfindlichsten ist das menschliche Auge für Kontraste,

„...wenn diese bei einfachen Sinuswellengittern mit einer Raumfrequenz von etwa drei Perioden pro Sehwinkelgrad auftreten“. **[20]**

Wenn man davon ausgeht, dass der maximale Kontrast 1 beträgt, ist der noch erkennbare Kontrast bei oben genannter Raumfrequenz 0,003.



Die Kontrastempfindlichkeit hängt vom Alter ab. Erwachsene können hochfrequente Signale besser erkennen als Kinder. Die Empfindlichkeit nimmt jedoch ab ca. 20 Lebensjahren wieder ab.

Abbildung 2-23: Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Alter

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein sinusförmiges Streifengitter mit verschiedenen Ortsfrequenzen und Kontraststufen. Die Ortsfrequenz und der Kontrast werden logarithmisch verändert, der Kontrast ist jedoch in der Abbildung auf derselben Höhe für alle Ortsfrequenzen gleich.

Man kann erkennen, dass der Kontrast bei niedrigen und hohen Ortsfrequenzen abnimmt und dagegen mittlere Frequenzen noch bei einem geringeren Kontrast wahrnehmbar sind. [22]

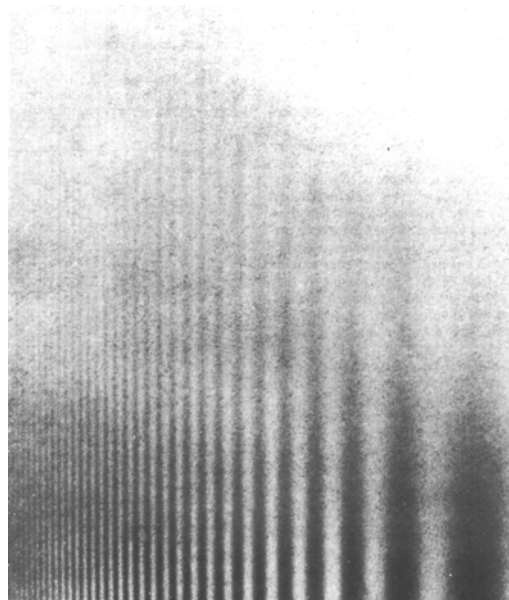


Abbildung 2-24: Sinusförmiges Streifengitter mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen und Kontraststufen

2.4 Rauschen

Rauschen ist ein stochastisches Störsignal, das sich dem Nutzsignal überlagert. Dabei wird zwischen verschiedenen Arten von Rauschen, deren Ursachen unterschiedlich sind, differenziert.

2.4.1 Rauscharten

Dunkelstromrauschen (thermisches Rauschen)

Im CCD-Chip werden Ladungsträger normalerweise durch Lichteinwirkung freigesetzt. Doch unabhängig vom Auftreffen des Lichts gibt es eine Ladung im CCD, die immer vorhandene ist: der Dunkelstrom. Diese Ladung wird zum Nutzsignal addiert und verursacht Rauschen.

„Abweichend vom Idealfall sind die Dunkelsignale aber nicht gleichmäßig über das Array der einzelnen Bildpunkte verteilt, sondern variieren infolge von Inhomogenitäten bei der Chipherstellung örtlich über der Sensorfläche, so dass ein strukturiertes Dunkelbild entsteht, welches man als „fixed pattern noise“ bezeichnet.“ [23]

Am deutlichsten ist der Fehler in dunklen Bildbereichen zu sehen, denn der Dunkelstrom, welcher Rauschen verursacht, wird hier schon bei geringer Ladung wahrgenommen. Dunkelstromrauschen hängt von der Temperatur ab und wird deshalb auch thermisches Rauschen genannt. Je wärmer der CCD-Chip ist, desto stärker ist das Rauschen. [24]

Schrotrauschen

Elektronen sind für den Elektrizitätstransport verantwortlich. Sie müssen dazu elektrische Potentialbarrieren, z.B. einen pn-Übergang, überwinden. Dieser Prozess ist ein statistischer Vorgang.

„Daher ist beispielsweise der von einer Kathode bei konstanter Temperatur und Spannung emittierte Strom kein reiner Gleichstrom, vielmehr schwankt er um einen zeitlichen Mittelwert.“ [25]

Als Schroteffekt wird das unregelmäßige Auftreffen der Elektronen auf die Anode bezeichnet.

Quantisierungsrauschen

Bei der Quantisierung wird ein kontinuierliches Signal in ein diskretes Signal umgewandelt, d.h. die Amplitude kann nur noch ganz bestimmte, in Stufen eingeteilte Werte annehmen. Die Amplitudenwerte des analogen Signals werden dabei zur nächstliegenden Quantisierungsstufe auf- oder abgerundet. Durch das Runden entsteht ein Quantisierungsfehler, der maximal halb so groß ist wie eine Quantisierungsstufe. Dieser Fehler wird als Quantisierungsrauschen bezeichnet.

[26]

2.4.2 Signal-Rausch-Verhältnis

$$SNR = 20 \log \frac{\text{NutzsIGNALspannung}}{\text{Rauschsignalspannung}} [dB] \quad (2.26)$$

SNR (Signal-to-Noise-Ratio) gibt das Verhältnis von NutzsIGNALspannung zu Rauschsignalspannung an. Dabei werden die Effektivwerte der Spannungen verwendet. Für ein qualitativ ausreichendes Fernsehbild ist bei Videosignalen ein SNR-Wert von 40 dB die untere Grenze. [27]

2.4.3 Rauschverteilung (Gauß'sche Normalverteilung)

Die Summe der Amplitudenverteilung der Rauscherscheinungen entspricht im Allgemeinen der Gaußverteilung. Dies lässt sich durch den zentralen Grenzwertsatz der Statistik belegen. Dieser sagt aus,

„...dass die Summe von genügend vielen unabhängigen Zufallsgrößen näherungsweise normalverteilt ist“. [28]

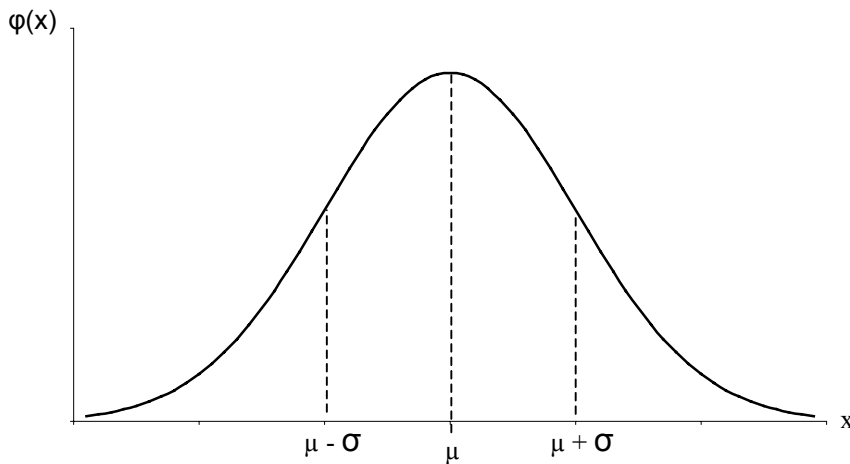


Abbildung 2-25: Gauß'sche Normalverteilung

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.27)$$

μ : Mittelwert (Erwartungswert)

σ : Standardabweichung

σ^2 : Varianz (Streuung)

68,3% aller Messwerte liegen im Intervall $[\mu - \sigma, \mu + \sigma]$

95,5% aller Messwerte liegen im Intervall $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$

99,7%, d.h. fast alle Messwerte liegen im Intervall $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$

Man geht davon aus, dass die Rauscherscheinungen in ihrer statistischen Verteilung gleichmäßig über das gesamte Bild verteilt sind, d.h. der Erwartungswert μ wird an jeder Stelle im Bild auf das Nutzsignal addiert. Zusätzlich muss die Abweichung vom Mittelwert, die sowohl positiv als auch negativ ausfallen kann, addiert werden. Dies führt zu folgendem Bildsignal:

Bildsignal = Nutzsignal + μ (Mittelwert des Rauschens) + σ (Abweichung vom Mittelwert)

Da der Mittelwert des Rauschens gleichmäßig über das gesamte Bild verteilt ist, verursacht dieser eine gleichmäßige Änderung des gesamten Bildes. Zur Verbesserung des Bildes kann der Mittelwert weggelassen werden und nur die Abweichung vom Mittelwert zum Bildsignal addiert werden. Daraus resultiert dann:

Verbessertes Bildsignal = Nutzsignal + σ (Abweichung vom Mittelwert)

[36]

2.4.4 Farbrauschen

Unter Farbrauschen versteht man Fehler im Bild, die in Form von Helligkeits- oder Farbveränderung sichtbar werden. Diese Störungen sind nicht im abgebildeten Objekt zu finden. **[37]**

Rauschen kann in Grauwertbildern und in Farbbildern auftreten. Da aber Farbbilder im Gegensatz zu Graustufenbildern mehrere Kanäle (z.B. RGB, CMYK, Lab) besitzen, kann auch das Rauschen in allen Kanälen vorhanden sein. Dabei muss das Rauschen nicht in allen Kanälen gleich stark vertreten sein. Meist ist es sogar sehr unterschiedlich auf die einzelnen Kanäle verteilt.

Bei Bildern im RGB- oder CMYK-Modus ist jeder der drei bzw. vier Kanäle für die Farbinformation verantwortlich, also zugleich für Helligkeit, Sättigung und Farbton. Im Lab-Modus ist das nicht der Fall. Dort wird die Helligkeitsinformation (L-Kanal) von der Farbinformation (a- und b-Kanal) getrennt. Während sich also im RGB- und CMYK-Modus ein Rauschen der Helligkeit in allen Kanälen bemerkbar macht, ist im Lab-Modus nur der L-Kanal davon betroffen. **[36]**

2.5 Colormanagement

2.5.1 Grundlagen

Zunächst waren die Systeme zum Colormanagement verschiedener Hersteller inkompatibel, was einen Austausch kalibrierter Daten unmöglich machte. Um dieses Problem zu lösen, wurde das International Color Consortium (ICC) gegründet. Zu dessen Gründungsmitgliedern gehörten unter anderem Adobe, Apple, Linotype-Hell, Microsoft und Sun.

1993 wurde ein einheitliches Format für Farbprofile entwickelt. Der ICC Standard ermöglicht einen weltweiten Austausch von Farbprofilen, unabhängig von der Plattform.

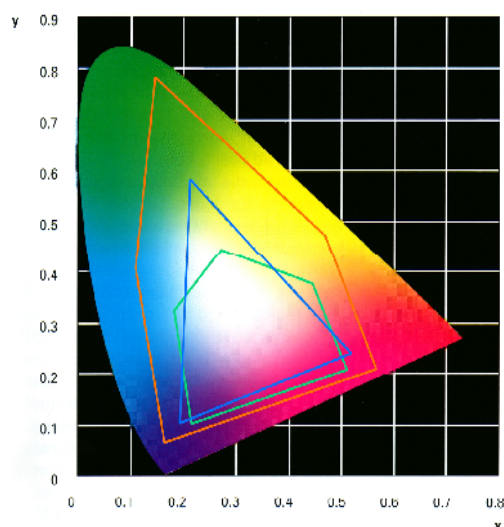


Abbildung 2-26: Farbräume

In der Praxis treten bei korrekter Farbdarstellung viele Probleme auf. Jedes Gerät und Medium, das zur Farbproduktion genutzt wird (z. B. Monitor, Dia, Drucker) kann einen anderen Farbumfang (Gamut) und somit auch einen anderen Farbbereich darstellen.

2.5.2 Farbraumtransformation

Durch Farbraumtransformation erfolgt eine

„...farbmetrisch eindeutige Verknüpfung eines (Geräte-) Farbraums mit einem Referenzfarbensystem (in Ausnahmefällen auch die direkte Verknüpfung zweier Gerätefarbräume) miteinander.“ [29]

Diese Umwandlung erfolgt unter Anwendung von linearen und nichtlinearen mathematischen Operationen.

PCS

Bei dem Profile Connection Space, kurz PCS genannt, handelt es sich um einen Referenz- und Verknüpfungsfarbraum, der unabhängig vom Gerät ist. Neben dem CIE-Lab können auch das CIE-XYZ oder andere Farbmodelle, wie beispielsweise RGB, als PCS verwendet werden. [29]

Gamut Mapping

Bei der Konvertierung vom PCS in einen Gerätefarbraum kommt es vor, dass Farben außerhalb des vom Gerät darstellbaren Bereiches liegen. Diese Farbwerte müssen durch möglichst ähnliche Farben, die sich innerhalb des Farbraums befinden, ersetzt werden. Dieser Prozess wird Gamut Mapping genannt.

Rendering Intent

Das Gamut Mapping kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Die Strategien bei der Farbersetzung werden als Rendering Intent bezeichnet.

Es wird zwischen vier Methoden unterschieden:

- Absolut farbmétrisch
- Relativ farbmétrisch
- Wahrnehmung, Fotografisch, Perceptual
- Sättigung

Farbmétrisch (Rendering Intent Colorimetric)

Der Erhalt der ursprünglichen Farbtöne steht im Vordergrund. Farben innerhalb des Ausgabefarbraums bleiben unverändert, die außerhalb liegenden werden mit reduzierter Sättigung auf die Grenze vom Zielfarbraum gesetzt. [30]

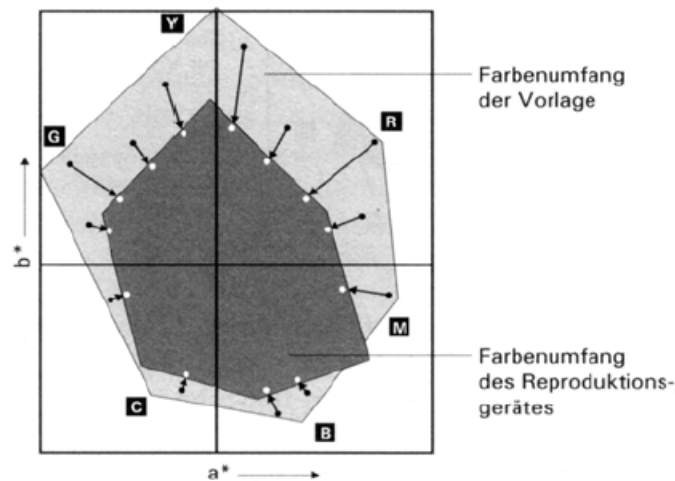


Abbildung 2-27: Rendering Intent Colorimetric

Absolut farbmetric

Im Ausgabefarbraum wird der Weißpunkt des Eingabefarbraums übernommen.

[29]

Relativ farbmetric

Es erfolgt eine Abbildung des Weißpunktes vom Zielsystem auf das Quellsystem.

[29]

Wahrnehmung, Fotografisch, Perceptual

Der Bildeindruck soll bei dieser Strategie erhalten bleiben. Es werden nicht nur alle hochgesättigten Farben des Quellfarbraums auf eine andere Farbe gesetzt, sondern der gesamte Quellfarbraum wird komprimiert. Somit werden alle Farben verändert, der Zielfarbraum wird nicht vollständig genutzt. [30]

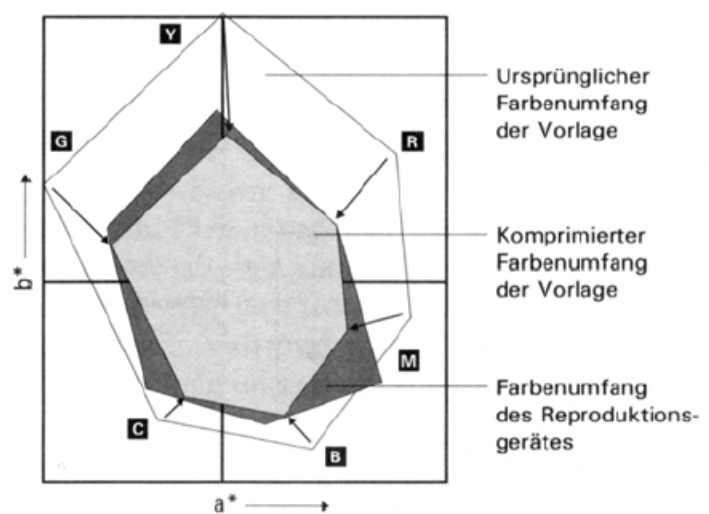


Abbildung 2-28: Rendering Intent Perceptual

Sättigung

Bei diesem sehr selten genutzten Verfahren erfolgt eine korrekte Wiedergabe der Sättigung, wobei der Farbton verändert wird.

2.5.3 ICC-Farbprofil

Die notwendigen Informationen zur Farbraumtransformation sind in den sogenannten Farbprofilen enthalten. Es gibt unterschiedliche Formate, von besonderer Bedeutung ist das ICC-Profilformat. Darin enthalten sind Gradationskurven, Matrizen und Tabellen, die den Quell- und den Zielfarbraum und deren Abhängigkeit voneinander beschreiben. Diese Daten werden vom Color Management Modul (CMM), einem schnellen Rechner zur Farbtransformation, genutzt.

In der ICC-Spezifikation wird zwischen zwei Arten der Transformation unterschieden:

- Matrix-basierte-Profile
- LUT-basierte-Profile

Geräte mit RGB Farbraum (z. B. Monitore) nutzen häufig matrix-basierte-Profile.

Matrix-basierte-Profile

Die Farbanpassung erfolgt unter Zuhilfenahme von Tone Reproduction Curves (TRC). Beim Monitor handelt es sich dabei um die Gammakurven der RGB-Kanäle. Dieser Vorgang wird als Linearisierung bezeichnet. Über eine 3 x 3 Matrix, in der sich die Werte der XYZ-Primärvalenzen der roten, grünen und blauen Primärfarben befinden (bei Monitoren entsprechen die XYZ-Werte also den Monitorphosphoren), erfolgt die Umrechnung zwischen RGB und dem Profile Connection Space (hier: CIE-XYZ).

Mathematisch lässt sich dies folgendermaßen beschreiben:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} R_{linear} \\ G_{linear} \\ B_{linear} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} TRC_{Rot} \\ TRC_{Grün} \\ TRC_{Blau} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Gerät} \\ G_{Gerät} \\ B_{Gerät} \end{bmatrix} \Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} R_{linear} \\ G_{linear} \\ B_{linear} \end{bmatrix}}_{\text{Matrix}} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_{PCS} \\ Y_{PCS} \\ Z_{PCS} \end{bmatrix} \quad (2.28)
 \end{aligned}$$

LUT-basierte Profile

Bei den LUT-basierten Profilen erfolgt die Transformation der Farben mittels mehrdimensionaler Tabellen. Diese Tabellen werden auch als Look-Up-Table (LUT) bezeichnet. Für jeden Eingabewert kann der entsprechende Ausgabefaktor diesen Tabellen entnommen werden. Da die Tabellen nicht beliebig groß und somit auch nicht beliebig genau sein können, müssen die darin fehlenden Farbwerte durch Interpolation berechnet werden.

Es können mehrere LUT in einem Profil enthalten sein. Für jede Umwandlungsrichtung (Umrechnung von den PCS in den Gerätefarbraum und umgekehrt) wird eine Tabelle benötigt, ebenso für jeden Rendering Intent. Die beiden farbmetrischen Rendering Intent nutzen jedoch eine gemeinsame LUT.

Aufbau von Farbprofilen

Ein Farbprofil lässt sich in drei Bereiche unterteilen (Abbildung 2-29): Zuerst der Header, anschließend die Tag Table und dann die Tagged Element Data.

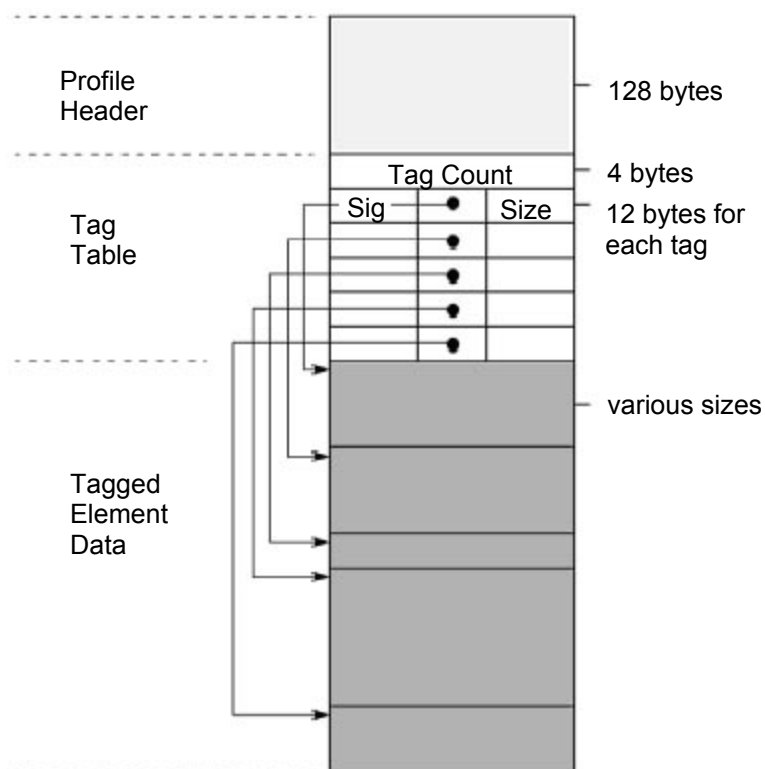


Abbildung 2-29: Aufbau von Farbprofilen

Im Header sind allgemeine Informationen über das Profil enthalten. Dazu gehören unter anderem Angaben zur Profil-Größe, CMM-Typ, Versionsnummer, Herkunftsfarbraum und Hersteller. Eine komplette Auflistung ist den Tabellen der ICC-Specification **[31]** zu entnehmen.

Im Anschluß an den Header folgt eine Auflistung aller im Profil enthaltenen Tags und deren Größe. Vergleichbar ist diese als „Tag Table“ bezeichnete Liste mit einem Inhaltsverzeichnis. Dieser Teil ist mit den darauffolgenden Tagged Element Data fest verbunden. In diesem Bereich sind die Daten der einzelnen Tags enthalten.

Mehrfach fiel der Begriff „Tag“. Dies ist die Bezeichnung für Daten und Elemente eines ICC-Profiles. Je nach Art des Profils befinden sich unterschiedliche Tags darin.

Tags lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- Required Tags
- Optional Tags
- Private Tags

Required Tags sind die Elemente, die zur vollen Funktionsfähigkeit eines Farbprofils notwendig sind.

Durch Optional Tags besteht die Möglichkeit, zusätzliche Elemente zur genaueren Farbraumbeschreibung oder Verbesserung der Transformationsergebnisse einzufügen.

Private Tags werden von den Herstellern genutzt, um zusätzliche Informationen, beispielsweise Messdaten, zu speichern. Werden sie zur Qualitätsverbesserung genutzt, kann Inkompatibilität entstehen, da meist nur herstellereigene CMMs die Informationen korrekt lesen können. Die Definition der Private Tags erfolgt nicht in der ICC-Spezifikation. Dort sind nur Inhalte und Funktionsweisen der Optional und Required Tags festgelegt.

In einem Profil für Farbmonitore müssen unter anderem folgende Tags enthalten sein:

Required Tags:

- Gammakurven für R, G, B
- Weißpunkt
- Matrix zur Umrechnung zwischen RGB und XYZ
- Tag zur chromatischen Anpassung

Optional Tags:

- Mehrdimensionale Gamut-Tags (LUT)

3. Versuchsaufbau

3.1 Der Arbeitsplatz

Von besonderer Bedeutung für eine farblichrichtige Darstellung am Monitor ist neben einer regelmäßigen Monitorkalibration der Aufbau des Monitorarbeitsplatzes.

Bei Monitoren handelt es sich um relativ schwache Strahlungsquellen, deshalb werden die auf dem Monitor dargestellten Farben leicht durch das Umgebungslicht beeinflusst. Besonders Schwankungen der Farbtemperatur durch einfallendes Tageslicht können die Farbbeurteilung beeinflussen. Um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurde bei der Gestaltung des Arbeitsplatzes auf die DIN Normen zurückgegriffen.

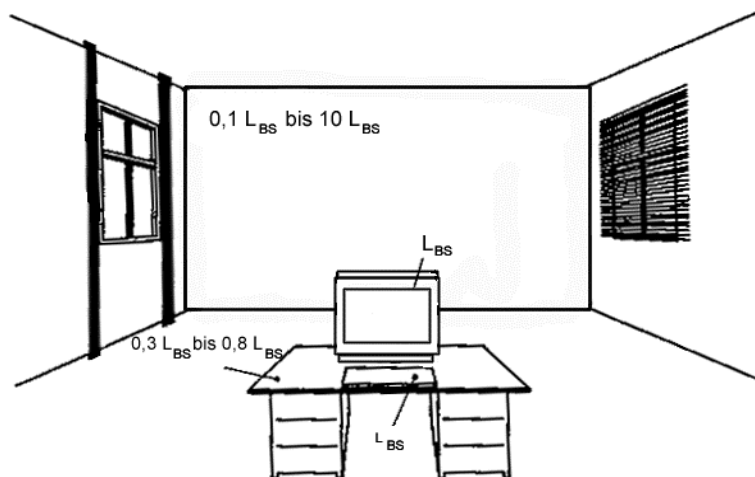


Abbildung 3-1: Empfohlene Leuchtdichteverhältnisse in einem Arbeitsraum mit Bildschirmen positiver Polarität

Als Richtwerte für die Leuchtdichteverhältnisse bei Bildschirmen (BS) mit positiver Polarität (dunkle Schrift auf hellem Hintergrund) sind folgende Richtwerte empfohlen [32]:

- Arbeitsmittel (AM), z. B. Papier $L_{AM} \approx L_{BS}$
- Schreibtisch (T), Arbeitsoberfläche $0,3 \cdot L_{BS} \leq L_T \leq 0,8 \cdot L_{BS}$
- Größere Flächen im Raum (U) $0,1 \cdot L_{BS} \leq L_U \leq 10 \cdot L_{BS}$

Die Beleuchtungsanlagen sollten steuerbar und an den Nutzungszweck des Arbeitsplatzes angepasst sein. Durch Helligkeit wird Wohlbefinden vermittelt, wohingegen durch gezieltes Abdunkeln bis auf 100 cd/m^2 bzw. 200 lx die Konzentrationsfähigkeit gesteigert werden kann. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass direkte Blendung durch Fenster und Oberlichter vermieden wird. Die Fenster sind mit Lichtschutzvorrichtungen zu versehen.

Darüber hinaus werden Spiegelungen von Gegenständen auf dem Monitor als störend empfunden. Es kann eine Beeinträchtigung der visuellen Informationsaufnahme auftreten. [32]

Der Aufbau des Arbeitsplatzes erfolgte, wie in Abbildung 3-2 dokumentiert. Bei der Messung der Leuchtdichteverhältnisse ergaben sich folgende Werte:

Objekt	Messwerte [cd/m^2]	$L_{\text{Objekt}} / L_{\text{BS}}$	DIN
Monitor	80,8	-	-
Tastatur	60	0,74	1
Schreibtisch	26	0,32	0,3 – 0,8
Hintergrund	7	0,09	0,1 – 10
Monitorumgebung	22	0,27	0,1 – 10

Tabelle 3-1: Messergebnisse der Leuchtdichteverhältnisse



Abbildung 3-2: Arbeitsplatz

Der Monitor wurde, wie auch aus den Messergebnissen sichtbar wird, visuell in den Vordergrund gestellt, indem die Stärke der Beleuchtung an der unteren Grenze der DIN gehalten wurde. Eine Abdunkelung der Fenster garantierte konstante Farbtemperaturen. Während der Monitor auf Farbart D 55 eingestellt wurde, ergaben Messungen des Umgebungslichtes mit dem Colormaster 3F eine Farbtemperatur von ca. 5600 K . Das direkte Umfeld des Monitors wurde neutral grau

gehalten, die Farbe des Hintergrundes war schwarz.

Betrachtungsabstand

Nachdem das Betrachtungsumfeld so gestaltet wurde, dass optimale Arbeitsbedingungen vorherrschen, muss auch der Betrachter so positioniert werden, dass eine optimale Konzentration möglich ist. Werden ergonomische Erfordernisse bei Sitzposition und Monitoraufstellung beachtet, so ist die Monitorarbeit für das Auge weniger ermüdend.

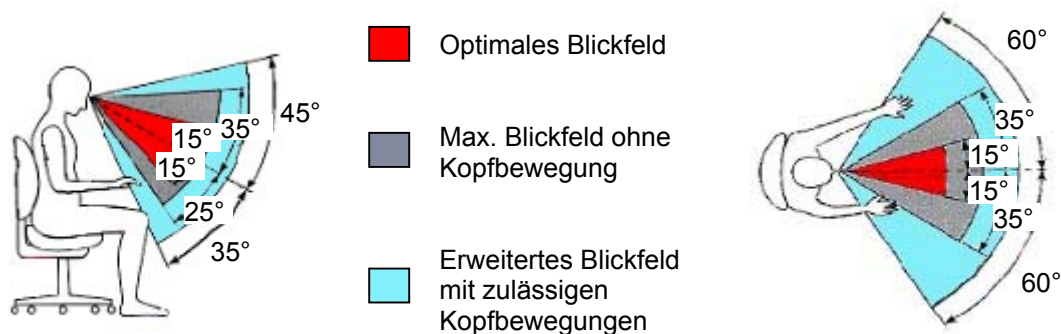
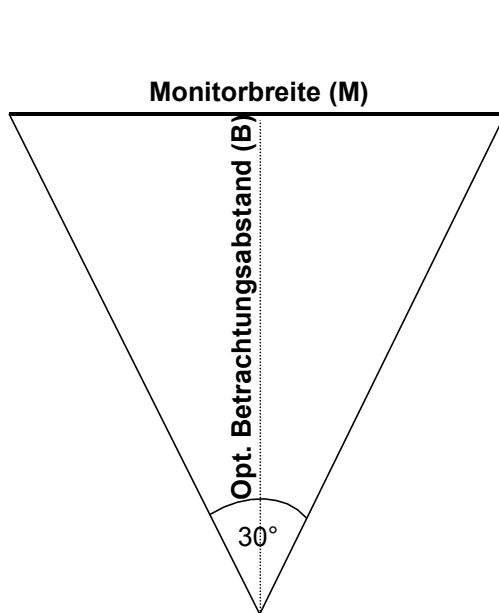


Abbildung 3-3: Größe des Blickfeldes beim Menschen

Die Blickrichtung zum Monitor sollte leicht nach unten weisen. Das optimale Blickfeld des Auges umfasst einen Winkel von ca. 30°. Darin sollte sich der Monitor befinden, so dass der relevante Teil des Monitors ohne Drehung des Kopfes eingesehen werden kann.

Aus dem optimalen Blickfeld lässt sich der optimale Betrachtungsabstand berechnen. Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass sich die gesamte Benutzeroberfläche des Shiraz-Programms im optimalen Blickfeld befindet, so dass eine Programmbedienung ohne Kopfbewegungen möglich ist.



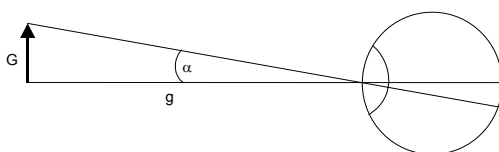
$$\tan\left(\frac{30^\circ}{2}\right) = \frac{M/2}{B_{opt}} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow B_{opt} &= \frac{M}{2 \cdot \tan(15^\circ)} \\ &= \frac{38 \text{ cm}}{2 \cdot \tan(15^\circ)} \\ &= \underline{\underline{70,9 \text{ cm}}} \end{aligned}$$

Abbildung 3-4: Optimaler Betrachtungsabstand

Der optimale Betrachtungsabstand für einen 21 Zoll Monitor beträgt also 70,9 cm.

Auch die maximale Betrachtungsentfernung kann bestimmt werden. Diese wird durch das Auflösungsvermögen des Auges beeinflusst. Um Bildrauschen möglichst gut wahrnehmen zu können ist es sinnvoll, dass das Auge benachbarte Pixel unterscheiden kann. Hierzu müssen die beiden Bildpunkte auf verschiedene Zäpfchen bzw. Stäbchen fallen. Für den kleinsten auflösbaren Winkel liegt der Sehwinkel α bei $1'$.



$$\tan \alpha = \frac{G}{g} \quad (3.2)$$

Abbildung 3-5: Sehwinkel

g = Betrachtungsabstand
 G = Gegenstand

Für den maximalen Betrachtungsabstand g in Abhängigkeit von der Monitorbreite M , der horizontalen Monitorauflösung AF_h und der Pixelbreite G gilt für $\alpha = 1'$:

$$G = \frac{M}{AF_h} = \frac{38 \text{ cm}}{640} = \underline{0,059 \text{ cm}} \quad (3.3)$$

daraus ergibt sich:

$$g = \frac{G}{2 \cdot \tan \alpha} = \frac{0,059 \text{ cm}}{2 \cdot \tan 1'} = \underline{101,4 \text{ cm}} \quad (3.4)$$

Der Betrachtungsabstand der Testpersonen vom Monitor sollte folglich zwischen minimal 70,9 cm und maximal 101,4 cm liegen. [33] [34]

3.2 Verwendete Geräte

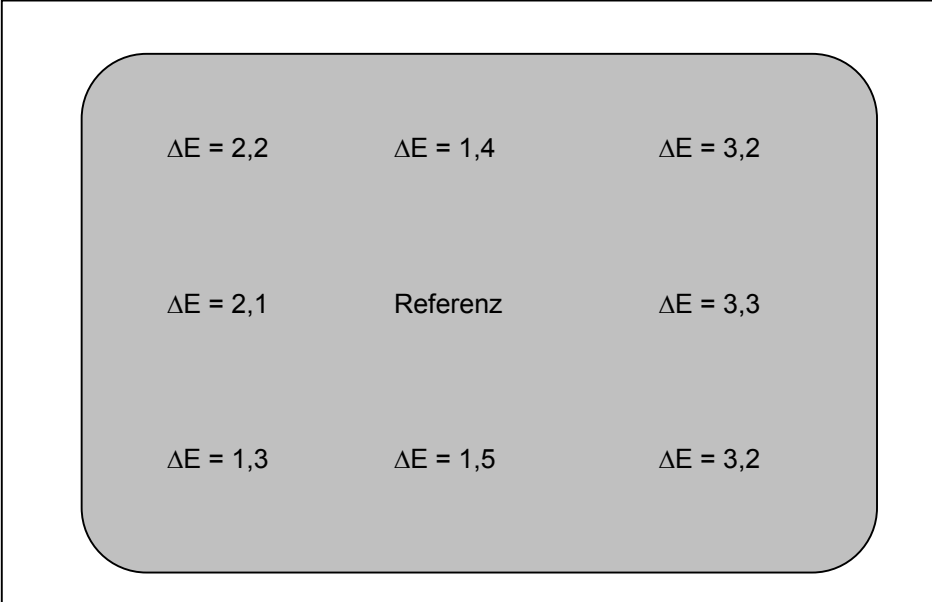
Eine Aufstellung aller verwendeten Geräte und Software ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Geräte	
Monitor	Step 21 Zoll Modellnr. NUB 1107 STTUW
Grafikkarte	Radeon 7000 / Radeon VE Speicher 64 MB
2 Leuchtstoffröhren	F 18 W / 54 Daylight; gemessene Farbtemperatur ca.5600 K
Messgerät für Farbtemperatur	Gossen Colormaster 3F
Messgerät für Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke	Gossen Mavolux digital
Kalibrierung	GretagMacbeth: eye-one
Software	
Betriebssystem	Windows 2000
Kalibrierung	GretagMacbeth: ProfileMaker 4.1.1
Java Programmierung	JBuilder 6
EXE Datei erstellen	exe4j

Sonstiges	
Monitorprofilname	Monitorprofil08.04.03.icc
Monitorauflösung	640 x 480
Monitorleuchtdichte laut ProfileMaker	80,8 cd / m ²
Monitorfarbtemperatur	5500 K

Tabelle 3-2: Verwendete Geräte, Software, wichtige Daten

Die Monitorkalibration und die sich anschließende Erstellung des Farbprofils „Monitorprofil08.04.03.icc“ erfolgte mit dem Programm „ProfileMaker“. Das Messgerät sollte bei jeder Messung mittig fixiert werden, um konstante Ergebnisse zu liefern. Eine Überprüfung der Farbunterschiede bei der Darstellung des Monitors ergab folgende Messdaten:



$\Delta E = 2,2$	$\Delta E = 1,4$	$\Delta E = 3,2$
$\Delta E = 2,1$	Referenz	$\Delta E = 3,3$
$\Delta E = 1,3$	$\Delta E = 1,5$	$\Delta E = 3,2$

Abbildung 3-6: Farbgenauigkeit des Monitors

3.3 Verwendete Farben, Kontraste und Frequenzen

Insgesamt wurden 62 verschiedene Bilder erstellt, die in 3 Sets abgelegt wurden. Neben den verschiedenen Farben wurden unterschiedlich starke Kontraste mit verschiedenen Frequenzen getestet.

Um einen visuellen Eindruck von verwendeten Farben und Kontrasten zu geben, sind in Abbildungen 3-7, 3-8 und 3-9 Ausschnitte aus den Testbildern abgedruckt.

Eine Farbabweichung von der Darstellung am Monitor kann beispielsweise durch das Druckprofil entstanden sein. Die zugehörigen Daten können der jeweils vorausgehenden und nachfolgenden Tabelle entnommen werden. Es wurde darauf verzichtet, alle eingestellten Frequenzen abzubilden, beispielhaft ist immer $\frac{1}{4}$ LP/Pixel eingestellt.

Zunächst wurden die Farben Cyan, Mittelblau, Mittelgrün, Pseudorot und Hellgrau ausgewählt. Genaue Daten sind der Tabelle zu entnehmen. Es wurden 3 Frequenzen gewählt. Eine sehr hohe mit $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel, eine etwas niedrigere mit $\frac{1}{6}$ Lp/Pixel und als niedrigste $\frac{1}{10}$ Lp/Pixel. Bei letztgenannter sind die Streifen bereits so breit, dass sie als Fläche wahrgenommen werden. Die verwendeten Kontraste betragen 3%, 10% und 22%. Dies entspricht einem geringen, mittleren und hohen Kontrast. Eine höhere Kontrasteinstellung für alle verwendeten Farben ist aufgrund des eingeschränkten Farbraums nicht möglich. Eingestellte Farben mit gewähltem Kontrast sollen innerhalb des darstellbaren Monitorfarbraums liegen, verrauschte Farben dürfen außerhalb liegen. Bei der Farbe Pseudorot kann lediglich ein maximaler Kontrast von 21% eingestellt werden, da sonst die Grenzen des Farbraums überschritten werden. Einzelheiten zur Kontrastberechnung können in Kapitel 3.5.2.3 nachgelesen werden.

	L_{mittel}^*	a^*	b^*	C	h
Mittelgrün	67,9	-42,8	35,4	55,5	140,4
Pseudorot	55,6	47,3	30,7	56,4	33,0
Mittelblau	45,2	24,2	-47	52,9	297,2
Cyan	70,2	-19,8	-5,4	20,5	195,3
Hellgrau	70,0	0,1	0,1	0,1	45,0

Tabelle 3-3: Lab-Werte der Testfarben

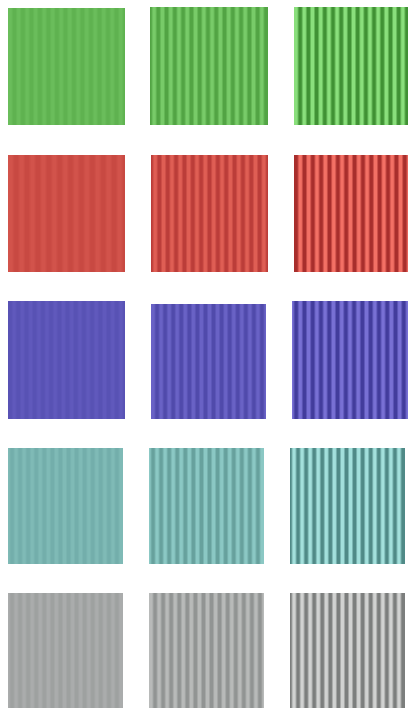


Abbildung 3-7: Verwendete Farben

		K=3%	K=10%	K=22%
Mittelgrün	L _{Hell}	65,86	74,69	82,84
	L _{Dunkel}	69,94	61,11	52,96
Pseudorot	L _{Hell}	57,27	61,16	67,83
	L _{Dunkel}	53,93	50,04	43,37
Mittelblau	L _{Hell}	46,56	49,72	55,14
	L _{Dunkel}	43,84	40,68	35,26
Cyan	L _{Hell}	72,31	77,22	85,64
	L _{Dunkel}	68,09	63,18	54,76
Hellgrau	L _{Hell}	72,10	77,00	85,40
	L _{Dunkel}	67,90	63,00	54,60

Tabelle 3-4: Daten zu Abbildung 3-7

Da bei der Programmierung des Shiraz-Programms der ersten Version ein Fehler aufgetreten ist, sind die Messwerte fehlerhaft, bzw. unvollständig. So wurden noch einige zusätzliche Farben getestet, die jedoch nur mit einem Kontrast von 10% und einer Frequenz von $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel eingestellt wurden. Hiermit soll, falls vorhanden, eine Abhängigkeit der Wahrnehmung des Rauschens von der Größe der L^* , a^* , b^* , C^*_{ab} und h Werte ermittelt werden.

	L_{mittel}^*	a^*	b^*	C	h
Grün	67,9	-24,2	20,0	31,4	140,4
Olivgrün	69,4	-17,0	17,0	24,0	135,0
Gelb	84,8	-12,3	54,2	55,6	102,8
Haut	77,0	18,7	12,6	22,5	34,0
Braun	69,4	17,0	17,0	24,0	45,0
Violett	69,4	17,0	-17,0	24,0	315,0
Magenta	55,6	47,3	-30,7	56,4	327,0
Blau	45,2	18,0	-35,0	39,4	297,2
Hellblau	69,4	-17,0	-17,0	24,0	225,0

Tabelle 3-5: Lab-Werte der Testfarben

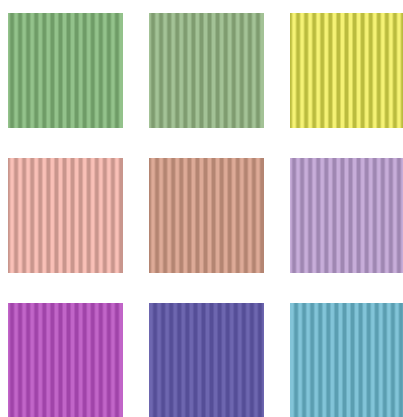


Abbildung 3-8: Verwendete Farben

Grün		Olivgrün		Gelb	
L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}
74,69	61,11	76,34	62,46	93,28	76,32
Haut		Braun		Violett	
L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}
84,7	69,3	76,46	62,46	76,34	62,46
Magenta		Blau		Hellblau	
L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}	L_{Hell}	L_{Dunkel}
61,16	50,04	49,72	40,68	76,34	62,46

Tabelle 3-6: Daten zu Abbildung 3-8

Darüber hinaus erfolgte noch der Test einiger Extrema (sehr starker Kontrast) und ein weiterer mit Zwischenabstufungen des Kontrastes und der Frequenz, um den Kurvenverlauf besser bestimmen zu können.

Lila wurde mit einem Kontrast von 22% und 35% bei einer Frequenz $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel verwendet. Die Einstellungen für Mittelblau betragen $f = \frac{1}{4}$ Lp/Pixel und $K = 7\%$. Dunkelgrau und Dunkelweiß wurden mit einer Frequenz von $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel und einem Kontrast von 33% getestet, außerdem noch ein Grau mit 65% Kontrast und den

Frequenzen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{10}$ Lp/Pixel, Grau mit $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel und einem Kontrast von 1%.

	L_{mittel}^*	a^*	b^*	C	h	Frequenz [Lp/Pixel]	Kontrast
Lila	51,7	39,6	-30,2	49,8	322,7	$\frac{1}{4}$	22 %
						$\frac{1}{4}$	35 %
Mittelblau	45,2	24,2	-47,0	52,8	297,2	$\frac{1}{4}$	7 %
Grau	55,0	0,1	0,1	0,1	45,0	$\frac{1}{4}$	1 %
						$\frac{1}{4}$	65 %
						$\frac{1}{10}$	65 %
Dunkelgrau	22	0,1	0,1	0,1	45,0	$\frac{1}{4}$	3 %
Dunkelweiß	88	0,1	0,1	0,1	45,0	$\frac{1}{4}$	3 %

Tabelle 3-7: Lab-Werte der Testfarben, ohne berechneten Kontrast

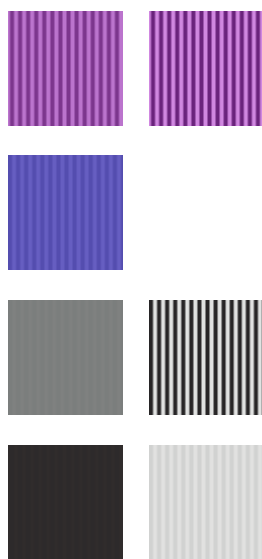


Abbildung 3-9: Verwendete Farben

Lila		K=22%	K=35%
	L_{Hell}	63,07	69,8
	L_{Dunkel}	40,33	33,61
Mittelblau		K=7%	
	L_{Hell}	48,36	
	L_{Dunkel}	42,04	
Grau		K=1%	K=65%
	L_{Hell}	55,55	90,75
	L_{Dunkel}	54,55	19,25
Dunkelgrau		K=3%	Dunkelweiß
	L_{Hell}	22,66	
	L_{Dunkel}	21,34	
			K=3%
			90,64
			85,36

Tabelle 3-8: Daten zu Abbildung 3-9

Die Lage aller verwendeter Farben im a^*b^* -Diagramm kann in Abbildung 3-10 betrachtet werden. Darüber hinaus ist dort auch die Größe des gesamten und des reduzierten Monitorfarbraums (siehe Kapitel.2.5) zu erkennen.

Zu beachten ist, dass es sich um eine Ansicht auf den Monitorfarbraum handelt, die unterschiedlichen Helligkeiten der Farben können dementsprechend nicht abgelesen werden.

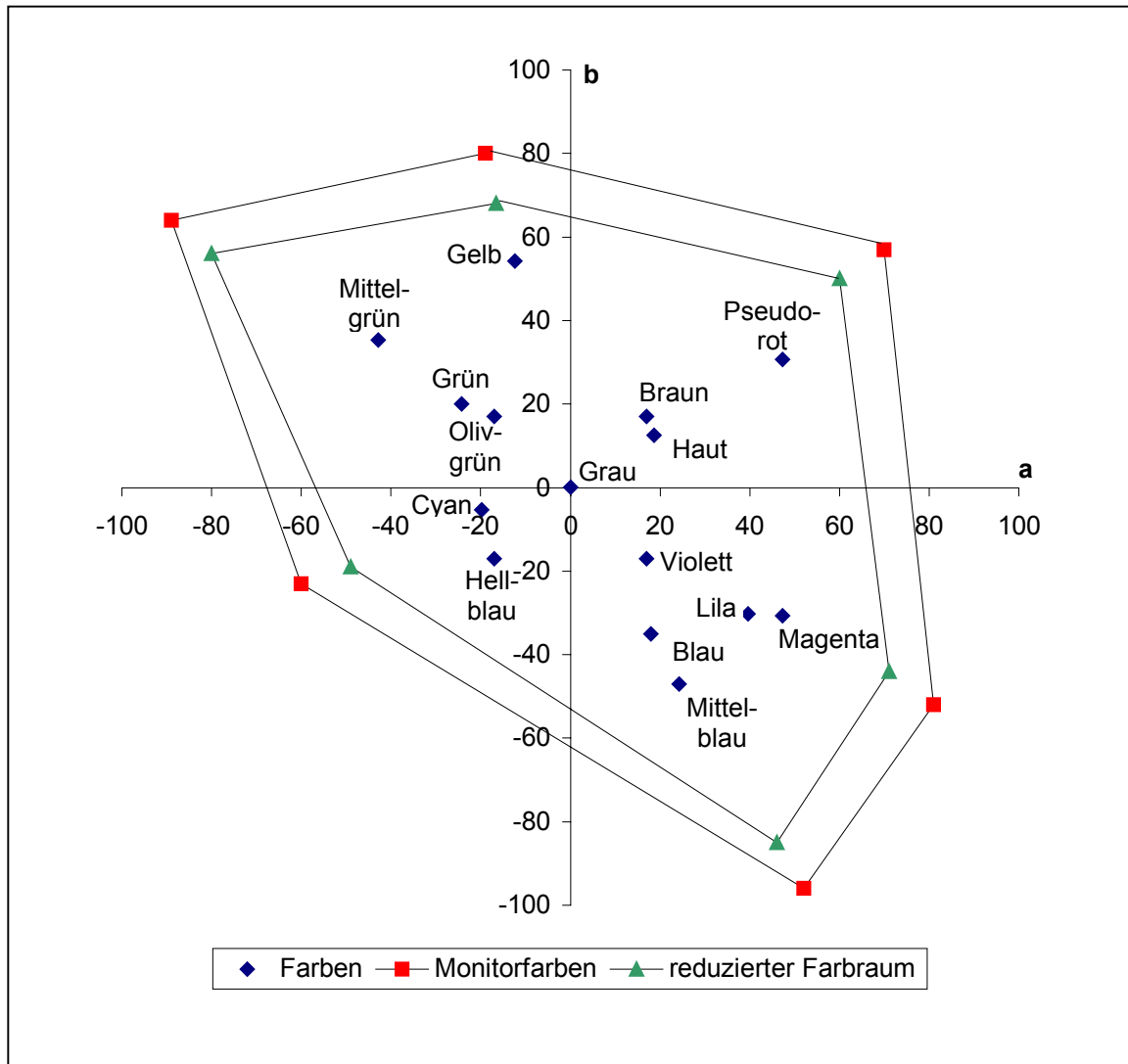


Abbildung 3-10: Darstellung der verwendeten Farben im a^*b^* -Diagramm

3.4 Versuchsdurchführung

Die Probanden wurden in den Raum mit dem aufgebauten Arbeitsplatz (siehe Kapitel 3.1) gebracht. Dort setzten sie sich in einem Abstand von 70 cm bis 1 m zum Monitor.

Zunächst erfolgte eine kurze Einführung in das Programm, bei der auch Sinn und Zweck der Tests erläutert wurden. Die Grenzen, bei der das Bildrauschen sichtbar wird, sollen durch ein Hin- und Herschieben der Slider möglichst genau bestimmt

werden. Die Studenten konnten die Rauschschwelle also von beiden Seiten her eingrenzen.

Durch die für diese Erklärungen benötigte Zeit konnten sich die Augen der Probanden an die Farbtemperatur von Umgebungslicht und Monitor anpassen.

Die Versuchsdurchführung erfolgte ohne Zeitdruck, um genaue Ergebnisse zu ermöglichen. Durchschnittlich benötigten die Studenten je Set 20 bis 30 Minuten.

Insgesamt wurden, aufgrund der großen Anzahl zu testender Bilder 3 Sets erstellt. An der Testreihe nahmen jeweils 25 bzw. 26 Personen teil. Es handelte sich fast ausschließlich um Studenten des Fachbereiches „Photoingenieurwesen und Medientechnik“.

3.5 Das Programm

Als Grundlage diente das Programm „Shiraz“, programmiert von Jan Fisher im Zuge der Diplomarbeit „Untersuchung der Farbabstandsformeln des CIELAB-Farbraums auf ihre Eignung, Farbrauschen quantitativ und physiologisch richtig zu beschreiben“.

Das Programm wurde in einigen Bereichen erweitert und umgeschrieben. Die Programmiersprache ist Java. Im Folgenden werden hier nur die neu hinzugekommenen Elemente erläutert. Die einzelnen Menüpunkte und deren Funktion können in der oben genannten Diplomarbeit von Jan Fischer und Michael Bantel nachgelesen werden.

Der gesamte Quellcode ist auf der beiliegenden CD-ROM zu finden.

3.5.1 Installation

Als Laufumgebung für das Programm Shiraz ist Java 1.3.1 und Java 3D notwendig. Die entsprechenden Programme befinden sich auf der CD-ROM.

Installation von Java 1.3.1

Ein Doppelklick auf J2SDK_1_3_1_01_WIN.EXE startet die Installation.

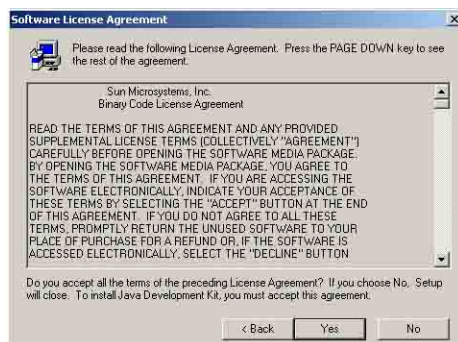
1. Schritt:



Klick auf Next

Abbildung 3-11: Installation von Java 1.3.1 (1. Schritt)

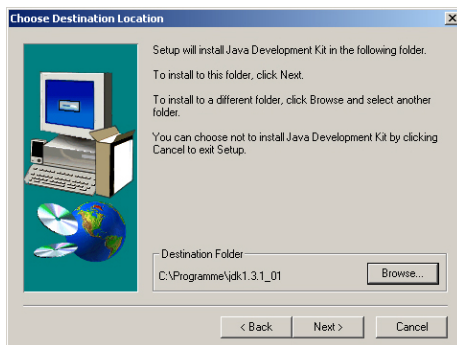
2. Schritt:



Klick auf Yes

Abbildung 3-12: Installation von Java 1.3.1 (2. Schritt)

3. Schritt:



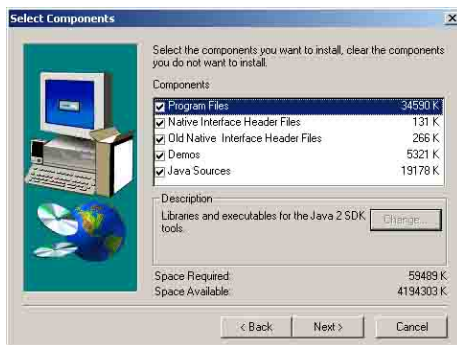
Über *Browse* kann hier der Speicherort ausgewählt werden. Dieser muss

C:\Programme\jdk1.3.1_01 sein.

Klick auf *Next*

Abbildung 3-13: Installation von Java1.3.1 (3. Schritt)

4. Schritt:



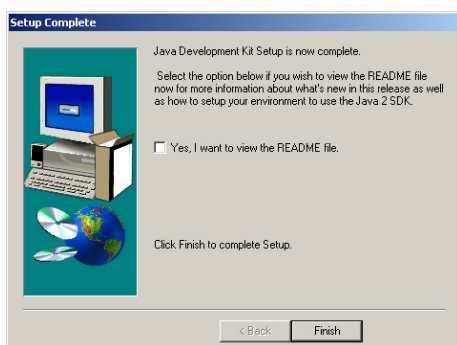
Für die Installation alle Komponenten anwählen.

Klick auf *Next*

Abbildung 3-14: Installation von Java1.3.1 (4. Schritt)

Das Programm wird jetzt installiert.

5. Schritt:



Um das Setup zu beenden:

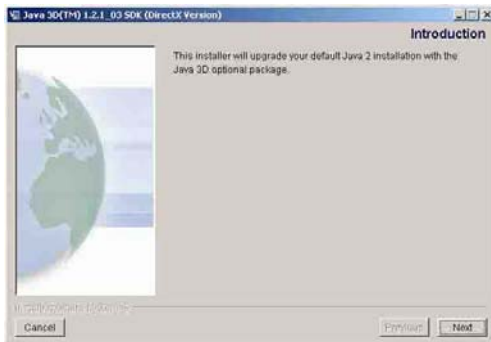
Klick auf *Finish*

Abbildung 3-15: Installation von Java1.3.1 (5. Schritt)

Installation von Java 3D

Ein Doppelklick auf JAVA3D_1_2_1_03_WIN32_DIREC.EXE startet die Installation.

1. Schritt:



Klick auf *Next*

Abbildung 3-16: Installation von Java 3D (1. Schritt)

2. Schritt:



Es muss der Radio-Button „I accept the terms of the License Agreement“ angewählt werden.

Klick auf *Next*

Abbildung 3-17: Installation von Java 3D (2. Schritt)

3. Schritt:



Klick auf *Install*

Abbildung 3-18: Installation von Java 3D (3. Schritt)

4. Schritt:



Abbildung 3-19: Installation von Java 3D
(4. Schritt)

Es muss der Radio-Button
„Add Java 3D to these JVMs“
angewählt werden.

Klick auf *Install*

Die Installation des Programms beginnt.

5. Schritt:



Abbildung 3-20: Installation von Java 3D
(5. Schritt)

Um die Installation abzuschließen:

Klick auf *Done*

Installation von Shiraz

Zum Starten muss ein Doppelklick auf Shiraz.exe ausgeführt werden.



Abbildung 3-21: Installation von Shiraz

Als Speicherort muss
C:\Programme
ausgewählt werden.

Klick auf *Unzip*

Das Programm wird entpackt. Anschließend erscheint eine Information, dass die Dateien erfolgreich entpackt wurden. Diese Nachricht muss mit *OK* bestätigt werden.

Man gelangt zurück zum 1. Fenster (Abbildung 3-21) und muss diese mit *Close* schließen.

Unter C:\Programme befindet sich jetzt ein Ordner „Shiraz“. Die in diesem Ordner befindliche Datei „Shiraz.exe“ startet durch Doppelklick das Programm.

3.5.2 Die Fenster von Shiraz

3.5.2.1 Farbauswahl

Das Farbauswahl-Fenster ist aus der Shiraz-Version von Jan Fischer übernommen. Im CIE-Lab oder im RGB-Farbraum kann über den Schieberegler oder durch Eingabe in die jeweiligen Zahlenfelder eine Farbe bestimmt werden, die im Vorschaufenster angezeigt wird. Bei der Eingabe der Werte über das Zahlenfeld müssen diese anschließend mit der Return-Taste bestätigt werden. Im CIE-Lab Modus müssen die Dezimalwerte mit einem Punkt eingegeben werden.

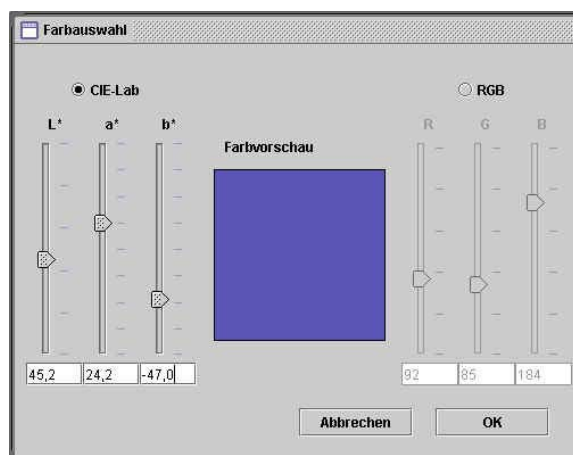


Abbildung 3-22: Farbauswahlfenster

Die Farbumrechnung zwischen RGB-Farbraum und CIE-Lab Farbraum wird von den Klassen *ICC_RGBmetrik* und *LABmetrik* übernommen und erfolgt unter Verwendung des in den Voreinstellungen gewählten ICC-Profiles. Die beiden Klassen sind ohne Änderungen aus der Shiraz-Version von Jan Fischer

übernommen und die genaue Funktionsweise der Farbumrechnung kann in der entsprechenden Diplomarbeit nachgelesen werden.

In der Diplomarbeit von Jan Fischer und Michael Bantel wird angesprochen, dass aufgrund der Quantisierung „bei der Eingabe z.B. des Wertes 43.6 für L^* der Wert nach Drücken der Enter-Taste auf 43.5 springt“. Das Umspringen war ein Fehler beim Runden im Programm und ist in der jetzigen Shiraz-Version behoben.

Bei der Farbauswahl kann es vorkommen, dass die Darstellungsmöglichkeiten des RGB-Farbraums überschritten werden. Ist dies der Fall, so wird ein Warnfeld mit dem Hinweis „*Unzulässige Farbe*“ angezeigt und der *OK*-Button wird deaktiviert. Eine Auswahl dieser Farben ist also nicht möglich.

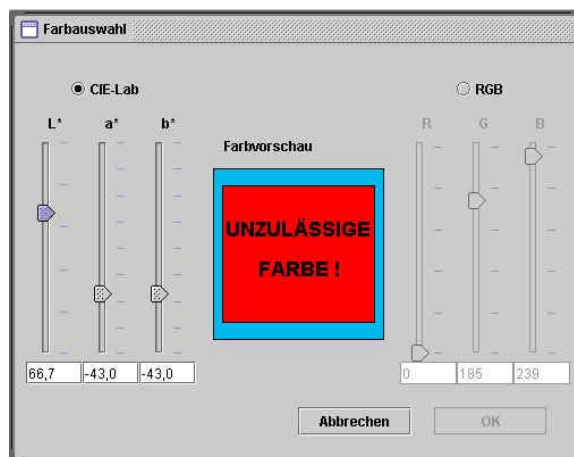


Abbildung 3-23: Unzulässige Farbe

Nach dem Einstellen der gewünschten Farbe gelangt man über den *OK*-Button zum nächsten Fenster. Die Lab-Werte der Farbe werden dabei gespeichert. *Abbrechen* schließt das Fenster und verwirft alle Eingaben.

3.5.2.2 Frequenzauswahl

Dieses Fenster ist im Gegensatz zur vorherigen Version neu. Es ermöglicht die Eingabe der gewünschten Frequenz in Linienpaare pro Pixel (L_p/Pixel). Dabei wird vom L^* -Wert der im Farbauswahl-Fenster eingestellten Farbe L_{\min} und L_{\max} mit einem Kontrast von 0,05 berechnet (siehe Kapitel 3.5.2.3) und dargestellt.

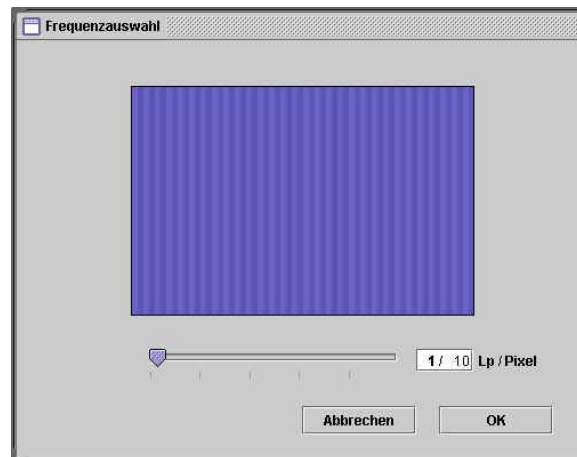


Abbildung 3-24: Frequenzauswahlfenster

Dargestellt sind jetzt 2 Farben, die sich nur in ihren L^* -Werten, also den Helligkeiten, unterscheiden.

Die Frequenz wurde durch ein Rechteckgitter erzeugt. Die Wahl fiel auf das Rechteckgitter anstelle des Sinusgitters, da man bei hohen Frequenzen wegen der wenigen Stützstellen nicht in der Lage wäre, einen sauberen Sinus zu darzustellen. Dies würde zu Fehlern im peek-to-peek Kontrast führen. Da es aber auch in der Natur weder extreme Kanten noch den Sinus wirklich gibt, hat beides die gleiche Aussagekraft. [35]

Beim Öffnen dieses Fensters wird eine Frequenz von $1/150$ Lp/Pixel eingestellt. Die Frequenz lässt sich durch einen Schieberegler oder durch Eingabe in das Zahlenfeld im Bereich von $1/2$ Lp/Pixel bis $1/300$ Lp/Pixel verändern. $1/2$ Lp/Pixel entspricht dabei einem pixelweisen Wechsel zwischen heller und dunkler Farbe. Es wird also 1 Linienpaar (Minimum + Maximum) auf 2 Pixeln dargestellt.

Auch hier schließt der *Abbrechen*-Button das Fenster, während man durch einen Klick auf den *OK*-Button zum nächsten Fenster gelangt und die eingegebene Frequenz gespeichert wird.

3.5.2.3 Kontrastauswahl

Das Kontrastauswahl-Fenster ist wie das Frequenzauswahl-Fenster auch mit einem Schieberegler und einem Zahlenfeld ausgestattet.

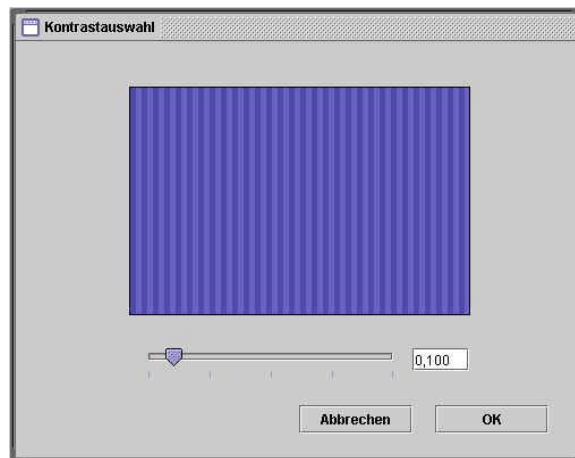


Abbildung 3-25: Kontrastauswahlfenster

In diesem Fenster kann mit oben genannten Elementen der Kontrast eingestellt werden.

Die Berechnung des Kontrasts erfolgt mit folgender Formel:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \quad (3.5)$$

Die mittlere Leuchtdichte L_{mittel} errechnet sich folgendermaßen:

$$L_{\text{mittel}} = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad (3.6)$$

Durch Umstellen und Zusammenfügen der beiden Formeln ergibt sich jeweils eine Formel für L_{\max} und L_{\min} :

$$L_{\max} = L_{\text{mittel}} \cdot (1 + K) \quad (3.7)$$

$$L_{\min} = L_{\text{mittel}} \cdot (1 - K) \quad (3.8)$$

Der L^* -Wert der im Farbauswahlfenster eingestellten Farbe wird als mittlere Leuchtdichte in die Gleichungen eingesetzt. Der Kontrast K entspricht dem Wert, der über den Schieberegler oder das Zahlenfeld eingegeben wird. Der Wertebereich für K liegt zwischen 0 und 1 und kann auf 3 Nachkommastellen

genau eingestellt werden. Die neuerrechneten Werte L_{\max} und L_{\min} entsprechen den L^* -Werten der beiden dargestellten Farben (Farbe 1 und Farbe 2). Die a^* - und b^* -Werte für die beiden Farben werden von der im Farbauswahlfenster eingestellten Farbe übernommen.

Die Grundeinstellung für den Kontrast beträgt 0.

Auch hier erfolgt erneut eine Überprüfung, ob sich die beiden Farben innerhalb des RGB-Farbraums befinden. Bei Überschreitung des Farbraums wird das Warnfeld mit dem Hinweis „Unzulässige Farbe“ angezeigt.

Durch Klicken auf den *OK*-Button wird der Kontrastwert gespeichert und man gelangt zum nächsten Fenster. Der *Abbrechen*-Button schließt das Auswahlfenster und verwirft alle bis dahin vorgenommenen Einstellungen.

3.5.2.4 Bildauswertung

In diesem Fenster wird die vorher eingestellte Farbe mit der gewählten Frequenz und dem gewählten Kontrast nochmals angezeigt. Dazu erhält man als Information die Lab-Werte beider Farben.

Durch Ziehen des Schiebereglers wird die Verrauschung sichtbar. Die Verrauschung erfolgt in drei Richtungen, nach L, C und h, also nach Luminanz, Chrominanz und Farbwinkel. Die drei Richtungen können über die drei Radio-Buttons angewählt werden. (siehe Kapitel 3.5.3)

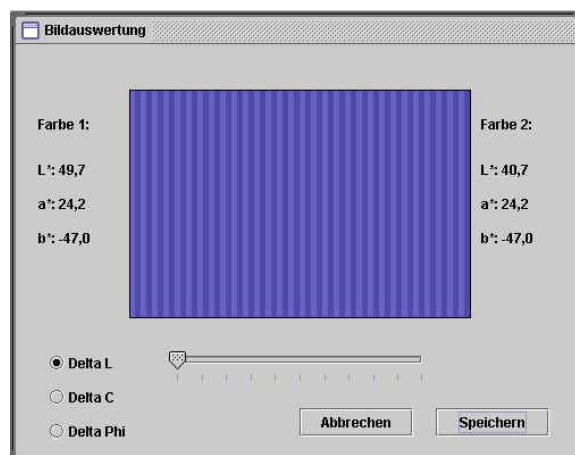


Abbildung 3-26: Bildauswertungsfenster

Die Anzeige des Rauschens ist in diesem Fenster jedoch nur eine Kontrolle. Der Wert des Schiebereglers wird hier noch nicht gespeichert. Dazu muss die Auswertung gestartet werden (siehe Kapitel 3.5.4). Durch den *Speichern*-Button wird das erstellte Bild gespeichert.

3.5.3 Das Verrauschen

Die Rauschwerte werden von der Methode *rauschzahlen* in der Klasse *Sequenz.Rauschen* erzeugt. Die Methode ist aus der Shiraz-Version von Jan Fischer übernommen. Hier wird

„... zur Erzeugung der Rauschwerte ... die in Java implementierte Klasse *Random* verwendet. Diese erzeugt durch die Funktion *nextGaussian()* eine annähernde $N(0;1)$ verteilte Zufallsfunktion. Da bei gleichem Startwert (dem *seed*-Wert) von *Random* die Zufallsfunktion immer die selbe Abfolge von „Zufallszahlen“ liefert, ist sichergestellt, dass jede erzeugte Farbe mit dem selben Muster verrauscht ist.“

[36]

Auszug aus dem Quellcode:

```
private void rauschzahlen(int anzahl) {
    Random zufall = new Random(1);

    for (int m = 0; m < anzahl; m++) {
        rausch[m] = zufall.nextGaussian();
        if (rausch[m] > 2.2) rausch[m] = 2.2;
        if (rausch[m] < -2.2) rausch[m] = -2.2;
    }
}
```

Die Grenzen für die Zufallszahlen werden auf $-2,2$ und $+2,2$ festgelegt. Damit liegen mehr als 95,5% aller Messwerte innerhalb des Wertebereichs (siehe Kapitel 2.4.3: Rauschverteilung). Für Werte, die außerhalb liegen, werden die Grenzwerte eingesetzt.

Es wurde festgelegt, dass sowohl die ausgewählte Farbe als auch die höchste Kontraststufe der Farbe im RGB-Farbraum darstellbar sein müssen. Es ist jedoch

nicht möglich, dass alle errechneten Rauschwerte ebenfalls im Farbraum liegen, da dieser sonst zu sehr eingeschränkt wird. Eine hohe Kontrasteinstellung wäre sonst unmöglich. Deshalb wurde im Programm bei der Überprüfung auf eine zulässige Farbe nur ein Faktor (im Quellcode als *testwert* bezeichnet) von 1,2 eingerechnet. Wäre dieser 2,2, so würden alle Rauschwerte im Farbraum liegen, so aber fallen einige Werte heraus. Diese Werte werden dann auf die Grenzen des Farbraums gesetzt. Sie werden dann zwar nicht korrekt umgesetzt, aber der Farbton weicht dennoch vom ursprünglichen Lab-Farbton ab.

Als Farbraum wurde CIE-Lab gewählt, da Farben darin annähernd gleichabständig dargestellt werden. In den CIE-Farbabstandsformeln sind drei Komponenten enthalten: Helligkeits- und Sättigungsdifferenz, sowie Bunttonbeitrag. Dabei setzt sich der Bunttonbeitrag zusammen aus ΔC und Δh .

Die Verrauschung erfolgt in drei Richtungen, nach ΔL , ΔC und Δh . Die separate Verrauschung dieser drei Komponenten ermöglicht eine gezielte Beurteilung der Rauschwahrnehmung.

Für die Verrauschung nach L wurde eine Sequenz mit 51 Bildern erstellt, die durch Bewegen des Sliders nacheinander aufgerufen werden. Jedes der 51 Bilder ist unterschiedlich stark verrauscht, beginnend mit einer Verrauschung von $\Delta E = 0$ bis $\Delta E = 10$. Somit ergeben sich Abstufungen von $\Delta E = 0,2$ zwischen den einzelnen Bildern. Der Farbabstand ΔE ist bei Verrauschung nach L der Helligkeitsveränderung ΔL gleichzusetzen, als $\Delta E = \Delta L$. Das Gleiche gilt entsprechend für C und h.

Für C und h wurden ebenfalls Sequenzen mit 51 Bildern erstellt, mit dem Unterschied, dass die maximale Verrauschung hier $\Delta E = 15$ ist. Der Abstand zwischen den Bildern beträgt hier also $\Delta E = 0,3$. Die maximale Verrauschung wurde im Gegensatz zur Verrauschung in Richtung L erhöht, weil die Verrauschung in Richtung C und h erst wesentlich später wahrgenommen wird. Aufgrund der hohen Varianz ist eine Abstufung von 0,2 nicht notwendig. Außerdem würde unnötig Speicherplatz und Rechenzeit beansprucht.

Für die einzelnen Bilder einer Sequenz werden die erzeugten Rauschwerte wie folgt mit den Lab-Werten verrechnet:

$$L_{neu} = L_{alt} + \frac{\text{Rauschwert} \cdot \Delta E_{\max} \cdot \text{aktuelles Bild}}{\text{Anzahl der Bilder} - 1} \quad \Delta E_{\max} = \Delta L_{\max} \quad (3.10)$$

Für C und h gilt entsprechendes.

Die verrauschten L-, C- und h-Werte werden nach L*, a* und b* und anschließend nach RGB umgerechnet.

3.5.4 Die Auswertung

Um mit der Auswertung beginnen zu können, müssen die erstellten Bilder in einem Set angelegt werden.

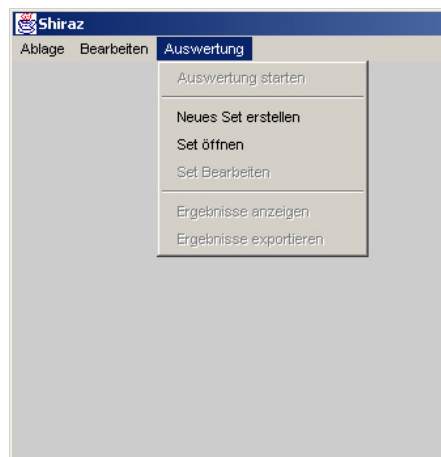


Abbildung 3-27: Auswertung starten

Dazu wird *Auswertung – Neues Set erstellen* gewählt, einen Namen für das Set eingegeben und auf *Speichern* gedrückt. Danach erfolgt eine Aufforderung, Bilder für das Set auszuwählen. Alle angewählten Bilder werden ins Set gespeichert. Jetzt kann die Auswertung gestartet werden.

Das erste im Set befindliche Bild wird geöffnet. Die Oberfläche sieht wie folgt aus:

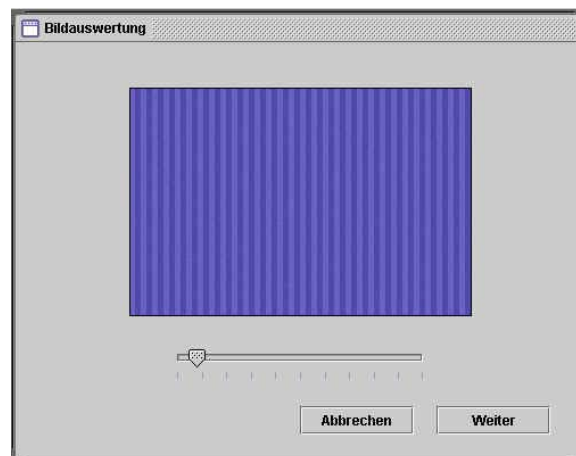


Abbildung 2-28: Bildauswertung

Über den Schieberegler kann hier der Punkt gefunden werden, ab dem Rauschen im Bild sichtbar wird. Die nächste Sequenz (ΔC) wird durch Drücken des *Weiter*-Buttons aufgerufen, denn hier werden nacheinander die drei Richtungen L, C und h einer Farbe abgearbeitet. Anschließend werden die eingestellten Werte gespeichert und das nächste im Set befindliche Bild wird geöffnet.

4. Ergebnisse

4.1 Grundlegendes zur Auswertung

Um eine möglichst große Genauigkeit bei den Messergebnissen zu erzielen, wurden je Set 25 bzw. 26 Personen getestet. Aus den so ermittelten Daten wurde für jedes Testbild der Mittelwert und die Varianz errechnet:

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

$$\text{Varianz} \quad \mu = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1} \quad (4.2)$$

Die einzelnen Ergebnisse der Probanden sind auf der beiliegenden CD abgespeichert, bereinigte Mittelwerte und Varianzen können den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Bei einer grafischen Darstellung der Messwerte in Form eines Diagramms zeigt sich, dass die Messwerte teilweise sehr stark schwanken. Die Varianz (Streuung) der Ergebnisse ist bei der ΔL Sequenz am geringsten, aber sowohl die Werte der ΔC Sequenz als auch die der Δh Sequenz enthalten große Abweichungen vom Mittelwert. Dies wird gut in den drei folgenden Diagrammen deutlich. Als Beispiel wurden die Messergebnisse von Mittelblau bei einer Frequenz von 1/6 LP/Pixel und einem Kontrast 22% gewählt.

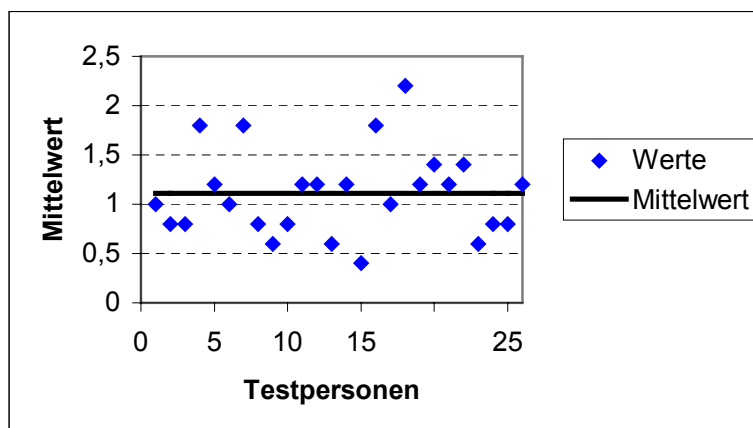


Abbildung 4-1: Messwerte ΔL Sequenz

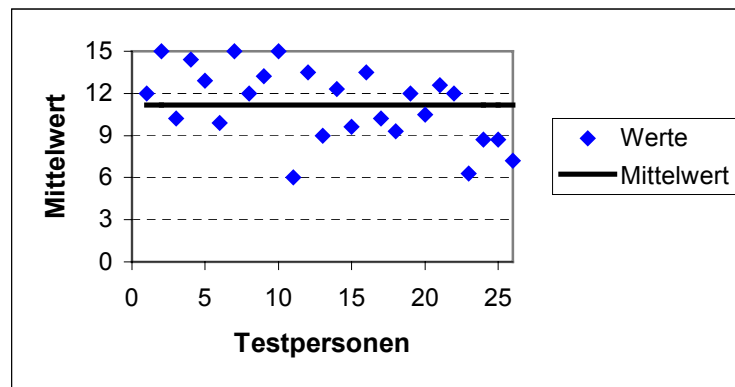


Abbildung 4-2: Messwerte ΔC Sequenz

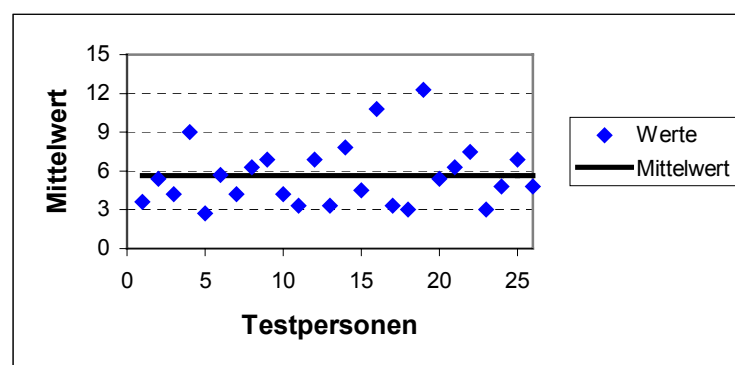


Abbildung 4-3: Messwerte Δh Sequenz

Neben der teilweise sehr großen Streuung der Werte fallen vereinzelte Extrema auf, die sehr stark vom errechneten Mittelwert abweichen. Der Wert Null (= kein Rauschen im Bild zu sehen) entstand durch unbeabsichtigtes Doppelklicken auf den *Weiter*-Button. Diese Ergebnisse wurden aus den Messergebnissen gestrichen. Die anderen Ausrutscher können durch Rauscheinbildung, Konkurrenzdruck oder nachlassende Konzentration seitens der Probanden hervorgerufen worden sein. Da sehr hohe Abweichungen zu einer Verfälschung des Mittelwertes und der Varianz führen, müssen diese Werte rausgenommen werden. Um eine Verfälschung der Ergebnisse gering zu halten, darf die Tabelle nur um möglichst wenig Werte bereinigt werden.

Als Anhaltswert bei der Auswahl der zu entfernenden Werte kann die in der vorausgegangenen Diplomarbeit benutzte Formel

$$\text{Mittelwert} \pm \frac{\text{Varianz}}{2} \quad (4.3)$$

verwendet werden. Es wurden allerdings nur weit von dieser Schwelle entfernte Werte gestrichen, sonst wären besonders in der ΔL Sequenz, die durch sehr geringe Varianz gekennzeichnet ist, zu viele Messergebnisse weggefallen (siehe Abbildung 4-4). Wiederum sind dort die Ergebnisse der Farbe Mittelblau dargestellt, diesmal mit eingezeichneten Grenzen, die nach obiger Formel bestimmt wurden. Aus diesen Messergebnissen wurden keine Werte entfernt.

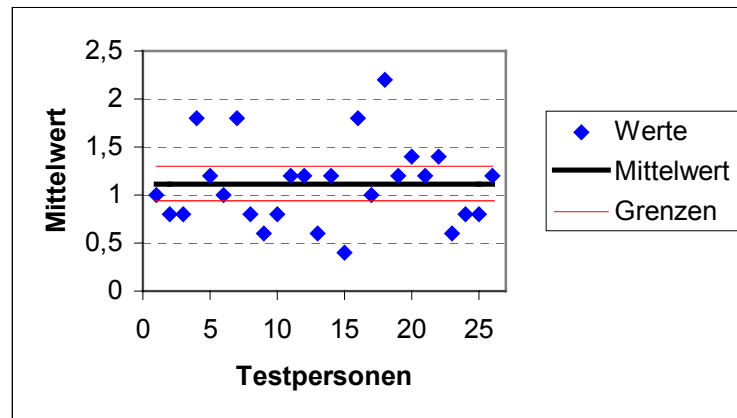


Abbildung 4-4: Messwerte ΔL Sequenz

Der Wert 15 wurde von den Probanden bei einem Nichterkennen des Rauschens eingestellt. Da der Wert dementsprechend nicht fälschlicherweise gewählt wurde, bleibt er in der Tabelle, sofern nicht zu weit vom Mittelwert entfernt, stehen.

4.2 Betrachtung einzelner Komponenten

Die im Anhang dargestellten Messwerte werden im Anschluss ausgewertet.

Befinden sich in Diagrammen Verbindungslinien zwischen den einzelnen Messwerten, so sind diese nicht als Zwischenwerte zu verstehen. Es sollen lediglich die Abstände zwischen den einzelnen Werten besser abgeschätzt werden können.

4.2.1 ΔL , ΔC und Δh

In den beiden nachfolgenden Diagrammen werden die Mittelwerte von ΔL , ΔC und Δh für Pseudorot und Mittelblau gegenüber gestellt.

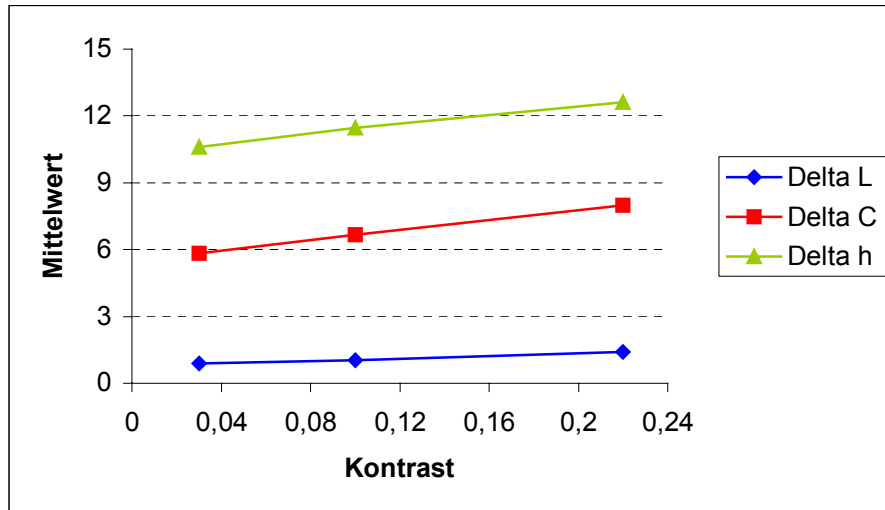


Abbildung 4-5: Mittelwert der Rauschwahrnehmung von Pseudorange

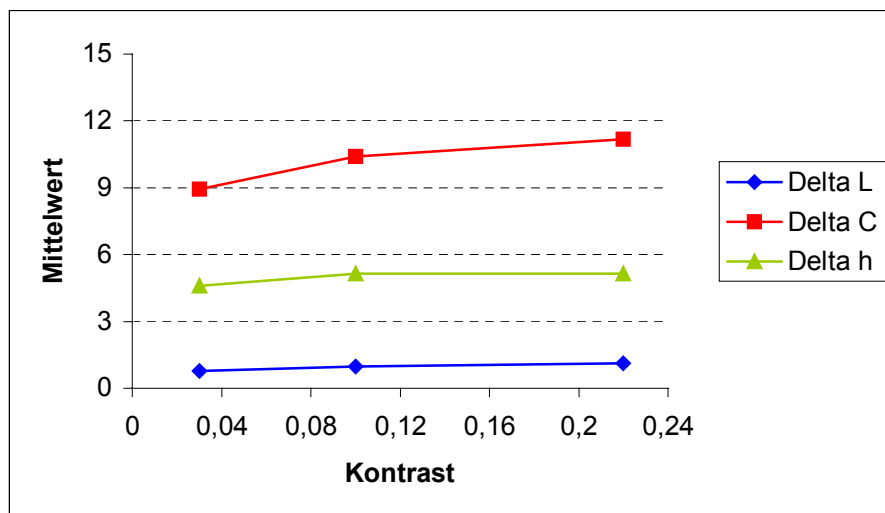


Abbildung 4-6: Mittelwert der Rauschwahrnehmung von Mittelblau

Es lässt sich daraus ablesen, dass das Rauschen in ΔL -Richtung am ehesten gesehen wird. Dies gilt für alle getesteten Farben, Kontraste und Frequenzen und kann für alle folgenden Auswertungen vorausgesetzt werden.

Die Wahrnehmung von Rauschen in ΔC - und Δh -Richtung variiert sehr stark. Bei manchen Farben ist das Rauschen in C-Richtung früher zu sehen als in h-Richtung, bei anderen Farben ist das umgekehrt. Wovon das abhängt, wird in den nachfolgenden Kapiteln untersucht.

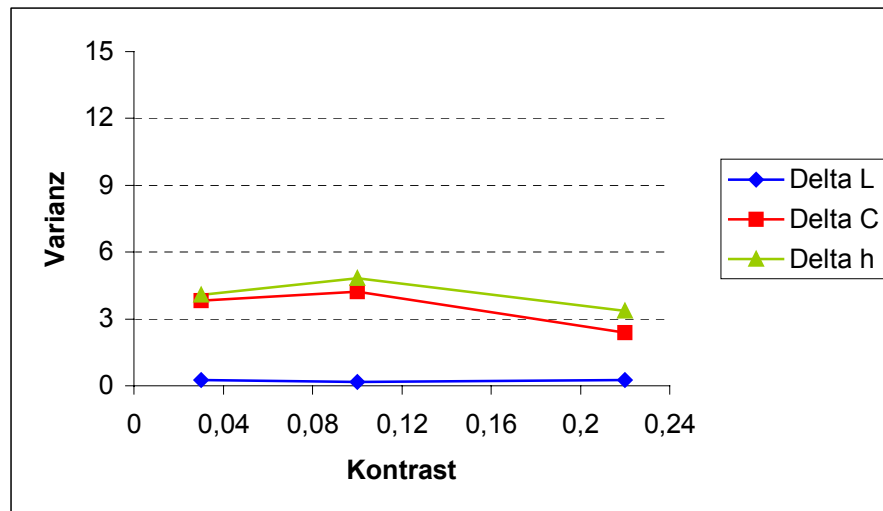


Abbildung 4-7: Varianz von Pseudorot

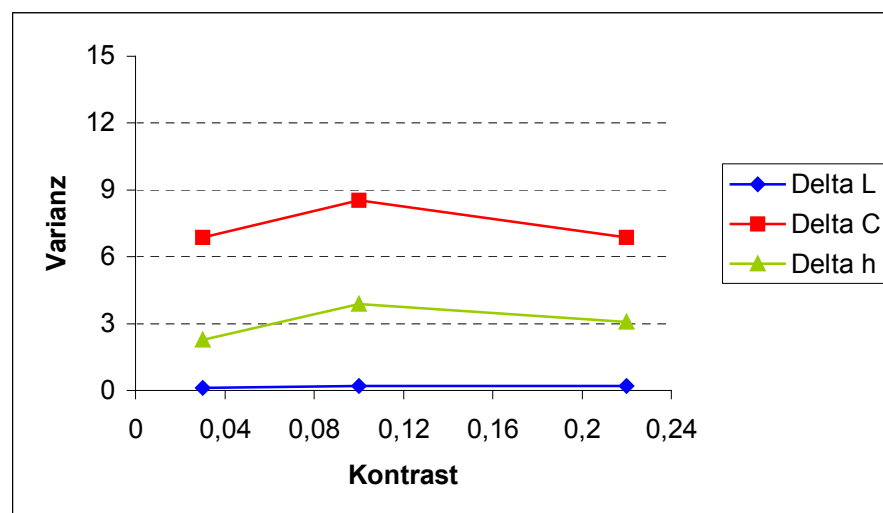


Abbildung 4-8: Varianz von Mittelblau

Die Varianz bei ΔL ist sehr gering. Die ΔC - und Δh -Sequenzen weisen dagegen sehr hohe und sehr stark schwankende Varianzen auf.

4.2.2 Kontrast und Frequenz

Für die Auswertung hinsichtlich Kontrast und Frequenz wurden beispielhaft Diagramme für Mittelblau und Pseudorot abgebildet.

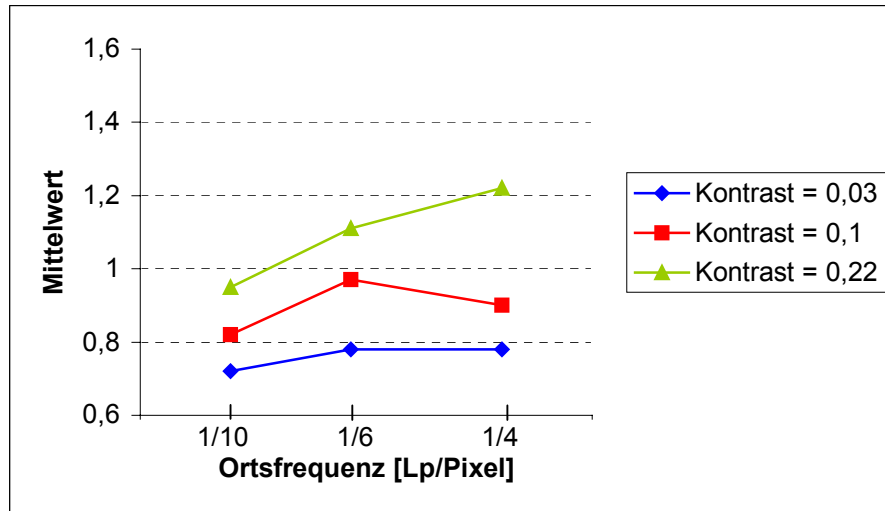


Abbildung 4-9: Mittelblau (ΔL)

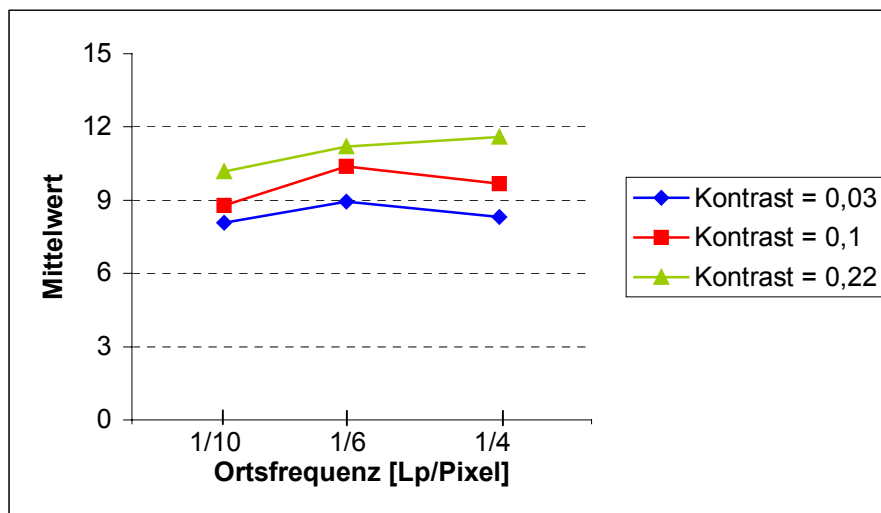


Abbildung 4-10: Mittelblau (ΔC)

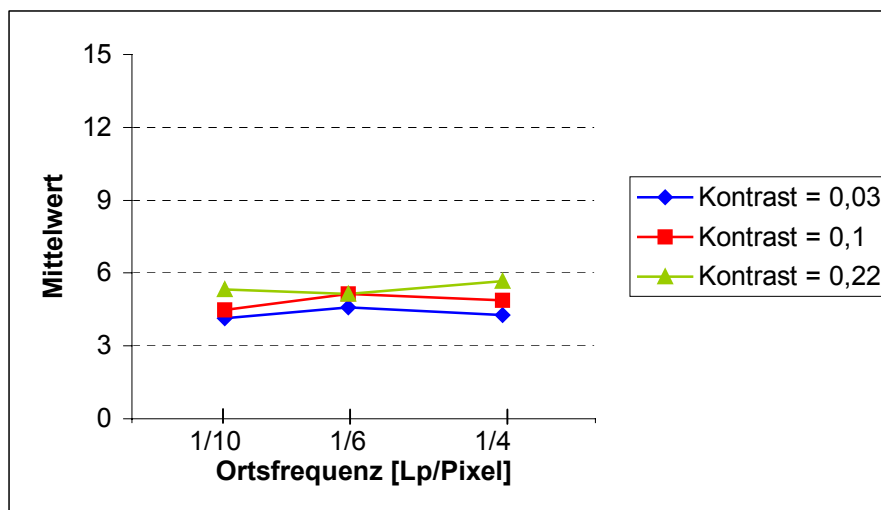
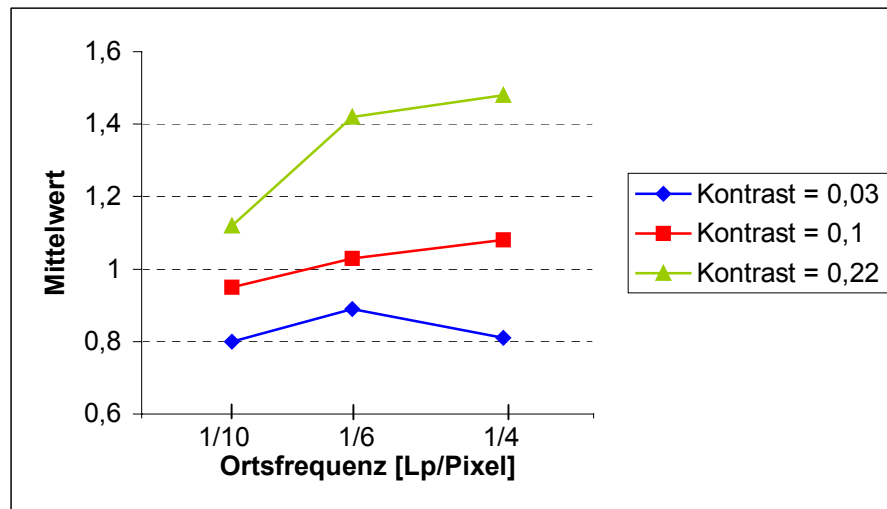
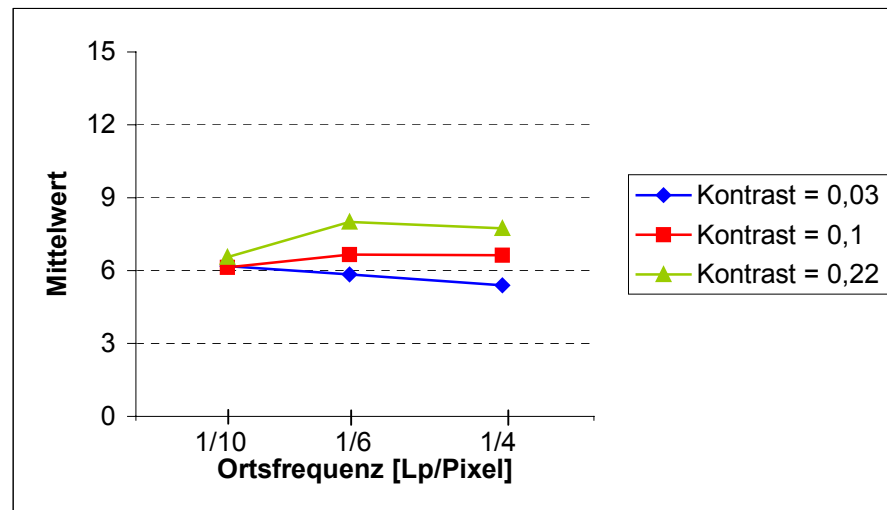
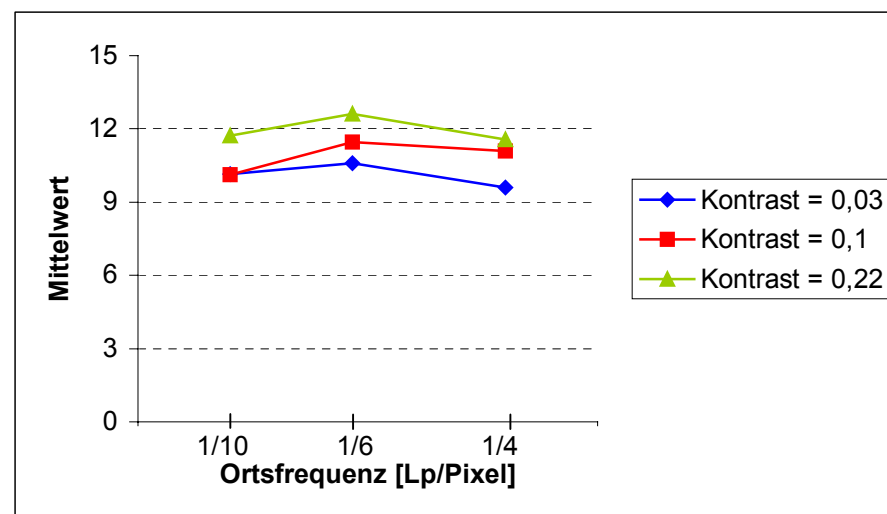


Abbildung 4-11: Mittelblau (Δh)

Abbildung 4-12: Pseudorot (ΔL)Abbildung 4-13: Pseudorot (ΔC)Abbildung 4-14: Pseudorot (Δh)

Grundsätzlich lässt sich für die 5 getesteten Farben festhalten, dass mit ansteigendem Kontrast das Rauschen im Bild erst später gesehen wird. Für die Frequenz lässt sich das nicht so eindeutig feststellen. Es besteht zwar die Tendenz, dass bei höherer Frequenz das Rauschen später zu erkennen ist als bei niedriger Frequenz, jedoch gibt es hier einige Ausnahmen. Beispielsweise hat Pseudorot (Δh) bei der Ortsfrequenz von $1/6$ Lp/Pixel ein Maximum, während die Rauschwahrnehmungsschwelle bei den Frequenzen $1/4$ und $1/10$ abfällt.

4.2.3 Sehr kleiner und sehr großer Kontrast

In Abbildung 4-15 wurde für Grau noch zusätzlich ein sehr kleiner und sehr großer Kontrast dargestellt. Dazu wurden im Diagramm die Messwerte von der Farbe Hellgrau mit einem Kontrast von 3% , 10% und 22% und die Farbe Grau mit einem Kontrast von 1% und 65% eingetragen. Die Frequenz betrug einheitlich $1/4$ Lp/Pixel. Hellgrau und Grau haben unterschiedliche L^* -Werte. Dieser Helligkeitsunterschied macht sich jedoch bei der Wahrnehmung des Rauschens kaum bemerkbar. Die genaue Auswertung dazu erfolgt in Kapitel 4.2.4.

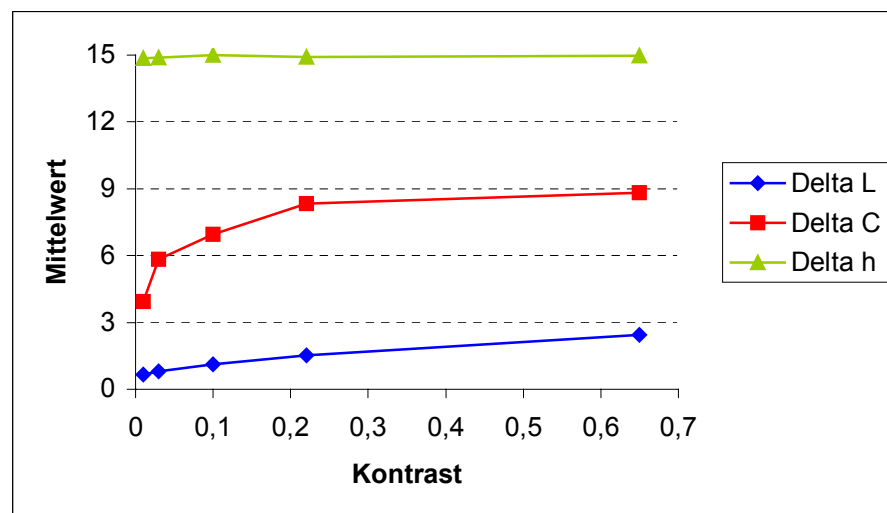


Abbildung 4-15: Hellgrau und Grau

Aus der Abbildung 4-15 lässt sich, wie auch oben schon ausgewertet, ablesen, dass die Schwelle, ab der Rauschen wahrgenommen wird, mit steigendem Kontrast immer höher wird. Eine Ausnahme stellt hier Δh dar, welches, von kleinen Schwankungen abgesehen, konstant 15 ist. Warum das so ist, wird in Kapitel 4.2.7 behandelt.

Eine Auswertung der Varianz zeigt, dass diese mit steigendem Kontrast auch stark zunimmt. Selbst die Varianz von ΔL , welche bei niedrigem Kontrast immer nahezu Null war, nimmt bei einem Kontrast von 65% zu. Folglich ist es mit höherem Kontrast immer schwieriger, die Schwelle, ab der Rauschen erkennbar wird, eindeutig zu bestimmen. Das wurde schon bei der Durchführung der Tests deutlich. Bei der Farbe Grau mit einem Kontrast von 65% war das Einstellen des Sliders sehr schwierig, denn beim Betrachten flimmerte das Bild auf dem Monitor. Es wird aber vom Monitor korrekt aufgelöst. Die Breite der Streifen beträgt 2 Pixel bei der Frequenz $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel.

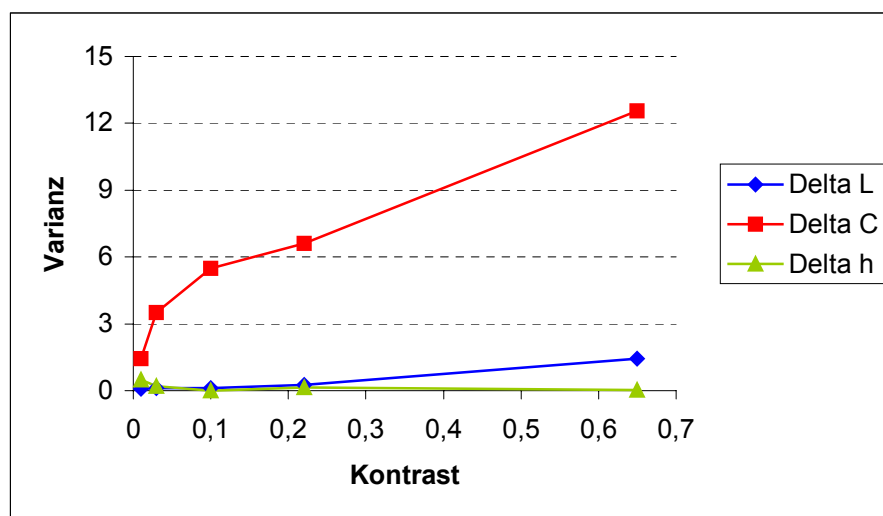


Abbildung 4-16: Varianz von Grau und Hellgrau

Im Folgenden eine Betrachtung der Faktoren L^* , C und h , sowie a^* und b^* .

4.2.4 Helligkeit (Luminanz)

In Abbildung 4-17 sind die Farben (Blau, Braun, Cyan, Gelb, Grün, Haut, Hellblau, Magenta, Mittelblau, Mittelgrün, Olivgrün, Pseudorot und Violett mit einem Kontrast von 10% und Frequenz von $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel nach der mittleren Helligkeit sortiert dargestellt. Die Messwerte von ΔL befinden sich im unteren Teil des Diagramms, während die Werte der Wahrnehmungsgrenzen von ΔC und Δh gehäuft in der Mitte des Diagramms auftreten. Beim Helligkeitswert 55 befinden sich die Messergebnisse von 2 Farben gleicher Helligkeit. Bei einer Farbe wird die Verrauschung nach Chrominanz vor der nach dem Farbtonwinkel wahrgenommen, bei der anderen entsprechend vertauscht.

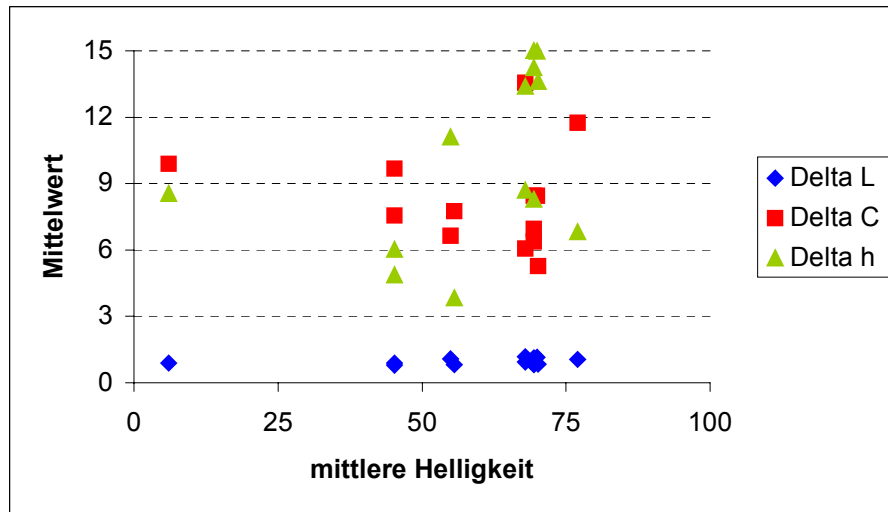


Abbildung 4-17: Alle Messergebnisse nach aufsteigender Helligkeit sortiert

Steigende oder fallende Tendenzen der Wahrnehmungsschwellen mit zunehmender Helligkeit sind nicht auszumachen. Die anderen Parameter der Farben (a^* und b^*) scheinen einen zu großen Einfluss auf die Wahrnehmung auszuüben.

Die Varianz nimmt Werte zwischen nahezu Null und 14 an. Auch hier ist kein Zusammenhang zur Helligkeitszunahme zu erkennen. Die Rauschschwellen der einzelnen Farben lassen sich bei gleicher Helligkeit $L=55$ unterschiedlich genau bestimmen.

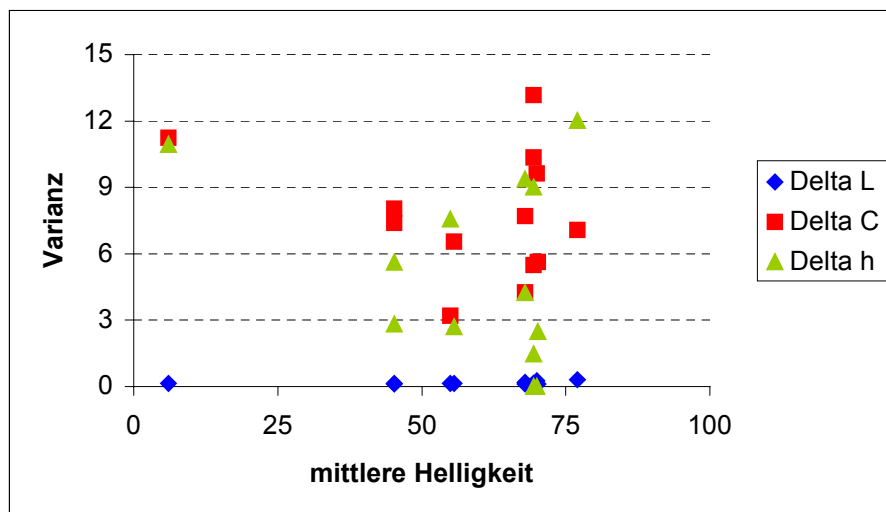


Abbildung 4-18: alle Farben nach Helligkeit sortiert

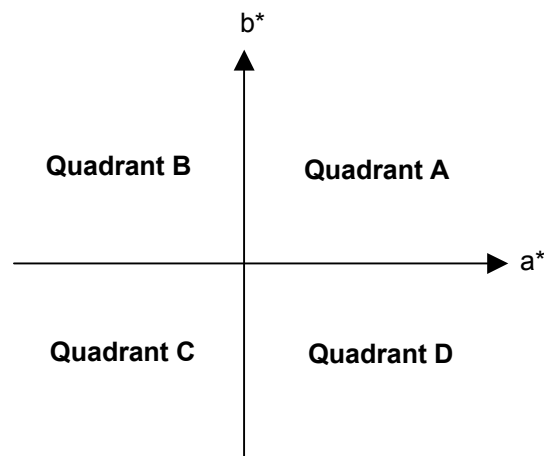


Abbildung 4-19: Quadranten

Eine Betrachtung des Quadranten A hingegen liefert etwas aufschlussreichere Ergebnisse: In diesem Sektor der a^*b^* -Darstellung liegen die Farben Pseudorot, Haut und Braun (in dieser Reihenfolge in Abbildung 4-20 zu finden). Werden sie nach den Helligkeitswerten angeordnet, ergibt sich folgendes Bild:

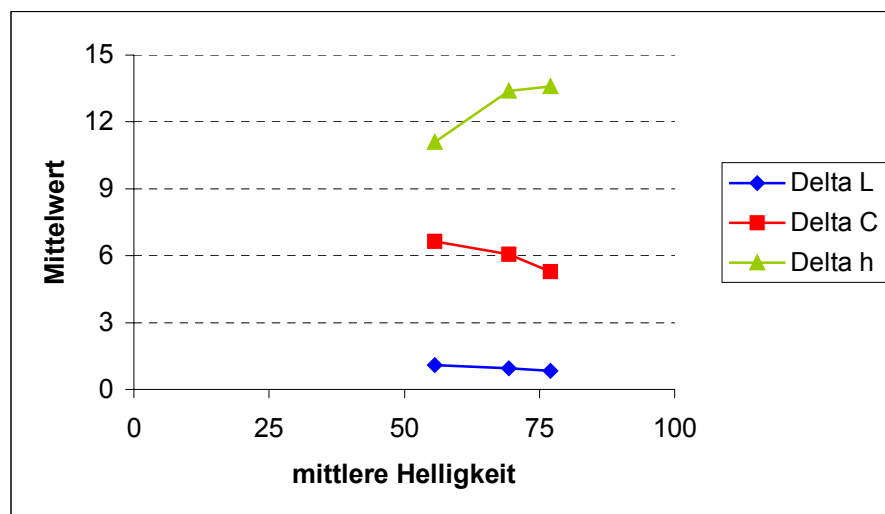


Abbildung 4-20: Abbildung der Farben Quadrant A

Die Wahrnehmung bei Verrauschung nach Δh ist am schlechtesten, darunter liegt die von ΔC , am besten werden wiederum Veränderungen nach ΔL erkannt.

Mit zunehmender mittlerer Helligkeit, wird eine Änderung nach Δh immer später bemerkt, während Verrauschung nach ΔC und ΔL besser zu sehen ist.

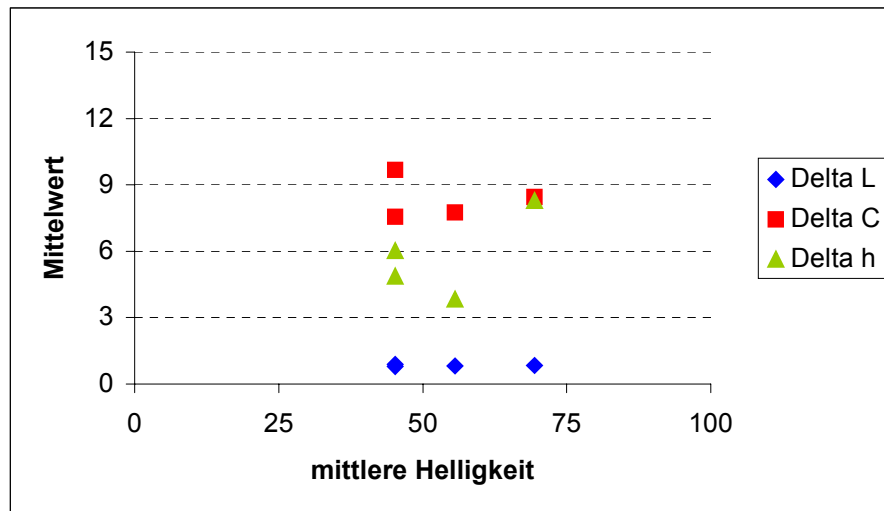


Abbildung 4-21: Quadrant D

Eine Betrachtung des Quadranten D (Blau, Mittelblau, Magenta, Violett) relativiert diese Aussage. Dadurch, dass zwei Farben mit gleicher Helligkeit (Blau und Mittelblau) stark voneinander abweichende Wahrnehmungsschwellen besitzen, kann keine eindeutige Aussage über steigende oder fallende Tendenzen bei einer Helligkeitszunahme getroffen werden.

Festzustellen ist jedoch, dass die Schwelle für eine Verrauschung in diesem Quadranten für ΔC am schlechtesten wahrgenommen wird. ΔC und Δh haben also, verglichen mit Quadrant A, ihre Reihenfolge geändert.

Auch die Farben der Quadranten B (Grün, Mittelgrün, Olivgrün, Gelb) und C (Hellblau, Cyan) werden im Folgenden nach ihrer Helligkeit sortiert dargestellt:

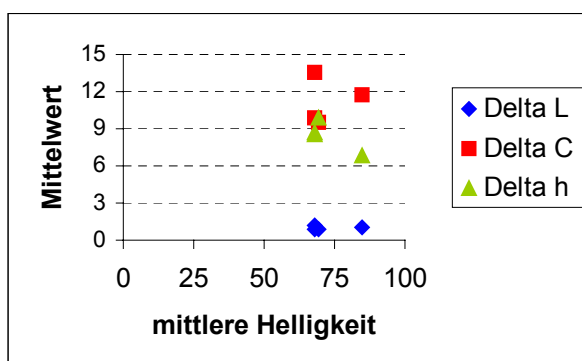


Abbildung 4-22: Quadrant B

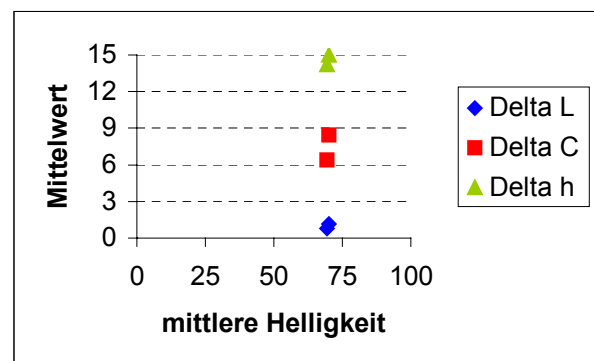


Abbildung 4-23: Quadrant C

Die Schwellen (ΔL , ΔC , Δh) für die Verrauschung des Quadranten B entsprechen in ihrer Reihenfolge denen des Sektors D, ebenso wie Quadrant C dem Sektor A gleicht.

Eine eindeutige Aussage über Steigung oder Gefälle der Werte mit zunehmender Helligkeit kann nicht getroffen werden. Hierzu liegen auch die Helligkeiten der Farben zu dicht beieinander.

Eine Beeinflussung der Diagramme durch die relativ großen Varianzen ist wiederum nicht auszuschließen. Wie aus Abbildung 4-24 hervorgeht, nehmen die Varianzen für ΔC und Δh relativ hohe Werte an.

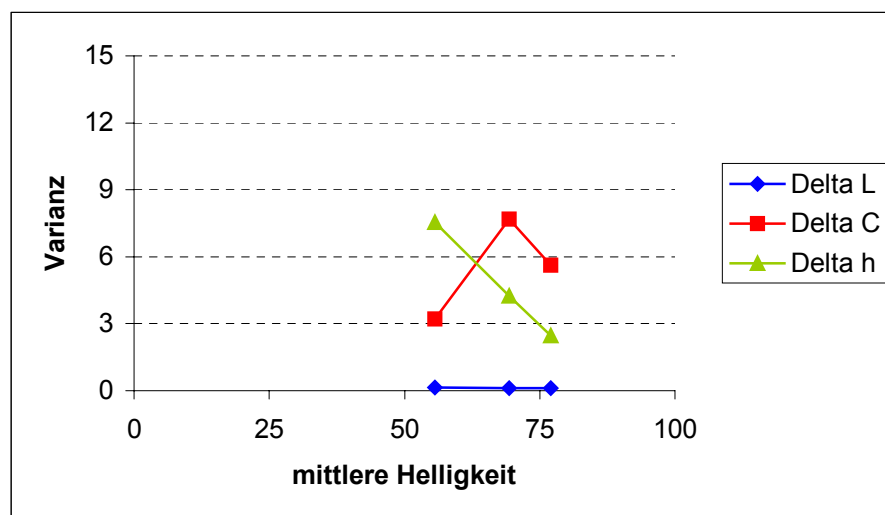


Abbildung 4-24: Quadrant A

Vielleicht gibt ja die Betrachtung von Grautönen unterschiedlicher Helligkeitswerte Aufschluss über die Abhängigkeit der Rauschwahrnehmung von der Bildhelligkeit. Für Grau (Dunkelgrau, Hellgrau, Dunkelweiß mit einem Kontrast von 3% und einer Frequenz von $\frac{1}{4}$ LP/Pixel) sind die a^* - und b^* Werte nahezu Null und können somit keinen Einfluss ausüben.

Die Mittelwerte für Δh liegen bei 15 (Abbildung 4-25). Das bedeutet, dass die Probanden kein Rauschen wahrnehmen konnten (Begründung siehe Kapitel.4.2.7). Für ΔC sinkt die Schwelle mit zunehmender Helligkeit, die Messwerte von ΔL nehmen nahezu konstante Werte an.

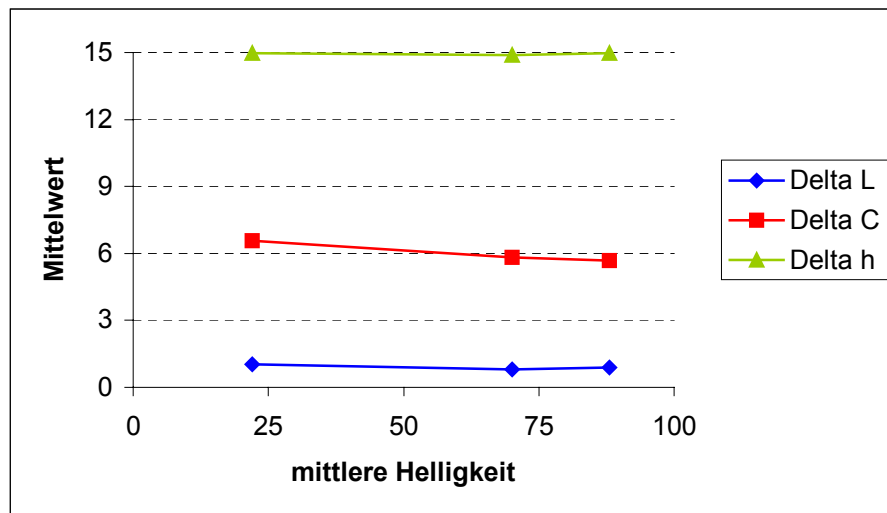


Abbildung 4-24: Grautöne

4.2.5 a*- und b*-Wert

Eine Abhängigkeit von der Größe des a*-Wertes ist nicht auszumachen:

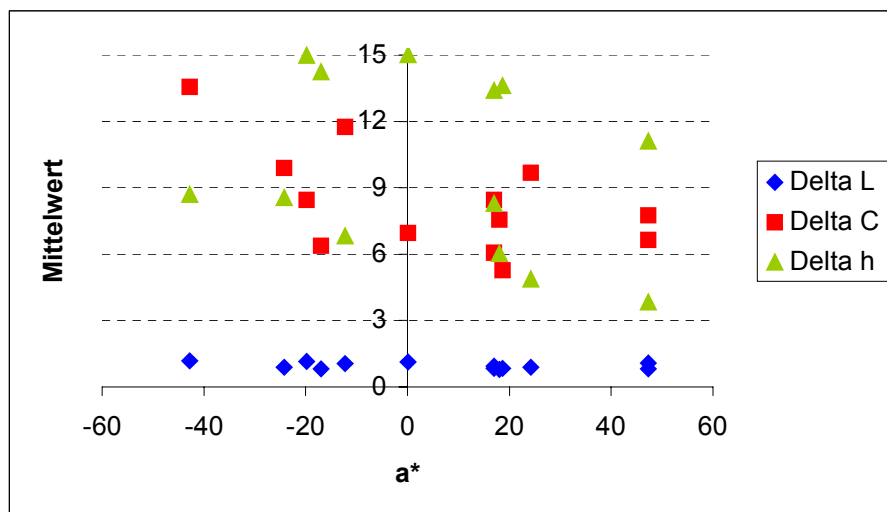


Abbildung 4-25: Farben nach a*-Wert sortiert

Auch bei der Darstellung der Rauschschwellen in Abhängigkeit vom b*-Wert (Abbildung 4-27) lässt sich kein Zusammenhang erkennen. Die Messergebnisse erscheinen ungeordnet, eine Schlussfolgerung ist nicht möglich.

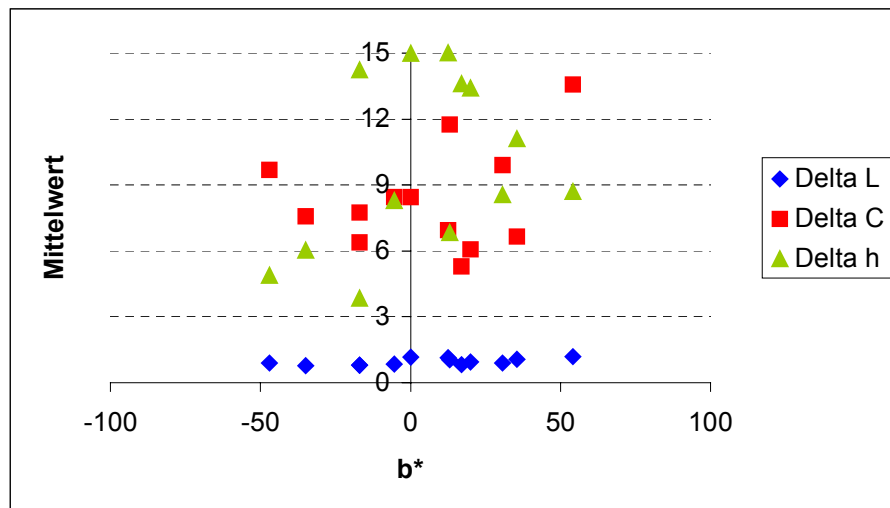


Abbildung 4-27: Farben nach b*-Wert sortiert

4.2.6 Chrominanz

Nachdem durch die Betrachtung der Werte in Verbindung mit der Helligkeit, dem a^* - und dem b^* -Wert keine eindeutige Aussage getroffen werden konnte, liefert vielleicht die Untersuchung der Sättigung (Chrominanz) neue Ergebnisse.

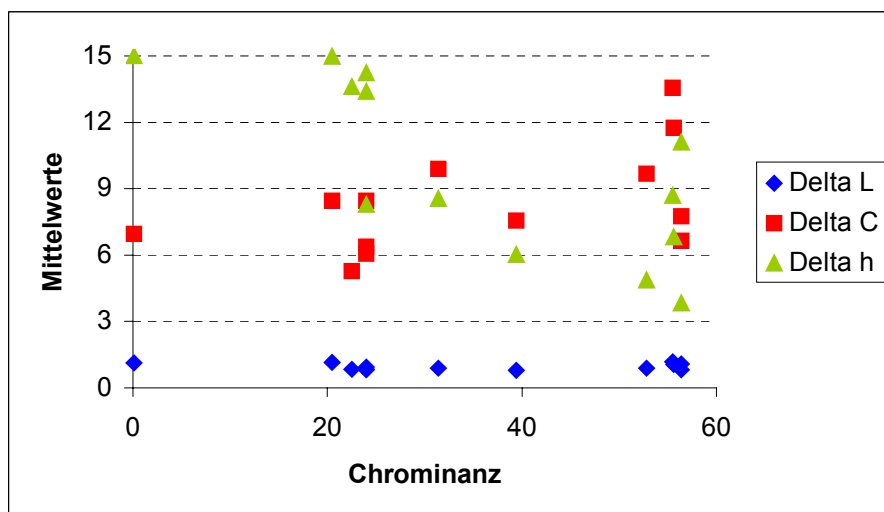


Abbildung 4-28: Alle Farben nach steigender Chrominanz sortiert

Zunächst wird versucht, alle Farben nach der Größe der Chrominanz zu ordnen. Es ist keine eindeutige Abhängigkeit zu erkennen. Die Wahrnehmung der Verrauschungsschwellen von Chrominanz und Farbton sind nicht eindeutig getrennt.

Die Betrachtung des Quadranten B (Reihenfolge: Olivgrün, Grün, Mittelgrün, Gelb) ist etwas aufschlussreicher. Die Werte von ΔC steigen mit zunehmender Chrominanz, während die von Δh fallen. Für ΔL bleiben sie konstant bei niedrigen Messwerten. Dies geht aus Abbildung 4-29 hervor.

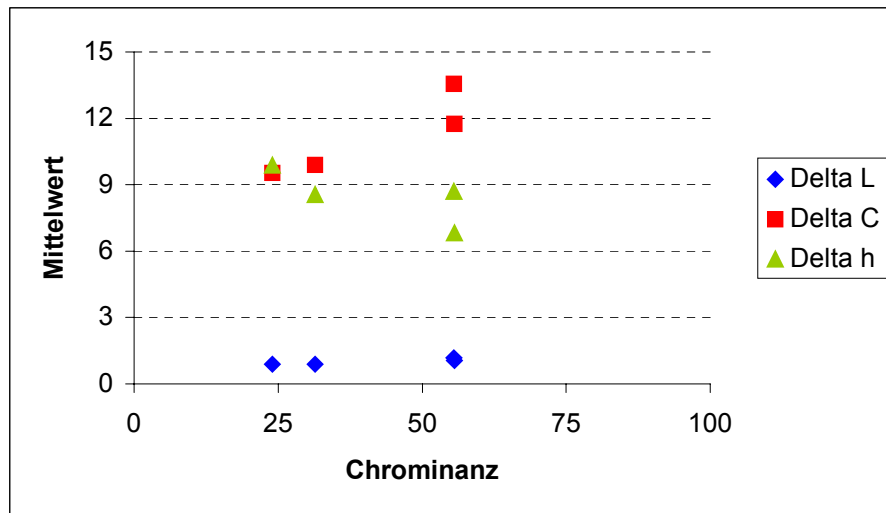


Abbildung 4-29: Quadrant B

Wie auch bei der Sortierung nach der Helligkeit zu beobachten, ergeben sich bei fast gleicher Sättigung ($C = 55,5$ bzw. $55,6$) zweier Farben (Mittelgrün und Gelb) unterschiedlich hohe Schwellenwerte für die betrachteten Größen. Vielleicht bringt eine andere Farbauswahl aufschlussreichere Ergebnisse.

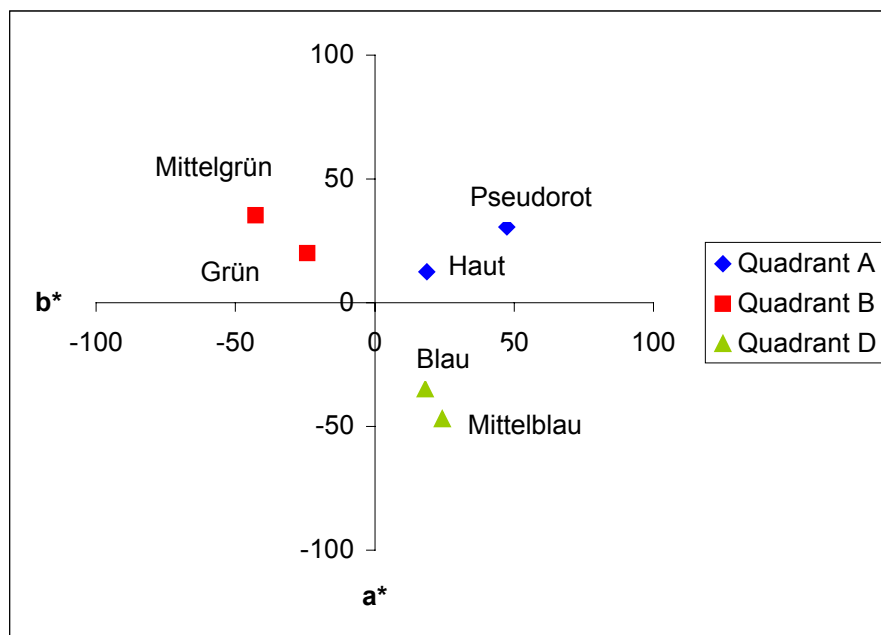


Abbildung 4-30: Farbdarstellung im a*b*-Diagramm

Jeweils zwei Farben liegen auf dem gleichen Winkel, die Verteilung ist symmetrisch im Raum. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Testbildern wurde auf die Untersuchung des Quadranten C verzichtet.

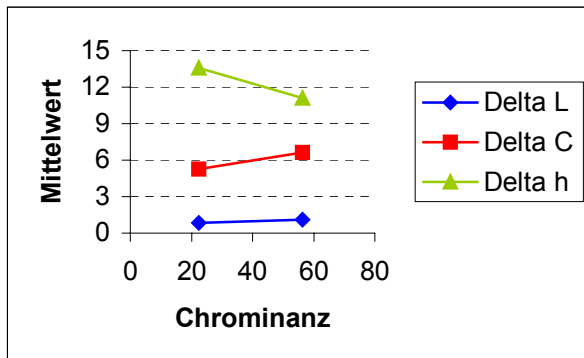


Abbildung 4-31: Quadrant A

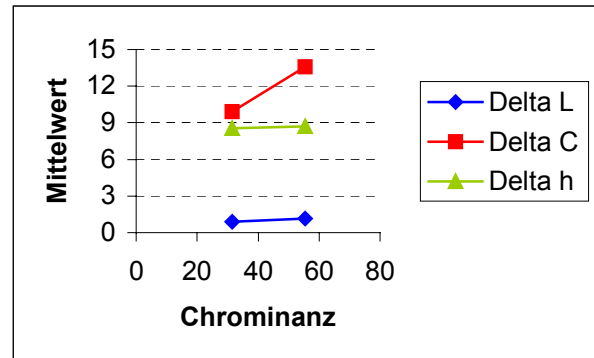


Abbildung 4-32: Quadrant B

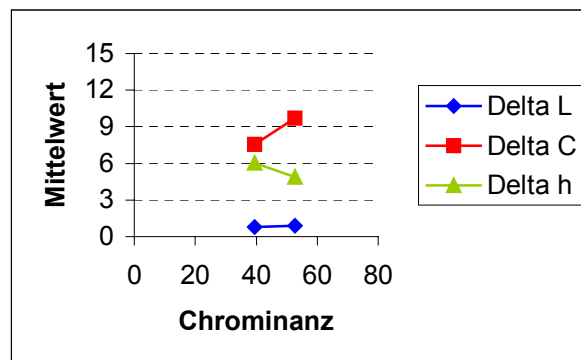


Abbildung 4-33: Quadrant D

Wie schon zuvor herausgestellt, besteht zwischen Quadranten B und D eine Ähnlichkeit in der Messwertverteilung. Zum Sektor A sind deutliche Unterschiede sichtbar (Abbildungen 4-31, 4-32, 4-33). Steigende und fallende Tendenzen der Rauschwahrnehmung der ΔL , ΔC und Δh -Sequenz mit steigender Chrominanz können denselben Abbildungen entnommen werden.

Ob die sichtbaren Tendenzen auch denen einer ausführlicheren Messung entsprechen, kann schlecht beurteilt werden. Je Farbwinkel wurden nur zwei Farben getestet, dies macht eine Mittelung der Werte unmöglich. Auch treten bei den Messergebnissen teilweise sehr hohe Varianzen auf.

Bei einer hohen Sichtbarkeitsschwelle sind meist auch die Varianzen groß. Natürlich gibt es auch von dieser Aussage Abweichungen. Im Folgenden sind hier die Varianzen zu den vorausgehenden Diagrammen abgebildet.

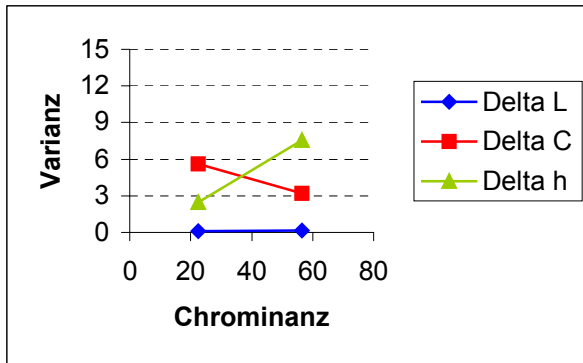


Abbildung 4-34: Quadrant A

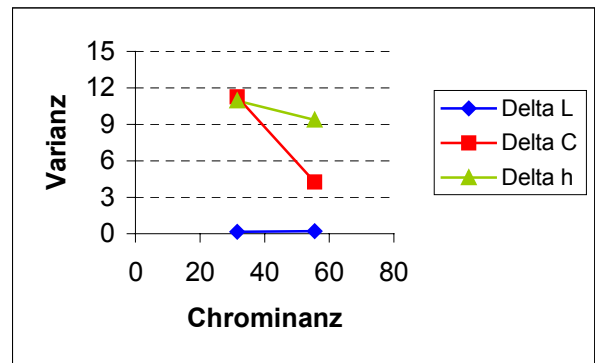


Abbildung 4-35: Quadrant B

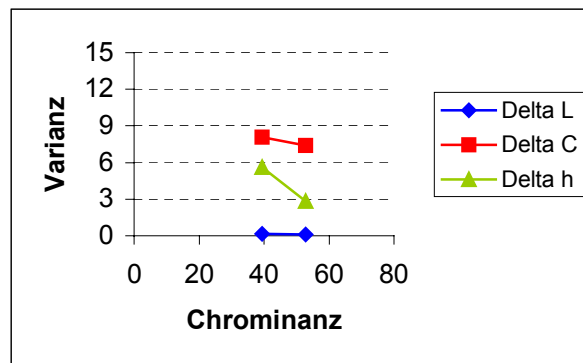


Abbildung 4-36: Quadrant D

Werden die Farben gleicher Sättigung (Reihenfolge: Braun, Olivgrün, Hellblau, Violett) miteinander verglichen, ist die symmetrische Verteilung der Messwerte sehr auffällig. In Abbildung 4-37. sind die Daten nach dem Farbtonwinkel sortiert, ausgehend vom Quadrant A gegen den Uhrzeigersinn.

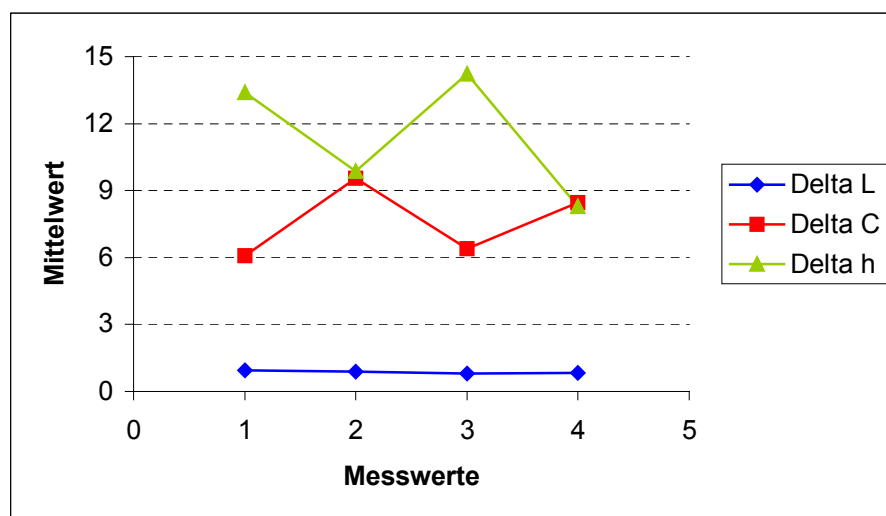


Abbildung 4-37: Farben gleicher Sättigung

ΔC und Δh nehmen in Quadranten B und D nahezu identische Werte an (ca. 9), während sie in Quadranten A und C deutlich auseinanderliegen. Die Wahrnehmung der Verrauschung nach Δh liegt dort bei Werten von 14, während die nach ΔC schon bei 6 bemerkt wird.

Die Varianzen sind asymmetrisch verteilt. Sie steigen bis auf sehr hohe Werte an. Die Streuung der Farbe Hellblau beträgt für ΔC 13.

Deutlich ist zu erkennen, dass bei einer Unterteilung der Farben nach den einzelnen Quadranten, mit zunehmender Sättigung die Verrauschung nach Δh geringer sein muss, um von den Probanden wahrgenommen werden zu können.

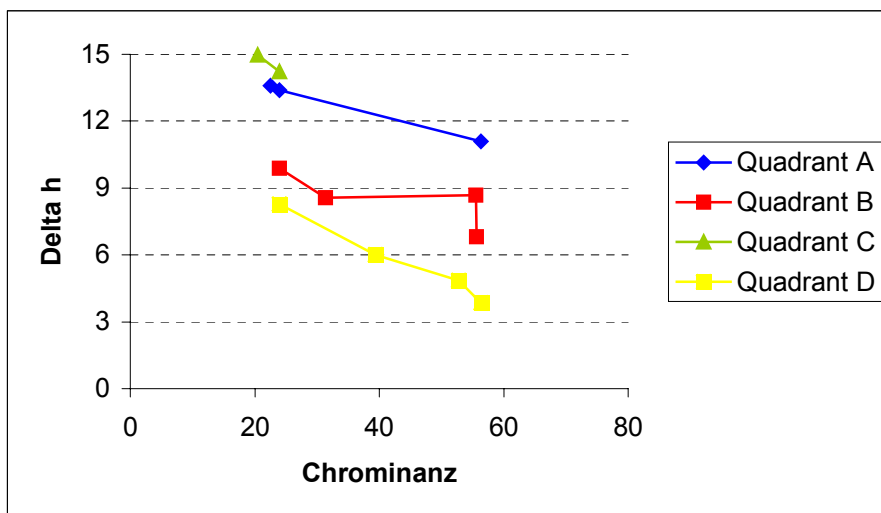


Abbildung 4-38: Abhängigkeit der Größe der Verrauschung von C^*

Diese Feststellung kann auch durch eine Zeichnung belegt werden:

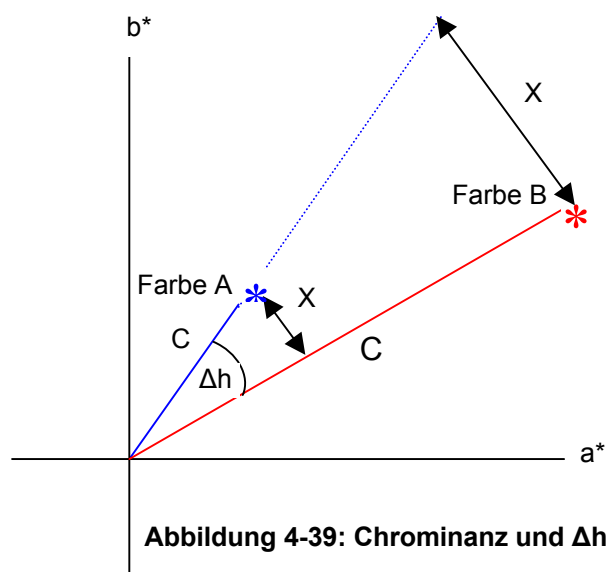


Abbildung 4-39: Chrominanz und Δh

Bei einer Farbe mit geringer Sättigung (Farbe A) ist bei gleichem Winkel Δh der Abstand X deutlich kleiner als bei der Farbe mit hoher Chrominanz (Farbe B).

Grautöne ändern sich bei einer Verrauschung nach Δh nicht, da C nahezu Null ist. Dies wurde von den meisten Probanden korrekt erkannt: Der Mittelwert der Verrauschung nach Δh beträgt fast immer 15.

4.2.7 Farbtonwinkel

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde häufig die Reihenfolge der Rauschwahrnehmung ΔL , ΔC , Δh vom Quadranten angesprochen.

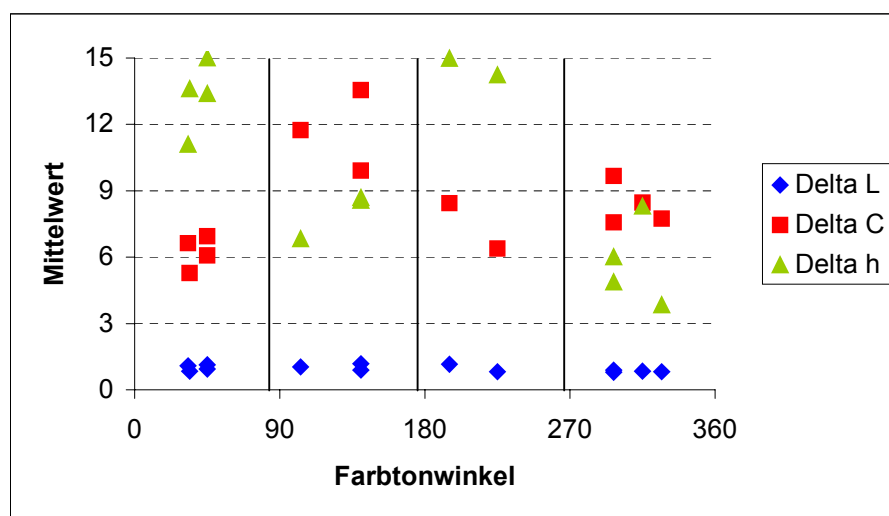


Abbildung 4-40: Farben sortiert nach dem Farbtonwinkel

Durch die Anordnung der Ergebnisse nach ihrem Farbtonwinkel (Grau ist nicht im Diagramm mit abgebildet) soll diese näher untersucht werden. Bisherige Ergebnisse können bestätigt werden. Ob ΔC oder Δh zuerst sichtbar werden, scheint direkt mit dem Quadranten, in dem die Farbe liegt, bzw. mit dem Farbtonwinkel, verknüpft zu sein. Diese Aussage kann jedoch nur bezüglich der untersuchten Farben getroffen werden.

4.2.8 Ähnliche Farben

Den bisherigen Ausführungen zu Folge, wird die Rauschwahrnehmung von der Größe der Chrominanz in Verbindung mit dem Farbtonwinkel relativ stark beeinflusst. Bei der Betrachtung zweier Farben, die im a^*b^* -Diagramm dicht beieinander liegen (Reihenfolge: Haut, Braun), sollten also für die Wahrnehmungsschwellen ähnliche Ergebnisse festgestellt worden sein.

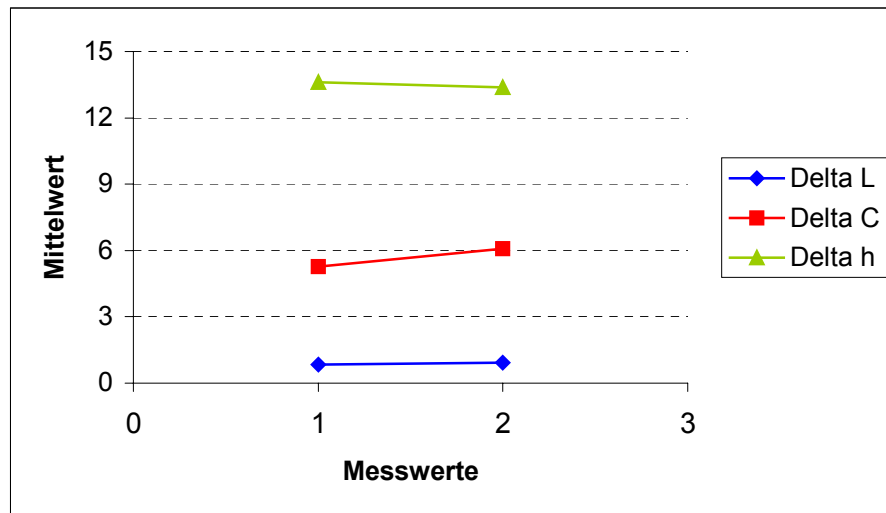


Abbildung 4-41: Ähnliche Farben

Wie in Abbildung.4-41 sichtbar, bestätigen sich diese Vermutungen bezüglich der Mittelwerte. Es sind nur geringe Differenzen bei Δh , ΔC und ΔL zu erkennen.

Eine Betrachtung der Varianzen (Abbildung.4-42) zeigt, dass diese relativ stark zwischen den Farben variieren.

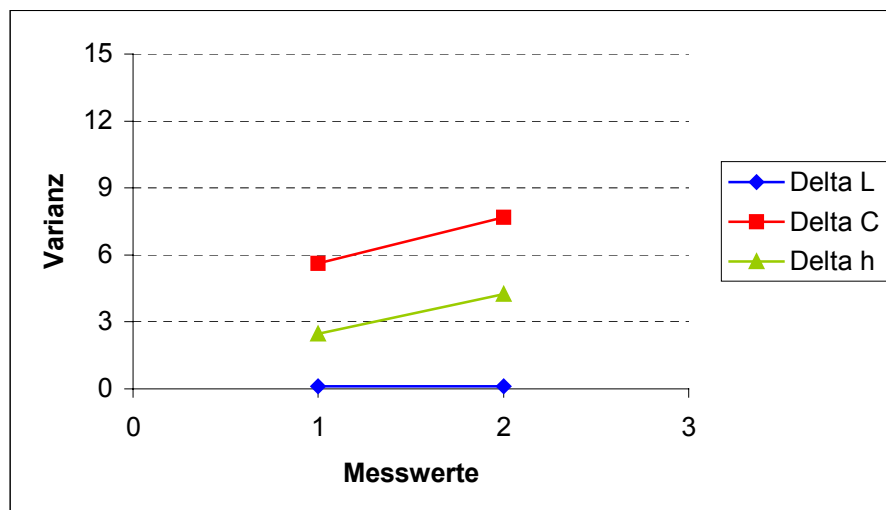


Abbildung 4-42: Ähnliche Farben

4.3 Betrachtung der Farbabstandsformeln

Neben den einzelnen Komponenten, die bisher betrachtet worden sind, können auch die Farbabstände zwischen verrauschter und unverrauschter Farbe untersucht werden.

Unter Zuhilfenahme der in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Farbabstandsformeln soll die Berechnung erfolgen. Es ergeben sich je betrachtetem Bild für die Verrauschung drei Farbabstände: ΔL , ΔC und Δh .

Für die Verrauschung nach ΔC bleibt der Farbtonwinkel konstant und lediglich die Sättigung der Farbe ändert sich. Es müssen folgende Gleichungen benutzt werden:

$$C_{neu} = C^* + \Delta C$$

$$b_{neu} = \sin h_{ab} \cdot C_{neu} \quad (4.4)$$

$$a_{neu} = \cos h_{ab} \cdot C_{neu}$$

ΔL und Δh werden mit 0 in die Gleichung eingesetzt, da sich diese Größen hier nicht ändern.

Im Gegensatz dazu bleibt bei Verrauschung nach Δh die Chrominanz der Farbe erhalten, nur der Farbtonwinkel ändert sich, ΔC und ΔL sind Null. Es gilt:

$$h_{neu} = h_{ab} + \Delta h$$

$$b_{neu} = \sin h_{neu} \cdot C^* \quad (4.5)$$

$$a_{neu} = \cos h_{neu} \cdot C^*$$

Bei der Verrauschung nach ΔL ändert sich lediglich der L^* -Wert. ΔC und Δh sind Null.

$$L_{neu} = L^* + \Delta L \quad (4.6)$$

C^* = Chrominanz der unverrauschten Farbe

C_{neu} = Chrominanz der verrauschten Farbe

ΔC = Wert aus Messungen

h_{ab} = Farbtonwinkel der unverrauschten Farbe

h_{neu} = Farbtonwinkel der verrauschten Farbe

a_{neu} = a^* -Wert der verrauschten Farbe

b_{neu} = b^* -Wert der verrauschten Farbe

Durch Einsetzen in die Farbabstandsformeln ergeben sich im Anhang befindliche Farbabstände, die im Anhang nachzulesen sind.

Im Folgenden eine Darstellung der 3 Farbabstandsformeln in Abhängigkeit von Frequenz und Kontrast. Die Aspekte Verrauschung nach ΔL , ΔC und Δh werden jeweils in verschiedenen Diagrammen betrachtet. Da sich bezüglich ΔL ähnliche Aussagen treffen lassen, erfolgt eine gemeinsame Untersuchung der Diagramme von Kontrast und Frequenz. Dies gilt ebenso für ΔC und Δh .

Verbindungslinien stellen keine Zwischenwerte dar, sondern dienen der Veranschaulichung.

ΔL -Diagramme

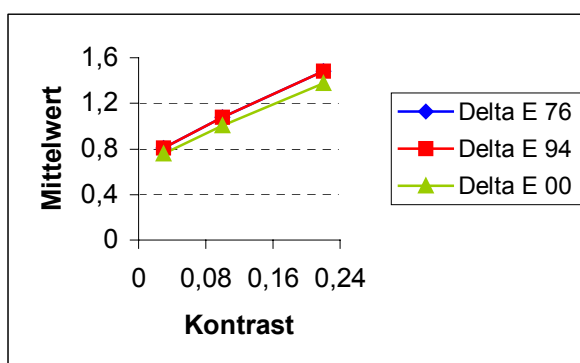


Abbildung 4-43: Pseudorot (ΔL)

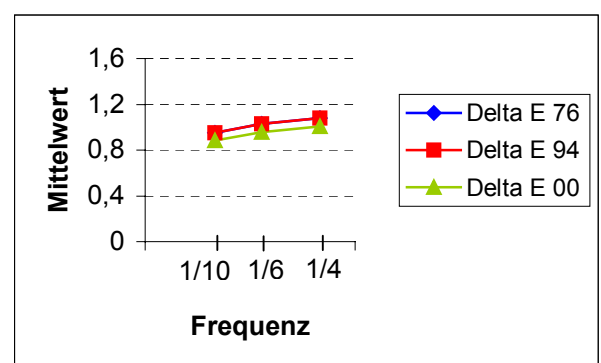


Abbildung 4-44: Pseudorot (ΔL)

Bei dieser Darstellung liegen die Werte, die mit den Farbabstandsformeln von 1976 und 1994 berechnet wurden, aufeinander. Die Werte aus der Farbabstandsformel 2000 befinden sich im Diagramm jeweils im gleichen Abstand unterhalb der Werte der beiden anderen Formeln, d.h., die mit der ΔE_{00} berechneten Farbabstände sind geringer geworden.

Bei Betrachtung des Kontrasts lässt sich feststellen, dass mit steigendem Kontrast ein höherer Farbabstand eingestellt werden muss, bis Fehler für Probanden sichtbar werden. Bei ΔC und Δh ist das ebenso der Fall. Diese Erkenntnis wurde auch schon in Kapitel 4.2.1 bei der Auswertung der einzelnen Komponenten ΔL , ΔC und Δh erlangt.

Für die Frequenz gilt, dass bei der niedrigsten Frequenz die geringsten Farbabstände entstehen.

ΔC -Diagramme

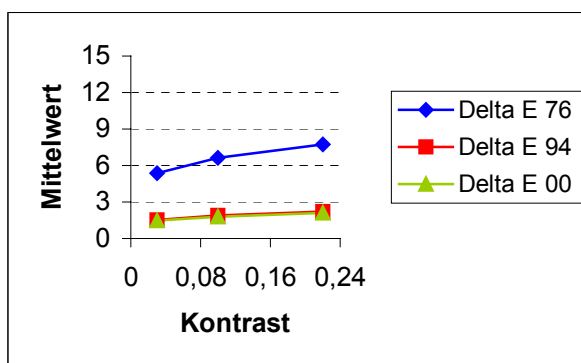


Abbildung 4-45: Pseudorot (ΔC)

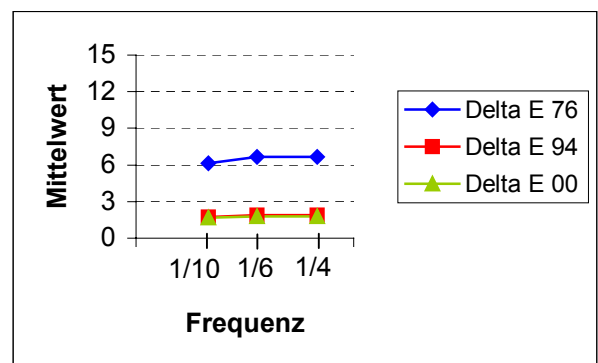
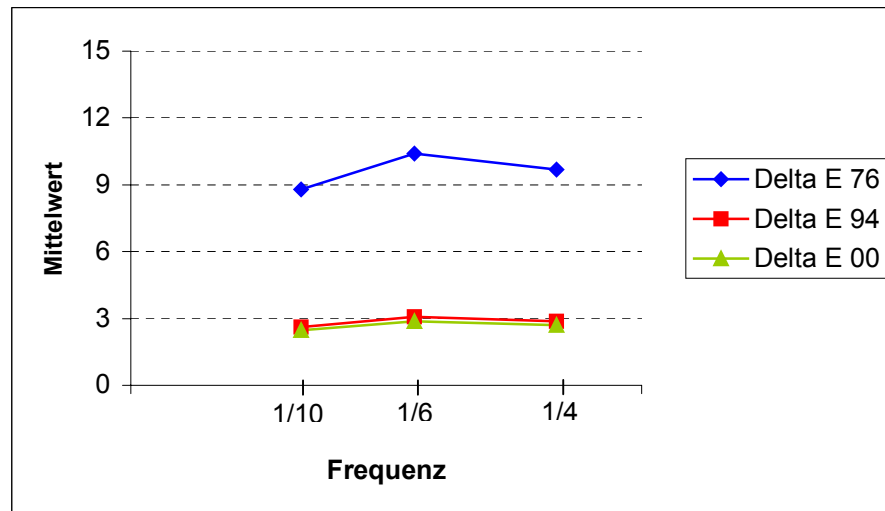


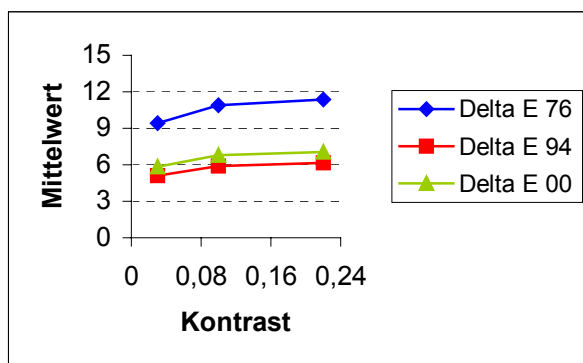
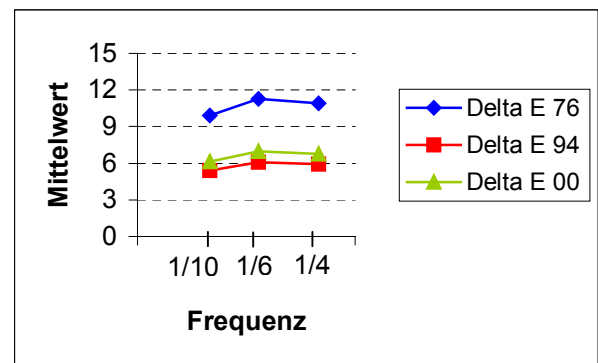
Abbildung 4-46: Pseudorot (ΔC)

Die Farbabstände, die nach der ΔE_{76} -Formel berechnet wurden, sind deutlich größer als die Farbabstände berechnet nach der ΔE_{94} und ΔE_{00} . Die Werte der Farbabstandsformel 1994 und 2000 sind nahezu gleich.

Im Diagramm, in dem die Frequenz aufgetragen ist, fällt der parallele Verlauf der ΔE_{94} - und ΔE_{00} -Formel zur x-Achse auf. Zur Überprüfung wurde zusätzlich ein Diagramm für die Farbe Mittelblau erstellt. Dieses weist ebenfalls den nahezu parallelen Verlauf auf.

Abbildung 4-47: Mittelblau (ΔC)

Δh -Diagramme

Abbildung 4-48: Pseudorot (Δh)Abbildung 4-49: Pseudorot (Δh)

Auch hier sind, wie in den ΔC -Diagrammen, die Farbabstände berechnet nach ΔE 76 deutlich am größten. Jedoch sind hier die Werte der Farbabstandsformeln 1994 und 2000 nicht nahezu gleich. Die ΔE 94-Formel liefert die geringsten Werte.

Vorausgehend wurde die Veränderung der Farbabstände mit zunehmendem Kontrast bzw. Frequenz untersucht. Von Interesse sind aber auch Farbabstandsveränderungen bei verschiedenen Farben. Nachfolgend die Farben Blau (1), Braun (2), Cyan (3), Gelb (4), Grün (5), Haut (6), Hellblau (7), Hellgrau (8), Magenta (9), Mittelblau (10), Mittelgrün (11), Olivgrün (12), Pseudorot (13) und Violett (14) und die Farbabstände mit 3 unterschiedlichen Farbabstandsformeln berechnet.

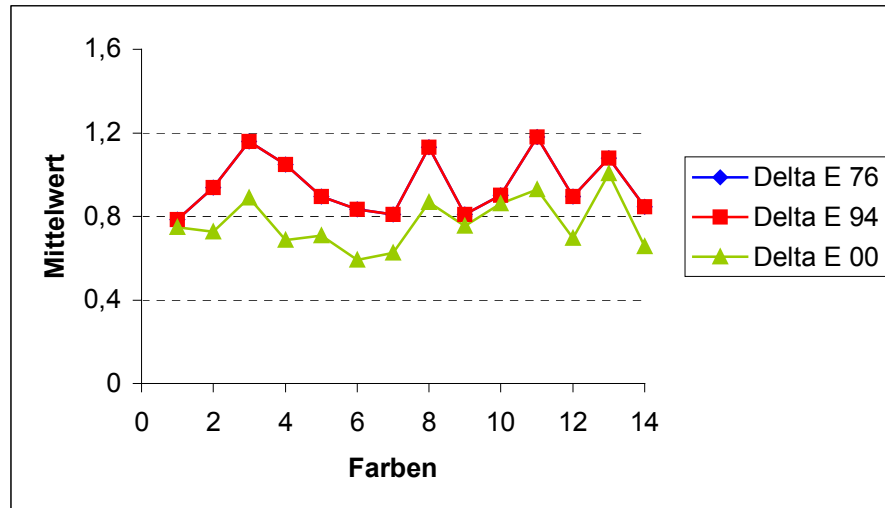


Abbildung 4-50: ΔL

Bei der Betrachtung der ΔL -Sequenz ergeben sich für die Farbabstände mit der CIE76 und der CIE94 identische Werte. Die Ergebnisse unter Verwendung der CIEDE00 sind minimal geringer. Der Graph scheint einen minimal glatteren Verlauf zu haben.

Verrauschung wird am schlechtesten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Cyan, Hellgrau, Mittelgrün
	ΔE 94	Cyan, Hellgrau, Mittelgrün
	ΔE 00	Pseudorot
Verrauschung wird am besten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Hellblau, Magenta, Blau
	ΔE 94	Hellblau, Magenta, Blau
	ΔE 00	Haut, Hellblau, Olivgrün, Violett

Tabelle 4-1: Ergebnisse zu Abbildung4-50

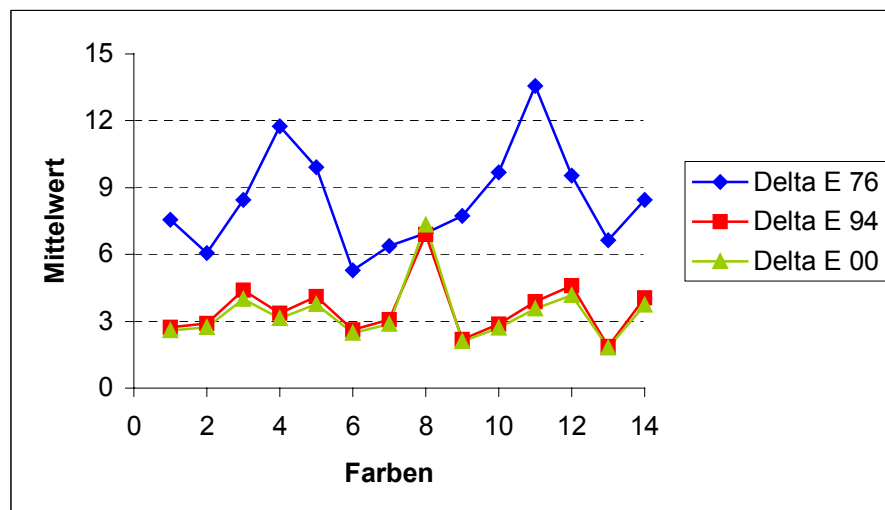


Abbildung 4-51: ΔC

Die Untersuchung der ΔC -Sequenz bezüglich der Farbabstände zeigt, dass der Verlauf der Werte der ΔE 76-Formel deutlich von den beiden anderen Formeln abweichende Größen liefert. Die Kurven der Gleichungen ΔE 94 und der ΔE 00 liegen sehr dicht beieinander. Die Werte, die sich für ΔE 00 ergeben, liegen noch leicht unter denen der ΔE 94-Formel, lediglich für Hellgrau sind die Werte größer. Der Verlauf der Farbabstände, die mit den beiden neueren Formeln berechnet wurden, ist geglättet.

Verrauschung wird am schlechtesten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Gelb, Mittelgrün
	ΔE 94	Hellgrau
	ΔE 00	Hellgrau
Verrauschung wird am besten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Braun, Haut, Pseudorot
	ΔE 94	Magenta, Pseudorot
	ΔE 00	Magenta, Pseudorot

Tabelle 4-2: Ergebnisse zu Abbildung 4-51

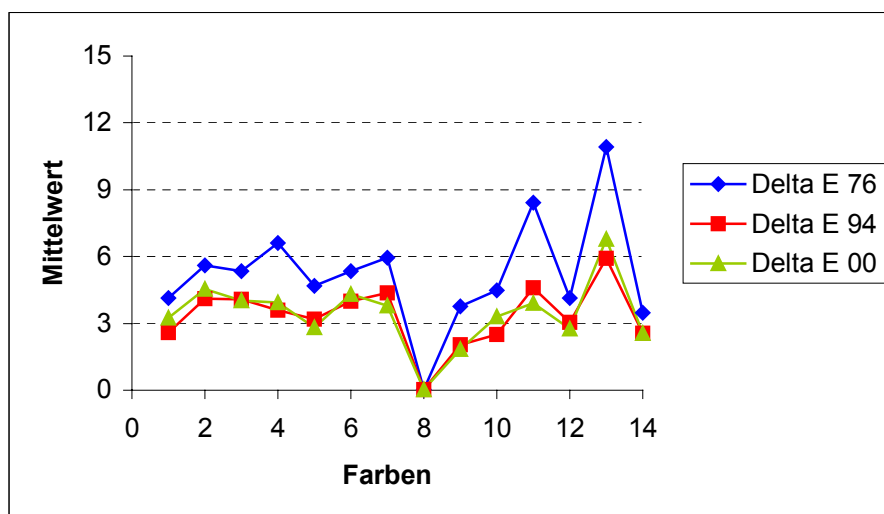


Abbildung 4-52: Δh

Die Werte aus den Farbabstandsformeln, die sich für die Δh -Sequenz ergeben, haben ähnliche Tendenzen in den Verläufen. Wiederum liegen die Ergebnisse der ΔE 76 deutlich über den anderen. Teilweise ergeben sich für die ΔE 94 die kleinsten Werte, sonst für die ΔE 00-Gleichung.

Verrauschung wird am schlechtesten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Mittelgrün, Pseudorot
	ΔE 94	Mittelgrün
	ΔE 00	Mittelgrün
Verrauschung wird am besten wahrgenommen bei:	ΔE 76	Hellgrau
	ΔE 94	Hellgrau
	ΔE 00	Hellgrau

Tabelle 4-3: Ergebnisse zu Abbildung 4-52

5. Zusammenfassung

Alle Schlussfolgerungen konnten lediglich bezüglich der betrachteten Farben, Frequenzen und Kontraste getroffen werden. Darüber hinaus können sie noch durch die teilweise sehr hohen Varianzen verfälscht worden sein. Auch Farbabweichungen des Monitors können die Ergebnisse beeinflusst haben.

In Abbildung 5.1 sind die Farben Blau (1), Braun (2), Cyan (3), Gelb (4), Grün (5), Haut (6), Hellblau (7), Hellgrau (8), Magenta (9), Mittelblau (10), Mittelgrün (11), Olivgrün (12), Pseudorot (13) und Violett (14) mit einem Kontrast von 10% und einer Frequenz von $\frac{1}{4}$ Lp/Pixel eingetragen. Die zugehörigen L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte können den Tabellen in Kapitel 3.3 entnommen werden.

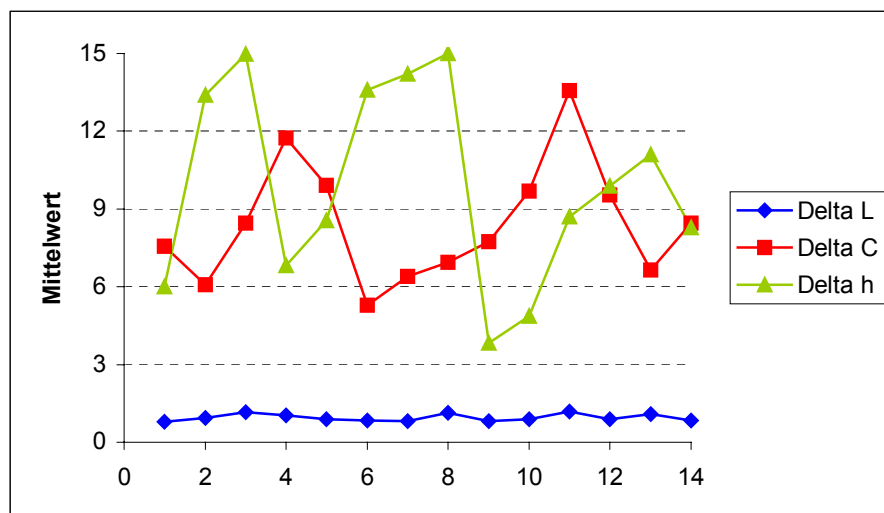


Abbildung 5-1: Alle Farben in alphabetischer Reihenfolge

Die nachfolgende Tabelle listet die Farben auf, bei denen die Verrauschung am besten bzw. am schlechtesten wahrgenommen wurden, d.h. dort war der Mittelwert am kleinsten bzw. am größten.

	Verrauschung wird am besten wahrgenommen bei:	Verrauschung wird am schlechtesten wahrgenommen bei:
ΔL	in etwa bei allen Farben gleich	
ΔC	Braun Haut Pseudorot	Gelb Mittelgrün
Δh	Magenta Mittelblau	Cyan Hellgrau Hellblau

Tabelle 5-1: Ergebnisse zu Abbildung 5-1

Auffällig ist hier, dass die Farben für gute oder schlechte Rauschwahrnehmung von ΔC und Δh jeweils einem Quadranten zugeordnet sind.

	gute Wahrnehmung	schlechte Wahrnehmung
ΔC	Farben liegen alle in Quadrant A	Hochgesättigte Farben aus Quadrant B
Δh	Hochgesättigte Farben aus Quadrant D	Farben liegen alle in Quadrant C

Tabelle 5-2: Ergebnisse zu Abbildung 5-1

Allgemein kann man sagen, dass bei ΔL die Wahrnehmungsschwelle für Rauschen sehr niedrig ist, während ΔC und Δh sehr hohe und stark schwankende Schwellen aufweisen.

Abbildung 5-2 zeigt die Varianz zu den oben genannten Farben in gleicher Reihenfolge.

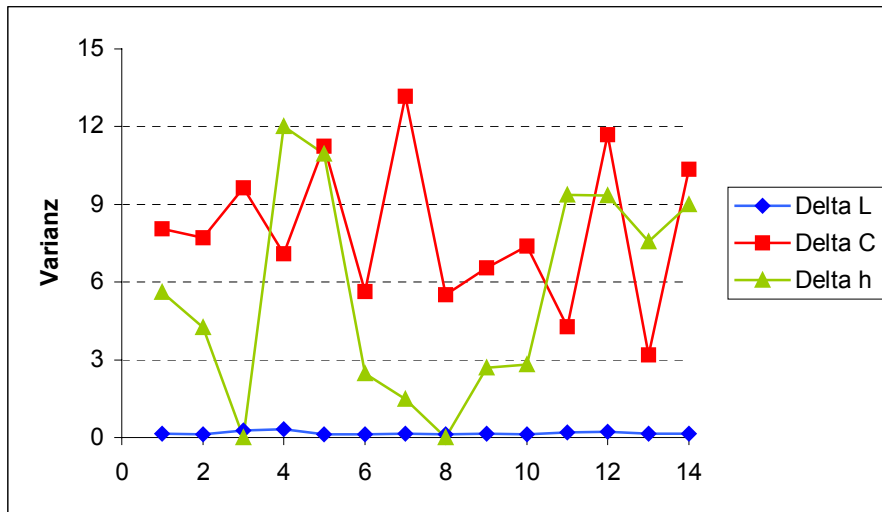


Abbildung 5-2: Varianz der Farben in alphabetischer Reihenfolge

Tabelle 5-3 gibt Auskunft darüber, bei welchen Farben die Varianz für ΔL , ΔC und Δh am höchsten bzw. am niedrigsten war.

	Varianz ist am niedrigsten bei:	Varianz ist am höchsten bei:
ΔL	in etwa bei allen Farben gleich	
ΔC	Pseudorot Mittelgrün	Grün Hellblau Olivgrün Violett
Δh	Cyan Hellgrau Hellblau	Gelb Grün Mittelgrün Olivgrün

Tabelle 5-3: Ergebnisse zu Abbildung 5-2

Auch hier lassen sich, wie beim Mittelwert, Gemeinsamkeiten der Farben feststellen.

	Varianz am niedrigsten	Varianz am höchsten
ΔC	Farben mit hoher Sättigung aus Quadrant A und B	Farben mit geringer Sättigung aus Quadrant B, C und D
Δh	Farben liegen alle in Quadrant C	Farben liegen alle in Quadrant B

Tabelle 5-4: Ergebnisse zu Abbildung 5-2

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Varianz bei Verrauschung nach L sehr gering ist. Demnach wurde das Rauschen in ΔL -Richtung von allen Testpersonen etwa zum gleichen, sehr frühen Zeitpunkt erkannt. Die Bildhelligkeit muss also genau reproduziert werden.

Die Varianz von ΔC und Δh ist sehr hoch und schwankt sehr stark. Daraus kann man schließen, dass das Rauschen hier von Testperson zu Testperson sehr unterschiedlich wahrgenommen wird. Nach C und h kann die Verrauschung sehr hoch sein, bis überhaupt Fehler bemerkt werden.

	Anordnung der Graphen ΔL, ΔC, Δh im Diagramm	Rauschwahrnehmung mit zunehmender Helligkeit	Rauschwahrnehmung mit zunehmender Chrominanz
Quadrant A	ΔL	minimal besser	minimal schlechter
	ΔC	besser	schlechter
	Δh	schlechter	besser
Quadrant B	ΔL	fast konstant	minimal schlechter
	Δh	besser	-
	ΔC	-	schlechter
Quadrant C	ΔL	-	(leicht besser)
	ΔC	-	(leicht besser)
	Δh	-	(konstant)
Quadrant D	ΔL	fast konstant	fast konstant
	Δh	besser	-
	ΔC	-	besser
Grautöne	ΔL	konstant	-
	ΔC	besser	-
	Δh	konstant	-

Tabelle 5-5: Rauschwahrnehmung in Abhängigkeit vom Quadranten

Für vorausgehende und nachfolgende Tabelle gilt, dass die eingeklammerten Aussagen sehr unsichere Folgerungen sind, da sie sich nur auf zwei Farben beziehen. Befindet sich ein Strich in der Tabelle, ließen sich die Farben dieses Quadranten nicht bezüglich dieses Aspektes untersuchen, oder es ist aufgrund hoher Schwankungen der Messwerte keine Tendenz zu erkennen.

	Anordnung der Graphen von unten nach oben	Mit zunehmender Helligkeit	Mit zunehmender Chrominanz
Quadrant A	ΔL	minimal besser	minimal schlechter
	ΔC	-	-
	Δh	besser	schlechter
Quadrant B	ΔL	minimal schlechter	-
	ΔC	-	-
	Δh	-	-
Quadrant C	ΔL	-	(besser)
	Δh	-	(schlechter)
	ΔC	-	(schlechter)
Quadrant D	ΔL	fast konstant	fast konstant
	Δh	-	besser
	ΔC	-	besser
Grautöne	Δh	-	-
	ΔL	-	-
	ΔC	besser	-

Tabelle 5-6: Varianzen in Abhängigkeit vom Quadranten

Innerhalb der Quadranten gilt: mit steigendem C*-Wert der Farben muss weniger nach Δh verrauscht werden, damit die Störungen sichtbar werden.

Ähnliche Farben liefern auch dicht beieinanderliegende Ergebnisse.

Bezüglich der berechneten Farbabstände lassen sich folgende zusammenfassende Aussagen treffen:

Außer bei der ΔL -Sequenz sind die nach den $\Delta E 94$ - und $\Delta E 00$ -Formeln berechneten Farbabstände zwischen verrauschter und unverrauschter Farbe geringer als bei $\Delta E 74$. Für die Verrauschung nach der Helligkeit gilt, dass sich für $\Delta E 76$ und $\Delta E 94$ gleiche Werte ergeben, die von $\Delta E 00$ liegen mit glatterem Verlauf darunter.

Mit zunehmendem Kontrast müssen größere Farbabstände eingestellt werden, bis eine Verrauschung sichtbar wird. Auch mit steigender Frequenz vergrößert sich tendenziell der Farbabstand.

Bei $1/10$ Lp/Pixel werden die Streifen bereits als einzelne Flächen wahrgenommen. Deshalb ist zu vermuten, dass bei niedrigeren Frequenzen keine weitere Änderung der Wahrnehmungsschwelle des Rauschens eintritt.

Mit der $\Delta E 00$ Formel weichen die berechneten Farbabstände der Testfarben, bei denen Rauschen sichtbar wird, weniger voneinander ab. Zwar liegt auch hier keine Gleichabständigkeit vor, aber die Schwankungen sind deutlich geringer. Bei Gleichabständigkeit hätten alle Farben den gleichen Farbabstand. Die betrachteten CIE-Farbabstandsformeln sind also nicht zur Beschreibung des Farbrauschens geeignet. Dies kann u.a. daran liegen, dass die Referenzbedingungen nicht erfüllt sind. Die Formeln beziehen sich auf eine Probengröße von mindestens 4° .

6. Ausblick

Zur Entwicklung einer Formel, welche die Wahrnehmung des Farbrauschens in Abhängigkeit von Bildfrequenz und Kontrast beschreibt, sind noch einige Aspekte genauer zu betrachten.

Beeinflussungen der Wahrnehmung des Farbrauschens durch den Kontrast konnten eindeutig nachgewiesen werden. Durch Zwischenabstufungen kann lediglich der Verlauf der Wahrnehmungsschwellen mit zunehmenden Kontrast genauer bestimmt werden.

Bezüglich der Wahrnehmung in Abhängigkeit von der Frequenzänderung traten Schwankungen der Ergebnisse auf. Genaue Untersuchungen weiterer Frequenzwerte zur Bestätigung oder Widerlegung des bisherigen Kurvenverlaufs sind erforderlich.

Insbesondere fehlen Untersuchungen weiterer Farben, da die Messergebnisse unter den in Kapiteln 4.2.4 – 4.2.7 betrachteten Gesichtspunkten starken Schwankungen unterworfen waren. Hierzu bietet sich eine Auswahl der Farben nach folgenden Aspekten an:

Einerseits bei gleichem Chrominanz- und Helligkeitswert den Farbtonwinkel in kleinen Abstufungen verändern, andererseits den Farbtonwinkel und die Helligkeit konstant halten und die Chrominanz variieren.

Neben den in der Diplomarbeit betrachteten Größen L^* , C^*_{ab} ; h_{ab} , a^* , b^* und ΔE^*_{ab} kann zusätzlich der Bunttonbeitrag ΔH^*_{ab} untersucht werden.

Darüber hinaus können Untersuchungen auf Bilder mit verschiedenfarbigen Streifen und Farbfotografien ausgeweitet werden.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 11.07.2003

Nicole Kidawa

Ich versichere hiermit, die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 11.07.2003

Christina Simon

Sperrvermerk

Die vorgelegte Arbeit unterliegt keinem Sperrvermerk.

Weitergabeerklärung

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Diplomarbeit oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Köln, den 11.07.2003

Nicole Kidawa

Ich erkläre hiermit mein Einverständnis, dass das vorliegende Exemplar meiner Diplomarbeit oder eine Kopie hiervon für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden darf.

Köln, den 11.07.2003

Christina Simon

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei allen bedanken, die uns im Rahmen unserer Diplomarbeit unterstützt haben.

Im besonderen bedanken wir uns bei den Referenten:

- Prof. Dr. Manfred Schrey für seine Unterstützung und Motivationsfähigkeit
- Dipl.-Ing. Dietmar Wüller für die Unterstützung, Diskussionen und fachliche Information

Darüber hinaus gilt unser Dank:

- Stephan Klein und Daniel Simon für die fachliche Beratung zur Java-Programmierung
- Unseren Eltern und Freunden für ihre Unterstützung und Geduld

Literaturverzeichnis

- [1] Lang, Heinwig: Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck
Göttingen, Muster-Schmidt Verlag, 1995. Seite 133ff
- [2] Glassner, Andrew S.: Principles of Digital Image Synthesis, Morgan
Kaufmann Pub, 1995. Seite 6
- [3] [http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS02/Proseminar_CV/
ausarbeitung2/ppichler.pdf](http://www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS02/Proseminar_CV/ausarbeitung2/ppichler.pdf), 19.05.2003
- [4] Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie, 1998.
Seite 42ff
- [5] Skript Verarbeitungstechnik. S24ff
- [6] Praktikumsanleitung Farbtechnik
- [7] Agfa Lecture: Eine Einführung in das digitale Scannen, Die digitale Farbe –
Teil 4. Seite 32ff
- [8] Brües, S.: Postscriptum Color Management, GretagMacbeth, 2000.
Seite 20
- [9] Brües, S.: Postscriptum Color Management, GretagMacbeth, 2000.
Seite 21
- [10] Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie, 1998.
Seite 55
- [11] DIN 6174: Farbmessung, Grundlagen der Farbmessung und ihre
Anwendungsbereiche in der Druckindustrie, Verlag Beruf + Schule in
Itzehoe, 1989. Seite 107/108
- [12] Fairchild, M.D.: Color Appearance Models, Addison Wesley Publishing
Company, 1997. Seite 95
- [14] Luo, M.R.; Cui, G.; Rigg, B.: The development of the CIE 2000 Colour
difference formula – CIEDE2000. COLOR research and application, Volume
26, Number 5, October 2001.
- [15] <http://www.uni-tuebingen.de/cg/lehre/ws2002-03/viskog-vortrag/1>
20.05.2003
- [16] Skript zur Vorlesung „Tontechnik“ von Prof. Dr. Ing. Franz Stollenwerk,
SS00 und WS00/01
- [17] www.sushii-net.de/fragen1.html, 07.06.2003

- [18] <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>, 11.06.2003
- [19] Skript zur Vorlesung „Digitale Bildverarbeitung“ von Prof. Dietmar Kunz, WS99/00
- [20] Aufsatzsammlung: Wahrnehmung und visuelles System, 1986
Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft
Campell, F. W.; Maffei, L.: Kontrast und Raumfrequenz. Seite 132
- [21] <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/seminararbeiten/s98/Helligkeit/Helligkeit.html#Kontroll>, 20.05.2003
- [22] Aufsatzsammlung: Wahrnehmung und visuelles System, 1986
Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft
Campell, F. W.; Maffei, L.: Kontrast und Raumfrequenz. Seite 138
- [23] <http://www.theta-system.de/datasheet/WEBccdPrimers2.pdf>, 24.06.03
- [24] <http://www.henning-arndt.de/digbild2.htm>, 24.06.03
- [25] Schiek, Burkhard; Siweris, Heinz-Jürgen: Rauschen in Hochfrequenzschaltungen, Heidelberg:Hüthig, 1990. Seite 4
- [26] <http://www.uni-koeln.de/phil-fak/muwi/ag/umdruck/deltasig.pdf>, 18.06.03
- [27] Skript zur Vorlesung „Videotechnik“ von Prof. Dr. Ing. Franz Stollenwerk, WS00/01 und SS01
- [28] Prof. Dr. Scheid, Harald: Schüler Duden, Die Mathematik II, Meyers Lexikonredaktion, 1991. Seite 445
- [29] Brües, S.: Postscriptum Color Management, GretagMacbeth, 2000. Seite 33ff
- [30] Burger, Rudolph E.: Colormanagement Konzepte, Begriffe, Systeme. Seite 61f
- [31] International Color Consortium: Specification ICC.1.2001-12, File Format for Color Profiles (Version 4.0.0), ICC 2001 (<http://www.color.org>), 01.04.2003
- [32] DIN Norm 5035-7: Beleuchtungsbedingungen bei Bildschirmarbeitsplätzen, Empfohlene Leuchtdichteverhältnisse in einem Arbeitsraum mit Bildschirmen positiver Polarität
- [33] <http://fmysql.tu.graz.ac.at/~ZV600/610/doc/AugeundBs.pdf>, 01.07.2003
- [34] Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig, 1996. Seite 370
- [35] Gespräch mit Dietmar Wüller vom 26.03.2003

- [36] Diplomarbeit „Untersuchung der Farbabstandsformeln des CIELAB Farbraums auf ihre Eignung, Farbrauschen quantitativ und physiologisch richtig zu beschreiben“ von Jan Fischer und Michael Bantel
- [37] Gespräch mit Dietmar Wüller vom 10.07.2003

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1 Lang, Heinwig: Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck
Göttingen, Muster-Schmidt Verlag, 1995. Seite134
- Abbildung 2-2 Lang, Heinwig: Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck
Göttingen, Muster-Schmidt Verlag, 1995. Seite135
- Abbildung 2-3 Aufsatzsammlung: Wahrnehmung und visuelles System, 1986
Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft
Hubel, David H.; Wiesel, Torsten N.: Die Verarbeitung visueller Information. Seite 40
- Abbildung 2-4 <http://160.45.133.240/pixelgrafik/img37.png>, 08.07.2003
- Abbildung 2-5 Internet: <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>,
11.06.2003
- Abbildung 2-6 Internet: <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>,
11.06.2003
- Abbildung 2-8 Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie,
1998. Seite 52
- Abbildung 2-9 Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie,
1998. Seite 55
- Abbildung 2-10 Billmeyer, Fred W.; Saltzman, Max: Grundlagen der
Farbtechnologie, Muster Schmidt Verlag. Seite 65
- Abbildung 2-11 Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie,
1998. Seite 57
- Abbildung 2-13 <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>, 11.06.2003
- Abbildung 2-14 <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>, 11.06.2003
- Abbildung 2-15 <http://www.fo.fh-koeln.de/dozent/blendl/Granzer.pdf>, 08.07.2003
- Abbildung 2-16 [http://www.uni-tuebingen.de/cg/lehre/ws2002-03/
viskog-vortrag/1](http://www.uni-tuebingen.de/cg/lehre/ws2002-03/viskog-vortrag/1), 20.05.2003
- Abbildung 2-17 [http://www.ie.ap.uni-kiel.de/plasma/ag-piel/p3m/kap8/
b8_1.html](http://www.ie.ap.uni-kiel.de/plasma/ag-piel/p3m/kap8/b8_1.html), 23.05.2003
- Abbildung 2-18 Skript zur Vorlesung „Digitale Bildverarbeitung“ von Prof.
Dietmar Kunz, WS99/00

- Abbildung 2-20 http://193.23.171.171/download/BvuVis_02.pdf, 30.05.03
- Abbildung 2-22 <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/vorlesung/fohlen/1/v05bmtf.pdf>, 07.05.2003
- Abbildung 2-23 <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/lehre/vorlesung/fohlen/1/v05bmtf.pdf>, 07.05.2003
- Abbildung 2-24 Aufsatzsammlung: Wahrnehmung und visuelles System, 1986
Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft
Campell, F. W.; Maffei, L.: Kontrast und Raumfrequenz.
Seite 138
- Abbildung 2-26 Diplomarbeit „Untersuchung der Farbabstandsformeln des
CIELAB Farbraums auf ihre Eignung, Farbrauschen quantitativ
und physiologisch richtig zu beschreiben“ von Jan Fischer und
Michael Bantel
- Abbildung 2-27 <http://www.iccview.de>, 25.03.2003
- Abbildung 2-28 <http://www.iccview.de>, 25.03.2003
- Abbildung 2-29 International Color Consortium: Specification ICC.1.2001-12,
File Format for Color Profiles (Version 4.0.0), ICC 2001
(<http://www.color.org>), 01.04.2003
- Abbildung 3-1 DIN Norm 5035-7: Beleuchtungsbedingungen bei
Bildschirmarbeitsplätzen, Empfohlene Leuchtdichteverhältnisse
in einem Arbeitsraum mit Bildschirmen positiver Polarität
- Abbildung 3-3 <http://fmysql.tu.graz.ac.at/~ZV600/610/doc/AugeundBs.pdf>,
01.07.2003
- Abbildung 3-5 Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag
Leipzig, 1996. Seite 370

Formelverzeichnis

- Formel 2.1 Marchesi, Jost: Handbuch der Fotografie, Verlag Photographie, 1998. Seite 51
- Formel 2.2 – 2.5 DIN 6174: Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel
- Formel 2.6 DIN 5033-3: Farbmessung - Farbmaßzahlen
- Formel 2.7 – 2.9 DIN 6174: Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel
- Formel 2.10 Loos, Hansl: Farbmessung, Grundlagen der Farbmetrik und ihre Anwendungsbereiche in der Druckindustrie, Verlag Beruf + Schule in Itzehoe, 1989. Seite 107/108
- Formel 2.11 – 2.12 Fairchild, M.D.: Color Appearance Models, Addison Wesley Publishing Company, 1997. Seite 94/95
- Formel 2.13 – 2.18 Luo, M.R.; Cui, G.; Rigg, B.: The development of the CIE 2000 Colour difference formula – CIEDE2000. COLOR research and application, Volume 26, Number 5, October 2001.
- Formel 2.19 – 2.21 Skript zur Vorlesung „Videotechnik“ von Prof. Dr. Ing. Franz Stollenwerk, WS00/01 und SS01
- Formel 2.22 <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>, 11.06.2003
- Formel 2.23 De Valois, R. L.: Spatial Vision, Oxford University Press, New York, 1988. Seite 8
- Formel 2.24 – 2.26 Skript zur Vorlesung „Tontechnik“ von Prof. Dr. Ing. Franz Stollenwerk, SS00 und WS00/01
- Formel 2.27 Papula, Lothar: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. Seite 253
- Formel 3.5 Skript zur Vorlesung „Tontechnik“ von Prof. Dr. Ing. Franz Stollenwerk, SS00 und WS00/01
- Formel 4.1 – 4.2 Papula, Lothar: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. Seite 254

Bereinigte Messergebnisse

Farbe		Cyan			Cyan		
Kontrast		3%			10%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	0,86	0,82	0,80	1,16	1,08	0,95
	Varianz	0,16	0,15	0,09	0,27	0,16	0,13
ΔC	Mittelwert	6,92	7,22	6,78	8,44	8,47	7,09
	Varianz	5,84	6,25	4,32	9,64	6,38	4,18
Δh	Mittelwert	15,00	15,00	14,86	14,98	14,54	14,39
	Varianz	0	0	0,29	0	1,9	8,64

Farbe		Cyan			Pseudorot		
Kontrast		22%			3%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	1,49	1,50	1,21	0,81	0,89	0,80
	Varianz	0,25	0,23	0,14	0,10	0,27	0,10
ΔC	Mittelwert	10,26	9,70	8,46	5,39	5,83	6,18
	Varianz	5,99	9,06	6,74	3,14	3,82	2,20
Δh	Mittelwert	15,00	14,88	14,79	9,61	10,60	10,15
	Varianz	0	0,28	1,12	6,61	9,71	5,40

Farbe		Pseudorot			Pseudorot		
Kontrast		10%			21%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	1,08	1,03	0,95	1,48	1,42	1,12
	Varianz	0,14	0,17	0,17	0,38	0,25	0,22
ΔC	Mittelwert	6,64	6,67	6,12	7,73	7,99	6,54
	Varianz	3,20	4,22	2,82	4,31	2,38	3,98
Δh	Mittelwert	11,10	11,46	10,11	11,57	12,61	11,72
	Varianz	7,55	4,84	6,37	7,71	3,35	6,04

Farbe		Mittelblau			Mittelblau		
Kontrast		3%			10%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	0,78	0,78	0,72	0,90	0,97	0,82
	Varianz	0,13	0,11	0,11	0,13	0,21	0,06
ΔC	Mittelwert	8,32	8,95	8,07	9,68	10,39	8,79
	Varianz	5,24	6,88	5,56	7,38	8,54	4,11
Δh	Mittelwert	4,28	4,60	4,13	4,87	5,14	4,48
	Varianz	1,89	2,26	1,33	2,81	3,87	2,13

Farbe		Mittelblau			Hellgrau		
Kontrast		22%			3%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	1,22	1,11	0,95	0,81	0,90	0,75
	Varianz	0,20	0,19	0,05	0,12	0,13	0,08
ΔC	Mittelwert	11,58	11,19	10,18	5,82	8,43	5,53
	Varianz	2,55	6,86	6,94	3,50	5,95	2,93
Δh	Mittelwert	5,68	5,13	5,33	14,89	14,97	15,00
	Varianz	2,55	3,08	2,77	0,19	0,02	0

Farbe		Hellgrau			Hellgrau		
Kontrast		10%			22%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	1,13	1,15	0,88	1,52	1,42	1,16
	Varianz	0,12	0,35	0,08	0,27	0,28	0,08
ΔC	Mittelwert	6,95	7,28	6,53	8,34	7,37	13,63
	Varianz	5,50	7,87	3,89	6,60	6,83	3,65
Δh	Mittelwert	15,00	14,99	14,87	14,90	14,94	9,35
	Varianz	0	0	0,42	0,13	0,04	6,04

Farbe		Mittelgrün			Mittelgrün		
Kontrast		3%			10%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	0,82	0,87	0,71	1,18	1,20	0,88
	Varianz	0,12	0,12	0,08	0,19	0,21	0,14
ΔC	Mittelwert	11,61	12,86	11,60	13,56	12,55	12,90
	Varianz	6,62	4,13	6,66	4,27	9,40	6,47
Δh	Mittelwert	6,78	8,28	8,27	8,69	9,31	8,03
	Varianz	4,47	7,32	5,21	9,36	6,48	4,40

Farbe		Mittelgrün		
Kontrast		22%		
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/6	1/10
ΔL	Mittelwert	1,53	1,50	1,16
	Varianz	0,25	0,23	0,08
ΔC	Mittelwert	13,33	13,44	13,63
	Varianz	5,01	3,29	3,65
Δh	Mittelwert	9,85	9,22	9,35
	Varianz	11,09	7,05	6,04

Farbe		Blau	Braun	Gelb	Grün	Haut	Hellblau
Kontrast		10%	10%	10%	10%	10%	10%
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
ΔL	Mittelwert	0,78	0,94	1,05	0,90	0,83	0,81
	Varianz	0,14	0,13	0,32	0,13	0,12	0,15
ΔC	Mittelwert	7,57	6,07	11,75	9,90	5,28	6,39
	Varianz	8,05	7,70	7,09	11,25	5,63	13,16
Δh	Mittelwert	6,01	13,39	6,82	8,55	13,60	14,22
	Varianz	5,62	4,24	12,02	10,94	2,47	1,48

Farbe		Magenta	Mittel- blau	Olivgrün	Violett	Lila	
Kontrast		10%	10%	10%	10%	22%	35%
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
ΔL	Mittelwert	0,81	0,89	0,90	0,85	1,11	1,26
	Varianz	0,15	0,26	0,22	0,15	0,28	0,22
ΔC	Mittelwert	7,74	7,18	9,54	8,46	8,98	11,19
	Varianz	6,54	7,77	11,69	10,35	8,40	10,53
Δh	Mittelwert	3,84	4,32	9,88	8,29	4,79	6,17
	Varianz	2,69	5,45	9,35	8,99	2,81	9,21

Farbe		Grau			Dunkel- grau	Dunkel- weiß
Kontrast		65%	65%	1%	3%	3%
Frequenz [LP/Pixel]		1/4	1/10	1/4	1/4	1/4
ΔL	Mittelwert	2,45	2,43	0,67	1,02	0,88
	Varianz	1,45	0,58	0,10	0,26	0,14
ΔC	Mittelwert	8,83	8,56	3,95	6,57	5,68
	Varianz	12,57	6,83	1,45	4,65	2,71
Δh	Mittelwert	14,96	14,99	14,86	14,97	14,98
	Varianz	0,03	0	0,5	0,02	0,01

Berechnete Farbabstände

Farbe		Cyan			Cyan			Cyan		
Kontrast		3%			10%			22%		
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔE 76	ΔL	0,86	0,82	0,8	1,16	1,08	0,95	1,49	1,50	1,21
	ΔC	6,92	7,22	6,78	8,44	8,47	7,09	10,26	9,70	8,46
	Δh	5,36	5,36	5,31	5,35	5,19	5,14	5,36	5,32	5,28
ΔE 94	ΔL	0,86	0,82	0,8	1,16	1,08	0,95	1,49	1,5	1,21
	ΔC	3,60	3,76	3,52	4,39	4,40	3,69	5,33	5,04	4,40
	Δh	4,10	4,10	4,06	4,09	3,97	3,93	4,10	4,06	4,04
ΔE 00	ΔL	0,66	0,63	0,61	0,89	0,83	0,73	1,14	1,15	0,93
	ΔC	3,33	3,46	3,27	4,00	4,00	3,40	4,77	4,53	4,00
	Δh	4,03	4,03	3,99	4,02	3,91	3,87	4,03	4,00	3,97

Farbe		Pseudorot			Pseudorot			Pseudorot		
Kontrast		3%			10%			21%		
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔE 76	ΔL	0,81	0,89	0,8	1,08	1,03	0,95	1,48	1,42	1,12
	ΔC	5,39	5,83	6,18	6,64	6,67	6,12	7,73	7,99	6,54
	Δh	9,45	10,42	9,98	10,91	11,26	9,94	11,37	12,39	11,51
ΔE 94	ΔL	0,81	0,89	0,8	1,08	1,03	0,95	1,48	1,42	1,12
	ΔC	1,52	1,65	1,74	1,88	1,89	1,73	2,19	2,26	1,85
	Δh	5,12	5,64	5,40	5,91	6,10	5,38	6,16	6,71	6,24
ΔE 00	ΔL	0,76	0,83	0,75	1,01	0,96	0,89	1,37	1,32	1,04
	ΔC	1,47	1,59	1,68	1,80	1,81	1,67	2,08	2,15	1,77
	Δh	5,85	6,46	6,18	6,77	7,00	6,16	7,07	7,71	7,16

Farbe		Mittelblau			Mittelblau			Mittelblau		
Kontrast		3%			10%			22%		
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔE 76	ΔL	0,78	0,78	0,72	0,9	0,97	0,82	1,22	1,11	0,95
	ΔC	8,32	8,95	8,07	9,68	10,39	8,79	11,58	11,19	10,18
	Δh	3,95	4,24	3,81	4,49	4,74	4,13	5,23	4,73	4,92
ΔE 94	ΔL	0,78	0,78	0,72	0,9	0,97	0,82	1,22	1,11	0,95
	ΔC	2,46	2,65	2,39	2,86	3,07	2,60	3,43	3,31	3,01
	Δh	2,20	2,37	2,12	2,51	2,644	2,30	2,92	2,64	2,74
ΔE 00	ΔL	0,75	2,50	0,69	0,86	0,93	0,78	1,17	1,06	0,91
	ΔC	2,33	3,14	2,27	2,69	2,88	2,46	3,18	3,08	2,82
	Δh	2,92	0,75	2,82	3,32	3,49	3,06	3,85	3,49	3,62

Farbe		Hellgrau			Hellgrau			Hellgrau		
Kontrast		3%			10%			22%		
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔE 76	ΔL	0,81	0,9	0,75	1,13	1,15	0,88	1,52	1,42	1,23
	ΔC	5,82	8,43	5,53	6,95	7,28	6,53	8,34	7,32	7,04
	Δh	0,04	0,04	0,04	0,04	0,34	0,04	0,04	0,04	0,04
ΔE 94	ΔL	0,81	0,9	0,75	1,13	1,15	0,88	1,52	1,42	1,23
	ΔC	5,78	8,38	5,50	6,91	7,23	6,49	8,29	7,32	7,00
	Δh	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ΔE 00	ΔL	0,62	0,69	0,58	0,87	0,88	0,68	1,17	1,09	0,94
	ΔC	6,31	8,58	6,04	7,33	7,61	6,96	8,50	7,69	7,41
	Δh	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Farbe		Mittelgrün			Mittelgrün			Mittelgrün		
Kontrast		3%			10%			22%		
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10	1/4	1/6	1/10
ΔE 76	ΔL	0,82	0,87	0,71	1,18	1,2	0,88	1,53	1,5	1,16
	ΔC	11,61	12,86	11,6	13,56	12,55	12,9	13,33	13,44	13,63
	Δh	6,57	8,02	8,01	8,42	9,02	7,77	9,54	8,93	9,06
ΔE 94	ΔL	0,82	0,87	0,71	1,18	1,2	0,88	1,53	1,5	1,16
	ΔC	3,32	3,67	3,31	3,87	3,58	3,69	3,81	3,84	3,69
	Δh	3,58	4,37	4,37	4,59	4,92	4,24	5,20	4,87	4,94
ΔE 00	ΔL	0,65	0,68	0,56	0,93	0,95	0,69	1,20	1,18	0,91
	ΔC	3,09	3,39	3,08	3,56	3,32	3,40	3,51	3,54	3,58
	Δh	3,05	3,72	3,71	3,90	4,18	3,61	4,42	4,14	4,20

Farbe		Blau	Braun	Gelb	Grün	Haut	Violett	Lila	
Kontrast		10%	10%	10%	10%	10%	10%	22%	35%
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
ΔE 76	ΔL	0,78	0,94	1,05	0,90	0,85	0,81	1,10	1,26
	ΔC	7,57	6,07	11,75	9,90	8,46	6,39	8,98	11,19
	Δh	4,13	5,61	6,61	4,68	3,47	5,95	4,16	5,36
ΔE 94	ΔL	0,78	0,94	1,05	0,90	0,85	0,81	1,10	1,26
	ΔC	2,73	2,92	3,36	4,10	4,06	3,07	2,77	3,45
	Δh	2,60	4,12	3,61	3,18	2,55	4,37	2,38	3,07
ΔE 00	ΔL	0,75	0,73	0,69	0,71	0,66	0,63	1,09	1,24
	ΔC	2,57	2,74	3,12	3,76	3,72	2,87	2,61	3,20
	Δh	3,25	4,55	3,93	2,83	2,57	3,80	2,24	2,87

Farbe		Hell- blau	Ma- genta	Oliv- grün	Grau			Dunkel- weiß	Dunkel- grau
Kontrast		10%	10%	10%	1%	65%	65%	3%	3%
Frequenz [Lp/Pixel]		1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/10	1/4	1/4
ΔE 76	ΔL	0,81	0,81	0,90	0,67	2,45	2,43	0,88	1,02
	ΔC	7,74	7,74	4,14	3,94	8,83	8,56	5,68	6,57
	Δh	3,78	3,78	9,54	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ΔE 94	ΔL	0,81	0,81	0,90	0,67	2,45	2,43	0,88	1,02
	ΔC	2,19	2,19	4,58	3,92	8,77	8,51	5,64	6,53
	Δh	2,05	2,05	3,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ΔE 00	ΔL	0,75	0,75	0,69	0,63	2,28	2,26	0,56	0,72
	ΔC	2,09	2,09	4,15	4,48	8,90	8,68	6,18	6,99
	Δh	1,84	1,84	2,77	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04