Visuelle Beurteilung von kleinen und großen Farbunterschieden und Beschreibung mit Farbabstandsformeln

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Philipp Kittelmann
aus Berlin

von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. M. Alexa
Berichter:	Prof. Dr. H. Kaase
Berichter:	Prof. Dr. K. Richter
Berichter:	Prof. Dr. S. Völker

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01. April 2010

Berlin 2010

D 83

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Heinrich Kaase, dem langjährigen Leiter des Fachgebiets Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin, der mich über viele Jahre hinweg in meinem fachlichen Interesse bestärkt hat, indem er mir zum Gedankenaustausch zur Verfügung stand. Seine uneingeschränkte Unterstützung während Studium und Dissertation war eine wichtige Voraussetzung für diese Arbeit.

Gleichermaßen danke ich Herrn Prof. Dr. phil. Klaus Richter für die produktiven Diskussionen bei der Entwicklung meines Themas. Seine hervorragende und allumfassende Betreuung hat mich stets motiviert, besonders sein mir entgegengebrachtes Vertrauen sowie die damit verbundene Freiheit, meine eigenen Vorstellungen umzusetzen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker, dem Leiter des Fachgebiets Lichttechnik an der Technischen Universität Berlin, danke ich für seine fachliche Hilfestellung und seine Unterstützung.

Der BAM danke ich für die Bereitstellung aller von mir verwendeten Mittel. Auch meine Kollegen möchte ich an dieser Stelle lobend erwähnen. Besonders Dr. Jens Witt, Klaus-Peter Gründer und Bernd Muschik standen mir stets für fachliche Gespräche zur Verfügung.

Meiner Frau Laura will ich sehr herzlich für ihre große Unterstützung und für die Durchsicht der Arbeit danken: *Ohne Dich wäre es nicht gegangen.*

Meine Mutter Marion Kittelmann, meine beiden Brüder Florian und Stephan sowie meine Onkel Wilm und Rüdiger Kittelmann gaben mir in jeder Phase den unschätzbaren familiären Rückhalt. Dr. Olga Schüler möchte ich sehr herzlich für die Durchsicht meiner Arbeit danken. Gerdi Willing führte mich mit ihrem Optimismus und ihrer positiven Einstellung immer wieder auf den richtigen Weg. Ein liebevolles Gedenken gilt an dieser Stelle auch meinem Vater Peter Kittelmann und Achim Willing: *Ohne Euch wäre ich nicht da, wo ich heute bin. Ich hoffe, Ihr seid stolz auf mich.*

Zuletzt bedanke ich mich noch bei meinen 40 Probanden für ihre Zeit und die Geduld, die sie während der Messungen aufbrachten.

Philipp Kittelmann

21. April 2010

Vorwort

In dieser Arbeit wird die visuelle Farbbeurteilung von Testpersonen mit mathematischen Berechnungen von Farben und deren Differenzen verglichen. Um die verschiedenen Verwendungen der Begriffe für die visuellen Empfindungen der Probanden und die Berechnungen zu verdeutlichen, werden diese Begriffe zunächst definiert und dann in dieser Definition in der Arbeit verwendet.

- Farbe: Farbe ist „diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann“ [DIN79a]. Die Farbe ist somit eine optische Empfindung eines Materials, die nicht von der Struktur, dem Glanz oder der Rauhigkeit abhängt.

- Farbunterschied: Die von den Probanden empfundenen Differenzen zwischen zwei Farben werden als Farbunterschiede bezeichnet.

- Farbschwelle: Der kleinste erkennbare Farbunterschied zwischen zwei Farben wird als Farbschwelle bezeichnet. Die Farbschwelle ist dabei statistisch so definiert, dass sie jeweils bei der Hälfte der Betrachtungen erkannt oder nicht erkannt wird. Alle Farbunterschiede, die größer als die Farbschwelle sind, sind „überschwellig“.

- Farbabstand: Die durch Formeln berechnete Differenz zwischen zwei Farben wird als Farbabstand bezeichnet.

- Kleine Farbunterschiede: Farbunterschiede, die einen Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen 1 und 5 haben, werden als klein bezeichnet.

- Große Farbunterschiede: Farbunterschiede, die einen Farbabstand > 5 ΔE^*_{ab} haben, werden als groß bezeichnet.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1: Einleitung 1
1.1 Motivation 1
1.2 Ziel der Arbeit 2

Kapitel 2: Stand der Wissenschaft 5
2.1 Offene Fragen 9
2.2 Hypothesen 9

Kapitel 3: Versuchsaufbau 11
3.1 Statistische Daten der Probanden 11
3.1.1 Farbseheigenschaften der Testpersonen 12
3.1.2 Farbfehlsichtigkeitsprüfung der Testpersonen 13
3.2 Abmusterungskabine 13
3.3 Versuchsaufbau der Untersuchung von Farbschwellen 15
3.3.1 Methode zur Erzeugung der Farbschwellen 16
3.3.2 Farbschwellenversuchsaufbau 17
3.3.3 Berechnung der Strahlungsfunktion der zweiten Lichtart 18
3.3.4 Farbmuster für die verschiedenen Schwellenuntersuchungen 25
3.4 Versuchsaufbau der Untersuchung der großen Farbunterschiede 28
3.4.1 Zwölf Testseiten für Untersuchung von großen Farbunterschieden 30
3.4.2 Bewertung der Vergleichsfarben 31
3.5 Fehlerbetrachtung 33

Kapitel 4: Ergebnisse 35
4.1 Ergebnisse der Untersuchung von Farbschwellen 35
4.1.1 Ellipsen in der Normfarbtafel 35
4.1.2 Schwellenellipsoide im CIELAB-Farbraum 39
4.1.3 Farbmetrische Beschreibung der Farbschwellen mit einem Polynom 2. Grades oder zwei Polynomen 1. Grades 44
4.1.4 Vergleich der neu vorgeschlagenen Funktion mit bekannten Farbabstandsformeln 53
4.1.5 Werte der CIELAB-Farbabstandsformel für die Farbschwellen 55
4.1.6 Werte der CIEDE2000-Farbabstandsformel für die Farbschwellen 56
4.1.7 Vergleich und Optimierung ausgewählter Farbabstände 58
4.1.8 Untersuchung der LABJNDS-Farbabstandsformel 66
4.1.9 Vergleich des CIEXYZ-Farbraumes mit den Farbräumen LMS und LMSV 68
4.2 Vergleich großer visueller Farbunterschiede und berechneter Farbabstände 71

4.2.1 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit der CIELAB-Farbabstandsformel 72
4.2.2 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit der CIEDE2000-Farbabstandsformel 79
4.2.3 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit ausgewählten Farbabstandsformeln 87
4.2.4 Optimierungsmodelle bei den großen Farbunterschieden 94
4.3 Vergleich der Probandendaten 96

Kapitel 5: Weitere Untersuchungen 99
5.1 Skalierungsexperiment 99
5.1.1 Auswertung des Skalierungsexperimentes 99
5.1.2 Ergebnisse des Skalierungsexperiments 100
5.2 Farbschwellen für separat liegende Farbmuster 102
5.2.1 Auswertung der geometrischen Abstandsuntersuchung für Farbschwellen 102
5.2.2 Farbschwellen mit geometrischem Abstand zwischen den Farbmustern 103

Kapitel 6: Analyse und Ausblick 107

Kapitel 7: Zusammenfassung 109
7.1 Summary 110

Literatur 111

Anhang 119
A.1 Farbmessung 119
A.1.1 Technische Daten des SpectroScans 119
A.1.2 Überprüfung der Genauigkeit der Farbmessung 121
A.2 Farbabstandsformeln 124
A.2.1 LABHNU-Farbräume 124
A.2.2 CMC(l:c)-Farbabstandsformel 124
A.2.3 CIE94-Farbabstandsformel 125
A.2.4 CIEDE2000-Farbabstandsformel 126
A.2.5 DIN99-Farbabstandsformel 127
A.2.6 Optimierte DIN99-Farbabstandsformel 127
A.2.7 Farbschwellen-Formel LABJNDS 128
A.3 Herstellung der Testseiten 129
A.4 Untersuchung der Farbschwellen 132
A.5 Untersuchung der großen Farbunterschiede 139
A.6 Skalierungsexperiment 147
A.7 Farbschwellenuntersuchung mit geometrischen Abständen 148
A.8 Ordnerstruktur der eingefügten CD 149
A.9 Testseiten 149

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Seit Jahrzehnten ist es Ziel der Farbmetrik, das menschliche Farbempfinden in einem mathematischen System zu beschreiben. Eine präzise Abgrenzung unterschiedlicher Farben ist zweckdienlich oder sogar erforderlich in vielen Bereichen, zum Beispiel in der Automobil-, der Textilindustrie sowie der Landwirtschaft. Daher wurden immer neue Bestrebungen angestellt, um den Unterschied zwischen zwei Farben mathematisch so zu beschreiben, wie er dem Empfinden des Menschen entspricht. Daraus haben sich etliche, zum Teil sehr komplexe Farbsysteme und Farbabstandsformeln entwickelt. Sie sind in zahlreichen technischen Berichten der CIE [CIE04a, CIE05] und DIN-Vorschriften [DIN79c, DIN01] beschrieben. In der industriellen Anwendung sind vor allem kleine Farbabstände mit einem ΔE^*_{ab} zwischen 1 und 5 von Bedeutung.

In der Diplomarbeit „Visuelle Überprüfung großer CIELAB-Farbabstände von 3- und 5-stufigen Farbreihen“ [Kit05] von Kittelmann wurden große Farbabstände von ΔE^*_{ab} größer als 10 beurteilt. Dabei wurde vor allem der Unterschied zwischen den verschiedenen Farbabstandsformeln betrachtet. Einer der untersuchten Parameter war der Vergleich von direkt aneinander mit separat liegenden Farbmustern. Die CIELAB-Formel wies dabei die beste Korrelation zu den Bewertungen der Testpersonen auf. Zudem wurde festgestellt, dass bei separat liegenden Farbmustern eine bessere Korrelation zustande kommt als bei direkt aneinander liegenden Farbmustern.

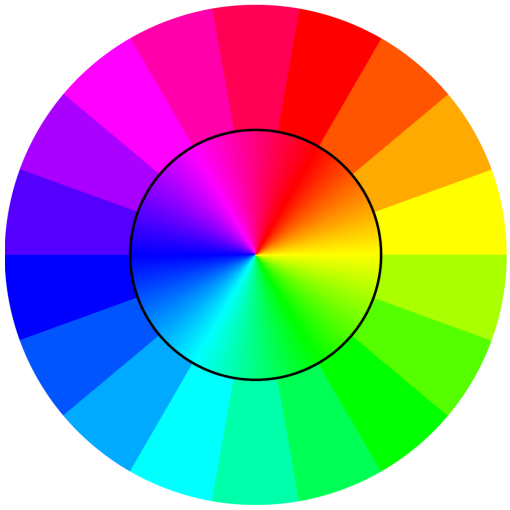

Bild 1.1 Farbschwelle (innen) und große Farbunterschiede (außen)

Jedoch liefert keine der bisher vorhandenen Farbabstandsformeln einen Ansatz, der für die gesamte Bandbreite der Farbunterschiede anwendbar ist, also sowohl für den Farbschwellenbereich als auch für große Farbunterschiede zutrifft. In dieser Arbeit soll nun eine genauere Untersuchung der Farbschwellen und der großen Farbunterschiede durchgeführt werden. Des Weiteren soll der Einfluss unterschiedlicher Farbeigenschaften, wie zum Beispiel der Helligkeit der Farbe, dargestellt werden. Bild 1.1 zeigt Farbunterschiede, die sich von der Farbschwelle bis zu großen Farbunterschieden erstrecken.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf den Farbschwellen. Für die Farbschwellen ist der Farbabstand abhängig von der Lage der Referenzfarbe im CIELAB-Farbraum und der Veränderung der Helligkeit L^*, der Buntheit C^*_{ab} und des Bunttonwinkels h_{ab}.

Die großen Farbunterschiede werden im zweiten Teil dieser Arbeit genauer betrachtet. Diese Farbunterschiede können sich über farblich verschiedene Bereiche[1] des CIELAB-Farbraumes erstrecken, daher spielen auch entsprechend viele Parameter bei der Bewertung dieser Farbunterschiede eine Rolle. Dies erschwert die Voraussage, wie genau ein großer Farbunterschied empfunden wird.

1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung des CIELAB-Farbraumes um den Graumittelpunkt[2], sowohl im Bezug auf die Farbschwellen als auch auf die großen Farbunterschiede. Hierzu werden die visuellen Bewertungen durch Testpersonen mit den theoretisch berechneten Farbabständen verglichen. Dabei werden unterschiedliche farbmetrische Parameter vorausgesetzt.

Diese Untersuchung ist wichtig, weil durch den Fortschritt in der Technik immer neue Beleuchtungssysteme (zum Beispiel LED-Leuchten[3]) entwickelt werden, die zu einer besseren Farberkennung beitragen. Kombinationssysteme, die die Nutzung des Tageslichtes mit künstlicher Beleuchtung verbinden, führen zu unterschiedlichen Lichtfarben in einem Raum und zu einer Veränderung der Lichtfarbe mit der Zeit. In diesem Fall könnten kleine Farbunterschiede, die durch Metamerie-Effekte[4] entstehen, deutlicher werden. Zum anderen wird die Produktion in der Industrie immer globaler. Die Teile eines Produktes werden in verschiedenen Ländern hergestellt und in einem anderen Land zusammengesetzt. Das fertige Produkt sollte dennoch keine erkennbaren Farbunterschiede aufweisen.

Es soll untersucht und dargestellt werden, wie verschiedene Farbabstandsformeln Farbschwellen und große Farbunterschiede beschreiben. Die CIELAB- und die CIEDE2000-Farbabstandsformeln werden hierbei gesondert untersucht. Die Arbeit befasst sich schwerpunktmäßig mit den Körperfarben und vernachlässigt die Lichtfarben. Körperfarben sind Farben, die durch Reflektion einer Beleuchtung auf einer Oberfläche entstehen, während Lichtfarben die Farben eines selbst leuchtenden Objektes sind.

Der größte Teil der Arbeit betrifft Farbschwellen und ihre Farbabstände bei verschiedenen Referenzfarben. Dabei wird besonders die Abhängigkeit der Farbabstände von den einzelnen Farbwerten der Proben untersucht. Für die Farbschwellen werden die Farbabstände ΔE^* bei unterschiedlichen Farbmustern und Farbveränderungen untersucht. Der Farbabstand wird mittels mehrerer gängiger Farbabstandsformeln berechnet. Für die verschiedenen Farbschwellen werden die berechneten Farbabstände miteinander verglichen.

---

1 Der CIELAB-Farbraum wird in den grünen, roten, gelben, blauen, hellen und dunklen Bereich unterteilt.

2 Als Graumittelpunkt wird die Farbe mit den Farbmaßzahlen $L^* = 50$, $a^* = 0$, $b^* = 0$ bezeichnet.

3 Die Abkürzung „LED“ steht für Light Emitting Diode.

4 Mit Metamerie bezeichnet man in der Optik den Sachverhalt, dass unterschiedliche Spektren für eine gegebene Lichtart beim Menschen denselben Farbeindruck hervorrufen können.

Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede werden die Veränderungen der einzelnen Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* und ihre vier verschiedenen Kombinationen[5] jeweils gesondert untersucht. Die Wahrnehmung der Farbunterschiede soll durch ihre Anordnung in einer Farbreihe nicht beeinflusst werden. Die Testpersonen sollen die Farbunterschiede bewerten, ohne durch die Vorgabe eines Farbsystems oder einer Farbabstandsformel beeinflusst zu werden.

Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede wird ermittelt, wie gut die gewählte Farbabstandsformel jeweils die visuelle Bewertung der Testpersonen wiedergibt. Dafür muss ein System entwickelt werden, das zum einen die Farbabstandsformel zu den visuellen Bewertungen der Testpersonen in Bezug setzt. Zum anderen müssen trotz Anwendung unterschiedlicher Formeln sämtliche Ergebnisse miteinander vergleichbar sein.

Ein weiterer Schritt ist es, die Sehzapfen-Grundfunktionen anzuwenden, die im Technischen Bericht 170-1:2006 der CIE [CIE06a] eingeführt wurden. Dazu muss ein Vergleich zwischen den Sehzapfen-Grundfunktionen und den Normspektralwertfunktionen stattfinden. Da noch kein genormtes System zur Berechnung von Farbabständen über die Sehzapfen-Grundfunktion von der CIE veröffentlicht wurde, ist hier ein großer Spielraum für eigene Entwicklungen vorhanden.

[5] Bei den vier Kombinationen handelt es sich um die Veränderung jeweils zweier Farbmaßzahlen, L^* und a^*, L^* und b^* sowie a^* und b^*, und die Veränderung aller drei Farbmaßzahlen.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft

Es wurden schon viele Untersuchungen durchgeführt, die die visuelle Bewertung durch Testpersonen mit einem farbmetrischen System verbinden sollten. Dabei wurden zunehmend komplexere Farbabstandsformeln entwickelt, die alle Effekte der Farbempfindung in sich vereinen sollten.

Die Untersuchungen von D. L. MacAdam von 1942 [MAd42] gehörten zu den ersten Untersuchungen über Farbschwellen. MacAdam fand heraus, dass sich die Farbschwellen in der Normfarbtafel als Ellipsen um die Referenzfarben beschreiben lassen. Er untersuchte dabei aber nur Lichtfarben. 1949 wurden diese Untersuchungen von MacAdam zusammen mit Brown detaillierter durchgeführt. Diesmal wurden die Farben aus drei primären Farben gemischt. Auf einem dunklen Hintergrund wurde ein 2° großes Beobachtungsfeld untersucht. Dabei wurden nicht nur die 38 betrachteten Farbarten, sondern auch deren Leuchtdichte verändert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte ebenfalls als Ellipsoide in der Normfarbtafel.

In der BAM führte Klaus Richter im Jahr 1979 [Ric79] Untersuchungen zum Gegenfarbsystem[6] durch. Dabei wurden Farbschwellen durch haploskopisches Sehen bestimmt. Ein 2°-Innenfeld in Form eines Halbkreises lag auf einem quadratischen 10°-Umfeld. Es wurden zwei getrennte Halbkreise betrachtet. Das linke Auge betrachtete ausschließlich den linken Halbkreis auf einem weißen Hintergrund, das rechte nur den rechten Halbkreis auf einem Hintergrund anderer Farbe. Die Anordnung war so aufgebaut, dass die beiden Halbkreise zusammen im Ergebnis als ein vollständiger Kreis wahrgenommen werden sollten. Bei der Untersuchung wurden für den Hintergrund acht verschiedene Farben verwendet. Auf dem weißen Hintergrund wurde eine Innenfeldfarbe vorgegeben, die dann auch auf dem bunten Umfeld erzeugt werden sollte. Dabei wurden 12 Bunttonreihen mit 15 Sättigungsstufen als Innenfeldfarbe auf dem weißen Hintergrund vorgegeben. Das Experiment wurde zuerst nur mit einem gelben Umfeld durchgeführt. Für die Farben der Innenfelder ergaben sich Farborte in der Normfarbtafel, die auf einer Geraden lagen und sich von Gelbgrün nach Blaurot erstreckten. Das Ergebnis bestätigte die binokulare Wechselwirkung in der haploskopischen Versuchstechnik[7].

An der BAM wurden unter der Führung von Klaus Witt in den Achtzigerjahren mehrere Farbschwellenuntersuchungen für Körperfarben durchgeführt [WiD83] [Wit87] [Wit90]. Es

[6] Das Gegenfarbsystem basiert auf den drei Empfindungen des menschlichen Sehens: Helligkeit, Rot/Grün- und Blau/Gelb-Buntheit. Es wird vorausgesetzt, dass es drei Urfarbenpaare (Weiß/Schwarz, Rot/Grün, Gelb/Blau) gibt, bei denen jeweils beide Farben des Paares keinen Anteil der anderen Farbe enthalten. [Ric96]

[7] Bei der haploskopischen Versuchstechnik werden unterschiedliche Farbreize für jeweils ein Auge erzeugt. Beide Augen zusammen zeigen eine gemeinsame Adaptation an zwei verschiedene Reize und Reizorte. In der Augenoptik bedeutet haploskopisch, dass für jedes einzelne Auge Filter verschrieben werden, die bei beidseits geöffneten Augen aufeinander abgestimmt werden.

wurden die Farbschwellen um fünf Referenzfarben untersucht. Bei diesen Referenzfarben handelte es sich um Weiß, Blau, Grün, Rot und Gelb. Für jede Referenzfarbe wurden 50 bis 64 Probenfarben mit einem CIELAB-Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen 0,06 und 1,1 hergestellt. Die Referenz- und die Probenfarben wurden so nah wie möglich aneinander geführt, es war aber immer eine schmale senkrechte Kante zu sehen. Es ergab sich für alle fünf Referenzfarben ein Farbschwellenellipsoid im (x,y,Y)-Raum. Bei der Untersuchung der Parameter „Hintergrundhelligkeit“ und „Probenabstand“ ergaben sich keine großen Veränderungen in den Ergebnissen.

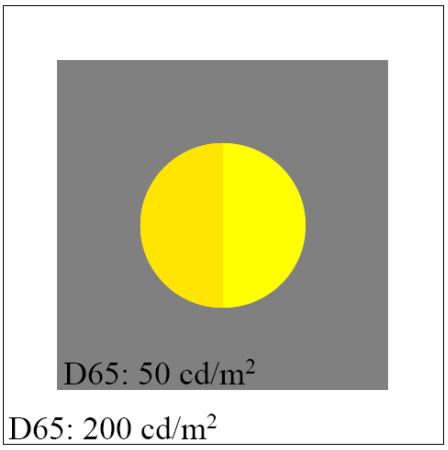

Bild 2.1 Aufbau der Innen- und Umfelder

In der Arbeit „Farbempfindungsmerkmal Elementarbuntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld“ [Ric85] von 1985 untersuchte Klaus Richter die Farbschwellen in der Rot-Grün- und Blau-Gelb-Richtung. Es wurden kreisförmige Innenfelder auf einem grauen quadratischen Umfeld betrachtet, beide Felder waren von einer weißen Fläche umgeben. (Bild 2.1) Die Farbe des Hintergrundes wurde durch rückseitige Beleuchtung erzeugt. Die Farbe des Innenfeldes wurde durch vorderseitige Projektion hergestellt und sollte die gleiche Helligkeit wie die graue Umfeldfarbe haben. Die linke und die rechte Hälfte des Innenkreises wurden durch unterschiedliche Projektoren beleuchtet und der Proband sollte über die Beleuchtung des einen Halbkreises eine Farbschwelle einstellen. Es zeigte sich, dass die Schwellenerkennbarkeit für die Rot-Grün-Richtung und die Gelb-Blau-Richtung schlechter wurde, sobald die Buntheit der Farben zunahm.

An der BAM wurden noch weitere Untersuchungen zur Schwellenerkennbarkeit durchgeführt. In der Arbeit „Experimentelle Ermittlung des Leuchtdichte-Unterscheidungsvermögens von unbunten und bunten Infeldfarben“ [Avr88] aus dem Jahre 1988 wurden die erkennbaren Helligkeitsschwellen bei verschiedenen Innenfeldfarben von Dimitrios Avramopoulos untersucht. Das Experiment war ähnlich aufgebaut wie das aus dem Jahre 1979: Zwei halbkreisförmige Innenfelder waren von einem grauen Umfeld umgeben, das wiederum auf einem weißen Hintergrund lag (Bild 2.1). Die Farbe eines der beiden Innenfeld-Halbkreise wurde verändert und sollte dann so eingestellt werden, dass eine Farbschwelle zur Farbe des zweiten Halbkreises erkennbar wird. Es wurden 11 Basisleuchtdichten untersucht. Bei bunten und unbunten Innenfeldfarben waren ähnliche Leuchtdichteunterschiede für die Farbschwellen notwendig. Außerdem vergrößerten sich die Leuchtdichteunterschiede für die Farbschwellen als Funktion der Umfeldleuchtdichte.

1995 untersuchte Georg Krikonis in der Arbeit „Die Schwellenerkennbarkeit von statischen, farbigen Streifenmustern“ [Kri95] die Schwellenerkennbarkeit von statischen Farbzeichen. Dazu wurden auf einem Monitor Farben in einem kreisförmigen Innenfeld erzeugt, das auf einem grauen Umfeld betrachtet wurde. Das Innenfeld war in Streifen angeordnet, die sich farblich verändern ließen. Man untersuchte zwei Streifenmuster unterschiedlicher Breite. Betrachtet wurden 19 Kombinationen von 64 verschiedenen Leuchtdichten bei 10 unterschiedlichen Lichtarten. Die ermittelten Unterschiede lassen sich weder mit der Farbmetrik noch mit den psychophysiologischen Grundsätzen erklären. Es konnte aber eine

Abhängigkeit zwischen dem Quotienten der Leuchtdichte zu den Veränderungen der Leuchtdichte und der logarithmischen Darstellung der Leuchtdichte nachgewiesen werden.

An der Universität von Granada untersuchten J. A. Martínez, A. J. Poza, M. Melgosa und E. Hita [MPM96] 1996 den Einfluss von Farbkorrekturfunktionen bei Farbschwellen und großen Farbunterschieden. Es wurden fünf Farbbereiche mit 200 Munsell-Proben betrachtet. Es zeigte sich, dass alle untersuchten Funktionen bei den Schwellen zu Diskriminationsellipsen führten, die sich in ihrer Ausrichtung kaum unterschieden. Für große Farbunterschiede traten innerhalb der Probandengruppe große Differenzen bei den Ergebnissen zur Farbbestimmung auf. Dagegen bestand eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der bewerteten Farbabstände. Man kam zu dem Schluss, dass es sowohl bei großen als auch bei kleinen Farbabständen einen signifikanten Einfluss der Farbkorrekturfunktionen auf die Einzelfarben, aber nur einen geringen auf die Bestimmung der Farbunterschiede gibt.

Alexander Rosemann [Ros97] untersuchte 1997 aneinander und separat liegende Graumuster. Es wurden visuell gleichabständige Graumuster hergestellt, die sich in 32 bis 512 Stufen von Weiß nach Schwarz veränderten. Man untersuchte, wie gut sich die einzelnen Stufen voneinander unterscheiden ließen, beziehungsweise wann kein Unterschied mehr erkennbar war. Dabei zeigte sich, dass es Unterschiede in der Wahrnehmung von Farbunterschieden bei separat und direkt aneinander liegenden Farbreihen gibt. Während bei den aneinander grenzenden Farbmustern der Zusammenhang zwischen der Helligkeit und dem Hellbezugswert durch eine stetige S-Funktion angenähert wird, hat die Funktion bei den separat liegenden Farbmustern eine Unstetigkeitsstelle im mittelgrauen Bereich. Die ermittelte Abhängigkeit zwischen der Helligkeit und dem Hellbezugswert stand dabei im Widerspruch zur CIELAB-Farbabstandsformel. Es wurde ebenfalls der Einfluss der Umgebungsfarbe durch einen hellen, dunklen und mittelgrauen Hintergrund untersucht. Hierbei wurde deutlich, dass es bei den direkt aneinander liegenden Farbreihen keinen Einfluss der Umgebungsfarbe gibt. Separat liegende Farbreihen hingegen ließen sich am besten auf einem mittelgrauen Hintergrund unterscheiden.

In seiner Doktorarbeit von 1998 beschäftigte sich der Psychologe Rainer Zwisler [Zwi98a] mit den Kontexteffekten bei hochgesättigten Farben. Dazu führte er eine Untersuchung mit vier Probanden durch. Diese Probanden sollten eine subjektiv konstante Farbe für ein Innenfeld auf wechselnden farbigen Hintergründen einstellen. Jene Farbe wurde als Standardfarbe bezeichnet. Der Hintergrund war ein ungefähr 10° großes Umfeld, das durch einen kalibrierten Computermonitor dargestellt wurde. Das Innenfeld war kleiner als 2°. Die Farbe dieses Innenfeldes wurde über das Licht einer Halogenglühlampe und mit monochromatischem Licht erzeugt, das auf einer gleichmäßigen Fläche reflektiert wurde. Zuerst sollten die Probanden die Standardfarbe mehrmals bei einem bestimmen Hintergrund einstellen. Dann wurde dieser Hintergrund verändert, und die Probanden sollten die Standardfarbe bei neuer Umgebungsfarbe erneut einstellen. Es wurden 10 verschiedene Standardfarben untersucht, wobei 3 rein monochromatisch waren. Man stellte fest, dass sich die Einstellungen der Probanden nicht vorhersagen ließen. Durch Vernachlässigung der Gedächtniseffekte[8] wurde deutlich, dass sich für die Vorhersage der Einstellungen nur das projektive Modell halbwegs eignete.

Große Farbunterschiede mit einem ΔE^*_{ab} von über 10 wurden schon häufiger untersucht. Exemplarisch soll die Untersuchung von Shing-Sheng Guan und M. Ronnier Luo [GuL99] aus dem Jahr 1999 erwähnt werden. Sie erzeugten 292 Wollfarbmuster, die ein mittleres

[8] Die Probanden führten die Untersuchung mehrmals durch. Sie wussten bei den späteren Untersuchungen die erwarteten Werte. Dieser Effekt musste herausgerechnet werden.

ΔE^*_{ab} von 12 zueinander hatten. Dabei hatten 202 Proben ungefähr eine Helligkeit von $L^* = 50$, die restlichen 90 Proben befanden sich bei Helligkeiten L^* zwischen 40 und 60. Die Bestimmung der Farbunterschiede erfolgte mit zwei verschiedenen Methoden: der Vergleich mit einer Grauskala[9], deren Muster die gleichen physikalischen und materiellen Eigenschaften hatten, und ein Paarvergleich, für den 3 Standardpaare ausgewählt und mit den Probenpaaren verglichen wurden. Die Grauskalenmethode eignete sich besser als die Paarvergleichsmethode. Es zeigte sich, dass die CIELAB-Farbabstandsformel die großen Farbabstände etwas besser beschreibt als die Formeln CMC, CIE94 und die BFD.

Haisong Xu, Hiroshia Yaguchi und Satorshi Shiori [XYS02] untersuchten 2002 die Korrelation zwischen den visuellen und farbmetrischen Bewertungen für Farbschwellen und große Farbunterschiede. In psychophysikalischen Experimenten wurden die Farbunterscheidungsschwellen, aber auch überschwellige Farbunterschiede[10] betrachtet. Dabei wurden die Reize zum einen stufenweise und zum anderen kontinuierlich verändert. Die untersuchten Farben erstreckten sich in den fünf untersuchten CIELAB-Farbbereichen von den Farbschwellen bis hin zu großen Farbunterschieden. Der Vergleich der bewerteten und der berechneten Werte zeigte sowohl für die CIELAB- als auch für die Schwelleneinheiten[11] eine lineare Abhängigkeit zueinander. Diese Abhängigkeit war jedoch bei jeder einzelnen Richtung und in jedem Farbbereich unterschiedlich. Für Farbunterschiede mit einem Vielfachen der Farbschwellen wurden die CIELAB-Farbabstände als zu gering berechnet. Bei Anwendung der Farbschwelleneinheiten für größere Farbabstände wurden die farbmetrischen Größen als zu gering wahrgenommen. Das verwendete CIELAB-Farbsystem ist dementsprechend kein lineares Einheitssystem. Beim Vergleich der Farbabstandsformeln zeigte die CIEDE2000-Formel die beste Korrelation, gefolgt von der CMC-Formel und der CIELAB-Formel. Die CIE94-Formel zeigte das schlechteste Ergebnis.

Philipp Kittelmann untersuchte in seiner Diplomarbeit [Kit05], wie nach der CIELAB-Farbabstandsformel hergestellte gleichabständige Farbreihen von Probanden visuell beurteilt werden. Es wurden hauptsächlich gleichabständige 3- und 5-stufige CIELAB-Farbreihen untersucht. Die Farbreihen reichten von Weiß nach Bunt und von Bunt nach Schwarz sowie von Weiß nach Schwarz. Als Endfarben dieser Farbbereiche sind die Standard-Offset-Farben definiert. Außerdem wurden die Farbreihen von Weiß nach Schwarz über eine bunte Farbe, sowie die bunten Offset-Farben untereinander verglichen. Die Untersuchungen wurden sowohl für direkt aneinander als auch separat liegende Farbreihen durchgeführt. Die visuellen Bewertungen der Probanden wurden mit den Farbabständen verglichen, die nach verschiedenen Farbabstandsformeln berechnet wurden. Es zeigte sich, dass die nach CIELAB gleichabständigen Farbreihen von den Probanden größtenteils nicht als gleichabständig bewertet wurden. Dennoch gab die CIELAB-Farbabstandsformel die Bewertungen der Probanden insgesamt am besten wieder. Die Korrelation zwischen Bewertung und Berechnung war bei den separat liegenden Farbreihen geringer als bei den direkt aneinander liegenden. Bei den nicht gleichabständig erzeugten Farbreihen zeigte die DIN99-Farbabstandsformel den geringsten Unterschied zu den Bewertungen der Probanden.

An der Universität von Leeds wurde 2007 untersucht [WCL07], für welche Größenbereiche sich die CIEDE2000-Formel eignet. Die CIEDE2000-Farbabstandsformel wurde bei großen ($21{,}9 < \Delta E^*_{ab} < 107{,}2$), mittleren ($2{,}1 < \Delta E^*_{ab} < 7{,}0$) und kleinen ($0{,}2 < \Delta E^*_{ab} < 0{,}6$) Farbabständen mit der CIELAB-, der CMC- und CIE94-Formel verglichen. Die CIEDE2000-

[9] Eine Vergleichsskala aus Wollproben wurde hergestellt. Sie bestand nur aus grauen Farben und wurde daher „Grauskala“ genannt.

[10] Als „überschwellige Farbabstände“ werden Farbabstände bezeichnet, die größer als die Farbschwelle sind.

[11] Die Größe einer Schwelle wird als Schwelleneinheit bezeichnet.

Formel lieferte bei großen Farbabständen unbedeutend bessere Ergebnisse als die anderen drei Formeln. Bei den mittleren Farbabständen war die CIEDE2000 signifikant besser geeignet als die CIELAB-Formel und etwas besser als die beiden anderen Formeln. Bei kleinen Farbabständen korrelierte die CIEDE2000 deutlich besser als die CIELAB- und CIE94-Formeln mit den Bewertungen der Probanden, aber nur gering besser als die CMC-Formel.

2.1 Offene Fragen

Die meisten Experimente wurden für kleine Farbunterschiede, mit einem CIELAB-Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen 1 und 5, durchgeführt, da diese für die praktische Anwendung wichtig sind. Für die Entwicklung der CIEDE2000-Farbabstandsformel wurden nur Untersuchungsergebnisse verwendet, in denen sich die Farbunterschiede in diesem Bereich befanden. Es ist daher zu überprüfen, inwieweit sich die CIEDE2000-Farbabstandsformel auch für die Beschreibung von Farbschwellen ($\Delta E^*_{ab} < 1$) und großen Farbunterschieden ($\Delta E^*_{ab} > 5$) eignet.

In den Untersuchungen von Farbschwellen konnten die Farbschwellen nur für Lichtfarben exakt bestimmt werden. Bei der Untersuchung von Farbschwellen für Körperfarben konnte nur bestimmt werden, ob ein Farbunterschied erkennbar ist oder nicht. Durch diese Methode wurde nicht die exakte Farbschwelle bestimmt, sondern nur der Bereich. Ein weiterer Nachteil bei der Bestimmung von Farbschwellen für Körperfarben ist der Umfang der Untersuchung. Zur Bestimmung der Farbschwelle um eine Referenzfarbe werden sehr viele Probenmuster benötigt. Daher beschränkte man sich meist auf wenige Referenzfarben. Des Weiteren wurden die Referenzfarbe und die Probenfarben nicht mit direktem Kontakt hergestellt, sondern befanden sich auf zwei unterschiedlichen Mustern. Diese Muster wurden nebeneinander gehalten, wodurch sich immer eine kleine geometrische Lücke zwischen den Mustern einstellte. Es ist zu überprüfen, welchen Einfluss eine solche geometrische Lücke auf die Bestimmung der Farbschwelle hat.

Für die Untersuchung von großen Farbunterschieden gibt es zwei gängige Methoden. Bei der Methode des Paarvergleiches wird jeweils ein Farbunterschied mit einem Referenzfarbunterschied verglichen. Bei der Verhältnis-Methode werden zwei Farbunterschiede miteinander ins Verhältnis gesetzt. Beide Methoden haben den Nachteil, dass sie das Ergebnis der Untersuchung alleine durch den Aufbau der Untersuchung beeinflussen. Es sollte nun eine Methode entwickelt werden, die diesen Nachteil nicht mehr hat.

2.2 Hypothesen

Sowohl für das Problem der Beschreibung der Farbschwellen als auch der großen Farbunterschiede sollten Lösungen gefunden werden. Diese Lösungen sollen realisierbar sein und keine komplexen theoretischen Ansätze enthalten.

Bei der Untersuchung soll eine genaue Bestimmung der Farbschwellen für Körperfarben ermöglicht werden. Der Ansatz für die Messmethode ist die Einführung einer zweiten Lichtart zusätzlich zur Standardbeleuchtung. Durch diese zweite Lichtart ändern sich die Normfarbwerte des Farbmusters. Durch die zusätzliche Beleuchtung werden die Proben bei

jeder Messung immer heller. Dabei sollte es aber im Bereich der Farbschwellen keinen Unterschied machen, ob ein Farbmuster heller oder dunkler wird.

Durch die neue Methode werden die Farbschwellen für Körperfarben exakt bestimmt. Die Ergebnisse unterscheiden sich daher deutlich von den bisherigen Untersuchungen, bei denen die Probanden bei einem festen Farbunterschied nur entscheiden konnten, ob er erkennbar ist oder nicht. Ein Vergleich der Ergebnisse wird daher nur bedingt möglich sein.

Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede soll eine Methode gefunden werden, die unabhängig vom Aufbau der Untersuchung ist und das Ergebnis nicht beeinflusst. Eine Kombination der beiden Methoden „Paarvergleich“ und „Verhältnis“ sollte diesen Nachteil nicht mehr haben. Das Referenzprobenpaar des Paarvergleiches wird bei dieser Methode nicht mehr benötigt. Die Eigenschaft der Verhältnismethode, dass immer nur zwei Farbunterschiede miteinander verglichen werden können, entfällt bei diesem Ansatz. Des Weiteren werden die Farbunterschiede nicht nach der Größe ihrer Farbabstände sortiert. Die Reihenfolge wird zufällig ausgewählt.

Kapitel 3

Versuchsaufbau

Die allgemeinen Bedingungen für die Durchführung eines Farbabmusterungsexperiments sind in der DIN 6173-1 [DIN75] angegeben. Sie setzen sich im Wesentlichen aus den folgenden drei Bedingungen zusammen:

1. Die wirksame Farbabmusterungslichtart
2. Die geometrischen Abmusterungsbedingungen
3. Die physiologischen Abmusterungsbedingungen

Bei einem Farbabmusterungsexperiment beeinflussen sehr viele Parameter die Empfindung der Probanden. Sie müssen daher immer vor einem Experiment genau definiert und angeben werden. Die genauen Bedingungen des durchgeführten Experimentes werden in diesem Kapitel beschrieben.

Beide Farbabmusterungsexperimente werden in einer Abmusterungskabine durchgeführt, welche die Normlichtart D65 simuliert. Des Weiteren wird bei der Farbschwellenuntersuchung die Probe mit einer zweiten Lichtart bestrahlt. Im Folgenden wird zuerst die Abmusterungskabine beschrieben, dann der Aufbau der Untersuchungen von Farbschwellen und anschließend für die Untersuchung der großen Farbunterschieden.

3.1 Statistische Daten der Probanden

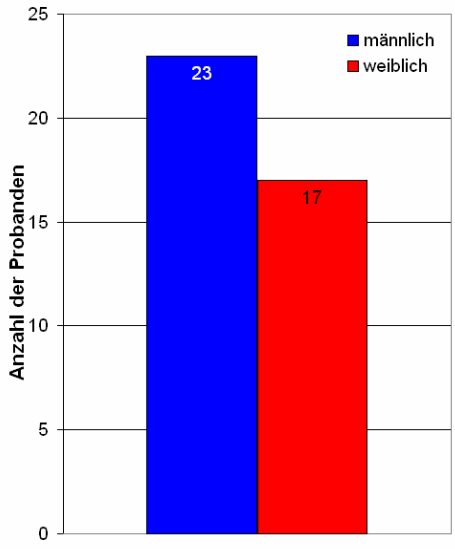

Bild 3.1 Anzahl der männlichen und weiblichen Probanden

Bei einer Untersuchung, die sehr vom Empfinden der teilnehmenden Probanden abhängt, ist eine detaillierte Aufstellung der teilnehmenden Probanden wichtig. Bei der Auswahl der Probanden wurde vor allem auf eine gleichmäßige Anzahl von weiblichen und männlichen Personen geachtet. Von den 40 teilnehmenden Probanden waren 17 Frauen und 23 Männer.

Der Altersdurchschnitt betrug 26,55 Jahre, wobei die Hälfte der Probanden unter 23 Jahre alt war. Acht der Probanden waren über 30 davon vier über 50 Jahre alt. Eine bessere Altersverteilung der Probanden im Sinne eines repräsentativen Querschnitts hätte eine größere Zahl an Teilnehmern vorausgesetzt. Die folgende Tabelle 3.1 zeigt die den Altersdurchschnitt der Probanden und die dazugehörige Standardabweichung. Das Bild 3.2 zeigt die

Aufteilung der männlichen und weiblichen Probanden nach dem Alter.

Tabelle 3.1 Altersdurchschnitt der Probanden

	Gesamt	männlich	weiblich
Altersdurchschnitt	26,55 Jahre	24,57 Jahre	29,24 Jahre
Standardabweichung	10,79 Jahre	7,77 Jahre	13,99 Jahre

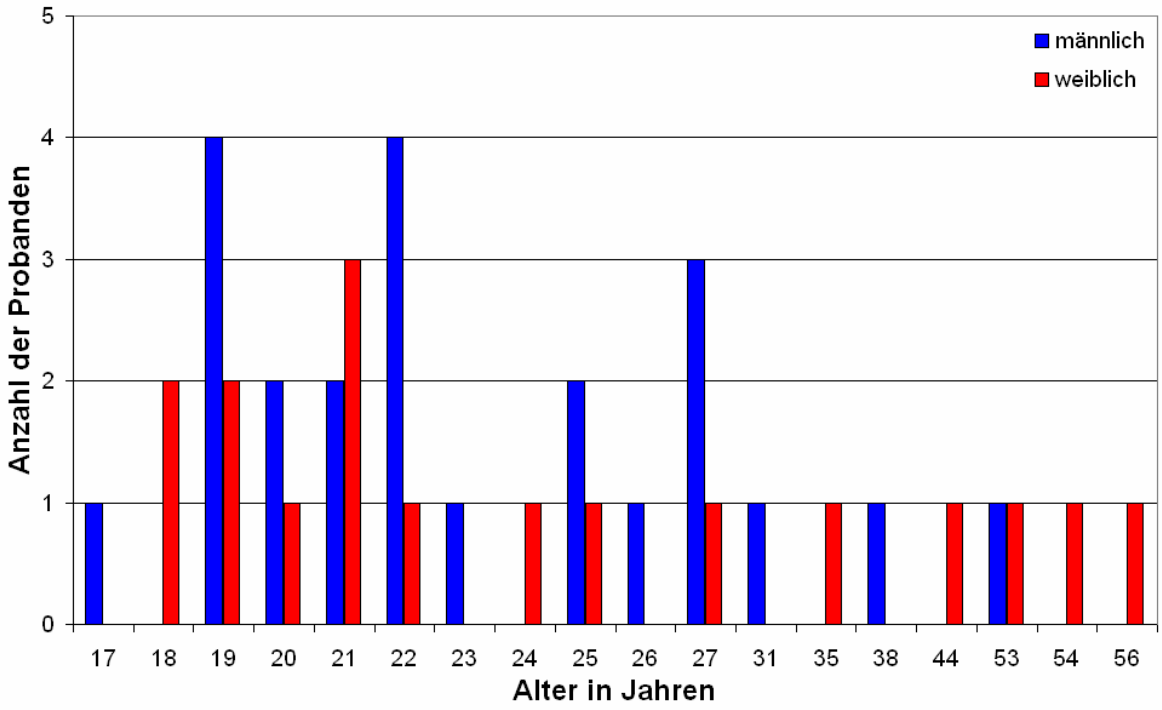

Bild 3.2 Altersverteilung nach Geschlechtern

Bei den Teilnehmern der Untersuchung handelte es sich zu größten Teilen um Personen, die noch an keiner farbmetrischen Untersuchung teilgenommen hatten.

3.1.1 Farbseheigenschaften der Testpersonen

Die Farbschwellenuntersuchung und die Untersuchung der großen Farbunterschiede werden mit 40 Probanden durchgeführt. Dabei sind die Probanden bei beiden Untersuchungen identisch. Es wird der Mittelwert über die Daten der 40 Probanden gebildet, nachdem die fünf Minimal- und Maximalwerte herausgenommen werden, so dass der Mittelwert über 30 Werte gebildet wird.

Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen werden hier die Daten mehrerer Probanden einmalig aufgenommen, anstatt von wenigen Probanden die Daten mehrmals aufzuzeichnen. Die Anzahl der gesammelten Daten ist dabei identisch, nur wird die Streuung bei dieser Untersuchung etwas größer sein. Diesem Effekt wird mit dem Herausnehmen der Extremwerte entgegengewirkt.

Die Entscheidung, mit einer höheren Probandenzahl die Untersuchung nur einmal durchzuführen, wurde getroffen, weil ein Durchlauf der Untersuchung zehn Stunden dauert und es für die Testpersonen nicht zumutbar ist, diesen Aufwand mehrmals auf sich zu nehmen.

3.1.2 Farbfehlsichtigkeitsprüfung der Testpersonen

Die Überprüfung der Probanden auf Farbfehlsichtigkeit erfolgt mit dem Anomaloskop nach Nagel.

Beim Anomaloskop wird das gelbe Licht, das einer Spektrallinie entspricht, durch rotes und grünes Licht nachgemischt. Dabei muss der Proband die Einstellung nach seinem Empfinden vornehmen. Da bei farbfehlsichtigen Personen ein von der Norm abweichendes Verhältnis zwischen den verschiedenen Zapfenarten vorliegt, ist die Einstellung dieser Personen eine andere als die von Normalsichtigen.

Bei keinem der 40 Probanden wurde mit dem Anomaloskop eine Farbfehlsichtigkeit festgestellt. Sie konnten ohne Vorbehalte an der Untersuchung teilnehmen. Die Anomalquotienten nach der DIN 6160 [DIN66] der Probanden lagen alle zwischen 0,7 und 1,4, somit im Bereich der normalen Trichromaten.

3.2 Abmusterungskabine

Für die Abmusterung von Farben muss eine Standardlichtart gewählt werden. Bei dieser Untersuchung wird die Normlichtart D65 verwendet. Damit die Farben ausschließlich unter dieser Normlichtart betrachtet werden, wird eine Abmusterungskabine benötigt. Diese Abmusterungskabine sollte die Normlichtart D65 möglichst genau wiedergeben. Es wird die Abmusterungskabine Macbeth SpectraLight Color Matching System SPL 65 B[12] verwendet [SpL]. Die Abmusterungskabine SPL 65 B erlaubt es, zwischen drei Lichtarten mit verschiedenen Farbtemperaturen zu wählen:

1. Tageslicht (6500K)
2. Sonnenuntergangslicht (2300K)
3. Supermarktlicht (4400K)

Außerdem kann der Ultraviolettanteil eingeschaltet werden, einzeln oder in Kombination mit einer der Lichtarten. In dieser Untersuchung wird der UV-Anteil jedoch nicht verwendet, um eine zusätzliche Fluoreszenz der Proben zu vermeiden.

Die Kabine SPL 65 B hat die Abmessungen von 87 cm Höhe, 87 cm Breite und 58 cm Tiefe. Das Innere der Kabine ist in einem neutralen Grau gehalten, um Bunttonverfälschungen durch den Einfluss der Umgebungsfarbe zu vermeiden. Die Kabine ist mit folgenden Lampen ausgestattet:

- zwei 750W-Quartz-Halogenlampen
- eine 500W-Quartz-Halogenlampe
- zwei Minus-Rot-Fluoreszenz-Lampen F 36 T 12/CW
- zwei Ultraviolett-Lampen BLB

Bei dieser Untersuchung wird die Einstellung für Tageslicht benutzt, welche der Normlichtart D65 entspricht. Die Normlichtart D65 wird durch die 750W-Quartz-Halogenlampen und ein

[12] Im folgenden Text wird als Kurzbezeichnung „SPL 65 B“ verwendet.

Filtersystem erzeugt. Das Bild 3.3 zeigt die Strahlungsfunktionen[13] von der Normlichtart D65 $S_{D65t}(\lambda)$ (blau) und der realen Lichtart in der Abmusterungskabine[14] $S_{D65}(\lambda)$ (rot).

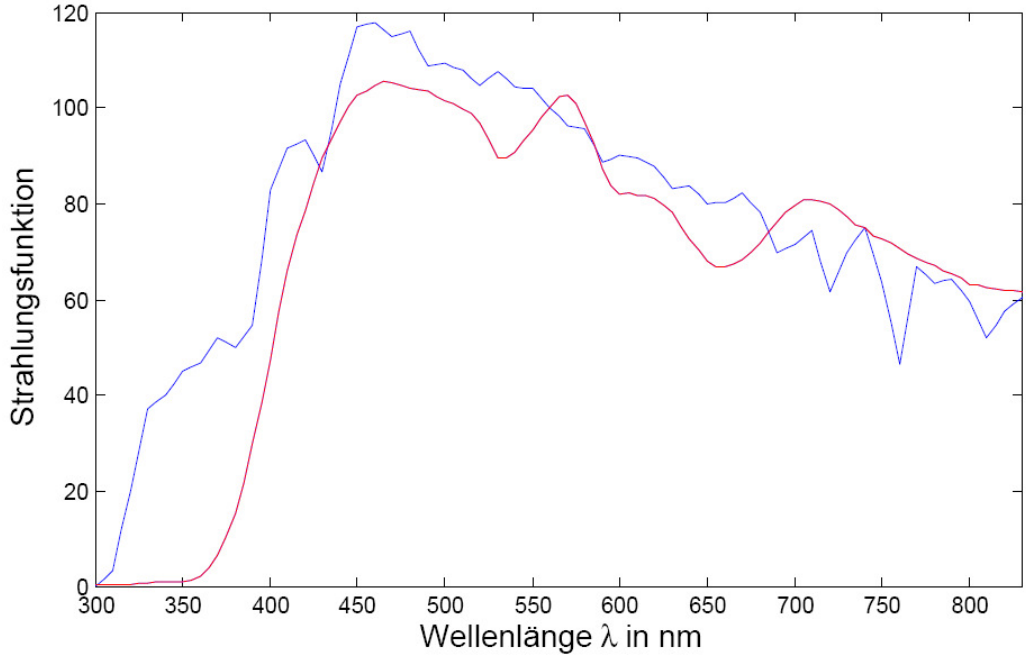

Bild 3.3 Strahlungsfunktion der Normlichtart D65 und der Lichtart in der Abmusterungskabine

Es gibt verschiedene Methoden, um die Lichtart der Abmusterungskabine mit der Normlichtart D65 zu vergleichen:

1. Die ähnlichste Farbtemperatur beträgt 6280K und liegt somit nahe bei den 6500K der Normlichtart D65. [DIN82a]
2. Der Farbwiedergabeindex beträgt 97 und ist somit nur gering kleiner als die 100 der Normlichart D65. [CIE95b]
3. Die Veröffentlichung CIE S 012/E:2004 gibt zwei Indizes für die Überprüfung einer Lichtart an: einen für den sichtbaren Bereich und einen für den UV-Bereich der Strahlung. Da in der Arbeit nur nicht-fluoreszierende Farben verwendet werden, ist der Index M_{UV} nicht zu berücksichtigen. Der Index M_{VIS} liegt bei 0,21, wodurch die Kabine die Güte A hat. [CIE04b]

Da die Lichtart der Abmusterungskabine nicht exakt der Normlichtart D65 entspricht, müssen aus den gemessenen Reflexionsgraden $\rho_{gem}(\lambda)$ der Proben neu Reflexionsgrade $\rho_{alt}(\lambda)$ für die Schwellenuntersuchung berechnet werden[15]. Für die Untersuchung großer Farbunterschiede ist die Güte der Kabine ausreichend.

[13] Kennzeichnung der spektralen Beschaffenheit einer Strahlung (Beschreibung einer Lichtart) durch die relative spektrale Verteilung einer beliebigen Strahlungsgröße. Die Strahlungsfunktion ist auf den Wert 100 bei 560 nm normiert.

[14] Die spektrale Bestrahlungsstärke in der Abmusterungskabine wurde mit dem Spektrometer MCS-CCD UV NIR der Firma TEC5 an der BAM gemessen und auf den Wert 100 bei 560 nm normiert. Die Messung ist auf eine PTB-Referenzstrahlungsquelle zurückgeführt.

[15] Die neuen Reflektionsgrade berechnen wie folgt: $\rho_{alt}(\lambda) = \frac{S_{D65}(\lambda)}{S_{D65t}(\lambda)} \rho_{gem}(\lambda)$

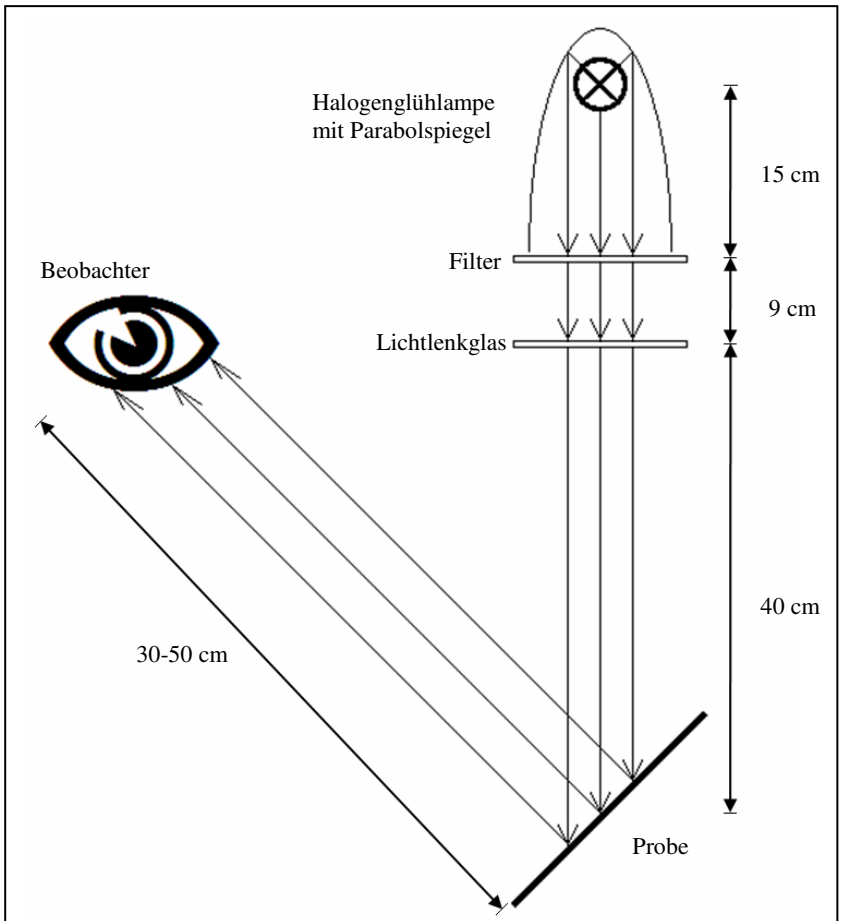

Bild 3.4 Lichteinfalls- und Beobachtungsrichtung in der Abmusterungskabine

Das Bild 3.4 zeigt die Beleuchtung der Probe und das optische System in der Abmusterungskabine. Die Lichteinfallsrichtung auf die Probe soll dabei 45° sein und die Beobachtungsrichtung 0° zur Probe betragen. Neben der Lichteinfallsrichtung sind auch der Öffnungswinkel der Beleuchtung und die gleichmäßige Beleuchtungsstärke wichtige Parameter der Untersuchung. Der Öffnungswinkel der Beleuchtung beträgt 1,9° und ist somit kleiner als der nach der DIN 5033-7 erlaubte Öffnungswinkel der 45/0-Messgeometrie von 5° in der DIN 5033-7 [DIN83a]. Die Beleuchtungsstärke schwankt zwischen 1243 lx und 1299 lx in der Probenebene.

Die Abmusterungskabine wird über einen Spannungsstabilisator betrieben, damit Spannungsschwankungen des Stromnetzes einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Untersuchung haben. Jede Veränderung der Versorgungsspannung der Lampen würde dazu führen, dass sich die Beleuchtungsbedingungen verändern und der Proband unter nicht normierten, wechselnden Bedingungen eine Einstellung der Farbschwelle vornimmt.

3.3 Versuchsaufbau der Untersuchung von Farbschwellen

Der Aufbau der Farbschwellenuntersuchung ist abhängig von der Methode der Farbabmusterung. Deshalb wird diese zuerst kurz erläutert, danach wird die Erzeugung der zweiten Lichtart beschrieben. Zuletzt werden die verwendeten Testseiten und die darauf sichtbaren Farbmuster erläutert.

3.3.1 Methode zur Erzeugung der Farbschwellen

Die Farbschwellenuntersuchung erfolgt in dieser Arbeit für Körperfarben, das heißt für Farben, die durch die Reflexion von Licht auf einem Körper entstehen. Die Schwierigkeit besteht darin, die Farbschwellen zu bestimmen. Diese liegen definitionsgemäß exakt am Übergang von der Nichterkennbarkeit zur Erkennbarkeit eines Farbunterschiedes. Subjektiv ist dieser Übergang jedoch fließend; er wird von fast jeder Person etwas anders wahrgenommen, da zum Beispiel das Verhältnis zwischen den Zapfentypen individuell variiert [FI05]. Es muss deshalb eine Methode entwickelt werden, mit der die Farbschwellen ausreichend genau bestimmt werden können.

In dieser Untersuchung wird die Methode „Addition“ von Lichtspektren benutzt. Die Farbprobe wird nicht nur mit der Normlichtart D65 bestrahlt, sondern zusätzlich mit einer zweiten Lichtart, deren spektrale Strahlungsfunktion sich von der Strahlungsfunktion der Normlichtart D65 unterscheidet. Durch die zweite Lichtart wird das Licht verändert, das von der Probe reflektiert wird. Die „virtuellen“ spektralen Reflexionsgrade $\rho_{neu}(\lambda)$[16], die dieses Licht erzeugen, werden über die folgende Herleitung berechnet (für die Normfarbwert Y):

$$
\begin{aligned}
&Y_{neu} = Y_{alt} + Y_2 \\
&\Rightarrow K\int S_{D65}(\lambda)\cdot\rho_{neu}(\lambda)\cdot\bar{y}(\lambda)\cdot d\lambda = K\int S_{D65}(\lambda)\cdot\rho_{alt}(\lambda)\cdot\bar{y}(\lambda)\cdot d\lambda + K\int S_2(\lambda)\cdot\rho_{alt}(\lambda)\cdot\bar{y}(\lambda)\cdot d\lambda \\
&\Rightarrow S_{D65}(\lambda)\cdot\rho_{neu}(\lambda) = S_{D65}(\lambda)\cdot\rho_{alt}(\lambda) + S_2(\lambda)\cdot\rho_{alt}(\lambda)
\end{aligned}
$$

Die Berechnung der spektralen Reflexionsgrade $\rho_{neu}(\lambda)$ der Schwellenfarbe erfolgt über folgende Formel:

$$\rho_{neu}(\lambda) = \frac{S_{D65}(\lambda) + S_2(\lambda)}{S_{D65}(\lambda)}\rho_{alt}(\lambda) \qquad \text{(Gl. 3.1)}$$

Über diese Formel werden die spektralen Reflexionsgrade $\rho_{neu}(\lambda)$ der Schwellenfarbe für das gesamte Spektrum des Lichtes von 380 bis 730 nm[17] berechnet. $\rho_{alt}(\lambda)$ steht für die spektralen Reflexionsgrade der Referenzfarbe, $S_{D65}(\lambda)$ für die spektrale Strahlungsfunktion der Normlichtart D65 und $S_2(\lambda)$ für die spektrale Strahlungsfunktion der zweiten Lichtart.

Diese komplizierte Methode zur Berechnung der spektralen Reflexionsgrade ist notwendig, da kein geeignetes Messgerät zur Verfügung steht, das im Farbschwellenbereich die spektralen Reflexionsgrade in einer ausreichenden Genauigkeit messen kann. Das von Jäger [Jäg06] entwickelte System wäre zwar gut geeignet, benötigt aber eine sehr starke Beleuchtung, um derart kleine Reflexionsunterschiede zu bestimmen.

[16] Ein „virtueller“ Reflexionsgrad ist experimentell nicht messbar, sondern nur in einem Denkmodell abstrakt möglich. Diesen „virtuellen“ Reflexionsgrad würde eine Probe besitzen, die im Druckverfahren statt über zwei Lichtarten hergestellt worden wäre.

[17] Der Spektralbereich ist durch die vom SpectroScan aufgenommene Reflexions- und Transmissionsgrade auf den Bereich von 380 bis 730 nm beschränkt.

3.3.2 Farbschwellenversuchsaufbau

Die Farbproben werden in der Abmusterungskabine betrachtet und eine Hälfte wird mit einer zweiten veränderbaren Lichtart beleuchtet. Dabei können sowohl die Beleuchtungsstärke der Lichtart als auch die spektrale Verteilung der Lichtart verändert werden. Diese Variation erfolgt über Farbfilter und Graufilterdrehräder. Sowohl für die Normlichtart D65 als auch für die zweite Lichtart ist die 45°/0°-Geometrie für den Beobachter zu gewährleisten. Eine Hälfte der Probe wird nur mit der Normlichtart D65 beleuchtet, die andere Hälfte zusätzlich mit der variablen zweiten Lichtart. Die Probanden sollen angeben, wann sie jeweils einen Unterschied zwischen den beiden Hälften erkennen können.

Die zweite Lichtart wird durch eine Halogenglühlampe erzeugt. Das Licht dieser Lampe wird mit Hilfe eines Projektors gerichtet und fokussiert. Damit durch die Halogenglühlampe nicht mehr als das gewünschte Farbfeld ausgeleuchtet wird, ist das Licht durch eine rechteckige Blende begrenzt. Mittels verschiedener Farbfilter, die in den Strahlengang geschoben werden können, wird die Lichtfarbe und über zwei Graufilterdrehräder die Beleuchtungsstärke verändert.

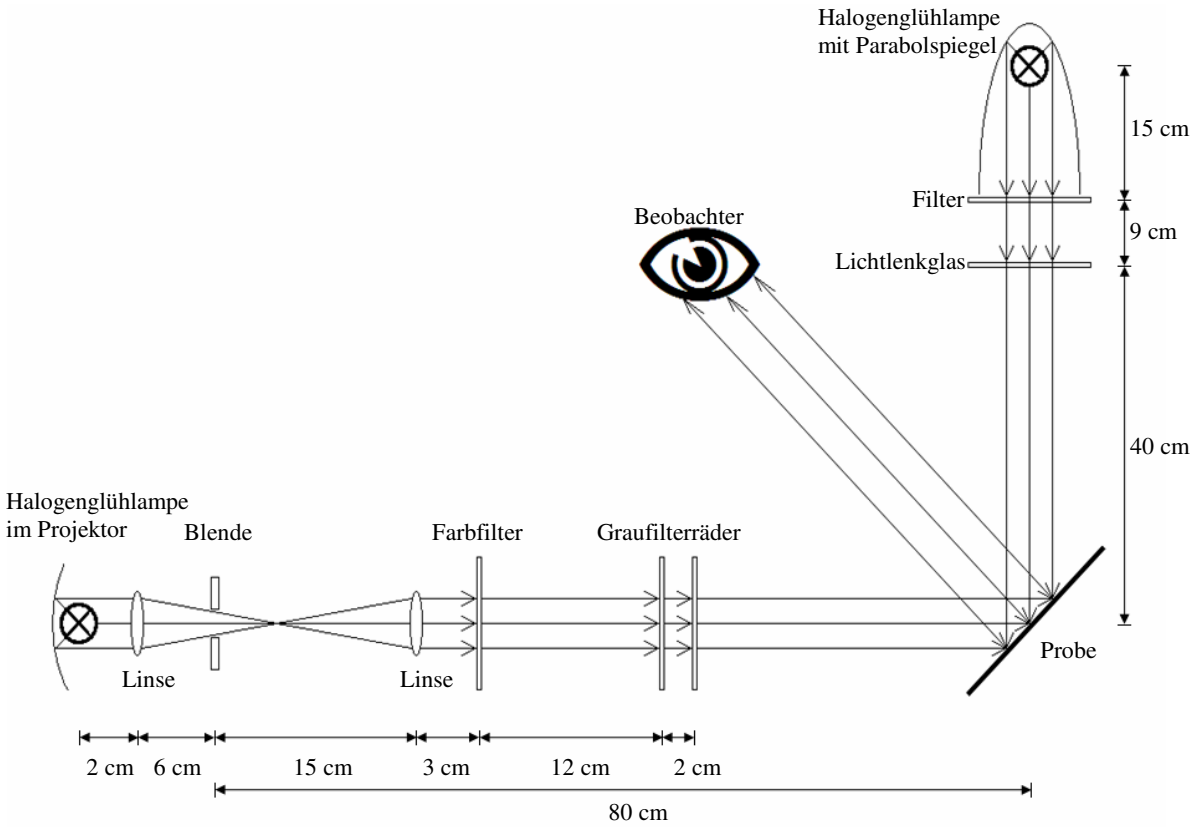

Bild 3.5 Schematischer Versuchsaufbau

Das Bild 3.5 zeigt den schematischen Versuchsaufbau der Farbschwellensuntersuchung. Die Lichteinfallsrichtung der zweiten Beleuchtung liegt bei -45° und damit genau entgegengesetzt zur Lichteinfallsrichtung der Beleuchtung der Abmusterungskabine. Der Reflexionsgrad des Farbmusters ist aber in beiden Fällen gleich[18]. Der Öffnungswinkel der zweiten Beleuchtung liegt bei 0,5° und ist damit deutlich kleiner als der geforderte Öffnungswinkel.

[18] Die Messung der Reflexionsgrade mit 45/0-Messgeometerie und -45/0-Messgeometrie zeigen die gleiche Schwankung wie zwei Messungen in 45/0-Messgeometrie.

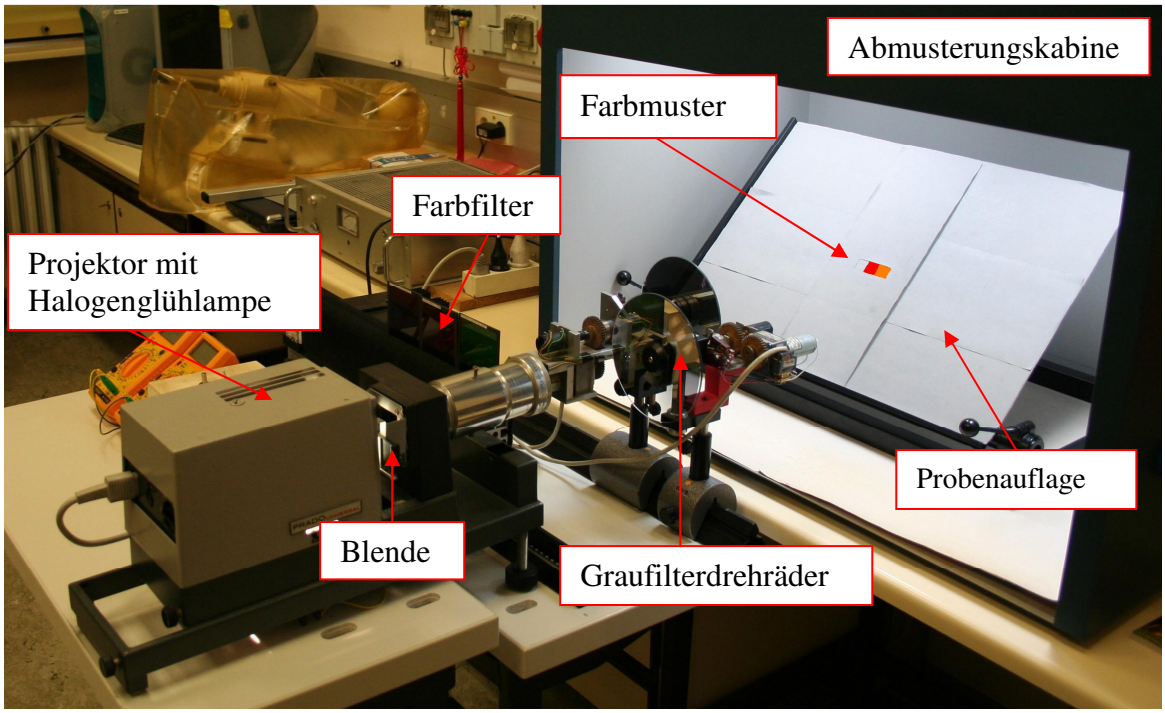

Bild 3.6 Foto des Versuchsaufbaus

Das Bild 3.6 zeigt ein Foto des Versuchsaufbaus. Die rote Seite des Farbmusters wird ausschließlich mit der D65-Lichart beleuchtet, die orange Hälfte zusätzlich mit der zweiten Lichtart, die durch das System „Projektor-Farbfilter-Graufilter“ erzeugt wird.

3.3.3 Berechnung der Strahlungsfunktion der zweiten Lichtart

Für die Strahlungsfunktion der zweiten Lichtart werden die Strahlungsfunktion der Halogenglühlampe $S_{HGL}(\lambda)$ und die spektralen Transmissionsgrade der Graufilter τ_{1a} und τ_{1b}, sowie der Farbfilter τ_2 benötigt. Dieses Produkt wird außerdem noch mit einem Faktor x_S multipliziert, der die beiden Strahlungsfunktionen in Verbindung setzt. Die spektrale Strahlungsfunktion $S_2(\lambda)$ berechnet sich dann wie folgt:

$$S_2(\lambda) = x_S \cdot S_{HGL}(\lambda) \cdot \tau_{1a}(\lambda) \cdot \tau_{1b}(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) \qquad \text{(Gl. 3.2)}$$

Der spektrale Transmissionsgrad τ_2 ist für alle Wellenlängen gleich Eins, wenn kein Farbfilter im Strahlengang liegt.

Alle weiteren Daten werden im Folgenden angegeben.

- **Halogenglühlampe im Projektor**

Bei der Halogenglühlampe, die für die Erzeugung der zweiten Lichtart benutzt wird, handelt es sich um eine Lampe der „HLX 64655“-Serie von Osram, eine Niedervoltlampe mit einer Versorgungsspannung von 24 V und einer Leistung von 250 W. Die Lebensdauer der Lampe beträgt 100 Stunden, sie musste daher zweimal während der Untersuchung gewechselt werden. Die Halogenglühlampe befindet sich in einem Projektor, durch den das Licht gerichtet und fokussiert wird.

Die Linsen des Projektors verändern durch ihre Transmissions- und Absorptionseigenschaften die Strahlungsfunktion der Halogenglühlampe. Daher muss die Strahlungsfunktion des Gesamtsystems gemessen werden.[19] Dieses Gesamtsystem besteht aus der Halogenglühlampe und den optischen Elementen[20] des verwendeten Projektors. Die Strahlungsfunktion des Gesamtsystems muss in der weiteren Berechnung Verwendung finden.

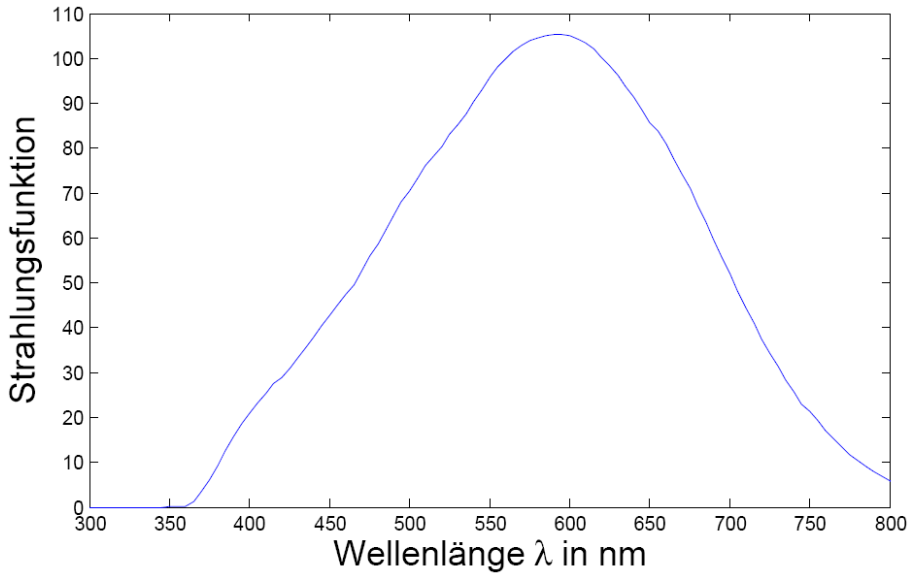

Bild 3.7 Spektrum der Halogenglühlampe im Projektor

Bild 3.7 zeigt die Strahlungsfunktion der Halogenglühlampe im Projektor $S_{HGL}(\lambda)$. Es wird deutlich, dass die optischen Elemente des Projektors vor allem den langwelligen Bereich der spektralen Verteilung der Halogenglühlampe reduzieren, denn ein Temperaturstrahler müsste ohne äußere Einflüsse höhere Werte in diesem Bereich aufweisen.

- **Farbfilter**

Das Licht der Halogenglühlampe kann durch drei Farbfilter in seiner Farbart verändert werden. Es handelt sich dabei um einen roten, einen grünen und einen blauen Filter. Die spektralen Transmissionsgrade τ_2 dieser Filter sind so beschaffen, dass sie nur in bestimmten Spektralbereichen lichtdurchgängig sind. So soll erreicht werden, dass angenähert nur einer der Normfarbwerte maximal verändert wird.

[19] Die Messung des Spektrums erfolgte in der BAM am Bentham-Radiometer. Es besteht aus zwei Bentham-TM300-Monochromatoren und weiteren Bentham-Messgeräten zur Aufnahme und Verstärkung des Signals. Es wird die spektrale Bestrahlungsstärke für den Spektralbereich 300 nm bis 800 nm gemessen und dann auf den Wert 100 bei 560 nm normiert.

[20] Bei den optischen Elementen handelt es sich um die Linse, einen grünen Wärmefilter und den Reflektor, die alle Einfluss auf die spektrale Verteilung haben.

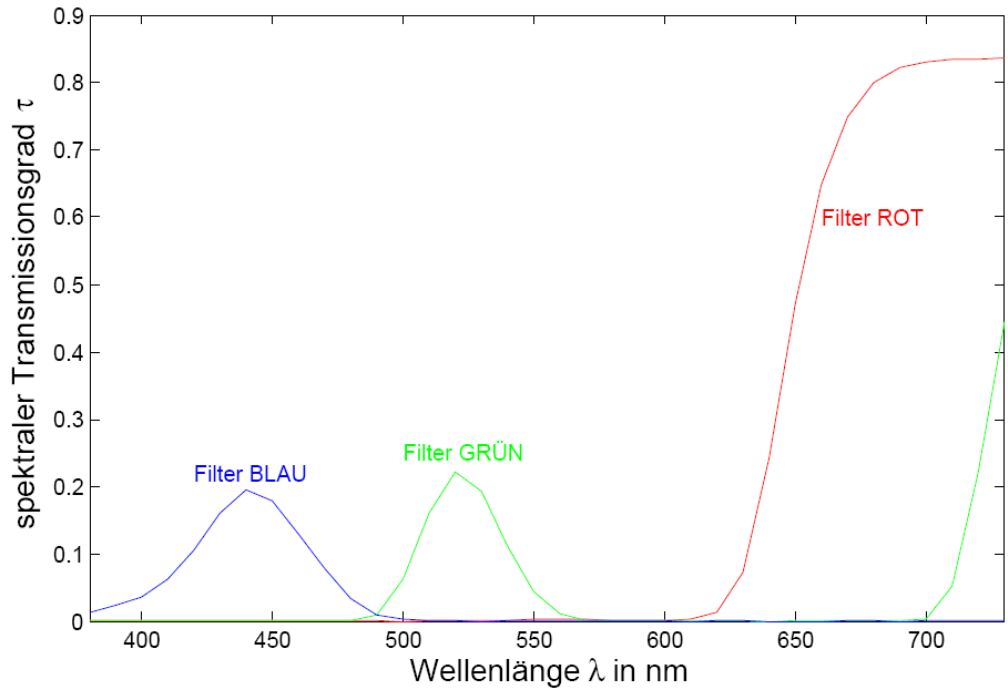

Bild 3.8 Transmissionsgrade der Farbfilter

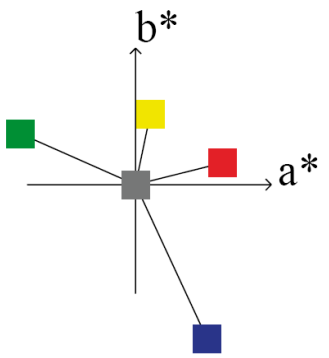

Bild 3.9 Farbveränderung in der a*/b*-Ebene mit drei Filtern und ohne Filter

Das Bild 3.8 zeigt die spektralen Transmissionsgrade der Filter. Durch die drei Farbfilter und die Lichtfarbe der Halogenglühlampe werden zudem alle vier Achsenrichtungen der *a*/b**-Ebene abgedeckt, da die Lichtfarbe der Halogenglühlampe gelblicher ist als die Lichtfarbe der Normlichtart D65. Das Bild 3.9 zeigt die Farbveränderungen der mittelgrauen Farbe in der *a*/b**-Ebene. Das rote Quadrat kennzeichnet die Farbveränderung bei rotem Filter im Strahlengang. Entsprechendes gilt für die grüne und blaue Darstellung. Das gelbe Quadrat steht für einen Strahlengang ohne Filter. Bei allen Farbveränderungen kommt es auch zu einer Veränderung der Helligkeit, diese ist hier nicht dargestellt. Die Farbveränderung ohne Filter im Strahlengang findet hauptsächlich in der Helligkeit *L** statt. Die Winkel zwischen den Richtungen der Farbveränderungen sind bei jeder bestrahlten Referenzfarbe unterschiedlich. Die Bilder 3.10, 3.11 und 3.12 stellen grob die Buntöne der Filter dar.

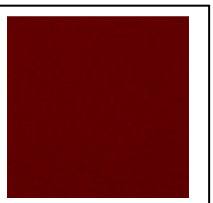

Bild 3.10 Rot

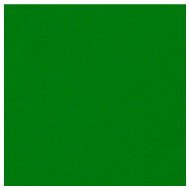

Bild 3.11 Grün

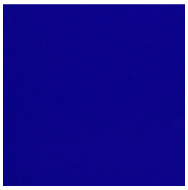

Bild 3.12 Blau

- **Graufilterdrehräder**

Durch die beiden Graufilterräder wird die Beleuchtungsstärke verändert. Die spektralen Transmissionsgrade τ_{1a} und τ_{1b} der Filterräder sind so beschaffen, dass sie an einer Stelle sehr wenig und dann immer mehr Licht durchlassen. Die Veränderung der spektralen

Transmissionsgrade erfolgt dabei annähert logarithmisch, jedoch nicht über den gesamten Spektralbereich gleich.

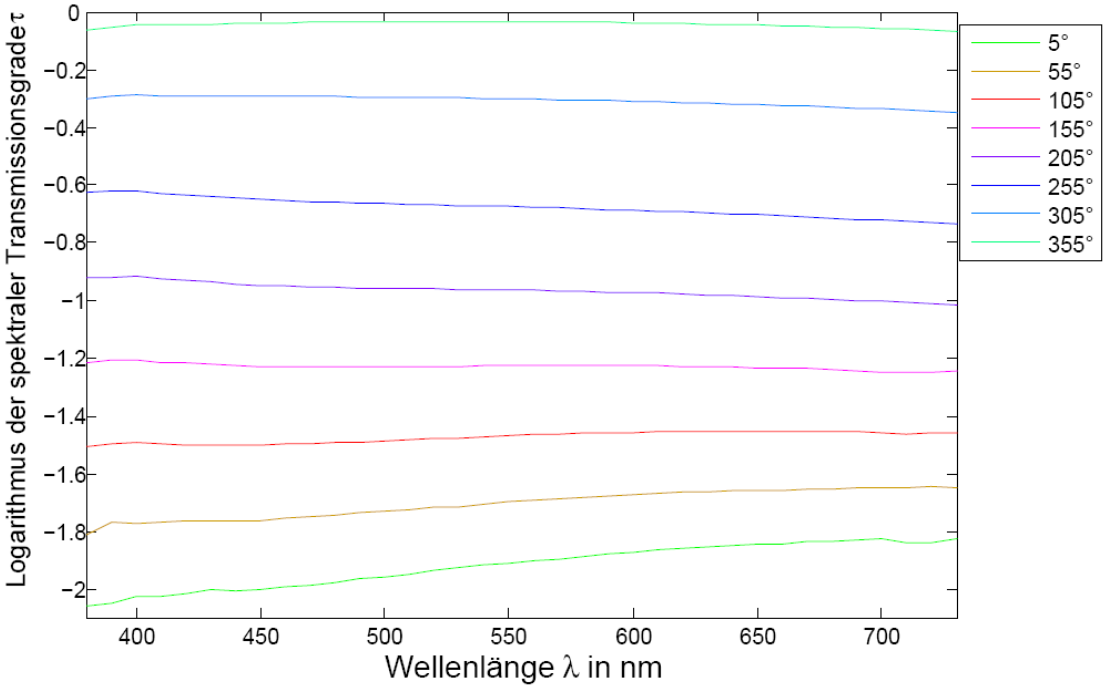

Bild 3.13 Spektrale Transmissionsgrade des Graufilterrades

Bild 3.13 zeigen Logarithmus der spektralen Transmissionsgrade eines Graufilterrades in logarithmischer Darstellung. Dabei werden die Transmissionsgrade bei verschiedenen Radstellungen gezeigt, angefangen bei 5° und in 50°-Schritten weiter bis 355°.[21]

Die Stellung des Filterrades und damit die Transmissionsgrade an dieser Stelle müssen also während der Untersuchung aufgenommen werden. Die Stellung des Filterrades kann über einen regelbaren Widerstand ermittelt werden, der proportional zur Stellung des Rades seinen Wert verändert. Aus dem gemessenen Widerstandswert kann die entsprechende Radstellung in Grad errechnet werden.

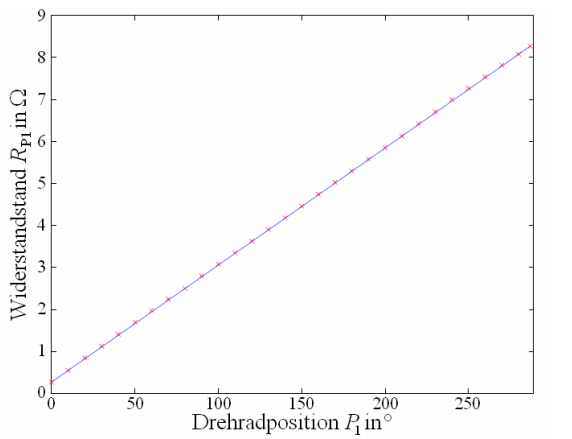

Bild 3.14 Verhältnis Drehrad 1

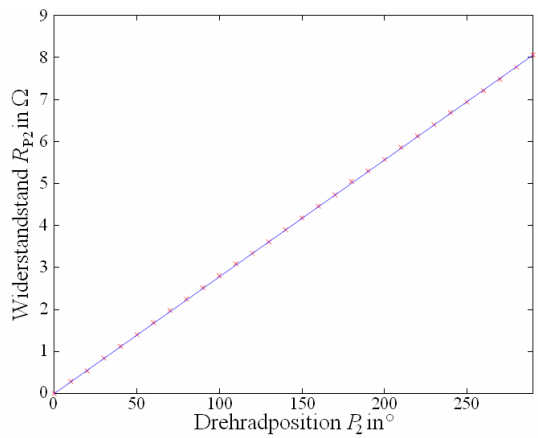

Bild 3.15 Verhältnis Drehrad 2

[21] Die Radstellungen werden von 0° bis 360° angegeben. Dabei ist die Transmission bei 0° am geringsten und bei 360° am größten.

Die Bilder 3.14 und 3.15 zeigen das Verhältnis zwischen Widerstand und Position der beiden Drehräder, wobei die blaue Gerade jeweils die verwendete Ausgleichsgerade wiedergibt und die roten Kreuze die gemessenen Verhältnisse.

Das Drehrad 1 hat bei einem Bewegungsradius von 287° eine Widerstandsdifferenz von 8,0 Ω, und das Drehrad 2 hat bei einem Bewegungsradius von 296° eine Widerstandsdifferenz von 8,2 Ω. Da sich der Widerstandsbereich verschieben kann, ist es notwendig, immer einen der Endpunkte des Bereiches anzugeben, um die genaue Drehradstellung berechnen zu können.

Die Drehradpositionen P_1 und P_2 berechnen sich nach folgenden Formeln:

$$P_1 = \frac{R_{P1} - (R_{E1} - R_{G1})}{R_{G1}} \cdot 287°, \text{ für das Drehrad 1} \qquad \text{(Gl. 3.3)}$$

$$P_2 = \frac{R_{P2} - R_{A2}}{R_{G2}} \cdot 296°, \text{ für das Drehrad 2} \qquad \text{(Gl. 3.4)}$$

Dabei steht R_{P1} für den Widerstand an der eingestellten Position, R_{E1} für den Widerstand am Ende des Bereichs und R_{G1} für den Widerstandswert des Gesamtbereiches beim ersten Drehrad. R_{P2} steht für die eingestellte Position, R_{A2} für den Widerstand am Anfang des Bereichs und R_{G2} für den Widerstandswert des Gesamtbereiches beim zweiten Drehrad. In der Untersuchung hat es sich als günstig erwiesen, den Endwert des ersten Drehrades und den Anfangswert des zweiten Drehrades zu verwenden, da diese Werte in jedem Fall aufgenommen werden und sich zusätzliche Messungen so erübrigen.

Die Drehradstellungen werden dabei auf ganzzahlige Gradwerte gerundet, da die spektralen Transmissionsgrade ebenfalls für ganzzahlige Werte berechnet wurden. Die Transmissionsgrade für jeden ganzzahligen Grad werden logarithmisch[22] berechnet, denn die Transmissionsgrade werden nur in 5°-Schritten gemessen.

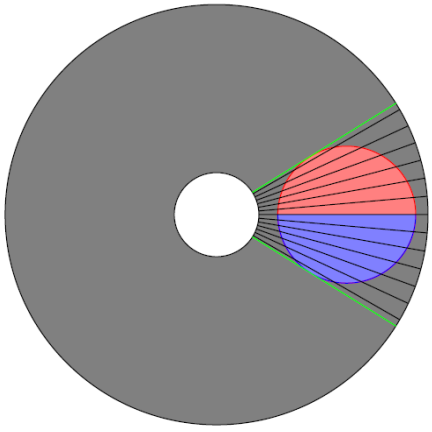

Bild 3.16 Graufilter mit Lichtfläche

Aus den Drehradeinstellungen und den Transmissionsgraden des Graufilters werden die durchschnittlichen spektralen Transmissionsgrade der beleuchteten Fläche berechnet, die das Licht durchläuft. Dabei ist es nicht zulässig, nur die Transmissionswerte der Drehradeinstellung zu berücksichtigen. Denn das Licht trifft nicht nur in den Bereich von einem Grad auf das Filterrad, sondern auf eine Fläche, die sich über einen Winkelbereich von 64° erstreckt. Das Licht beleuchtet nicht alle Bereiche in diesem Winkelbereich gleichmäßig. Die Winkelbereiche in der Nähe des Mittelpunktes der beleuchteten Fläche werden stärker beleuchtet als die äußeren Bereiche. Es müssen also die Verhältnisse zwischen den einzelnen Winkelbereichen zueinander berechnet werden. Es genügt, die Verhältnisse für eine der beiden Kreishälften zu ermitteln, da die Strahlung symmetrisch zum Mittelpunkt der Kreisfläche ist. Das Bild 3.16 zeigt ein Drehrad (grau) und die Fläche, die vom Licht bestrahlt wird, sowie die Bereiche für

[22] Die Berechnung erfolgt logarithmisch, da die Transmission des Graufilters logarithmisch abnimmt.

den Winkel von 10° in dieser Fläche[23]. Dabei ist der positive Winkelbereich der bestrahlten Fläche rosa dargestellt und der negative Winkelbereich hellblau.

Die Bestrahlung der Fläche ist symmetrisch, aber nicht homogen über die gesamte Fläche. Die Bestrahlungsstärke ist in Nähe der Kreismitte größer als an den Rändern. Auch dieser Effekt muss in die Verhältnisse a_n zwischen den Transmissionen einbezogen werden. Es ergeben sich somit die Verhältnisse, die in der Tabelle 3.2 angegeben sind. Die negativen Winkelbereiche haben die gleichen Verhältnisse wie die positiven. Die Summe über alle Verhältnisse ergibt 100. Das Bild 3.17 zeigt das Verhältnis a_n noch einmal über alle Bereiche.

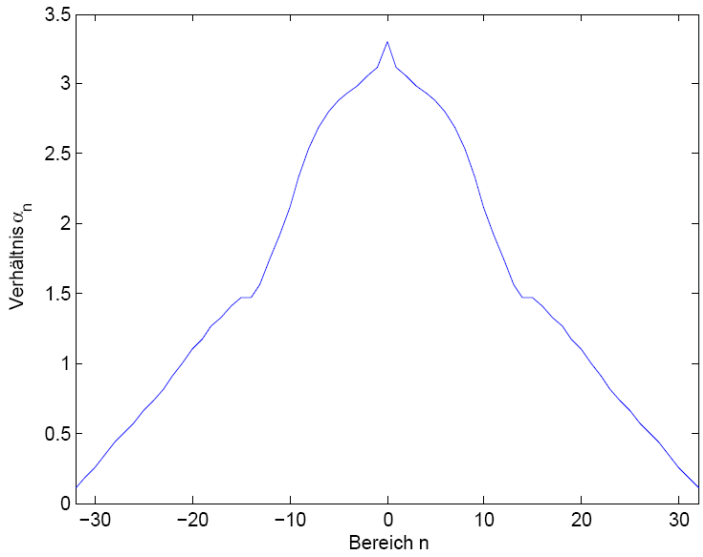

Bild 3.17 Verhältnis α_n

Tabelle 3.2 Verhältnis zwischen den Winkelbereichen

Bereich *n*	Verhältnis α_n	Bereich *n*	Verhältnis α_n	Bereich *n*	Verhältnis α_n
0	3,30	11	1,92	22	0,91
1	3,12	12	1,75	23	0,81
2	3,05	13	1,56	24	0,73
3	2,98	14	1,47	25	0,66
4	2,93	15	1,47	26	0,57
5	2,88	16	1,41	27	0,50
6	2,80	17	1,33	28	0,43
7	2,69	18	1,26	29	0,34
8	2,53	19	1,17	30	0,25
9	2,33	20	1,10	31	0,18
10	2,11	21	1,00	32	0,11

Es ergibt sich für die Berechnung der spektralen Transmissionsgrade τ_1 des Filterrades, für die Stellung x in Grad und die entsprechenden Transmissionsgrade $\tau_{(x+n°)}$ folgende Formel:

$$\tau_{1,\lambda} = \frac{\sum_{n=0}^{64} \alpha_{n-32} \cdot \tau_{(x+n°),\lambda}}{100}, \text{ für alle Wellenlängen } \lambda \qquad \text{(Gl. 3.5)}$$

[23] Da die beiden Graufilter unmittelbar hintereinander angebracht werden, verändert sich die Größe der Beleuchtungsfläche zwischen den Drehrädern kaum. Der Unterschied ist so minimal, dass er nicht berücksichtigt werden muss.

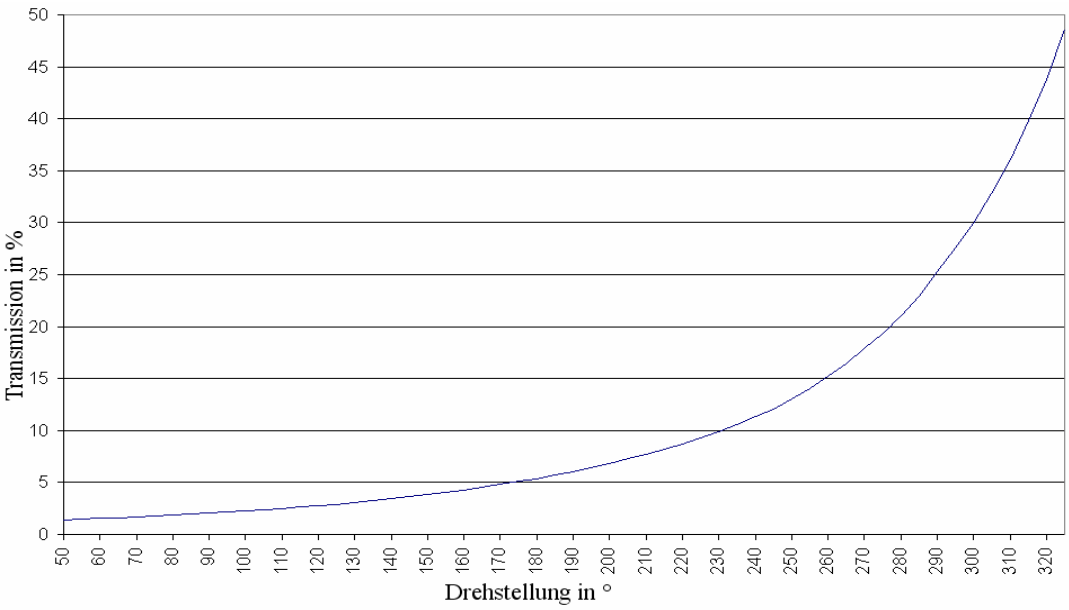

Bild 3.18 Transmission des Filterrades

Das Bild 3.18 zeigt die Transmission des Graufilterdrehrades. Sie wurde durch Messung der Beleuchtungsstärke ermittelt. Es werden nur die Transmissionen zwischen 50° und 325° für die Untersuchung verwendet, da sich das Filterrad nur über diesen Bereich bewegen lässt. Die angegebene Gradzahl entspricht der Lage des Mittelpunktes der beleuchteten Fläche.

- **Verhältnis zwischen den Strahlungsfunktionen**

Für die Strahlungsfunktionen der beiden Lichtarten können nicht unmittelbar ihre Standardwerte zueinander in Verbindung gesetzt werden. Erst müssen die spektralen Werte ihrer Strahlungsfunktionen müssen angeglichen werden.[24] Hierfür wird die Beleuchtungsstärke gemessen, genau an der Stelle der Abmusterungskabine, an der die Farbproben bewertet werden. Die Beleuchtungsstärke der Abmusterungskabine und der Halogenglühlampe werden getrennt voneinander gemessen. Es ergibt sich ein Wert E_{D65r} von 1278 lx für die Abmusterungskabine und ein Wert E_2 von 2948 lx für die Halogenglühlampe.[25] Für die Beleuchtungsstärke E_v gilt folgende Gleichung mit dem Lichtstrom ϕ_v und der Fläche A:

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA} \qquad \text{(Gl. 3.6)}$$

Jetzt muss die Beleuchtungsstärke E_v noch mit den spektralen Strahlungsfunktionen in Verbindung gesetzt werden. Hierzu wird folgende Gleichung für den Lichtstrom ϕ_v benutzt:

$$\phi_v = K_m \cdot \int_{380nm}^{780nm} \phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \qquad \text{(Gl. 3.7)}$$

K_m ist das photometrische Strahlungsäquivalent, $V(\lambda)$ die spektrale Funktion der Hellempfindlichkeit und $\phi_{e\lambda}$ der spektrale Strahlungsfluss. Dieser ist proportional zur Strahlungsfunktion. Die Fläche A ist bei der Beleuchtungsstärkemessung beide Male gleich und

[24] Die Strahlungsfunktionen sind auf den Wert 100 bei der Wellenlänge 560 nm normiert.
[25] Dieser Wert wurde ohne jeglichen Filter im Strahlengang gemessen.

entfällt wie alle anderen Konstanten bei der Bildung des Verhältnisses. Daher kann das Verhältnis x_S zwischen den beiden spektralen Strahlungsfunktionen, mit welchem dann die Strahlungsfunktion der zweiten Lichtart multipliziert wird, durch folgende Formel berechnet werden:

$$x_S = \frac{E_2}{E_{D65r}} \cdot \frac{\sum_{380nm}^{780nm} S_{D65r}(\lambda)}{\sum_{380nm}^{780nm} S_2(\lambda)} \qquad \text{(Gl. 3.8)}$$

3.3.4 Farbmuster für die verschiedenen Schwellenuntersuchungen

Bei der Farbschwellenuntersuchung werden für 98 Farben jeweils 4 Farbveränderungen betrachtet. Für jeden Probanden werden also fast 400 Daten aufgenommen. Die ermittelten Daten sind im Anhang A.4 zu finden.

Die Farbmuster werden systematisch im CIELAB-Farbraum verteilt ausgewählt, wie in den Bildern 3.17, 3.18 und 3.19 dargestellt. Das zentrale Farbmuster, um das sich alle anderen Farbmuster anordnen, ist das mittelhelle Grau mit den Farbmaßzahlen $L^* = 50$ und $a^* = 0$ sowie $b^* = 0$. Ferner werden Farbmuster auf den Farbmaßzahlachsen derart genauer untersucht, dass auf jeder Achse 8 Farbmuster hinzugenommen werden, jeweils mit den Farbabständen von $\Delta E^*_{ab} = 5$ sowohl in positiver als auch in negativer Richtung. In jede der drei Ebenen L^*/a^*, L^*/b^* und a^*/b^* werden jeweils 8 Farbmuster so hineingelegt, dass die eine Hälfte einen Farbabstand ΔE^*_{ab} von 20, die andere von 40 zum Graumittelpunkt hat. Die Farbmuster liegen dabei auf den Winkelhalbierenden zwischen den Achsen. Dann werden noch 16 Farbmuster untersucht, bei denen alle Farbmaßzahlen zu gleichen Teilen verändert werden. Acht dieser Farbmuster liegen auf einem Kreis mit dem Farbabstand $\Delta E^*_{ab} = 20$ und die anderen acht auf einem Kreis mit dem Farbabstand $\Delta E^*_{ab} = 40$.

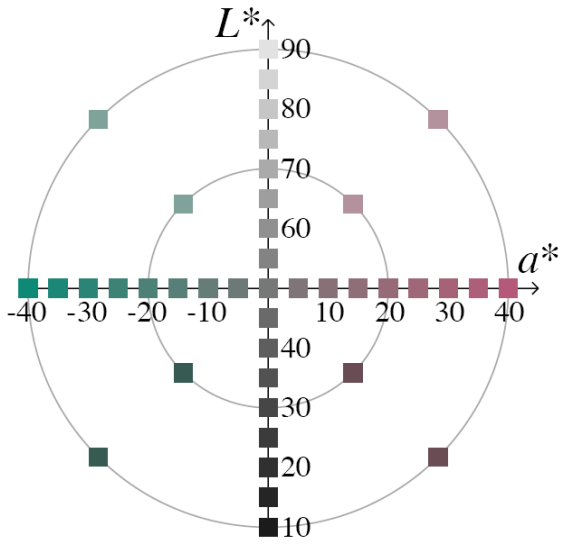

Bild 3.19 Darstellung der Farbmuster für die Schwellenuntersuchung in der L^*/a^*-Ebene

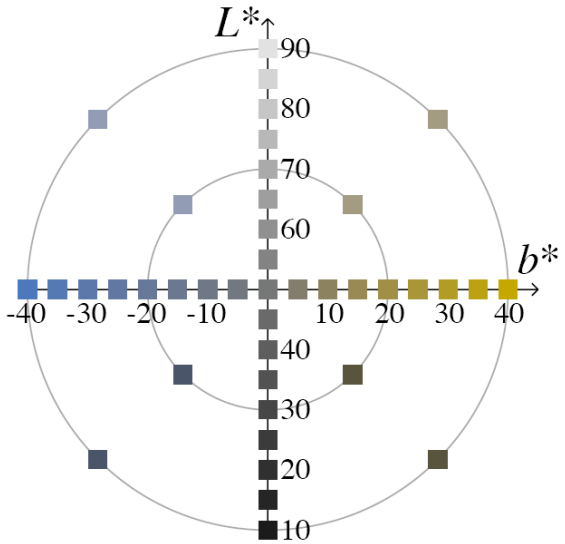

Bild 3.20 Darstellung der Farbmuster für die Schwellenuntersuchung in der L^*/b^*-Ebene

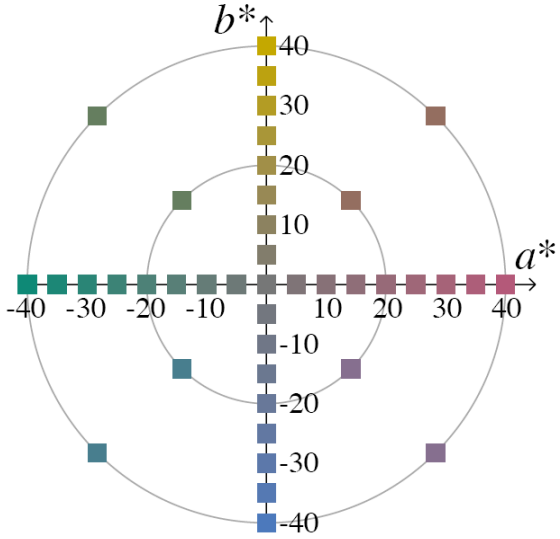

Bild 3.21 Darstellung der Farbmuster für die Schwellenuntersuchung in der *a*/b**-Ebene

Die Bilder 3.19, 3.20 und 3.21 zeigen die verwendeten Farbmuster in den drei Ebenen.[26]

Des Weiteren werden neun Farbmuster mit den Offset-CIELAB-Farbmaßzahlen[27] untersucht, da sie für die Druckindustrie von größerer Bedeutung sind. Die Offset-CIELAB-Farbmaßzahlen sind in der Tabelle 3.3 angegeben.

Tabelle 3.3 Farbmaßzahlen der Offset-Farben

	CIELAB-Farbmaßzahlen		
	*L**	*a**	*b**
C Cyanblau	58,62	-30,63	-42,75
M Magentarot	48,13	75,20	-6,80
Y Gelb	90,37	-11,16	96,17
O Orangerot	47,94	65,31	52,07
L Laubgrün	50,90	-62,96	36,71
V Violettblau	25,72	31,35	44,36
W ISO Papier (Weiß)	95,41	-0,98	4,76
Z Grau	56,71	-0,24	2,15
N Schwarz gedruckt	18,01	0,50	-0,46

Das rechteckige Feld besteht aus zwei aneinandergrenzenden Quadraten mit der Kantenlänge 18 mm. Die Probengröße im Gesichtsfeld für jedes Quadrat beträgt somit bei 50 cm Sehabstand 2,06° und bei einem Sehabstand von 30 cm 3,43°. Der Sehabstand, den alle

[26] Bei den drei Ebenen handelt es sich um die *L*/a**-Ebene bei einer Farbmaßzahl *b** von 0, die *L*/b**-Ebene bei einer Farbmaßzahl *a** von 0 und um die *a*/b**-Ebene bei einer Farbmaßzahl *L** von 50. In dieser Arbeit werden diese Ebenen noch häufiger erwähnt und nur noch kurz *L*/a**-Ebene, *L*/b**-Ebene und *a*/b**-Ebene genannt.

[27] Die Offset-Farbwerte werden dem Technischen Bericht der ISO „Method of specifying image reproduction of colour devices by digital and analog test charts“ [ISO04] entnommen. Die Offset-Farbe Grau liegt genau zwischen den Farben „ISO Papier“ und „Schwarz gedruckt“ und wurde nicht dem Bericht entnommen, sondern berechnet.

Probanden bei der Abmusterung haben, liegt zwischen 30 cm und 50 cm.[28] Die Probengröße liegt somit im Bereich 1 bis 4 Grad, für den die Normspektralwertfunktionen des 2°-Standardbeobachters empfohlen werden.

Nun wird die rechte Hälfte der Farbmuster mit vier verschiedenen Lichtarten zusätzlich zur Normlichtart D65 bestrahlt. Die vier Lichtarten werden dadurch erzeugt, dass das Licht der Halogenglühlampe keinen oder jeweils einen der drei beschriebenen Filter durchläuft.[29] Für jede dieser vier Lichtarten wird dann die Farbschwelle aufgenommen. Dabei sind die vier Lichtarten so gewählt, dass sie einen möglichst großen Farbbereich im CIELAB-Raum umfassen. Die Helligkeit L^* ist bei der Farbschwelle immer größer als bei der Referenzfarbe, da mehr Licht reflektiert wird. Ursache dafür ist der oben beschriebene Versuchsaufbau. Das Ergebnis wird dadurch vernachlässigbar beeinflusst.

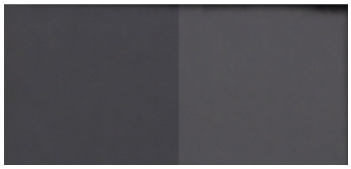

Bild 3.22 Hell (Gelb)

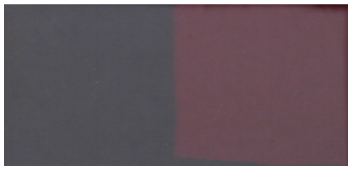

Bild 3.23 Rot

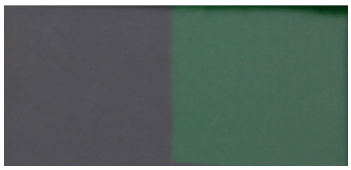

Bild 3.24 Grün

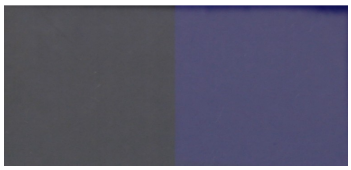

Bild 3.25 Blau

Die Bilder 3.22 bis 3.25 zeigen die Farbveränderungen beim mittelgrauen Farbmuster mit den Farbmaßzahlen $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$.

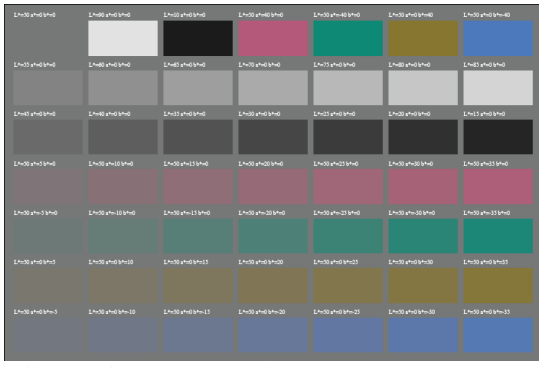

Bild 3.26 Erste Testseite der Untersuchung für Farbschwellen

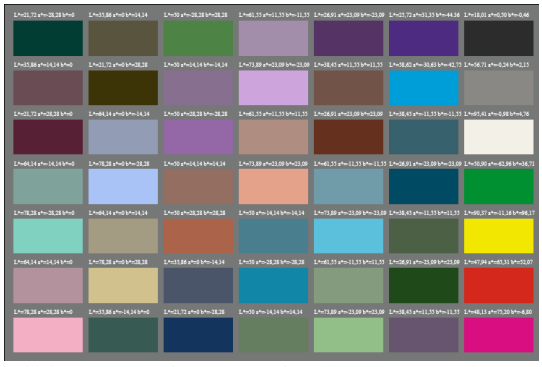

Bild 3.27 Zweite Testseite der Untersuchung für Farbschwellen

Die beiden Testseiten für die Schwellenuntersuchung bestehen jeweils aus 49 Farbmustern, die in einer 7×7-Struktur angeordnet sind. Das Bild 3.26 zeigt die erste und das Bild 3.27 die zweite Testseite. Im Anhang A.4 sind die gemessenen Farbmaßzahlen der Farbmuster angegeben. Im Anhang A.9 sind die Internet-Versionen der Testseiten zu finden. Die Internet-

[28] Die Entfernung der Probanden zum Farbmuster variierte wegen ihrer unterschiedlichen Körpergröße. Sie bewegt sich um 40 cm. Die Werte 50 cm und 30 cm sind angegeben, da die Entfernung sich sicher innerhalb dieses Bereiches befindet.

[29] Es handelt sich dabei um die drei Filter, die im Kapitel 3.3.3 im Unterpunkt „Farbfilter“ beschrieben werden.

Versionen unterscheiden sich nur durch einen anderen Rahmen von den verwendeten Testseiten.

3.4 Versuchsaufbau der Untersuchung der großen Farbunterschiede

Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede wird die visuelle Bewertung von Farbunterschieden mit einem Farbabstand ΔE^*_{ab} größer als 10 betrachtet. Dabei soll eine systematische Variation der Farbunterschiede bezüglich des CIELAB-Farbraumes erfolgen. Die reine Veränderung der Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* sowie die kombinierte Veränderung zweier Farbmaßzahlen und die gemeinsame Veränderung aller Farbmaßzahlen soll jeweils einzeln betrachtet werden.

Die Probanden betrachten die Farbproben in der Abmusterungskabine unter 45°/0°-Geometrie.

Es werden neun Farben als Referenzfarben ausgewählt, bei denen die Farbveränderungen vorgenommen werden sollen. Es handelt sich um die mittelgraue Farbe und um acht Farben in der Helligkeitsebene $L^* = 50$. Vier Farben liegen auf den a^*- und b^*-Farbmaßzahlachsen und vier auf den Winkelhalbierenden zwischen den Achsen, alle haben eine Buntheit C^*_{ab} von 50. Die Tabelle 3.4 zeigt die Farbwerte der neun Referenzfarben.[30]

Tabelle 3.4 Farbmaßzahlen a^* und b^* der Referenzfarben

		L^*	a^*	b^*
Farbe 1	Mittelgrau	50,00	00,00	00,00
Farbe 2	Rosarot	50,00	50,00	00,00
Farbe 3	Ziegelrot	50,00	35,36	35,36
Farbe 4	Ockergelb	50,00	00,00	50,00
Farbe 5	Grasgrün	50,00	-35,36	35,36
Farbe 6	Blaugrün	50,00	-50,00	00,00
Farbe 7	Türkisblau	50,00	-35,36	-35,36
Farbe 8	Himmelblau	50,00	00,00	-50,00
Farbe 9	Violettrot	50,00	35,36	-35,36

Um die Farbunterschiede darzustellen, werden Farbreihen nach folgendem Aufbau erzeugt: Neben einem rechteckigen Feld in der Referenzfarbe werden untereinander Quadrate der zu vergleichenden Farben angeordnet, ohne dass hinsichtlich ihres Farbabstands (zur Referenzfarbe) eine logische Reihe entsteht. Für die Veränderung der einzelnen Farbmaßzahlen sowie die kombinierte Veränderung zweier Farbmaßzahlen werden jeweils acht Farben mit der Referenzfarbe verglichen. Für die Veränderung aller Farbmaßzahlen werden 16 Farben mit der Referenzfarbe verglichen.

Bei der Veränderung der einzelnen Farbmaßzahlen werden jeweils vier Farben in positiver als auch negativer Richtung in 10-ΔE^*_{ab}-Schritten erzeugt. Die Farben werden über einen Bereich von 80 Einheiten der jeweiligen Farbmaßzahlen abgewandelt. Bei der kombinierten Veränderung zweier Farbmaßzahlen ergeben sich folgende acht Kombinationspaare: (-20|-

[30] Die Namen der Farben sind frei gewählt. Sie sollen nur zur Unterscheidung der Farben beitragen und haben keine standardisierte Bedeutung. Es wurden keine Namen der Offset-Farben benutzt.

20), (-20|20), (20|20), (20|-20), (-10|-10), (-10|10), (10|10) und (10|-10). Bei der Veränderung aller drei Farbmaßzahlen werden für die Farbe 2 bis 9 die 16 Kombinationen hergestellt, die in der Tabelle 3.5 aufgeführt sind. Für die Farbe 1 werden die Helligkeitsdifferenz ΔL^* mit -20, -10, 10 und 20 und die Farbmaßzahlen a^* und b^* jeweils mit den Werten der Tabelle 3.6 addiert. Es entstehen somit 4 Farbreihen mit Mittelgrau als Referenzfarbe. Es handelt sich bei allen Farbwerten nur um eine Zielvorgabe. Die gemessenen Farbwerte sind im Anhang A.5 angegeben.

Tabelle 3.5 Veränderungen der Farbmaßzahlen im Vergleich zu den Referenzfarben 2 bis 9

	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Kombination 1	20	20	20
Kombination 2	10	10	10
Kombination 3	20	20	-10
Kombination 4	10	10	-20
Kombination 5	20	-10	20
Kombination 6	10	-20	10
Kombination 7	20	-10	-10
Kombination 8	10	-20	-20
Kombination 9	-10	20	20
Kombination 10	-20	10	10
Kombination 11	-10	20	-10
Kombination 12	-20	10	-20
Kombination 13	-10	-10	20
Kombination 14	-20	-20	10
Kombination 15	-10	-10	-10
Kombination 16	-20	-20	-20

Tabelle 3.6 Veränderung von a^* und b^* im Vergleich zu der Referenzfarbe 1

	Δa^*	Δb^*
Kombination 1	20	20
Kombination 2	20	10
Kombination 3	20	-10
Kombination 4	20	-20
Kombination 5	10	20
Kombination 6	10	10
Kombination 7	10	-10
Kombination 8	10	-20
Kombination 9	-10	20
Kombination 10	-10	10
Kombination 11	-10	-10
Kombination 12	-10	-20
Kombination 13	-20	20
Kombination 14	-20	10
Kombination 15	-20	-10
Kombination 16	-20	-20

3.4.1 Zwölf Testseiten für Untersuchung von großen Farbunterschieden

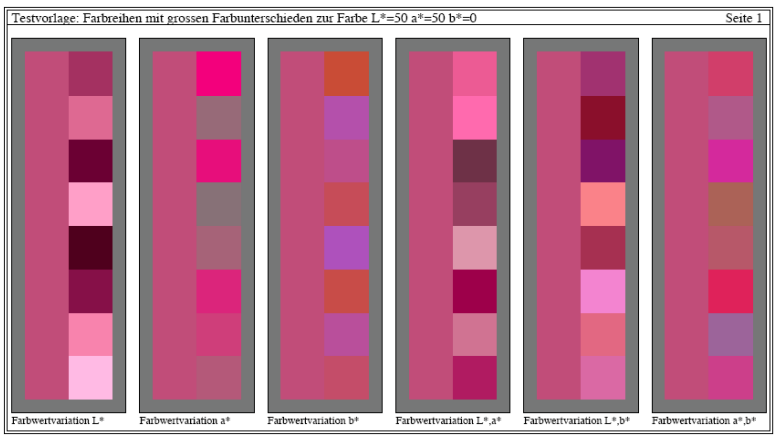

Bild 3.28 Testvorlage der ersten Art für die Referenzfarbe Nr. 2 mit den CIELAB-Daten $L^* = 50$, $a^* = 50$ und $b^* = 0$

Es gibt zwei verschiedene Arten von Testseiten. Die erste Art der Testseiten zeigt für jeweils ein Referenzfarbmuster sechs Farbreihen, das heißt es gibt neun Seiten für die neun Referenzfarben der Tabelle 3.4 mit dieser Struktur. Bei den hier gezeigten Farbreihen sind auf der linken Seite das Referenzfarbmuster und auf der rechten Seite die acht Vergleichsfarbmuster angeordnet. In der ersten Farbreihe wird die Farbmaßzahl L^* verändert, in der zweiten a^* und in der dritten b^*. In der vierten Farbreihe wird die Kombination von L^* und a^* verändert, in der fünften von L^* und b^* und in der letzten von a^* und b^*. Das Rechteck der Referenzfarbe hat dabei die Größe 128 mm in der Höhe und 16 mm in der Breite, und die Quadrate der Vergleichsfarben haben eine Seitenlänge von 16 mm. Auch hier ergibt sich wieder eine Probengröße im Gesichtsfeld zwischen 2,06° und 3,43° bei einem Abstand zwischen 30 cm und 50 cm zur Probe. Das Bild 3.28 zeigt die Testseite der ersten Art mit Farbe Nr. 2 (Rosarot) als Referenzfarbe.

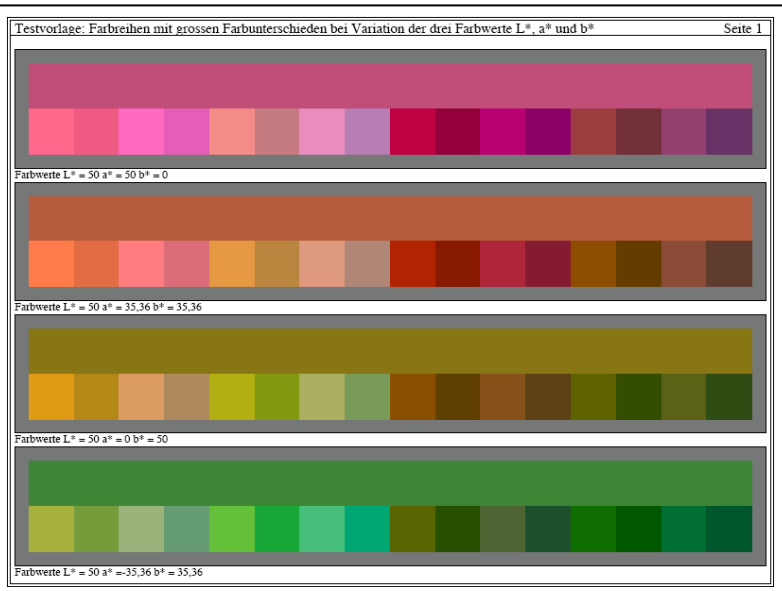

Bild 3.29 Testvorlage der zweiten Strukturart

Die Struktur der zweiten Testvorlagenart unterscheidet sich von der ersten Testvorlage durch mehrere Eigenschaften. Es werden auf einer Seite vier Referenzfarbmuster dargestellt, jedoch nur Vergleichfarben gezeigt, bei denen eine Veränderung aller drei Farbmaßzahlen L^*, a^* und

*b** vorliegt. Die Referenzfarbe befindet sich in der oberen und die Vergleichsfarben in der unteren Hälfte. Es werden drei Testseiten mit dieser Struktur erzeugt. Die erste Testvorlage der zweiten Strukturart hat die Farben Rosarot, Ziegelrot, Ockergelb und Grasgrün als Referenzfarben, und die zweite Testvorlage hat die Farben Blaugrün, Türkisblau, Himmelblau und Violettrot als Referenzfarben. Auf der letzten Seite ist nur Mittelgrau als Referenzfarbe vorhanden. Da es bei Mittelgrau 64 Farbkombinationen gibt - im Gegensatz zu den anderen 8 Referenzfarben, mit denen die Vergleichfarben zu Mittelgrau erzeugt werden - müssen hier 4 Farbreihen verwendet werden, die Mittelgrau als Referenzfarbe benutzen. Das Rechteck der Referenzfarbe hat dabei die Größe 253 mm in der Höhe und 16 mm in der Breite, die Quadrate der Vergleichsfarben haben eine Seitenlänge von 16 mm. Auch hier ergibt sich eine Probengröße im Gesischtsfeld zwischen 2,06° und 3,43° bei einem Abstand zwischen 30 cm und 50 cm zur Probe. Das Bild 3.29 zeigt die erste Testvorlage der zweiten Strukturart.

Die Farbdaten dieser Testseiten befinden sich im Anhang A.5. Im Anhang A.9 sind die Internet-Versionen der Testseiten zu finden. Die Internet-Versionen unterscheiden sich nur durch einen anderen Rahmen von den verwendeten Testseiten.

3.4.2 Bewertung der Vergleichsfarben

Die Bewertung der Farbreihen erfolgt auf einer Skala von 0 bis 50. Die Farben einer Reihe sollen jeweils in eine Skala eingetragen werden So können die Testpersonen die Farbunterschiede zwischen der Referenzfarbe und den Vergleichsfarben einer Reihe in Relation zueinander setzen. Dabei sind nicht die Absolutwerte entscheidend, sondern das Verhältnis zwischen den Bewertungen ist das wichtigste Kriterium. Die Bewertung des jeweiligen Feldes wird mit der Nummer des Feldes auf der linken oder rechten Seite der Skala eingetragen. Der Werte „0“ soll gewählt werden, wenn Referenz- und Vergleichsfarbe als gleich empfunden werden. Der Wert „50“ kann für den maximal empfundenen Farbunterschied genutzt werden, es darf aber auch ein geringerer Wert als 50 eingetragen werden.

Den Testpersonen wird die vorzunehmende Bewertung anhand eines Beispiels erklärt. Die hierbei gezeigte Farbreihe kommt in der Untersuchung selbst nicht vor, um die Probanden nicht zu beeinflussen. Die Bilder 3.30 bis 3.37 zeigen die Schritte der Bewertung einer Farbreihe.

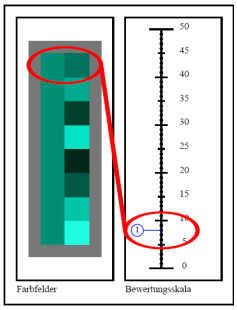

Bild 3.30 Schritt 1

- 1. Schritt: Die Vergleichsfarbe im ersten Feld auf der rechten Seite wird mit der Referenzfarbe auf der linken Seite verglichen. Dabei ist es wichtig, schon bei der ersten Farbe die übrigen sieben Farben zu überblicken und die Farbunterschiede insgesamt untereinander zu sortieren. In diesem Beispiel ist der Farbunterschied nicht sehr groß und wird daher mit „8“ bewertet. Also wird auf der linken Seite der Skala in Höhe der „8“ die Zahl „1“ eingetragen.

- 2. Schritt: Als nächstes wird die zweite Vergleichsfarbe auf der rechten Seite der Farbreihe mit der Referenzfarbe verglichen. Der Farbunterschied ist etwas größer als bei der ersten Farbe und wird daher mit einer „10“ bewertet. Da diese Bewertung sehr nahe bei der ersten liegt, wird die Zahl „2“ auf der rechten Seite der Skala in Höhe der „10“ eingetragen, um Verwechslungen zu vermeiden.

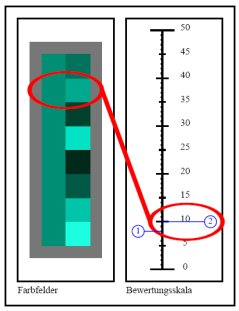

Bild 3.31 Schritt 2

- 3. Schritt: Die dritte Farbe wird mit der Referenzfarbe verglichen. Der Farbunterschied wird als stärker empfunden, aber nicht als der größte Unterschied in der Farbreihe. Er wird daher mit „35“ bewertet und in dieser Höhe auf der Skala mit einer „3“ eingetragen, diesmal wieder auf der linken Seite.

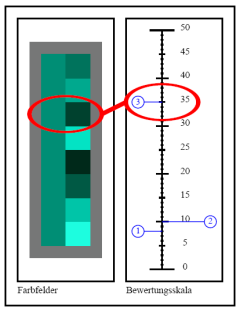

Bild 3.32 Schritt 3

- 4. Schritt: Der Farbunterschied zwischen der vierten Vergleichsfarbe und der Referenzfarbe wird als etwas geringer empfunden als der vorhergehende. Die Bewertung wird mit einer „31“ vorgenommen und auf der linken Seite der Skala mit einer „4“ eingetragen.

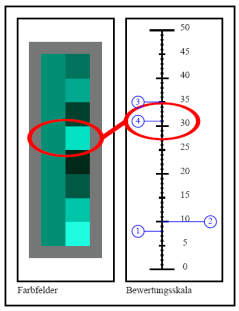

Bild 3.33 Schritt 4

- 5. Schritt: Zwischen der Referenzfarbe und der fünften Vergleichsfarbe wird der größte Farbunterschied empfunden. Der maximale Farbunterschied dieser Farbreihe wird bei „45“ in der Skala mit einer „5“ eingetragen, aber nicht im Maximum der Skala bei „50“. Der Unterschied ist zwar der größte, aber in Relation zum dritten Farbunterschied nicht so viel größer, dass ein Eintrag bei „50“ erfolgen sollte.

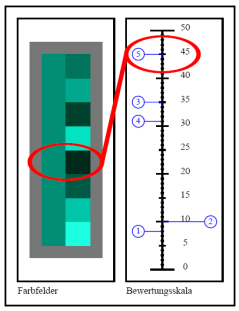

Bild 3.34 Schritt 5

- 6. Schritt: Die Farbe des sechsten Feldes auf der rechten Seite wird mit der Referenzfarbe verglichen. Dieser Farbunterschied wird weder als groß noch als klein empfunden. Er wird etwa in der Mitte zwischen dem eingetragenen Maximalwert und „0“ angesetzt und bei „23“ in der Skala mit einer „6“ eingetragen.

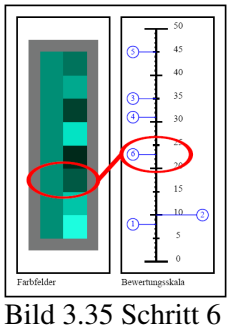

Bild 3.35 Schritt 6

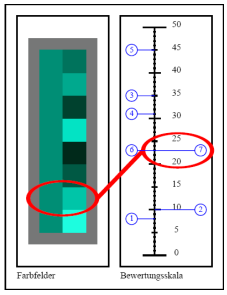

Bild 3.36 Schritt 7

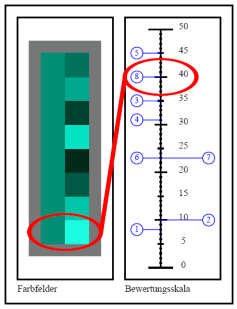

Bild 3.37 Schritt 8

- 7. Schritt: Der Farbunterschied zwischen der Referenzfarbe und der siebten Vergleichsfarbe wird als ebenso groß empfunden wie der sechste Farbunterschied und daher auch mit einer „23“ bewertet. In die Skala wird die „7“ also auf der gleichen Höhe eingetragen wie die „6“, aber zur sicheren Unterscheidung auf der gegenüberliegenden Seite.

- 8. Schritt: Bei der achten Vergleichsfarbe wird der Farbunterschied zur Referenzfarbe wieder als groß empfunden, aber nicht als ganz so groß wie bei der fünften Vergleichsfarbe. Daher wird die „8“ bei „40“ in die Skala eingetragen.

Nach dem letzten Schritt soll noch einmal abschließend überprüft werden, ob das Verhältnis der bewerteten Farbunterschieden auf der Skala auch dem subjektiv empfundenen Verhältnis entspricht.

Den Probanden ist es freigestellt, in welcher Reihenfolge sie die Vergleichsfarben bewerten.

Das Beispiel zeigt die Bewertung der Farbreihen auf den Testseiten der ersten Art. Die Bewertung der Farbreihen auf den Testvorlagen der zweiten Art erfolgt entsprechend, nur dass 16 Farben anstelle von 8 Farben in der Skala von „0“ bis „50“ bewertet werden müssen.

3.5 Fehlerbetrachtung

Bei allen messtechnischen Untersuchungen gibt es Fehlerquellen. Dabei unterscheidet man zwischen systematischen und zufälligen Fehlern.

Die systematischen Fehler bei den Schwellenuntersuchungen beruhen vor allem auf der Beleuchtung des Farbmusters mit der zweiten Lichtart. Die Beleuchtungsstärke in der Abmusterungskabine schwankt nur um 0,25 %, während die Beleuchtungsstärke des Projektors um 1,25 % schwankt. Die gemessenen Reflexionsgrade haben ebenfalls einen möglichen Fehleranteil von 1 %, genauso wie die Transmissionsgrade der Filter. Daraus ergibt sich ein maximaler systematischer Fehler von ungefähr 5,5 % für die Schwellenuntersuchungen. Bei der Untersuchung der großen Farbabstände werden die Testseiten nur unter dem D65-Normlicht betrachtet. Es spielen somit nur der Fehleranteil der Testseiten und die Schwankung der Beleuchtung in der Kabine eine Rolle. Der systematische Fehler liegt hier bei 1,5 %. Eine genauere Betrachtung der Farbmessung ist im Anhang A.4 zu finden.

Die zufälligen Fehler kommen in beiden Untersuchungen durch die Probanden zustande. Sie werden durch die Standardabweichung dargestellt. Bei den Farbschwellenuntersuchungen wird die Standardabweichung der Farbabstände der Farbschwellen verwendet und bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede die Standardabweichung der relativen visuellen Farbunterschiede. Dabei zeigt sich, dass die Standardabweichung stark schwankt. Bei manchen Kombinationen von Farbmustern und Farbfiltern ist die Standardabweichung sehr gering, bei anderen wiederum sehr groß. Die Tabelle 3.7 zeigt die minimalen und maximalen

Standardabweichungen bei den verschiedenen Filtern. Die vollständige Übersicht zu den Standardabweichungen ist im Anhang A.4 zu finden.

Tabelle 3.7 Maximale und minimale Standardabweichungen der Farbabstände ΔE^*_{ab} der Farbschwellen bei der Schwellenuntersuchung

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Maximum	0,507	0,760	2,075	0,277
Minimum	0,101	0,155	0,137	0,088

Die hohen Werte beim blauen Filter in der Tabelle 3.7 sind dadurch zu erklären, dass die Farbabstände der Farbschwelle bei diesem Filter immer etwas größer waren und in der Folge auch die Schwankungen zwischen den verschiedenen Probanden größer sind.

Bei der Untersuchung der großen Farbabstände sind die Schwankungen zwischen den einzelnen Personen etwas größer. Dies ist dadurch zu klären, dass sie die Farbmuster nach ihrer Empfindung bewerten sollten. Zudem kann die verwendete Struktur zur Bestimmung der Farbabstände zu größeren Schwankungen führen.

Tabelle 3.8 Maximale Standardabweichungen der relativen visuellen Beurteilungen ΓB bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede

Farbe	Veränderung						
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	$\Delta L^*/\Delta a^*$	$\Delta L^*/\Delta b^*$	$\Delta a^*/\Delta b^*$	$\Delta L^*/\Delta a^*/\Delta b^*$
1	0,157	0,126	0,144	0,168	0,159	0,145	0,153
2	0,116	0,178	0,160	0,158	0,142	0,143	0,116
3	0,149	0,136	0,149	0,132	0,151	0,153	0,178
4	0,156	0,150	0,136	0,152	0,134	0,163	0,160
5	0,166	0,124	0,127	0,164	0,149	0,179	0,158
6	0,169	0,158	0,131	0,147	0,176	0,148	0,142
7	0,155	0,146	0,156	0,178	0,150	0,147	0,143
8	0,160	0,158	0,148	0,157	0,144	0,157	0,149
9	0,166	0,126	0,137	0,168	0,155	0,164	0,136

Tabelle 3.9 Minimale Standardabweichungen der relativen visuellen Beurteilungen ΓB bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede

Farbe	Veränderung						
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	$\Delta L^*/\Delta a^*$	$\Delta L^*/\Delta b^*$	$\Delta a^*/\Delta b^*$	$\Delta L^*/\Delta a^*/\Delta b^*$
1	0,014	0,021	0,037	0,036	0,043	0,024	0,016
2	0,038	0,076	0,031	0,046	0,049	0,028	0,038
3	0,019	0,044	0,046	0,044	0,016	0,054	0,076
4	0,023	0,000	0,067	0,051	0,051	0,008	0,031
5	0,032	0,054	0,043	0,044	0,055	0,023	0,046
6	0,027	0,039	0,055	0,021	0,013	0,073	0,049
7	0,041	0,000	0,035	0,015	0,044	0,061	0,028
8	0,031	0,015	0,026	0,045	0,034	0,041	0,019
9	0,016	0,036	0,018	0,065	0,022	0,019	0,044

Die Tabellen 3.8 und 3.9 zeigen die maximalen und minimalen Standardabweichungen bei den verschiedenen Referenzfarben und Veränderungen dieser Referenzfarbe. Die kompletten Standardabweichungen sowohl für die Untersuchung der Farbschwellen als auch der großen Farbabstände sind im Anhang A.5 zu finden.

Kapitel 4

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in folgender Reihenfolge vorgestellt:
- Untersuchungen zu den Farbschwellen
- Untersuchungen zu den großen Farbunterschieden
- Analyse der Abhängigkeit der Probandendaten von Alter und Geschlecht

4.1 Ergebnisse der Untersuchung von Farbschwellen

Die Ergebnisse der Schwellenuntersuchung werden in folgender Reihenfolge vorgestellt:
- Untersuchung der Ellipsen in der Normfarbtafel
- Untersuchung der Ellipsoide im CIELAB-Farbraum
- Genauere Betrachtung der CIEDE2000-Farbabstandsformel im Bezug auf die Farbschwellen
- Vergleich ausgewählter Farbabstandsformeln im CIELAB-Farbraum bezüglich der Farbschwellen
- Vergleich der Ellipsoide in den Farbräumen CIEXYZ, LMS und LMSV

4.1.1 Ellipsen in der Normfarbtafel

Als erstes werden die ermittelten Farbschwellen in der Normfarbtafel dargestellt, um zu überprüfen, wie sie sich dort von den MacAdam-Ellipsen unterscheiden und ob überhaupt ein Vergleich möglich ist.

Die Berechnung der Ellipsen erfolgt nach einem einfachen Prinzip: Es werden für die Anpassung an die Normfarbwertanteile x und y jeweils nur zwei Parameter verwendet. Diese Parameter werden so gewählt, dass die Ellipsen den geringsten Unterschied zu den experimentell ermittelten Werten haben. Zwar ist es nicht möglich, die Ellipsen mit dieser einfachen Methode exakt an die bestimmten Farbabstände der Farbschwellen anzupassen. Die verwendete Methode ist jedoch hinreichend genau, um gesicherte Aussagen treffen zu können.

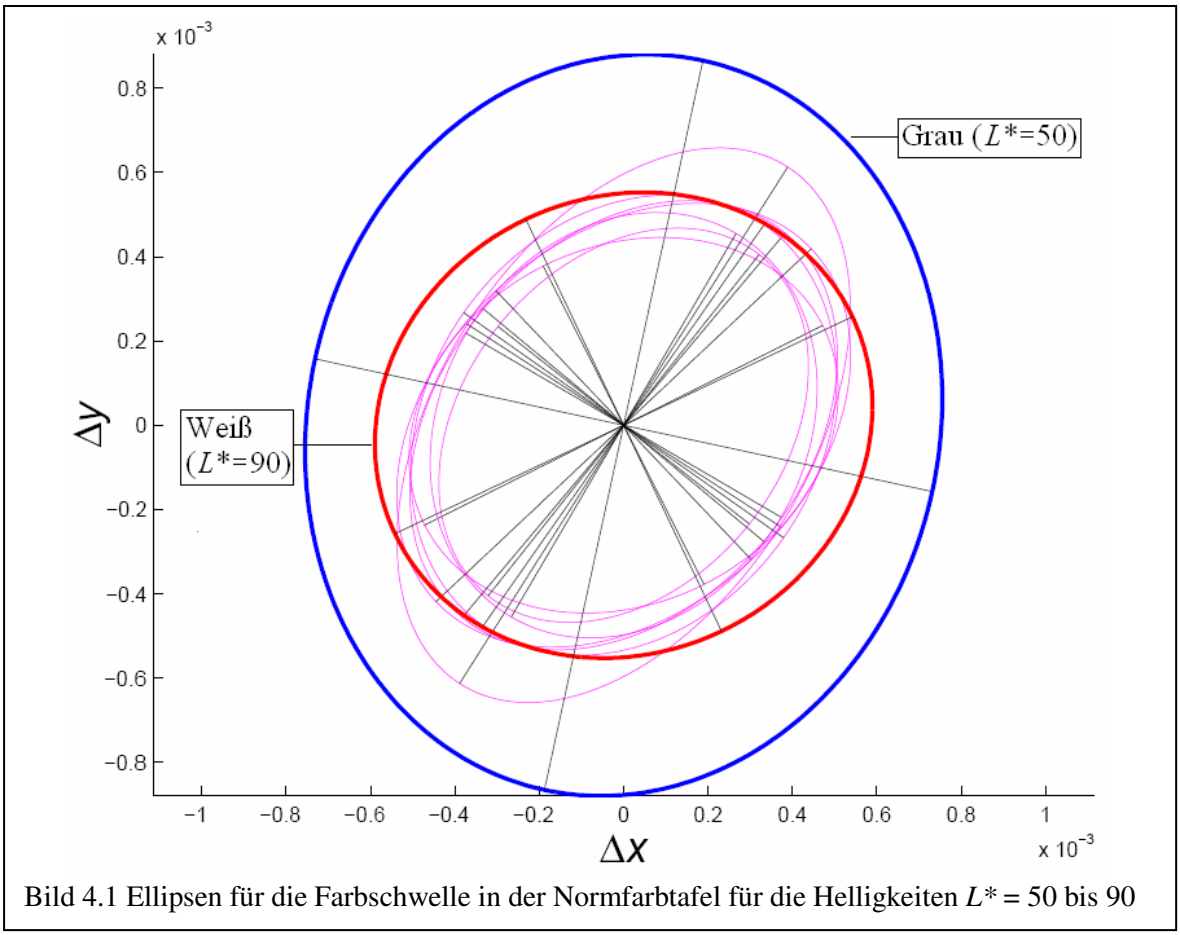

Bild 4.1 Ellipsen für die Farbschwelle in der Normfarbtafel für die Helligkeiten $L^* = 50$ bis 90

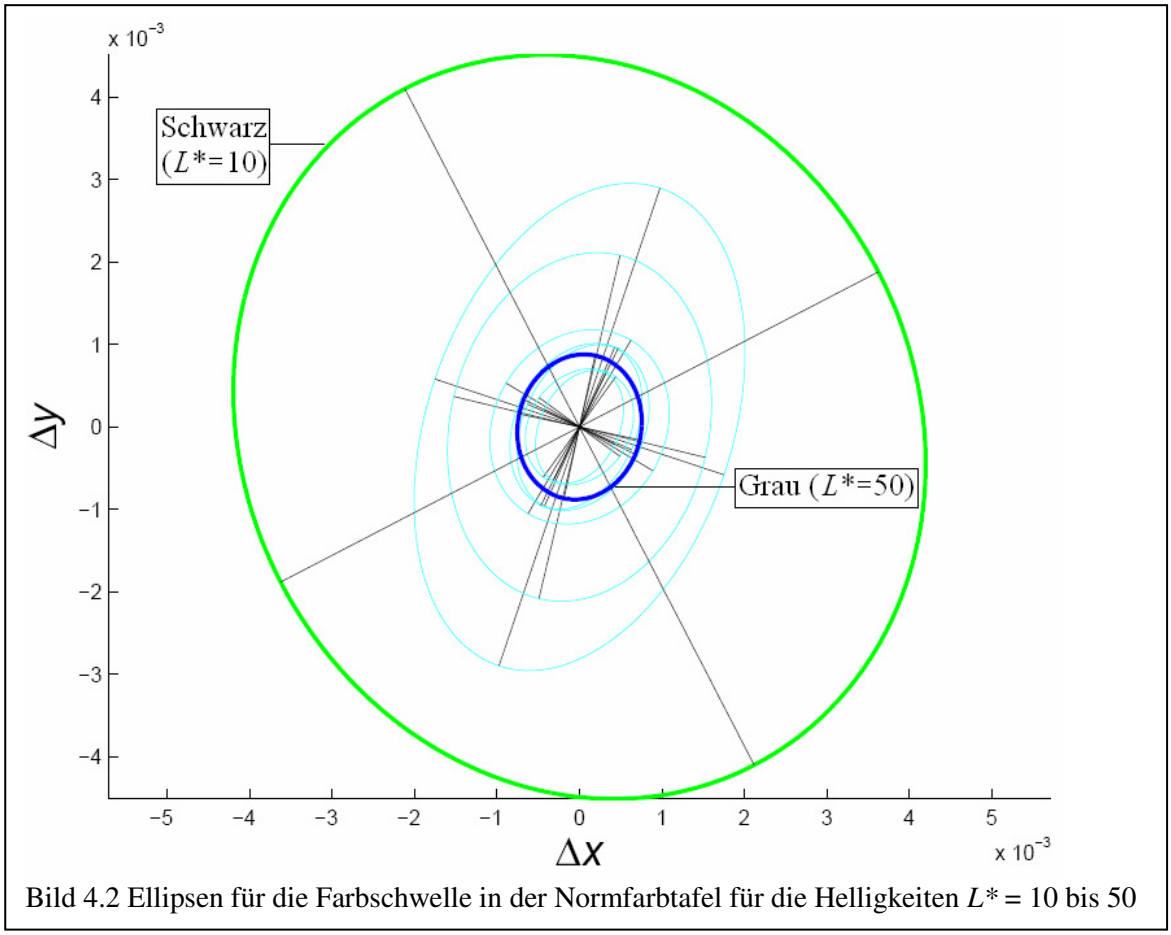

Bild 4.2 Ellipsen für die Farbschwelle in der Normfarbtafel für die Helligkeiten $L^* = 10$ bis 50

Die Bilder 4.1 und 4.2 zeigen die Schwellenellipsen für die 15 Farben der Graureihe von einem L^* = 10 bis zu einem L^* = 90. Die Ellipse für die Referenzfarbe Mittelgrau ist in blauer Farbe dargestellt, für die Farbe mit L^* = 10 in Grün und für die Farbe mit L^* = 90 in Rot. Die Ellipsen für die Farben mit Werten von L^* = 15 bis L^* = 45 sind in Cyan dargestellt, die Farben mit einem L^* zwischen 55 und 85 in Magenta. Für die Farbschwellen schwanken die mittleren Ellipsenradien für die Farben mit einem L^* zwischen 50 und 90 nur um einen Faktor 1,8 (Bild 4.1), während die mittleren Ellipsenradien für die Farben mit einem L^* zwischen 10 und 50 um einen Faktor 7,2 schwanken (Bild 4.2).

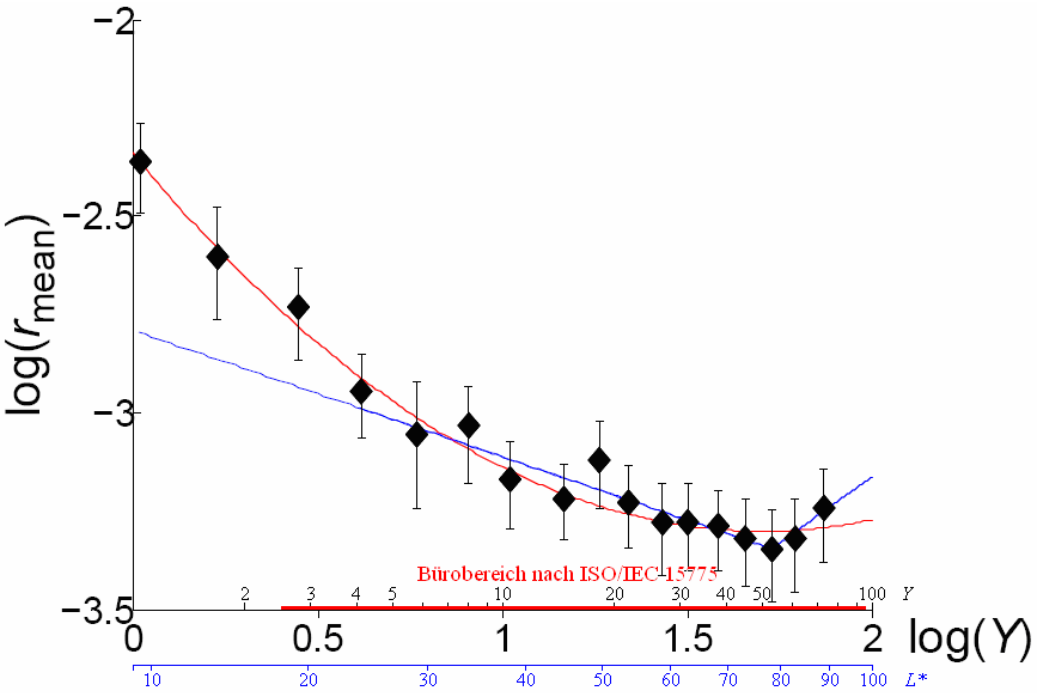

Bild 4.3 Logarithmus des mittleren Radius r_{mean} der Ellipsen für die Farbschwellen in der Normfarbtafel als Funktion des Logarithmus des Normfarbwertes Y und der Helligkeit L^*; Ausgleich durch zwei Funktionen

Zur besseren Übersicht wird der mittlere Radius r_{mean} der Ellipsen in der Normfarbtafel für die Referenzfarben auf der Grauachse berechnet. Das Bild 4.3 zeigt den mittleren Radius r_{mean} als Funktion des Normfarbwertes Y in doppellogarithmischer Darstellung. Es zeigt sich, dass der Radius der Ellipsen von Schwarz bis zur Referenzfarbe mit L^* = 80 stetig abnimmt und bei den beiden hellsten Referenzfarben mit L^* = 85 und 90 wieder zunimmt. Die Abnahme des mittleren Radius ist dabei zuerst sehr groß und wird dann immer kleiner. Die Polynomfunktion 2. Grades, die rot in das Bild 4.3 eingezeichnet ist, gibt den Verlauf der mittleren Radien r_{mean} über den Normfarbwert Y für die dunklen und mittelhellen Farben gut wieder. Für die hellen Farbproben zeigt sich aber eine größere Abweichung. Die Kombination von zwei Polynomen 1. Grades, die blau in das Bild 4.3 eingezeichnet ist, approximiert den Verlauf der mittleren Radien r_{mean} für den Bürobereich nach ISO/IEC 15775 ($2{,}5 < Y < 95$) [ISO99]. Größere Abweichungen entstehen erst im Bereich von $Y < 4$.

Der mittlere Radius r_{mean} der Ellipsen als Funktion des Normfarbwertes Y lässt aber noch keine eindeutige Aussage über das Verhalten der Farbschwellen im CIELAB-Farbraum zu. Für die Farbschwellen nehmen die Farbabstände im CIELAB-Farbraum bei dunkler und heller werdenden Referenzfarben im Vergleich zum Mittelgrau zu (Bilder 4.12, 4.16 und 4.20). Diese Eigenschaft ist aus dem Bild 4.3 nicht ersichtlich.

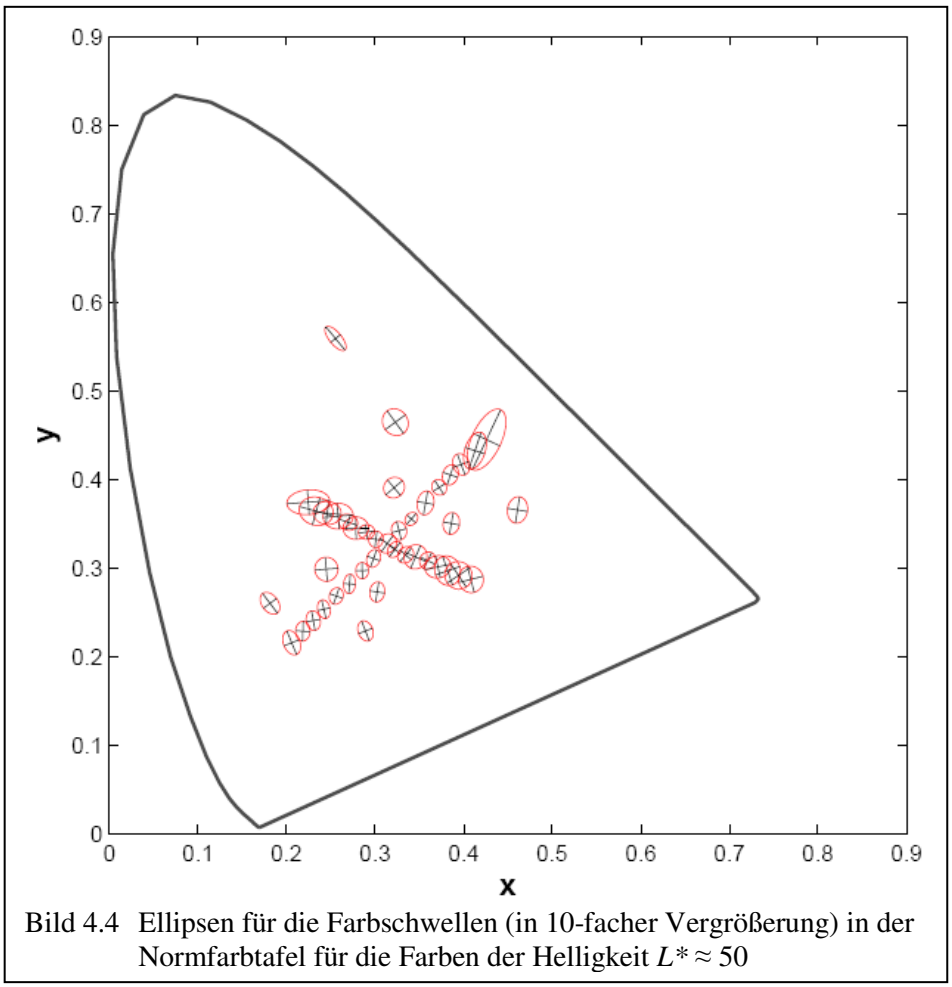

Bild 4.4 Ellipsen für die Farbschwellen (in 10-facher Vergrößerung) in der Normfarbtafel für die Farben der Helligkeit $L^* \approx 50$

Das Bild 4.4 zeigt die Ellipsen für die Farbschwellen in der Normfarbtafel für die Farben der Helligkeit L^* von ungefähr 50. Die in dieser Untersuchung ermittelten Ellipsen in der Normfarbtafel zeigen teilweise deutlich andere Eigenschaften als die MacAdam-Ellipsen. Die MacAdam-Ellipsen sind am kleinsten im blauen Bereich und am größten im grünen. Hingegen liegt bei dieser Untersuchung das Maximum im gelben Bereich, und gerade im grünen Bereich ist die Ellipse sogar kleiner als in anderen. Auch im blauen Bereich zeigt sich eine stärkere Ausdehnung der Ellipsen. Die Werte um das Mittelgrau haben die geringsten Ellipsengrößen. Auch der maximale Größenunterschied zwischen den Ellipsen ist geringer als bei denen nach MacAdam.

Ein Unterschied zwischen den MacAdam-Ellipsen und den in dieser Untersuchung bestimmten Ellipsen dürfte dadurch entstehen, dass in dieser Untersuchung die Schwellen an Körperfarben gemessen werden, während MacAdam seine Untersuchungen 1942 an Lichtfarben durchgeführt hat. Des Weiteren wurde bei den Untersuchungen von MacAdam eine weiße Umgebung gewählt und die Leuchtdichte der Innenfelder war doppelt so hoch wie die Leuchtdichte der Umgebung. In dieser Untersuchung wurde eine graue Umgebung verwendet, die eine Helligkeit L^* von ungefähr 50 hat, genauso wie die Farben der im Bild 4.4 dargestellten Ellipsen. Die sehr hohen Leuchtdichten der Innenfarbmuster bei MacAdam könnten in die Sättigungsbereiche der visuellen Farbmechanismen führen und so zu Ellipsengrößen, die in der Praxis nicht relevant sind. [Ric96]

Die Ellipsen in der Normfarbtafel haben um die unbunten Referenzfarben bei gleicher Helligkeit den geringsten Radius. Aus dieser Eigenschaft schließt man, dass sich die

Farbabstände im CIELAB-Farbraum für die Farbschwellen auch zu bunten Farben vergrößern werden.

4.1.2 Schwellenellipsoide im CIELAB-Farbraum

Für die Farbschwellen werden die Reflexionsgrade $\rho_{neu}(\lambda)$ und daraus die Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* berechnet. Im CIELAB-Farbraum ergeben sich sehr unterschiedliche Farbabstände ΔE^*_{ab} bei verschiedenen Referenzfarben. Die Tabelle 4.1 zeigt die durchschnittlichen Farbabstände ΔE^*_{ab} für die einzelnen Filter, ihre Maximal- und Minimalwerte sowie die dazugehörigen Farbmuster, deren gerundete Farbmaßzahlen als ($L^*|a^*|b^*$)-Tripel angegeben sind.

Tabelle 4.1 Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Farbabstände ΔE^*_{ab}

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,286	0,364	0,793	0,224
Maximalwert	0,619	0,758	2,026	0,444
	Farbmuster 5 (50|-40|0)	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 84 (90|-11|96)	Farbmuster 3 (10|0|0)
Minimalwert	0,133	0,186	0,360	0,154
	Farbmuster 44 (50|0|-10)	Farbmuster 37 (50|0|10)	Farbmuster 8 (55|0|0)	Farbmuster 87 (36|0|-14)

Wie die Tabelle 4.1 zeigt, erstrecken sich die Mittelwerte der Farbabstände ΔE^*_{ab} über einen Wertebereich von 0,2 bis 0,8. Maximal- und Minimalwerte beim blauen Filter unterscheiden sich um den Faktor 6. Ohne Filter entstehen Abweichungen um den Faktor 3.

Weil bei jedem der berechneten Farbabstände ΔE^*_{ab} die drei Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* einen unterschiedlichen Einfluss haben, sollten die Differenzen der drei Farbmaßzahlen ΔL^*, Δa^* und Δb^* getrennt voneinander betrachtet werden. Dies ist anhand der bisherigen Daten jedoch nicht möglich. Daher wird für die Farbschwellen aus den Differenzen der drei Farbmaßzahlen ein Ellipsoid um jedes der 98 Farbmuster berechnet.

Für das erste Farbfeld wird exemplarisch erläutert, wie für die Farbschwellen aus den gemessenen Farbmaßzahlen die Ellipsoide berechnet werden. Bezüglich des Farbschwellenbereiches wird angenommen, dass der Betrag der Farbmaßzahldifferenz gleich groß ist, unabhängig davon, ob die Differenz negativ oder positiv ist. Die Ellipsoide werden als punktsymmetrisch zur Referenzfarbe definiert. Für die Farbschwellen werden die vier Veränderungen der Farbmaßzahlen ermittelt. Aus ihren Helligkeitsdifferenzen ΔL^*, Rot-Grün-Differenzen Δa^* und Gelb-Blau-Differenzen Δb^* wird ein Ellipsoid berechnet. Die Schnittpunkte der Ellipsoide mit den Farbmaßzahlachsen werden berechnet. Die Tabelle 4.2 zeigt die Farbabstände ΔE^*_{ab} und die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für das erste Farbmuster.

Tabelle 4.2 Farbabstände ΔE^*_{ab} und Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für die Farbschwellen beim ersten Farbmuster ($L^* = 50$; $a^* = 0$; $b^* = 0$)

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
ΔE^*_{ab}	0,236	0,340	0,451	0,255
ΔL^*	0,033	0,087	0,009	0,176
Δa^*	0,227	-0,301	0,187	0,037
Δb^*	0,057	0,132	-0,410	0,181

Für die Ellipsoide im CIELAB-Farbraum werden die Schnittellipsen berechnet, die sich in den drei Ebenen des Farbraumes[31] ergeben. Für die Berechnung dieser Ellipsen werden die zwei Punkte, die sich am nächsten zur jeweiligen Ebene befinden, auf die Ebene projiziert. Durch diese beiden Punkte wird dann eine Ellipse berechnet. Dabei müssen die Ellipsen so aufeinander abgestimmt sein, dass sie sich auf den Farbraumachsen schneiden. Diese Achsenschnittpunkte werden für verschiedene Gruppen von Farben einzeln untersucht. Zum einen werden die drei Geraden im CIELAB-Farbraum betrachtet, bei denen sich nur eine Farbmaßzahl ändert und die durch Mittelgrau verlaufen, und zum anderen die drei Ebenen, die sich durch diese drei Geraden erzeugen lassen.

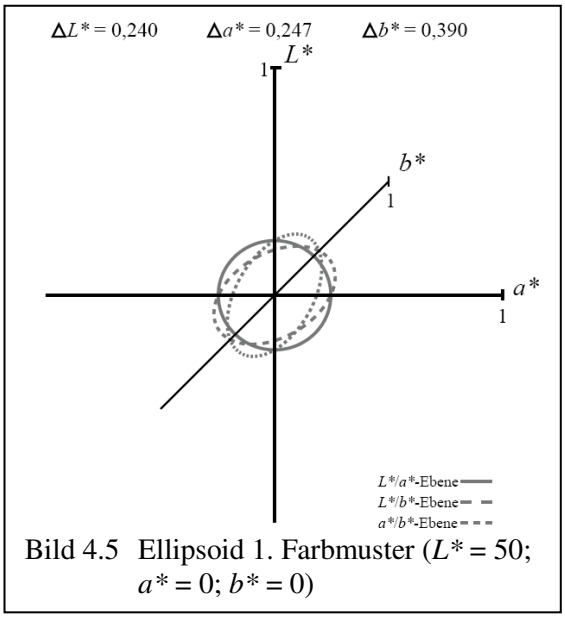

Bild 4.5 Ellipsoid 1. Farbmuster ($L^* = 50$; $a^* = 0$; $b^* = 0$)

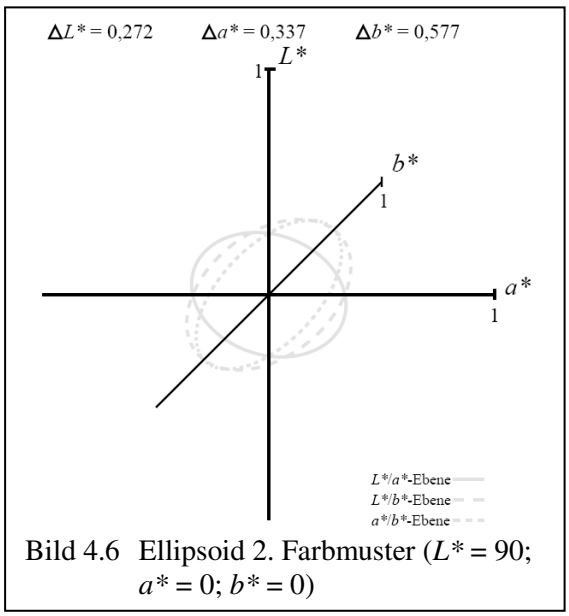

Bild 4.6 Ellipsoid 2. Farbmuster ($L^* = 90$; $a^* = 0$; $b^* = 0$)

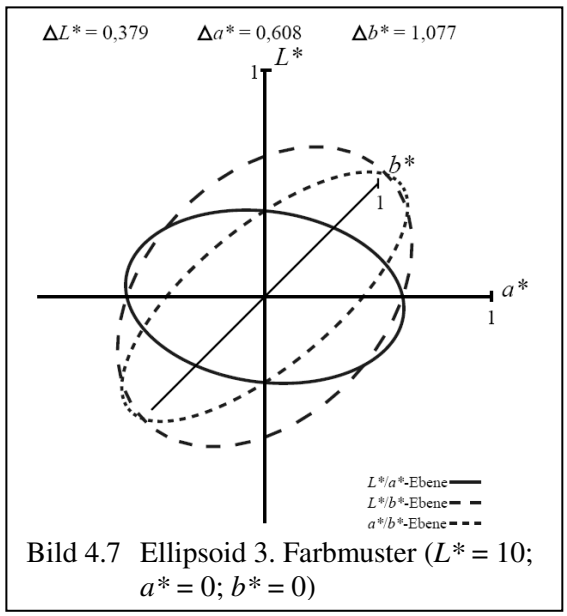

Bild 4.7 Ellipsoid 3. Farbmuster ($L^* = 10$; $a^* = 0$; $b^* = 0$)

[31] Bei den drei Ebenen handelt es sich um die L^*/a^*-, die L^*/b^*- und a^*/b^*-Ebene. Für die notwendige Berechnung der Schnittpunkte der Ellipsoide mit den Farbmaßzahlachsen ist nur die Berechnung von zwei Ellipsen in den Ebenen nötig. Es werden daher die Ebenen genommen, zu denen die aufgenommenen Stützpunkte die geringste Differenz haben.

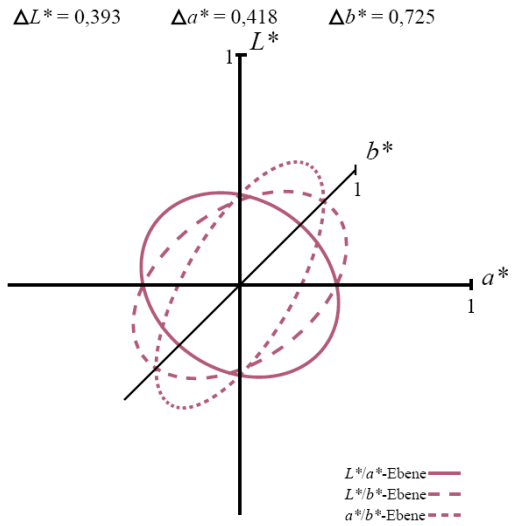

Bild 4.8 Ellipsoid 4. Farbmuster (L^* = 50; a^* = 40; b^* = 0)

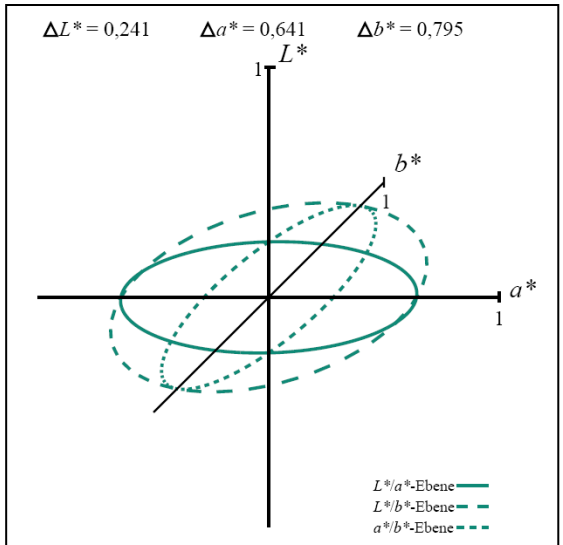

Bild 4.9 Ellipsoid 5. Farbmuster (L^* = 50; a^* = -40; b^* = 0)

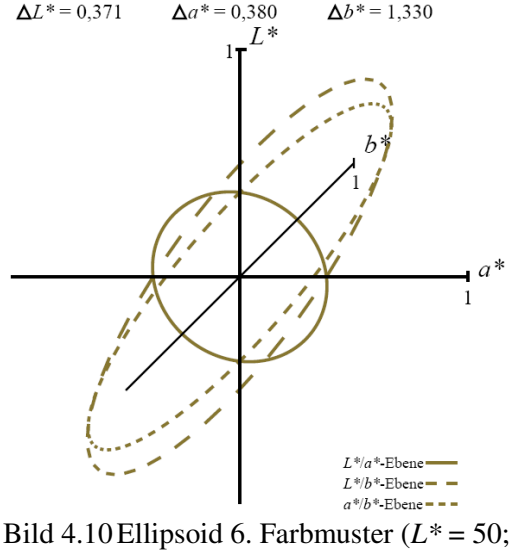

Bild 4.10 Ellipsoid 6. Farbmuster (L^* = 50; a^* = 0; b^* = 40)

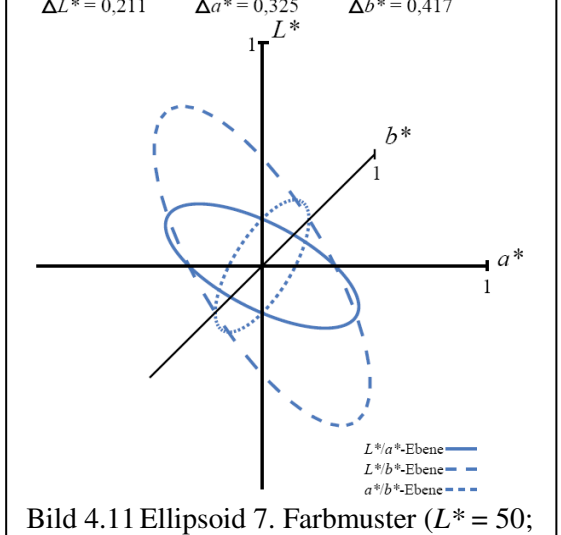

Bild 4.11 Ellipsoid 7. Farbmuster (L^* = 50; a^* = 0; b^* = -40)

Die Bilder 4.5 bis 4.11 zeigen die aus den Schwellenellipsoiden stammenden Schnittellipsen in den Ebenen L^*/a^*, L^*/b^* und a^*/b^* des CIELAB-Farbraum für die ersten sieben Farbmuster. Alle Farbmaßzahlachsen sind im Bereich 0 bis 1 angegeben. Dadurch kann man die Schwellenellipsoide miteinander vergleichen, sowohl die Form der Ellipsoide als auch deren Größe. Die im Bild angegebenen Werte ΔL^*, Δa^* und Δb^* beschreiben die Ellipsoidausdehnung in Richtung der drei Farbmaßzahlen.

Wenn die berechneten Ellipsoidausdehnungen mit den Farbmaßzahlen der Farbmuster in Verbindung gesetzt werden, wird deutlich, dass die Größe der Farbmaßzahldifferenzen von der jeweiligen Farbmaßzahl abhängig ist. Zum Beispiel führt eine höhere Farbmaßzahl a^* der Referenzfarbe für die Farbschwellen zu einer größeren Rot-Grün-Buntheitsdifferenz Δa^*. Bei Betrachtung der Abhängigkeit der Farbabstände für die Farbschwellen von der Helligkeit wird deutlich, dass im mittelgrauen Bereich ($40 \leq L^* \leq 60$) der Farbabstand geringer ist als bei den helleren und dunkleren Farben.

Tabelle 4.3 Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Ellipsoidkomponenten in den Richtungen L^*, a^* und b^*

	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
Mittelwert	0,209	0,301	0,562
Maximalwert	0,458	0,641	1,780
	Farbmuster 50 (21,72|-28,28|0,00)	Farbmuster 5 (50,00|-40,00|0,00)	Farbmuster 84 (90,37|-11,16|96,17)
Minimalwert	0,131	0,144	0,232
	Farbmuster 93 (35,86|-14,14|0,00)	Farbmuster 44 (50,00|0,00|-10,00)	Farbmuster 55 (25,72|31,35|-44,36)

Die Tabelle 4.3 zeigt die durchschnittlichen Abstände ΔL^*, Δa^* und Δb^* der Ellipsoidachsen über alle 98 Farben und die Maximal- und Minimalwerte mit den dazugehörigen Farbmustern, deren Farbmaßzahlen als ($L^*|a^*|b^*$)-Tripel angegeben sind. Für die Farbschwellen sind die Mittelwerte der Helligkeitsdifferenzen ΔL^* um den Faktor 1,5 kleiner als die der Rot-Grün-Differenzen Δa^* und um den Faktor 2,8 kleiner als die der Gelb-Blau-Differenzen Δb^*. Minimal- und Maximalwert unterscheiden sich bei der Helligkeitsdifferenz ΔL^* um den Faktor 3,5, bei der Rot-Grün-Differenz Δa^* um den Faktor 4,6 und bei der Gelb-Blau-Differenz Δb^* um den Faktor 7,7.

Es wird deutlich, dass sich für die Farbschwellen jede der drei Farbmaßzahldifferenzen im CIELAB-Farbraum anders verhält. Die Tabelle 4.4 führt die durchschnittlichen Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für die Schwellen für verschiedene Gruppen der Farbmuster auf. Bei den bunten Offset-Farben sind die Differenzen im CIELAB-Farbraum am stärksten.

Tabelle 4.4 Durchschnittliche Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für die Farbschwellen

	Alle Farben	Farben (L^*,0,0)	Farben (0,a^*,0)	Farben (0,0,b^*)	Farben (L^*,a^*,0)	Farben (L^*,0,b^*)	Farben (0,a^*,b^*)	Offset-Farben
ΔL^*	0,209	0,231	0,204	0,208	0,219	0,214	0,202	0,238
Δa^*	0,301	0,243	0,359	0,236	0,316	0,239	0,303	0,390
Δb^*	0,562	0,449	0,517	0,509	0,506	0,486	0,528	0,967

Durch Einführung der Parameter α und β in die Gleichungen der CIELAB-Farbmaßzahlen ergeben sich neue Berechnungen der Farbmaßzahlen L^*_o, a^*_o und b^*_o[32], die in den folgenden Formeln angegeben sind:

$$L^*_o = 116 \cdot f\left(Y/Y_n\right) - 16 \qquad \text{(Gl. 4.1)}$$

$$a^*_o = \alpha \cdot 500 \cdot \left[f\left(X/X_n\right) - f\left(Y/Y_n\right) \right] \qquad \text{(Gl. 4.2)}$$

$$b^*_o = \beta \cdot 200 \cdot \left[f\left(Y/Y_n\right) - f\left(Z/Z_n\right) \right] \qquad \text{(Gl. 4.3)}$$

Für die optimalen Werte der Parameter α und β sind in der Tabelle 4.5 angegeben. Der so berechnete Farbraum wird als „NToC-Farbraum“ bezeichnet.[33] Die Tabelle 4.6 zeigt die

[32] Der Index „o“ steht hierbei für „optimiert“, wobei die Optimierung sich auf die Differenzen zwischen den Farbmaßzahlkomponenten der Schwellenellipsoide bezieht.

[33] Die Abkürzung „NToC“ steht für „New Threshold out of CIELAB“.

durchschnittlichen Achsenwerte der Ellipsoide über alle 98 Farben und die Maximal- und Minimalwerte mit den dazugehörigen Farbmustern unter Verwendung der Gleichungen 4.1 bis 4.3.

Tabelle 4.5 Parameter α und β zur Optimierung

α	β
0,515	0,153

Tabelle 4.6 Mittel-, Maximal- und Minimalwerte der Ellipsoidachsen

	ΔL^*_o	Δa^*_o	Δb^*_o
Mittelwert	0,148	0,152	0,149
Maximalwert	0,335	0,325	0,357
	Farbmuster 3 (10,00|0,00|0,00)	Farbmuster 3 (10,00|0,00|0,00)	Farbmuster 3 (10,00|0,00|0,00)
Minimalwert	0,084	0,068	0,045
	Farbmuster 15 (45,00|0,00|0,00)	Farbmuster 44 (50,00|0,00|-10,00)	Farbmuster 84 (90,37|-11,16|96,17)

Die Parameter α und β liegen beide deutlich unter 1, wobei der Parameter β sehr viel kleiner ist als α. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da der Mittelwert von Δb^* um den Faktor 1,9 kleiner ist als der Mittelwert von Δa^*. Durch die Optimierung werden die durchschnittlichen Werte nahezu gleich.

Eine ähnliche Eigenschaft zeigt sich bei Kleinfeldern (Probengröße < 1°). Durch die geringere Anzahl von S-Zapfen in der Netzhaut (15 % der Gesamtpopulation [CaS82]) kommt es bei Farbmustern mit sehr geringer Größe zur Kleinfeld-Tritanopia. In ihrem Bericht von 1985 geben Silverstein und Merrifield [SiM85] Korrekturen der CIELUV-Farbabstandsformel für die Probengrößen 32', 16', 8', 4' und 2' an. Die folgende Gleichung zeigt die CIELUV-Formel mit der Kleinfeldkorrektur $\Delta E^*_{uv\text{-}sf}$ und die Tabelle 4.7 gibt die Werte der Parameter K_L, K_u und K_v für die verschiedenen Probengrößen an. Zum besseren Vergleich werden die Parameter auf $K'_L = 1$ normiert. Die Tabelle 4.7 zeigt auch die normierten Parameter K'_u und K'_v.

$$\Delta E^*_{uv-sf} = \sqrt{(K_L \cdot \Delta L^*)^2 + (K_u \cdot \Delta u^*)^2 + (K_v \cdot \Delta v^*)^2} \qquad \text{(Gl. 4.4)}$$

Tabelle 4.7 Parameter K_L, K_u und K_v für die verschiedenen Probengrößen

Probengröße in Bogenminuten	Probengröße in Grad	K_L	K_u	K_v	K'_u	K'_v
32	0,53	0,850	0,270	0,318	0,156	0,133
16	0,27	0,575	0,160	0,278	0,075	0,043
8	0,13	0,285	0,072	0,253	0,011	0,003
4	0,07	0,105	0,020	0,190	0,000	0,000
2	0,03	0,032	0,003	0,094	0,000	0,000

Die Farbmaßzahlen u^* und v^* verhalten sich zwar nicht genauso wie die Farbmaßzahlen a^* und b^*, aber ein größerer Betrag von u^* führt zu einem größeren Betrag von a^* und ein größerer Betrag von v^* zum einem größeren Betrag von b^*. Bei Kleinfeldern mit einer Probengröße unter 0,50° nimmt der Beitrag der Gelb-Blau-Differenz Δb^* zum CIELAB-Farbabstand stetig ab und erreicht bei 0,06° den Wert 0. Der Bereich zwischen 0,50° und 3,50° wurde nicht untersucht. Die Farbmuster, die in dieser Arbeit verwendet wurden, hatten eine

Probengröße von 2° bis 3,5°. Die geringere Anzahl von S-Zapfen in der Netzhaut könnte für die Farbschwellen die größeren Gelb-Blau-Differenzen Δb^* dieser Arbeit erklären.

4.1.3 Farbmetrische Beschreibung der Farbschwellen mit einem Polynom 2. Grades oder zwei Polynomen 1. Grades

Es soll nun überprüft werden, wie sich die Farbabstände für die Farbschwellen verhalten, wenn die Referenzfarben nur in Farbmaßzahlachsen-Richtung verändert werden. Die drei Farbmaßzahlachsen enthalten jeweils die mittelgraue Farbe mit den Farbmaßzahlen $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$.[34] Es werden somit die drei Hauptachsen im CIELAB-Farbraum untersucht, bei denen sich jeweils nur eine der drei Farbmaßzahlen verändert und deren Ursprung im Mittelgrau liegt. Außerdem werden die drei Ebenen betrachtet, die durch jeweils zwei dieser drei Hauptachsen aufgespannt werden.

Die Farben, die auf diesen Hauptachsen[35] oder in den 2-Hauptachsen-Ebenen[36] liegen, dienen als Referenzfarben zur Ermittlung der Farbschwellen. Für die Farbschwellen wird jeweils eine der drei Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* unabhängig von den beiden anderen verändert. Dabei wird durch die ermittelten Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* eine Ausgleichsfunktion gelegt. Für die drei Achsen wird eine Polynomfunktion 2. Ordnung verwendet, die in der Gleichung 4.4 angegeben ist. Für die drei Ebenen ist die verwendete Funktion in der Gleichung 4.5 angegeben.

$$f_1(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \qquad \text{(Gl. 4.5)}$$

$$f'_1(x, y) = c_0 + a'_1 \cdot x + a'_2 \cdot x^2 + b'_1 \cdot y + b'_2 \cdot y^2 + c_1 \cdot x \cdot y \qquad \text{(Gl. 4.6)}$$

Dabei ergeben die Funktionen die Differenz einer Farbmaßzahl, das heißt $f_1(x)$ beziehungsweise $f'_1(x,y)$ stehen für ΔL^*, Δa^* oder Δb^*. In den Gleichungen 4.4 und 4.5 steht x für die Werte der Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^*. In der Gleichung 4.5 stehen x und y für zwei verschiedene Farbmaßzahlen. Diese Ausgleichsfunktionen werden in der Annahme berechnet, dass sich für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* von einem Minimum aus stetig vergrößern. Dabei wird das Mittelgrau jeweils als Nullpunkt betrachtet. Der Parameter a_0 der Gleichung 4.4 wird für die Helligkeitsachse[37] berechnet und für die Rot-Grün-Achse und die Gelb-Blau-Achse als gegeben vorausgesetzt. Somit soll sich bei Mittelgrau für alle Ausgleichsfunktionen derselbe Wert ergeben. Für die Parameter a'_1, a'_2, b'_1 und b'_2 in der Ausgleichsfunktion der Ebenen werden jeweils die Parameter der beiden Geraden genommen, die diese Ebene aufspannen. Die Berechnung der Ausgleichsfunktion ist notwendig, da für die Farbschwellen die ermittelten Farbabstände einen zufälligen Fehler enthalten.

Es kommt noch eine zweite Variante der Ausgleichsfunktion zur Anwendung. Dabei werden zwei Polynome 1. Ordnung benutzt, die bei Mittelgrau den gleichen Wert haben. Diese

---

[34] Die mittelgraue Farbe ($L^* = 50$, $a^* = 0$, $b^* = 0$) wird ab jetzt als „Mittelgrau“ bezeichnet.

[35] Diese drei Geraden werden in dieser Arbeit auch häufig als die „Farbmaßzahlachsen“ bezeichnet. Die Gerade, bei der sich nur der Wert von L^* verändert, wird L^*-Achse genannt, die, bei der sich nur der a^*-Wert verändert, a^*-Achse und die, bei der sich nur der b^*-Wert verändert, b^*-Achse.

[36] Die Ebene, für die gilt $L^* = 50$ und $a^* = 0$, wird als L^*/a^*-Ebene bezeichnet, die, für die gilt $L^* = 50$ und $b^* = 0$, als L^*/b^*-Ebene und die, für die gilt $a^* = 0$ und $b^* = 0$, als a^*/b^*-Ebene.

[37] Die Helligkeitachse ist die Gerade mit a^* und b^* gleich Null und wird für die Berechnung von a_0 gewählt, da angenommen wird, dass sich für die Farbschwellen hier die beste Angleichung an die Farbabstände durch die Polynomfunktion ergibt.

Variante der Ausgleichsfunktion hat in der Nähe von Mittelgrau eine stärkere Steigung als die erste Variante. Diese Steigung ist aber konstant und somit an den Rändern des betrachteten Bereiches nicht so steil wie beim Polynom 2. Ordnung. Die folgenden Gleichungen zeigen die zweite Ausgleichfunktion:

$$f_2(x) = a_0 + a_1 \cdot x \text{ für } x = (L^*\text{-}50) < 0,\ x = a^* < 0 \text{ und } x = b^* < 0 \qquad \text{(Gl. 4.7)}$$

$$f_2(x) = b_0 + b_1 \cdot x \text{ für } x = (L^*\text{-}50) \geq 0,\ x = a^* \geq 0 \text{ und } x = b^* \geq 0 \qquad \text{(Gl. 4.8)}$$

Die Bilder 4.12 bis 4.23 zeigen die Ausgleichsfunktionen für die drei Farbmaßzahl-Hauptachsen. Dabei zeigen die Abbildungen 4.12 bis 4.15 die Farbmaßzahldifferenz der Farbschwellen für die Helligkeitsgerade L^*, 4.16 bis 4.19 für die Rot-Grün-Gerade a^* und die Bilder 4.20 bis 4.23 für die Gelb-Blau-Gerade b^*. Die erste Abbildung jeder Vierergruppe zeigt die Ausgleichsfunktion bei Veränderung der Farbschwelle für die Helligkeit L^* und die durch die Ellipsoide berechneten Werte für die untersuchten Farben. Die zweite zeigt die Ausgleichsfunktion bei Veränderung der Rot-Grün-Buntheit a^*, die dritte die Ausgleichsfunktion bei Veränderung der Gelb-Blau-Buntheit b^* und die vierte einen Vergleich zwischen den drei Ausgleichsfunktionen. In allen Bildern gibt die schwarze Linie die Ausgleichsfunktion für L^*, die rote die für a^* und die blaue die für b^* wieder. Die durchgezogene Linie kennzeichnet die Ausgleichsfunktion der ersten Variante, die unterbrochene Linie die der zweiten Variante.

Die als senkrechte schwarze Linien eingezeichneten Fehlertoleranzen schwanken sehr stark. Die Ausgleichsfunktionen liegen zum Teil nicht im Fehlertoleranzbereich. Die aufgenommenen Werte werden zum Teil nicht wiedergegeben. Durch Polynome höheren Grades kann eine bessere Anpassung an die aufgenommenen Werte erreicht werden. Aber diese Funktionen verhalten sich in den Randbereichen des Farbraumes nicht mehr wirklichkeitsnah.

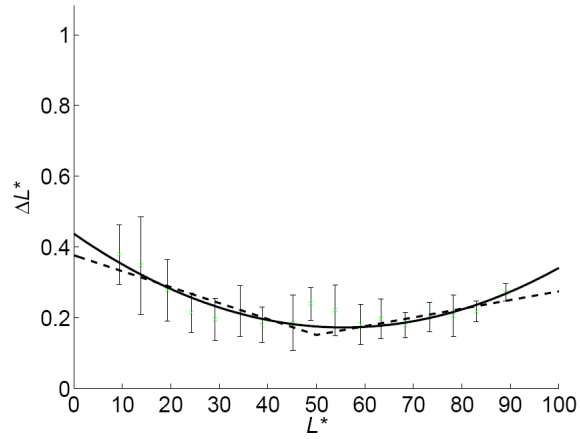

Bild 4.12 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^*

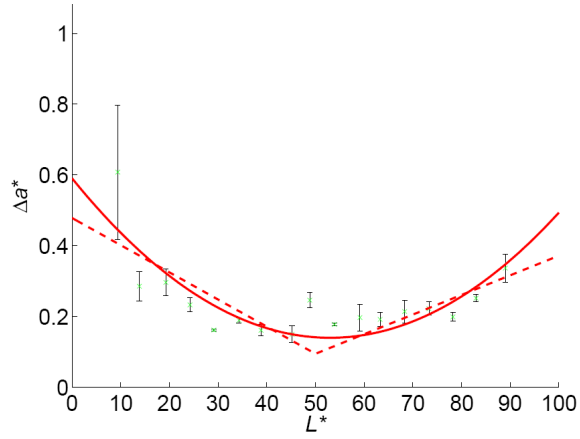

Bild 4.13 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^*

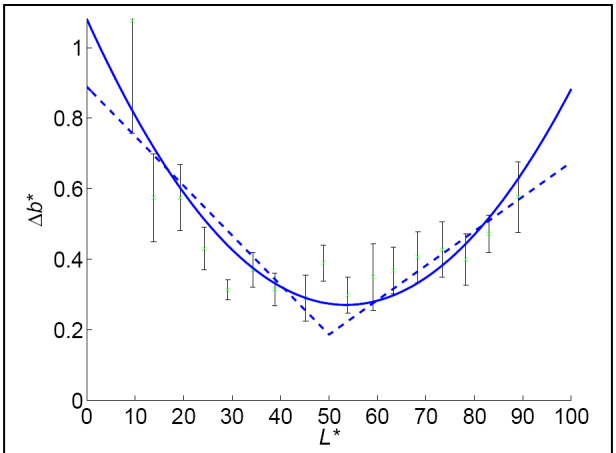

Bild 4.14 Gelb-Blau-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^*

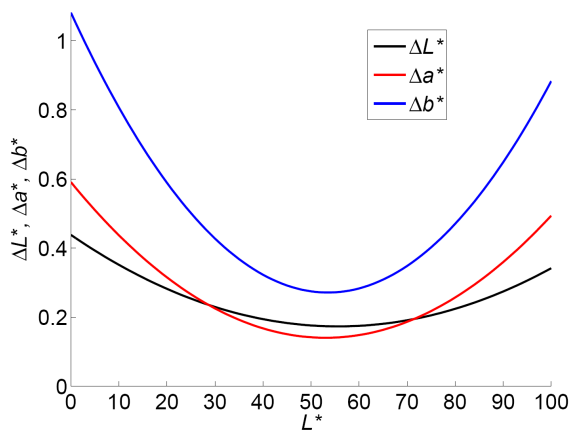

Bild 4.15 Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Helligkeit L^*

Die Bilder 4.12 bis 4.15 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* (durchgezogene Linien) als Funktion der Helligkeit L^*.[38] Alle drei Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* zeigen für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* die geringsten Werte um die mittelgraue Referenzfarbe. Bei den dunklen Farben haben die Farbmaßzahldifferenzen größere Werte als bei den hellen. Die minimalen Werte von ΔL^* und Δa^* sind etwa gleich, für Δa^* geringfügig niedriger. Die Rot-Grün-Differenz Δa^* ist bei den hellen und dunklen Farben größer als die Helligkeitsdifferenz ΔL^*. Das Minimum der Gelb-Blau-Differenz Δb^* ist beinahe doppelt so groß wie das von ΔL^* und Δa^*. Auch die Erhöhung von Δb^* zu den hellen und dunklen Farben ist größer als bei den anderen beiden Farbmaßzahldifferenzen. Die ersten Ausgleichsfunktionen sehen wie folgt aus:

$$f_{1L}(L^*-50) = \Delta L^*_L = 0{,}176 - 0{,}000966 \cdot (L^*-50) + 0{,}000086 \cdot (L^*-50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.9)}$$

$$f_{1a}(L^*-50) = \Delta a^*_L = 0{,}142 - 0{,}000972 \cdot (L^*-50) + 0{,}000160 \cdot (L^*-50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.10)}$$

$$f_{1b}(L^*-50) = \Delta b^*_L = 0{,}275 - 0{,}001984 \cdot (L^*-50) + 0{,}000283 \cdot (L^*-50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.11)}$$

Die zweiten Ausgleichsfunktionen (gestrichelte Linie) zeigen sehr ähnliche Eigenschaften wie die ersten. Die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für die Farbschwellen zeigen ebenfalls alle eine stärkere Steigung im dunkleren Bereich des CIELAB-Farbraumes. Dabei zeigt die zweite Ausgleichsfunktion bei den Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* für Farben mit einem $L^* < 15$ beziehungsweise mit einem $L^* > 85$ geringere Werte als die erste Ausgleichsfunktion. Die zweiten Ausgleichsfunktionen sehen wie folgt aus:

$$f_{2L}(L^*-50) = 0{,}152 - 0{,}004502 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* < 50 \qquad \text{(Gl. 4.12)}$$

$$f_{2L}(L^*-50) = 0{,}152 + 0{,}002466 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* \geq 50 \qquad \text{(Gl. 4.13)}$$

$$f_{2a}(L^*-50) = 0{,}095 - 0{,}007672 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* < 50 \qquad \text{(Gl. 4.14)}$$

$$f_{2a}(L^*-50) = 0{,}095 + 0{,}005541 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* \geq 50 \qquad \text{(Gl. 4.15)}$$

$$f_{2b}(L^*-50) = 0{,}187 - 0{,}014053 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* < 50 \qquad \text{(Gl. 4.16)}$$

$$f_{2b}(L^*-50) = 0{,}187 + 0{,}009773 \cdot (L^*-50) \text{ für } L^* \geq 50 \qquad \text{(Gl. 4.17)}$$

[38] Die Farbmaßzahlen a^* und b^* sind dabei gleich Null.

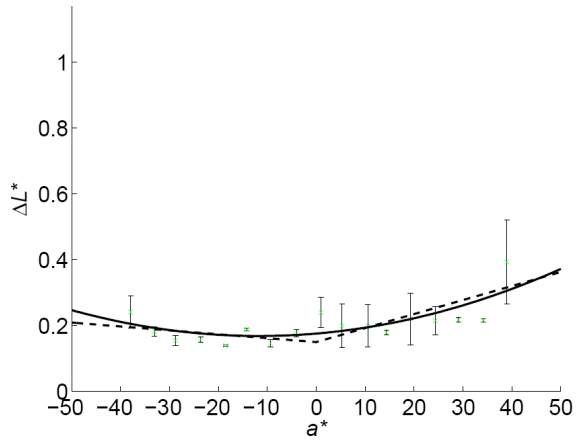

Bild 4.16 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^*

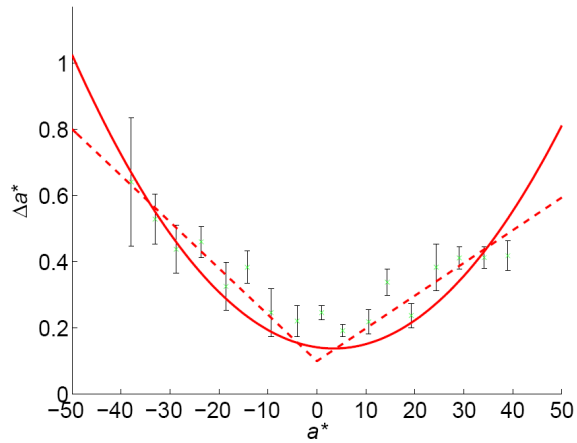

Bild 4.17 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^*

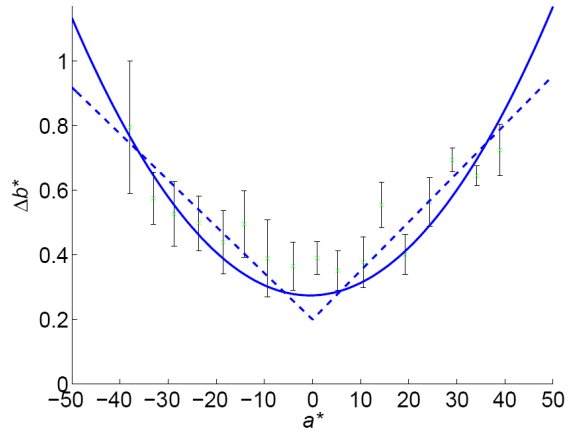

Bild 4.18 Gelb-Blau-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^*

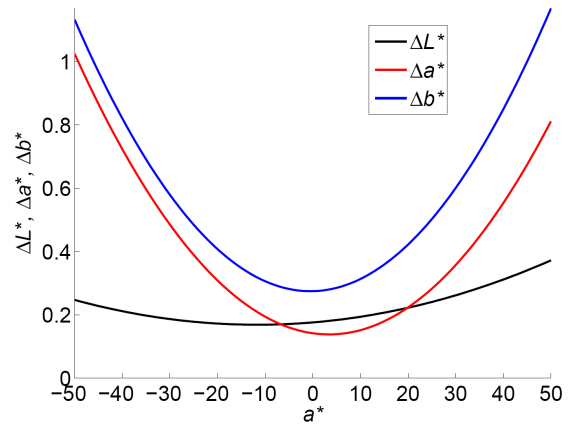

Bild 4.19 Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^*

Die Bilder 4.16 bis 4.19 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* (durchgezogene Linien) als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^*.[39] Für die Farbschwellen besitzen alle drei Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* die geringsten Werte um die mittelgraue Referenzfarbe. Der Minimalwert wird für die Helligkeitsdifferenz ΔL^* etwas in den grünen Bereich verschoben, weil die Normspektralwertfunktion $\bar{y}(\lambda)$ ihr Maximum bei 555 nm hat. Aus demselben Grund sind für die Farbschwellen die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* im roten Bereich etwas größer als im grünen Bereich. Generell sind die Helligkeitsdifferenzen aber geringer als die anderen beiden Farbmaßzahldifferenzen. Die Werte der Rot-Grün-Differenz Δa^* sind im grünen Bereich größer als im roten. Für die Farbschwellen sind die Gelb-Blau-Differenzen Δb^* im roten Bereich größer als im grünen. Durch diese Eigenschaften nähern sich die Farbmaßzahldifferenzen Δa^* und Δb^* im grünen Bereich an. Für die Farbschwellen sind die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* sowohl im grünen als auch im roten Bereich sehr viel geringer als für die beiden anderen Farbmaßzahldifferenzen. Es folgen die Ausgleichsfunktionen:

$$f_{1L}(a^*) = \Delta L^*_a = 0{,}176 + 0{,}001251 \cdot a^* + 0{,}000054 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.18)}$$

$$f_{1a}(a^*) = \Delta a^*_a = 0{,}142 - 0{,}002135 \cdot a^* + 0{,}000311 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.19)}$$

[39] Die Helligkeit L^* ist gleich 50 und die Gelb-Blau-Buntheit b^* ist gleich 0.

$$f_{1b}(a^*) = \Delta b^*_a = 0{,}275 + 0{,}000356 \cdot a^* + 0{,}000351 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.20)}$$

Die zweiten Ausgleichungsfunktionen (gestrichelte Linie) für die Rot-Grün-Buntheit a^* sind den ersten von ihren Eigenschaften her ähnlich. Die beiden Ausgleichsfunktionen für die Helligkeitsdifferenz ΔL^* sind sogar fast identisch. Bei der Helligkeitsdifferenz ΔL^* ist die Steigung im roten Bereich höher als im grünen. Bei der Farbmaßzahldifferenz Δa^* ist die Steigung im grünen Bereich höher als im roten und bei der Farbmaßzahldifferenz Δb^* ist die Steigung in beide Richtungen ungefähr gleich groß. Bei höheren Beträgen der Rot-Grün-Buntheit a^* sind die Werte der zweiten Ausgleichsfunktion kleiner als die der ersten Ausgleichsfunktion. Die zweiten Ausgleichsfunktionen sehen wie folgt aus:

$$f_{2L}(a^*) = 0{,}152 - 0{,}001107 \cdot a^* \text{ für } a^* < 0 \qquad \text{(Gl. 4.21)}$$
$$f_{2L}(a^*) = 0{,}152 + 0{,}004181 \cdot a^* \text{ für } a^* \geq 0 \qquad \text{(Gl. 4.22)}$$
$$f_{2a}(a^*) = 0{,}095 - 0{,}014212 \cdot a^* \text{ für } a^* < 0 \qquad \text{(Gl. 4.23)}$$
$$f_{2a}(a^*) = 0{,}095 + 0{,}010081 \cdot a^* \text{ für } a^* \geq 0 \qquad \text{(Gl. 4.24)}$$
$$f_{2b}(a^*) = 0{,}187 - 0{,}014880 \cdot a^* \text{ für } a^* < 0 \qquad \text{(Gl. 4.25)}$$
$$f_{2b}(a^*) = 0{,}187 + 0{,}015604 \cdot a^* \text{ für } a^* \geq 0 \qquad \text{(Gl. 4.26)}$$

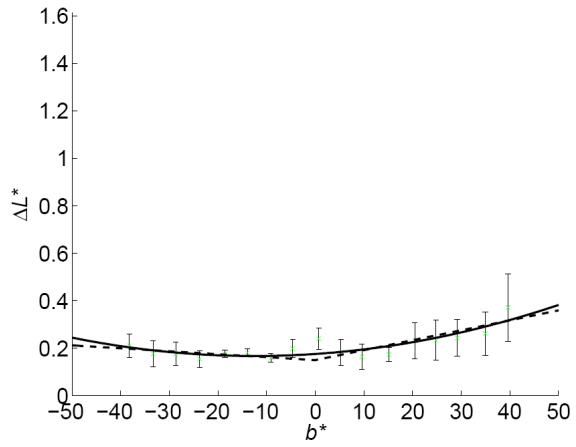

Bild 4.20 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^*

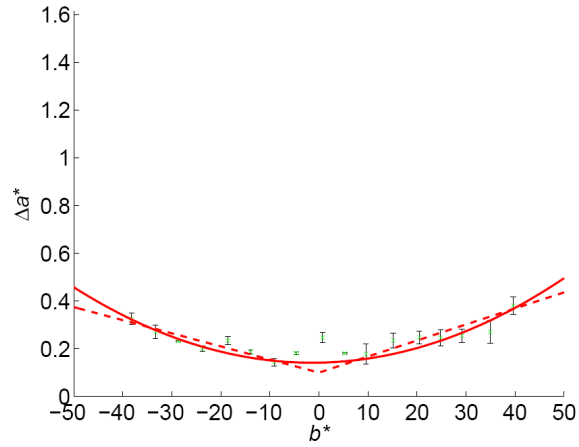

Bild 4.21 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^*

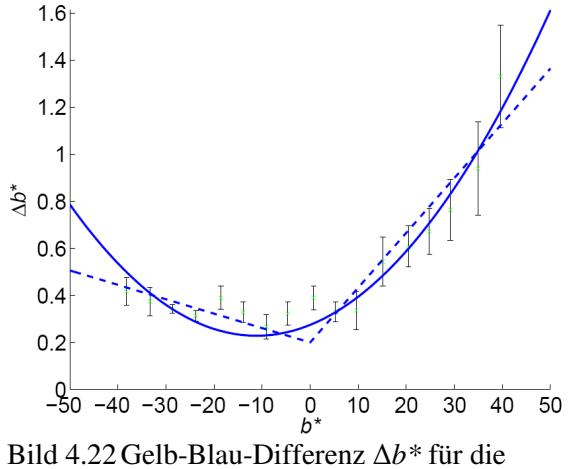

Bild 4.22 Gelb-Blau-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^*

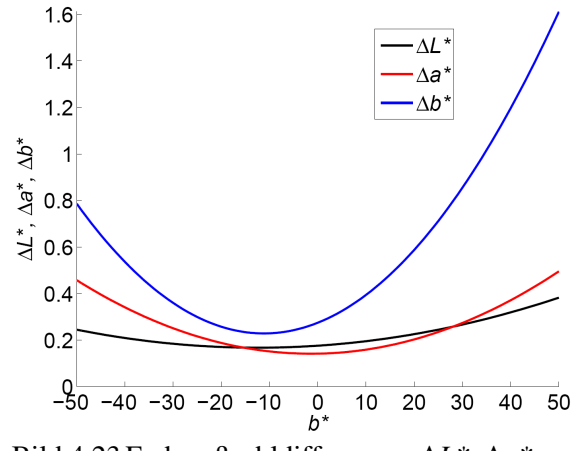

Bild 4.23 Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^*

Die Bilder 4.20 bis 4.23 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* (durchgezogene Linien) als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^*.[40] Die beiden Farbmaßzahldifferenzen ΔL^* und Δb^* zeigen für die Farbschwellen als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^* die geringsten Werte leicht im blauen Bereich, während die Rot-Grün-Differenz Δa^* die geringsten Werte um die mittelgraue Referenzfarbe hat. Während sich die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^* und Δa^* im blauen und gelben Bereich sehr ähnlich verhalten, zeigt die Gelb-Blau-Differenz Δb^* im blauen Bereich nur halb so große Werte wie im gelben. Es folgen die Ausgleichsfunktionen:

$$f_{1L}(b^*) = \Delta L^*_b = 0{,}176 + 0{,}001358 \cdot b^* + 0{,}000055 \cdot b^{*2} \quad \text{(Gl. 4.27)}$$

$$f_{1a}(b^*) = \Delta a^*_b = 0{,}142 + 0{,}000380 \cdot b^* + 0{,}000134 \cdot b^{*2} \quad \text{(Gl. 4.28)}$$

$$f_{1b}(b^*) = \Delta b^*_b = 0{,}275 + 0{,}008258 \cdot b^* + 0{,}000370 \cdot b^{*2} \quad \text{(Gl. 4.29)}$$

Die zweite Ausgleichsfunktion (gestrichelte Linie) für die Gelb-Blau-Buntheit b^* zeigt keine großen Unterschiede zur ersten Ausgleichsfunktion bei den Farbmaßzahldifferenzen ΔL^* und Δa^*. Bei der Gelb-Blau-Differenz Δb^* als Funktion von b^* zeigen sich größere Unterschiede. Die Steigung der zweiten Ausgleichsfunktion in den blauen Bereich hinein ist bei der Farbmaßzahldifferenz Δb^* fast 40 % geringer als bei der ersten. Generell sind die Werte der zweiten Ausgleichsfunktion im Randbereich immer etwas geringer oder gleich den Werten der ersten Ausgleichsfunktion. Die zweiten Ausgleichsfunktionen sehen wie folgt aus:

$$f_{2L}(b^*) = 0{,}152 - 0{,}001165 \cdot b^* \text{ für } b^* < 0 \quad \text{(Gl. 4.30)}$$

$$f_{2L}(b^*) = 0{,}152 + 0{,}004112 \cdot b^* \text{ für } b^* \geq 0 \quad \text{(Gl. 4.31)}$$

$$f_{2a}(b^*) = 0{,}095 - 0{,}005682 \cdot b^* \text{ für } b^* < 0 \quad \text{(Gl. 4.32)}$$

$$f_{2a}(b^*) = 0{,}095 + 0{,}006911 \cdot b^* \text{ für } b^* \geq 0 \quad \text{(Gl. 4.33)}$$

$$f_{2b}(b^*) = 0{,}187 - 0{,}006623 \cdot b^* \text{ für } b^* < 0 \quad \text{(Gl. 4.34)}$$

$$f_{2b}(b^*) = 0{,}187 + 0{,}023771 \cdot b^* \text{ für } b^* \geq 0 \quad \text{(Gl. 4.35)}$$

Für die Farbschwellen zeigen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* folgende gemeinsame Eigenschaften: Die Minimalwerte befinden sich immer in der Nähe der mittelgrauen Farbe. Außerdem zeigt eine Farbmaßzahldifferenz als Funktion selbiger Farbmaßzahl höhere Werte als bei den anderen beiden Farbmaßzahlen. Zum Beispiel sind die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* als Funktion der Helligkeit L^* höher als bei der Rot-Grün-Buntheit a^* oder der Gelb-Blau-Buntheit b^*.

Im weiteren Verlauf der Untersuchung wird nur noch die erste Ausgleichsfunktion (Polynom 2. Grades) betrachtet. Die erste Ausgleichsfunktion zeigt in der Nähe der mittelgrauen Referenzfarbe geringere Anstiege und an den Rändern des Farbraumes größere Anstiege für die Farbschwellen. Die zweite Ausgleichsfunktion (Kombination aus zwei Polynomen 1. Grades) zeigt einen konstanten Anstieg jeweils über eine Hälfte der Farbmaßzahlachse. Die erste Ausgleichsfunktion liegt im Durchschnitt näher an den experimentell ermittelten Farbmaßzahldifferenzen als die zweite.

Die Bilder 4.24 bis 4.32 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Ausgleichsfunktion der drei 2-Hauptachsen-Ebenen. Für die Farbschwellen zeigen die Bilder 4.24 bis 4.26 die Farbmaßzahldifferenzen als Funktion von L^* und a^*, 4.27 bis 4.29 als Funktion von L^* und b^* und 4.30 bis 4.32 als Funktion von a^* und b^*. Dabei zeigt das erste

[40] Die Helligkeit L^* ist gleich 50 und die Rot-Grün-Buntheit a^* ist gleich 0.

Bild jeder Dreiergruppe für die Farbschwellen die Helligkeitsdifferenz ΔL^*, das zweite die Rot-Grün-Differenzen Δa^* und das dritte die Gelb-Blau-Differenzen Δb^*. Durch die Farbgebung wird hierbei die Größe des Wertes angegeben: Je bläulicher die Funktion, desto niedriger die Werte, und je rötlicher, desto größer. Die farbigen Linien in der Basisebene stellen die Farbmaßzahldifferenzen mit gleichen Werten für die Farbschwellen da. Es ist dabei zu beachten, dass die Werte, die sich in den Randbereichen der dargestellten Ebenen befinden, nur theoretisch berechnet werden können, da es keine realen Farben mit diesen Farbwerten gibt.

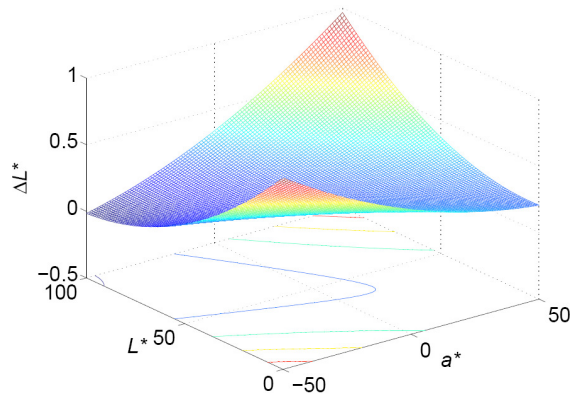

Bild 4.24 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Rot-Grün-Buntheit a^*

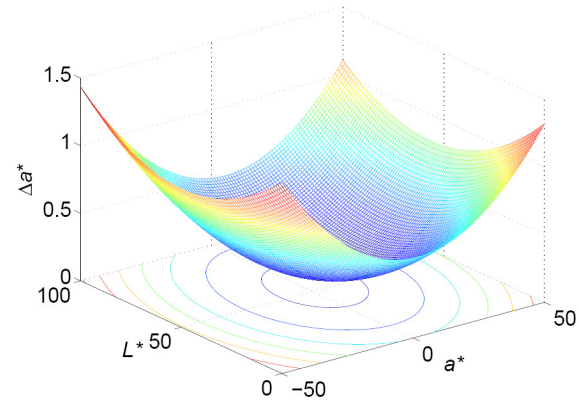

Bild 4.25 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Rot-Grün-Buntheit a^*

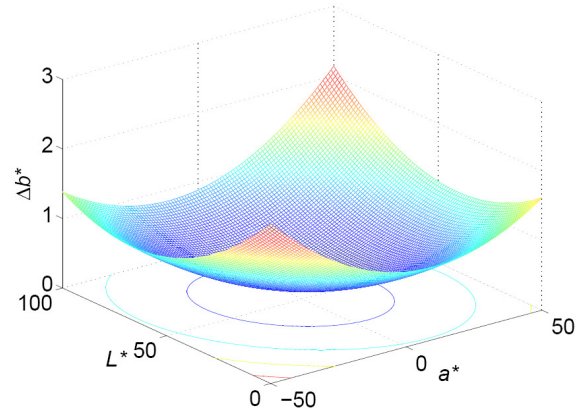

Bild 4.26 Blau-Gelb-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Rot-Grün-Buntheit a^*

Die Bilder 4.24 bis 4.26 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Farbmaßzahlen L^* und a^*.[41] Für die Farbschwellen werden die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* in Richtung der hellen und grünlichen Farben immer kleiner und erreichen sogar einen Wert von Null. Diese Werte der Farbmaßzahlen werden nur bei nicht realen Farben erreicht und sind daher zu vernachlässigen. Auch in Richtung der dunklen rötlichen Farben werden die Helligkeitsdifferenzen kleiner. Bei den dunklen grünlichen und hellen rötlichen Farben werden die Helligkeitsdifferenzen hingegen immer größer. Die größte Steigung ist dabei in Richtung der positiven a^*-Werte und der L^*-Werte, die gegen 100 gehen, zu erkennen. Bei den Rot-Grün-Differenzen Δa^* für die Farbschwellen ist der minimale Wert

[41] Die Gelb-Blau-Buntheit b^* ist gleich 0.

ungefähr bei Mittelgrau. In alle Richtungen werden die Rot-Grün-Differenzen stetig größer. Der stärkste Anstieg zeigt sich in Richtung der hellen grünlichen Farben. Während die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* stärker von der Helligkeit L^* der Farbe abhängen, sind die Rot-Grün-Differenzen Δa^* stärker von der Rot-Grün-Buntheit a^* der Farbe abhängig. Bei der Gelb-Blau-Differenz Δb^* für die Farbschwellen liegt das Minimum ungefähr bei Mittelgrau und die Vergrößerung ist in alle Richtungen etwa gleich stark. Wenn die Farben dunkler und rötlicher werden, ist die Steigung etwas größer als in den anderen Bereichen. Die Werte der Helligkeitsdifferenzen ΔL^* liegen zwischen 0,1 und 1,1, die Rot-Grün-Differenzen Δa^* zwischen 0,2 und 1,8 und die Gelb-Blau-Differenzen Δb^* zwischen 0,4 und etwas über 3,0.

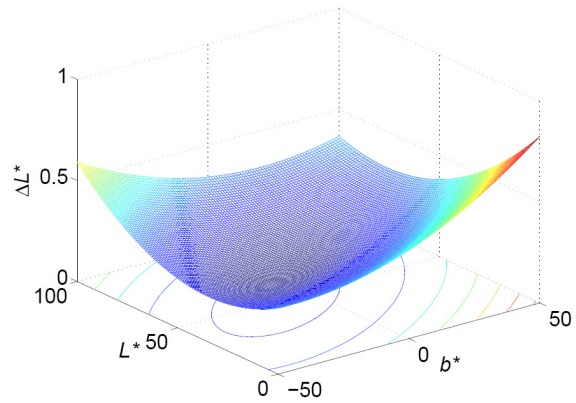

Bild 4.27 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Gelb-Blau-Buntheit b^*

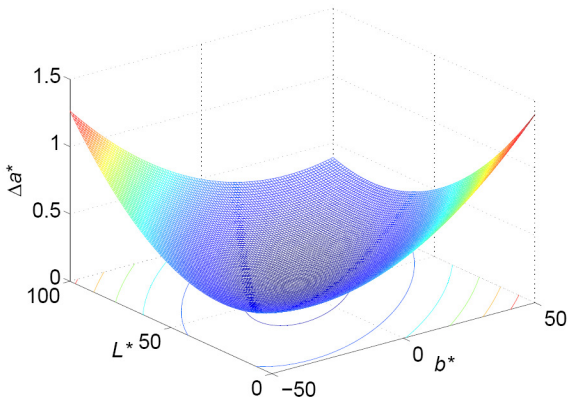

Bild 4.28 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Gelb-Blau-Buntheit b^*

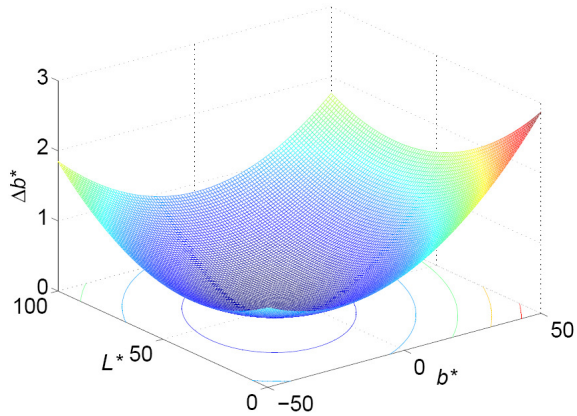

Bild 4.29 Blau-Gelb-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Helligkeit L^* und der Blau-Gelb - Buntheit b^*

Die Bilder 4.27 bis 4.29 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Farbmaßzahlen L^* und b^*.[42] Bei den Helligkeitsdifferenzen ΔL^* liegt das Minimum etwas im gelblichen Bereich, aber nicht weit von Mittelgrau entfernt. Die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* werden im dunklen gelblichen Bereich am größten. Die Veränderung bezüglich der Helligkeit L^* der Farbe ist kleiner als bezüglich der Gelb-Blau-Buntheit b^*. Bei den Rot-Grün-Differenzen Δa^* liegt das Minimum bei der mittelgrauen Farbe. Die maximale Steigung der Farbmaßzahldifferenz Δa^* zeigt in Richtung des dunklen gelben Bereiches der Ebene. Dabei ist eine stärkere Vergrößerung der Rot-Grün-Differenzen Δa^*

[42] Die Rot-Grün-Buntheit a^* ist gleich 0.

gegenüber der Gelb-Blau-Buntheit b^* der Farbe als im Vergleich zu ihrer Helligkeit L^* zu erkennen. Die Gelb-Blau-Differenz Δb^* zeigt ein Minimum ungefähr bei Mittelgrau und wird durch die Gelb-Blau-Buntheit b^* der Farbe stärker beeinflusst. Die stärkste Steigung liegt in Richtung der dunklen gelblichen Farben. Die maximalen Werte der Helligkeitsdifferenzen ΔL^* liegen ungefähr bei 1,0, die maximalen Rot-Grün-Differenzen Δa^* ungefähr bei 1,7 und die maximalen Gelb-Blau-Differenzen Δb^* etwas über 3,8.

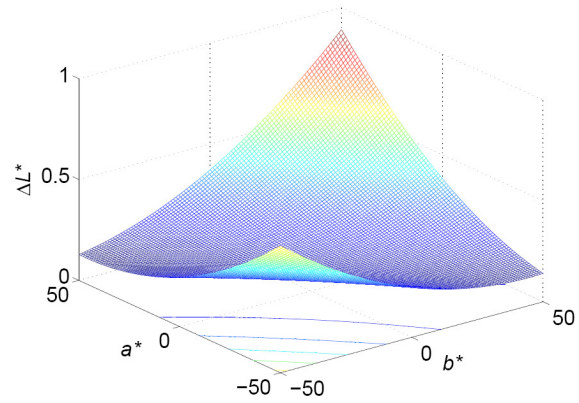

Bild 4.30 Helligkeitsdifferenz ΔL^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* und der Gelb-Blau-Buntheit b^*

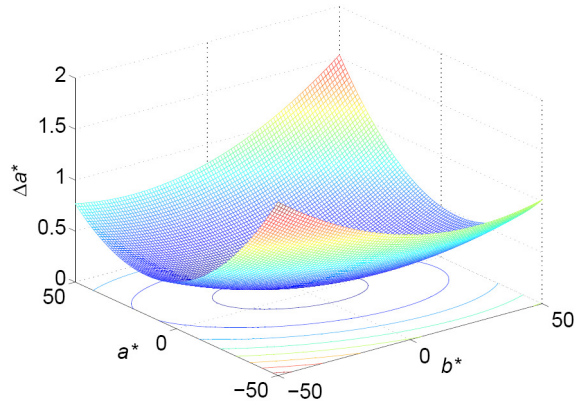

Bild 4.31 Rot-Grün-Differenz Δa^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* und der Gelb-Blau-Buntheit b^*

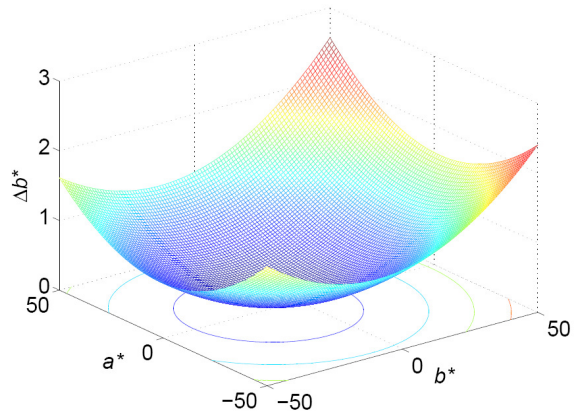

Bild 4.32 Blau-Gelb-Differenz Δb^* für die Farbschwellen als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* und der Blau-Gelb - Buntheit b^*

Die Bilder 4.30 bis 4.32 zeigen für die Farbschwellen die Farbmaßzahldifferenzen ΔL^*, Δa^* und Δb^* als Funktion der Farbmaßzahlen a^* und b^*.[43] Für die Farbschwellen verhalten sich die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* in den Bereichen hoher Beträge der Farbmaßzahlen a^* und b^* sehr unterschiedlich. Die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* haben Werte von unter 0,15 bis über 1,05 in diesen Bereichen. Die Steigung der Helligkeitsdifferenzen ΔL^* im rotgelben und im grünblauen Bereich[44] ist gering im Vergleich zu den Steigungen im rotblauen und im grüngelben Bereich. Bei den Rot-Grün-Differenzen Δa^* für Farbschwellen ist die Steigung größer in Richtung der Rot-Grün-Buntheit a^* als in Richtung der Gelb-Blau-Buntheit b^*. Bei

[43] Die Helligkeit L^* ist gleich 50.

[44] Die Bereiche werden nur hilfsweise „roter Bereich“ beziehungsweise „gelber Bereich“ genannt; diese Bezeichnung hat nichts mit der wirklichen Farbe zu tun, sondern mit dem Wert der Farbmaßzahlen. Das gilt auch für die Bezeichnungen „grüner Bereich“ und „blauer Bereich“.

der Farbmaßzahldifferenz Δb^* für die Farbschwellen ist die Steigung in Richtung der Rot-Grün-Buntheit a^* und in Richtung der Gelb-Blau-Buntheit b^* etwa gleich groß. Während die Steigung der Rot-Grün-Differenz Δa^* in Richtung des grünen Bereiches leicht stärker als in Richtung des roten Bereich ist, ist die Steigung der Gelb-Blau-Differenz Δb^* im gelben Bereich deutlich größer als im blauen. Die Rot-Grün-Differenzen Δa^* haben Werte von 0,2 bis 2,0, während die Gelb-Blau-Differenzen Δb^* in einem Wertebereich von 0,3 bis knapp über 3,3 liegen.

Die Maximalwerte der Farbmaßzahldifferenzen liegen immer an den Rändern des betrachteten Werteraumes, das heißt bei den Geraden an einer der Seiten und bei den Ebenen oder den Räumen an einer der Ecken. Die hier betrachteten Werte der Farbmaßzahlen (z.B. $L^* = 50$, $a^* = 50$, $b^* = 50$) kommen zum größten Teil in der Realität nicht vor.

4.1.4 Vergleich der neu vorgeschlagenen Funktion mit bekannten Farbabstandsformeln

Die Farbschwellen werden mit den Farbabstandsformeln von CIELAB und CIEDE2000 für die L^*-, a^*- und b^*-Geraden beschrieben. Die Farbschwellen in Helligkeitsrichtung werden mit der Reizschwellenfunktion nach Weber[45] und der neuen Helligkeitsfunktion von Rosemann[46] verglichen. Der erste Vergleich erfolgt für die Helligkeitsbezugdifferenzen ΔY über dem Logarithmus des Helligkeitsbezuges Y (Bild 4.33). In allen vier Bildern ist die in Kapitel 4.1.3 ermittelte Schwellenfunktion in der Linienfarbe Orange eingezeichnet. Die übrigen Funktionen sind in den Bildern gekennzeichnet.

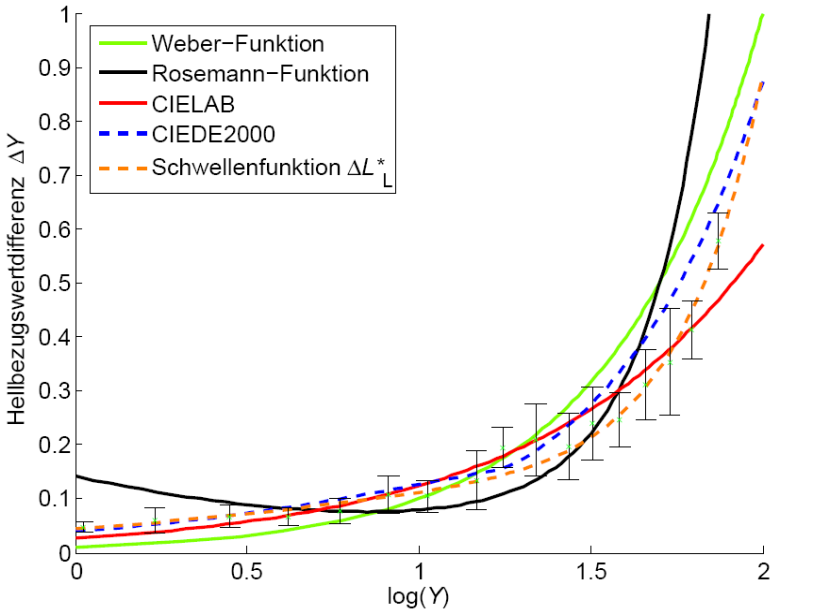

Bild 4.33 Differenz des Hellbezugswertes ΔY als Funktion von Y für Farbschwellen

[45] Ernst Weber untersuchte 1834 die Unterscheidungsschwellen. Aus den Ergebnissen dieses Experimentes entwickelte Weber die Regel, dass die Unterschiedsschwelle proportional zum relativen Reizzuwachs ist.

[46] Alexander Rosemann untersuchte 1997 die Unterscheidungsmöglichkeit bei gleichabständigen aneinandergrenzenden Graumustern auf Photopapier. Aus den Ergebnissen entwickelte er eine neue Funktion zur Beschreibung der Helligkeit. Diese Funktion hat die folgende Struktur:

$$L^*_{\mathrm{Ros}} = f(\log(Y)) = 1 + \frac{a_1}{1 + e^{-a_2 \cdot (\log(Y) - a_3)}} \quad \text{mit } a_1 = 107{,}033;\ a_2 = 3{,}528 \text{ und } a_3 = 1{,}296$$

Die CIELAB- und die CIEDE2000-Formel zeigen im dunklen Bereich ($Y < 4$) der Grauachse eine gute Annäherung an die ermittelten Farbabstände der Farbschwellen. Die Weber-Funktion liefert zu niedrige und die Rosemann-Funktion zu hohe Werte. Im hellen Bereich ($Y > 40$) haben sowohl die Weber-Funktion als auch die Rosemann-Funktion zu hohe Werte. Die Werte der CIELAB- und der CIEDE2000-Formel liegen bei fast allen Farbabständen für die Farbschwellen im statistischen Toleranzbereich. Die Werte der CIEDE2000-Formel haben dabei den geringeren Abstand zu den Farbabständen für die Farbschwellen und liegen näher an der ermittelten Schwellenfunktion.

Für die Beschreibung der Farbschwellen bei der Grauachse im CIELAB-Farbraum eignet sich die CIEDE2000-Formel besser als die CIELAB-Formel. Der nächste Vergleich erfolgt für ΔL^* als Funktion von L^* (Bild 4.34).

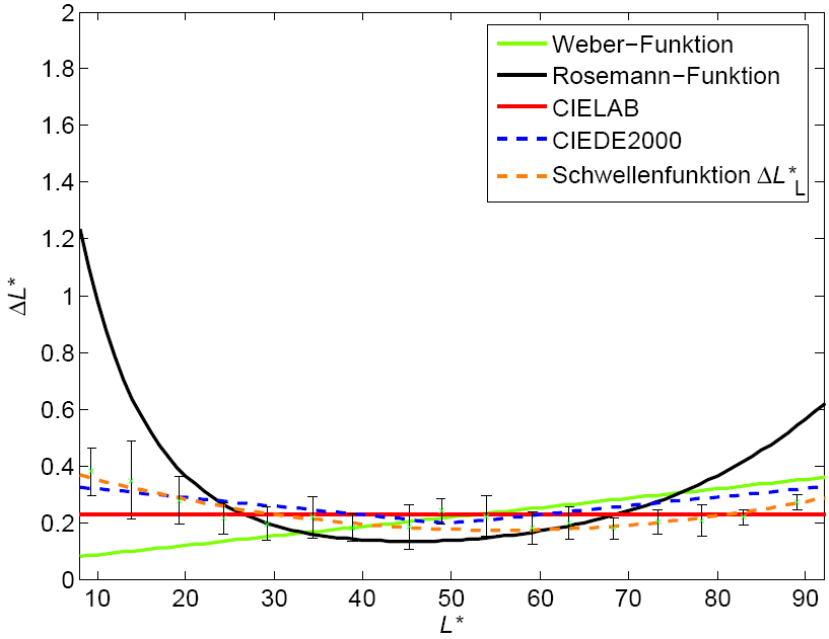

Bild 4.34 Helligkeitsdifferenz ΔL^* als Funktion der Helligkeit L^* für Farbschwellen

Es zeigt sich, wie auch schon beim Vergleich von ΔY als Funktion des Logarithmus von Y, dass die CIELAB- und CIEDE2000-Formeln besser für die Beschreibung der Farbschwellen geeignet sind als die Weber- und die Rosemann-Funktion. Die CIEDE2000-Formel weist eine geringere Differenz zu den ermittelten Farbabständen der Farbschwellen und der berechneten Schwellenfunktion auf. Die Werte der CIELAB-Formel liegen meist im statistischen Toleranzbereich. Die Weber-Funktion liefert im hellen Bereich zu hohe Werte, da die Proportionalität zwischen vorhandenem Reiz und Reizzunahme im Bereich des maximalen Reizes nicht mehr linear ist. Die Steigung der Rosemann-Funktion ist im dunklen und hellen Bereich zu stark. Grund hierfür ist der Aufbau der vorgenommenen Untersuchung. Durch die stufenweise Veränderung der Farbunterschiede können die Farbschwellen nicht exakt ermittelt werden, der Bereich der Farbschwelle kann nur eingegrenzt werden.

Für die Farbschwellen liegen die Rot-Grün-Differenz Δa^* als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* und die Gelb-Blau-Differenz Δb^* als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^* näher an den Werten der CIEDE2000-Farbabstandsformel als an den Werten der CIELAB-Formel. Für die Farbschwellen befindet sich bei der Rot-Grün-Differenz Δa^* als Funktion der Rot-Grün-Buntheit a^* die CIEDE2000-Formel bei 10 von 17 Farbabständen im statistischen

Toleranzbereich. Bei der Gelb-Blau-Differenz Δb^* als Funktion der Gelb-Blau-Buntheit b^* liegt sie nur bei vier Farbabständen im statistischen Toleranzbereich. Für den blauen Bereich liefert die CIEDE2000-Formel zu große und für den gelben Bereich zu kleine Werte.

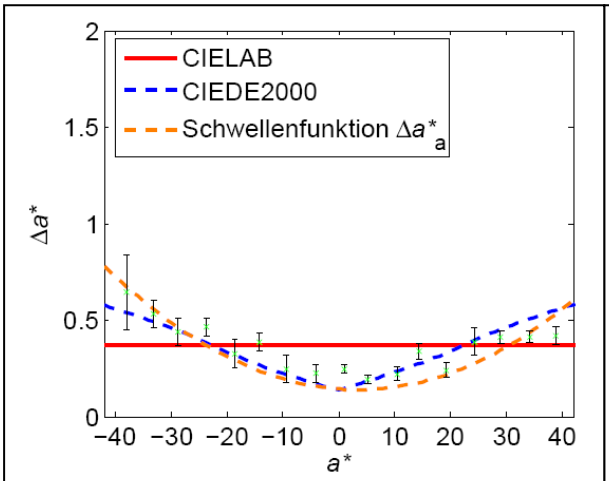

Bild 4.35 Rot-Grün-Differenz Δa^* als Funktion von a^* für Farbschwellen

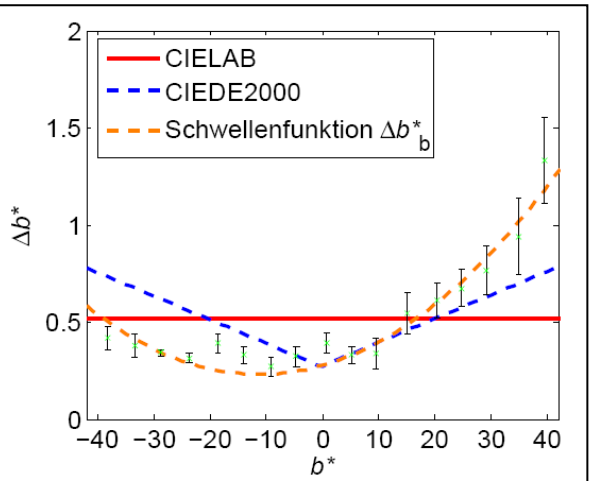

Bild 4.36 Gelb-Blau-Differenz Δb^* als Funktion von b^* für Farbschwellen

Die in Kapitel 4.1.3 aufgezeigte Abhängigkeit von Δa^* und Δb^* als Funktion der Helligkeit L^*, sowie die Abhängigkeit von ΔL^* als Funktion der Buntheit C^*_{ab} sind in beiden Formeln nicht vorhanden.

4.1.5 Werte der CIELAB-Farbabstandsformel für die Farbschwellen

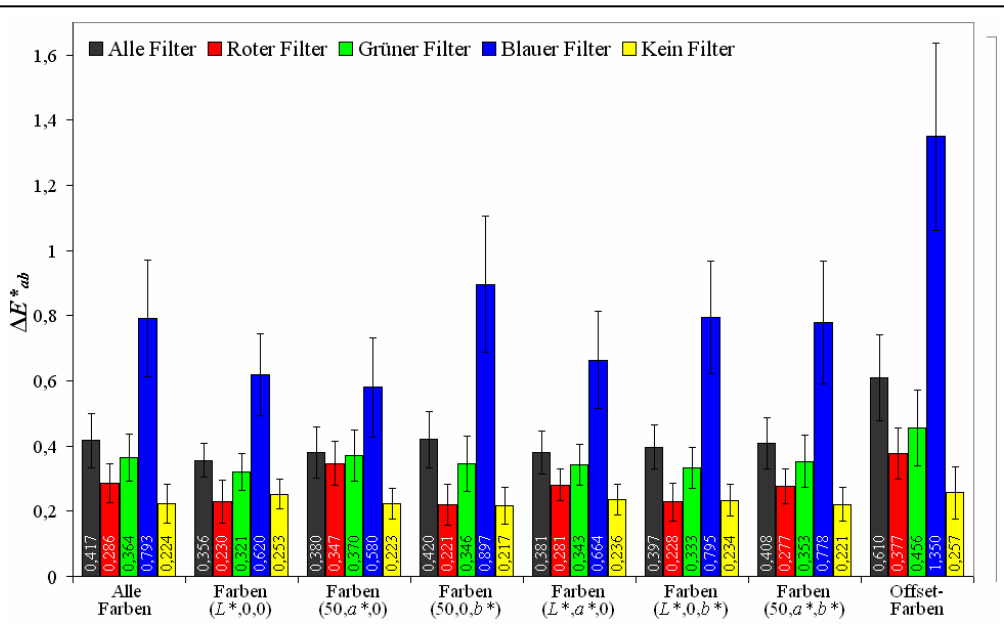

Bild 4.37 Mittelwerte von ΔE^*_{ab} für die Farbschwellen bei den verschiedenen Farbfiltern und verschiedenen Gruppen von Farbmustern

Das Bild 4.37 macht deutlich, dass für die Farbschwellen die Farbabstände ΔE^*_{ab} beim blauen Farbfilter immer höher liegen als bei allen anderen Farbfiltern. Bei den Farbmustern mit einer Farbmaßzahl $b^* \neq 0$ ist der Wert für den blauen Farbfilter ungefähr doppelt so hoch wie der Mittelwert über alle Farbfilter. Die Farbabstände ΔE^*_{ab} haben für die Einstellung ohne

Farbfilter fast immer die geringsten Werte. Nur bei den Farbmustern auf der Grauachse[47] ist der durchschnittliche Farbabstand für den roten Farbfilter ungefähr 10 % geringer. Bei den Farbmustern mit einer Farbmaßzahl $a^* = 0$ sind die Farbabstandswerte beim roten Filter ungefähr gleich den Werten ohne Farbfilter. Die Farbabstände ΔE^*_{ab} beim roten Farbfilter sind bei den Farben auf der Rot-Grün-Achse[48] und bei den Offset-Farben ungefähr 20 % höher als der Mittelwert. Die Farbabstände ΔE^*_{ab} für den grünen Farbfilter schwanken bei allen Farbmustern außer den Offset-Farben um den Wert 0,350. Bei den Offset-Farben liegt er etwa 25 % höher. Alle Farbfiltereinstellungen haben ihren Maximalwert bei den Offset-Farben.

4.1.6 Werte der CIEDE2000-Farbabstandsformel für die Farbschwellen

Die CIEDE2000-Formel ist die aktuellste der von der CIE herausgegebenen Farbabstandsformeln. Sie basiert auf einer großen Anzahl von Farbuntersuchungen und wird heute häufig für den Vergleich von zwei Farben eingesetzt. Auch bei der CIEDE2000-Formel zeigt sich, dass alle vier untersuchten Farbschwellen unterschiedliche Farbabstandswerte haben.

Zur Überprüfung, wie gut die Farbschwellen von einer Farbabstandsformel beschrieben werden, wird der Quotient Θ eingeführt. Der Quotient Θ errechnet sich aus dem Minimalwert und dem Maximalwert der Farbabstände bei einem Farbmuster. Die folgende Formel zeigt die Berechnung:

$$\Theta = \frac{\Delta E^*_{\min}}{\Delta E^*_{\max}} \qquad \text{(Gl. 4.36)}$$

Es ergibt sich für jedes Farbmuster ein anderer Quotient Θ. Im Idealfall sollten für die Farbschwellen alle Farbabstände um ein Farbmuster herum gleich groß sein und sich ein Wert von 1 für den Quotienten Θ ergeben. Je kleiner der Quotient wird, desto weiter sind die Farbabstände vom Idealfall entfernt.

Bei der Farbabstandsformel CIEDE2000 liegt der Minimalwert des Quotienten Θ bei 0,139 für das Farbmuster 68 ($L^* = 26{,}91$; $a^* = 23{,}09$; $b^* = 23{,}09$) und der Maximalwert des Quotienten Θ bei 0,638 für das Farbmuster 98 ($L^* = 48{,}13$; $a^* = 75{,}20$; $b^* = -6{,}80$). Der Mittelwert des Quotienten Θ ist 0,347. Zum Vergleich hat der Quotient Θ bei der gewöhnlichen CIELAB-Formel einen Mittelwert von 0,299 und die Extremwerte liegen bei 0,113 (Farbmuster 1 mit $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$) und 0,524 (Farbmuster 55 mit $L^* = 25{,}72$, $a^* = 31{,}35$ und $b^* = -44{,}36$). Die CIEDE2000-Farbabstandsformel liefert Werte, die näher an Eins liegen als bei der CIELAB-Formel, und ist damit etwas besser zur Beschreibung von Farbschwellen geeignet.

Die Tabelle 4.8 zeigt die Mittel-, die Minimal- und Maximalwerte des Farbabstandes ΔE^*_{00} bei den vier verschiedenen verwendeten Farbfiltereinstellungen. Dabei wird deutlich, dass für die Farbschwellen die Farbabstände beim blauen Filter im Durchschnitt die größten Werte haben und sich ohne Farbfilter die geringsten Farbabstände ergeben. Für die Farbschwellen haben die Farbabstände bei den roten 34 % und den grünen Filtern 75 % größere Werte als ohne Filter. Beim roten Filter ergibt sich der geringste Wert der CIEDE2000-Farbabstandsformel. Bei den

[47] Die Helligkeit L^* der Farbmuster verändert sich, während die Farbmaßzahlen a^* und b^* gleich 0 sind.

[48] Die Farbmaßzahl a^* der Farbmuster verändert sich, während die Helligkeit $L^* = 50$ und die Farbmaßzahl $b^* = 0$ sind.

Extremwerten sind die Farbmuster und ihre gerundeten Farbmaßzahlen in der Form ($L^*|a^*|b^*$) angegeben.

Tabelle 4.8 Mittel-, Minimal- und Maximalwerte des Farbabstandes ΔE^*_{00} für die Farbschwellen bei den Farbfiltern

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,233	0,302	0,523	0,173
Maximalwert	0,828	1,029	1,524	0,375
	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 3 (10|0|0)
Minimalwert	0,103	0,149	0,254	0,109
	Farbmuster 55 (26|31|-44)	Farbmuster 77 (51|-63|37)	Farbmuster 98 (48|75|-7)	Farbmuster 55 (26|31|-44)

Während die Maximalwerte alle beim dunkelsten Farbmuster liegen, ergeben sich die Minimalwerte bei einer der Offset-Farben. Der Grund dafür ist, dass der CIEDE2000-Farbabstand kleiner wird, je größer die Buntheit C^*_{ab} der Farben ist. Beim Vergleich mit den Mittel- und Extremwerten der CIELAB-Farbabstandsformel (Tabelle 4.1) zeigt sich, dass alle Mittel- und Minimalwerte von ΔE^*_{00} kleiner sind als bei ΔE^*_{ab}. Auch die Maximalwerte für den blauen Farbfilter und ohne Farbfilter sind kleiner, für den roten und den grünen Farbfilter aber größer.

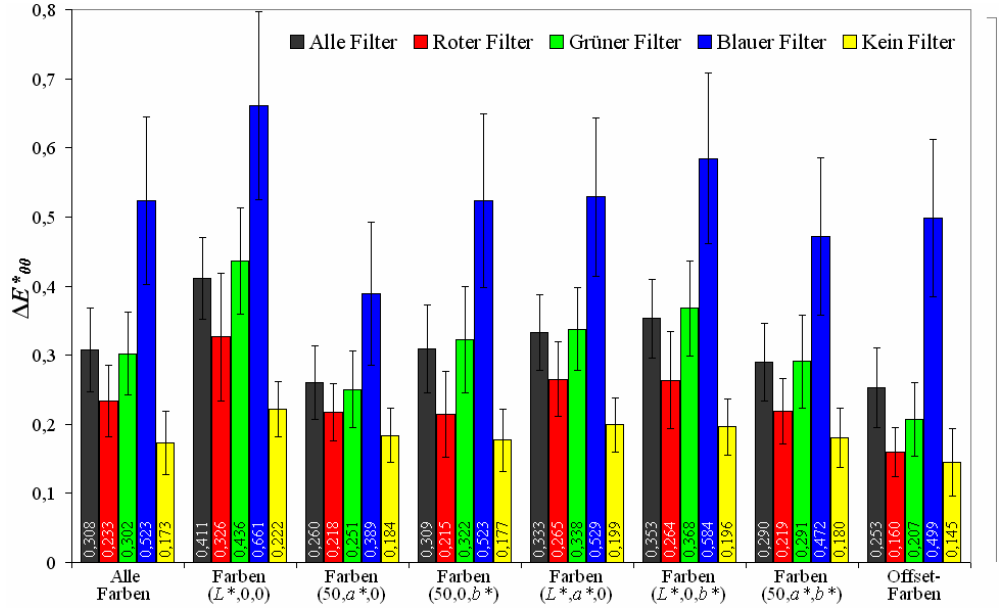

Bild 4.38 Mittelwert der CIEDE2000-Farbabstände ΔE^*_{00} bei den vier Farbfiltern und verschiedenen Gruppen von Farbmustern

Zur genaueren Betrachtung der CIEDE2000-Farbabstände ΔE^*_{00} werden für die Farbschwellen verschiedene Durchschnittswerte der Farbabstände gebildet. Es werden die Durchschnitte für die Farbmustergruppen gebildet. Dabei werden jeweils über alle Farbfilter und jeweils von einem Farbfilter die Durchschnitte einzeln gebildet. Das Bild 4.38 zeigt diese Durchschnittswerte. Der geringste Mittelwert der Farbabstände bei allen Farbfiltern ergibt sich bei den Farben (50,a^*,0) und der größte zeigt sich bei den Farben (L^*,0,0). Für jede der betrachteten Gruppen von Farben ist jeweils der Durchschnitt über die Farbabstände der Farbschwellen beim blauen Farbfilter am größten. Die Mittelwerte der Farbabstände der Farbschwellen, die ohne Filter aufgenommen wurden, sind am kleinsten.

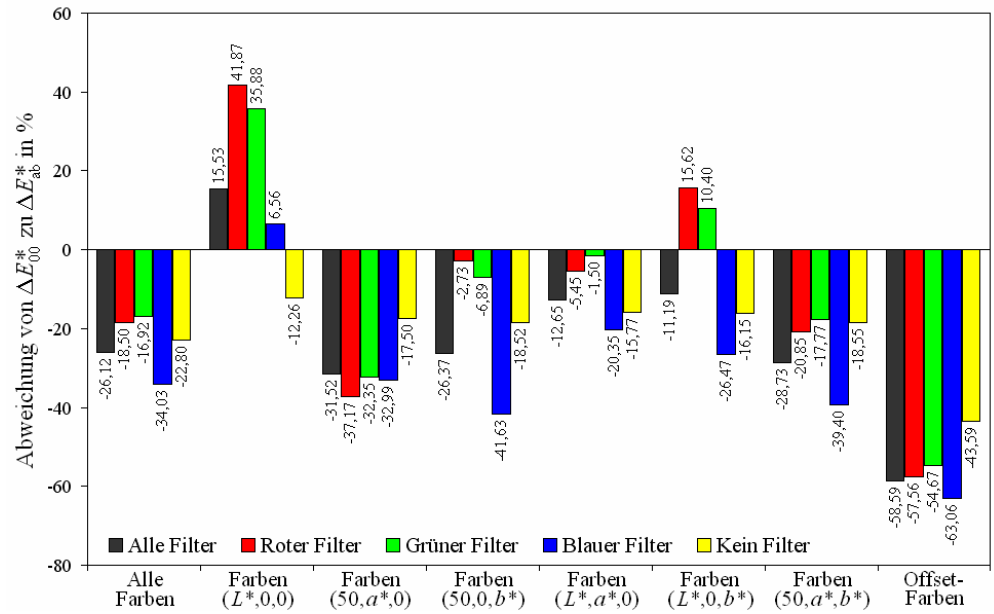

Bild 4.39 Abweichung der Farbabstände ΔE^*_{00} zu den Farbabständen ΔE^*_{ab} in Prozent bei den vier verschiedenen Farbfiltern und den verschiedenen Farbmustern

Das Bild 4.39 zeigt die prozentualen Abweichungen der Mittelwerte der Farbabstände ΔE^*_{00} zu den Mittelwerten der Farbabstände ΔE^*_{ab}. Wenn die Abweichung negativ ist, sind die Mittelwerte der Farbabstandsformel CIEDE2000 kleiner als die der CIELAB-Formel. Bei einer positiven Abweichung sind die Mittelwerte der CIELAB-Formel kleiner. Die prozentualen Abweichungen zwischen der CIELAB- und der CIEDE2000-Farbabstandsformel sind für die verschiedenen Gruppen von Farbmustern und die verschiedenen Farbfilter sehr unterschiedlich. Die Abweichung liegt zwischen dem Maximalwert von 41,87 % beim roten Farbfilter für die Farben (L^*,0,0) und dem Minimalwert -63,06 % beim blauen Filter für die Offset-Farben. Die Abweichungen sind dabei besonders bei den Farbabständen der Farbschwellen für den blauen Filter im hohen negativen Bereich. Bei der CIEDE2000-Farbformel erhält die Helligkeitsdifferenz ΔL^* mehr Gewicht als bei der CIELAB-Farbabstandsformel. Die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} sowie die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} erhalten dagegen etwas weniger. Für die Farbschwellen beim blauen Filter ist die Helligkeitsdifferenzen ΔL^* geringer als die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab}, was zu einer Verringerung des CIEDE2000-Farbabstandes gegenüber dem CIELAB-Farbabstand führt. Die CIEDE2000-Farbabstände sind nur bei den Farben mit $C^*_{ab} = 0$ im Gesamtdurchschnitt größer als die CIELAB-Farbabstände. Der Paramater S_C, der zur Angleichung der Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und der Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verwendet wird, ist bei diesen Farben am geringsten. Daher kommt es zur Vergrößerung des Farbabstandes.

4.1.7 Vergleich und Optimierung ausgewählter Farbabstände

Es werden zwölf verschiedene Farbabstände untersucht und miteinander verglichen. Die ermittelten Farbabstände der Farbschwellen werden in acht Gruppen aufgeteilt:

Gruppe 1: Alle Farbmuster
Gruppe 2: Farbmuster mit (L^*,0,0)
Gruppe 3: Farbmuster mit (50,a^*,0)

Gruppe 4: Farbmuster mit (50,0,b^*)
Gruppe 5: Farbmuster mit (L^*,a^*,0)
Gruppe 6: Farbmuster mit (L^*,0,b^*)
Gruppe 7: Farbmuster mit (50,a^*,b^*)
Gruppe 8: Offset-Farben

Tabelle 4.9 Mittelwerte der verschiedenen Farbabstände für die Farbschwellen bei den acht Farbmustergruppen

	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{HNU}	ΔE^*_{HNU1}	ΔE^*_{HNU2}	ΔE^*_{CMC}	ΔE^*_{94}
Gruppe 1	**0,417** (± 0,084)	**0,394** (± 0,080)	**0,371** (± 0,076)	**0,317** (± 0,066)	**0,356** (± 0,070)	**0,285** (± 0,057)
Gruppe 2	0,356 (± 0,051)	0,343 (± 0,049)	0,322 (± 0,047)	0,280 (± 0,041)	0,489 (± 0,071)	0,343 (± 0,050)
Gruppe 3	0,380 (± 0,078)	0,368 (± 0,076)	0,343 (± 0,071)	0,289 (± 0,060)	0,294 (± 0,060)	0,258 (± 0,053)
Gruppe 4	0,420 (± 0,087)	0,395 (± 0,082)	0,372 (± 0,077)	0,323 (± 0,067)	0,338 (± 0,069)	0,274 (± 0,056)
Gruppe 5	0,381 (± 0,065)	0,364 (± 0,062)	0,342 (± 0,059)	0,293 (± 0,051)	0,383 (± 0,063)	0,297 (± 0,050)
Gruppe 6	0,397 (± 0,067)	0,376 (± 0,063)	0,353 (± 0,060)	0,307 (± 0,053)	0,401 (± 0,064)	0,303 (± 0,049)
Gruppe 7	0,408 (± 0,052)	0,386 (± 0,049)	0,362 (± 0,049)	0,311 (± 0,048)	0,320 (± 0,044)	0,268 (± 0,043)
Gruppe 8	0,610 (± 0,081)	0,523 (± 0,076)	0,520 (± 0,075)	0,424 (± 0,069)	0,300 (± 0,063)	0,256 (± 0,057)
	ΔE^*_{00}	ΔE^*_{99}	ΔE^*_{99o}	ΔE^*_{XYZ}	ΔE^*_{LMS}	ΔE^*_{LMSV}
Gruppe 1	**0,308** (± 0,060)	**0,241** (± 0,048)	**0,360** (± 0,071)	**0,186** (± 0,042)	**0,150** (± 0,033)	**0,176** (± 0,040)
Gruppe 2	0,411 (± 0,059)	0,289 (± 0,041)	0,494 (± 0,071)	0,169 (± 0,032)	0,142 (± 0,026)	0,161 (± 0,031)
Gruppe 3	0,260 (± 0,053)	0,209 (± 0,042)	0,312 (± 0,064)	0,161 (± 0,033)	0,134 (± 0,027)	0,151 (± 0,032)
Gruppe 4	0,309 (± 0,063)	0,244 (± 0,049)	0,346 (± 0,070)	0,187 (± 0,041)	0,148 (± 0,030)	0,181 (± 0,039)
Gruppe 5	0,333 (± 0,054)	0,249 (± 0,040)	0,393 (± 0,064)	0,168 (± 0,031)	0,139 (± 0,025)	0,159 (± 0,030)
Gruppe 6	0,353 (± 0,057)	0,263 (± 0,042)	0,408 (± 0,065)	0,179 (± 0,034)	0,145 (± 0,026)	0,171 (± 0,032)
Gruppe 7	0,290 (± 0,042)	0,230 (± 0,038)	0,332 (± 0,047)	0,175 (± 0,043)	0,141 (± 0,044)	0,167 (± 0,041)
Gruppe 8	0,253 (± 0,048)	0,223 (± 0,056)	0,284 (± 0,059)	0,223 (± 0,068)	0,177 (± 0,066)	0,207 (± 0,063)

Die Tabelle 4.9 zeigt die Mittelwerte für die verschiedenen Farbabstandsformeln über die acht Farbmustergruppen. In den Klammern sind die Standardabweichungen angegeben. Die Mittelwerte der Gruppe 1 sind in der Tabelle 4.9 fett geschrieben, da sie den Gesamtdurchschnitt wiedergeben. Die Minimalwerte sind blau markiert und die Maximalwerte rot. Bei den Farbabstandsformeln CIELAB, LABHNU, LABHNU1 und LABHNU2 liegt der Minimalwert jeweils bei den Farben mit (L^*,0,0) und der Maximalwert bei den Offset-Farben. Der Grund hierfür ist der geringere Einfluss der Helligkeitsdifferenz in diesen Formeln gegenüber dem Einfluss der Buntheits- und Bunttondifferenz. Die komplexen Formeln[49] hingegen haben ihren Maximalwert bei den Farben mit (L^*,0,0), weil bei ihnen die Buntheit C^*_{ab} und der Bunttonwinkel h_{ab} einen Einfluss auf den Farbabstand haben. Die Buntheit C^*_{ab} ist bei der Gruppe 2 gleich Null und daher ebenso der Bunttonwinkel h_{ab}. Der Ansatz, den Farbabstand bei den Farben mit $C^*_{ab} = 0$ zu vergrößern, ist richtig, aber für den Farbschwellenbereich zu stark. Der Mittelwert der Offset-Farben ist mit den komplexen Farbabstandsformeln deutlich geringer geworden als bei CIELAB.

Die Abstände in den Farbräumen CIEXYZ, LMS und LMSV sind geringer als die anderen Farbabstände und die Mittelwerte der Farbmustergruppen schwanken nur um den Faktor 1,4. Die Werte in diesen drei Farbräumen wurden unmittelbar aus den spektralen Reflexionsgraden berechnet. Es wurde keine Anpassung dieser Werte vorgenommen. Durch die Angleichung in den anderen Farbräumen – vor allem im CIELAB-Farbraum – werden die Werte der Farbabstände vergrößert. Die Größe der Farbabstände ist aber von untergeordneter

[49] Die Farbabstandsformeln CMC, CIE94, CIEDE2000, DIN99 und DIN99o werden als „komplexe Farbabstandsformlen“ bezeichnet.

Bedeutung, wichtiger ist eine geringe Schwankung. Die geringe Schwankung in den Farbräumen CIEXYZ, LMS und LMSV ist darauf zurückzuführen, dass über die Farbabstände aller vier Filtereinstellungen gemittelt wurde. Zur Überprüfung der Schwankung der Farbabstände bei den Schwellen wird der Quotient Θ vom geringsten zum größten Wert bei den verschiedenen Filtereinstellungen eingeführt.[50]

Die Tabelle 4.10 zeigt den Quotient Θ von Minimal- zu Maximalwert der durchschnittlichen Farbabstände bei den acht verschiedenen Gruppen. Die Werte sind umso besser, je näher sie an Eins liegen. Die in den Klammern angegeben Werte sich die Standardabweichungen.

Tabelle 4.10 Quotient Θ vom Minimal- zum Maximalwert der Farbabstände

	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{HNU}	ΔE^*_{HNU1}	ΔE^*_{HNU2}	ΔE^*_{CMC}	ΔE^*_{94}
Gruppe 1	**0,298** (± 0,031)	**0,318** (± 0,032)	**0,311** (± 0,031)	**0,265** (± 0,030)	**0,326** (± 0,032)	**0,356** (± 0,036)
Gruppe 2	0,368 (± 0,051)	0,399 (± 0,051)	0,366 (± 0,052)	0,265 (± 0,051)	0,352 (± 0,050)	0,373 (± 0,052)
Gruppe 3	0,385 (± 0,039)	0,404 (± 0,039)	0,405 (± 0,038)	0,370 (± 0,039)	0,396 (± 0,041)	0,417 (± 0,040)
Gruppe 4	0,269 (± 0,039)	0,292 (± 0,039)	0,278 (± 0,040)	0,204 (± 0,038)	0,310 (± 0,040)	0,346 (± 0,047)
Gruppe 5	0,361 (± 0,036)	0,383 (± 0,036)	0,373 (± 0,037)	0,321 (± 0,036)	0,367 (± 0,039)	0,386 (± 0,040)
Gruppe 6	0,304 (± 0,043)	0,328 (± 0,042)	0,309 (± 0,043)	0,227 (± 0,038)	0,325 (± 0,040)	0,357 (± 0,044)
Gruppe 7	0,307 (± 0,035)	0,326 (± 0,035)	0,323 (± 0,033)	0,278 (± 0,028)	0,336 (± 0,035)	0,368 (± 0,036)
Gruppe 8	0,154 (± 0,044)	0,244 (± 0,064)	0,242 (± 0,068)	0,214 (± 0,063)	0,255 (± 0,072)	0,431 (± 0,103)
	ΔE^*_{00}	ΔE^*_{99}	ΔE^*_{99o}	ΔE^*_{XYZ}	ΔE^*_{LMS}	ΔE^*_{LMSV}
Gruppe 1	**0,346** (± 0,033)	**0,445** (± 0,037)	**0,347** (± 0,035)	**0,221** (± 0,022)	**0,260** (± 0,027)	**0,146** (± 0,018)
Gruppe 2	0,357 (± 0,045)	0,485 (± 0,051)	0,385 (± 0,051)	0,220 (± 0,035)	0,191 (± 0,039)	0,121 (± 0,028)
Gruppe 3	0,460 (± 0,040)	0,557 (± 0,045)	0,413 (± 0,041)	0,284 (± 0,040)	0,352 (± 0,035)	0,201 (± 0,028)
Gruppe 4	0,350 (± 0,039)	0,418 (± 0,046)	0,334 (± 0,041)	0,181 (± 0,030)	0,179 (± 0,032)	0,103 (± 0,021)
Gruppe 5	0,392 (± 0,038)	0,508 (± 0,043)	0,386 (± 0,040)	0,251 (± 0,023)	0,286 (± 0,025)	0,164 (± 0,025)
Gruppe 6	0,338 (± 0,039)	0,437 (± 0,041)	0,348 (± 0,041)	0,195 (± 0,028)	0,187 (± 0,028)	0,110 (± 0,021)
Gruppe 7	0,387 (± 0,035)	0,465 (± 0,039)	0,359 (± 0,036)	0,226 (± 0,022)	0,268 (± 0,027)	0,149 (± 0,016)
Gruppe 8	0,348 (± 0,088)	0,398 (± 0,098)	0,411 (± 0,106)	0,408 (± 0,087)	0,314 (± 0,090)	0,265 (± 0,091)

Es zeigt sich, dass die DIN99-Farbabstandsformel mit ΔE^*_{99} das beste Verhältnis (am nächsten an 1) zwischen den Farbabständen bei den vier Farbfiltern ausgibt. Für die Farbschwellen schwanken die Abstände in den Farbräumen CIEXYZ, LMS und LMSV bei den verschiedenen Farbfiltern sehr stark. Diese Farbräume geben die Farbschwellen also nicht so gut wieder. Wie man in der Tabelle 4.10 erkennt, sind alle modifizierten Farbabstandsformeln bis auf die LABHNU2-Farbabstandsformel für die Wiedergabe des Schwellensehens besser geeignet als die CIELAB-Farbabstandsformel.

Eine weitere Möglichkeit, die Farbabstände miteinander zu vergleichen, ist die STRESS-Formel [GHM07]. Dabei werden die berechneten Farbabstände mit den visuellen Beurteilungen verglichen. Der STRESS-Wert S kann zwischen 0 und 100 liegen, wobei 0 beim Idealfall vorliegt. Die Formel und der Faktor F berechnen sich wie folgt:

$$S = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum \left(\Delta E_i - F \cdot \Delta V_i\right)^2}{\sum \Delta E_i^2}} \qquad \text{(Gl. 4.37)}$$

[50] Dieser Wert soll zeigen, wie sehr für die Farbschwellen die Farbabstände bei einem Farbmuster schwanken. Wenn die Farbabstände gleich sind, ist der Wert gleich 1. Je stärker die Farbabstände sich bei den einzelnen Filtern unterscheiden, desto kleiner wird der Wert. Die genaue Definition befindet sich in Kapitel 4.1.6.

$$F = \frac{\sum \Delta E_i \cdot \Delta V_i}{\sum \Delta V_i^2} \qquad \text{(Gl 4.38)}$$

Für ΔE_i werden die Farbabstände für die Farbschwellen eingesetzt, die durch die verschiedenen Farbabstandsformeln berechnet wurden. Für ΔV_i wird immer der Wert 1 eingesetzt, da für die Farbschwelle die visuelle Bewertung immer gleich ist. Der Wert der STRESS-Formel S wird für jedes Farbmuster einzeln berechnet. Die folgende Tabelle zeigt den Mittelwert von STRESS über alle Farbmuster und den Vergleich mit dem Quotienten Θ für jede der Farbabstandsformeln. Dabei sind kleine Werte bei STRESS besser und große Werte beim Quotienten Θ.

Tabelle 4.11 Vergleich STRESS-Wert S mit dem Quotienten Θ

	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{HNU}	ΔE^*_{HNU1}	ΔE^*_{HNU2}	ΔE^*_{CMC}	ΔE^*_{94}
Wert S	45,412	42,400	44,154	50,309	43,064	41,326
Quotient Θ	0,298	0,318	0,311	0,265	0,326	0,356
	ΔE^*_{00}	ΔE^*_{99}	ΔE^*_{99o}	ΔE^*_{XYZ}	ΔE^*_{LMS}	ΔE^*_{LMSV}
Wert S	39,332	32,326	40,633	52,601	40,972	54,147
Quotient Θ	0,346	0,445	0,347	0,221	0,260	0,146

Die STRESS-Formel liefert annähernd das gleiche Ergebnis wie der Quotient Θ. Zum Beispiel hat für die DIN99-Farbabstandsformel der Quotient Θ den höchsten (0,445) und der STRESS-Wert S den kleinsten Wert (32,326).

Es folgt eine Analyse der komplexen Farbabstandsformeln mit der Frage, warum sie die Farbschwellen besser wiedergeben als der CIELAB-Farbabstand. Als Kriterium für die gute Wiedergabe der Farbschwellen wird der Quotient Θ verwendet, weil eine Farbabstandsformel jede Farbschwelle um eine Farbe gleich bewerten soll. Diese Eigenschaft ist vorhanden, wenn der Mittelwert des Quotienten Θ genau gleich 1 ist.

- **CMC**

  Die Parameter S_L, S_C und S_H sind bei dieser Farbabstandsformel nur von der Referenzfarbe abhängig. Der Parameter S_L ist für dunkle Farben konstant bei ungefähr 0,5, nimmt aber ab einem Helligkeitswert L^* von 16 zu, bis auf einen Wert von etwa 1,5 für sehr helle Farben. Das heißt, der Helligkeitsabstand ΔL^* wird bei dunklen Referenzfarben stärker bewertet, danach nimmt der Einfluss auf den Farbabstand aber ab. Der Parameter S_C liegt für $C^*_{ab} \approx 0$ bei 0,7. Der Parameter erhöht sich mit steigender Buntheit C^*_{ab} der Referenzfarbe. Die Steigung des Parameters nimmt mit steigender Buntheit ab. Der Parameter S_H ist etwas komplexer, er hängt sowohl von der Buntheit C^*_{ab} als auch vom Bunttonwinkel h_{ab} ab. Das Maximum von S_H liegt bei $h_{ab} = 145°$ und das Minimum bei $h_{ab} = 55°$. Es gibt ein lokales Minimum bei 282°. Zwischen 140° und 220° ist der Parameter relativ konstant. Ein größerer Wert von C^*_{ab} führt auch zu einem größeren Wert von S_H.

  Durch die Parameter S_C und S_H werden vor allem die Farbabstände bei bunten Referenzfarben verringert. Dabei werden die Farbabstände mit einem geringeren ΔL^* stärker verändert als die mit einem geringeren ΔC^*_{ab} beziehungsweise ΔH^*_{ab}. Für dunkle Farben wird durch S_L der Einfluss von ΔL^* auf den gesamten Farbabstand vergrößert.

Durch die Verwendung der CMC-Formel zeigt sich vor allem eine Verbesserung der Farbschwellenwiedergabe bei farbigen Referenzproben. Hingegen kommt es bei den Referenzfarben nahe der Grauachse zu einer Verschlechterung gegenüber der CIELAB-Formel. Diese Verschlechterung ist darauf zurückzuführen, dass bei hellen Referenzfarben die Helligkeitsunterschiede ΔL^* verringert werden. Da ΔL^* sowieso schon kleiner ist als die Differenz ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} und diese nicht verändert werden, ist die Verschlechterung leicht zu erklären. Bei dunklen Farben wird hingegen der Anteil von ΔL^* an ΔE^*_{CMC} vergrößert, wodurch der Quotient Θ verbessert wird. Bei den bunten Referenzfarben verbessert sich der Quotient Θ zum größten Teil, da die Parameter S_C und S_H die Differenz ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} verkleinern. Bei den bunten Referenzfarben mit einem h_{ab} von ungefähr 45° stellt sich hingegen eine Verschlechterung des Quotienten Θ ein. Diese Verschlechterung wird dadurch erzeugt, dass sich bei diesen Referenzfarben ein Minimum von S_H befindet, wodurch die Gleichmäßigkeit der Farbabstände um diese Referenzfarben negativ beeinflusst wird.

In der Farbabstandsformel CMC sind die Parameter l und c dafür vorgesehen, die Formel den Beobachtungsgegebenheiten anzupassen. Es wird deutlich, dass sich der mittlere Quotient Θ auf 0,462 verbessern lässt, wenn für l = 0,418 und c = 2,417 gewählt wird. Für den Farbschwellenbereich ist der Parameter S_L somit zu groß und S_C ist zu klein. Durch die beiden Parameter l und c lässt sich eine Verbesserung von 41,7 % der Farbschwellenwiedergabe der Formel erreichen.

- **CIE94**

Auch bei dieser Farbabstandsformel hängen die Parameter S_C und S_H nur von der Referenzfarbe ab. Der Parameter S_L ist hingegen konstant gleich 1, daher wird ΔL^* nicht verändert. Die Parameter S_C und S_H sind nur abhängig von C^*_{ab}. Die Werte liegen dabei auf einer Geraden, für S_C mit einer Steigung von 0,45 und für S_H mit einer Steigung von 0,15.

Durch die Eigenschaften der Parameter wird der Farbabstand für bunte Referenzfarben kleiner, außer wenn sich nur die Helligkeit L^* verändert. Durch diese Eigenschaft wird der Quotient Θ für die meisten Referenzfarben besser, da ΔL^* einen geringeren Einfluss auf ΔE^*_{94} bekommt. Durch diese einfache Veränderung der Farbabstandsformel zeigt sich ein besserer Effekt als bei den meisten anderen Formeln.

In der Farbabstandsformel CIE94 gibt es drei Parameter, um die Formel der Beobachtungssituation anzupassen: K_L, K_C und K_H. K_L wird als konstant 1 festlegt und nur die beiden anderen Parameter werden optimiert. Es ergibt sich ein Maximum von 0,446 für den Quotienten Θ bei den Parametern K_C = 4,432 und K_H = 2,025. Es zeigt sich somit, dass S_C und S_H im Verhältnis zu S_L zu klein sind, S_C muss sogar sehr viel vergrößert werden. Die Verbesserung von Θ ist mit 25,3 % deutlich, aber geringer als bei der CMC-Formel (41,7 %).

- **CIEDE2000**

Bei dieser Farbabstandsformel werden zuerst die Werte von a^* über die Buntheit C^*_{ab} in die a'-Werte vergrößert. Dabei wird a^* stärker verändert wenn C^*_{ab} klein ist. Ab einem C^*_{ab} von ungefähr 30 ist die Veränderung zu vernachlässigen. Im Gegensatz zu den Formeln nach CMC und CIE94 werden die Parameter durch den Mittelwert der Werte von beiden betrachteten Farben beeinflusst. Der Parameter S_L hat eine V-Form über die

Helligkeit L^*. Der Wert geht von 1 bei $L^* = 50$ auf 1,75 bei $L^* = 0$ beziehungsweise $L^* = 100$. Der Parameter S_C berechnet sich wie bei CIE94. Auch der Parameter S_H wird sehr ähnlich berechnet wie bei der CIE94-Formel. Es wird nur ein weiterer Faktor T zur Steigung der Geraden hinzugerechnet. Der Faktor T ist eine Summe aus verschiedenen Kosinusfunktionen. Es ergibt sich ein Minimum bei $h' = 62°$ und ein Maximum bei 5°. Es gibt noch zwei lokale Minima bei 158° und 308° sowie zwei lokale Maxima bei 118° und 207°. Die CIEDE2000 enthält noch einen Term zur Ellipsenrotation, der durch den Parameter R_T beschrieben wird. Dieser Parameter ist nur im blauen Bereich (h' um 270°) ungleich Null und negativ. Er ist ebenfalls von C' abhängig und wird geringer, wenn C' größer wird (ab $C' = 40$ zu vernachlässigen).

Durch die V-Form von S_L hat ΔL^* in den hellen und dunklen Bereichen einen geringeren Einfluss auf den gesamten Farbabstand ΔE^*_{00}. Der Einfluss von Δa^* wird in der Nähe der Grauachse erhöht. Der Anteil von ΔC^*_{ab} wird durch S_C genau wie bei CIE94 für buntere Farben reduziert. Ebenso hat ΔH^*_{ab} bei bunteren Farben einen geringeren Einfluss, ist aber auch abhängig von h_{ab}. Die Berechnung des Parameters S_H bei CIEDE2000 ist eine Kombination aus den Berechnungen bei CMC und CIE94. Die Ellipsenrotation beeinflusst die Farbformel nur bis zu einem C^*_{ab} von ungefähr 40. Der Parameter R_T ist immer negativ und nur in einem engen Bereich um h_{ab} von 270° relevant.

Auch bei dieser Formel wird der Farbabstand vor allem durch die Buntheit C^*_{ab} beeinflusst. Die Verbesserung der Farbschwellenwiedergabe tritt in den bunten Bereichen von CIELAB auf. Durch die Verringerung von ΔL^* im dunklen und hellen Bereich ohne Veränderung von ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} ist die CIEDE2000-Formel in Teilen der Grauachse aber auch schlechter als die CIELAB-Formel. Genauso wie die CMC-Formel ist die CIEDE2000-Formel bei Farben mit Werten von a^* und b^*, die beinahe identisch sind, schlechter als die CIELAB-Formel. Gerade in diesem Bereich hat der Parameter S_H ein Minimum.

Auch in der Farbabstandsformel CIEDE2000 gibt es drei Parameter, um die Formel der Beobachtungssituation anzupassen: K_L, K_C und K_H. Wieder wird K_L als konstant 1 festgelegt und nur die beiden anderen Parameter werden optimiert. Dadurch lässt sich eine sehr gute Optimierung des Quotienten Θ erreichen. Er verbessert sich durch die Parameter $K_C = 2{,}593$ und $K_H = 3{,}179$ von 0,346 auf 0,494. Auch in dieser Formel sind die Parameter S_C und S_H im Vergleich zu S_L zu gering und müssen erhöht werden.

- **DIN99**

Im Unterschied zu den anderen Farbabstandsformeln verändert die DIN99-Formel den gesamten Farbraum und behält den Vektorabstand bei. Die Helligkeit L^* wird im dunklen Bereich gestaucht und im hellen Bereich gestreckt. Die a^*/b^*-Ebene wird um 16° gedreht und dann werden die b_{99}-Werte um den Faktor 0,7 gestaucht. Diese Werte werden noch einmal über die Buntheit C_{99} gestaucht. Dabei werden die Farbwerte nahe der Grauachse sehr gering verändert, während die mit großer Buntheit C_{99} stärker gestaucht werden.

Bei der Helligkeitsachse bleiben die Endpunkte gleich, nur der Zwischenbereich wird zum Teil gestreckt oder gestaucht. Die Achse wird dabei so verändert, dass der Helligkeitswert $L_{99} = 50$ jetzt bei $L^* = 40$ liegt. Durch diese Veränderung werden die Helligkeitsunterschiede im dunklen Farbbereich gestreckt und im hellen Farbbereich gestaucht. Die Drehung der a^*/b^*-Ebene ist notwendig, damit nicht nur die b^*-Werte

verändert werden, sondern a^* und b^* in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Bei Farben mit einer größeren Buntheit C^*_{ab} werden die Farbabstände kleiner bewertet als bei Farben in Nähe der Grauachse.

Durch diese Veränderungen des Farbraums und unter Verwendung des Vektorabstandes zeigt die DIN99-Formel über den gesamten Farbraum eine Verbesserung der Farbschwelleneigenschaften gegenüber der CIELAB-Formel.

Bei dieser Farbabstandsformel wurden die beiden Parameter k_E und k_{CH} zur besseren Anpassung an die Beobachtungsumgebung eingeführt. Der Quotient Θ lässt sich mit den Parametern $k_E = 1{,}756$ und $k_{CH} = 1{,}950$ um 19,1 % auf den Wert 0,530 verbessern. Durch k_E wird die Helligkeit insgesamt reduziert und durch k_{CH} im Produkt mit k_E die Buntheit. Ein k_E über 1 führt genauso zu einer Verkleinerung der Helligkeitsdifferenzen wie ein Produkt von k_E und k_{CH} über 1 zu einer Verkleinerung der Buntheitsdifferenzen. Durch die Kombination dieser beiden Eigenschaften wird der Quotient Θ verbessert.

- **DIN99o**

Bei dieser Formel handelt es sich um eine Modifizierung der DIN99-Formel. Es wurden einige Parameter verändert unter der Verwendung der Untersuchungen, die für die Entwicklung der CIEDE2000-Formel herangezogen wurden. Die Helligkeit L^* wird bei dieser Formel sehr viel weniger verändert als bei der DIN99-Formel. Der Helligkeitswert $L_{99} = 50$ liegt jetzt ungefähr bei $L^* = 47$, eine nur geringe Veränderung. Hingegen liegt die Drehung der a^*/b^*-Ebene jetzt bei 26°, aber die Stauchung von b_{99} nur bei 0,83 anstatt 0,7. Die größte Modifikation im Vergleich zur DIN99-Formel ist aber die Veränderung des Farbabstandes über C_{99}. Der Einfluss der Buntheit C_{99} auf den Farbabstand wird im Bereich um die Grauachse erhöht und erst ab einem C^*_{ab}-Wert von ungefähr 23 verringert.

Durch diese Veränderungen der Parameter verhält sich die DIN99o-Formel ähnlich wie die CIEDE2000-Formel. Das ist zu erwarten, da sie beide auf denselben Untersuchungen basieren. Die Verschlechterung gerade im Bereich der Grauachse liegt vor allem an den Veränderungen durch die Buntheit C_{99}. Der Einfluss der Buntheit auf die Farbabstände wird in diesem Bereich erhöht.

In dieser Farbabstandsformel existieren auch die beiden Parameter k_E und k_{CH} zur besseren Anpassung an die Beobachtungsumgebung. Der Quotient Θ lässt sich mit den Parametern $k_E = 0{,}776$ und $k_{CH} = 3{,}439$ um 39,5 % auf den Wert 0,484 verbessern. Durch k_E wird die Helligkeit insgesamt vergrößert und durch k_{CH} im Produkt mit k_E die Buntheit verkleinert. Ein k_E unter 1 führt genauso zu einer Vergrößerung der Helligkeitsdifferenzen wie ein Produkt von k_E und k_{CH} über 1 zu einer Verkleinerung der Buntheitsdifferenzen. Durch die Kombination dieser beiden Eigenschaften wird der Quotient Θ verbessert.

Neben den bekannten Farbabstandsformeln und Farbräumen wurden in Kapitel 4.1.2 auch noch eine Modifikation des CIELAB-Farbraumes für den Farbschwellenbereich ΔE^*_{NToC} und eine neue Farbabstandsformel ΔE^*_{Sn}[51] entwickelt. Es zeigt sich, dass beide Neuentwicklungen den Schwellenbereich besser wiedergeben als die bisherigen Formeln.

[51] Der Index „Sn“ steht für „Schwelle neu“.

- **NToC-Farbraumes**

Der optimierte Farbraum NToC, der in Kapitel 4.1.2 ermittelt wurde, hat einen durchschnittlichen Quotienten Θ von 0,601. Dieser Wert ist besser als jeder andere Wert der komplexen Farbabstandsformeln. Bei der Optimierung des CIELAB-Farbraumes wird jedoch nur die Berechnung der Farbmaßzahlen a^* und b^* modifiziert. Dabei wird a^* mit 0,515 multipliziert und b^* mit 0,153.

- **Neue Schwellen-Farbabstandsformel**

Aus den Ausgleichsfunktionen in Kapitel 4.1.3 wird eine neue Schwellen-Farbabstandsformel ΔE^*_{Sn} entwickelt. Diese Farbabstandsformel hat folgende Form:

$$\Delta E^*_{Sn} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a^*}{\alpha \cdot S_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b^*}{\beta \cdot S_b}\right)^2} \qquad \text{(Gl. 4.39)}$$

Die Parameter S_L, S_a und S_b werden unter Verwendung der Ausgleichsfunktion aus Kapitel 4.1.3 wie folgt berechnet:

$$S_L = \sqrt[3]{F_{LL}(L^*) \cdot F_{La}(a^*) \cdot F_{Lb}(b^*)} \qquad \text{(Gl. 4.40)}$$

$$S_a = \sqrt[3]{F_{aL}(L^*) \cdot F_{aa}(a^*) \cdot F_{ab}(b^*)} \qquad \text{(Gl. 4.41)}$$

$$S_b = \sqrt[3]{F_{bL}(L^*) \cdot F_{ba}(a^*) \cdot F_{bb}(b^*)} \qquad \text{(Gl. 4.42)}$$

Die Funktionen F_{LL}, F_{La}, F_{Lb}, F_{aL}, F_{aa}, F_{ab}, F_{bL}, F_{ba} und F_{bb} sind in den folgenden Gleichungen angegeben:

$$F_{LL}(L^*) = 0{,}176 - 0{,}000966 \cdot (L^* - 50) + 0{,}000086 \cdot (L^* - 50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.43)}$$

$$F_{La}(a^*) = 0{,}176 + 0{,}001251 \cdot a^* + 0{,}000054 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.44)}$$

$$F_{Lb}(b^*) = 0{,}176 + 0{,}001358 \cdot b^* + 0{,}000055 \cdot b^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.45)}$$

$$F_{aL}(L^*) = 0{,}142 - 0{,}000972 \cdot (L^* - 50) + 0{,}000160 \cdot (L^* - 50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.46)}$$

$$F_{aa}(a^*) = 0{,}142 - 0{,}002135 \cdot a^* + 0{,}000311 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.47)}$$

$$F_{ab}(b^*) = 0{,}142 + 0{,}000380 \cdot b^* + 0{,}000134 \cdot b^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.48)}$$

$$F_{bL}(L^*) = 0{,}275 - 0{,}001984 \cdot (L^* - 50) + 0{,}000283 \cdot (L^* - 50)^2 \qquad \text{(Gl. 4.49)}$$

$$F_{ba}(a^*) = 0{,}275 + 0{,}000356 \cdot a^* + 0{,}000351 \cdot a^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.50)}$$

$$F_{bb}(b^*) = 0{,}275 + 0{,}008258 \cdot b^* + 0{,}000370 \cdot b^{*2} \qquad \text{(Gl. 4.51)}$$

Die Parameter α und β ergeben sich durch Optimierung der Farbabstandsformel ΔE^*_{Sn}. α ist somit gleich 0,067 und β ist gleich 0,850. Für den mittleren Quotient Θ ergibt sich derWert 0,561. Dieser Wert ist besser als alle Werte der komplexen Farbabstandsformeln, aber schlechter als der Wert des NToC-Farbraumes.

Es zeigt sich, dass im Schwellenbereich die Helligkeit L^* einen sehr viel stärkeren Einfluss hat als bei überschwelligen Farbabständen. Die Farbmaßzahl b^* hat den geringsten Einfluss auf die Schwellenerkennbarkeit. Die einfache Modifikation des CIELAB-Farbraumes, bei der nur die Farbmaßzahlen a^* und b^* verringert werden, führt zu den besten Resultaten aller

Farbabstandsformeln. Im diesem Farbraum wird vor allem die Farbmaßzahl b^* sehr stark reduziert.

Keine der komplexen Formeln hat eine Abhängigkeit der Farbmaßzahldifferenzen Δa^* und Δb^* von der Helligkeit L^* und keine Abhängigkeit der Helligkeitsdifferenz ΔL^* von den Farbmaßzahlen a^* und b^*. Diese Abhängigkeiten wurden aber im Farbschwellenbereich nachgewiesen und sollte daher berücksichtigt werden. Die neue Schwellen-Farbabstandsformel ΔE^*_{Sn} hingegen hat diese Abhängigkeiten und kann dadurch eine bessere Anpassung an die Farbschwellen erreichen.

Die Farbabstandsformeln CMC, CIE94 und CIEDE2000 verwenden die Farbabstandsformel ΔE^*_{ab} mit ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} als Grundlage. Die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verhalten sich dabei etwas anders zueinander als die Farbmaßzahldifferenzen Δa^* und Δb^*. Die gemeinsame Eigenschaft mit Δa^* und Δb^* ist, dass ΔC^*_{ab} sein Maximum hat wenn ΔH^*_{ab} gleich Null ist und umgekehrt. Während sich Δa^* und Δb^* in jedem Bereich des Farbraumes gleich zueinander verhalten, ist das Verhalten von ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} zueinander abhängig vom Farbbereich, in dem der Farbabstand liegt. Durch die Verwendung von ΔC^*_{ab} und ΔH^*_{ab} für die komplexen Farbabstandsformeln erhält man somit Ellipsen in der a^*/b^*-Ebene, deren Ausrichtung abhängig ist vom Farbbereich. In den Farbabstandsformeln DIN99 und DIN99o wird dieses Verhalten durch die Drehung der a^*/b^*-Ebene erzeugt. Dieser Ansatz entspricht dem Verhalten der Farbschwellen im CIELAB-Farbraum. Das Verhalten der Farbschwellen ist aber etwas komplexer. Während die von den Farbabstandsformeln erzeugten Ellipsen bei einem bestimmten Bunttonwinkel h_{ab} immer gleich ausgerichtet sind, verändert sich die Ausrichtung der Schwellenellipsen in der a^*/b^*-Ebene bei einem Bunttonwinkel h_{ab}. Darüber hinaus ist die Ausrichtung der Ellipsen auch noch von der Helligkeit L^* abhängig.

4.1.8 Untersuchung der LABJNDS-Farbabstandsformel

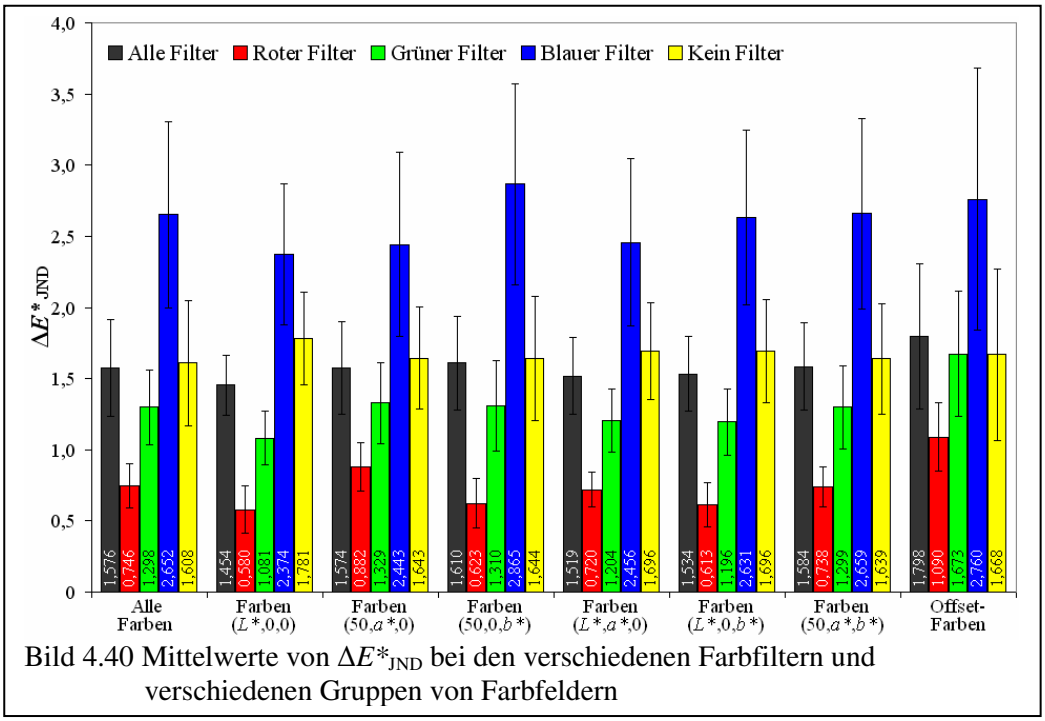

Bild 4.40 Mittelwerte von ΔE^*_{JND} bei den verschiedenen Farbfiltern und verschiedenen Gruppen von Farbfeldern

Für die Farbschwellen wurden die Normfarbwerte X, Y und Z aufgenommen, aus denen die Werte der LABJNDS-Farbabstandsformel berechnet werden. Diese Farbabstandsformel wurde aus den Experimenten von Klaus Richter aus dem Jahr 1985 [Ric85] entwickelt.

Das Bild 4.40 zeigt die mittleren Farbabstände ΔE^*_{JND} bei verschiedenen Gruppen von Farbmustern. Durch Anwendung der LABJNDS-Farbabstandsformel ergeben sich größere Werte für die Farbabstände als bei den anderen Farbabstandsformeln. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass der rote Farbfilter bei allen Gruppen den geringsten Durchschnittswert hat und der blaue Farbfilter zu den größten Werten führt. Die Farbabstandswerte ohne Farbfilter ergeben die zweithöchsten Werte. Das ist ein deutlicher Unterschied zu allen anderen Formeln, bei denen diese Farbabstandswerte im Durchschnitt immer den geringsten Wert hatten.

Bei der LABJNDS-Formel werden die Werte durch den Parameter Y_0 verändert. Dieser Parameter ist eine Konstante. Die Parameter a_0 und b_0 verändern das Verhältnis, in dem die Farbmaßzahlen a^* und b^* in den Farbabstandswert eingehen. Betrachtet man die Mittelwerte, so scheinen die Δa^*-Veränderungen zu gering und die Δb^*-Veränderungen zu stark bewertet zu werden.

Werden die Parameter a_0 und b_0 so verändert, dass sich im Durchschnitt über alle Farbmuster der geringste Unterschied zwischen den verschiedenen Farbfiltern ergibt, und wird $Y_0 = 1$ gesetzt, erhält man die Parameter $a_0 = 2{,}519$ und $b_0 = 0{,}609$. Es ergibt sich die modifizierte LABJNDS-Formel mit Farbabständen ΔE^*_{JNDm}.

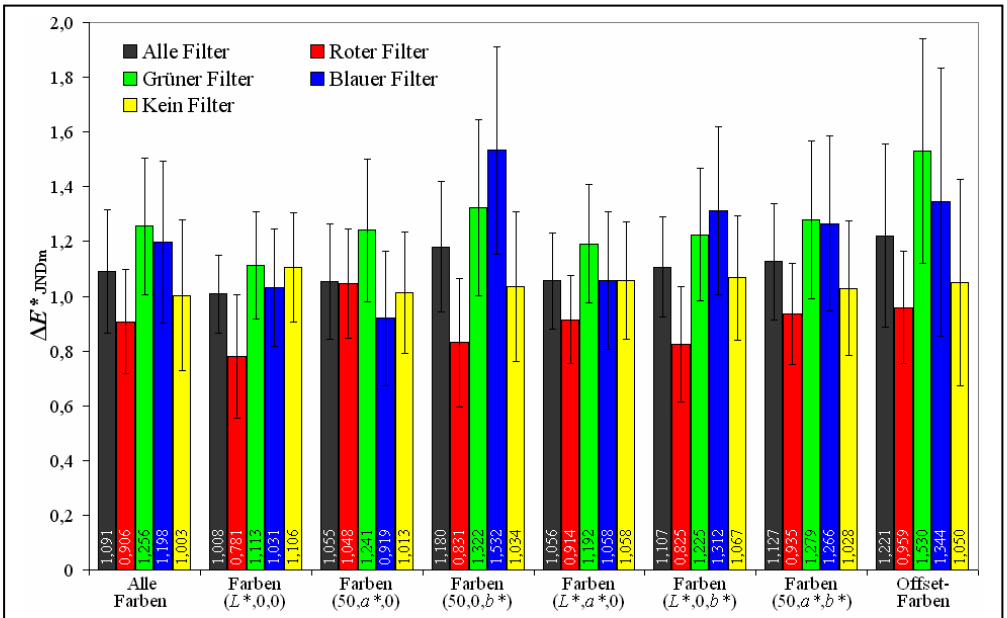

Bild 4.41 Mittelwerte von ΔE^*_{JNDm} bei den verschiedenen Farbfilter und verschiedenen Gruppen von Farbfeldern

Das Bild 4.41 zeigt die Mittelwerte von ΔE^*_{JNDm} bei den verschiedenen Farbmustergruppen. Es ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der verschiedenen Filtereinstellungen im Durchschnitt über alle Felder näher zusammen liegen. Während die LABJNDS-Farbabstandsformel ΔE^*_{JND} einen Quotient Θ von 0,294 hat (STRESS-Wert $S = 40{,}378$), beträgt der Quotient Θ bei der modifizierten LABJDNS-Formel ΔE^*_{JNDm} 0,627 (STRESS-Wert $S = 18{,}763$). Die Formel ΔE^*_{JNDm} liefert somit die beste Beschreibung der Farbschwellen der untersuchten Formeln.

4.1.9 Vergleich des CIEXYZ-Farbraumes mit den Farbräumen LMS und LMSV

Die CIE hat 2006 im technischen Report CIE 170-1:2006 [CIE06a] die drei Sehzapfen-Grundfunktionen $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$ und $\bar{s}(\lambda)$ veröffentlicht. Aus diesen Grundfunktionen wird ein Farbraum gebildet, der in seiner Berechnung dem CIEXYZ-Farbraum sehr ähnlich ist. Es werden nur die Normspektralwertfunktionen durch die Sehzapfen-Grundfunktionen ersetzt. In seinem Buch „Light – Vision – Color“ [Val05] gibt Arne Valberg noch modifizierte Sehzapfen-Grundfunktionen an. Auch mit diesen wird ein Farbraum gebildet. Die vorstehend genannten Farbräume sollen nun mit dem CIEXYZ-Farbraum verglichen werden. Die Modifikationen der Sehzapfen-Grundfunktionen durch Valberg sieht wie folgt aus:

$$\bar{l}_{\mathrm{V}}(\lambda) = 0{,}862 \cdot \bar{l}(\lambda) \qquad \text{(Gl. 4.52)}$$

$$\bar{s}_{\mathrm{V}}(\lambda) = 1{,}054 \cdot \bar{s}(\lambda) \qquad \text{(Gl. 4.53)}$$

$$\bar{m}_{\mathrm{V}}(\lambda) = 1{,}711 \cdot \bar{m}(\lambda) \qquad \text{(Gl. 4.54)}$$

Als erstes werden die Größenunterschiede der Farbschwellen bei den vier Farbfiltern betrachtet. Die Mittel- und Extremwerte der Farbabstände in den Farbräumen LMS und LMSV werden miteinander verglichen, diese Werte stehen in den Tabellen 4.12 und 4.13.

Tabelle 4.12 Durchschnittlicher Farbabstand ΔE_{LMS} sowie die Extremwerte

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,058	0,122	0,225	0,195
Maximalwert	0,153	0,318	0,749	0,673
	Farbmuster 84 (90|-11|96)	Farbmuster 2 (90|0|0)	Farbmuster 7 (50|0|-40)	Farbmuster 2 (90|0|0)
Minimalwert	0,011	0,033	0,057	0,054
	Farbmuster 21 (15|0|0)	Farbmuster 56 (18|0|0)	Farbmuster 58 (22|0|28)	Farbmuster 56 (18|0|0)

Tabelle 4.13 Durchschnittlicher Farbabstand ΔE_{LMSV} sowie die Extremwerte

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,048	0,114	0,364	0,180
Maximalwert	0,126	0,296	1,209	0,614
	Farbmuster 84 (90|-11|96)	Farbmuster 2 (90|0|0)	Farbmuster 7 (50|0|-40)	Farbmuster 2 (90|0|0)
Minimalwert	0,009	0,031	0,091	0,050
	Farbmuster 21 (15|0|0)	Farbmuster 56 (18|0|0)	Farbmuster 58 (22|0|28)	Farbmuster 56 (18|0|0)

Bei Betrachtung der beiden Tabellen 4.12 und 4.13 fällt auf, dass für die Farbschwellen die Farbabstände beim roten Filter in beiden Farbräumen den geringsten Mittelwert haben. Die LMSV-Werte sind 21 % kleiner als die LMS-Werte. Der Grund dafür ist die etwas reduzierte $\bar{l}_{\mathrm{V}}(\lambda)$-Funktion gegenüber der $\bar{l}(\lambda)$-Funktion. Für die Farbschwellen zeigen die Farbabstände bei der Einstellung ohne Filter keinen großen Unterschied zwischen den LMS- und LMSV-Werten. Der größte Unterschied zwischen den LMS- und LMSV-Werten besteht

beim blauen Filter. Hier liegen die LMSV-Werte 62 % über den LMS-Werten. Diese Vergrößerung ist durch die starke Erhöhung der $\bar{s}_V(\lambda)$-Funktion zu erklären. Die durchschnittlichen Farbabstände für die Farbschwellen aus dem CIEXYZ-Farbraum – beim roten Filter 0,093, beim grünen 0,080, beim blauen 0,378 und ohne Filter 0,191 – werden mit den Mittelwerten aus den Farbräumen LMS und LMSV verglichen. Es zeigt sich, dass sich die Werte beim roten Filter um den Faktor 1,7 und beim grünen Filtern um den Faktor 1,5 unterscheiden, während die Werte ohne Filter kaum Unterschiede im Mittelwert zeigen. Beim blauen Filter ist der mittlere Farbabstand im LMSV-Farbraum nur 4 % vom Mittelwert im CIEXYZ-Farbraum entfernt. Der mittlere Farbabstand im LMS-Farbraum ist dagegen 40 % entfernt. Zur genaueren Betrachtung dieser Eigenschaften wird der Quotient Ω aus dem LMS- beziehungsweise dem LMSV-Farbabstand zum CIEXYZ-Farbabstand herangezogen. Die Tabelle 4.14 zeigt die Mittel- und Extremwerte der berechneten Quotienten Ω für den Farbraum LMS. Die Tabelle 4.15 zeigt die Mittel- und Extremwerte der Quotienten Ω für den Farbraum LMSV.

Tabelle 4.14 Mittel- und Extremwerte des Quotienten Ω mit ΔE_{LMS} zu ΔE_{XYZ}

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,625	1,525	0,599	1,022
Maximalwert	0,844	1,539	0,614	1,339
	Farbmuster 62 (59|-31|-43)	Farbmuster 94 (22|0|-28)	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 77 (51|-63|37)
Minimalwert	0,594	1,499	0,590	0,709
	Farbmuster 98 (48|75|-7)	Farbmuster 84 (90|-11|96)	Farbmuster 82 (73|-23|-23)	Farbmuster 98 (48|75|-7)

Tabelle 4.15 Mittel- und Extremwerte des Quotienten Ω mit ΔE_{LMSV} zu ΔE_{XYZ}

	Roter Farbfilter	Grüner Farbfilter	Blauer Farbfilter	Ohne Filter
Mittelwert	0,515	1,423	0,966	0,945
Maximalwert	0,724	1,440	0,991	1,229
	Farbmuster 62 (59|-31|-43)	Farbmuster 94 (22|0|-28)	Farbmuster 3 (10|0|0)	Farbmuster 77 (51|-63|37)
Minimalwert	0,487	1,393	0,952	0,616
	Farbmuster 98 (48|75|-7)	Farbmuster 84 (90|-11|96)	Farbmuster 82 (73|-23|-23)	Farbmuster 98 (48|75|-7)

Die Werte beim grünen Filter sind in den neuen Farbräumen größer, beim roten kleiner als im CIEXYZ-Farbraum. Bei den Werten, die ohne Farbfilter aufgenommen wurden, kommt ein Durchschnittsquotient um 1 zustande. Während sich beim blauen Filter für den LMSV-Farbraum ein Quotient von ungefähr 1 ergibt, ist der Quotient Ω beim LMS-Farbraum sehr viel kleiner. Es ist aber vor allem auffallend, dass die Quotienten Ω beim roten (Faktor 1,5) und ohne Filter (Faktor 2,0) zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert stark schwanken, während sie sich beim grünen und blauen Filter kaum verändern. Dieser Unterschied entsteht, weil sich die Normspektralwertfunktionen im roten Bereich des Lichtes erheblich von den Sehzapfen-Grundfunktionen unterscheiden.

Auch in den Farbräumen CIEXYZ, LMS und LMSV können Schwellenellipsoide um die untersuchten Farben erzeugt werden. Diese werden wieder genauso berechnet wie die Ellipsoide im CIELAB-Farbraum. Es ergeben sich die folgenden Mittel- und Extremwerte:

Tabelle 4.16 Mittel- und Extremwerte der Schwellenellipsoiden in den Farbräumen LMS und LMSV

	ΔL	ΔM	ΔS	ΔL_V	ΔM_V	ΔS_V
Mittelwert	0,055	0,076	0,117	0,048	0,049	0,315
Maximalwert	0,143	0,241	0,561	0,125	0,220	0,897
	Farbe 84 (90|-11|96)	Farbe 2 (90|0|0)	Farbe 60 (73|23|-23)	Farbe 2 (90|0|0)	Farbe 84 (90|-11|96)	Farbe 60 (73|23|-23)
Minimalwert	0,011	0,011	0,001	0,009	0,009	0,001
	Farbe 21 (15|0|0)	Farbe 21 (15|0|0)	Farbe 58 (22|0|28)	Farbe 21 (15|0|0)	Farbe 21 (15|0|0)	Farbe 58 (22|0|28)

Im LMS-Farbraum sind die Ellipsoide etwas größer als im LMSV-Farbraum. Die Ellipsoide im LMS-Farbraum haben ihren maximalen Mittelwert bei ΔS und den geringsten bei ΔL. Dabei ergeben sich vor allem für ΔS starke Schwankungen zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert. Im LMSV-Farbraum sind die Schwankungen zwischen den einzelnen Ellipsoidachsenwerten größer als im LMS-Farbraum. Der größte Mittelwert liegt bei ΔS_V, die Mittelwerte bei ΔL_V und ΔM_V sind ungefähr gleich. Der Maximalwert von ΔM_V ist hingegen 75 % größer als der Maximalwert von ΔL_V.

Zum weiteren Vergleich werden die Ellipsoidhomogenität κ[52] und die Ellipsoidheit ε[53] herangezogen. Die Ellipsoidhomogenität beträgt im LMS-Farbraum 0,038 und im LMSV-Farbraum 0,091. Der Wert κ_{LMSV} ist 10 % größer als κ_{XYZ}, währenddessen der Wert κ_{LMS} 54 % kleiner ist als κ_{XYZ}. Die Ellipsoidhomogenität κ_{LAB} hat den größten Wert. Die Ellipsoidhomogenität κ_{LAB} ist vor allem deshalb besser, weil dieser Farbraum durch die Wurzelfunktion 3. Grades an die menschliche Reizempfindung angepasst ist.

Tabelle 4.17 Ellipsoidhomogenität κ

	CIELAB	CIEXYZ	LMS	LMSV
Ellipsoidhomogenität κ	0,130	0,082	0,038	0,091

Tabelle 4.18 Mittel- und Extremwerte der Ellipsoidheit ε

	CIELAB	CIEXYZ	LMS	LMSV
Mittlere Ellipsoidheit ε_{mw}	0,508	0,680	0,702	0,843
Maximale Ellipsoidheit ε_{max}	0,832	0,814	0,921	0,933
	Farbe 84 (90|-11|96)	Farbe 55 (26|31|-44)		
Minimale Ellipsoidheit ε_{min}	0,222	0,138	0,013	0,438
	Farbe 55 (26|31|-44)	Farbe 91 (48|65|52)		

Die Werte für die Ellipsoidheit ε stehen in der Tabelle 4.18. Dabei ist zu sehen, dass die Durchschnittswerte für die Ellipsoidheit ε im LMS-Farbraum ungefähr gleich sind mit denen im CIEXYZ-Farbraum, während die Ellipsoidheit im LMSV-Farbraum 24 % schlechter ist.

[52] Die Ellipsoidhomogenität κ ist der Quotient der kleinsten durch die größte Hauptachse aller Ellipsoiden, daher gilt: Ein größerer Wert ist besser als ein kleiner. Dabei sollte der Wert im Idealfall gleich 1 sein.

[53] Die Ellipsoidheit ε ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{R_2 + R_3}{2 \cdot R_1} \right)$$

Dabei ist R_1 der Radius der Hauptachse des Ellipsoiden und R_2 und R_3 sind die Radien der Nebenachsen. Ein Wert von 0 kennzeichnet einen Kreis, ein Wert von 1 eine Gerade. Die Farbschwellen sollten einen Kreis um das Farbmuster bilden, daher ist ein niedriger Wert besser als ein hoher.

Es zeigt sich somit, dass die Modifizierung von Valberg zu einer Verschlechterung führt. Gerade im LMS-Farbraum gibt es Schwankung um den Faktor 70 zwischen den Extremwerten. Der CIELAB-Farbraum zeigt auch bei der Ellipsoidheit ε die besten Ergebnisse.

Die Verwendung der Sehzapfen-Grundfunktionen führt zu keiner besseren Anpassung der Farbräume an die Farbschwellen als die Verwendung der Normspektralwertfunktionen. Die von Valberg normierten Sehzapfen-Grundfunktionen zeigen eine 10 % bessere Ellipsenhomogenität, aber eine 24 % schlechtere mittlere Ellipsoidheit. Die mittlere Ellipsoidheit des LMS-Farbraumes ist nur 3 % schlechter als die des CIEXYZ-Farbraumes, die Ellipsenhomogenität ist 54 % schlechter.

4.2 Vergleich großer visueller Farbunterschiede und berechneter Farbabstände

In diesem Kapitel werden die großen Farbunterschiede mit der CIELAB- und der CIEDE2000-Farbabstandsformel beschrieben. Die Differenzen zwischen den berechneten Farbabständen und den visuellen Farbunterschieden der Probanden werden ermittelt. Der Einfluss der verschiedenen farbmetrischen Daten auf die Korrelation zwischen Farbunterschied und Farbabstand wird untersucht. Anschließend erfolgt noch die Untersuchung auf Eignung ausgewählter Farbabstandsformeln für die Beurteilung großer Farbunterschiede. Hierzu dient die Korrelation zwischen visuellen Farbunterschieden und berechneten Farbabständen.

Für die Auswertung der großen Farbunterschiede werden die Farbabstände für jede Farbreihe in eine Skala von 0 bis 1 übertragen, um sie mit den visuellen Bewertungen der Probanden zu vergleichen. Dafür werden alle Farbabstände einer Farbreihe durch den Maximalwert der Farbabstände $\Delta E^*_{\max}$ dieser Farbreihe dividiert. Diese neuen relativen Farbabstände werden mit ΓE^*[54] bezeichnet. ΓE^* wird also wie folgt berechnet:

$$\Gamma E^*_{\mathrm{i}} = \frac{\Delta E^*_{\mathrm{i}}}{\Delta E^*_{\max}} \qquad \text{(Gl. 4.55)}$$

Da die Probanden ihre visuellen Empfindungen mit unterschiedlichen Werten in die Bewertungsskalen eintragen, müssen diese Werte auf eine Skala von 0 bis 1 normiert werden. Dazu werden alle Bewertungen durch die maximale Bewertung der Farbreihe dividiert. Es ergibt sich eine Normierung der Werte auf der Skala von 0 bis 1. Die 1 kann bei dieser Methode je nach Proband bei unterschiedlichen Feldern liegen, so dass sich bei der Mittelwertbildung ein maximaler Wert von unter 1 ergeben kann.

Die relativen visuellen Beurteilungen ΓB_{i} werden durch die Gleichung 4.55 berechnet. B_{i} sind alle visuellen Beurteilungen der Farbreihe und $B_{\max}$ ist die höchste visuelle Beurteilung des Probanden.

$$\Gamma B_{\mathrm{i}} = \frac{B_{\mathrm{i}}}{B_{\max}} \qquad \text{(Gl. 4.56)}$$

[54] Die Bezeichnung „ΓE^*“ wird gewählt, da der Farbabstand ΔE^* normiert ist. Diese Normierung verändert den Farbabstand aber nur sehr gering, daher wird er mit Γ anstatt mit Δ bezeichnet.

Um die Korrelation zwischen den Farbabständen und den visuellen Bewertungen zu ermitteln, werden die relativen Farbabstände ΓE^* und die relativen visuellen Bewertungen ΓB in Verbindung gesetzt. Der Betrag der Differenzen zwischen den relativen visuellen Beurteilungen ΓB und relativen Farbabständen ΓE^* wird als ωE^* bezeichnet.

$$\omega E^* = \left|\Gamma B - \Gamma E^*\right| \qquad \text{(Gl. 4.57)}$$

Je kleiner der Wert ωE^*, desto besser korrelieren die berechneten Farbabstände mit den visuellen Bewertungen der Probanden.

4.2.1 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit der CIELAB-Farbabstandsformel

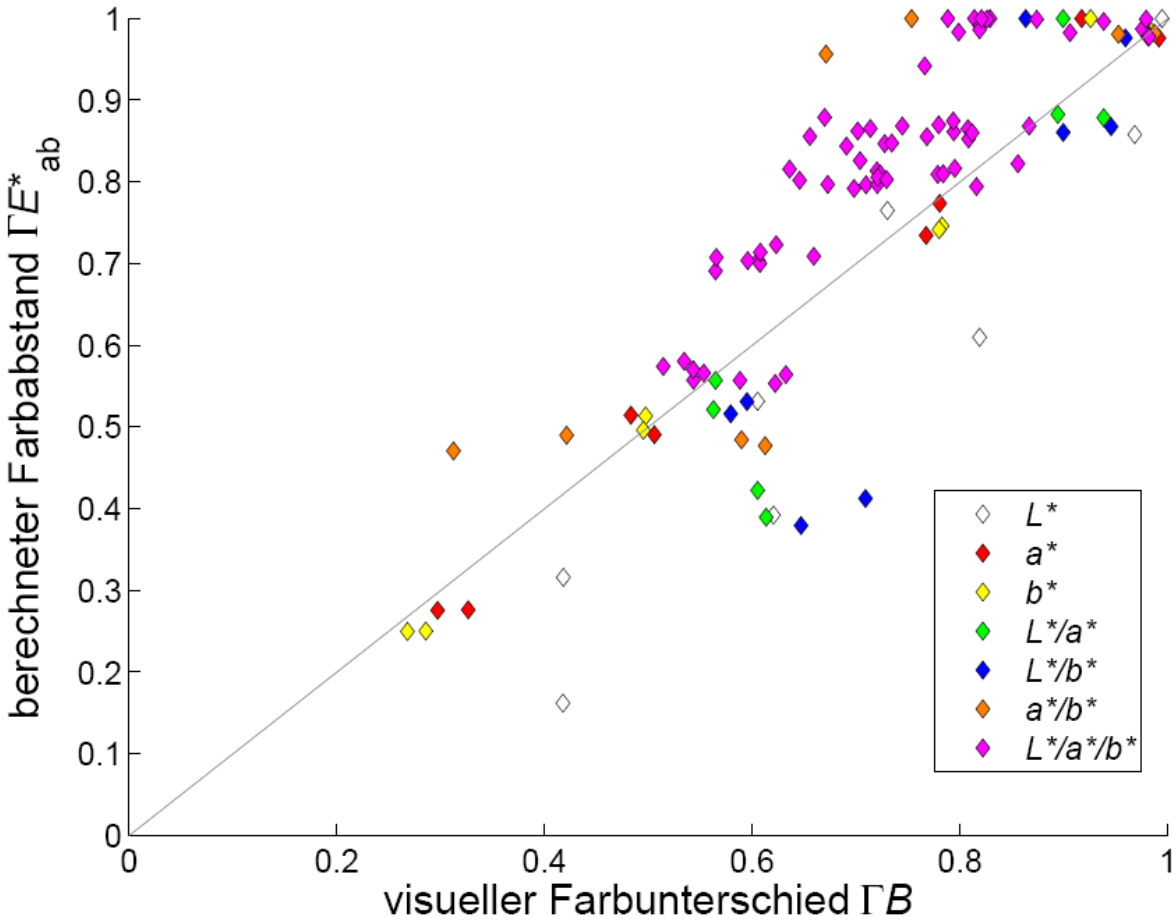

Bild 4.42 Relativer Farbabstand ΓE^*_{ab} als Funktion des relativen visuellen Farbunterschiedes ΓB bei der mittelgrauen Farbe im CIELAB-Farbraum

Die Korrelation zwischen den berechneten Farbabständen und den visuellen Farbunterschieden erfolgt über den Durchschnitt der Werte von ΓE^*_{ab} und ΓB für die einzelnen Farbreihen. Das Bild 4.42 zeigt die relativen CIELAB-Farbabstände ΓE^*_{ab} als Funktion der relativen visuellen Farbunterschiede der Probanden bei der mittelgrauen[55] Farbe für 7 Farbveränderungen. Die verschiedenfarbigen Rauten zeigen die unterschiedlichen Varianten der Farbveränderung an:

[55] Mittelgrau: $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$

weiße Rauten – L^*; rote Rauten – a^*; gelbe Rauten – b^*; grüne Raute – L^*/a^*; blaue Raute – L^*/b^*; orange Raute – a^*/b^*; magentafarbene Rauten – $L^*/a^*/b^*$

Die Verteilung der relativen Farbunterschiede ΓB liegt vor allem im höheren Bereich deutlich oberhalb der Vergleichsgeraden[56]. Aus dem Bild 4.42 wird deutlich, dass sich die Farbveränderungen a^* und b^* sehr dicht an der Vergleichsgeraden befinden, während die Veränderungen von L^* etwas weiter entfernt sind. Der Vergleich zwischen den Veränderungen L^*/a^*, L^*/b^* und a^*/b^* zeigt kein so deutliches Ergebnis, aber die Kombination L^*/a^* scheint eine etwas geringere Differenz zwischen Bewertung und Berechnung zu haben. Es lässt sich beim Vergleich der Farbveränderung L^*/b^* und a^*/b^* keine Aussage treffen, welcher Mittelwert größer ist, da die Veränderungen L^*/b^* große Differenzen zwischen ΓB und ΓE^*_{ab} im Bereich der kleinen Farbabstände und a^*/b^* im Bereich der großen Farbabstände haben. Die durchschnittliche Differenz bei der Farbveränderung $L^*/a^*/b^*$ wird einen Wert ergeben, der weder extrem klein noch sehr groß sein wird. Dabei ist bei den Werten für $L^*/a^*/b^*$ auffallend, dass die Werte von ΓE^*_{ab} fast vollständig oberhalb der Vergleichsgeraden liegen.

Aus den relativen Farbabständen ΓE^*_{ab} und den Farbunterschieden ΓB werden dann nach der Gleichung 4.57 die Vergleichswerte ωE^*_{ab} berechnet. Es ergeben sich die Mittelwerte für die Daten ωE^*_{ab}, die in den Tabellen 4.19 und 4.20 angegeben sind. In der Tabelle 4.19 werden die Mittelwerte für die einzelnen Farben, in der Tabelle 4.20 für die einzelnen Variationen der Veränderungen der Farben dargestellt.

Tabelle 4.19 Mittelwerte von ωE^*_{ab} für neun Referenzfarben

	Alle	Mittel-grau	Rosa-rot	Ziegel-rot	Ocker-gelb	Gras-grün	Blau-grün	Türkis-grün	Himmel-blau	Violett-rot
$\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$	0,114	0,091	0,121	0,099	0,105	0,114	0,149	0,117	0,143	0,100

Tabelle 4.20 Mittelwerte von ωE^*_{ab} für sieben Farbveränderungen

	Alle	L^*	a^*	b^*	L^*/a^*	L^*/b^*	a^*/b^*	$L^*/a^*/b^*$
$\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$	0,114	0,135	0,091	0,121	0,123	0,113	0,143	0,097

Beim Vergleich der Mittelwerte für die neun Referenzfarben (Tabelle 4.19) wird deutlich, dass sich bei den Farben unterschiedliche Durchschnittswerte entstehen. Die Maximalwerte sind Blau markiert und die Minimalwerte Rot. Die mittelgraue Farbe hat den geringsten (20 % unter dem Gesamtdurchschnitt[57]) und Blaugrün mit den Farbwerten (50|-50|0)[58] den größten Wert (30 % über dem Gesamtdurchschnitt).

Auch der Vergleich der Mittelwerte für sieben Farbveränderungen (Tabelle 4.20) zeigt keinen einheitlichen Durchschnittswert. Der Minimalwert bei den Berechnungen von ωE^*_{ab} liegt bei der Veränderung von a^* (20 % unter dem Gesamtdurchschnitt) und der Maximalwert bei der kombinierten Veränderung von a^*/b^* (25% über dem Gesamtdurchschnitt).

[56] Die Vergleichsgerade ist genau die Funktion, bei der den Werten von ΓE^*_{ab} gleiche Werte von ΓB zugeordnet werden.

[57] Der Gesamtdurchschnitt ist der Mittelwert über alle Referenzfarben und Farbänderungen. Er beträgt für die CIELAB-Farbabstandsformel 0,114.

[58] Die Farbwerte werden in der Form ($L^*|a^*|b^*$) angegeben.

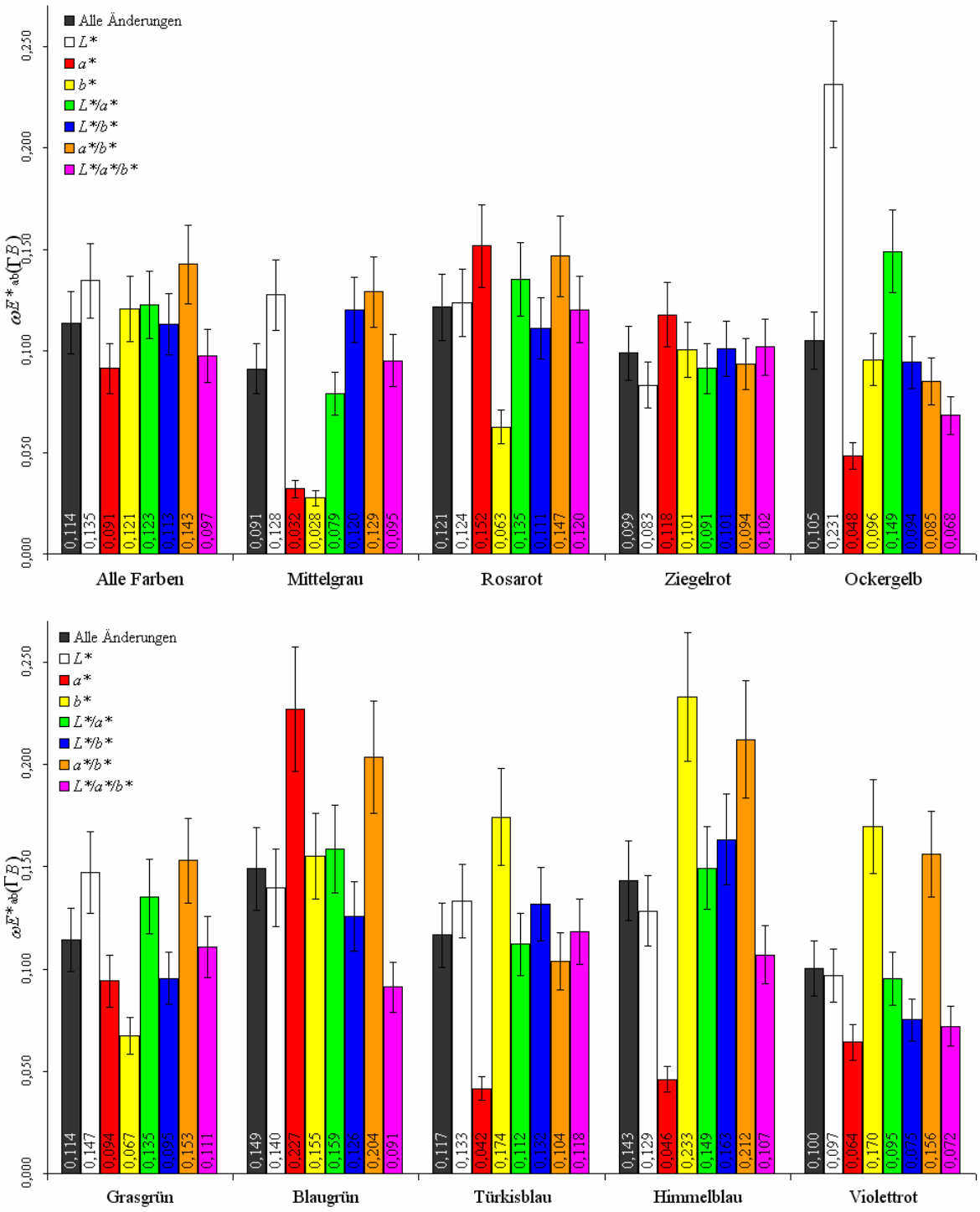

Bild 4.43 Mittelwerte der Differenzen $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ im CIELAB-Farbraum

Das Bild 4.43 zeigt die Mittelwerte der Differenzen $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ für die verschiedenen Farbänderungen bei den neun Referenzfarben und den Durchschnitt über alle Farben.

Es folgt eine genauere Betrachtung der einzelnen Farben:

- Mittelgrau (50|0|0)
  Der Mittelwert über alle Änderungen ist bei dieser Farbe 20 % geringer als der Gesamtdurchschnitt. Es fällt vor allem auf, dass die Differenzen bei den Farbveränderungen a^* um den Faktor 3,5 und bei b^* um den Faktor 4 geringer sind.

Die Veränderungen von *L**, *L*/b** und *a*/b** haben die größten Werte, circa 10 % höher als der Gesamtdurchschnitt.

- Rosarot (50|50|0)
  Bei dieser Farbe ist der Mittelwert über alle Änderungen 6 % größer als der Gesamtdurchschnitt. Die einzelnen Mittelwerte schwanken nicht allzu stark, bis auf den Wert bei der *b**-Veränderung, der halb so groß ist wie der Gesamtdurchschnitt. Die Veränderungen von *a** und *a*/b** führen zu 33 % beziehungsweise 29 % größeren Differenzen als der Gesamtdurchschnitt.

- Ziegelrot (50|35,36|35,36)
  Bei dieser Farbe liegen die durchschnittlichen Differenzen für die verschiedenen Farbveränderungen alle bei einem ähnlichen Wert. Der Mittelwert für *L** ist 10 % kleiner und der für *a** ist 18 % größer als der Mittelwert über alle Änderungen. Der Mittelwert über alle Änderungen ist 15 % geringer als der Gesamtdurchschnitt.

- Ockergelb (50|0|50)
  Der Durchschnitt für die Helligkeitsveränderung ist doppelt so hoch wie der Gesamtdurchschnitt. Der Wert für *L*/a** ist 50 % größer, der Mittelwert über alle Änderungen ist 10 % geringer als der Gesamtdurchschnitt. Das liegt vor allem daran, dass die Mittelwerte für *a** und *L*/a*/b** um den Faktor 2,4 und 1,7 kleiner sind.

- Grasgrün (50|-35,36|35,36)
  Bei dieser Farbe entspricht der Mittelwert über alle Änderungen genau dem Gesamtdurchschnitt. Die Veränderung von *b** hat einen um den Faktor 1,7 kleineren Wert. Die Veränderungen von *L**, *a*/b** und *L*/a** haben um den Faktor 1,3 größere Mittelwerte.

- Blaugrün (50|-50|0)
  Bei dieser Farbe liegen der Maximalwert bei der Veränderung *a** (100 % über dem Gesamtdurchschnitt) und der Minimalwert bei der *L*/a*/b**-Veränderung (20 % unter dem Gesamtdurchschnitt). Der Mittelwert bei *a*/b** ist um den Faktor 1,8 höher als der Gesamtdurchschnitt und die weiteren Mittelwerte sind ebenfalls größer als der Gesamtdurchschnitt. Der Mittelwert über alle Änderungen bei dieser Farbe ist von allen der größte, nämlich 30 % über dem Gesamtdurchschnitt.

- Türkisblau (50|-35,36|-35,36)
  Bei dieser Farbe ist der Mittelwert über alle Änderungen ungefähr gleich dem Gesamtdurchschnitt. Der Mittelwert für die Veränderung *b** ist 50 % größer als der Gesamtdurchschnitt, während die Veränderung von *a** um den Faktor 2,7 kleiner ist. Die restlichen Mittelwerte schwanken leicht um den Mittelwert über alle Änderungen, wobei die Werte für *L** und *L*/b** etwas größer sind.

- Himmelblau (50|0|-50)
  Die Mittelwerte für die Veränderungen von *b** und *a*/b** liegen um den Faktor 2 höher als der Gesamtdurchschnitt, wobei der für *b** noch etwas höher ist als der für *a*/b**. Der Durchschnitt für *a** hingegen ist um den Faktor 2,5 kleiner. Trotzdem ist der Mittelwert über alle Änderungen 25 % größer als der Gesamtdurchschnitt.

- Violettrot (50|35,36|-35,36)
  Der Mittelwert über alle Änderungen ist 14 % kleiner als der Gesamtdurchschnitt bei dieser Farbe. Dabei sind die Mittelwerte bei b^* und a^*/b^* um den Faktor 1,5 größer als der Gesamtdurchschnitt, während die anderen etwas kleiner sind. Die Veränderungen von a^*, L^*/b^* und $L^*/a^*/b^*$ haben um den Faktor 1,7 bis 1,8 kleinere Mittelwerte als der Gesamtdurchschnitt.

Die Betrachtung der verschiedenen Farbmaßzahlveränderungen bei den unterschiedlichen Referenzfarben verdeutlicht, dass die Mittelwerte von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bei manchen Farbmaßzahlveränderungen stärker schwanken als bei anderen. Gerade die Veränderungen der Rot-Grün-Buntheit a^* und der Gelb-Blau-Buntheit b^* zeigen bei verschiedenen Referenzfarben stärkere Schwankungen von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$. Die Veränderung von a^* schwankt um den Faktor 7,1 bei den verschiedenen Referenzfarben und die Veränderung von b^* um den Faktor 8,3. Sowohl die Veränderung der Rot-Grün-Buntheit a^* als auch der Gelb-Blau-Buntheit b^* besitzen bei manchen Farben die beste Korrelation zwischen Farbunterschied und CIELAB-Farbabstand (a^* bei Türkisblau, b^* bei Mittelgrau). Genauso ergeben sich aber auch bei bestimmten anderen Referenzfarben die schlechtesten Korrelationen (a^* bei Blaugrün, b^* bei Himmelblau). Die Helligkeitsveränderung hat einen Mittelwert von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bei Ockergelb, der um den Faktor 1,7 größer als der Mittelwert über alle Farben ist und bei Ziegelrot um den Faktor 1,6 kleiner. Der $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Wert bei der Helligkeitsveränderung schwankt um den Faktor 2,8 über alle Referenzfarben. Die Farbveränderungen, bei denen mehrere Farbmaßzahlen verändert werden, haben geringere Schwankungen bezüglich der Korrelation zwischen Farbunterschied und Farbabstand. Die Veränderung von L^* und a^* schwankt um den Faktor 2,0, von L^* und b^* um den Faktor 2,2, von a^* und b^* um den Faktor 2,5 und von allen drei Farbmaßzahlen um den Faktor 1,8.

Die Korrelation der CIELAB-Farbabstände zu den visuellen Farbunterschieden hängt stark von den verschiedenen Referenzfarben und Veränderungen der Farbmaßzahlen ab.

Bei den Veränderungen in L^*, a^* und b^* wird nun untersucht, ob sich Unterschiede ergeben, wenn die Farbmaßzahl zu- oder abnimmt. Die Bilder 4.44, 4.45 und 4.46 zeigen die Differenzen $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ über die Differenzen der Farbmaßzahlen ΔL^*, Δa^* und Δb^* bei allen Farben im CIELAB-Farbraum. Die Werte der einzelnen Farben werden dabei wie folgt markiert: Mittelgrau – schwarze Raute; Rosarot– rote Raute; Ziegelrot – orange Raute; Ockergelb – gelbe Raute; Grasgrün – hellgrüne Raute; Blaugrün – dunkelgrüne Raute; Türkisblau – hellblaue Raute; Himmelblau – blaue Raute; Violettrot – violette Raute

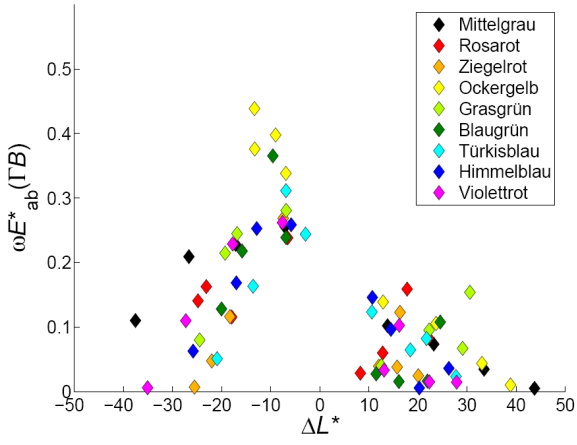

Bild 4.44 $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ als Funktion der Helligkeitsdifferenz ΔL^*

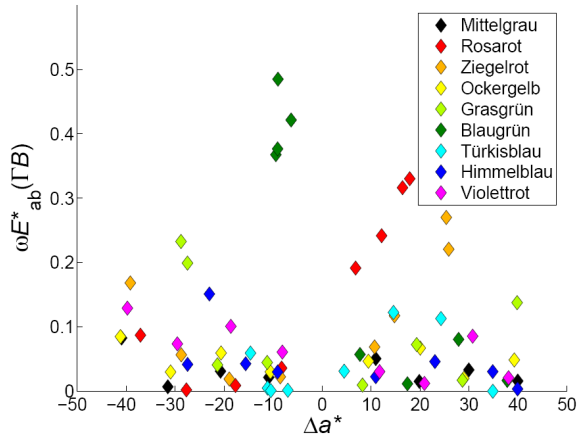

Bild 4.45 $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ als Funktion der Rot-Grün-Differenz Δa^*

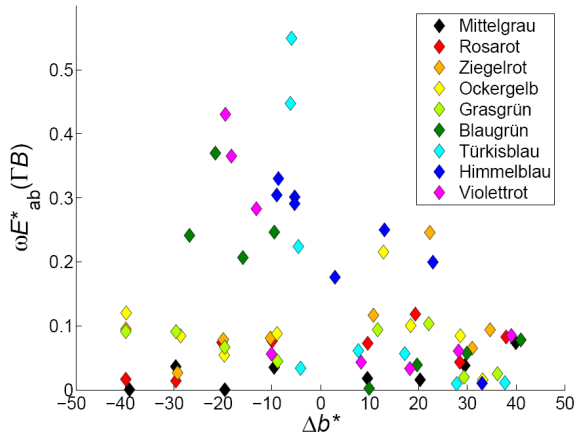

Bild 4.46 $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ als Funktion von Gelb-Blau-Differenz Δb^*

Bei Betrachtung der Bilder 4.44, 4.45 und 4.46 sieht man, dass sich die Werte für $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ mit jeder Veränderung der einzelnen Farbmaßzahlen unterschiedlich verhalten. Bei den Helligkeitsveränderungen ΔL^* zeigt sich, dass die Werte für $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bei der Veränderung im dunkleren Farbbereich grundsätzlich größer sind als bei einer Veränderung im helleren. Für die Farbe Ockergelb, bei der schon der Mittelwert von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bei der Helligkeitsveränderung sehr groß war, sind die $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte im dunklen Farbbereich sehr viel höher als im hellen. Im Falle der Rot-Grün-Veränderung Δa^* zeigen die Werte von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bei Veränderungen im roten und im grünen Farbbereich keine großen Unterschiede. Es gibt aber zwei Ausnahmen; bei Rosarot (a^*=50) sind die $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte bei positiver Δa^*-Veränderung größer, bei Blaugrün (a^*=-50) bei negativer Δa^*-Veränderung. Bei den Δb^*-Veränderungen sind die $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte im negativen Bereich etwas höher als im positiven Bereich. Vor allem für die Farben Blaugrün, Türkisgrün, Himmelblau und Violettrot ist ein größerer Unterschied zu erkennen. Bei der Δb^*-Veränderung gibt es keine großen $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte, weil keine Farben mit einem sehr großen b^*-Wert[59] untersucht wurden. Die Tabelle 4.21 zeigt die durchschnittlichen Werte von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ jeweils für den positiven und den negativen Bereich[60] der Farbveränderungen.

Tabelle 4.21 Mittelwerte von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ für positive und negative Farbmaßzahlenveränderungen

	Alle	Mittel-grau	Rosa-rot	Ziegel-rot	Ocker-gelb	Gras-grün	Blau-grün	Türkis-grün	Himmel-blau	Violett-rot
ΔL^*_-	0,204	0,201	0,164	0,110	0,388	0,205	0,238	0,193	0,186	0,152
ΔL^*_+	0,065	0,054	0,083	0,056	0,075	0,089	0,042	0,074	0,071	0,042
Δa^*_-	0,100	0,036	0,033	0,067	0,051	0,129	0,413	0,017	0,066	0,091
Δa^*_+	0,083	0,029	0,270	0,169	0,046	0,059	0,041	0,067	0,026	0,037
Δb^*_-	0,163	0,018	0,046	0,071	0,087	0,074	0,266	0,314	0,307	0,284
Δb^*_+	0,079	0,037	0,080	0,131	0,104	0,061	0,045	0,035	0,159	0,056

[59] Damit eine Farbe richtig „Gelb“ ist, sollte nicht nur ein Gelb-Blau-Gehalt b^* von über 75 vorhanden, sondern auch die Helligkeit L^* größer als 50 sein.

[60] Die negativen Farbmaßzahlenveränderungen werden mit ΔL^*_-, Δa^*_- und Δb^*_- und die positiven mit ΔL^*_+, Δa^*_+ und Δb^*_+ bezeichnet.

Die Probanden konnten die visuellen Beurteilungen für jede Farbreihe beliebig auf einer Skala von 0 bis 50 eintragen, es ergab sich somit ein Maximalwert, der nicht bei 50 liegen muss. Es werden nun die Mittelwerte dieser Maximalwerte[61] der visuellen Bewertungen mit den Maximalwerten der berechneten Farbabstände verglichen. Dieser Vergleich wird jeweils für alle neun Referenzfarben (Tabelle 4.22) und alle sieben Farbveränderungen (Tabelle 4.23) durchgeführt. Der durchschnittliche Maximalwert der Bewertungen über alle Farben und Veränderungen ist dabei etwas größer als der Wert bei den theoretisch berechneten Abständen. Über alle Farben verändert sich max(B) sehr wenig. Nur bei Türkisgrün ist er etwas kleiner. Die Differenz zwischen max(B) und max(ΔE^*_{ab}) ist bei den Farben Ockergelb, Grasgrün und Türkisblau etwas kleiner als der Durchschnitt und bei den Farben Rosarot und Himmelblau etwas größer.

Tabelle 4.22 Durchschnittliche Maximalwerte der visuellen Bewertungen und der berechneten Farbabstände bei den neun Referenzfarben

	Alle	Mittel-grau	Rosa-rot	Ziegel-rot	Ocker-gelb	Gras-grün	Blau-grün	Türkis-grün	Himmel-blau	Violett-rot
max(B)	39,653	41,857	41,143	39,567	39,781	38,371	38,438	35,948	40,038	40,786
max(ΔE^*_{ab})	33,226	34,749	33,157	32,527	35,510	33,509	32,396	31,168	31,905	33,462
Differenz	6,427	7,108	7,986	7,040	4,271	4,862	6,042	4,780	8,133	7,324

Aus den Mittelwerten von max(B) über alle Farbveränderungen wird deutlich, dass Veränderungen, in denen auch die Helligkeit variiert wird, bei der visuellen Beurteilung als größer beurteilt werden, während eine Variation der Buntheit zu subjektiv geringeren Veränderungen führt. Bei den Farbmaßzahlenveränderungen von a^* und b^* sind die Werte von max(B) sogar etwas kleiner als die max(ΔE^*_{ab})-Werte, während sie bei den Veränderungen von L^*/a^* und L^*/b^* sehr viel größer sind.

Tabelle 4.23 Durchschnittliche Maximalwerte der visuellen Bewertung und der berechneten Farbabstände bei den verschiedenen Farbveränderungen

	Alle	L^*	a^*	b^*	L^*/a^*	L^*/b^*	a^*/b^*	$L^*/a^*/b^*$
max(B)	39,653	41,348	38,211	36,163	42,189	40,163	35,841	42,653
max(ΔE^*_{ab})	33,226	32,952	39,103	39,118	29,076	28,823	29,177	34,057
Differenz	6,427	8,396	-0,892	-2,955	13,113	11,34	6,664	8,596

Beim Vergleich der visuellen Bewertungen der Probanden mit den CIELAB-Farbabständen wird deutlich, dass es einen Unterschied zwischen den theoretisch berechneten Farbabständen und den Bewertungen gibt. Dieser Unterschied hängt sowohl von der Referenzfarbe als auch von der Veränderung der Farbwerte ab. Es lässt sich noch nicht bestimmen, wie diese Zusammenhänge zu einer Farbabstandsformel für große Farbabstände zusammengefasst werden können.

[61] Der Maximalwert der visuellen Farbunterschiede der Probanden wird ab jetzt mit max(B) bezeichnet.

4.2.2 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit der CIEDE2000-Farbabstandsformel

Da sich die CIEDE2000-Farbabstandsformel zu einer der wichtigsten Farbabstandsformeln entwickelt hat, wird sie in diesem Kapitel ausführlich betrachtet und mit der CIELAB-Farbabstandsformel verglichen.

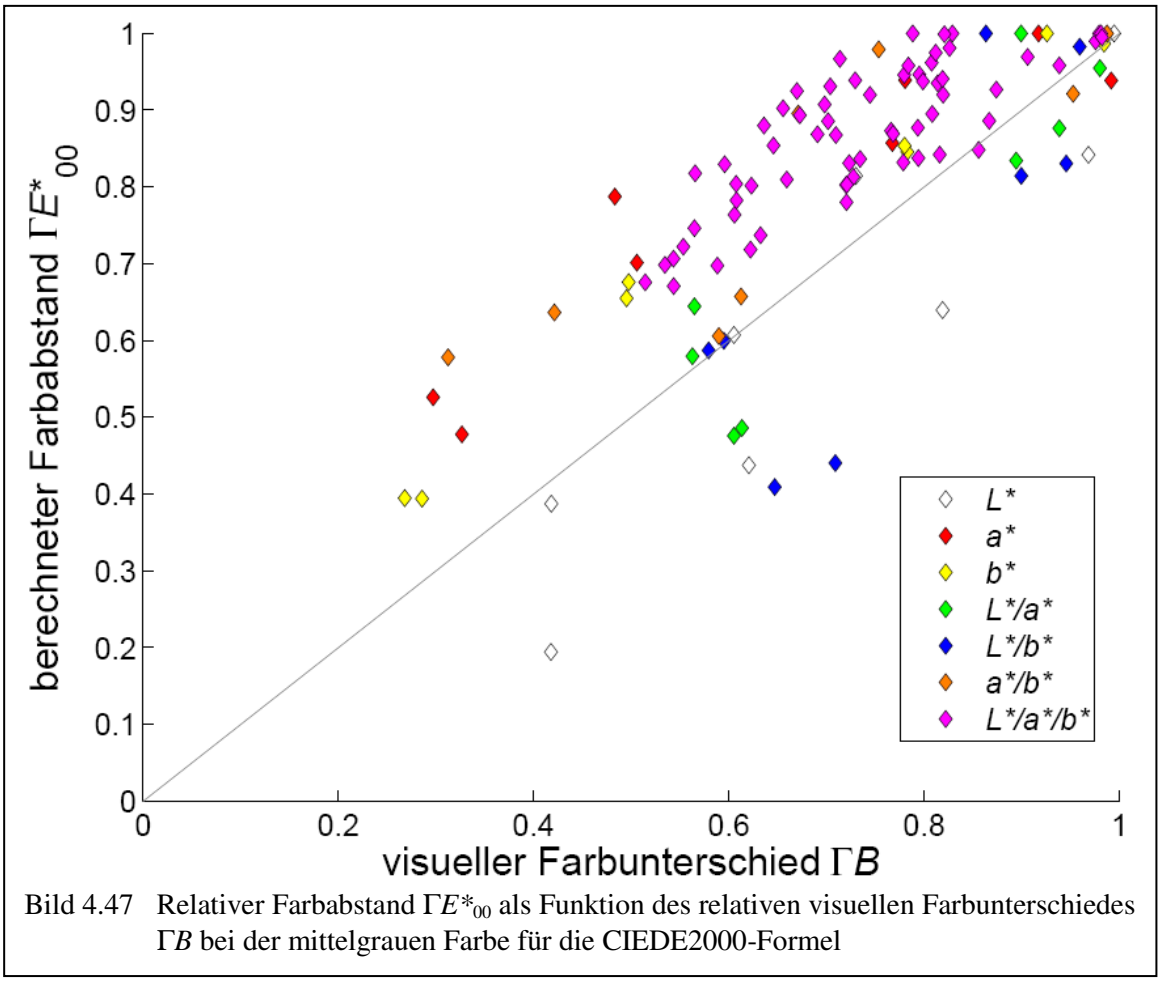

Bild 4.47 Relativer Farbabstand ΓE^*_{00} als Funktion des relativen visuellen Farbunterschiedes ΓB bei der mittelgrauen Farbe für die CIEDE2000-Formel

Der Vergleich zwischen den berechneten Farbabständen und den visuellen Farbunterschieden erfolgt auch beim CIEDE2000-Farbabstand über den Durchschnitt der Werte von ΓE^*_{00} und ΓB für die einzelnen Farbreihen. Das Bild 4.47 zeigt die relativen CIEDE2000-Farbabstände ΓE^*_{00} als Funktion der relativen Farbunterschiede ΓB bei der mittelgrauen Farbe. Die verschiedenfarbigen Rauten zeigen die sieben Farbveränderungen an: weiße Rauten – L^*; rote Rauten – a^*; gelbe Rauten – b^*; grüne Rauten – L^*/a^*; blaue Rauten – L^*/b^*; orange Rauten – a^*/b^*; magentafarbene Rauten – $L^*/a^*/b^*$

Die Verteilung bei den relativen Farbunterschieden ΓB ist nicht gleichmäßig um die Vergleichsgerade. Die Differenzen bei der b^*-Veränderung sind etwas kleiner als die meisten anderen Differenzen. Die a^*-Veränderung hat im Durchschnitt die größten Differenzen zur Vergleichsgeraden, aber auch die a^*/b^*- und a^*/b^*-Veränderungen haben größere Differenzen. Wenn man diese Ergebnisse mit den Ergebnissen beim CIELAB-Farbabstand vergleicht, fällt vor allem auf, dass die Werte für die a^*- und b^*-Veränderungen nicht mehr so dicht beieinander liegen und die Werte für die $L^*/a^*/b^*$-Veränderung vor allem über der Vergleichsgerade liegen.

Aus diesen relativen CIEDE2000-Farbabständen ΓE^*_{00} und den relativen Farbunterschieden ΓB werden dann die Vergleichswerte ωE^*_{00} berechnet. Es ergeben sich die Mittelwerte für die Daten ωE^*_{00}, die in den Tabellen 4.24 und 4.25 angegeben sind. In der Tabelle 4.24 werden die Mittelwerte für die einzelnen Farben und in der Tabelle 4.25 für die einzelnen Variationen der Veränderungen der Farben dargestellt.

Tabelle 4.24 Mittelwerte von ωE^*_{00} für alle neun Referenzfarben

	Alle	Mittel-grau	Rosa-rot	Ziegel-rot	Ocker-gelb	Gras-grün	Blau-grün	Türkis-grün	Himmel-blau	Violett-rot
$\omega E^*_{00}(\Gamma B)$	0,126	0,125	0,117	0,152	0,122	0,113	0,150	0,120	0,137	0,101

Tabelle 4.25 Mittelwerte von ωE^*_{00} für sieben Farbveränderungen

	Alle	L*	a*	b*	L*/a*	L*/b*	a*/b*	L*/a*/b*
$\omega E^*_{00}(\Gamma B)$	0,126	0,125	0,145	0,124	0,141	0,130	0,154	0,102

Auch bei der CIEDE2000-Farbabstandsformel zeigt der Vergleich der Mittelwerte über die verschiedenen Farben (Tabelle 4.24), dass alle Farben unterschiedliche Durchschnittswerte haben. Die Maximalwerte sind blau markiert und die Minimalwerte rot. Im Gegensatz zum CIELAB-Farbabstand hat die $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Berechnung den Minimalwert bei Violettrot mit den Farbwerten (50|35,36|-35,36) (25 % unter dem Gesamtdurchschnitt[62]) und den größten Wert bei Ziegelrot mit den Farbwerten (50|35,36|35,36) (25 % über dem Gesamtdurchschnitt). Die Schwankung zwischen den Extremwerten von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ ist um 20 % geringer als bei den Werten für die CIELAB-Farbabstandsformel. Die Maximalwerte sind ungefähr gleich, aber der Minimalwert von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ ist 0,01 höher als der Minimalwert von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ bezüglich der verschiedenen Referenzfarben.

Auch bei den verschiedenen Farbveränderungen (Tabelle 4.25) ergeben sich keine einheitlichen Mittelwerte. Die Extremwerte ergeben sich für die CIEDE2000-Formel bei anderen Veränderungen als bei der CIELAB-Formel. Der Minimalwert liegt bei der Veränderung von $L^*/a^*/b^*$ und ist 25 % geringer als der Gesamtdurchschnitt. Der Maximalwert befindet sich wie bei der CIELAB-Farbabstandsformel bei der Veränderung von a^*/b^* und ist 25 % größer als der Gesamtdurchschnitt. Die Schwankung zwischen den Extremwerten ist bei der CIELAB- und CIEDE2000-Farbabstandsformel ungefähr gleich.

Es folgt der Vergleich der Mittelwerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ bei denen verschiedenen Referenzfarben und verschiedenen Veränderungen der Farbmaßzahlen für die CIELAB- und die CIEDE2000-Farbabstandsformeln Die Korrelation zwischen den Farbunterschieden und den CIELAB-Farbabständen ist bei allen Referenzfarben im gleichen Bereich oder besser als bei der CIEDE2000-Farbabstandsformel. Bei den Veränderungen der Farbmaßzahlen ist die Korrelation zwischen den CIEDE2000-Farbabständen und den Farbunterschieden nur bei der Veränderung der Helligkeit L^* um 7,5 % besser als bei der CIELAB-Farbabstandsformel. Ansonsten ist der $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Wert bis zu 60 % besser als der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert.

[62] Der Gesamtdurchschnitt ist der Mittelwert über alle Referenzfarben und Farbänderungen. Er beträgt für die CIEDE2000-Farbabstandsformel 0,126.

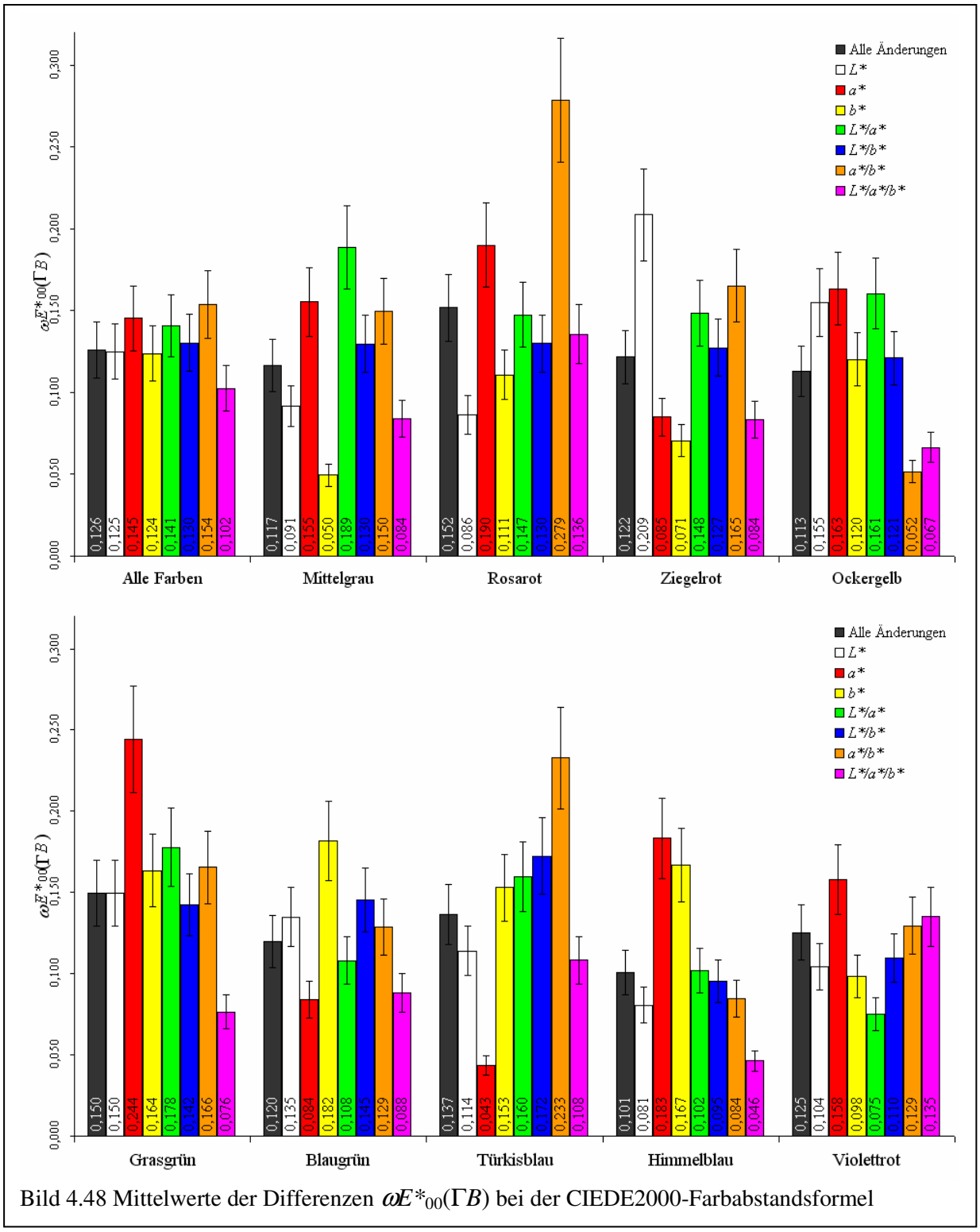

Bild 4.48 Mittelwerte der Differenzen $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ bei der CIEDE2000-Farbabstandsformel

Das Bild 4.48 zeigt die Mittelwerte der Differenzen $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ der verschiedenen Farbveränderungen für die neun Referenzfarben und den Durchschnitt über alle Farben.

Es folgt eine genauere Betrachtung der einzelnen Farben:

- Mittelgrau (50|0|0)
  Bei dieser Farbe liegt der geringste Mittelwert bei der b^*-Veränderung vor (40 % unter dem Gesamtdurchschnitt), aber auch die L^*- und $L^*/a^*/b^*$-Veränderungen haben Mittelwerte, die 28% beziehungsweise 33 % geringer als der Gesamtdurchschnitt sind.

Der größte $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert wird bei der L^*/a^*-Veränderung sichtbar (um den Faktor 1,5 größer als der Gesamtdurchschnitt). Die a^*- und a^*/b^*-Veränderungen liegen mit ihrem Mittelwert ebenfalls über dem Gesamtdurchschnitt. Der Mittelwert über alle Änderungen liegt bei der mittelgrauen Farbe 7 % unter dem Gesamtdurchschnitt.

- Rosarot (50|50|0)
  Der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert ist für diese Farbe bei der Veränderung von a^*/b^* um den Faktor 2,2 größer als der Gesamtdurchschnitt. Der Wert bei der Veränderung von a^* ist um den Faktor 1,5 höher. Diese beiden Werte führen dann auch zu einem Mittelwert über alle Änderung, der 20 % über dem Gesamtdurchschnitt ist. Da fällt es nicht ins Gewicht, dass die $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Werte für die L^*- und b^*-Veränderungen 32 % beziehungsweise 12 % geringer sind.

- Ziegelrot (50|35,36|35,36)
  Der Mittelwert über alle Änderungen liegt 3 % unter dem Gesamtdurchschnitt. Der kleinste $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert liegt bei der Veränderung von b^* vor (44 % unter dem Gesamtdurchschnitt). Die Werte für die a^*-Veränderung und für die $L^*/a^*/b^*$-Veränderung sind 33 % kleiner als der Gesamtdurchschnitt. Der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert bei der L^*-Veränderung ist 65 % größer als der Gesamtdurchschnitt.

- Ockergelb (50|0|50)
  Gleich bei drei Veränderungen sind Mittelwerte von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ um 25 % höher als der Gesamtdurchschnitt, nämlich bei den L^*-, a^*- und L^*/a^*-Veränderungen. Dagegen haben die Veränderungen von a^*/b^* und $L^*/a^*/b^*$ um den Faktor 2 kleinere Mittelwerte. Der Mittelwert über alle Änderungen ist 10 % geringer als der Gesamtdurchschnitt.

- Grasgrün (50|-35,36|35,36)
  Bei dieser Farbe ist der Mittelwert für die a^*-Veränderung um den Faktor 1,9 größer als der Gesamtdurchschnitt, der Mittelwert für die $L^*/a^*/b^*$-Veränderung um den Faktor 1,7 kleiner. Die anderen Werte entsprechen etwa dem Mittelwert über alle Änderungen, der 20 % größer ist als der Gesamtdurchschnitt.

- Blaugrün (50|-50|0)
  Bei dieser Farbe ist der Mittelwert über die a^*-Veränderungen 33 % kleiner als der Gesamtdurchschnitt, genauso wie der Mittelwert bei der $L^*/a^*/b^*$-Veränderung. Hingegen hat die b^*-Veränderung einen 44 % höheren Mittelwert. Der Gesamtdurchschnitt ist bei dieser Farbe 5 % größer als der Mittelwert über alle Änderungen.

- Türkisblau (50|-35,36|-35,36)
  Während die Veränderung von a^*/b^* einen 85 % größeren Mittelwert als der Gesamtdurchschnitt hat, ist der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert bei der Veränderung der Farbmaßzahl a^* um den Faktor 3 kleiner. Die Werte bei den Veränderungen von L^* und $L^*/a^*/b^*$ sind 15 % beziehungsweise 10 % geringer als der Gesamtdurchschnitt, aber die anderen Mittelwerte von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ liegen oberhalb des Gesamtdurchschnitts. Der Mittelwert über alle Änderungen liegt dabei 9 % höher als der Gesamtdurchschnitt.

- Himmelblau (50|0|-50)
  Die $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Werte bei den Veränderungen von a^* und b^* liegen 45 % beziehungsweise 30 % höher als der Gesamtdurchschnitt, während die L^*- und

L/a*/b**-Veränderungen 35 % und 74 % geringer sind. Der Mittelwert über alle Änderungen liegt 20 % unter dem Gesamtdurchschnitt und ist damit der geringste aller Farben.

- Violettrot (50|35,36|-35,36)
  Der Mittelwert über alle Änderungen ist ungefähr gleich dem Gesamtdurchschnitt. Der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert für die Veränderung von *L*/a** ist um den Faktor 1,7 geringer als der Gesamtdurchschnitt und der Wert für die Veränderung von *a** ist 25 % größer. Einzig bei dieser Farbe ist der Mittelwert bei der Veränderung von *L*/a*/b** größer als der Mittelwert über alle Änderungen (8 %).

Die Mittelwerte von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ schwanken bei allen Veränderungen stark über die neun Referenzfarben, am meisten jedoch bei den Veränderungen von *a** und *a*/b** (Faktor 5,7 und 5,4). Bei den Veränderungen von *L*/b** ist die Schwankung am geringsten (Faktor 1,5). Es fällt außerdem auf, dass die Mittelwerte von $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$ zum Teil völlig andere Größen haben als die $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte bei den CIELAB-Farbabständen.

Der Unterschied zwischen der Korrelation der CIELAB- und CIEDE2000-Farbabstände zu den Farbunterschieden wird nun bei der Referenzfarbe Mittelgrau genauer betrachtet.

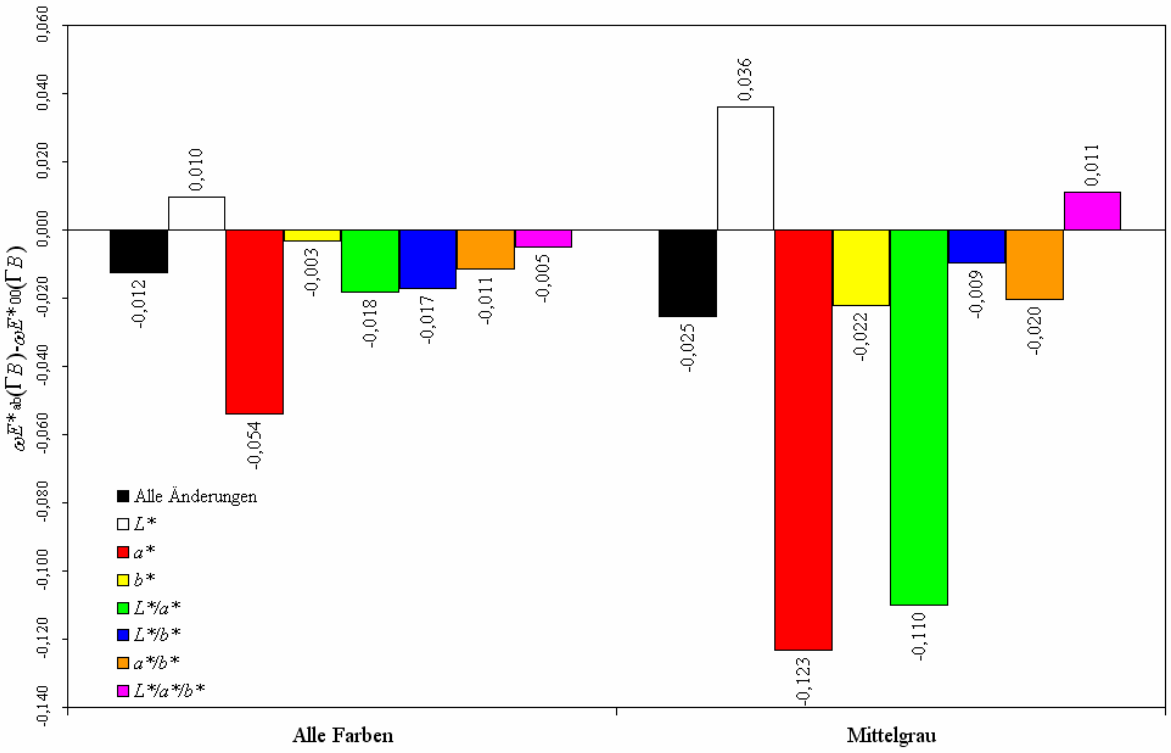

Bild 4.49 Differenz der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte für die Farbabstandsformeln CIELAB und CIEDE2000

Das Bild 4.49 zeigt die Differenzen zwischen den Mittelwerten von $\omega E^*(\Gamma B)$ für die Farbabstandsformeln CIELAB und CIEDE2000 für alle Farben und für Mittelgrau. Ein negativer Wert bedeutet, dass der $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Wert kleiner ist als der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert und somit die Korrelation zwischen den Farbunterschieden und den CIELAB-Farbabständen besser. Ein positiver Wert bedeutet, dass der $\omega E^*_{00}(\Gamma B)$-Wert kleiner ist als der $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Wert und somit die Korrelation zwischen den Farbunterschieden und den CIEDE2000-Farbabständen besser. Bei Mittelgrau korrelieren die Farbunterschiede für die Veränderungen *a** und *L*/a** sehr viel besser mit den CIELAB-Farbabständen als mit den CIEDE2000-Farbabständen. Bei

der Veränderung L^* ist die Korrelation zwischen den Farbunterschieden und den CIEDE2000-Farbabständen besser als bei der CIELAB-Farbabstandsformel. Im Falle der anderen Veränderungen ist die Korrelation zu den Farbunterschieden für beide Farbabstandsformeln ungefähr gleich.

Es folgt eine genauere Betrachtung der Korrelation der Farbunterschiede mit den CIELAB- und den CIEDE2000-Farbabständen bei Mittelgrau als Referenzfarbe. Die relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} werden für die relativen Farbunterschiede ΓB gleich 0,25, 0,50, 0,75 und 1,00 berechnet.[63] Diese Berechnung erfolgt für die Farben in den drei 2-Hauptachsen-Ebenen.[64] Die Bilder 4.50 bis 4.52 zeigen diese Darstellung. Auf den Achsen ΓB_L, ΓB_a und ΓB_b sind die relativen Farbunterschiede dargestellt, bei denen jeweils eine der drei Farbmaßzahlen L^*, a^* und b^* verändert wird. Im Idealfall sollten die relativen Farbabstände ΓE^* auf den konzentrischen Kreisen liegen.

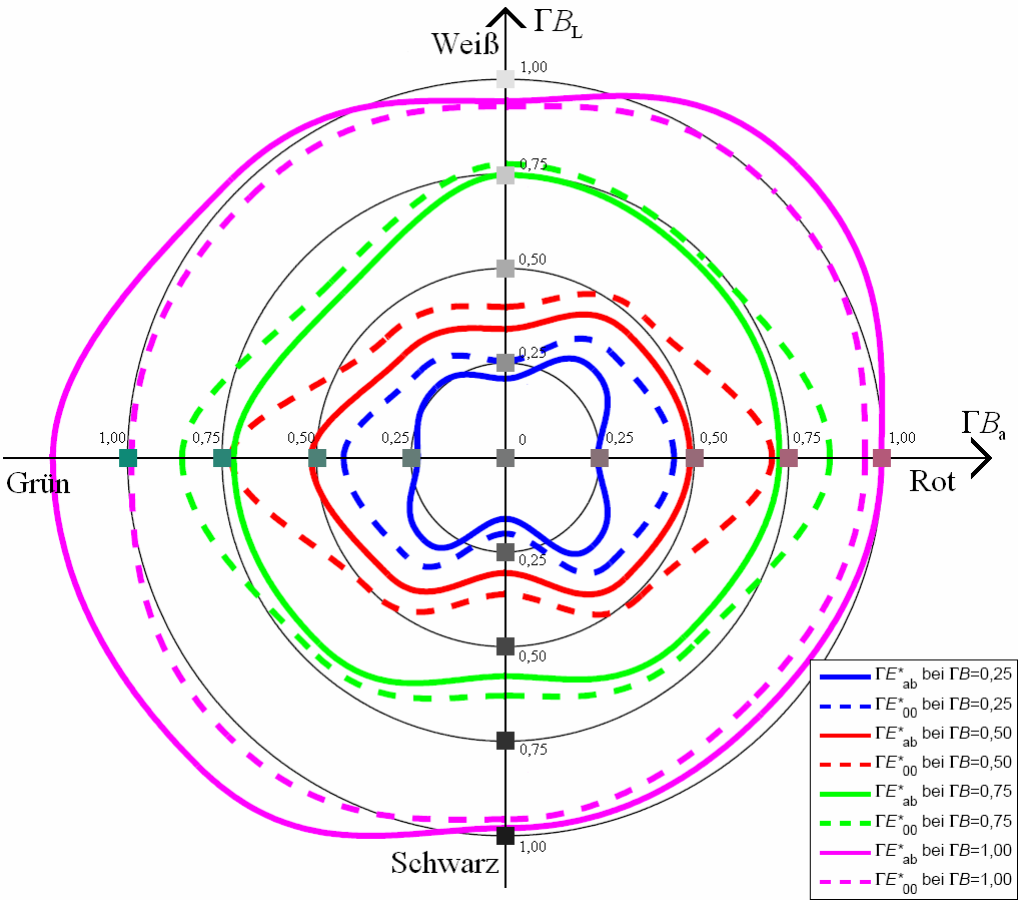

Bild 4.50 Darstellung der relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für ΓB für die Farben der Ebene ($L^*|a^*|0$) zur Referenzfarbe Mittelgrau (50|0|0)

Das Bild 4.50 zeigt die relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für die Farben der Ebene ($L^*|a^*|0$) zur mittelgrauen Farbe (50|0|0) für die vier relativen Farbunterschiede ΓB gleich 0,25, 0,50, 0,75 und 1,00. Bei der Veränderung der Helligkeit L^* zeigen die CIELAB-Farbabstände eine schlechtere Korrelation zu den Farbunterschieden als die CIEDE2000-Farbabstände. Gerade bei den Farben, die einen geringen Unterschied zum Mittelgrau haben, werden die

63 Die Werte der relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} sind aus den experimentell aufgenommenen Daten berechnet. Zur Vereinfachung der Berechnung wurden theoretische Annahmen gemacht. Diese Annahmen beeinflussen die Ergebnisse leicht, aber nicht entscheidend.

64 Bei den 2-Hauptachsen-Ebenen handelt es sich um die Ebene mit den Farben ($L^*|a^*|0$), ($L^*|0|b^*$) und ($50|a^*|b^*$).

Farbabstände als zu gering berechnet. Durch die V-Form der CIEDE2000-Formel werden die relativen Farbabstände ΓE^*_{00} bei kleineren Helligkeitsunterschieden etwas größer als die relativen Farbabstände ΓE^*_{ab}. Bei der Veränderung der Rot-Grün-Buntheit a^* der Farben zeigen die relativen CIELAB-Farbabstände ΓE^*_{ab} keinen großen Unterschied zu den relativen Farbunterschieden ΓB. Nur bei Farben im sehr grünlichen Bereich ($a^* < -30$) gibt es eine größere Abweichung. Die relativen CIEDE2000-Farbabstände ΓE^*_{00} haben nur bei den Farben mit einer größeren Buntheit ($C^*_{ab} > 30$) eine gute Korrelation zu den Farbunterschieden. Bei den anderen Farben sind die berechneten CIEDE2000-Farbabstände zu groß. Der Grund für die größere Abweichung ist die Veränderung von a^* zu a' bei der CIEDE2000-Formel sowie der Parameter S_C, der in Richtung der größeren Farbunterschieden hin zunimmt. Die Farbunterschiede, bei denen sich sowohl die Helligkeit L* als auch die Rot-Grün-Buntheit a* ändert, korrelieren je nach Änderung der Farbmaßzahlen besser mit der CIELAB- oder der CIEDE2000-Farbabstandsformel.

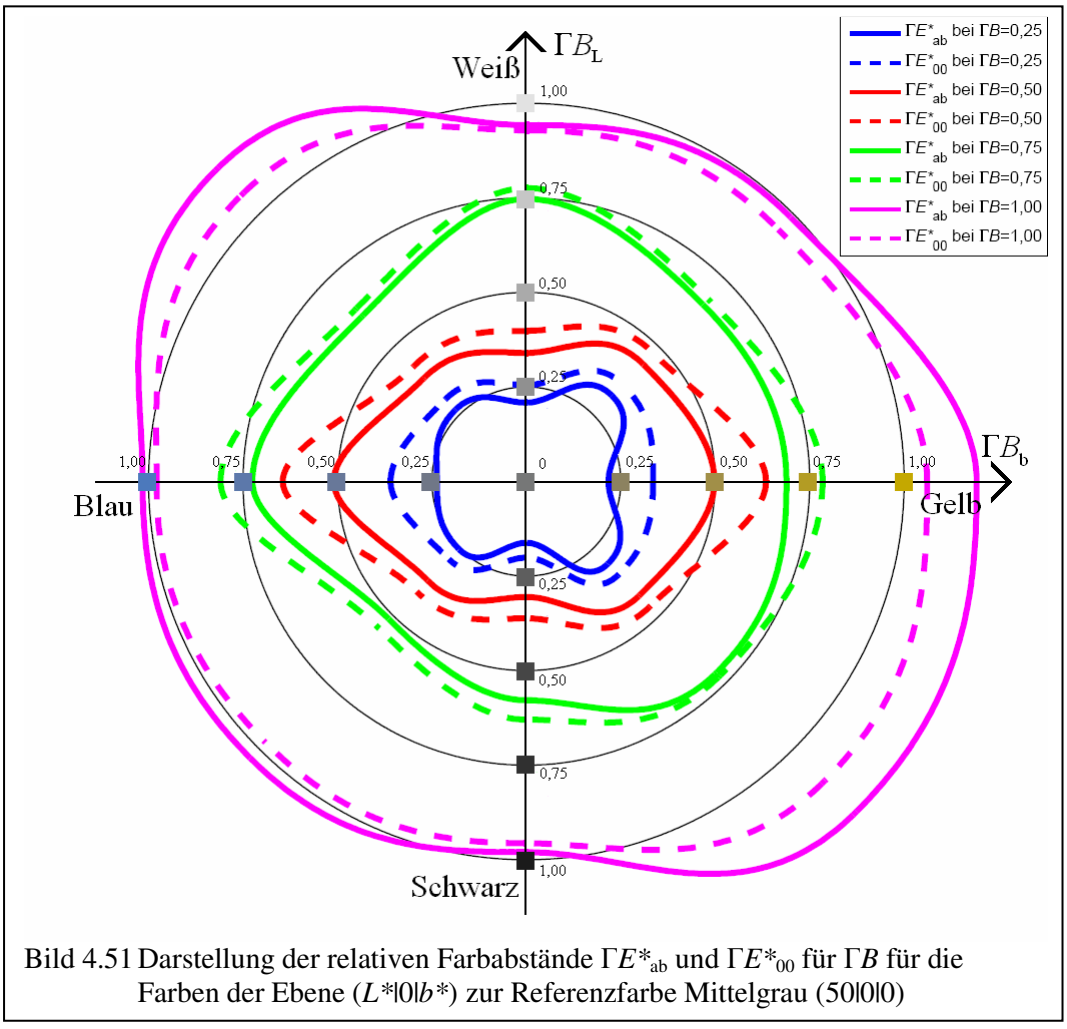

Bild 4.51 Darstellung der relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für ΓB für die Farben der Ebene ($L^*|0|b^*$) zur Referenzfarbe Mittelgrau (50|0|0)

Das Bild 4.51 zeigt die relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für die Farben der Ebene ($L^*|0|b^*$) zur mittelgrauen Farbe (50|0|0) für die vier relativen Farbunterschiede ΓB gleich 0,25, 0,50, 0,75 und 1,00. Die Korrelation zwischen Farbunterschied und Farbabstand bei der Veränderung der Helligkeit L^* verhält sich wie in der L^*/a^*-Ebene. Bei der Veränderung der Gelb-Blau-Buntheit b^* der Farben weisen die relativen CIELAB-Farbabstände ΓE^*_{ab} keinen großen Unterschied zu den relativen Farbunterschieden ΓB auf. Nur bei Farben im sehr gelblichen Bereich ($b^* > 30$) gibt es eine größere Abweichung. Die relativen CIEDE2000-Farbabstände ΓE^*_{00} haben nur bei den Farben mit einer größeren Buntheit ($C^*_{ab} > 30$) eine gute Korrelation zu den Farbunterschieden. Die Abweichungen sind etwas geringer als bei der

Veränderung von a^*, da b^* für die CIEDE2000-Formel nicht verändert wird. Der Grund für die Abweichung ist nur der Parameter S_C. Bei der gleichzeitigen Veränderung von L^* und b^* verhält sich die Korrelation zwischen Farbabstand und Farbunterschied je nach Veränderung der beiden Farbmaßzahlen anders. Wenn beide Farbmaßzahlen L^* und b^* um den gleichen Betrag vergrößert werden, sind die Farbabstände für die Farbunterschiede in der Nähe von Mittelgrau zu groß. Bei den größeren Farbunterschieden ist die Korrelation aber gut. Wenn beide Farbmaßzahlen L^* und b^* um den gleichen Betrag verkleinert werden, ist die Korrelation für die kleineren ($\Delta E^*_{ab} \leq 10$) und die größeren ($\Delta E^*_{ab} \geq 35$) Farbunterschiede gut. Bei den mittleren ($10 < \Delta E^*_{ab} < 35$) Farbunterschieden sind sowohl die CIELAB- als auch die CIEDE2000-Farbabstände zu klein. Wenn die Helligkeit L^* um den gleichen Betrag erhöht wie die Gelb-Blau-Buntheit b^* verringert wird und umgekehrt, sind die Farbabstände bei den mittleren Farbunterschieden (ΓB zwischen 0,50 und 0,75) zu klein, beziehungsweise bei den größeren ($\Gamma B = 1{,}00$) und den kleineren ($\Gamma B = 0{,}25$) Farbunterschieden sind sie etwas zu groß.

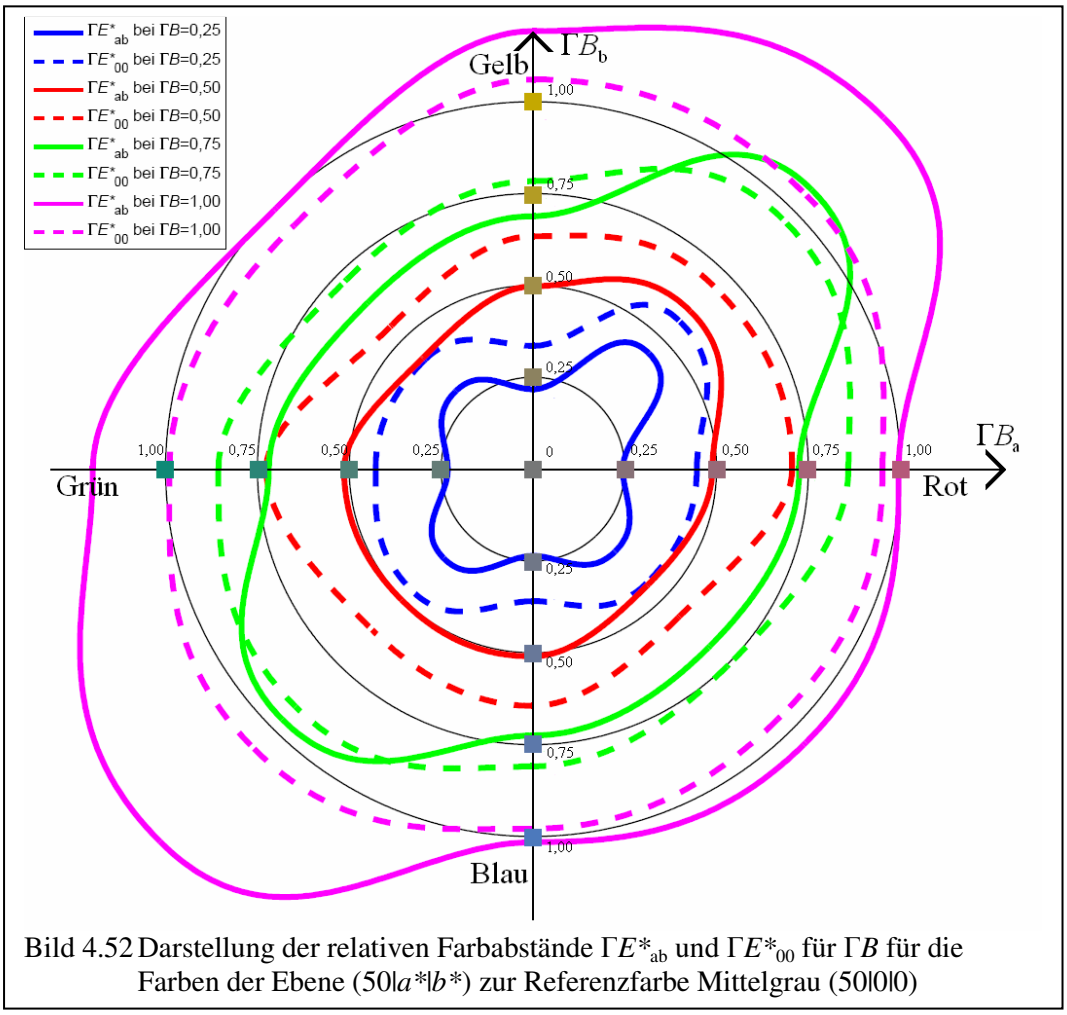

Bild 4.52 Darstellung der relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für ΓB für die Farben der Ebene (50|a^*|b^*) zur Referenzfarbe Mittelgrau (50|0|0)

Das Bild 4.52 zeigt die relativen Farbabstände ΓE^*_{ab} und ΓE^*_{00} für die Farben der Ebene (50|a^*|b^*) zur mittelgrauen Farbe (50|0|0) für die vier relativen Farbunterschiede ΓB gleich 0,25, 0,50, 0,75 und 1,00. Die Korrelation für die Veränderung der Rot-Grün-Buntheit a^* beziehungsweise der Gelb-Blau-Buntheit b^* wurden schon beschrieben. Wenn die beiden Farbmaßzahlen a* und b* um den gleichen Betrag verringert oder vergrößert werden, sind die berechneten Farbabstände generell zu groß. Die relativen CIELAB-Farbabstände ΓE^*_{ab} bei den relativen Farbunterschieden von $\Gamma B = 0{,}50$ und die relativen CIEDE2000-Farbabstände ΓE^*_{00} bei den relativen Farbunterschieden von $\Gamma B = 1{,}00$ am besten korrelieren. Wenn die Rot-Grün-Buntheit a^* um den gleichen Betrag erhöht wie die Gelb-Blau-Buntheit b^* verringert wird und umgekehrt, ist die Korrelation gut. Nur in der Nähe von Mittelgrau werden die Farbabstände zu

groß. Dabei ist der CIELAB-Farbabstand noch etwas geringer als der CIEDE2000-Farbabstand.

4.2.3 Große Farbunterschiede und deren Beschreibung mit ausgewählten Farbabstandsformeln

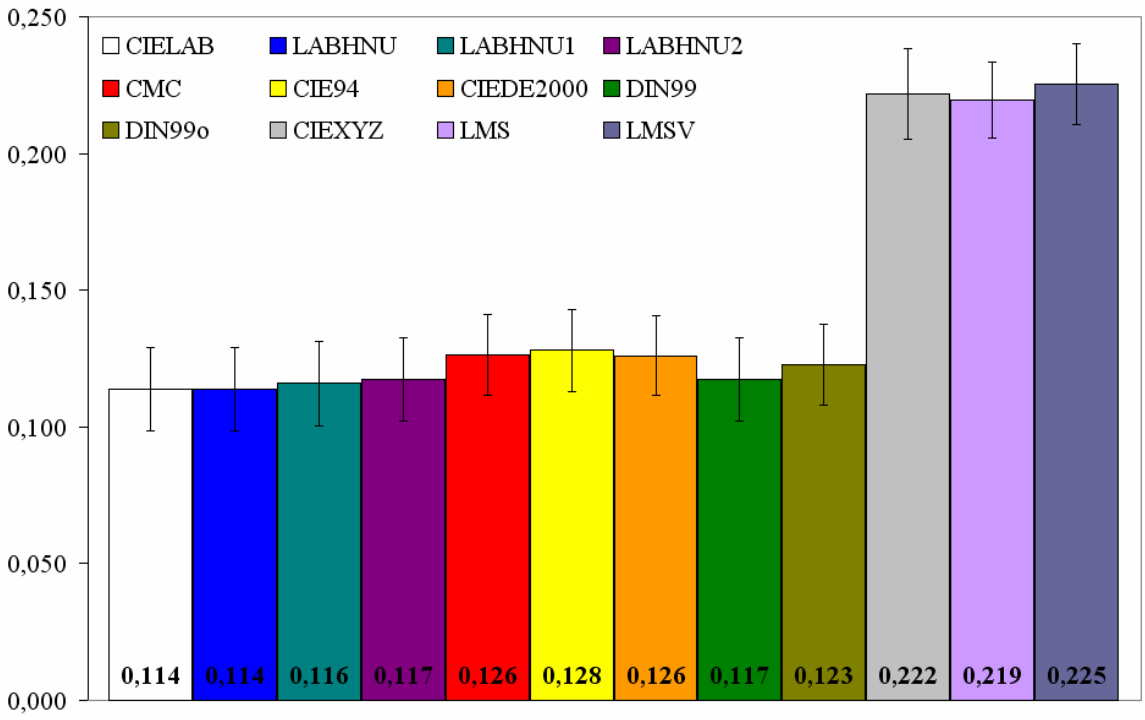

Bild 4.53 Durchschnittswerte von ωE^* der verschiedenen Farbabstandsformeln

Neben den CIELAB- und CIEDE2000-Farbabstandsformeln werden noch zehn weitere Farbabstandsformeln betrachtet und mit den visuellen Bewertungen verglichen: Es werden die LABHNU-, LABHNU1-, LABHNU2-, CMC-, CIE94-, DIN99-, und DIN99o-Farbabstandsformeln sowie die Vektorabstände in den CIEXYZ-, LMS- und LMSV-Farbräumen in den Vergleich mit einbezogen.

Der Vergleich der Gesamtdurchschnittswerte von ωE^* im Bild 4.53 zeigt, dass alle Farbabstandsformeln in einem sehr ähnlichen Wertebereich liegen. Die drei Vektorabstände hingegen liegen sehr viel weiter von den übrigen Werten entfernt und werden daher nicht für die weitere Auswertung berücksichtigt. Der große Unterschied bei den Vektorabständen entsteht, weil sie nur aus den Reflektionsgraden berechnet werden und nicht an das menschliche Sehen angepasst sind.

Die CIELAB-Farbabstandsformel hat den geringsten Gesamtdurchschnitt. Die Farbabstandsformeln CMC, CIE94 und CIEDE2000 sowie die DIN99o zeigen etwas größere Durchschnittswerte als die anderen Formeln, wobei der Wert bei der CIE94-Formel der größte ist. Die Durchschnittswerte für die Formeln LABHNU1, LABHNU2 und DIN99 liegen nur etwas über den Werten von CIELAB und LABHNU. Keine der Farbabstandsformeln ist signifikant besser als die anderen, da sich ihre Fehlertoleranzbereiche überschneiden.

Die folgende Tabelle 4.26 zeigt die Minimal- und Maximalwerte von ωE^* und die Referenzfarbe sowie die Farbveränderung, bei der sie auftreten. Die Schwankung von ωE^* ist der Maximalwert geteilt durch den Minimalwert.

Tabelle 4.26 Minimal- und Maximalwerte sowie die Schwankung von ωE^*

	Minimalwert		Maximalwert		Schwankung
CIELAB	0,028		0,233		8,5
	Mittelgrau	*b**	Türkisblau	*b**	
LABHNU	0,025		0,239		9,4
	Mittelgrau	*b**	Blaugrün	*a**	
LABHNU1	0,025		0,236		9,3
	Mittelgrau	*b**	Blaugrün	*a**	
LABHNU2	0,025		0,248		9,8
	Mittelgrau	*b**	Türkisblau	*b**	
CMC	0,040		0,256		6,4
	Himmelblau	*a**	Ziegelrot	*L**/*b**	
CIE94	0,045		0,249		5,5
	Himmelblau	*a**	Ockergelb	*L**	
CIEDE2000	0,043		0,279		6,4
	Himmelblau	*a**	Ziegelrot	*L**/*b**	
DIN99	0,042		0,274		6,6
	Himmelblau	*a**	Blaugrün	*a**	
DIN99o	0,041		0,278		6,9
	Himmelblau	*a**	Blaugrün	*a**	

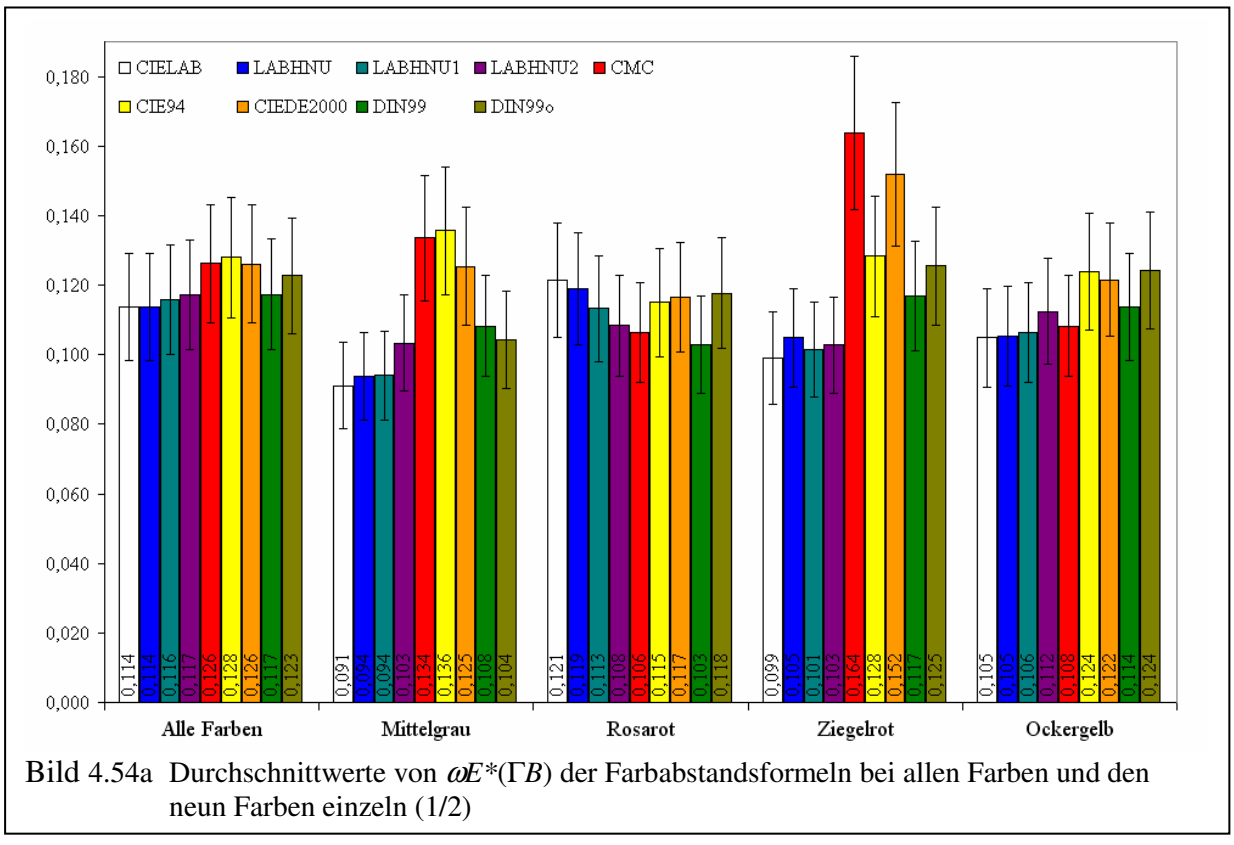

Bild 4.54a Durchschnittwerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ der Farbabstandsformeln bei allen Farben und den neun Farben einzeln (1/2)

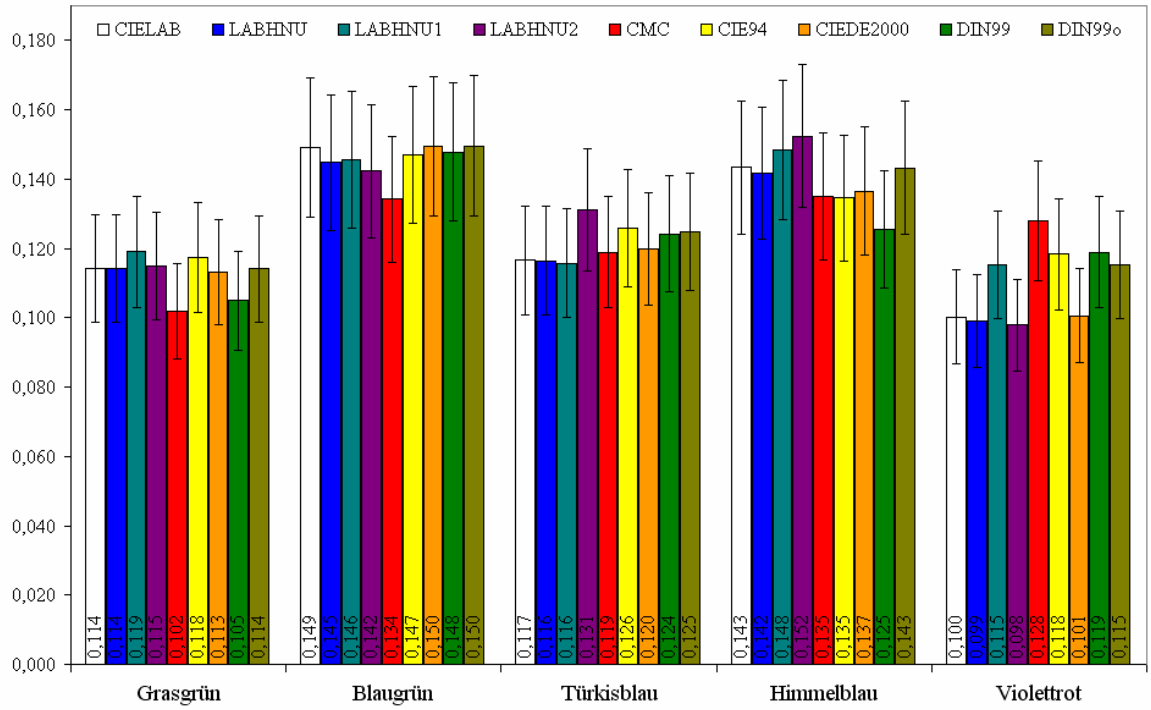

Bild 4.54b Durchschnittwerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ der Farbabstandsformeln bei allen Farben und den neun Farben einzeln (2/2)

Für eine genauere Betrachtung der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte werden die Durchschnittswerte der einzelnen Farbabstandsformeln bei den verschiedenen Farben und Farbveränderungen betrachtet. Die Bilder 4.54a und 4.54b zeigen die Durchschnittwerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ der neun Farbabstandsformeln und die Durchschnittswerte für alle Farben bei den neun verschiedenen Referenzfarben.

Die Farbabstandsformeln haben bei unterschiedlichen Farben ihre minimalen und maximalen Durchschnittswerte von $\omega E^*(\Gamma B)$. Bei Mittelgrau besitzen die Farbabstandsformeln CIELAB, LABHNU, LABHNU1 und DIN99o ihr Minimum, bei Violettrot LABHNU2 und CIEDE2000, bei Rosarot CIE94 und DIN99 sowie bei Grasgrün CMC. Ihre Maxima haben die Formeln CIELAB, LABHNU, CIE94, DIN99 und DIN99o bei Blaugrün, LABHNU1 und LABHNU2 bei Himmelblau sowie CMC und CIEDE2000 bei Ziegelrot. Es werden jetzt die Durchschnittswerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ bei jeder der neun Referenzfarben einzeln betrachtet und die Werte der verschiedenen Farbabstandsformeln analysiert.

- Mittelgrau (50|0|0)
  Die CIELAB-Formel weist bei dieser Farbe den geringsten Wert von $\omega E^*(\Gamma B)$ auf, aber die Formeln LABHNU und LABHNU1 liefern nur 3 % größere Werte. Die Formel von CIE94 hat den größten $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert (49 % größer als CIELAB) und die von CMC nur einen knapp kleineren (47 % größer als CIELAB). Die Werte von LABHNU2, DIN99 und DIN99o liegen zwischen den Extremwerten, wobei sie sich näher am Minimalwert befinden (~15 % größer als CIELAB).

- Rosarot (50|50|0)
  Bei dieser Farbe liegt das Minimum der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte bei der DIN99-Farbabstandsformel, die LABHNU2- und CMC-Formel haben 3 – 4 % größere Werte. Die CIELAB-Formel hat den größten Mittelwert von $\omega E^*(\Gamma B)$ (19 % größer als DIN99), aber auch die Werte für LABHNU, DIN99o, CIEDE2000 und CIE94 sind nur

1 – 5 % kleiner. Nur der Wert für die LABHNU1-Formel liegt weder im Bereich des Minimums noch des Maximums.

- Ziegelrot (50|35,36|35,36)
  Hier ist der $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert von CIELAB der kleinste und die Formeln von LABHNU, LABHNU1 und LABHNU2 haben 2 – 6 % höhere Werte. Die CMC-Formel hat den maximalen Durchschnittswert (66 % über CIELAB) und die CIEDE2000-Formel einen Wert im ähnlichen Bereich (54 % größer als CIELAB). Die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte von DIN99, DIN99o und CIE94 liegen zwischen den Extremwerten, wobei der Wert für die DIN99-Formel etwas geringer ist.

- Ockergelb (50|0|50)
  Auch bei dieser Farbe ist bei der CIELAB-Formel der geringste $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert vorhanden. Die Werte für die Formeln von LABHNU und LABHNU1 sind weniger als 1 % größer. Der Wert für die CMC-Formel ist 7 % größer. Die Werte für die CIE94- und DIN99-Formeln sind die Maximalwerte (18 % größer als CIELAB), der Wert für CIEDE2000 ist nur 2 % geringer. Die Werte für die Formeln von LABHNU2 und DIN99o liegen wieder zwischen den Extremwerten.

- Grasgrün (50|-35,36|35,36)
  Die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte für CMC und DIN99 sind hier geringer als alle anderen Werte, wobei der CMC-Wert noch 3 % kleiner ist. Die Formeln von LABHNU1 und CIE94 haben die maximalen Werte bei dieser Farbe, ansonsten liegen die Werte der anderen Formeln alle im selben Bereich. Zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert liegen nur 17 % Unterschied.

- Blaugrün (50|-50|0)
  Bei dieser Farbe haben alle Farbabstandsformeln einen ähnlich hohen Wert, der auch bei vielen Formeln höher liegt als bei allen anderen Farben. Nur die CMC-Farbabstandsformel hat einen geringeren $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert. Während die anderen $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte nur um 5 % schwanken, ist $\omega E^*_{CMC}(\Gamma B)$ 11 % geringer als der Maximalwert.

- Türkisblau (50|-35,36|-35,36)
  Die LABHNU1-Farbabstandsformel hat den geringsten $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert. Die Werte für die LABHNU- und CIELAB-Formeln sind weniger als 1% größer. Die Werte für die Formeln von CMC und CIEDE2000 liegen ebenfalls nur 3 % über dem Bereich des Minimums. Der Wert von LABHNU2 ist hingegen der größte Durchschnittswert (13 % über LABHNU1), während die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte von CIE94, DIN99 und DIN99o in der Mitte liegen (~7 % über LABHNU1).

- Himmelblau (50|0|-50)
  Hier hat die DIN99-Farbabstandsformel den geringsten $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert und die LABHNU2-Formel den größten (22 % größer DIN99). Die Durchschnittswerte der Formeln nach CIELAB, LABHNU, LABHNU2 sowie DIN99o sind nur 3 – 7 % kleiner als das Maximum, während die Werte für CMC, CIE94 und CIEDE2000 im mittleren Bereich liegen.

- Violettrot(50|35,36|-35,36)
  Das Maximum der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte liegt bei der CMC-Farbabstandsformel, keine andere Formel hat einen Wert in diesem Bereich. Dafür liegen die CIELAB-, LABHNU- und CIEDE2000-Formeln nur 1 – 3% vom Minimum entfernt, das genau bei der LABHNU2-Formel liegt (31 % kleiner als CMC). Die Formeln LABHNU1, CIE94, DIN99 und DIN99o liegen annähernd in der Mitte zwischen den Extremwerten.

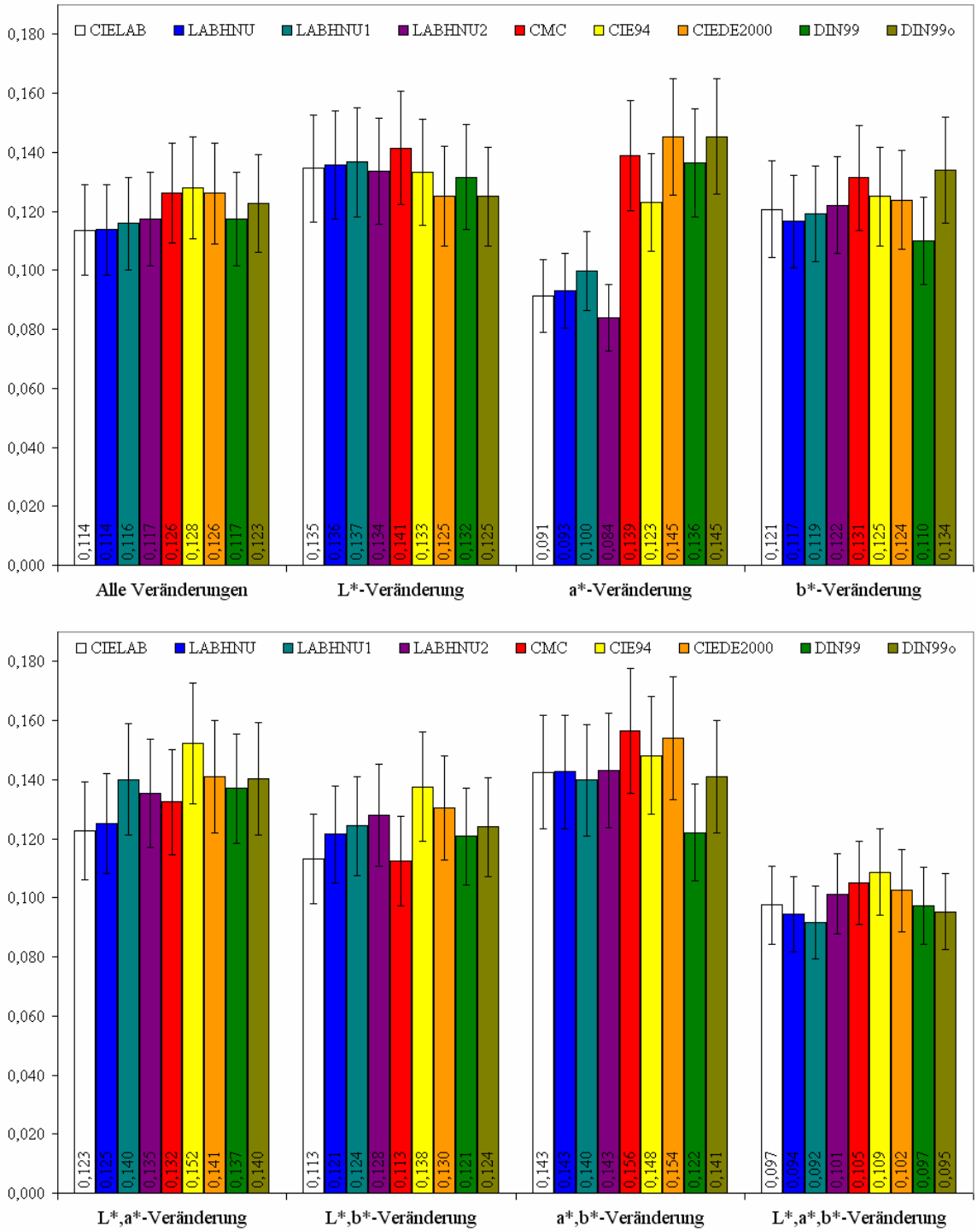

Bild 4.55 Durchschnittliche $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte der Farbabstandsformeln bei den sieben Farbveränderungen

Das Bild 4.55 zeigt die Durchschnittswerte bei den verschiedenen Farbveränderungen.

Auch bei den durchschnittlichen $\omega E^*(\Gamma B)$-Werten der verschiedenen Farbveränderungen werden die maximalen und minimalen Mittelwerte der einzelnen Farbabstandsformeln betrachtet. Diesmal liegen die Extremwerte bei ähnlichen Farbveränderungen. So liegen die Minimalwerte für die Formeln CIELAB, LABHNU und LABHNU2 bei der a^*-Veränderung. Für die restlichen Formeln liegt der Minimalwert bei der Veränderung aller drei Farbmaßzahlen. Für diese Veränderungen liegen alle Formeln bei einem geringen $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert. Die Maximalwerte der CIELAB-, LABHNU-, LABHNU2-, CMC- und CIEDE2000-Formeln liegen bei der a^*/b^*-Veränderung, für die Formeln LABHNU1, CIE94 und DIN99 liegen die maximalen Werte bei der L^*/a^*-Veränderung. Nur für die DIN99o-Formel liegt das Maximum bei der a^*-Veränderung. Es folgt eine Betrachtung der sieben verschiedenen Veränderungen der Farbmaßzahlen im Detail.

- Veränderung von L^*
  Bei dieser Veränderung liegen die Minimalwerte bei den Formeln CIEDE2000 und DIN99o, während der Maximalwert bei der CMC-Formel vorliegt (13 % größer als CIEDE2000/DIN99o). Die übrigen $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte liegen dazwischen, wobei LABHNU2 den größten (10 % größer als CIEDE2000/DIN99o) und DIN99 den geringsten Wert (6 % größer als CIEDE2000/DIN99) aufweist.

- Veränderung von a^*
  Bei dieser Veränderung gibt es den größten Unterschied zwischen dem Minimal- und dem Maximalwert. Während LABHNU2 den niedrigsten $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert hat, haben die Formeln CIEDE2000 und DIN99o ein 73 % höheren Wert. Die Werte der CIELAB- und LABHNU-Formeln liegen noch in der Nähe des Minimums (10 % größer als LABHNU2), genauso wie der Wert von LABHNU1, der 19 % größer ist. Die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte von CMC und DIN99 befinden sich 7 % unterhalb des Maximums.

- Veränderung von b^*
  Während die DIN99-Formel hier den minimalen $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert hat, ist ihre optimierte Variante DIN99o 22 % größer und besitzt somit den maximalen Wert. Die CMC-Formel liegt 2 % unterhalb des Maximums. Die übrigen Werte befinden sich alle nahe beieinander im Mittelbereich, wobei LABHNU einen etwas geringeren und CIE94 einen etwas höheren Wert hat.

- Veränderung von L^* und a^*
  Der $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert von CIELAB ist am kleinsten, aber die LABHNU-Formel hat nur einen 2 % größeren Wert. Der maximale Wert liegt bei der Formel von CIE94, 24 % über dem Wert von CIELAB. Die anderen $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte von LABHNU2, CMC, DIN99, LABHNU1, CIEDE2000 und DIN99o befinden sich im Bereich 7 – 15 % über CIELAB.

- Veränderung von L^* und b^*
  Diese Veränderung hat die Minimalwerte bei den Formeln CIELAB und CMC und den Maximalwert bei der CIE94-Formel (22% über dem Minimalwert). Die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte der CIEDE2000- und LABHNU2-Formel liegen im Bereich von 15 % über dem Minimalwert. Die übrigen Formeln zeigen einen Wert im mittleren Bereich, DIN99o und LABHNU1 im oberen, und LABHNU und DIN99 landen im unteren Mittelfeld.

- Veränderung von a^* und b^*
  Das Minimum ist 15 % von den anderen Werten entfernt und gehört zur DIN99-Formel vor. Der maximale Wert der CMC-Formel liegt 28 % über dem Minimalwert und der $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert der CIEDE2000-Formel ist nur 1 % geringer. Die Werte von CIELAB, LABHNU und LABHNU1 liegen bei ungefähr gleichen Werten zwischen den Extremen. Der Wert von CIE94 liegt etwas tiefer, während die Werte von LABHNU2 und DIN99o etwas höher liegen.

- Veränderung von L^*, a^* und b^*
  Bei dieser Veränderung sind sämtliche $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte der verschiedenen Farbabstandsformeln sehr gering. Das Minimum liegt bei LABHNU2, die Werte von LABHNU und DIN99o sind 3 % höher. Die CIE94-Formel weist den maximalen Wert auf (18 % über dem Minimum). Die Werte von CIELAB und DIN99 liegen im unteren Bereich und die Werte von LABHNU2, CMC und CIEDE2000 im oberen. Der Wert von CMC ist unter den letzt genannten der höchste.

In den folgender Tabelle sind die mittleren $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte für die CIELAB-Farbabstandsformel und deren Differenz zu den mittleren $\omega E^*(\Gamma B)$-Werten der anderen Farbabstandsformeln angegeben. Dabei zeigt die Tabelle 4.27 die Durchschnittswerte über alle Referenzfarben. In den Zeilen stehen die verschiedenen Änderungen der Farbmaßzahlen. Zur besseren Übersicht sind die positive Differenzen Rot und die negativen Blau dargestellt. Eine rote Zahl zeigt an, dass die Farbabstandsformel für diesen Mittelwert schlechter mit den Farbunterschieden korreliert als die CIELAB-Formel, bei einer blauen Zahl ist die verwendete Farbabstandsformel besser geeignet.

Tabelle 4.27 Mittelwerte von $\omega E^*(\Gamma B)$ für die CIELAB-Farbabstandsformel und deren Differenzen zu den mittleren $\omega E^*(\Gamma B)$-Werten der anderen Farbabstandsformeln im Mittel über neun Referenzfarben

	CIELAB	LABHNU	LABHNU1	LABHNU2	CMC	CIE94	CIEDE2000	DIN99	DIN99o
Alle	0,114	0,000	0,002	0,004	0,012	0,014	0,012	0,004	0,009
L^*	0,135	0,001	0,002	-0,001	0,007	-0,001	-0,010	-0,003	-0,010
a^*	0,091	0,002	0,008	-0,008	0,047	0,031	0,054	0,045	0,054
b^*	0,121	-0,004	-0,002	0,001	0,011	0,004	0,003	-0,011	0,013
L^*/a^*	0,123	0,002	0,017	0,013	0,010	0,029	0,018	0,014	0,018
L^*/b^*	0,113	0,008	0,011	0,015	-0,001	0,025	0,017	0,008	0,011
a^*/b^*	0,143	0,000	-0,003	0,000	0,014	0,006	0,011	-0,020	-0,002
$L^*/a^*/b^*$	0,097	-0,003	-0,006	0,004	0,008	0,011	0,005	0,000	-0,002

Die Tabelle 4.27 zeigt die Differenzen der Werte, die im Bild 4.54 betrachtet wurden, gegenüber der CIELAB-Farbabstandsformel. Man sieht deutlich, dass die Werte der CIELAB-Formel bei den meisten Farbveränderungen am niedrigsten sind. Bei manchen Veränderungen zeigen zwar einige Farbabstandsformeln einen geringeren Unterschied zwischen visueller Bewertung und theoretischer Berechnung, aber im Durchschnitt weist die CIELAB-Formel die geringsten Unterschiede zwischen den Bewertungen der Probanden und den berechneten Daten auf. Die CIELAB-Farbabstandsformel ist somit die Formel, die am besten für die Betrachtung großer Farbabstände geeignet ist. Dies ist eine weitere Bestätigung der Ergebnisse einer früheren Arbeit des Autors. [Kit05]

- **Zusammenfassung**

Unter Einbezug aller betrachten Farbunterschiede korreliert die Beschreibung mit der CIELAB-Farbabstandsformel von allen untersuchten Formeln am besten mit den großen Farbunterschieden. Sie ist aber nicht signifikant besser (Bild 4.52) als die anderen Farbabstandsformeln, da sich die Fehlertoleranzbereiche von allen untersuchten Farbabstandsformeln überschneiden. Die Korrelation zwischen den Farbunterschieden und den Farbabständen ist von der Referenzfarbe und der Änderung der Farbmaßzahlen abhängig. Die Schwankungen gehen von einem Faktor 5,5 bei der CIE94-Formel bis zu einem Faktor 9,8 bei der LABHNU2-Formel (Tabelle 4.28). Es kann daher keine Aussage darüber getroffen werden, aufgrund welcher Parameter eine Farbabstandsformel besser mit den Farbunterschieden korreliert als eine andere.

4.2.4 Optimierungsmodelle bei den großen Farbunterschieden

Es werden in beide Formen (LAB und LCH) der CIELAB-Farbabstandsformeln neue Parameter eingefügt, da durch die unterschiedliche Berechnung der beiden Formen auch unterschiedliche Verbesserungen eintreten könnten. In die Farbabstandsformel, die die Helligkeitsdifferenz ΔL^*, die Rot-Grün-Differenz Δa^* und die Gelb-Blau-Differenz Δb^* benutzt, werden die Parameter l_{o1}, a_o und b_o eingefügt, so dass sich folgende Farbabstandsformel ergibt:

$$\Delta E^*_{\mathrm{LABn}} = \sqrt{l_{o1} \cdot (\Delta L^*)^2 + a_o \cdot (\Delta a^*)^2 + b_o \cdot (\Delta b^*)^2} \qquad \text{(Gl. 4.58)}$$

In die Farbabstandsformel, die die Helligkeitsdifferenz ΔL^*, die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verwendet, werden die Parameter l_{o2}, c_o und h_o eingefügt, so dass sich folgende Farbabstandsformel ergibt:

$$\Delta E^*_{\mathrm{LCHn}} = \sqrt{l_{o2} \cdot (\Delta L^*)^2 + c_o \cdot (\Delta C^*)^2 + h_o \cdot (\Delta H^*)^2} \qquad \text{(Gl. 4.59)}$$

Es wurde überprüft, bei welchen Werten für die Parameter l_{o1}, a_o und b_o sowie l_{o2}, c_o und h_o sich ein Minimum in den $\omega E^*(\Gamma B)$-Werten ergibt. Der $\omega E^*(\Gamma B)$-Wert ist 0,113671, wenn jeweils alle drei Parameter bei Eins liegen. Die Tabelle 4.28 zeigt die Parameter und den dazugehörigen Wert von $\omega E^*(\Gamma B)$.

Tabelle 4.28 Parameter der beiden Angleichungsmodelle und ihr ωE*(ΓB)-Mittelwert

Angleichung der $\Delta E^*_{\mathrm{LABn}}$-Farbabstandsformel			
l_{o1}	a_o	b_o	$\omega E^*(\Gamma B)$-Wert
1,355	1,044	0,834	0,113028
Angleichung der $\Delta E^*_{\mathrm{LCHn}}$-Farbabstandsformel			
l_{o2}	c_o	h_o	$\omega E^*(\Gamma B)$-Wert
2,011	1,305	1,404	0,113032

Die Verbesserung der Angleichung ist in beiden Fällen geringer als 1 %. Es zeigt sich in beiden Fällen, dass der Parameter der Helligkeit der größte der drei ist.

Es wurden außerdem die Parameter K_L, K_C und K_H bei der CIEDE2000-Farbabstandsformel und die Parameter k_E und k_{CH} bei der DIN99- und DIN99o-Farbabstandsformel so verändert, dass sich die berechneten Werte der Formeln besser an die visuellen Bewertungen der Testpersonen angleichen. Die Tabelle 4.29 zeigt die neuen Parameter sowie den alten und den neuen Durchschnitt der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte.

Tabelle 4.29 Parameter der optimierten CIEDE2000-, DIN99- und DIN99o-Farbabstandsformel sowie ihrer $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte

Optimierung der CIEDE2000-Farbabstandsformel				
K_L	K_C	K_H	$\omega E^*(\Gamma B)_{alt}$	$\omega E^*(\Gamma B)_{neu}$
1,050	0,959	0,670	0,126055	0,123747
Optimierung der DIN99-Farbabstandsformel				
k_E	k_{CH}		$\omega E^*(\Gamma B)_{alt}$	$\omega E^*(\Gamma B)_{neu}$
0,003	0,814		0,117355	0,116213
Optimierung der DIN99o-Farbabstandsformel				
k_E	k_{CH}		$\omega E^*(\Gamma B)_{alt}$	$\omega E^*(\Gamma B)_{neu}$
0,291	1,128		0,122732	0,122258

Während sich die $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte der DIN99 und DIN99o durch die Optimierung weniger als 1 % verändert haben, zeigt der Mittelwert der $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte bei der CIEDE2000-Formel eine Verbesserung von 2 %. Beide durchschnittlichen Werte von $\omega E^*(\Gamma B)$ sind dennoch größer als der Wert der unveränderten CIELAB-Formel. Hiermit ist noch einmal gezeigt, dass die CIELAB-Farbabstandsformel sich von den untersuchten Formeln am besten für die Beschreibung großer Farbunterschiede eignet. Durch die Optimierung der Farbabstandsformeln wird keine Verbesserung erreicht.

Es wird eine neue Farbabstandsformel entwickelt, die die Helligkeitsdifferenz ΔL^*, die Rot-Grün-Differenz Δa^* und die Gelb-Blau-Differenz Δb^* jeweils in Verbindung mit den Farbmaßzahlen der beiden Farben setzt. Dieser Farbabstand wird mit ΔE^*_{neu} bezeichnet. Es ergibt sich folgende Formel:

$$\Delta E^*_{neu} = \sqrt{(\Delta L^*_{neu})^2 + (\Delta a^*_{neu})^2 + (\Delta b^*_{neu})^2} \qquad \text{(Gl. 4.60)}$$

Die Werte für ΔL^*_{neu}, Δa^*_{neu} und Δb^*_{neu} werden wie folgt berechnet:

$$\Delta L^*_{neu} = \frac{|L^*_0 - L^*_1|}{1 + p_{L1} \cdot (L^*_0 - L^*_1) + p_{L2} \cdot \overline{L^*} + p_{L3} \cdot \overline{a^*} + p_{L4} \cdot \overline{b^*}} \qquad \text{(Gl. 4.61)}$$

$$\Delta a^*_{neu} = \frac{|a^*_0 - a^*_1|}{1 + p_{a1} \cdot (a^*_0 - a^*_1) + p_{a2} \cdot \overline{L^*} + p_{a3} \cdot \overline{a^*} + p_{a4} \cdot \overline{b^*}} \qquad \text{(Gl. 4.62)}$$

$$\Delta b^*_{neu} = \frac{|b^*_0 - b^*_1|}{1 + p_{b1} \cdot (b^*_0 - b^*_1) + p_{b2} \cdot \overline{L^*} + p_{b3} \cdot \overline{a^*} + p_{b4} \cdot \overline{b^*}} \qquad \text{(Gl. 4.63)}$$

Die Indizes 0 und 1 stehen wieder für die Referenz und die Probe. Bei $\overline{L^*}$, $\overline{a^*}$ und $\overline{b^*}$ handelt es sich um den Mittelwert der jeweiligen Farbmaßzahl der Farbmuster. Dabei wurde der Mittelwert so gewählt, dass sich negative und positive Werte der Farbmaßzahlen a^* und b^* aufheben. Damit soll gewährleistet sein, dass sich der Farbabstand anders verhält, wenn er im grünen oder roten Bereich des CIELAB-Farbraumes liegt.

Es ergibt sich ein Wert von 0,100228 für $\omega E^*(\Gamma B)$ unter Verwendung der in Tabelle 4.30 angegebenen Parameter, der über 11 % besser ist als für die CIELAB-Farbabstandsformel.

Tabelle 4.30 Normierte Parameter der neuen Farbabstandsformel

p_{L1}	0,012655	p_{a1}	0,003241	p_{b1}	-0,000632
p_{L2}	0,042361	p_{a2}	0,014981	p_{b2}	0,002501
p_{L3}	0,029229	p_{a3}	0,000557	p_{b3}	0,007139
p_{L4}	0,021822	p_{a4}	-0,001231	p_{b4}	0,002136

Da die Parameter p_{Lj} (j = 1, 2, 3, 4) die größten Werte haben, geht die Farbmaßzahldifferenz ΔL^* am geringsten in den Farbabstand ein. Die Differenz Δb^* wird in dieser Farbabstandsformel ΔE^*_{neu} am stärksten berücksichtigt, da die Parameter p_{bj} (j = 1, 2, 3, 4) im Durchschnitt die kleinsten Werte haben. Durch die Parameter p_{i1} (i = L, a, b) wird der Einfluss bestimmt, den Richtung der Veränderung der Farbmaßzahl hat. Bei der Veränderung von L^* zeigt der positive Faktor an, dass die Farbmuster, die dunkler als die Referenzfarbe sind, einen größeren Farbunterschied haben als die helleren Farbmuster. Bei der Veränderung von a^* bedeutet der positive Faktor, dass die Farbmuster, die grünlicher als die Referenzfarbe sind, einen größeren Farbunterschied haben als die rötlichen Farbmuster. Bei der Veränderung von b^* bedeutet der negative Faktor, dass die Farbmuster, die gelblicher als die Referenzfarbe sind, einen größeren Farbunterschied haben als die bläulichen Farbmuster.

Wie aus den Werten in der Tabelle 4.32 ersichtlich, hat bei der Helligkeitsdifferenz ΔL^* der Mittelwert der Helligkeit L^* den größten Einfluss. Der Parameter p_{L4} ist beim mittleren Wert der Farbmaßzahl a^* etwas kleiner als der Parameter p_{L3}. Der positive Wert des Parameters p_{L4} bedeutet, dass bei roten Farbmustern die Helligkeit einen stärkeren Einfluss auf den empfundenen Farbunterschied hat als bei grünen. Der Parameter p_{L5} ist noch kleiner. Hier gilt, dass bei gelben Proben die Helligkeit einen größeren Einfluss auf den empfundenen Farbunterschied hat als bei blauen. Die Richtung der Helligkeitsveränderung hat den geringsten Einfluss auf die Größe des empfundenen Farbunterschiedes. Sie zeigt nur, dass bei dunkleren Proben der empfundene Farbunterschied etwas größer ist als bei hellen.

Auch bei der Rot-Grün-Differenz Δa^* hat der Mittelwert der Helligkeiten den größten Einfluss auf die Größe des Farbabstandes ΔE^*_{neu}. Diesmal hat der Mittelwert der Farbmaßzahl b^* einen größeren Einfluss als der Mittelwert der Farbmaßzahl a^*. Der negative Wert des Parameters p_{a5} bedeutet, dass bei bläulichen Farbmustern eine Veränderung von a^* einen größeren Einfluss auf den empfunden Farbunterschied hat. Der Einfluss der mittleren Farbmaßzahl a^* ist sehr gering. Einen größeren Einfluss hat eine Veränderung des Farbmusters ins Grünliche.

Der empfundene Farbunterschied hängt bei der Gelb-Blau-Differenz Δb^* vor allem vom Mittelwert der Farbmaßzahl a^* ab (siehe Parameter p_{b4}). Die Parameter p_{b3} und p_{b5}, die den Einfluss vom Mittelwert der Farbmaßzahlen L^* und b^* bestimmen, sind hingegen etwas kleiner. Der Parameter p_{b2} ist sehr gering und negativ, das heißt, dass eine Veränderung ins Gelbliche den empfundenen Farbunterschied etwas stärker beeinflusst.

4.3 Vergleich der Probandendaten

Die Gruppe der vierzig Probanden wird zunächst ohne Auswahlkriterien zusammengestellt. Erst nachträglich werden zur Unterteilung Eigenschaften ausgewählt, die sich bei Betrachtung der Gesamtgruppe als sinnvoll anbieten. Die Unterscheidung nach Geschlecht führt zu zwei

Untergruppen annähernd gleicher Größe (17 Frauen, 23 Männer). Bei einer Unterscheidung nach dem Alter lassen sich durch Teilung in eine Altersgruppe ≤ 23 Jahre und eine zweite mit Probanden älter als 23 Jahre zwei Untergruppen gleicher Größe (20 : 20) herstellen. Zusätzlich wird bei der Auswertung eine Unterscheidung nach Probanden ≤ 30 Jahre und > 30 Jahre und auch ≤ 50 Jahre und > 50 Jahre berücksichtigt. Diese zwei Varianten ergeben zwar keine vergleichbar großen Untergruppen und lassen keinen aussagekräftigen Vergleich zu. Sie sollen jedoch dazu dienen, eine mögliche Tendenz zu erfassen.

Zuerst werden die Vergleichsdaten für die Schwellenuntersuchung betrachtet. Dabei zeigt die Tabelle 4.31 die durchschnittlichen Werte von ΔE^*_{ab} der einzelnen Farbfilter bei einer Unterteilung der Probandengruppe nach dem Geschlecht. Die Tabelle 4.32 zeigt die durchschnittlichen Werte von ΔE^*_{ab} für die Aufteilung der Probanden nach dem Kriterium Alter ≤ bzw. > 23 Jahre.

Tabelle 4.31 Mittelwert von ΔE^*_{ab} bei Unterteilung der Probanden nach ihrem Geschlecht

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
weiblich	0,296	0,376	0,856	0,246
männlich	0,285	0,362	0,763	0,214
Quotient	1,038	1,039	1,123	1,152

Aus der Tabelle 4.31 sieht man, dass die Farbschwellen für die männlichen Probanden 9 % geringere Farbabstände haben als für die weiblichen. Dabei ist der Unterschied bei den roten und grünen Filtern sehr gering (~ 4 %), bei den anderen beiden Farbveränderungen etwas größer (12 – 15 %). Zur Verdeutlichung wird der Quotient aus den Mittelwerten der weiblichen und männlichen Probanden angegeben.

Tabelle 4.32 Mittelwert von ΔE^*_{ab} mit der Altersunterteilung ≤ bzw. > 23 Jahren

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
23 Jahre und jünger	0,246	0,309	0,669	0,185
über 23 Jahre	0,342	0,445	0,951	0,279
Quotient	0,720	0,696	0,704	0,662

Wie erwartet zeigt die Tabelle 4.32, dass die Farbschwellen für die ältere Probandengruppe 30 % größere Farbabstände haben. Die Unterschiede sind somit deutlich größer als bei der Geschlechtsunterscheidung. Bei der Altersunterteilung ≤ bzw. > 23 Jahren ist der Unterschied zwischen den Farbabständen für die Farbschwellen bei allen Filtereinstellungen ungefähr gleich. Der Quotient aus den Mittelwerten für alle Probanden verdeutlicht, dass der Unterschied beim blauen und grünen Filter ungefähr gleich ist, während er beim roten etwas kleiner und bei der Veränderung ohne Filter etwas größer ist.

Das Durchschnittsalter der weiblichen Probanden ist um 4,5 Jahre höher als das der männlichen. Es ist also zu berücksichtigen, dass die Fähigkeit zur Schwellenerkennung bei den weiblichen Probanden durch den höheren Altersdurchschnitt dieser Gruppe etwas schlechter ist. Es ist demnach möglich, dass die Fähigkeit zur Schwellenerkennung für die roten und grünen Farbveränderungen bei den Frauen sogar besser ist, sofern Männer und Frauen im gleichen Alter sind.

Die Tabellen 4.33 und 4.34 zeigen noch einmal, wie sich die Fähigkeit zur Schwellenerkennung mit dem Alter verschlechtert. Wegen des Größenunterschieds der jeweiligen Untergruppen bei Anwendung des Kriteriums ≤ und > 30 Jahre bzw. ≤ und > 50

Jahre wurden die Tabelleninhalte mit allen Daten berechnet und sind im statistischen Sinn jedoch nicht aussagekräftig.[65]

Tabelle 4.33 Mittelwert von ΔE^*_{ab} mit der Altersunterteilung ≤ bzw. > 30 Jahren

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
30 Jahre und jünger	0,296	0,374	0,781	0,229
über 30 Jahre	0,396	0,522	1,177	0,307

Tabelle 4.34 Mittelwert von ΔE^*_{ab} mit der Altersunterteilung ≤ bzw. > 50 Jahren

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
50 Jahre und jünger	0,304	0,382	0,810	0,232
über 50 Jahre	0,430	0,594	1,310	0,365

In der Tabelle 4.35 befinden sich die Mittelwerte von $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$ für die vier gewählten Vergleichsgruppen der Probanden. Bei dieser Untersuchung sind die $\omega E^*_{ab}(\Gamma B)$-Werte für die männlichen Personen um 10 % kleiner als für die weiblichen. Der CIELAB-Farbraum ist somit für die visuellen Farbunterschiede, die von den männlichen Probanden gesehen werden, besser geeignet. Beim Vergleich der Testpersonen ≤ und > 23 Jahren sind die Mittelwerte ungefähr gleich groß, der Wert für die älteren Probanden ist 5 % geringer als für die jüngeren. Bei der Unterscheidung der Probanden nach den anderen beiden Altersklassen zeigt sich hingegen wieder, dass die Farbempfindungen der älteren Probanden schlechter durch die CIELAB-Farbabstandsformel wiedergegeben werden. Der Unterschied ist bei den Probanden über und unter 50 Jahren am größten. Es scheint so, als seien die Werte der Personen über 30 und unter 50 sogar etwas geringer als die Werte der Personen unter 30, denn der Mittelwert der Personen unter 50 ist geringer als der Mittelwert der Personen unter 30.

Tabelle 4.35 $\omega E^*(\Gamma B)$-Werte für die unterschiedlichen Vergleichsgruppen der Probanden

weiblich	0,123	≤ 23 Jahre	0,119	≤ 30 Jahre	0,116	≤ 50 Jahre	0,115
männlich	0,111	> 23 Jahre	0,113	> 30 Jahre	0,126	> 50 Jahre	0,139

[65] Bei der Verwendung aller Daten werden die Mittelwerte durch das Einbeziehen der Ausreißer verfälscht. Deshalb sind die Daten statistisch nicht aussagekräftig.

Kapitel 5

Weitere Untersuchungen

Neben den Untersuchungen der Farbschwellen und der großen Farbunterschiede wurden noch zwei weitere Experimente durchgeführt. Zum einen ein Skalierungsexperiment und zum anderen eine Farbschwellenuntersuchung mit geometrischen Abständen zwischen den Proben. Beide Experimente wurden aber nicht so umfangreich durchgeführt wie die beiden Hauptuntersuchungen dieser Arbeit. Der Versuchsaufbau ist bei beiden Experimenten der gleiche wie bei der Farbschwellenuntersuchung, welcher im Kapitel 3.3 erläutert wird.

5.1 Skalierungsexperiment

Diese Untersuchung wird für sieben Farbmuster[66] durchgeführt, die in der Tabelle 5.1 aufgeführt sind. Es wird nur eine Farbveränderung untersucht, bei der sich die Helligkeit ändert, das heißt ohne Farbfilter im Strahlengang.

Für die Untersuchung müssen die Probanden[67] zunächst die Farbschwelle bestimmen. Dann sollen sie angeben, wann sie bestimmte Vielfache des Farbunterschiedes der Schwelle erkennen: Sie sollen fünf Vielfache der Farbschwelle festlegen, nämlich den zwei-, drei-, vier-, fünf- und zehnfachen Unterschied. Dabei wirkt sich das subjektive Empfinden der Testpersonen gleich mehrfach auf das Ergebnis aus, da zuerst die Farbschwelle bestimmt wird und daraus folgernd die Vergrößerung des Farbunterschiedes ermittelt werden muss.

Tabelle 5.1 Farbmaßzahlen der sieben Farbmuster

	L^*	a^*	b^*
Farbe 1	50	0	0
Farbe 2	90	0	0
Farbe 3	10	0	0
Farbe 4	50	40	0
Farbe 5	50	-40	0
Farbe 6	50	0	40
Farbe 7	50	0	-40

5.1.1 Auswertung des Skalierungsexperimentes

Das Ziel dieses Experiments ist es, den Übergang von Farbschwellen zu überschwelligen Farbunterschieden mit einer Funktion zu erfassen. Im Unterschied zu der

[66] Bei den Farbmustern handelt es sich um den Graumittelpunkt sowie die sechs Endfarben der Schwellenuntersuchung auf den Farbmaßzahlachsen.

[67] Es handelt sich um dieselben Probanden, deren statischen Daten im Kapitel 3.1 stehen.

Farbschwellenuntersuchung wird aber nicht der Mittelwert über die Widerstandswerte aller 40 Probanden gebildet, sondern es werden für alle Werte die „virtuellen“ Reflexionsgrade berechnet. Die Mittelwertbildung erfolgt später.

Aus diesen Reflexionsgraden werden die Farbmaßzahlen ermittelt, aus denen wiederum die entsprechenden Farbabstände berechnet werden. Auch in dieser Untersuchung werden wieder mehrere verschiedene Farbabstandsformeln untersucht. Es werden alle auf dem CIELAB-Farbraum basierenden Farbabstandsfunktionen im Anhang A.2 verwendet.

Für die Auswertung dieser Untersuchung wird eine Exponentialfunktion mit folgender Gleichung verwendet:

$$\Delta E_{\mathrm{x}} = \Delta E_{\mathrm{S}} + a \cdot \left(1 - e^{\left(b \cdot x^{c}\right)}\right) \qquad \text{(Gl. 5.1)}$$

Der Farbabstand ΔE_{S} ist der Wert für die Farbschwelle, der Farbabstand ΔE_{x} ist der Farbabstand, der sich bei einem x-fachen der jeweiligen Farbschwelle ergibt. Die Parameter errechnen sich aus den durch die Untersuchung ermittelten Daten. Der Parameter a berechnet sich aus dem maximalen Wert der Farbabstände $\Delta E_{\max}$ bei der Untersuchung. Der Parameter b berechnet sich aus diesem Parameter a, den Farbabständen ΔE_{i} und dem dazugehörigen Vielfachen x_{i}. Der Index „i“ wird somit von 1 bis 5 verändert und n ist gleich 5.[68] Der Exponent c wird für jede Farbe so angeglichen, dass sich der geringste Unterschied zwischen der Funktion und den aufgenommen Werten ergibt.[69]

$$a = (\Delta E_{\max} - \Delta E_{\mathrm{S}}) \cdot \frac{100}{a_{\mathrm{f}}} \qquad \text{(Gl. 5.2)}$$

$$b = \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{n} \frac{\log\left(1 - \frac{(\Delta E_{\mathrm{i}} - \Delta E_{\mathrm{S}})}{a}\right)}{x_{\mathrm{i}}^{c}}}{n} \qquad \text{(Gl. 5.3)}$$

Die Funktionsparameter werden für den Mittelwert-Probanden berechnet, wobei die fünf Minimal- und Maximalwerte gestrichen werden. Es ergibt sich somit für jede der neun Farbabstandsformeln eine eigene Funktion. Die Güte jeder einzelnen Funktion wird überprüft, indem der Durchschnitt der Differenz zwischen den experimentell ermittelten und den berechneten Farbabständen gebildet wird.

5.1.2 Ergebnisse des Skalierungsexperiments

Für die von den Probanden angegebenen Farbunterschiede verlaufen die Farbabstände nicht linear durch das Vielfache der Farbabstände für die Farbschwelle. Für das zweifache der Farbschwelle nimmt der Farbabstand nur um den Faktor 1,5 im Vergleich zum Farbabstand der Farbschwelle zu. Die Differenzen zwischen den Farbabständen der Vielfachen werden immer größer. Der Farbabstand zwischen dem Fünffachen und dem Zehnfachen der Farbschwelle beträgt mehr als das Doppelte des Farbabstandes zwischen der Referenzfarbe und dem Fünffachen der Schwelle (siehe Anhang A.6). Durch die von den Probanden

[68] Es werden fünf Vielfache betrachtet: Zweifach, Dreifach, Vierfach, Fünffach und Zehnfach.

[69] Der angegeben Faktor a_{f} wird für jede Referenzfarbe und jede Farbabstandsformel einzeln ermittelt.

bestimmten Farbabstände wird jetzt die in Kapitel 5.1.1 beschriebene Ausgleichsfunktion gelegt.

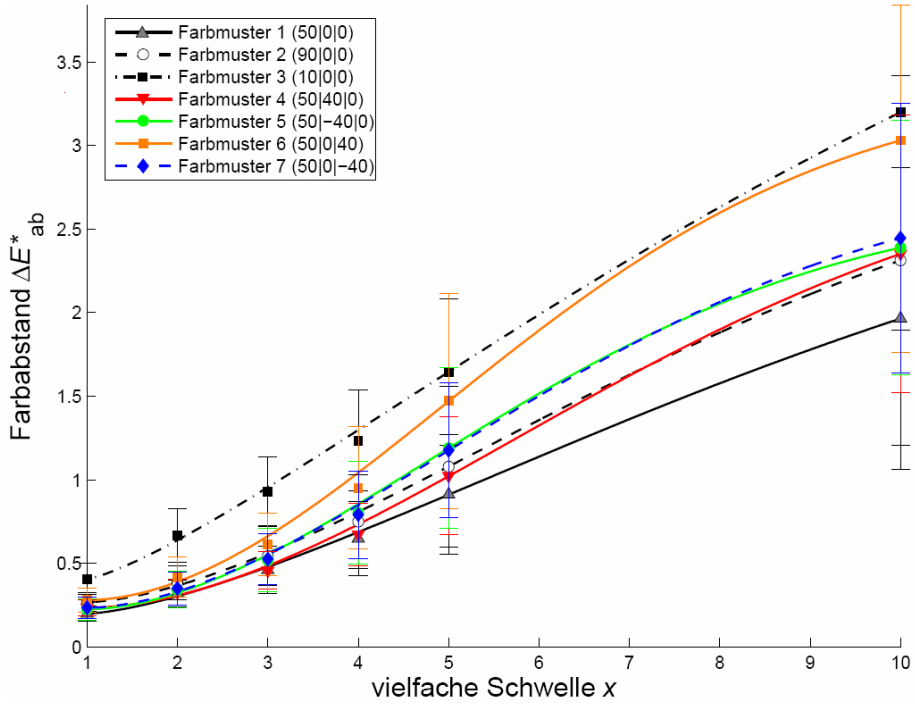

Bild 5.1 Ausgleichsfunktion bei sieben Farbmustern für den Farbabstand ΔE^*_{ab}

Wie im Bild 5.1 zu erkennen, sind die Ausgleichsfunktionen bei manchen Farbmustern besser an die aufgenommenen Werte angepasst als bei anderen. Die Ausgleichsfunktionen liegen alle innerhalb des statistischen Toleranzbereichs der aufgenommenen Werte. Das gelbliche Farbmuster zeigt die schlechteste Anpassung an die Ausgleichsfunktion und das graue Farbmuster die beste.

Für den Vergleich der verschiedenen Farbabstandsformeln beim Übergang von den Farbschwellen zu den kleinen Farbabständen wird nur das mittelgraue Farbmuster betrachtet. Für den Vergleich werden die Farbabstände für die Vielfachen der Farbschwelle durch das Vielfache geteilt und auf den Farbabstand der Farbschwelle normiert. Die folgende Gleichung zeigt diese Normierung auf den Wert ΨE.

$$\Psi E_{\mathrm{n}} = \frac{\Delta E_{\mathrm{n}}}{n \cdot \Delta E_1} \quad \text{für n = 1, 2, 3, 4, 5 und 10} \qquad \text{(Gl. 5.4)}$$

Tabelle 5.2 Normierte Farbabstände ΨE für die Vielfachen der Farbschwellen bei Mittelgrau

	n-faches der Farbschwelle					
	1	2	3	4	5	10
CIELAB	1,000	0,803	0,775	0,819	0,922	0,995
CMC	1,000	0,800	0,770	0,814	0,918	0,986
CIE94	1,000	0,803	0,775	0,818	0,921	0,992
CIEDE2000	1,000	0,802	0,772	0,815	0,917	0,981
DIN99	1,000	0,803	0,773	0,816	0,917	0,981
DIN99o	1,000	0,797	0,765	0,807	0,906	0,955

Der Verlauf des normierten Farbabstandes ΨE ist für alle betrachteten Farbabstandsformeln annähernd gleich. Er nimmt bis zum dreifachen der Farbschwelle ab und dann wieder zu. Beim zehnfachen der Farbschwelle ist der normierte Farbabstand ΨE wieder ungefähr bei 1.

5.2 Farbschwellen für separat liegende Farbmuster

In dieser Untersuchung wird betrachtet, wie sich die Farbschwellen verändern, wenn zwischen den Farbmustern ein geometrischer Abstand liegt. Es werden wieder die sieben Farbmuster aus der Tabelle 5.1 untersucht. Es wird jeweils nur diejenige Farbschwelle betrachtet, die ohne einen Farbfilter im Strahlengang erzeugt wird.

Es werden drei geometrische Abstandsgrößen betrachtet, die im Verhältnis 1:32 (ca. 0,5 mm), 1:16 (ca. 1 mm) und 1:8 (ca. 2 mm) zur Größe des Farbfeldes stehen. Es wurde zunächst überlegt, die geometrischen Abstandsgrößen von einem viertel, einem halben und einem ganzen Farbfeld hinzuzunehmen, aber in Voruntersuchungen zeigte sich, dass die großen Änderungen schon bei viel kleineren geometrischen Lücken zwischen den Farbmustern eintreten (siehe unten).

5.2.1 Auswertung der geometrischen Abstandsuntersuchung für Farbschwellen

Diese Untersuchung soll zeigen, wie sich die visuelle Empfindung der Farbschwellen ändert, wenn die Farbmuster nicht mehr unmittelbar aneinander grenzen, sondern durch eine kleine Fläche mittelgrauer Farbe voneinander getrennt sind. Dabei werden drei Abstände (0,5625 mm, 1,1250 mm und 2,2500 mm) zwischen den Farbmustern untersucht. Auch diese Untersuchung wird für die bekannten neun Farbabstandsformeln durchgeführt – wie bei der Untersuchung des Übergangs von den Farbschwellen zu den kleinen Farbunterschieden.

Nach Durchführung der Abmusterungen liegen wieder die Werte der regelbaren Widerstände vor. Aus diesen Werten werden wie bei der Farbschwellenuntersuchung die Reflexionsgrade der Farbschwellen, die Farbdaten und die Farbabstände berechnet. Der Schritt der Mittelwertbildung erfolgt hier wieder an gleicher Stelle wie bei den Farbschwellen mit direktem Kontakt zwischen den Feldern.

Bei der Auswertung wird folgende Theorie zu Grunde gelegt: Der berechnete Farbabstand der Farbschwellen wird durch eine exponentielle Funktion mit dem Abstand zwischen den Feldern als Variable beschrieben. Bereits das Einfügen einer sehr kleinen Lücke führt zu einer starken Vergrößerung des Farbabstandes zwischen der Referenzfarbe und der Testfarbe, bei der die Farbschwelle erkannt wird. Bei einer weiteren Erhöhung des geometrischen Abstands vergrößert sich der Farbabstand jedoch nicht mehr entsprechend. Daher wird folgende Formel für die Abhängigkeit zwischen dem geometrischen Abstand x und dem Farbabstand ΔE_x der Farbschwelle angesetzt:

$$\Delta E_x = \Delta E_S + a \cdot \left(1 - e^{(b \cdot x)}\right) \qquad \text{(Gl. 5.5)}$$

Der Farbabstand ΔE_S ist der Wert für die Farbschwelle bei direktem Kontakt der Flächen, der Farbabstand ΔE_x ist der Farbabstand bei dem geometrischen Abstand x zwischen den Farbmustern. Die Parameter errechnen sich aus den durch die Untersuchung ermittelten

Daten. Der Parameter a berechnet sich aus dem maximalen Wert der Farbabstände ΔE_{max}[70] bei der Untersuchung. Der Parameter b berechnet sich aus diesem Parameter a, den Farbabständen ΔE_i und den dazugehörigen geometrischen Abständen x_i. Es werden drei geometrische Abstände betrachtet: 0,5625 mm, 1,1250 mm und 2,2500 mm.[71]

$$a = (\Delta E_{max} - \Delta E_S) \cdot \frac{100}{99} \qquad \text{(Gl. 5.6)}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{\log\left(1 - \frac{(\Delta E_i - \Delta E_S)}{a}\right)}{x_i}}{n} \qquad \text{(Gl. 5.7)}$$

Auch in dieser Untersuchung wird bewertet, wie gut die berechneten Funktionen die experimentell ermittelten Daten wiedergeben.

5.2.2 Farbschwellen mit geometrischem Abstand zwischen den Farbmustern

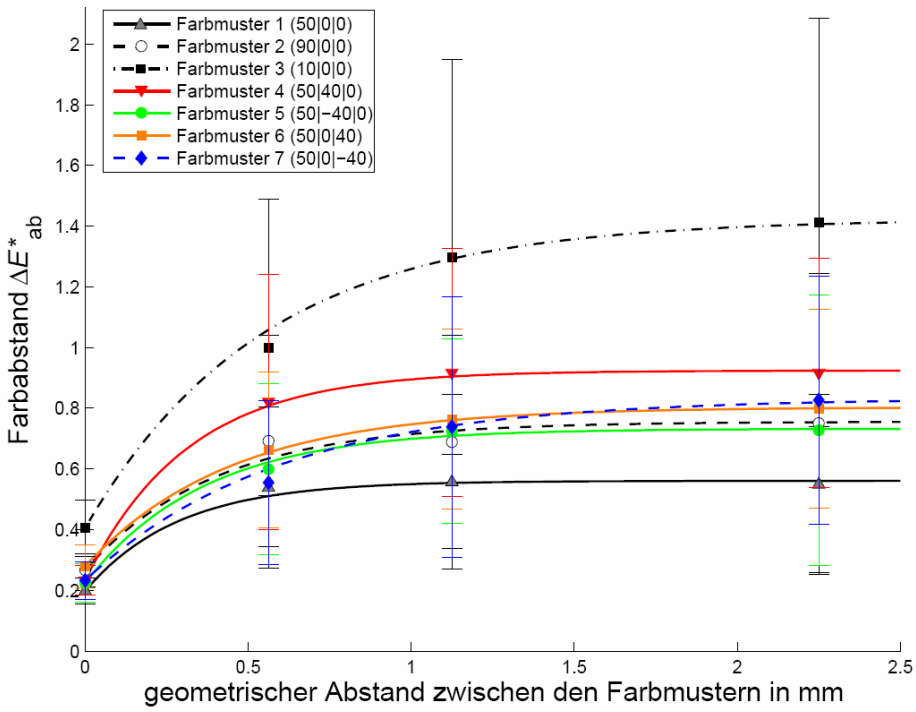

Bild 5.2 Exponentielle Ausgleichsfunktionen für die sieben Farbmuster im CIELAB-Farbraum

Die exponentielle Ausgleichsfunktion, die im Kapitel 5.2.1 beschrieben wird, eignet sich sehr gut für die Annährung an die in dieser Untersuchung ermittelten Daten. Das Bild 5.2 zeigt die exponentiellen Ausgleichsfunktionen und die Farbabstände im CIELAB-Farbraum für die

[70] Es wird der Maximalwert der Farbabstände der Farbschwellen bei den drei geometrischen Abständen verwenden.

[71] Der angegebene Faktor wurde nicht ermittelt, sondern aus Erfahrungswerten geschätzt.

Farbschwellen. Die Ausgleichsfunktionen liegen innerhalb des statistischen Fehlertoleranzbereichs der aufgenommen Werte.

Die berechneten Exponentialfunktionen sind gut an die ermittelten Daten angepasst. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die untersuchte Eigenschaft durch die verwendete Ausgleichsfunktion ausreichend dargestellt wird.

Die Farbabstände für die Farbschwellen nehmen schon bei sehr kleinen geometrischen Abständen (~ 0,5 mm) zwischen den Farbmustern um einen Faktor größer als 2 zu. Bei einem geometrischen Abstand von ungefähr 2,0 mm wird die Sättigung erreicht. Es gibt somit keine zusätzliche Änderung, wenn der geometrische Abstand größer als 2 mm wird. Die folgende Tabelle 5.3 zeigt für die Farbschwelle die Faktoren, um die sich die Farbabstände vergrößern, wenn ein geometrischer Abstand zwischen den Farbmuster ist.

Tabelle 5.3 Faktor der Vergrößerung der Farbschwellen bei den verschiedenen Referenzfarben und geometrischen Farbmusterabständen

geometrischer Abstand in mm	Farbmuster						
	1	2	3	4	5	6	7
0,5625	2,72	2,60	2,47	3,53	2,67	2,38	2,38
2,2500	2,78	2,82	3,49	3,95	3,25	2,86	3,55

Für die Farbschwellen wird untersucht, inwieweit die Differenz des Hellbezugswertes ΔY vom Hellbezugswert Y der Referenzfarbe abhängt. Es werden nur die drei ersten Farbmuster dazu verwendet, da bei ihnen die Differenz des Hellbezugswertes ΔY nur vom Hellbezugswert Y des Farbmusters abhängig ist. Es werden die direkt aneinander grenzenden Farbmuster und die separaten Farbmuster mit einem geometrischen Abstand von 0,5625 mm verwendet.

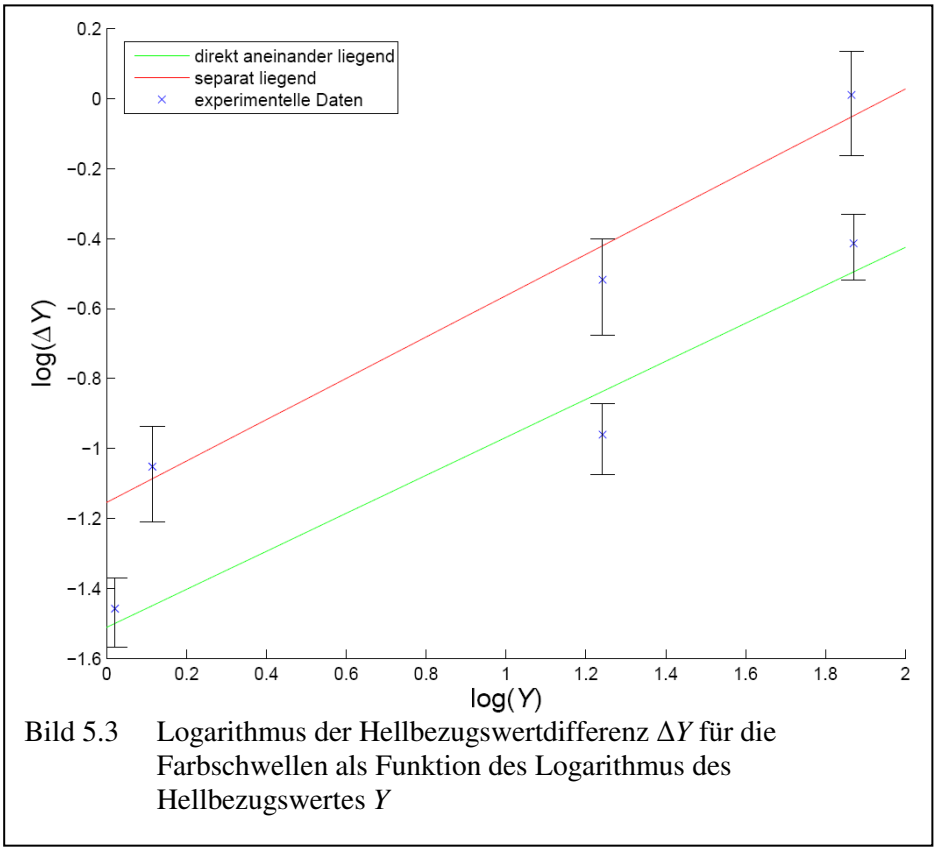

Bild 5.3 Logarithmus der Hellbezugswertdifferenz ΔY für die Farbschwellen als Funktion des Logarithmus des Hellbezugswertes Y

Das Bild 5.3 zeigt die Hellbezugswertdifferenz ΔY für die Farbschwellen als Funktion des Hellbezugswertes Y in doppellogarithmischer Darstellung. Die experimentell ermittelten Werte sind etwas weiter von den eingezeichneten Ausgleichsgeraden entfernt. Die Hellbezugswertdifferenz ΔY ist somit nicht proportional zum Hellbezugswert Y der Referenzfarbe.

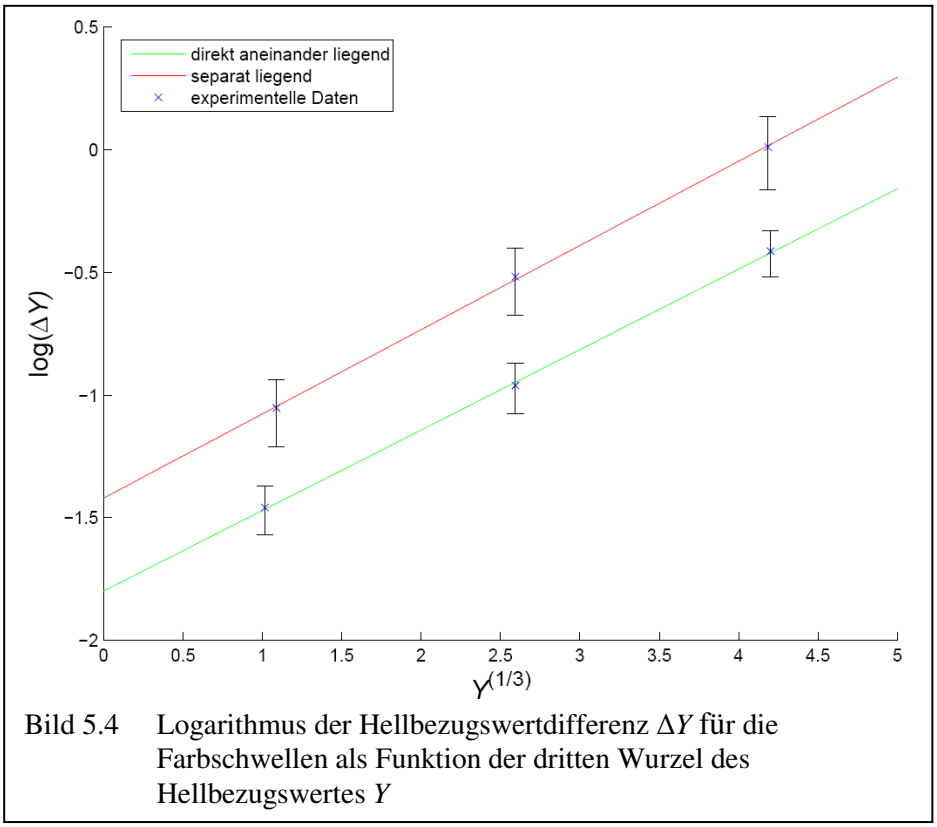

Bild 5.4 Logarithmus der Hellbezugswertdifferenz ΔY für die Farbschwellen als Funktion der dritten Wurzel des Hellbezugswertes Y

Das Bild 5.4 zeigt den Logarithmus der Hellbezugswertdifferenz ΔY für die Farbschwellen als Funktion der dritten Wurzel des Hellbezugswertes Y. Die Ausgleichsgerade für die aneinander liegenden Farbmuster ist grün dargestellt, für die separat liegenden Farbmuster rot. Die blauen Kreuze markieren die experimentellen Daten. Die experimentell ermittelten Werte werden sehr gut durch die Ausgleichsfunktionen dargestellt. Es ergeben sich folgende Gleichungen für die Ausgleichsfunktionen:

$$\log(\Delta Y) = -1{,}798 + 0{,}328 \cdot Y^{(1/3)} \qquad \text{(Gl. 5.8)}$$

$$\log(\Delta Y) = -1{,}420 + 0{,}343 \cdot Y^{(1/3)} \qquad \text{(Gl. 5.9)}$$

Die Gleichung 5.8 gilt für die direkt aneinander liegenden Felder und die Gleichung 5.9 für die separat liegenden Felder. Wie erwartet ist der erste Parameter für die direkt aneinander liegenden Farbmuster etwas geringer. Bei dieser Konstellation sind die Farbschwellen leichter zu erkennen. Die Steigung der Gerade ist annähernd gleich.

Die folgende Tabelle 5.4 zeigt für die Farbschwellen bei den drei ersten Farbmustern die Hellbezugswertdifferenz ΔY sowie ihren Logarithmus. Des Weiteren wird zum Vergleich der Hellbezugswert Y des Farbmusters sowie sein Logarithmus und seine dritte Wurzel angegeben. Die Hellbezugswertdifferenz ΔY und die Hellbezugswerte Y werden für die geometrischen Abstände 0,00 mm, 0,56 mm, 1,13 mm und 2,25 mm angegeben. Die

Hellbezugswerte berechnen sich aus dem Hellbezugswert *Y* der Farbmuster und der Farbe des geometrischen Abstandes. Je größer der geometrische Abstand wird, desto größer wird sein Einfluss auf den gesamten Hellbezugswert *Y*.

Tabelle 5.4 Hellbezugswertdifferenzen ΔY für die Farbschwelle sowie die Hellbezugswerte *Y* der Farbmuster

Farb-muster	Farbmaßzahl			geometr. Abstand in mm	Hellbezugswert-differenz ΔY	log(ΔY)	Hellbezugswert Y	log(Y)	$Y^{1/3}$
	L*	a*	b*						
3	10	0	0	0,0000	0,035	-1,458	1,049	0,021	1,016
				0,5625	0,089	-1,052	1,291	0,111	1,089
				1,1250	0,118	-0,927	1,526	0,184	1,151
				2,2500	0,130	-0,886	1,975	0,296	1,255
1	50	0	0	0,0000	0,109	-0,961	17,453	1,242	2,594
				0,5625	0,304	-0,517	17,442	1,242	2,593
				1,1250	0,315	-0,502	17,433	1,241	2,593
				2,2500	0,310	-0,509	17,414	1,241	2,592
2	90	0	0	0,0000	0,386	-0,413	74,181	1,870	4,202
				0,5625	1,026	0,011	73,298	1,865	4,185
				1,1250	1,021	0,009	72,442	1,860	4,169
				2,2500	1,114	0,047	70,805	1,850	4,137

Kapitel 6

Analyse und Ausblick

In dieser Arbeit wurden visuell ermittelte Farbunterschiede mit der Beschreibung durch ausgewählte Farbabstandsformeln verglichen. Ziel ist ein Koordinatensystem, das die Farbschwellen als dreidimensionalen Vektorabstand beschreibt. Die Arbeit zeigt viele Parameter, die bei der Lösung zu berücksichtigen sind. Dies sind zum Beispiel der geometrische Abstand der Farbmuster und die Abhängigkeit der Farbschwellen in Gelb-Blau-Richtung von der Feldgröße. Die Tabelle 6.1 zeigt die Vergleichswerte Θ_{100} und S_{100} der verschiedenen Farbabstandsformeln vor und nach der Anpassung an die Betrachtungsbedingungen bei der Farbschwellenuntersuchung. Die Angleichungsparameter sind angegeben. Die nicht angegebenen Parameter K_L (CIE94, CIEDE2000) und Y_0 (LABJNDS) sind gleich 1. Der Vergleichswert Θ_{100} berechnet sich aus dem Quotienten Θ (Gleichung 4.36) und der Vergleichswert S_{100} aus dem STRESS-Wert S (Gleichung 4.37). Die folgenden Gleichungen zeigen die genaue Berechnung:

$$\Theta_{100} = 100 \cdot \Theta \qquad \text{(Gl. 6.1)}$$

$$S_{100} = 100 - S \qquad \text{(Gl. 6.2)}$$

Diese Veränderungen wurden vorgenommen, damit für beide Vergleichswerte gilt: Je näher sie an dem Wert 100 sind, desto besser ist die Beschreibung der Farbschwellen durch die Farbabstandsformel. Der zusätzliche Index „s“ steht für die Vergleichswerte bei den Standard-Farbabstandsformeln[72] und der Index „p“ für die Vergleichswerte bei den Farbabstandsformeln mit den angegebenen Parametern.

Tabelle 6.1 Vergleichswerte für die Beschreibung der Farbschwellen vor (s) und nach (p) der Anpassung an die Betrachtungsbedingungen

	$\Theta_{100,s}$	$S_{100,s}$	Angleichungsparameter				$\Theta_{100,p}$	$S_{100,p}$
CIELAB	29,800	54,587	α	0,515	β	0,153	60,100	80,200
CMC	32,600	56,937	l	0,418	c	2,417	46,200	71,436
CIE94	35,600	58,674	K_C	4,432	K_H	2,025	44,600	71,371
CIEDE2000	34,600	60,668	K_C	2,953	K_H	3,179	49,400	74,041
DIN99	44,500	67,674	k_E	1,756	k_{CH}	1,950	53,000	76,549
DIN99o	34,700	59,367	k_E	0,776	k_{CH}	3,439	48,400	74,559
LABJNDS	29,400	59,621	a_0	2,519	b_0	0,609	62,700	81,237

Bei allen Farbabstandsformeln, welche für einen Farbabstandsbereich von $1 < \Delta E^*_{ab} < 5$ entwickelt wurden, kommt es durch die Angleichung der Parameter an die

[72] Für die Standard-Farbabstandsformeln sind alle Angleichungsparameter gleich 1. Nur für die LABJNDS-Formel sind die Standardparameter ungleich 1: $a_0 = 1{,}0$, $b_0 = 1{,}8$ und $Y_0 = 1{,}5$.

Betrachtungsbedingungen zu einer signifikanten Verbesserung der Beschreibung der Farbschwellen. Es zeigt sich somit, dass die Farbabstandsformeln mit ihren Standardparametern an die Beurteilung von kleinen Farbunterschieden gut angepasst sind, aber nicht für die Beschreibung von Farbschwellen geeignet sind.

Die Abhängigkeit der Farbschwellen von der Feldgröße in Gelb-Blau-Richtung muss für den Anwendungsbereich von 0° bis 10° dringend geklärt werden. Bisher sind nur Daten für den Bereich von 0° bis 0,5° bekannt. Dabei muss sowohl das Verhalten der Farbschwellen bezüglich der Größe und der Farbe des Feldes untersucht werden, als auch der physiologische Grund für dieses Verhalten. Es ist zu erwarten, dass wegen der 30fach geringeren Verteilung der S- gegenüber L- und M-Zapfen und nur 10 S-Zapfen/Grad die Gelb-Blau-Unterscheidung bei unter 1 Grad Probengröße stark abnimmt. Dieser Effekt ist als Kleinfeld-Tritanopie bekannt.

Der Übergang von den Farbschwellen zu den kleinen Farbabständen muss genauer untersucht werden. In dieser Arbeit wurde er zwar betrachtet, aber die aufgenommene Datenmenge ist zu gering für eine exakte Analyse. Es wurde bei sieben Farbmustern nur die Beleuchtungssituation ohne Farbfilter untersucht, dass heißt vor allem die Veränderung der Helligkeit L^*. Eine genauere Untersuchung des Übergangs von den Farbschwellen zu den kleinen Farbunterschieden sollte für eine größere Anzahl von Referenzfarben und Farbveränderungen durchgeführt werden. Aus den so aufgenommenen Daten kann eine genaue Analyse erfolgen, die zeigt, wie groß der Einfluss der einzelnen Parameter auf den Übergang von den Farbschwellen zu den kleinen Farbunterschieden ist.

Die Untersuchung der Farbschwellen bei separat liegenden Farbmustern zeigte eine deutliche Vergrößerung des Farbabstandes gegenüber den aneinander grenzenden Farbmustern. Die Farbschwellen ergeben für einen kleinen geometrischen Abstand (~ 0,5 mm) in neutraler Farbe zwischen den Farbmustern einen CIELAB-Farbabstand, der sich um einen Faktor 2,4 bis 3,5 je nach Referenzfarbe vergrößert. Für die Farbschwellen wird bei einem geometrischen Abstand größer als 2,0 mm ein Sättigungswert erreicht, dabei erhöht sich der CIELAB-Farbabstand je nach Referenzfarbe um den Faktor 2,8 bis 4,0 gegenüber den aneinander grenzenden Farbmustern. In dieser Arbeit wurden bei sieben Referenzfarben drei geometrische Abstände untersucht. Sowohl die Hintergrundfarbe als auch die Feldgröße der Farbmuster wurden dabei nicht variiert. Die Untersuchung dieser Parameter sollte weitergeführt werden. Des Weiteren ist die Untersuchung des Überganges von den Farbschwellen zu den kleinen Farbunterschieden auch für Farbmuster wichtig, die einen geometrischen Abstand zueinander haben.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Im experimentellen Teil dieser Arbeit wurden durch 40 Probanden visuelle Farbschwellen ermittelt und große Farbunterschiede bewertet. Die Experimente wurden für Körperfarben bei einer Beleuchtung mit der Normlichtart D65, für die Probengröße von 2° und für aneinander grenzende Farbmuster durchgeführt. Die CIELAB-, die CIEDE2000- und andere Farbabstandsformeln wurden geprüft.

Die Farbabmusterungsexperimente unterschieden sich in wichtigen Punkten von anderen Untersuchungen. Durch eine neue optische Farbmischmethode ist eine exakte Bestimmung der Farbschwellen für Körperfarben möglich und nicht nur der Bereich, in dem die Farbschwellen liegen. Eine Verfälschung der Ergebnisse durch die Trennkanten- und Glanz-Effekte von aneinandergrenzenden Farbmustern ist ausgeschlossen. Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede mit einem CIELAB-Farbabstand $\Delta E^*_{ab} > 10$ wird durch die Kombination von zwei bekannten Untersuchungsmethoden eine neue Methode entwickelt, die unabhängig von einer Referenz ist, welche die Ergebnisse beeinflusst.

Für die Farbschwellen ergeben sich bei den aneinander grenzenden Farbmustern mittlere Farbabstandswerte von 0,417 für CIELAB und von 0,308 für CIEDE2000. Für die Farbschwellen und mit den beiden Farbabstandsformeln ist die Korrelation um etwa den Faktor 2 schlechter als für die großen Farbunterschiede. Daher sind die Farbabstandsformeln CIELAB und CIEDE2000 für die Beschreibung von Farbschwellen nicht geeignet. Jedoch durch Verkleinerung der Parameter für die Rot-Grün-Buntheit a^* und die Gelb-Blau-Buntheit b^* um etwa den Faktor 2 und 6 gegenüber der Helligkeit können die Farbschwellenergebnisse angenähert beschrieben werden.

Für Farbschwellen und einen kleinen geometrischen Abstand (~ 0,5 mm) mit grauer Farbe zwischen den Farbmustern vergrößert sich der CIELAB-Farbabstand um einen Faktor 2,4 bis 3,5 je nach Referenzfarbe. Für einen geometrischen Abstand größer als 2,0 mm erreicht, der CIELAB-Farbabstand einen Sättigungswert, der um den Faktor 2,8 bis 4,0 größer ist.

Bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede mit einem CIELAB-Farbabstand $\Delta E^*_{ab} > 10$ zeigt die CIELAB-Formel eine statistisch insignifikant bessere Korrelation zwischen visueller Bewertung und farbmetrischer Berechnung als die CIEDE2000-Formeln.

Schlagworte:
Farbabstand, CIELAB, CIEDE2000, Farbschwellen, Körperfarben, Farbmetrik

7.1 Summary

In the experimental part of this work 40 test persons have determined visual colour thresholds and large colour differences. The experiments were done for surface colours with an illumination of the CIE standard illuminant D65, for the 2° CIE standard observer and for adjacent colour samples. The CIELAB, the CIEDE2000 and other colour formulas were tested.

The colour assessment experiments differ in important points compared to other experiments. By a new optical colour mixture method an exact determination of the colour threshold was possible, and not only the range in which the colour thresholds are located. A falsification of the results by borderline or gloss effects of the adjacent samples is excluded. For the investigation of the large colour differences with a CIELAB colour difference $\Delta E^*_{ab} > 10$ two known research methods are combined to a new one which is independent of a reference, and which may influence the results.

For the colour thresholds and for adjacent samples result the average colour difference data are 0.417 for CIELAB and 0.308 for CIEDE2000. For the colour thresholds, and with both colour difference formulas the correlation is by about a factor 2 worse compared to the large colour differences. Therefore the colour difference formulas CIELAB and CIEDE2000 are not applicable to describe colour thresholds. However, by reduction of the parameters for the red-green a^* and yellow-blue chroma b^* by a factor 2 and 6 compared to the lightness, our threshold results may be described approximately.

For the colour thresholds und a small geometric distance (~ 0.5 mm), and a grey colour between the colour samples the CIELAB colour difference increases by a factor 2.4 to 3.5 depending on the reference colour. For a geometric distance larger than 2.0 mm the CIELAB colour difference reaches a saturation value which is by a factor 2.8 to 4.0 larger.

For the investigation of the large colour differences with a CIELAB colour difference $\Delta E^*_{ab} > 10$ the CIELAB formula shows an insignificant better correlation between the visual assessment and the colorimetric calculation compared to the CIEDE2000 formula.

Literatur

[AnN56] **Anweisungen für die Untersuchung des Farbsehens mit dem Anomaloskop nach Nagel;** 1956; "Die Farbe" 6 (1957), Seiten 115-119

[AnoBA] **Anomaloskop nach Nagel - Beschreibung und Anweisung für die Untersuchungen;** 1960; Gebrauchsanweisung

[Avr88] **Experimentelle Ermittlung des Leuchtdichte-Unterscheidungsvermögens von unbunten und bunten Infeldfarben;** *Dimitrios Avramopoulos;* 1988, Studienarbeit TU Berlin

[BAM68] **Hilfsmittel zur Bestimmung von Farbwiedergabe-Indizes nach DIN 6169 Blatt 2;** 1968; Veröffentlichung BAM

[BAM73a] **Tabellen zur Farbmetrik: Normfarbwerte X,Y,Z und Normfarbwertanteile x,y sowie die Farbwerte U*,V*, W* und Farbwertanteile u,v;** 1973; Veröffentlichung BAM

[BAM73b] **Tabellen zur Farbmetrik: Wellenlängengrenzen und spektraler Strahldichtefaktor von metameren Testfarben zu den CIE-Testfarben;** 1973; Veröffentlichung BAM

[BKJ04] **Quantifying Variations in Personal Color Spaces: Are There Sex Differences in Color Vision?;** *David L. Bimler, John Kirkland, Kimberly A. Jameson;* 2004; COLOR research and application, Vol. 29 Nr. 2, Seiten 128-134

[BrM49] **Visual Sensitivities to Combined Chromaticy and Luminance Differences;** *W.R. Brown, D.L. MacAdam;* 1949; J. Opt. Soc. Am. 39, Seiten 808-834

[BSM93] **Taschenbuch der Mathematik;** *Ilja A. Bronstein, Konstantin A. Semendjajew, Gerhard Musiol, Heiner Mühlig;* 1993; Verlag Harri Deutsch

[CaS82] **Sensitivity of the Blue-Sensitive Cones Across the Central Retina;** *J.A. Castano, H.G. Sperling;* 1982; Vision Research, Vol. 22 Nr. 6, Seiten 661-673

[Chu03] **Which Color is More Colorful, the Lighter One or the Darker One?;** *Chengwu Chui;* 2003; COLOR research and application, Vol. 28 Nr. 3, Seiten 168-169

[CIE01a] **Improvement to Industrial Colour Differences Evaluation;** 2001; CIE 142-2001

[CIE01b] **Proceedings of the CIE Expert Symposium 2000 on Colour Standards for Imaging Technology;** 2001; CIE x21:2001

[CIE04a] **Colorimetry, 3rd Edition;** 2004; CIE 15.3:2004

[CIE04b] **Standard Method of Assessing the Spectral Quality of Daylight Simulators for Visual Appraisal and Measurement of Colour;** 2004; CIE S 012/E:2004

[CIE05] **Methods for Deriving Colour Differences in Images;** 2005; CIE TC8-02

[CIE06a] **Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1;** 2006; CIE 170-1:2006

[CIE06b] **Colorimetry - Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers;** 2006; CIE S 014-1/E:2006

[CIE06c] **Colorimetry - Part 2: CIE Standard Illuminants;** 2006; CIE S 014-2/E:2006

[CIE83] **The Basic of Physical Photometry;** 1983; CIE 18.2-1983

[CIE93] **Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation;** 1993; CIE 101-1993

[CIE95a] **Industrial Colour-Difference Evaluation;** 1995; CIE 116-1995

[CIE95b] **Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources;** 1995; CIE 13.3-1995

[CIE98] **Proceedings of the CIE Expert Symposium '97 on Colour Standards for Imaging Technology;** 1998; CIE x14-1998

[ClE74] **Grundlagen der Statistik;** *Günter Clauß, Heinz Ebner;* 1974 Volk und Wissen Verlag

[CLR+02] **Uniform Color Spaces Based on the DIN99 Colour-Difference Formula;** *G. Cui, M. R. Luo, B. Rigg, G. Roesler, K. Witt;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 4, Seiten 282-290

[CYG02] **Effects of Hue, Saturation and Brightness on Preference;** *Nilgün Camgöz, Cengiz Yener, Dilek Güvenc;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 3, Seiten 199-207

[DIN01] **Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel;** 2001; DIN 6176

[DIN66] **Anomaloskop nach Nagel;** 1966; DIN 6160

[DIN75] **Farbabmusterung; Allgemeine Farbabmusterungsbedingungen;** 1975; DIN 6173-1

[DIN76] **Farbmessung: Dreibereichsverfahren;** 1976; DIN 5033-6

[DIN78] **Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Begriffe Kennzahlen;** 1978; DIN 5036-1

[DIN79a] **Farbmessung: Grundbegriffe der Farbmetrik;** 1979; DIN 5033-1

[DIN79b] **Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen ;** 1979; DIN 5036-3

[DIN79c] **Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel;** 1979; DIN 6174

[DIN80a] **DIN-Farbkarte: System der DIN-Farbkarte für den 2°-Normalbeobachter;** 1980; DIN 6164-1

[DIN80b] **DIN-Farbkarte: Festlegung der Farbmuster;** 1980; DIN 6164-2

[DIN81] **Farbmessung: Gleichheitsverfahren;** 1981; DIN 5033-5

[DIN82] **Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik;** 1982; DIN 5031-3

[DIN82a] **Farbmessung: Messbedingungen für Lichtquellen;** 1982; DIN 5033-8

[DIN82b] **Farbmessung: Weißstandard für Farbmessung und Photometrie;** 1982; DIN 5033-9

[DIN83a] **Farbmessung: Messbedingungen für Körperfarben;** 1983; DIN 5033-7

[DIN83b] **Farbabmusterung; Beleuchtungsbedingungen für künstliches mittleres Tageslicht;** 1983; DIN 6173-2

[DIN92a] **Farbmessung: Normvalenz-Systeme;** 1992; DIN 5033-2

[DIN92b] **Farbmessung: Farbmaßzahlen;** 1992; DIN 5033-3

[DIN92c] **Farbmessung: Spektralverfahren;** 1992; DIN 5033-4

[FI05a] **Jede Netzhaut ist anders - und trotzdem bleibt gelb gleich gelb;** 2005; Farbimpulse - Das Onlinemagazin für Farbe in Wissenschaft und Technik http://www.farbimpulse.de ; Zugriff am 02.04.2007

[Fuji] **Digital-Bildprintsystem Fujix Pictrography 3000 EC-Modelle, Erste Ausgabe;** 1994; Gebrauchsanweisung

[Gal04] **Grundlagen der Lichttechnik;** *Dietrich Gall;* 2004; Richard Pflaum Verlag

[Gel26] **Über den Einfluß der Umstimmung auf die Farbschwelle - Weitere Untersuchungen zur Kenntnis der intracorticalen Erregungsvorgänge in der Sehsphäre;** *Ernst Gellhorn;* 1926

[GHM07] **Measurement of the relationship between perceived and computed color differences;** *P.A. Garcia, R. Huertas, M. Melgosa, G. Cui;* 2007; J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 24 Nr. 7, Seiten 1823-1829

[Gou91] **Color Vision;** *P. Gouras;* 1991; Principles of neural science (E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell), Appleton & Lange, East Norwalk, Seiten 467-480

[GrS02] **Performance of CIE94 for Nonreference Conditions;** *Lewis D. Griffin, Arsalan Sepehri;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 2, Seiten 108-115

[GuL99] **A Colour-Difference Formula for Assessing Large Colour Differences;** *Shing-Sheng Guan, M. Ronnier Luo;* 1999; COLOR research and application, Vol. 24 Nr. 5, Seiten 344-355

[HMO05] **A new colour-difference formula defined in OSA-UCS space;** *R. Huertas, M. Melgosa, C. Oleari;* 2005; AIC Colour 05, Seiten 1071-1074

[HMO06] **Performance of a new color-difference formula based on OSA-UCS space using small-medium color differences;** *R. Huertas, M. Melgosa, C. Oleari;* 2006; J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23 Nr. 9, Seiten 2077-2084

[HRV97] **Comparative Analysis of the Quantization of Color Spaces on the Basis of the CIELAB Color-Difference Formula;** *B. Hill, Th. Roger, F. W. Vorhagen;* 1997; ACM Transaction on Graphics, Vol. 16 Nr. 2, Seiten 109-154

[Ind01] **Uniformities in OSA-UCS and in NCS tested by color difference prediction based on principal hue components;** *Tarow Indow;* 2001; AIC Colour 01, Seiten 844-847

[Ind02] **Color Difference Predicted by Color Component Differences;** *Tarow Indow;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 6, Seiten 425-429

[Irt91] **Psychophysische Invarianzen in der Farb- und Helligkeitswahrnehmung;** *Hans Irtel;* 1991; Springer-Verlag

[ISO04] **Method of specifying image reproduction of colour devices by digital and analog test charts;** 2004; ISO/IEC/PDTR 24705:2004

[ISO99] **Information technology - Office machines - Method of specifying image reproduction of colour copying machines by analog test charts - Realisation and application;** 1999; ISO/IEC 15775:1999

[Jäg06] **Bildgebendes Multispektralsystem zur Serienfarbmessung an goniochromatischen Oberflächenbeschichtungen in der Automobil- und Zulieferindustrie;** *Stefan Jäger;* 2006; Doktorarbeit TU Berlin

[Kin80] **Beitrag zur Bestimmung von Farben ähnlichster Farbtemperatur in Umfeldern der Farbarten 3000 bis 7000 K;** *Kimani Kinyanjui;* 1980; Studienarbeit TU Berlin

[Kit05] **Visuelle Überprüfung großer CIELAB-Farbabstände von 3- und 5-stufigen Farbreihen;** *Philipp Kittelmann;* 2005; Diplomarbeit TU Berlin

[Klö95] **PostScript - Einstieg-Workshop-Referenz;** *Ingo Klöckl;* 1995; Hanser Verlag

[KoK01] **An Effective Conversion Algorithm from OSA-UCS to CIEXYZ;** *Mituo Kobayasi, Yosiki Kayoko;* 2001; AIC Colour 01, Seiten 848-851

[Kri95] **Die Schwellenerkennbarkeit von statischen, farbigen Streifenmustern;** *Georg Krikonis;* 1995; Doktorarbeit TU Berlin

[Kue00] **A Structural Comparison of the Munsell Renotation and the OSA-UCS Uniform Color System;** *Rolf G. Kuehni;* 2000; COLOR research and application, Vol. 25 Nr. 3, Seiten 186-192

[Kue01] **From Color-Matching Error to Large Color Differences;** *Rolf G. Kuehni;* 2001; COLOR research and application, Vol. 26 Nr. 5, Seiten 384-393

[LaX02] **Evaluation of the Quality of Different D65 Simulators for Visual Assessment;** *Yuk-Ming Lam, John H. Xin;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 4, Seiten 243-251

[LeP06] **Comparison of the Metrics between the CIELAB and the DIN99 Uniform Color Spaces using Dental Resin Composite Materials Values;** *Yong-Keun Lee, John M. Powers;* 2006; COLOR research and application, Vol. 31 Nr. 3, Seiten 168-173

[MAd42] **Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight;** *D.L. MacAdam;* 1942; J. Opt. Soc. Am. 32, Seiten 247-274

[MAd74] **Uniform Color Scales;** *D.L. MacAdam;* 1974; J. Opt. Soc. Am. 64, Seiten 1691-1702

[MAd78] **Colorimetric Data for Samples of OSA Uniform Scales;** *D.L. MacAdam;* 1978; J. Opt. Soc. Am. 68, Seiten 121-130

[MAT] **Getting started with MATLAB;** Rudra Pratap ; 1984-2007; Oxford University Press

[Mel00] **Testing CIELAB-Based Color-Difference Formulas;** *Manuel Melgosa;* 2000; COLOR research and application, Vol. 25 Nr. 1, Seiten 49-55

[MiT04] **Estimation of Just-Noticeable Differences in Multispectral Color Spaces;** *Irina Mironova, Pekka Toivanen;* 2004; CGIV 2004: The Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision, Seiten 376-378

[MPM96] **Influence of colour-matching functions on threshold and large colour differences;** *J.A. Martínez, A.J. Poza, M. Melgosa, E. Hita;* 1997; Journal of Optics **28**, Seiten 26-36

[MRV82] **Farbe+Design: Sonderdruck "Farbe und Farbsehen";** *Karl Miescher, Klaus Richter, Arne Valberg;* 1982; Farbe + Design Nr. 23/24, Seiten 2-23

[MüR69] **Licht und Sehen;** *Conrad G. Müller, Mae Rudolph;* 1969; rororo Sachbuch

[Müt60] **ABC der Optik;** *Karl Mütze;* 1960; Verlag Werner Dausien

[NaS06] **Clarification of Differences between Variable Achromatic Color and Variable Chromatic Color Methods in the Helmholtz-Kohlrausch Effect;** *Yoshinobu Nayatani, Hideki Sakai;* 2006; COLOR research and application, Vol. 31 Nr. 2, Seiten 146-155

[ORW03] **A Study of Colour Emotion and Colour Preference. Part I: Colour Emotions for Single Colours;** *Li-Chen Ou, M. Ronnier Luo, Andrée Woodcock, Angela Wright;* 2003; COLOR research and application, Vol. 29 Nr. 3, Seiten 232-240

[Ott07] **Bestimmung spektraler Reflexionsfaktoren, Reflexionsgrade und Transmissiongrade nicht fluoreszierender Materialien am ZEISS DMC 25;** *Peter Otto;* 2007; Standardarbeitsanweisung VIII.13-2

[Pai87] **Detailerkennbarkeit eines Farbzeichens in verschiedenen Farbkombinationen;** *Georgios Paissidis;* 1987; Diplomarbeit TU Berlin

[PoC04] **Spectrophotometric Error in Colour Coordinates Introduced by Fluorescence of White Calibration Tile;** *Alicia Pons, Joaquín Campos;* 2004; COLOR research and application, Vol. 29 Nr. 2, Seiten 111-114

[PoS86] **PostScript Language - Tutorial and Cookbook;** 1986; Addison Wesley

[PoS90] **PostScript Language - Reference Manual;** 1990; Addison Wesley

[Ric05] **Linear Relationship between CIELAB and Device Coordinates for a new Colorimetric Image Technology (CIT);** *Klaus Richter;* 2005; http://www.ps.bam.de ; Zugriff am 03.11.2006

[Ric06] **Symmetrisches Farbsehmodell, CIELAB und Farb-Informationstechnologie;** *Klaus Richter;* 2006 http://www.ps.bam.de ; Zugriff am 30.03.2007

[Ric07] **Colorimetric Modell of Logarithmic Colour Spaces LMSLAB;** *Klaus Richter;* 2007 http://www.ps.bam.de ; Zugriff am 07.08.2007

[Ric79] **Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems;** *Klaus Richter;* 1979; BAM Forschungsbericht 61

[Ric80] **CIE 1976 Color Spaces and Proposals for Modification;** *Klaus Richter;* 1980; Acta Chromatica, Vol. 3 Nr. 5, Seiten 214-222

[Ric84] **Einführung in die Farbmetrik;** *Manfred Richter;* 1984; Verlag de Gruyter

[Ric85] **Farbempfindungsmerkmal Elementarbuntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld;** *Klaus Richter;* 1985; BAM Forschungsbericht 115

[Ric96] **Computergrafik und Farbmetrik;** *Klaus Richter;* 1996; VDE Verlag

[Rob90] **Historical Development of CIE Recommended Color Difference Equations;** *Alan R. Robertson;1990*; COLOR research and application, Vol. 15 Nr. 3, Seiten 167-170

[Ros97] **Gleichabständige aneinandergrenzende und separat liegende Graumuster und psychophysikalische Auswertung;** *Alexander Rosemann;* 1997; Diplomarbeit TU Berlin

[Sch70] **Das Sehen;** *Herbert Schober;* 1970; Fachbuchverlag Leipzig

[Sch95] **Farbdarstellung mit geräteunabhängigen CIE-Farben für die Anwendung in CAD-Systemen am Beispiel von Farbfolien der Theatertechnik;** *Ulrich Schindele;* 1995; Diplomarbeit TFH Berlin

[ShF02] **Evaluating the 1931 CIE Color-Matching Functions;** *Mark Shaw, Mark Fairchild;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 5, Seiten 316-329

[SiM85] **The development and evaluation of color systems for airborne applications: Phase I-Fundamental visual, perceptual, and display systems considerations;** *D.L. Silverstein, R.M. Merrifield;* 1985; (Tech. Report DOT/FAA/PM085019). Washington, DC: Federal Aviation Administration

[SpL] **SpectralLight III – Operation Manual**; 1999, Gretag MacBeth

[SpS] **SpectroScan T - Bedienungsanleitung;** 2005; Gertag Macbeth

[Ste57] **On the Psychophysical Law;** *Stanley Smith Stevens;* 1957; The Psychological Review, Vol. 64 Nr. 3, Seiten 153-181

[SWD05] **The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data and Mathematical Observation;** *Gaurav Sharma, Wencheng Wu, Edul N. Dalai;* 2005; COLOR research and application, Vol. 30 Nr. 1, Seiten 21-30

[Val05] **Light - Vision - Color;** *Arne Valberg;* 2005 Wiley-VCH Verlag

[ViC01] **Michel-Eugène Chevreul and His Colour Classification System;** *Francoise Viénot, Alain Chiron;* 2001; COLOR research and application, Supp. Vol. 26, Seiten S20-S24

[Völ06] **Euclidization of the First Quadrant of the CIEDE2000 Color Difference System for Calculation of Large Color Differences;** *Hans G. Völz;* 2006; COLOR research and application, Vol. 31 Nr. 1, Seiten 5-12

[WCL07] **Report to TC1-63 Validity of the Range of CIEDE2000;** *Han Wang, Guihan Cui, Ronnier Luo;* 2007

[WiD83] **Parametric Variations in Threshold Color-Difference Ellipsoid for Green Painted Samples;** *Klaus Witt, Günter Döring;* 1983; COLOR research and application, Vol. 8 Nr. 3, Seiten 153-163

[Wit05a] **Buntheit mit System;** *Klaus Witt;* 2005; Farbe und Lack, 3-2005, Seiten 86-89

[Wit05b] **Vorschlag zur Überarbeitung der DIN 6176;** *Klaus Witt;* 2005

[Wit06] **Farbmetrische Methoden zur Herstellung von Prüfvorlagen für Farbkopierer, Farbscanner und Farbmonitore;** *Jens Witt;* 2006; Doktorarbeit TU Berlin

[Wit87] **Three-Dimensional Threshold of Color-Difference Perceptibility in Painted Samples: Variability of Observers in four CIE Color Regions;** *Klaus Witt;* 1987; COLOR research and application, Vol. 12 Nr. 3, Seiten 128-134

[Wit90] **Parametric Effects on Surface Color-Difference Evaluation at Thresholds;** *Klaus Witt;* 1990; COLOR research and application, Vol. 15 Nr. 4, Seiten 189-199

[Wit99] **Geometric Relations between Scales of Small Colour Differences;** *Klaus Witt;* 1999; COLOR research and application, Vol. 24 Nr. 2, Seiten 78-92

[WyS00] **Color Science - Concept and Methods Quantitative Data and Formula (2nd Edition);** *Günter Wyszecki, W.S. Stiles;* 2000; Wiley & Sons

[Wys60] **Farbsysteme;** *Günter Wyszecki;* 1960; Musterschmidt Verlag

[XuY05] **Visual Evaluation at Scale of Threshold to Suprathreshold Color Difference;** *Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi;* 2005; COLOR research and application, Vol. 30 Nr. 3, Seiten 198-208

[XYS02] **Correlation between Visual and Colorimetric Scales Ranging from Threshold to large Color Difference;** *Haisong Xu, Hirohisa Yaguchi, Satoshi Shiori;* 2002; COLOR research and application, Vol. 27 Nr. 5, Seiten 349-359

[ZhM06] **How Well Can People Use Different Color Attributes?;** *Hongqin Zhang, Ethan D. Montag;* 2006; COLOR research and application, Vol. 31 Nr. 6, Seiten 445-457

[Zwi98a] **Experimentelle Untersuchung zu Kontexteffekten bei hochgesättigten Farben;** *Rainer Zwisler;* 1998; Doktorarbeit Universität Regensburg

[Zwi98b] **Geschichte der Psychologie des Sehens nach Boring (1942);** *Rainer Zwisler;* 1998; Skript Universität Regensburg, Institut für Psychologie

Anhang

In diesem Anhang befinden sich die verwendeten Farbabstandsformel sowie die Methoden für die Farbmessung und die Herstellung der Testseiten. Des Weiteren sind diejenigen ermittelten und verarbeiteten Daten angegeben, die für die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der vorliegenden Arbeit unmittelbar entscheidend waren.

Während der Untersuchung wurden die Daten von 40 Probanden aufgenommen. Aufgrund der Datenmenge ist es nicht möglich, alle Werte an dieser Stelle aufzuzeigen. Es erfolgt eine Beschränkung auf entscheidende Daten. Die vollständigen Daten sowie alle Graphiken, die bei der Untersuchung erzeugt wurden, befinden sich auf einer beigelegten CD.

A.1 Farbmessung

Die Messung der Reflexions- und der Transmissionsgrade erfolgt mit einem „SpectroScan Transmission“ der Firma GretagMacbeth. Der SpectroScan[73] besteht aus dem „SpectroLino“, dem eigentlichen Messgerät, und einem Messtisch. Für die Messung der Reflexionsgrade wird folgender Arbeitsvorgang durchgeführt: Die zu messende Testseite wird auf die Elektrostatikfläche des Messtisches gelegt und durch Drücken der Taste „Pap. hold" fixiert. Nun wird am Computer die Software für die Reflexionsgradmessung der Testseite gestartet, sie baut eine Verbindung zum SpectroScan auf. Dann muss festgelegt werden, welche Größe die Testvorlage hat, das heißt aus wie vielen Reihen und Zeilen sie besteht.[74] Nun wird der Messvorgang gestartet. Dafür müssen zuerst die drei Fixpunkte der Testvorlage angesteuert und ihre Koordinaten an die Software übergeben werden. Das Gerät misst nun die Reflexionsgrade der Farbe und speichert sie dann in einer Datei. Zur Messung der Transmissionsgrade eines Filters müssen folgende Arbeitsschritte durchgeführt werden: Die Software für die Transmissionsgradmessung wird auf dem Computer gestartet, die Verbindung zum SpectroScan hergestellt und die Probenlampe vermessen. Der zu messende Filter wird auf die Probenlampe gelegt und die Transmissionsgrade werden gemessen. Mit Hilfe der Software können die Transmissionsgrade nun in einer Datei gespeichert werden [SpS].

A.1.1 Technische Daten des SpectroScans

Tabelle A.1 Aufnahme des Spektrums

Spektralmessung	über holografisches Beugungsgitter
Spektraler Messbereich	380 bis 730 nm
Physikalisch Auflösung	10 nm

[73] Im Folgenden wird anstatt „SpectroScan Transmission“ die Kurzbezeichnung SpectroScan verwendet.

[74] Es ist dabei wichtig, dass die zu messenden Farben in einer rechteckigen Struktur mit gleich großen geometrischen Abständen zwischen den Farbmustern angeordnet sind.

Tabelle A.2 Technische Daten des SpectroLinos für die Reflexionsmessung

Messgeometrie	45°/0° Ringoptik nach DIN 5033
Messblendendurchmesser	4,5 / 8 mm
Lichtquelle	Wolfram, gasgefüllt, Normlichtart A
Physikalische Filterung	D65 (angenähertes Tageslicht), Pol (polarisiert) und No (neutral, angenähertes Glühlampenlicht A)
Farbmetrik	CIE-XYZ, CIE-L*a*b*, CIE-L*u*v*, RxRyRz
Lichtarten der Farbmetrik	D50, D65, A, C, D30…D300, F1…F12
Beobachtungswinkel	2°, 10°
Weißbezug	absolut, relativ
Densitometrie	DIN 16536, DIN 16536 NB, ANSI STATUS A, ANSI STATUS T
Messzeiten	No-Filter ca. 1 s, Pol-Filter ca. 2,5 s, D65-Filter ca. 2 s
Geräteübereinstimmung	typisch 0,03 ΔE^* (Mittelwert über 12 Kacheln), maximal 0,8 ΔE^* (Mittelwert über 12 Kacheln)
Kurzzeit-Reproduzierbarkeit	0,03 ΔE^* (Mittelwert aus 10 Messungen im Abstand von 10 s auf Weiß)

Tabelle A.3 Technische Daten des SpectroLinos für die Transmissionsmessung

Messgeometrie	diffus/gerichtet (d/0), gerichtet/gerichtet (0/180) nach DIN 5033
Messblendendurchmesser	1 mm, 2 mm, 3 mm
Beleuchtung	Normlichtart A nach ISO 5/3
Farbmetrik	CIE-XYZ, CIE-L*a*b*, CIE-L*u*v*
Lichtarten der Farbmetrik	D50, D65, A, C, D30…D300, F1…F12
Beobachtungswinkel	2°, 10°
Densitometrie	DIN 16536, DIN 16536 NB, ANSI STATUS A, ANSI STATUS T
Messzeiten	5 s
Kurzzeit-Reproduzierbarkeit	0,5 ΔE^* (Mittelwert aus 10 Messungen im Abstand von 15 s, Blende 3 mm diffus)

Tabelle A.4 Umgebungsbedingungen des SpectroScan

Verwendbarkeit	Innenräume
Betriebstemperatur	10°C – 40°C
Lagertemperatur	-20°C – 70°C
Feuchtigkeit	max. relative Feuchtigkeit 80% bei 30°C, linear abnehmend bis zu 50% relativer Feuchte bei 40°C, kondenswasserfrei
Höhe	bis zu 2000 m über NN
Verschmutzungsgrad	2 nach IEC 664

Die Tabelle A.1 zeigt die Art der Spektralmessung sowie den Wellenlängenbereich für die Aufnahme des Spektrums durch den SpectroLino[75]. Die Tabelle A.2 beinhaltet die technischen Daten des SpectroLinos für die Reflexionsmessung. Die Tabelle A.3 gibt die technischen Daten des SpectroLinos für die Transmissionsmessung an und die Tabelle A.4 zeigt die Umgebungsbedingungen für den SpectroScan.

[75] Der „SpectroLino“ ist das Teilgerät des SpectroScan, das die Messung durchführt.

A.1.2 Überprüfung der Genauigkeit der Farbmessung

Um zu überprüfen, wie genau die vom SpectroScan gemessenen Daten sind, wurde es mit dem DMC 25 der Firma Zeiss verglichen. Das DMC[76] ist ein Referenzsystem für die Reflexionsmessung. Es misst die spektralen Reflexionsgrade nach der DIN 5036 Teile 1 und 3. Dafür werden makroskopische Proben benötigt. Die Messungen erfolgen für einen Wellenlängenbereich von 380 bis 720 nm und in der 45°/0°-Geometrie. [Ott07]

Für die Überprüfung wurden die Reflexionsgrade einer Testvorlage mit 64 Farben (4x4x4-Farbmatrix) auf beiden Geräten gemessen. Die Testvorlage wurde in RGB-Daten definiert.[77]

Tabelle A.5 Durchschnitte und Maximalwerte beim Vergleich der Messgeräte

	Durchschnitt	Maximalwert
Vergleich SpectroScan - DMC	1,594070	3,315120
Wiederholgenauigkeit SpectroScan	0,316373	0,865372
Wiederholgenauigkeit DMC	0,386691	0,811734

Die Tabelle A.5 zeigt die Durchschnitte und Maximalwerte von ΔE^*_{ab}. Das SpectroScan besitzt bei wiederholtem Messen keine große Schwankung. Es ist davon auszugehen, dass die Wiederholgenauigkeit ausreicht. Die Kontrollmessung des DMC wurde nur für 8 Farben[78]. durchgeführt, da die Messzeit für eine Kontrolle aller 64 Farben zu lang gewesen wäre. Auch hier zeigt sich eine vertretbare Wiederholgenauigkeit.

Tabelle A.6 ΔE^*_{ab}-Werte für verschiedene Farben

	RGB-Werte[79]	Vergleich SpectroScan - DMC	Wiederholgenauigkeit SpectroScan	Wiederholgenauigkeit DMC
Schwarz	0 0 0	1,062586	0,188836	0,306771
Weiß	1 1 1	1,248352	0,039377	0,011894
Rot	1 0 0	0,202193	0,358153	0,617642
Grün	0 1 0	2,606388	0,392828	0,505626
Blau	0 0 1	1,846996	0,208923	0,811734
Cyan	0 1 1	1,842542	0,141318	0,063104
Magenta	1 0 1	1,967260	0,138720	0,161341
Gelb	1 1 0	1,338318	0,491680	0,615411

Beim Vergleich von SpectroScan und DMC (Tabelle A.6) wird deutlich, dass die Größe von ΔE^*_{ab} nicht von der Wiederholgenauigkeit beider Geräte abhängt.

[76] Die Abkürzung „DMC“ wird ab jetzt für das „DMC 25“ der Firma Zeiss benutzt.

[77] Die Testseite wurde von einem Tintenstahldrucker „Canon i905D“ auf „Canon Glossy Photo Paper GP-401“ ausgedruckt.

[78] Bei den 8 Farben handelte es sich um Schwarz, Weiß, Rot, Grün, Blau, Cyan, Magenta und Gelb.

[79] Die RGB-Werte sind dabei wie folgt definiert: Der erste Wert steht für den Rotanteil, der zweite für den Grünanteil und der dritte für den Blauanteil. Die Werte verändern sich jeweils zwischen 0 und 1.

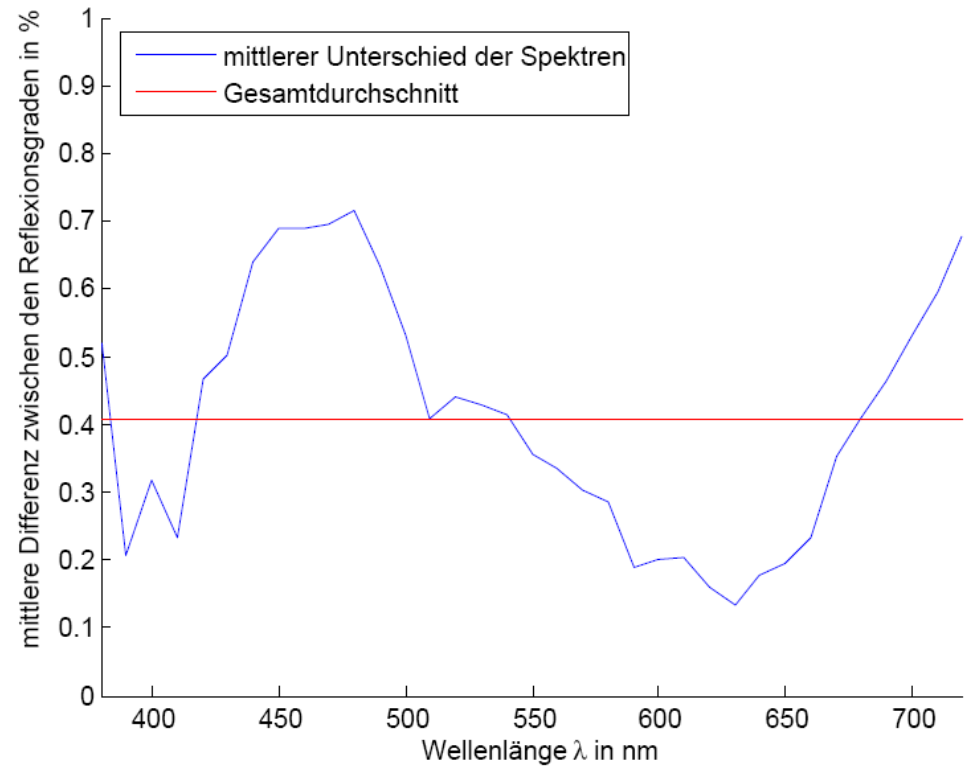

Bild A.1 Vergleich SpectroScan zu DMC

Das Bild A.1 zeigt den durchschnittlichen Unterschied zwischen den Spektren, die vom DMC gemessen wurden, sowie den Mittelwert zwischen den Spektren, die vom SpectroScan vor und nach der DMC-Messung gemacht wurden. Dabei zeigt sich deutlich, dass gerade im Bereich zwischen 410 nm und 520 nm größere Unterschiede zwischen den Messungen der beiden Geräte vorkommen. Genau in diesem Bereich liegt die Normspektralwertfunktion $\bar{z}(\lambda)$. Es kommt zu einer Veränderung des Normfarbwertes *Z*. Außerdem liegen in den kurz- und langwelligen Bereichen des Lichtes stärkere Unterschiede zwischen den Spektren vor. Diese Unterschiede haben aber so gut wie keinen Einfluss auf die Normfarbwerte. Der Durchschnitt ist als rote Linie eingezeichnet und liegt bei 0,41 %. Das Maximum befindet sich bei einer Wellenlänge von 480 nm und beträgt 0,72 %, während das Minimum mit 0,14 % bei 540 nm liegt..

Die Tabelle A.7 zeigt die durchschnittlichen Differenzen bei den Normfarbwerten und den Farbmaßzahlen.

Tabelle A.7 Durchschnittliche Differenzen der Normfarbwerte und Farbmaßzahlen

ΔX	ΔY	ΔZ	ΔL^*	Δa^*	Δb^*
0,160	0,234	0,621	0,515	0,657	1,274

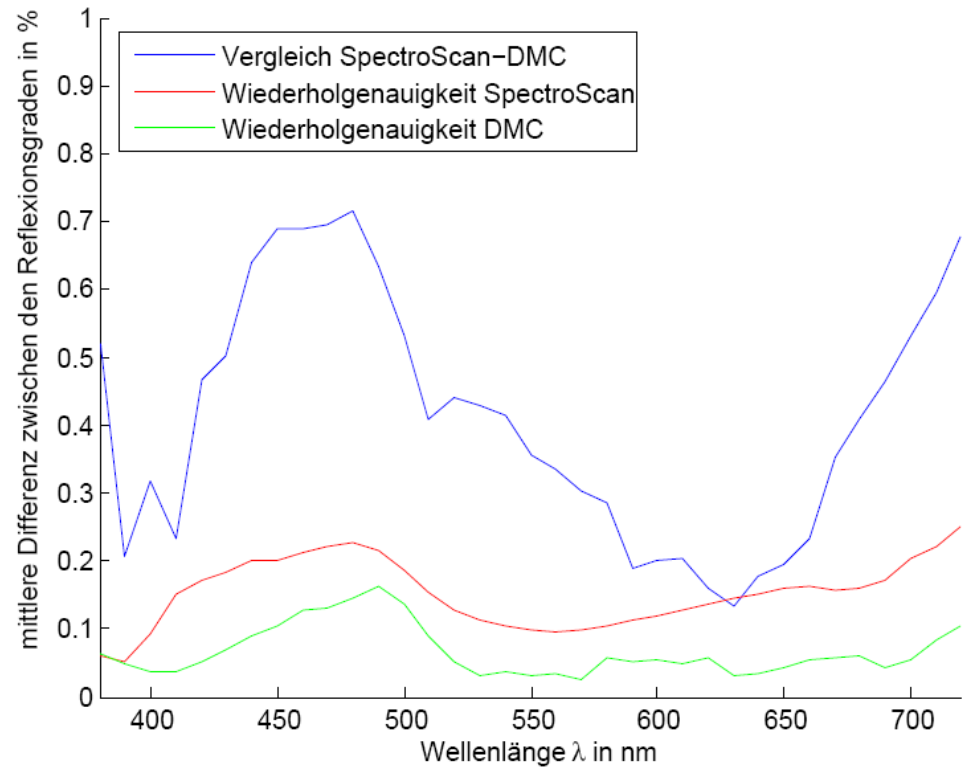

Bild A.2 Durchschnittliche Differenzen der spektralen Reflexionsgrade beim Vergleich der Messgeräte und der Wiederholgenauigkeits-Messungen

Der große Unterschied im Bereich von 410 nm und 520 nm (Bild A.2) ist höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass beim SpectroScan eine etwas größere Fluoreszenz vorliegt als beim DMC. Da sich diese Schwankungen aber nicht stark auswirken, kann man die gemessenen Werte des SpectroScan davon unabhängig verwenden.

In einer Arbeit von Alicia Pons und Joaquín Campos [PoC04] wird untersucht, welchen Einfluss ein fluoreszierender Weißstandard gegenüber einem nicht fluoreszierenden hat. Da das Bariumsulfat, das als Weißstandard beim DMC verwendet wird, keine fluoreszierenden Eigenschaften hat, könnte ein fluoreszierender Weißstandard beim SpectroScan die Unterschiede erklären. Bei den Untersuchungen von Pons und Campos weisen aber vor allem rote und orange Farben einen großen Unterschied auf. Beim Vergleich von SpectroScan und DMC zeigt sich aber nur ein geringer Unterschied bei den rötlichen Farben. Der Einfluss durch einen fluoreszierenden Weißstandard kann also so gut wie ausgeschlossen werden.

Das SpectroScan zeigt zwar geringe Unterschiede in der spektralen Aufnahme der Reflexion im Vergleich zum DMC, ist aber dennoch für diese Untersuchung am besten geeignet. Das hat folgende Gründe: Das SpectroScan arbeitet sehr viel schneller als das DMC. Die Wiederholgenauigkeit ist vollkommen ausreichend. Zudem kann das SpectroScan kleinere Probengrößen messen. Für die Berechnung der Farbmaßzahlen spielt es kaum eine Rolle, dass das Spektrum nur bis 730 nm und nicht bis 780 nm gemessen wird. In diesem Bereich sind die Normspektralfunktionen $\bar{x}(\lambda)$ und $\bar{y}(\lambda)$ sehr klein und $\bar{z}(\lambda)$ ist Null.

Für alle Lichtarten erfolgt die Berechnung der Farbwerte aus den Reflexionsgraden in MATLAB-Programmen. Da die Farbmaßzahlen in anderen Farbräumen zum Teil nicht aus den CIELAB-Daten zurückberechnet werden, müssen sie für alle Lichtarten aus den spektralen Reflexionsgraden ermittelt werden.

A.2 Farbabstandsformeln

Neben dem CIELAB-Farbabstand werden noch einige weitere Farbabstandsformeln in dieser Untersuchung betrachtet.

A.2.1 LABHNU-Farbräume

Für die LABHNU-Farbräume wird der CIELAB-Farbraum leicht verändert. Die Helligkeit L^* wird aber nicht verändert und der Farbabstand wird weiter über den Vektorabstand berechnet.

$$a^* = 500 \cdot \left[a' - a'_n\right] \cdot Y^{\frac{1}{3}} \qquad \text{(Gl. A.1)}$$

$$b^* = 500 \cdot \left[b' - b'_n\right] \cdot Y^{\frac{1}{3}} \qquad \text{(Gl. A.2)}$$

$$a' = \frac{\left(\frac{x}{y} + \frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{3}}}{4} \text{ für LABHNU} \qquad \text{(Gl. A.3)}$$

$$a' = \frac{\left(\frac{x}{y} + 1\right)}{15} \text{ für LABHNU1} \qquad \text{(Gl. A.4)}$$

$$a' = \frac{\left(\frac{x}{y} + \frac{1}{6}\right)^{\frac{2}{3}}}{15} \text{ für LABHNU2} \qquad \text{(Gl. A.5)}$$

$$b' = -\frac{\left(\frac{z}{y} + \frac{1}{6}\right)^{\frac{1}{3}}}{12} \text{ für alle drei LABHNU-Farbräume} \qquad \text{(Gl. A.6)}$$

Tabelle A.8 Farbarten für den idealen mattweißen Körper

	a'_n	b'_n
LABHNU	0,259403	-0,089899
LABHNU1	0,130031	-0,089899
LABHNU2	0,071776	-0,089899

A.2.2 CMC(l:c)-Farbabstandsformel

Die CMC-Farbabstandsformel ist eine Modifizierung der CIELAB-Farbabstandsformel, die die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verwendet.

$$\Delta E^*_{\mathrm{CMC}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*_{\mathrm{ab}}}{l \cdot S_{\mathrm{L}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{\mathrm{ab}}}{c \cdot S_{\mathrm{C}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{\mathrm{ab}}}{S_{\mathrm{H}}}\right)^2} \qquad \text{(Gl. A.7)}$$

$$S_{\mathrm{L}} = \frac{0{,}040975 \cdot L^*_{\mathrm{ab,0}}}{(1 + 0{,}01765 \cdot L^*_{\mathrm{ab,0}})}, \text{ wenn } L^*_{\mathrm{ab,0}} \geq 16 \qquad \text{(Gl. A.8)}$$

$$S_{\mathrm{L}} = 0{,}511 \text{ , wenn } L^*_{\mathrm{ab,0}} < 16 \qquad \text{(Gl. A.9)}$$

$$S_{\mathrm{C}} = \frac{0{,}0638 \cdot C^*_{\mathrm{ab,0}}}{(1 + 0{,}0131 \cdot C^*_{\mathrm{ab,0}})} + 0{,}638 \qquad \text{(Gl. A.10)}$$

$$S_{\mathrm{H}} = S_{\mathrm{C}}\left(T \cdot f + 1 - f\right) \qquad \text{(Gl. A.11)}$$

$$f = \sqrt{\frac{\left(C^*_{\mathrm{ab,0}}\right)^4}{\left(C^*_{\mathrm{ab,0}}\right)^4 + 1900}} \qquad \text{(Gl. A.12)}$$

$$T = 0{,}36 + \left|0{,}4 \cdot \cos(h^*_{\mathrm{ab,0}} + 35°)\right| \qquad \text{(Gl. A.13)}$$

$$T = 0{,}56 + \left|0{,}2 \cdot \cos(h^*_{\mathrm{ab,0}} + 168°)\right| \qquad \text{(Gl. A.14)}$$

Die Gleichung A.13 gilt, wenn $h^*_{\mathrm{ab,1}}$ nicht zwischen 164° und 345° liegt, ansonsten die Gleichung A.14. Der Index „ab,0“ signalisiert, dass die CIELAB-Werte der Referenzprobe verwendet werden.

Die Parameter l und c in der Gleichung A.7 sind normalerweise gleich 1 zu setzen, wobei l für die Gewichtung der Helligkeit und c für die Gewichtung der Buntheit steht. Sie sind jedoch nicht gleich 1, wenn die Betrachtungsbedingungen von den Standardbedingungen abweichen.

A.2.3 CIE94-Farbabstandsformel

Die CIE94-Farbabstandsformel ist eine Modifizierung der CIELAB-Farbabstandsformel, die die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verwendet.

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*_{\mathrm{ab}}}{K_{\mathrm{L}} \cdot S_{\mathrm{L}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{\mathrm{ab}}}{K_{\mathrm{C}} \cdot S_{\mathrm{C}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{\mathrm{ab}}}{K_{\mathrm{H}} \cdot S_{\mathrm{H}}}\right)^2} \qquad \text{(Gl. A.15)}$$

$$S_{\mathrm{L}} = 1 \qquad \text{(Gl. A.16)}$$

$$S_{\mathrm{C}} = 1 + 0{,}045 \cdot C^*_{\mathrm{ab,0}} \qquad \text{(Gl. A.17)}$$

$$S_{\mathrm{H}} = 1 + 0{,}015 \cdot C^*_{\mathrm{ab,0}} \qquad \text{(Gl. A.18)}$$

Die Parameter K_{L}, K_{C}, und K_{H} sollen die experimentellen Bedingungen berücksichtigen. Sind die Standardbedingungen erfüllt, sollten sie alle gleich 1 sein.

A.2.4 CIEDE2000-Farbabstandsformel

Die CIEDE2000-Farbabstandsformel ist eine Modifizierung der CIELAB-Farbabstandsformel, die die Buntheitsdifferenz ΔC^*_{ab} und die Bunttondifferenz ΔH^*_{ab} verwendet, aber vorher wird der CIELAB-Farbraum noch leicht verändert.

$$G = 0{,}5 \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{\left(\overline{C}^*_{ab}\right)^7}{\left(\overline{C}^*_{ab}\right)^7 + 25^7}} \right) \quad \text{(Gl. A.19)}$$

$$\text{mit } \overline{C}^*_{ab} = \frac{C^*_{ab,0} + C^*_{ab,1}}{2} \quad \text{(Gl. A.20)}$$

[80]

$$L' = L^* \quad \text{(Gl. A.21)}$$

$$a' = (1 + G) \cdot a^* \quad \text{(Gl. A.22)}$$

$$b' = b^* \quad \text{(Gl. A.23)}$$

$$C'_{ab} = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad \text{(Gl. A.24)}$$

$$\Delta L' = L'_0 - L'_1 \quad \text{(Gl. A.25)}$$

$$\Delta C'_{ab} = C'_{ab,0} - C'_{ab,1} \quad \text{(Gl. A.26)}$$

$$\Delta H'_{ab} = 2 \cdot \sqrt{C'_{ab,0} \cdot C'_{ab,1}} \cdot \sin\left(\frac{\Delta h'_{ab}}{2} \right) \quad \text{(Gl. A.27)}$$

$$\text{mit } \Delta h'_{ab} = h'_{ab,0} - h'_{ab,1} \quad \text{(Gl. A.28)}$$

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'_{ab}}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'_{ab}}{K_H S_H} \right)} \quad \text{(Gl. A.29)}$$

$$S_L = 1 + \frac{0{,}015 \cdot \left(\overline{L}' - 50\right)^2}{\sqrt{20 + \left(\overline{L}' - 50\right)^2}} \quad \text{(Gl. A.30)}$$

$$S_C = 1 + 0{,}045 \cdot \overline{C}'_{ab} \quad \text{(Gl. A.31)}$$

$$S_H = 1 + 0{,}015 \cdot \overline{C}'_{ab} \cdot T \quad \text{(Gl. A.32)}$$

$$T = 1 - 0{,}17 \cos\left(\overline{h}'_{ab} - 30°\right) + 0{,}24 \cos\left(2 \cdot \overline{h}'_{ab}\right) + 0{,}32 \cos\left(3 \cdot \overline{h}'_{ab} - 6°\right) - 0{,}20 \cos\left(4 \cdot \overline{h}'_{ab} - 63°\right) \quad \text{(Gl. A.33)}$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) \cdot R_C \quad \text{(Gl. A.34)}$$

$$\Delta\theta = 30 \exp\left\{ -\left[\frac{\left(\overline{h}'_{ab} - 275°\right)}{25} \right]^2 \right\} \quad \text{(Gl. A.35)}$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\left(\overline{C}'_{ab}\right)^7}{\left(\overline{C}'_{ab}\right)^7 + 25^7}} \quad \text{(Gl. A.36)}$$

[80] Die Indizes „0“ und „1“ stehen für die Bezugsfarbe und die Probenfarbe.

Die Parameter K_L, K_C, und K_H sollen genau wie bei der CIE94-Farbabstandsformel die experimentellen Bedingungen berücksichtigen. Sind die Standardbedingungen erfüllt, sollten sie alle gleich 1 sein.

A.2.5 DIN99-Farbabstandsformel

Für DIN99-Farbabstandsformel wird der CIELAB-Farbraum modifiziert und dann der Vektorabstand verwendet.

$$L_{99} = \left(\frac{1}{k_E}\right) \cdot 105{,}51 \cdot \left[\ln\left(1 + 0{,}0158 \cdot L^*\right)\right] \quad \text{(Gl. A.37)}$$

$$h_{99} = \arctan\left(\frac{f}{e}\right), \text{ wenn } e > 0 \text{ und } f \geq 0 \quad \text{(Gl. A.38)}$$

$$h_{99} = 90°, \text{ wenn } e = 0 \text{ und } f > 0 \quad \text{(Gl. A.39)}$$

$$h_{99} = 180° + \arctan\left(\frac{f}{e}\right), \text{ wenn } e < 0 \quad \text{(Gl. A.40)}$$

$$h_{99} = 270°, \text{ wenn } e = 0 \text{ und } f < 0 \quad \text{(Gl. A.41)}$$

$$h_{99} = 360° + \arctan\left(\frac{f}{e}\right), \text{ wenn } e > 0 \text{ und } f < 0 \quad \text{(Gl. A.42)}$$

$$h_{99} = 0°, \text{ wenn } e = 0 \text{ und } f = 0 \quad \text{(Gl. A.43)}$$

$$C_{99} = \frac{\left[\ln\left(1 + 0{,}045G\right)\right]}{0{,}045 k_{CH} k_E} \quad \text{(Gl. A.44)}$$

$$a_{99} = C_{99} \cdot \cos(h_{99}) \quad \text{(Gl. A.45)}$$

$$b_{99} = C_{99} \cdot \sin(h_{99}) \quad \text{(Gl. A.46)}$$

$$e = a^* \cdot \cos(16°) + b^* \cdot \sin(16°) \quad \text{(Gl. A.47)}$$

$$f = -0{,}7 \cdot a^* \cdot \sin(16°) + 0{,}7 \cdot b^* \cdot \cos(16°) \quad \text{(Gl. A.48)}$$

$$G = \sqrt{e^2 + f^2} \quad \text{(Gl. A.49)}$$

Die Parameter k_{CH} und k_E beschreiben den Einfluss der Betrachtungsbedingungen. Wenn die Referenzbedingungen gelten, sind die k-Parameter beide gleich 1 zu setzen.

$$\Delta E_{99} = \sqrt{(\Delta L_{99})^2 + (\Delta a_{99})^2 + (\Delta b_{99})^2} \quad \text{(Gl. A.50)}$$

A.2.6 Optimierte DIN99-Farbabstandsformel

Für die DIN99o-Farbabstandsformel wird der CIELAB-Farbraum modifiziert und dann der Vektorabstand verwendet.

$$L_{99o} = \left(\frac{1}{k_E}\right) \cdot 303{,}67 \cdot \left[\ln\left(1 + 0{,}0039 \cdot L^*\right)\right] \quad \text{(Gl. A.51)}$$

$$h_{99o} = h_{eofo} + 26° \quad \text{(Gl. A.52)}$$

$$C_{99o} = \frac{\left[\ln\left(1 + 0{,}075 Go\right)\right]}{0{,}0435 k_{CH} k_E} \quad \text{(Gl. A.53)}$$

$$a_{99o} = C_{99o} \cdot \cos(h_{99o}) \quad \text{(Gl. A.54)}$$

$$b_{99o} = C_{99o} \cdot \sin(h_{99o}) \quad \text{(Gl. A.55)}$$

$$eo = a^* \cdot \cos(26°) + b^* \cdot \sin(26°) \quad \text{(Gl. A.56)}$$

$$fo = -0{,}83 \cdot a^* \cdot \sin(26°) + 0{,}83 \cdot b^* \cdot \cos(26°) \quad \text{(Gl. A.57)}$$

$$Go = \sqrt{eo^2 + fo^2} \quad \text{(Gl. A.58)}$$

$$h_{eofo} = \arctan\left(\frac{fo}{eo}\right), \text{ wenn } eo > 0 \text{ und } fo \geq 0 \quad \text{(Gl. A.59)}$$

$$h_{eofo} = 90°, \text{ wenn } eo = 0 \text{ und } fo > 0 \quad \text{(Gl. A.60)}$$

$$h_{eofo} = 180° + \arctan\left(\frac{fo}{eo}\right), \text{ wenn } eo < 0 \quad \text{(Gl. A.61)}$$

$$h_{eofo} = 270°, \text{ wenn } eo = 0 \text{ und } fo < 0 \quad \text{(Gl. A.62)}$$

$$h_{eofo} = 360° + \arctan\left(\frac{fo}{eo}\right), \text{ wenn } eo > 0 \text{ und } fo < 0 \quad \text{(Gl. A.63)}$$

$$h_{eofo} = 0°, \text{ wenn } eo = 0 \text{ und } fo = 0 \quad \text{(Gl. A.64)}$$

Für die Parameter k_E und k_{CH} gelten die gleichen Bedingungen wie bei der DIN99-Farbabstandsformel.

$$\Delta E_{99o} = \sqrt{(\Delta L_{99o})^2 + (\Delta a_{99o})^2 + (\Delta b_{99o})^2} \quad \text{(Gl. A.65)}$$

A.2.7 Farbschwellen-Formel LABJNDS

Die LABJNDS-Farbabstandsformel verwendet als Basis den (x,y,Y)-Farbraum.

$$\Delta E^*_{JND} = \frac{Y_0 \cdot \sqrt{(\Delta Y)^2 + \left(a_0 \cdot \Delta a'' \cdot \overline{Y}\right)^2 + \left(b_0 \cdot \Delta b'' \cdot \overline{Y}\right)^2}}{s + d\overline{Y}^e} \quad \text{(Gl. A.66)}$$

Es gilt für ein Umfeld mit D65-Standardbeleuchtung Y_0 = 1,5, a_0 = 1,0 und b_0 = 1,8 sowie s = 0,0170, d = 0,0058 und e = 1,0. Ansonsten gilt:

$$\overline{Y} = \frac{(Y_1 + Y_2)}{2} \quad \text{(Gl. A.67)}$$

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 \quad \text{(Gl. A.68)}$$

$$\Delta a'' = a''_1 - a''_2 \quad \text{(Gl. A.69)}$$

$$\Delta b'' = b''_1 - b''_2 \qquad \text{(Gl. A.70)}$$

$$a'' = a_n + \frac{(a - a_n)}{(1 + 0{,}5 \cdot |a - a_n|)} \qquad \text{(Gl. A.71)}$$

$$b'' = b_n + \frac{(b - b_n)}{(1 + 0{,}5 \cdot |b - b_n|)} \qquad \text{(Gl. A.72)}$$

$$a = \frac{x}{y} \qquad \text{(Gl. A.73)}$$

$$b = -0{,}4 \cdot \frac{z}{y} \qquad \text{(Gl. A.74)}$$

A.3 Herstellung der Testseiten

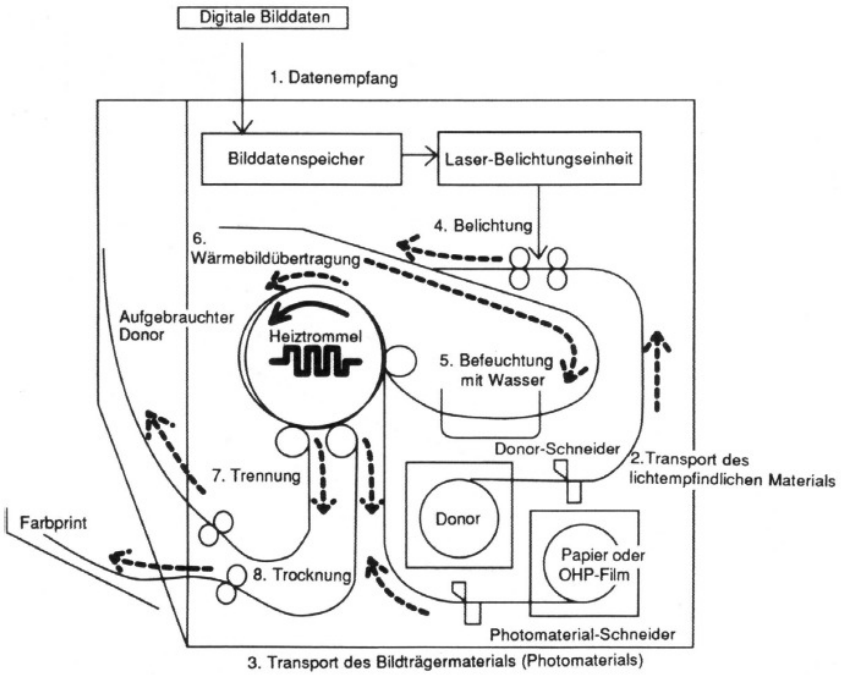

Bild A.3 Schematischer Ablauf des Druckprozesses

Für die Herstellung der Testseiten wird der „Fujix Pictrography 3000“ von Fuji[81] benutzt. Es handelt sich dabei um einen Drucker, der nach dem Prinzip des Farbstoff-Diffusionsverfahrens arbeitet. Das Bild A.3 zeigt den Ablauf des Druckprozesses beim Fujix.

Die Abläufe beim Druckvorgang sind folgende:

1. Die Bilddaten werden in den Bildspeicher geschrieben.
2. Das Geberpapier (= Donor) wird passend geschnitten.
3. Der Empfänger (= Bildträgermaterial) wird passend geschnitten.

[81] Im weiteren Text wird statt „Fujix Pictrography 3000“ die Abkürzung Fujix verwendet.

4. Das Geberpapier wird entsprechend der Bilddaten während des Transports durch die Laserstrahlung moduliert.
5. Das Geberpapier wird mit Wasser überzogen.
6. Das Geberpapier und der Empfänger werden zusammengefügt und über die Heiztrommel für die thermische Übertragung geleitet.
7. Der Empfänger wird vom Geberpapier befreit.
8. Trocknung und Ablage im Druckfach des Empfängers.

Die Tabelle A.9 zeigt eine Übersicht über die wichtigsten technischen Daten des Fujix.

Tabelle A.9 Technische Daten des Fujix

Modellbezeichung	PGB3000
Modellart	Tischgerät
Drucksystem	Wärme-Entwicklungs-Bildübertragungssystem mit Laser-Belichtung
Maximale Bildfläche	299 × 218 mm (A4-Sonderformat)
Auflösung	133, 200, 267, 320 und 400 dpi, umschaltbar
Zahl der Reproduktionsfarben	16,7 Millionen Farben mit je 256 Abstufungen für Cyan, Magenta und Gelb

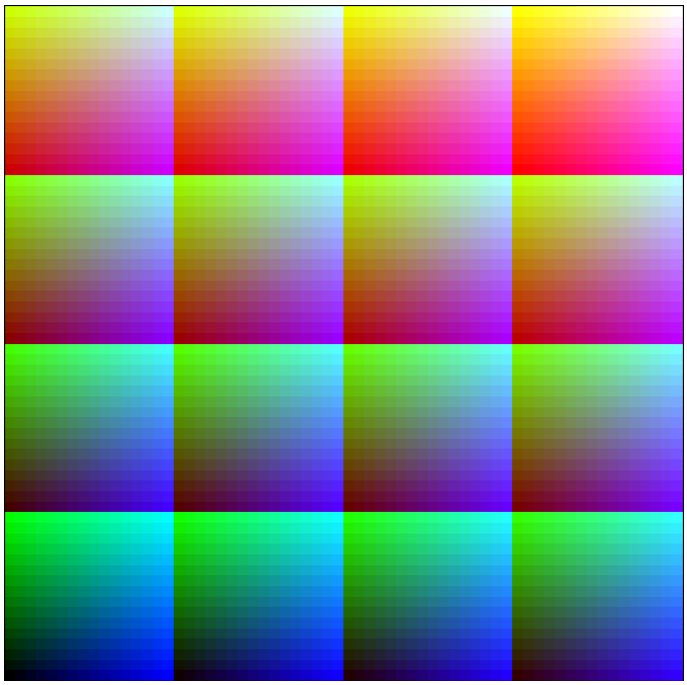

Bild A.4 16×16×16-RGB-Farbmatrix

Damit die Ausgabe der Testvorlagen sehr nahe an den gewünschten CIELAB-Farbwerten liegt, wird vor dem Ausdruck der Vorlagen eine Kalibrierung durchgeführt. Es handelt sich dabei um die „Trilineare Interpolation in kubisch-primitiver Referenzfarbanordnung“[82], die von Jens Witt in seiner Doktorarbeit [Wit06] beschrieben und untersucht wurde.

Die TriSC benötigt den Ausdruck einer Prüfvorlage, die in dieser Arbeit einer in RGB definierten 16×16×16-Farbmatrix entspricht. Nach Messung der Farbwerte der Prüfvorlage werden jedem der 4096 (r|g|b)-Tripel bestimmte CIELAB-Farbmaßzahlen zugeordnet. Durch

[82] „Trilineare Interpolation in kubisch-primitiver Referenzfarbanordnung“ wird ab jetzt mit TriSC abgekürzt.

diese Zuordnung lässt sich für jedes CIELAB-Farbmaßzahlen-Tripel ein bestimmtes (r|g|b)-Tripel berechnen, durch welches dann der Ausdruck realisiert wird. Bild A.4 zeigt die 16×16×16-RGB-Farbmatrix, wobei sich im äußersten Kästchen unten links die Farbe mit dem RGB-Wert (0|0|0) und oben rechts die Farbe mit dem RGB-Wert (1|1|1) befinden.

Jens Witt hat in seiner Arbeit speziell die Qualität der Kalibrierung des Fujix untersucht und für die TriSC bei einer Prüfvorlage mit einer in RGB definierten 9×9×9-Farbmatrix[83] ein mittleres ΔE^*_{ab} von 1,04 und ein maximales ΔE^*_{ab} von 2,5 für den Ausdruck ermittelt. Ein weiteres Ergebnis war, dass sich die Qualität durch Vergrößerung der RGB-Farbmatrix nicht wesentlich verbessern lässt.

Beim endgültigen Ausdruck der Testvorlagen für die Schwellenuntersuchung ergibt sich ein mittleres ΔE^*_{ab} von 1,597. Im Einzelnen finden sich allerdings bei der Darstellung im roten Bereich des CIELAB-Farbraumes größere ΔE^*_{ab}. Vor allem die Offset-Farben Magentarot und Orangerot werden vom Fujix unbefriedigend realisiert. Dieser Effekt entsteht, weil die vom Fujix wiedergegebenen Farbmaßzahlen für diese Offset-Farbmaßzahlen sich stark von den in der Norm angegebenen Farbmaßzahlen unterscheiden. Der Druckerfarbraum des Fujix ist gerade im Rotbereich nicht hinreichend ausgedehnt, um diese Farben richtig darzustellen. Die Tabelle A.9 zeigt die von Jens Witt gemessenen CIELAB-Farbmaßzahlen der Grundfarben beim Ausdruck durch den Fujix und der Unterschied zu den Farbmaßzahlen der Offset-Farben.

Tabelle A.9 CIELAB-Farbmaßzahlen der Grundfarben des Fujix und der Farbabstand zu die Farbmaßzahlen der Offset-Farben

	L^*_{Fujix}	a^*_{Fujix}	b^*_{Fujix}	L^*_{Offset}	a^*_{Offset}	b^*_{Offset}	ΔE^*_{ab}
Cyanblau	48,30	-27,90	-37,40	58,62	-30,63	-42,75	11,94
Magentarot	34,80	79,80	-36,60	48,13	75,20	-6,80	32,97
Gelb	82,70	-3,50	109,20	90,37	-11,16	96,17	16,95
Orangerot	32,80	61,50	43,50	47,94	65,31	52,07	17,81
Laubgrün	39,40	-62,50	42,50	50,90	-62,96	36,71	12,88
Violettblau	10,40	53,30	-62,90	25,72	31,35	-44,36	32,56

Bei der Auswertung der Untersuchung ist die genaue Wiedergabe der angegebenen Farbmaßzahlen jedoch nicht entscheidend, weil alle Farben nach dem Ausdruck neu gemessen werden und sich alle Auswertungen auf diese ermittelten Farbwerte beziehen. Gerade bei der Untersuchung der großen Farbunterschied ist es nicht entscheidend, die Farbwerte exakt wiederzugeben, denn die Bewertungen der Probanden werden mit den gemessenen Farbmaßzahlen verglichen.

[83] Obwohl eine 9×9×9-rgb-Farbmatrix zu einer ausreichenden Genauigkeit in der Kalibrierung führt, wurde eine 16×16×16-rgb-Farbmatrix verwendet. Diese Entscheidung wurde getroffen, bevor Jens Witt seine Arbeit beendet hatte. - Eine größere Farbmatrix führt nicht zu einer schlechteren Kalibrierung.

A.4 Untersuchung der Farbschwellen

Tabelle A.10 CIELAB-Daten der Farbmuster, die bei der Untersuchung der Farbschwellen verwendet wurden. Der Index „t“ kennzeichnet die theoretischen Farbmaßzahlen und der Index „r“ die real gemessenen. In der letzen Spalte steht der Farbabstand zwischen den Farbdaten.

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Farbmuster 1	50,00	0,00	0,00	50,26	0,68	-0,17	0,75
Farbmuster 2	90,00	0,00	0,00	91,30	-1,02	0,87	1,87
Farbmuster 3	10,00	0,00	0,00	9,98	-0,16	0,37	0,41
Farbmuster 4	50,00	40,00	0,00	49,82	40,68	0,98	1,21
Farbmuster 5	50,00	-40,00	0,00	49,86	-40,39	0,62	0,74
Farbmuster 6	50,00	0,00	40,00	48,79	0,61	39,83	1,37
Farbmuster 7	50,00	0,00	-40,00	50,30	0,33	-40,05	0,45
Farbmuster 8	55,00	0,00	0,00	55,45	0,28	0,03	0,53
Farbmuster 9	60,00	0,00	0,00	60,81	-0,28	0,56	1,03
Farbmuster 10	65,00	0,00	0,00	65,04	0,08	0,73	0,74
Farbmuster 11	70,00	0,00	0,00	70,18	-0,54	1,11	1,25
Farbmuster 12	75,00	0,00	0,00	75,29	-0,34	0,70	0,83
Farbmuster 13	80,00	0,00	0,00	80,31	-0,51	0,93	1,11
Farbmuster 14	85,00	0,00	0,00	85,15	-0,01	0,24	0,29
Farbmuster 15	45,00	0,00	0,00	46,56	-0,81	1,35	2,22
Farbmuster 16	40,00	0,00	0,00	40,05	0,19	0,25	0,32
Farbmuster 17	35,00	0,00	0,00	35,42	-0,09	0,92	1,01
Farbmuster 18	30,00	0,00	0,00	30,15	0,25	0,84	0,88
Farbmuster 19	25,00	0,00	0,00	25,14	0,11	0,84	0,86
Farbmuster 20	20,00	0,00	0,00	20,09	-0,22	0,55	0,60
Farbmuster 21	15,00	0,00	0,00	14,50	0,64	-0,22	0,84
Farbmuster 22	50,00	5,00	0,00	50,04	5,21	-0,76	0,79
Farbmuster 23	50,00	10,00	0,00	50,51	10,81	-0,86	1,29
Farbmuster 24	50,00	15,00	0,00	50,52	14,81	-0,14	0,57
Farbmuster 25	50,00	20,00	0,00	49,97	19,97	0,42	0,42
Farbmuster 26	50,00	25,00	0,00	49,35	25,33	0,06	0,73
Farbmuster 27	50,00	30,00	0,00	50,32	30,28	0,29	0,51
Farbmuster 28	50,00	35,00	0,00	50,51	35,65	0,42	0,92
Farbmuster 29	50,00	-5,00	0,00	50,62	-4,64	-0,48	0,86
Farbmuster 30	50,00	-10,00	0,00	50,58	-10,27	0,22	0,67
Farbmuster 31	50,00	-15,00	0,00	51,07	-15,41	-0,08	1,15
Farbmuster 32	50,00	-20,00	0,00	50,74	-20,00	0,43	0,85
Farbmuster 33	50,00	-25,00	0,00	50,54	-25,33	0,71	0,95
Farbmuster 34	50,00	-30,00	0,00	51,29	-30,77	0,24	1,52
Farbmuster 35	50,00	-35,00	0,00	50,55	-35,30	-0,54	0,83
Farbmuster 36	50,00	0,00	5,00	50,58	0,48	4,49	0,91
Farbmuster 37	50,00	0,00	10,00	50,47	0,85	8,92	1,45
Farbmuster 38	50,00	0,00	15,00	50,27	0,52	14,64	0,69
Farbmuster 39	50,00	0,00	20,00	49,59	0,14	20,13	0,45
Farbmuster 40	50,00	0,00	25,00	48,98	-0,04	24,60	1,09
Farbmuster 41	50,00	0,00	30,00	49,48	0,18	29,09	1,06
Farbmuster 42	50,00	0,00	35,00	49,48	0,36	35,01	0,63

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Farbmuster 43	50,00	0,00	-5,00	51,48	0,90	-5,72	1,87
Farbmuster 44	50,00	0,00	-10,00	51,34	1,02	-10,31	1,71
Farbmuster 45	50,00	0,00	-15,00	50,58	1,05	-15,27	1,23
Farbmuster 46	50,00	0,00	-20,00	49,84	0,36	-19,99	0,40
Farbmuster 47	50,00	0,00	-25,00	49,99	0,44	-25,30	0,53
Farbmuster 48	50,00	0,00	-30,00	50,71	0,57	-30,34	0,97
Farbmuster 49	50,00	0,00	-35,00	50,82	0,41	-35,08	0,92
Farbmuster 50	21,72	-28,28	0,00	22,66	-27,08	-0,01	1,52
Farbmuster 51	35,86	0,00	14,14	35,75	0,27	14,28	0,32
Farbmuster 52	50,00	-28,28	28,28	50,50	-28,46	28,80	0,74
Farbmuster 53	61,55	11,55	-11,55	61,46	12,06	-11,92	0,64
Farbmuster 54	26,91	23,09	-23,09	26,37	23,88	-22,72	1,02
Farbmuster 55	25,72	31,35	-44,36	25,72	31,72	-44,90	0,65
Farbmuster 56	18,01	0,50	-0,46	17,74	0,63	-0,85	0,49
Farbmuster 57	35,86	14,14	0,00	35,66	14,77	0,33	0,74
Farbmuster 58	21,72	0,00	28,28	25,69	0,83	26,44	4,45
Farbmuster 59	50,00	14,14	-14,14	49,55	14,74	-14,25	0,75
Farbmuster 60	73,89	23,09	-23,09	73,87	22,59	-22,55	0,74
Farbmuster 61	38,45	11,55	11,55	37,44	11,62	11,44	1,01
Farbmuster 62	58,62	-30,63	-42,75	54,66	-29,64	-35,94	7,94
Farbmuster 63	56,71	-0,24	2,15	56,79	-0,47	2,48	0,41
Farbmuster 64	21,72	28,28	0,00	21,55	28,92	0,72	0,98
Farbmuster 65	64,14	0,00	-14,14	64,64	-0,01	-13,50	0,81
Farbmuster 66	50,00	28,28	-28,28	50,53	28,44	-28,17	0,57
Farbmuster 67	61,55	11,55	11,55	62,08	12,01	11,61	0,71
Farbmuster 68	26,91	23,09	23,09	26,03	23,61	23,66	1,17
Farbmuster 69	38,45	-11,55	-11,55	39,51	-12,23	-11,23	1,30
Farbmuster 70	95,41	-0,98	4,76	91,81	-2,62	4,27	3,98
Farbmuster 71	64,14	-14,14	0,00	64,82	-14,20	-0,11	0,69
Farbmuster 72	78,28	0,00	-28,28	74,87	0,41	-25,02	4,73
Farbmuster 73	50,00	14,14	14,14	50,95	14,57	13,40	1,28
Farbmuster 74	73,89	23,09	23,09	72,59	17,94	20,73	5,81
Farbmuster 75	61,55	-11,55	-11,55	61,74	-12,23	-11,39	0,72
Farbmuster 76	26,91	-23,09	-23,09	30,71	-20,59	-22,46	4,59
Farbmuster 77	50,90	-62,96	36,71	48,87	-60,65	36,58	3,08
Farbmuster 78	78,28	-28,28	0,00	78,63	-26,37	-0,88	2,13
Farbmuster 79	64,14	0,00	14,14	65,33	-0,20	14,15	1,21
Farbmuster 80	50,00	28,28	28,28	51,04	28,49	27,94	1,12
Farbmuster 81	50,00	-14,14	-14,14	51,23	-13,94	-13,85	1,28
Farbmuster 82	73,09	-23,09	-23,09	73,57	-23,86	-22,96	0,91
Farbmuster 83	38,45	-11,55	11,55	39,74	-11,56	11,67	1,29
Farbmuster 84	90,37	-11,16	96,17	83,49	-8,92	94,57	7,41
Farbmuster 85	64,14	14,14	0,00	65,20	14,58	0,04	1,15
Farbmuster 86	78,28	0,00	28,28	79,13	-0,18	28,53	0,91
Farbmuster 87	35,86	0,00	-14,14	37,00	0,39	-14,02	1,21
Farbmuster 88	50,00	-28,28	-28,28	50,29	-28,11	-29,00	0,80
Farbmuster 89	61,55	-11,55	11,55	61,53	-11,74	11,03	0,55
Farbmuster 90	26,91	-23,09	23,09	27,40	-23,32	23,76	0,86

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Farbmuster 91	47,94	65,31	52,07	41,58	53,94	50,65	13,10
Farbmuster 92	78,28	28,28	0,00	74,39	23,25	-3,89	7,46
Farbmuster 93	35,86	-14,14	0,00	37,24	-14,29	0,09	1,39
Farbmuster 94	21,72	0,00	-28,28	22,09	0,15	-28,94	0,77
Farbmuster 95	50,00	-14,14	14,14	50,17	-13,43	13,93	0,76
Farbmuster 96	73,09	-23,09	23,09	73,30	-22,97	21,98	1,14
Farbmuster 97	38,45	11,55	-11,55	38,74	12,37	-12,35	1,18
Farbmuster 98	48,13	75,20	-6,80	38,89	66,56	-8,25	12,73

A.11 CIELAB-Mittelwerte der Farbabstände ΔE^*_{ab} der Farbschwellen

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 1	0,236	0,340	0,451	0,255
Farbmuster 2	0,322	0,373	0,700	0,304
Farbmuster 3	0,576	0,758	1,398	0,444
Farbmuster 4	0,401	0,517	0,849	0,304
Farbmuster 5	0,619	0,431	0,851	0,282
Farbmuster 6	0,374	0,441	1,768	0,304
Farbmuster 7	0,278	0,514	1,672	0,237
Farbmuster 8	0,170	0,241	0,360	0,229
Farbmuster 9	0,187	0,208	0,444	0,199
Farbmuster 10	0,182	0,275	0,516	0,216
Farbmuster 11	0,203	0,228	0,555	0,203
Farbmuster 12	0,211	0,287	0,599	0,226
Farbmuster 13	0,188	0,279	0,605	0,227
Farbmuster 14	0,239	0,281	0,637	0,245
Farbmuster 15	0,142	0,225	0,412	0,197
Farbmuster 16	0,152	0,245	0,466	0,194
Farbmuster 17	0,179	0,272	0,539	0,235
Farbmuster 18	0,153	0,244	0,448	0,207
Farbmuster 19	0,221	0,305	0,575	0,237
Farbmuster 20	0,279	0,405	0,852	0,308
Farbmuster 21	0,268	0,491	0,984	0,371
Farbmuster 22	0,182	0,240	0,460	0,215
Farbmuster 23	0,208	0,256	0,459	0,217
Farbmuster 24	0,324	0,387	0,645	0,214
Farbmuster 25	0,311	0,381	0,636	0,269
Farbmuster 26	0,505	0,523	0,832	0,344
Farbmuster 27	0,536	0,702	1,090	0,360
Farbmuster 28	0,539	0,653	0,973	0,354
Farbmuster 29	0,290	0,348	0,596	0,271
Farbmuster 30	0,325	0,296	0,618	0,234
Farbmuster 31	0,515	0,531	0,711	0,297
Farbmuster 32	0,435	0,381	0,645	0,226
Farbmuster 33	0,631	0,609	0,684	0,254
Farbmuster 34	0,592	0,554	0,746	0,250
Farbmuster 35	0,723	0,662	0,794	0,287
Farbmuster 36	0,238	0,451	0,555	0,274
Farbmuster 37	0,234	0,255	0,557	0,260

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 38	0,310	0,473	1,034	0,291
Farbmuster 39	0,329	0,351	1,118	0,328
Farbmuster 40	0,329	0,326	1,276	0,313
Farbmuster 41	0,341	0,434	1,476	0,347
Farbmuster 42	0,365	0,450	1,863	0,377
Farbmuster 43	0,234	0,400	0,604	0,290
Farbmuster 44	0,184	0,418	0,670	0,234
Farbmuster 45	0,236	0,482	0,891	0,268
Farbmuster 46	0,294	0,475	1,102	0,266
Farbmuster 47	0,246	0,538	1,205	0,229
Farbmuster 48	0,282	0,602	1,357	0,257
Farbmuster 49	0,324	0,637	1,631	0,259
Farbmuster 50	0,671	0,641	1,041	0,360
Farbmuster 51	0,304	0,454	0,927	0,302
Farbmuster 52	0,624	0,438	1,399	0,308
Farbmuster 53	0,347	0,521	0,988	0,313
Farbmuster 54	0,390	0,808	1,271	0,304
Farbmuster 55	0,215	0,671	1,884	0,227
Farbmuster 56	0,396	0,542	1,334	0,334
Farbmuster 57	0,431	0,515	0,986	0,314
Farbmuster 58	0,323	0,381	1,493	0,308
Farbmuster 59	0,224	0,484	0,926	0,263
Farbmuster 60	0,352	0,570	1,190	0,297
Farbmuster 61	0,314	0,481	1,034	0,300
Farbmuster 62	0,397	0,662	1,501	0,352
Farbmuster 63	0,206	0,377	0,706	0,250
Farbmuster 64	0,505	0,660	1,243	0,385
Farbmuster 65	0,285	0,457	0,905	0,272
Farbmuster 66	0,291	0,589	1,242	0,237
Farbmuster 67	0,392	0,550	1,009	0,306
Farbmuster 68	0,444	0,494	2,004	0,374
Farbmuster 69	0,393	0,301	0,713	0,227
Farbmuster 70	0,336	0,446	0,991	0,353
Farbmuster 71	0,453	0,468	0,786	0,248
Farbmuster 72	0,316	0,438	1,134	0,243
Farbmuster 73	0,240	0,296	0,688	0,198
Farbmuster 74	0,349	0,406	0,805	0,231
Farbmuster 75	0,370	0,368	0,808	0,185
Farbmuster 76	0,276	0,427	0,900	0,213
Farbmuster 77	0,548	0,394	1,279	0,191
Farbmuster 78	0,431	0,347	0,626	0,220
Farbmuster 79	0,202	0,239	0,739	0,200
Farbmuster 80	0,290	0,339	0,828	0,210
Farbmuster 81	0,352	0,436	0,653	0,232
Farbmuster 82	0,392	0,419	0,797	0,183
Farbmuster 83	0,266	0,338	0,902	0,206
Farbmuster 84	0,391	0,378	2,026	0,311
Farbmuster 85	0,279	0,460	0,639	0,206

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 86	0,250	0,307	0,930	0,240
Farbmuster 87	0,148	0,260	0,488	0,154
Farbmuster 88	0,330	0,405	0,875	0,196
Farbmuster 89	0,378	0,341	0,874	0,194
Farbmuster 90	0,481	0,416	1,438	0,250
Farbmuster 91	0,454	0,396	1,659	0,316
Farbmuster 92	0,334	0,466	0,772	0,230
Farbmuster 93	0,316	0,315	0,539	0,158
Farbmuster 94	0,298	0,528	0,797	0,232
Farbmuster 95	0,292	0,319	0,860	0,196
Farbmuster 96	0,340	0,366	1,001	0,217
Farbmuster 97	0,251	0,406	0,579	0,203
Farbmuster 98	0,421	0,590	0,636	0,296

Tabelle A.12 Standardabweichungen der Farbabstände ΔE^*_{ab} bei der Untersuchung der Farbschwellen

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 1	0,245	0,444	0,342	0,170
Farbmuster 2	0,355	0,505	0,740	0,207
Farbmuster 3	0,507	0,760	0,531	0,169
Farbmuster 4	0,225	0,282	0,660	0,112
Farbmuster 5	0,355	0,379	0,834	0,158
Farbmuster 6	0,299	0,314	0,612	0,152
Farbmuster 7	0,261	0,369	2,075	0,127
Farbmuster 8	0,217	0,234	0,231	0,144
Farbmuster 9	0,223	0,328	0,397	0,130
Farbmuster 10	0,221	0,293	0,524	0,110
Farbmuster 11	0,260	0,377	0,483	0,146
Farbmuster 12	0,222	0,343	0,630	0,114
Farbmuster 13	0,263	0,392	0,405	0,116
Farbmuster 14	0,280	0,362	0,537	0,160
Farbmuster 15	0,245	0,215	0,347	0,149
Farbmuster 16	0,127	0,158	0,266	0,088
Farbmuster 17	0,168	0,309	0,448	0,146
Farbmuster 18	0,105	0,218	0,255	0,135
Farbmuster 19	0,173	0,176	0,415	0,093
Farbmuster 20	0,279	0,301	0,485	0,150
Farbmuster 21	0,293	0,282	0,477	0,199
Farbmuster 22	0,175	0,225	0,293	0,100
Farbmuster 23	0,197	0,333	0,372	0,150
Farbmuster 24	0,242	0,316	0,469	0,168
Farbmuster 25	0,154	0,249	0,313	0,092
Farbmuster 26	0,164	0,266	0,647	0,111
Farbmuster 27	0,332	0,404	0,617	0,169
Farbmuster 28	0,339	0,333	0,532	0,142
Farbmuster 29	0,258	0,348	0,400	0,128
Farbmuster 30	0,250	0,256	0,347	0,124
Farbmuster 31	0,360	0,319	0,737	0,166
Farbmuster 32	0,249	0,242	0,493	0,119

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 33	0,322	0,275	0,508	0,147
Farbmuster 34	0,416	0,273	0,580	0,134
Farbmuster 35	0,264	0,377	0,509	0,157
Farbmuster 36	0,206	0,230	0,308	0,123
Farbmuster 37	0,176	0,155	0,379	0,120
Farbmuster 38	0,315	0,330	0,690	0,161
Farbmuster 39	0,297	0,265	0,641	0,165
Farbmuster 40	0,268	0,289	0,690	0,140
Farbmuster 41	0,367	0,273	0,603	0,162
Farbmuster 42	0,308	0,280	0,662	0,151
Farbmuster 43	0,121	0,223	0,279	0,151
Farbmuster 44	0,116	0,258	0,315	0,109
Farbmuster 45	0,177	0,248	0,534	0,146
Farbmuster 46	0,139	0,250	0,467	0,144
Farbmuster 47	0,201	0,335	0,888	0,107
Farbmuster 48	0,162	0,348	0,921	0,186
Farbmuster 49	0,249	0,258	0,802	0,129
Farbmuster 50	0,246	0,267	0,542	0,173
Farbmuster 51	0,135	0,171	0,390	0,110
Farbmuster 52	0,255	0,161	0,682	0,147
Farbmuster 53	0,103	0,276	0,561	0,103
Farbmuster 54	0,153	0,319	0,732	0,154
Farbmuster 55	0,152	0,337	1,045	0,147
Farbmuster 56	0,179	0,333	0,660	0,173
Farbmuster 57	0,177	0,303	0,589	0,105
Farbmuster 58	0,110	0,163	0,467	0,114
Farbmuster 59	0,101	0,187	0,362	0,098
Farbmuster 60	0,230	0,350	0,794	0,121
Farbmuster 61	0,210	0,190	0,507	0,141
Farbmuster 62	0,123	0,414	1,290	0,224
Farbmuster 63	0,107	0,156	0,289	0,092
Farbmuster 64	0,171	0,283	0,411	0,153
Farbmuster 65	0,135	0,217	0,384	0,098
Farbmuster 66	0,172	0,428	0,669	0,106
Farbmuster 67	0,177	0,308	0,497	0,130
Farbmuster 68	0,172	0,248	0,492	0,160
Farbmuster 69	0,180	0,210	0,410	0,155
Farbmuster 70	0,362	0,171	0,392	0,129
Farbmuster 71	0,284	0,257	0,509	0,108
Farbmuster 72	0,136	0,245	0,514	0,108
Farbmuster 73	0,140	0,192	0,289	0,109
Farbmuster 74	0,281	0,406	0,481	0,142
Farbmuster 75	0,240	0,295	0,559	0,107
Farbmuster 76	0,125	0,309	0,597	0,229
Farbmuster 77	0,279	0,191	0,732	0,146
Farbmuster 78	0,355	0,289	0,546	0,122
Farbmuster 79	0,166	0,171	0,477	0,102
Farbmuster 80	0,197	0,262	0,570	0,117

	Roter Filter	Grüner Filter	Blauer Filter	Ohne Filter
Farbmuster 81	0,248	0,252	0,562	0,128
Farbmuster 82	0,241	0,210	0,713	0,129
Farbmuster 83	0,238	0,257	0,483	0,168
Farbmuster 84	0,342	0,340	0,137	0,196
Farbmuster 85	0,220	0,259	0,461	0,205
Farbmuster 86	0,229	0,266	0,516	0,156
Farbmuster 87	0,120	0,209	0,435	0,093
Farbmuster 88	0,183	0,306	1,211	0,096
Farbmuster 89	0,252	0,251	0,535	0,122
Farbmuster 90	0,475	0,299	0,319	0,165
Farbmuster 91	0,233	0,319	0,235	0,277
Farbmuster 92	0,222	0,323	0,565	0,175
Farbmuster 93	0,432	0,246	0,415	0,135
Farbmuster 94	0,167	0,248	0,697	0,149
Farbmuster 95	0,176	0,204	0,626	0,113
Farbmuster 96	0,190	0,259	0,582	0,116
Farbmuster 97	0,105	0,268	0,503	0,136
Farbmuster 98	0,176	0,396	0,687	0,157

Die kompletten Daten der 40 Probanden, genauso wie die CIEXYZ-Werte der Farbmuster, die gemittelten CIELAB- und CIEXYZ-Werte der Farbschwellen und alle weiteren verwendeten Farbabstände sind auf der beigefügten CD als Excel-Tabellen zu finden.

A.5 Untersuchung der großen Farbunterschiede

Tabelle A.13 CIELAB-Farbwerte bei der Untersuchung der großen Farbunterschiede. Es werden exemplarisch nur die Farbwerte der Farbreihen mit der Referenzfarbe Mittelgrau gezeigt.

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Referenzfarbe	50,00	0,00	0,00	47,66	0,48	-0,56	2,45
Farbfeld	L^*-Veränderung						
1	70,00	0,00	0,00	70,89	-0,45	0,40	1,08
2	30,00	0,00	0,00	30,51	-0,03	0,08	0,52
3	10,00	0,00	0,00	10,11	-0,50	0,14	0,53
4	90,00	0,00	0,00	91,42	-0,91	0,29	1,71
5	20,00	0,00	0,00	21,00	-0,55	0,26	1,17
6	60,00	0,00	0,00	61,46	-0,31	-0,11	1,50
7	40,00	0,00	0,00	40,57	0,31	-0,72	0,97
8	80,00	0,00	0,00	81,15	-0,15	-0,26	1,18
Farbfeld	a^*-Veränderung						
1	50,00	40,00	0,00	50,39	40,46	0,42	0,74
2	50,00	-30,00	0,00	51,87	-31,01	0,47	2,18
3	50,00	-10,00	0,00	50,61	-10,40	0,47	0,87
4	50,00	20,00	0,00	50,90	20,36	0,07	0,97
5	50,00	-40,00	0,00	51,17	-40,45	-0,73	1,45
6	50,00	30,00	0,00	51,01	30,46	-0,67	1,30
7	50,00	-20,00	0,00	51,71	-20,25	-0,02	1,73
8	50,00	10,00	0,00	50,37	11,46	-1,36	2,03
Farbfeld	b^*-Veränderung						
1	50,00	0,00	40,00	49,46	0,76	39,40	1,11
2	50,00	0,00	-30,00	51,01	0,28	-30,21	1,07
3	50,00	0,00	-10,00	50,75	0,45	-10,08	0,88
4	50,00	0,00	20,00	50,43	0,11	19,80	0,49
5	50,00	0,00	-40,00	51,70	-0,57	-39,69	1,82
6	50,00	0,00	30,00	50,57	-0,05	28,96	1,19
7	50,00	0,00	-20,00	50,54	-0,27	-20,17	0,63
8	50,00	0,00	10,00	50,48	0,94	9,02	1,44
Farbfeld	L^*/a^*-Veränderung						
1	60,00	10,00	0,00	60,10	10,46	-0,12	0,48
2	70,00	20,00	0,00	70,98	19,43	0,51	1,24
3	30,00	-20,00	0,00	30,14	-19,90	-1,01	1,02
4	40,00	-10,00	0,00	40,92	-9,35	-0,64	1,29
5	70,00	-20,00	0,00	70,40	-19,99	-0,60	0,72
6	30,00	20,00	0,00	29,82	20,73	-1,32	1,52
7	60,00	-10,00	0,00	60,84	-10,33	-0,52	1,04
8	40,00	10,00	0,00	39,83	10,75	-1,19	1,41

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Farbfeld	L^*/b^*-Veränderung						
1	30,00	0,00	20,00	29,76	0,41	19,87	0,49
2	60,00	0,00	10,00	60,89	-0,28	9,48	1,07
3	40,00	0,00	-10,00	40,64	0,00	-10,12	0,65
4	70,00	0,00	-20,00	71,10	-0,18	-20,15	1,12
5	40,00	0,00	10,00	40,24	-0,06	10,00	0,25
6	70,00	0,00	20,00	71,20	-0,38	20,06	1,26
7	60,00	0,00	-10,00	60,80	-0,36	-9,93	0,87
8	30,00	0,00	-20,00	30,46	0,20	-21,28	1,38
Farbfeld	a^*/b^*-Veränderung						
1	50,00	10,00	10,00	49,18	11,03	9,09	1,60
2	50,00	20,00	-20,00	49,76	20,91	-20,13	0,95
3	50,00	10,00	-10,00	49,40	10,47	-10,15	0,78
4	50,00	-20,00	-20,00	51,10	-20,34	-20,64	1,32
5	50,00	-10,00	10,00	49,90	-9,48	9,79	0,57
6	50,00	20,00	20,00	49,79	20,84	20,11	0,88
7	50,00	-20,00	20,00	50,66	-20,45	20,26	0,84
8	50,00	-10,00	-10,00	50,17	-9,24	-10,53	0,94
	$L^*/a^*/b^*$-Veränderung						
Referenzfarbe	50,00	0,00	0,00	48,93	0,80	-0,74	1,53
Farbfeld 1	30,00	20,00	20,00	29,24	20,57	19,68	1,00
Farbfeld 2	30,00	20,00	10,00	29,41	20,64	10,03	0,87
Farbfeld 3	30,00	20,00	-10,00	29,50	20,24	-10,61	0,82
Farbfeld 4	30,00	20,00	-20,00	30,84	20,03	-19,86	0,86
Farbfeld 5	30,00	10,00	20,00	29,31	10,48	19,51	0,97
Farbfeld 6	30,00	10,00	10,00	28,90	10,25	9,39	1,28
Farbfeld 7	30,00	10,00	-10,00	29,77	11,07	-10,71	1,30
Farbfeld 8	30,00	10,00	-20,00	29,83	10,87	-20,55	1,04
Farbfeld 9	30,00	-10,00	20,00	29,87	-9,10	19,63	0,98
Farbfeld 10	30,00	-10,00	10,00	29,48	-9,93	9,69	0,61
Farbfeld 11	30,00	-10,00	-10,00	29,60	-9,28	-11,33	1,57
Farbfeld 12	30,00	-10,00	-20,00	28,71	-9,09	-20,65	1,71
Farbfeld 13	30,00	-20,00	20,00	29,83	-19,89	19,39	0,65
Farbfeld 14	30,00	-20,00	10,00	29,31	-19,53	9,66	0,91
Farbfeld 15	30,00	-20,00	-10,00	28,95	-19,02	-10,98	1,74
Farbfeld 16	30,00	-20,00	-20,00	28,86	-18,96	-20,07	1,55
Referenzfarbe	50,00	0,00	0,00	50,21	0,42	-0,29	0,55
Farbfeld 1	40,00	20,00	20,00	40,03	20,83	19,93	0,83
Farbfeld 2	40,00	20,00	10,00	40,34	20,96	9,64	1,08
Farbfeld 3	40,00	20,00	-10,00	39,91	20,04	-10,21	0,23
Farbfeld 4	40,00	20,00	-20,00	40,11	20,29	-20,72	0,78
Farbfeld 5	40,00	10,00	20,00	39,81	10,30	19,92	0,36
Farbfeld 6	40,00	10,00	10,00	39,98	10,03	9,28	0,73
Farbfeld 7	40,00	10,00	-10,00	40,20	10,40	-10,61	0,75
Farbfeld 8	40,00	10,00	-20,00	40,21	10,09	-20,20	0,30
Farbfeld 9	40,00	-10,00	20,00	40,53	-10,22	19,76	0,62
Farbfeld 10	40,00	-10,00	10,00	40,72	-9,67	10,19	0,81
Farbfeld 11	40,00	-10,00	-10,00	40,48	-9,54	-9,79	0,69

	L^*_t	a^*_t	b^*_t	L^*_r	a^*_r	b^*_r	ΔE^*_{ab}
Farbfeld 12	40,00	-10,00	-20,00	40,64	-10,36	-20,79	1,07
Farbfeld 13	40,00	-20,00	20,00	40,65	-19,60	20,57	0,95
Farbfeld 14	40,00	-20,00	10,00	40,66	-20,27	10,39	0,82
Farbfeld 15	40,00	-20,00	-10,00	40,61	-19,92	-10,95	1,13
Farbfeld 16	40,00	-20,00	-20,00	39,81	-20,00	-20,35	0,39
Referenzfarbe	50,00	0,00	0,00	50,57	0,42	-0,79	1,06
Farbfeld 1	60,00	20,00	20,00	61,91	19,29	19,92	2,04
Farbfeld 2	60,00	20,00	10,00	61,68	19,73	9,06	1,94
Farbfeld 3	60,00	20,00	-10,00	60,97	20,50	-10,26	1,12
Farbfeld 4	60,00	20,00	-20,00	61,00	20,49	-21,02	1,51
Farbfeld 5	60,00	10,00	20,00	60,90	10,79	19,35	1,36
Farbfeld 6	60,00	10,00	10,00	60,67	10,58	8,62	1,64
Farbfeld 7	60,00	10,00	-10,00	61,29	10,20	-11,20	1,77
Farbfeld 8	60,00	10,00	-20,00	61,01	10,23	-21,01	1,45
Farbfeld 9	60,00	-10,00	20,00	60,33	-9,92	19,36	0,72
Farbfeld 10	60,00	-10,00	10,00	60,56	-9,78	9,16	1,03
Farbfeld 11	60,00	-10,00	-10,00	60,19	-10,01	-10,78	0,80
Farbfeld 12	60,00	-10,00	-20,00	60,04	-9,77	-20,88	0,91
Farbfeld 13	60,00	-20,00	20,00	60,86	-20,04	19,74	0,89
Farbfeld 14	60,00	-20,00	10,00	60,37	-19,91	9,23	0,86
Farbfeld 15	60,00	-20,00	-10,00	60,81	-20,00	-10,71	1,08
Farbfeld 16	60,00	-20,00	-20,00	60,81	-19,75	-20,60	1,04
Referenzfarbe	50,00	0,00	0,00	50,07	0,92	-1,17	1,49
Farbfeld 1	70,00	20,00	20,00	71,27	19,90	19,36	1,43
Farbfeld 2	70,00	20,00	10,00	71,31	20,20	9,41	1,45
Farbfeld 3	70,00	20,00	-10,00	71,24	20,09	-10,79	1,47
Farbfeld 4	70,00	20,00	-20,00	71,59	20,00	-20,46	1,66
Farbfeld 5	70,00	10,00	20,00	71,33	9,88	19,22	1,55
Farbfeld 6	70,00	10,00	10,00	71,68	9,83	8,93	2,00
Farbfeld 7	70,00	10,00	-10,00	71,16	10,21	-11,21	1,69
Farbfeld 8	70,00	10,00	-20,00	70,63	10,09	-20,77	1,00
Farbfeld 9	70,00	-10,00	20,00	70,51	-10,14	19,28	0,89
Farbfeld 10	70,00	-10,00	10,00	70,33	-9,48	8,93	1,23
Farbfeld 11	70,00	-10,00	-10,00	70,09	-9,56	-11,36	1,43
Farbfeld 12	70,00	-10,00	-20,00	70,21	-9,45	-20,88	1,06
Farbfeld 13	70,00	-20,00	20,00	70,46	-19,71	18,81	1,31
Farbfeld 14	70,00	-20,00	10,00	70,31	-19,46	8,99	1,18
Farbfeld 15	70,00	-20,00	-10,00	69,96	-19,64	-11,12	1,18
Farbfeld 16	70,00	-20,00	-20,00	69,77	-19,41	-20,78	1,01

Tabelle A.14 Normierte Bewertungen der Probanden ΓB und die absoluten und normierten CIELAB-Farbabstände bei der Untersuchung der großen Farbabstände für Mittelgrau.

	ΓB	CIELAB	
		ΔE^*	ΓE^*
Farbfeld	L^*-Veränderung		
1	0,605	23,269	0,531
2	0,621	17,171	0,392
3	0,968	37,569	0,858
4	0,995	43,785	1,000
5	0,819	26,698	0,610
6	0,418	13,833	0,316
7	0,418	7,094	0,162
8	0,730	33,495	0,765
Farbfeld	a^*-Veränderung		
1	0,992	40,089	0,976
2	0,781	31,781	0,774
3	0,297	11,319	0,276
4	0,506	20,152	0,491
5	0,917	41,077	1,000
6	0,768	30,169	0,734
7	0,483	21,132	0,514
8	0,327	11,342	0,276
Farbfeld	b*-Veränderung		
1	0,926	40,001	1,000
2	0,783	29,846	0,746
3	0,286	10,010	0,250
4	0,497	20,542	0,514
5	0,984	39,351	0,984
6	0,780	29,665	0,742
7	0,495	19,835	0,496
8	0,268	9,989	0,250
Farbfeld	L*/a*-Veränderung		
1	0,563	15,952	0,521
2	0,980	30,072	0,983
3	0,939	26,878	0,878
4	0,614	11,921	0,390
5	0,899	30,598	1,000
6	0,894	27,005	0,883
7	0,565	17,044	0,557
8	0,605	12,927	0,422
Farbfeld	L*/b*-Veränderung		
1	0,946	27,158	0,868
2	0,595	16,623	0,531
3	0,647	11,875	0,379
4	0,959	30,554	0,976
5	0,709	12,911	0,412
6	0,863	31,300	1,000
7	0,579	16,156	0,516
8	0,900	26,933	0,860

	ΓB	CIELAB	
		ΔE^*	ΓE^*
Farbfeld	a*/b*-Veränderung		
1	0,590	14,371	0,484
2	0,671	28,374	0,956
3	0,312	13,965	0,471
4	0,988	29,131	0,982
5	0,421	14,530	0,490
6	0,953	29,092	0,981
7	0,753	29,666	1,000
8	0,613	14,153	0,477
Farbfeld	L*/a*/b*-Veränderung		
1	0,874	34,575	0,999
2	0,702	29,843	0,862
3	0,691	29,200	0,844
4	0,766	32,600	0,942
5	0,794	29,810	0,861
6	0,606	24,358	0,704
7	0,565	23,914	0,691
8	0,728	29,307	0,847
9	0,768	29,598	0,855
10	0,659	24,538	0,709
11	0,608	24,233	0,700
12	0,867	30,049	0,868
13	0,829	34,609	1,000
14	0,780	30,105	0,870
15	0,808	29,939	0,865
16	0,976	34,159	0,987
1	0,814	30,475	1,000
2	0,636	24,857	0,816
3	0,710	24,274	0,797
4	0,820	30,232	0,992
5	0,720	24,787	0,813
6	0,544	16,980	0,557
7	0,514	17,494	0,574
8	0,721	24,280	0,797
9	0,723	24,672	0,810
10	0,543	17,368	0,570
11	0,622	16,858	0,553
12	0,856	25,058	0,822
13	0,826	30,451	0,999
14	0,704	25,169	0,826
15	0,795	24,887	0,817
16	0,979	30,452	0,999

	ΓB	CIELAB	
		ΔE*	ΓE*
1	0,906	30,226	0,983
2	0,698	24,359	0,792
3	0,673	24,513	0,797
4	0,819	30,337	0,986
5	0,779	24,895	0,809
6	0,588	17,138	0,557
7	0,535	17,857	0,580
8	0,721	24,776	0,805
9	0,646	24,668	0,802
10	0,553	17,410	0,566
11	0,632	17,356	0,564
12	0,816	24,438	0,794
13	0,821	30,763	1,000
14	0,730	24,697	0,803
15	0,784	24,912	0,810
16	0,981	30,071	0,978
1	0,939	35,089	0,996
2	0,745	30,578	0,868
3	0,656	30,135	0,856
4	0,799	34,631	0,983
5	0,794	30,797	0,874
6	0,623	25,465	0,723
7	0,608	25,140	0,714
8	0,735	29,844	0,847
9	0,670	30,960	0,879
10	0,566	24,915	0,707
11	0,596	24,784	0,704
12	0,808	30,025	0,853
13	0,788	35,218	1,000
14	0,714	30,474	0,865
15	0,812	30,290	0,860
16	0,982	34,433	0,978

Tabelle A.15 Standardabweichungen der Bewertungen bei großen Farbabständen (Struktur1)

Feld	L*-Veränderung	a*-Veränderung	b*-Veränderung	L*/a*-Veränderung	L*/b*-Veränderung	a*/b*-Veränderung
	Mittelgrau					
1	0,115	0,021	0,058	0,168	0,043	0,127
2	0,120	0,097	0,088	0,036	0,159	0,119
3	0,037	0,096	0,144	0,047	0,130	0,099
4	0,014	0,113	0,114	0,124	0,058	0,024
5	0,057	0,085	0,037	0,070	0,115	0,145
6	0,136	0,077	0,107	0,064	0,082	0,048
7	0,157	0,126	0,126	0,157	0,149	0,078
8	0,092	0,117	0,115	0,120	0,072	0,135

Feld	*L**-Veränderung	*a**-Veränderung	*b**-Veränderung	*L*/a**-Veränderung	*L*/b**-Veränderung	*a*/b**-Veränderung
	Rosarot					
1	0,116	0,158	0,031	0,093	0,101	0,133
2	0,089	0,091	0,084	0,095	0,061	0,130
3	0,038	0,142	0,104	0,115	0,049	0,102
4	0,101	0,108	0,145	0,046	0,103	0,063
5	0,051	0,076	0,095	0,158	0,120	0,103
6	0,100	0,097	0,115	0,112	0,142	0,028
7	0,115	0,132	0,130	0,061	0,107	0,143
8	0,098	0,178	0,160	0,089	0,112	0,084
	Ziegelrot					
1	0,149	0,051	0,046	0,094	0,112	0,098
2	0,080	0,105	0,094	0,114	0,111	0,095
3	0,019	0,080	0,149	0,073	0,149	0,102
4	0,123	0,131	0,081	0,044	0,016	0,106
5	0,062	0,101	0,097	0,132	0,130	0,101
6	0,110	0,044	0,113	0,112	0,105	0,054
7	0,120	0,136	0,078	0,055	0,146	0,094
8	0,138	0,106	0,083	0,113	0,151	0,153
	Ockergelb					
1	0,150	0,103	0,067	0,117	0,105	0,089
2	0,156	0,110	0,073	0,051	0,064	0,142
3	0,077	0,117	0,108	0,109	0,112	0,121
4	0,063	0,112	0,094	0,152	0,051	0,122
5	0,091	0,000	0,107	0,086	0,127	0,155
6	0,101	0,089	0,126	0,090	0,124	0,008
7	0,113	0,145	0,136	0,132	0,134	0,053
8	0,023	0,150	0,069	0,112	0,074	0,163
	Grasgrün					
1	0,045	0,078	0,096	0,044	0,140	0,144
2	0,101	0,059	0,088	0,164	0,124	0,126
3	0,166	0,087	0,123	0,113	0,055	0,156
4	0,032	0,054	0,104	0,130	0,149	0,179
5	0,126	0,107	0,084	0,103	0,056	0,142
6	0,097	0,111	0,127	0,068	0,128	0,061
7	0,128	0,110	0,122	0,160	0,145	0,023
8	0,074	0,124	0,043	0,058	0,148	0,142
	Blaugrün					
1	0,027	0,134	0,087	0,021	0,149	0,113
2	0,169	0,114	0,068	0,147	0,127	0,131
3	0,048	0,110	0,074	0,110	0,176	0,148
4	0,076	0,101	0,055	0,132	0,072	0,106
5	0,148	0,158	0,129	0,106	0,013	0,131
6	0,108	0,039	0,129	0,083	0,154	0,073
7	0,109	0,124	0,119	0,135	0,086	0,143
8	0,102	0,097	0,131	0,137	0,087	0,148

Feld	*L**-Veränderung	*a**-Veränderung	*b**-Veränderung	*L*/a**-Veränderung	*L*/b**-Veränderung	*a*/b**-Veränderung
	Türkisblau					
1	0,142	0,085	0,096	0,118	0,122	0,089
2	0,146	0,081	0,117	0,141	0,081	0,089
3	0,091	0,110	0,141	0,120	0,117	0,061
4	0,071	0,093	0,071	0,043	0,109	0,064
5	0,048	0,000	0,035	0,078	0,044	0,091
6	0,129	0,129	0,148	0,015	0,150	0,113
7	0,155	0,118	0,123	0,178	0,096	0,144
8	0,041	0,146	0,156	0,137	0,052	0,147
	Himmelblau					
1	0,130	0,158	0,026	0,045	0,144	0,138
2	0,068	0,073	0,105	0,157	0,132	0,118
3	0,090	0,129	0,148	0,118	0,129	0,041
4	0,160	0,129	0,118	0,124	0,074	0,136
5	0,044	0,108	0,105	0,141	0,123	0,116
6	0,031	0,015	0,072	0,062	0,042	0,080
7	0,149	0,123	0,137	0,152	0,034	0,157
8	0,137	0,099	0,119	0,131	0,115	0,120
	Violettrot					
1	0,166	0,100	0,080	0,148	0,155	0,123
2	0,144	0,100	0,112	0,118	0,048	0,164
3	0,071	0,125	0,052	0,121	0,022	0,067
4	0,150	0,101	0,122	0,080	0,098	0,019
5	0,141	0,105	0,081	0,066	0,142	0,134
6	0,117	0,126	0,018	0,065	0,072	0,098
7	0,016	0,112	0,123	0,168	0,127	0,128
8	0,039	0,036	0,137	0,136	0,089	0,085

Tabelle A.16 Standardabweichungen der Bewertungen bei großen Farbabständen (Struktur 2)

Farbfeld	*L*/a*/b**-Veränderung					
	Mittelgrau				Rosarot	Ziegelrot
1	0,085	0,124	0,092	0,085	0,070	0,068
2	0,155	0,159	0,145	0,170	0,060	0,090
3	0,152	0,142	0,139	0,171	0,080	0,123
4	0,113	0,096	0,085	0,100	0,095	0,103
5	0,098	0,144	0,095	0,095	0,119	0,169
6	0,191	0,196	0,166	0,162	0,127	0,153
7	0,196	0,163	0,181	0,158	0,152	0,143
8	0,139	0,115	0,089	0,126	0,105	0,154
9	0,136	0,111	0,148	0,124	0,103	0,098
10	0,154	0,192	0,191	0,178	0,077	0,093
11	0,182	0,184	0,180	0,159	0,111	0,103
12	0,088	0,090	0,097	0,090	0,098	0,081
13	0,092	0,074	0,096	0,097	0,100	0,123
14	0,122	0,130	0,156	0,141	0,077	0,125
15	0,141	0,127	0,162	0,118	0,132	0,161
16	0,048	0,043	0,041	0,029	0,102	0,080

Farbfeld	$L^*/a^*/b^*$-Veränderung					
	Ockergelb	Grasgrün	Blaugrün	Türkisblau	Himmelblau	Violettrot
1	0,112	0,107	0,104	0,076	0,033	0,140
2	0,176	0,134	0,120	0,180	0,112	0,152
3	0,098	0,094	0,100	0,105	0,105	0,152
4	0,104	0,125	0,101	0,113	0,099	0,069
5	0,119	0,130	0,094	0,105	0,108	0,109
6	0,150	0,167	0,120	0,130	0,176	0,118
7	0,152	0,114	0,120	0,112	0,125	0,157
8	0,116	0,091	0,116	0,124	0,125	0,121
9	0,123	0,114	0,097	0,066	0,084	0,067
10	0,156	0,139	0,065	0,041	0,075	0,074
11	0,110	0,136	0,128	0,147	0,157	0,150
12	0,094	0,078	0,102	0,142	0,084	0,060
13	0,137	0,150	0,084	0,132	0,156	0,148
14	0,165	0,181	0,080	0,141	0,120	0,110
15	0,213	0,187	0,115	0,098	0,162	0,126
16	0,067	0,164	0,108	0,090	0,164	0,006

Die Skaleneinteilung durch die 40 Probanden, die CIELAB-Farbwerte der weiteren Referenzfarben, die CIEXYZ-Farbwerte aller Referenzfarben sowie die relativen Farbunterschiede der Probanden für alle Referenzfarben und alle absoluten und normierten Farbabstände, die verwendet werden, befinden sich auf der CD.

A.6 Skalierungsexperiment

Tabelle A.17 CIELAB-Farbwerte des Skalierungsexperiments (gemittelt)

Farbmuster	n-faches der Farbschwelle	L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*_{ab}
1	1	48,96	1,01	0,87	0,13	0,03	0,14	0,20
	2	49,05	1,02	0,96	0,22	0,04	0,22	0,32
	3	49,14	1,04	1,06	0,32	0,06	0,32	0,46
	4	49,27	1,07	1,19	0,45	0,09	0,46	0,65
	5	49,46	1,10	1,38	0,63	0,12	0,65	0,91
	10	50,20	1,22	2,12	1,37	0,24	1,39	1,96
2	1	89,19	-0,53	2,57	0,18	0,03	0,19	0,27
	2	89,27	-0,52	2,65	0,26	0,04	0,27	0,38
	3	89,38	-0,51	2,76	0,38	0,06	0,39	0,54
	4	89,53	-0,49	2,91	0,52	0,08	0,53	0,75
	5	89,76	-0,46	3,14	0,75	0,11	0,77	1,08
	10	90,61	-0,34	4,03	1,60	0,23	1,65	2,31
3	1	9,67	0,09	1,01	0,28	0,07	0,29	0,41
	2	9,85	0,14	1,20	0,45	0,12	0,47	0,67
	3	10,04	0,17	1,38	0,64	0,14	0,66	0,93
	4	10,27	0,18	1,58	0,87	0,16	0,86	1,23
	5	10,58	0,20	1,85	1,19	0,18	1,13	1,64
	10	11,80	0,24	2,82	2,40	0,22	2,10	3,20

4	1	48,44	39,10	1,84	0,13	0,11	0,15	0,23
	2	48,49	39,14	1,90	0,19	0,16	0,21	0,33
	3	48,57	39,20	1,99	0,27	0,22	0,30	0,46
	4	48,70	39,30	2,13	0,40	0,32	0,44	0,67
	5	48,91	39,47	2,36	0,60	0,49	0,67	1,02
	10	49,69	40,10	3,23	1,39	1,11	1,54	2,35
5	1	48,35	-38,01	1,24	0,15	0,10	0,14	0,22
	2	48,43	-38,06	1,31	0,22	0,15	0,21	0,34
	3	48,54	-38,14	1,42	0,34	0,23	0,32	0,52
	4	48,73	-38,26	1,60	0,52	0,35	0,49	0,80
	5	48,98	-38,43	1,84	0,77	0,52	0,74	1,19
	10	49,77	-39,00	2,55	1,56	1,09	1,45	2,39
6	1	47,60	1,03	39,83	0,16	0,08	0,21	0,28
	2	47,69	1,06	39,93	0,25	0,12	0,31	0,42
	3	47,80	1,12	40,08	0,37	0,18	0,46	0,61
	4	48,00	1,22	40,33	0,57	0,27	0,71	0,95
	5	48,31	1,37	40,72	0,88	0,43	1,10	1,47
	10	49,28	1,73	41,89	1,85	0,79	2,27	3,03
7	1	48,90	0,63	-38,07	0,17	0,10	0,12	0,23
	2	48,98	0,58	-38,01	0,26	0,15	0,18	0,35
	3	49,11	0,50	-37,92	0,39	0,22	0,27	0,52
	4	49,31	0,39	-37,78	0,58	0,33	0,42	0,79
	5	49,59	0,23	-37,57	0,86	0,50	0,63	1,18
	10	50,56	-0,34	-36,98	1,84	1,06	1,22	2,45

Auf der beigelegten CD befinden sich zusätzlich die CIELAB-Farbwerte von allen 40 Probanden sowie die gemittelten CIEXYZ-Farbwerte des Skalierungsexperiments und alle weiteren Farbabstände, die berechnet wurden.

A.7 Farbschwellenuntersuchung mit geometrischen Abständen

Tabelle A.18 CIELAB-Farbwerte der Schwellenuntersuchung mit geometrischem Abstand

Farbmuster	Geometrischer Abstand in mm	L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*_{ab}
1	0,0000	48,96	1,01	0,87	0,13	0,03	0,14	0,20
	0,5625	49,20	1,05	1,11	0,37	0,07	0,38	0,54
	1,1250	49,21	1,05	1,13	0,39	0,07	0,39	0,56
	2,2500	49,21	1,05	1,12	0,38	0,07	0,39	0,55
2	0,0000	89,19	-0,53	2,57	0,18	0,03	0,19	0,27
	0,5625	89,49	-0,50	2,87	0,48	0,07	0,49	0,69
	1,1250	89,49	-0,50	2,87	0,48	0,07	0,49	0,69
	2,2500	89,53	-0,49	2,91	0,52	0,08	0,53	0,75
3	0,0000	9,67	0,09	1,01	0,28	0,07	0,29	0,41
	0,5625	10,09	0,17	1,43	0,70	0,15	0,70	1,00
	1,1250	10,31	0,19	1,62	0,92	0,16	0,90	1,30
	2,2500	10,40	0,19	1,70	1,01	0,17	0,98	1,41

4	0,0000	48,44	39,10	1,84	0,13	0,11	0,15	0,23
	0,5625	48,79	39,37	2,23	0,49	0,39	0,53	0,82
	1,1250	48,85	39,42	2,29	0,54	0,44	0,60	0,92
	2,2500	48,85	39,42	2,29	0,54	0,44	0,60	0,92
5	0,0000	48,35	-38,01	1,24	0,15	0,10	0,14	0,22
	0,5625	48,60	-38,18	1,47	0,39	0,27	0,37	0,60
	1,1250	48,68	-38,23	1,55	0,47	0,32	0,44	0,73
	2,2500	48,68	-38,23	1,55	0,48	0,32	0,45	0,73
6	0,0000	47,60	1,03	39,83	0,16	0,08	0,21	0,28
	0,5625	47,83	1,13	40,12	0,40	0,19	0,50	0,66
	1,1250	47,89	1,16	40,19	0,46	0,22	0,57	0,76
	2,2500	47,91	1,17	40,22	0,48	0,23	0,60	0,80
7	0,0000	48,90	0,63	-38,07	0,17	0,10	0,12	0,23
	0,5625	49,14	0,49	-37,91	0,41	0,23	0,29	0,56
	1,1250	49,27	0,41	-37,81	0,55	0,31	0,39	0,74
	2,2500	49,33	0,37	-37,76	0,61	0,35	0,44	0,83

Auf der beigelegten CD befinden sich noch die CIELAB-Farbwerte von allen 40 Probanden sowie die gemittelten CIEXYZ-Farbwerte der Schwellenuntersuchung mit geometrischem Abstand und alle weiteren Farbabstände, die berechnet wurden.

A.8 Ordnerstruktur der eingefügten CD

Die beigefügte CD enthält folgende Ordner:

- Graphiken_Untersuchungsergebnisse
  - Farbschwellen
    - CIELAB-Farbraum
    - Normfarbtafel
  - geometrischer_Abstand
  - große_Farbunterschiede
  - Skalierungsexperiment
- Testseiten der Untersuchung
- Untersuchung_Farbschwellen
- Untersuchung_geometrischer_Abstand
- Untersuchung_große_Farbunterschiede
- Untersuchung_Skalierung

Die beigefügte CD können Sie im Internet unter http://130.149.60.45/~farbmetrik/index.html finden.

A.9 Testseiten

Auf den folgenden Seiten sind die Internet-Versionen der verwendeten Testseiten gezeigt. Zuerst die drei Testseiten für die Farbschwellenuntersuchung, dann die zwölf Testseiten für die Untersuchung der großen Farbunterschiede.

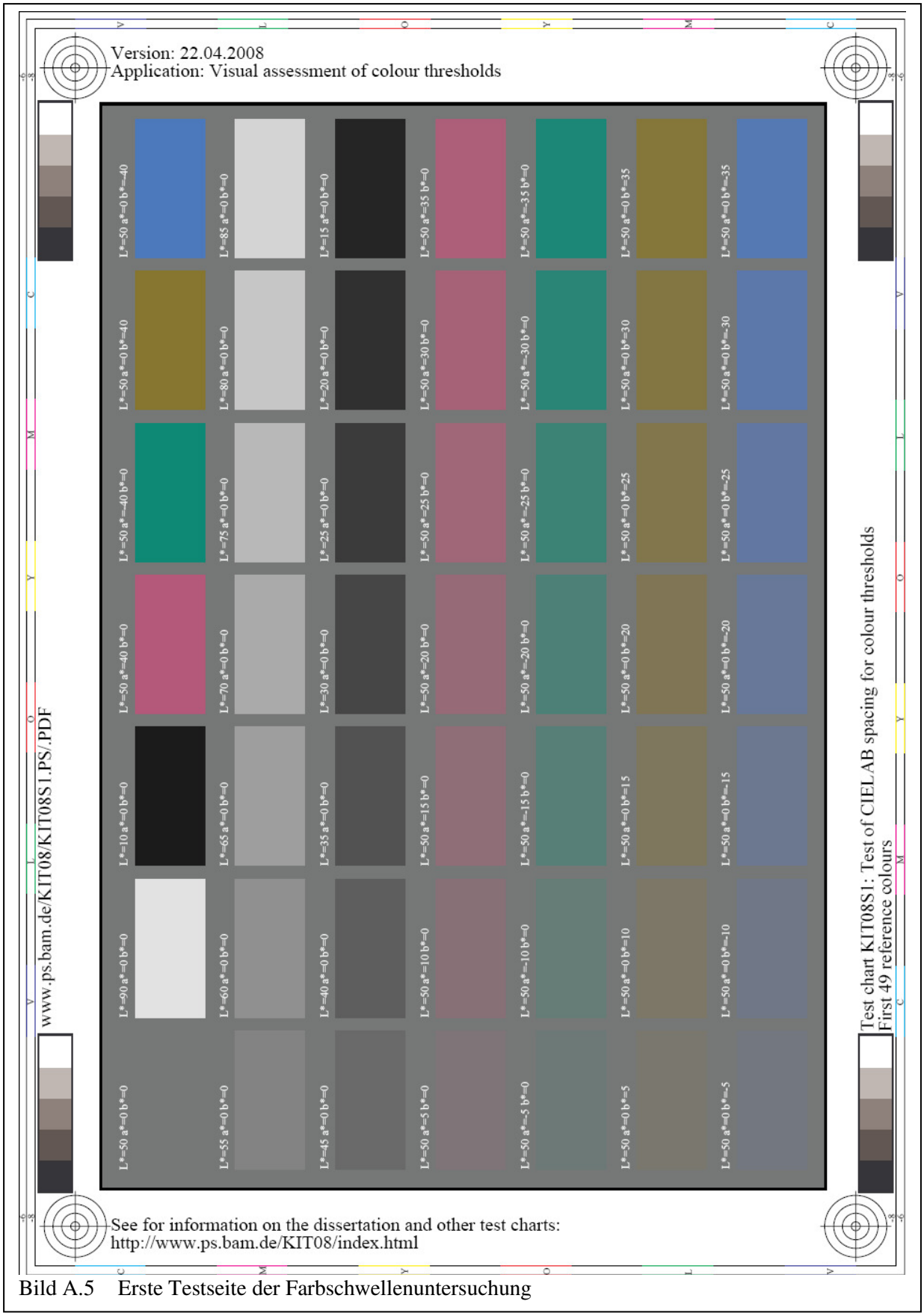

Bild A.5 Erste Testseite der Farbschwellenuntersuchung

Bild A.6 Zweite Testseite der Farbschwellenuntersuchung

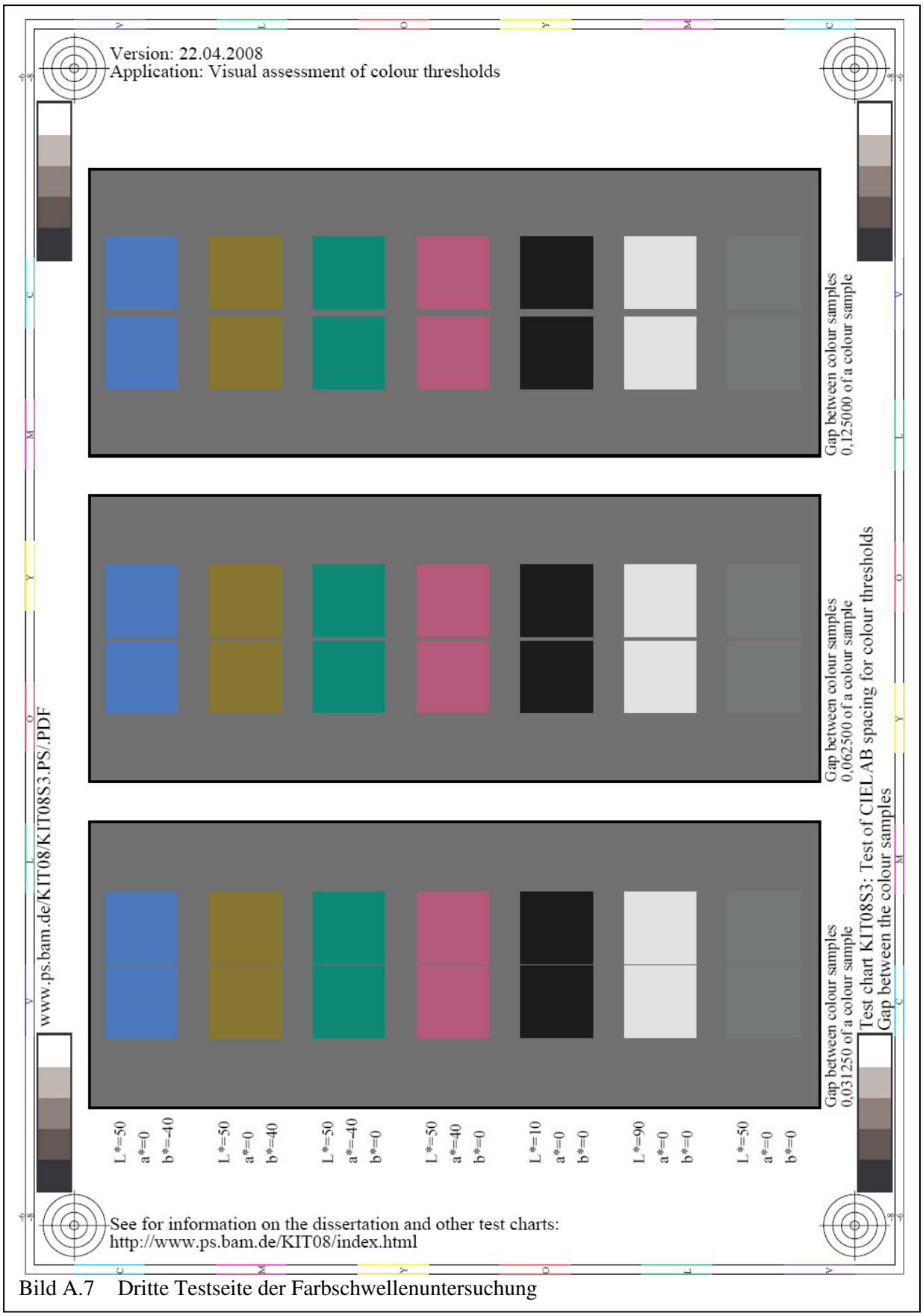

Bild A.7 Dritte Testseite der Farbschwellenuntersuchung

Bild A.8 Erste Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

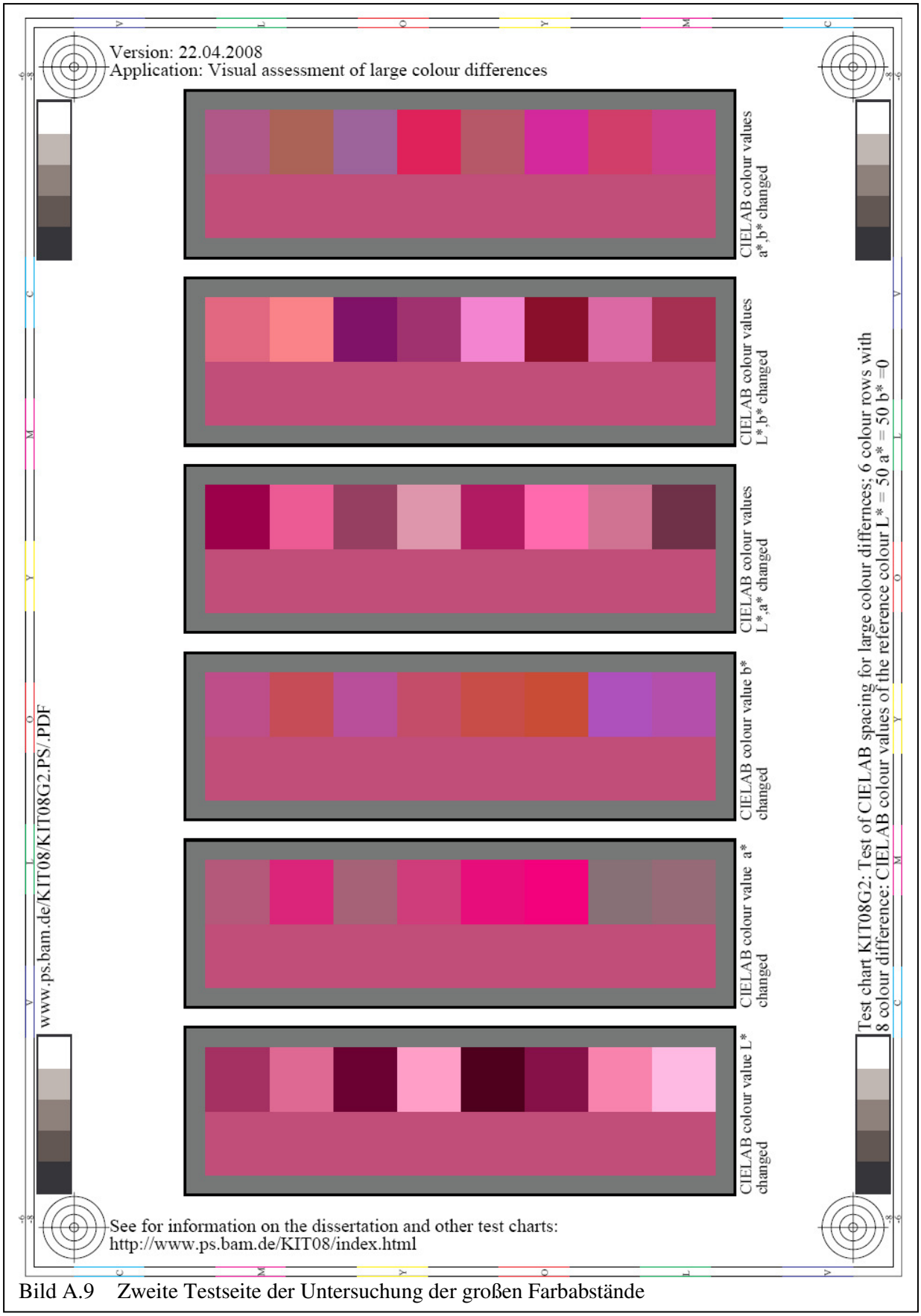

Bild A.9 Zweite Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

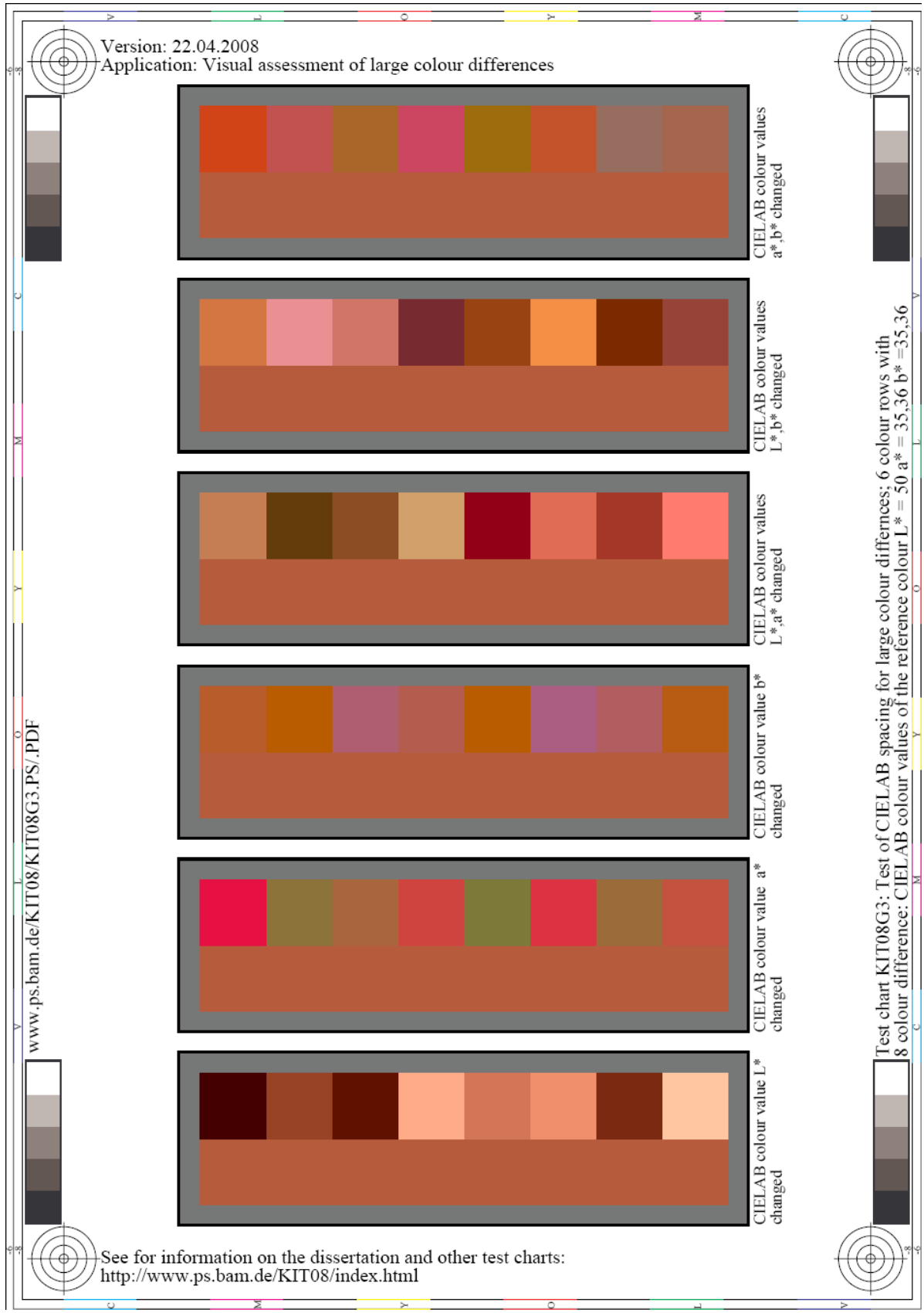

Bild A.10 Dritte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

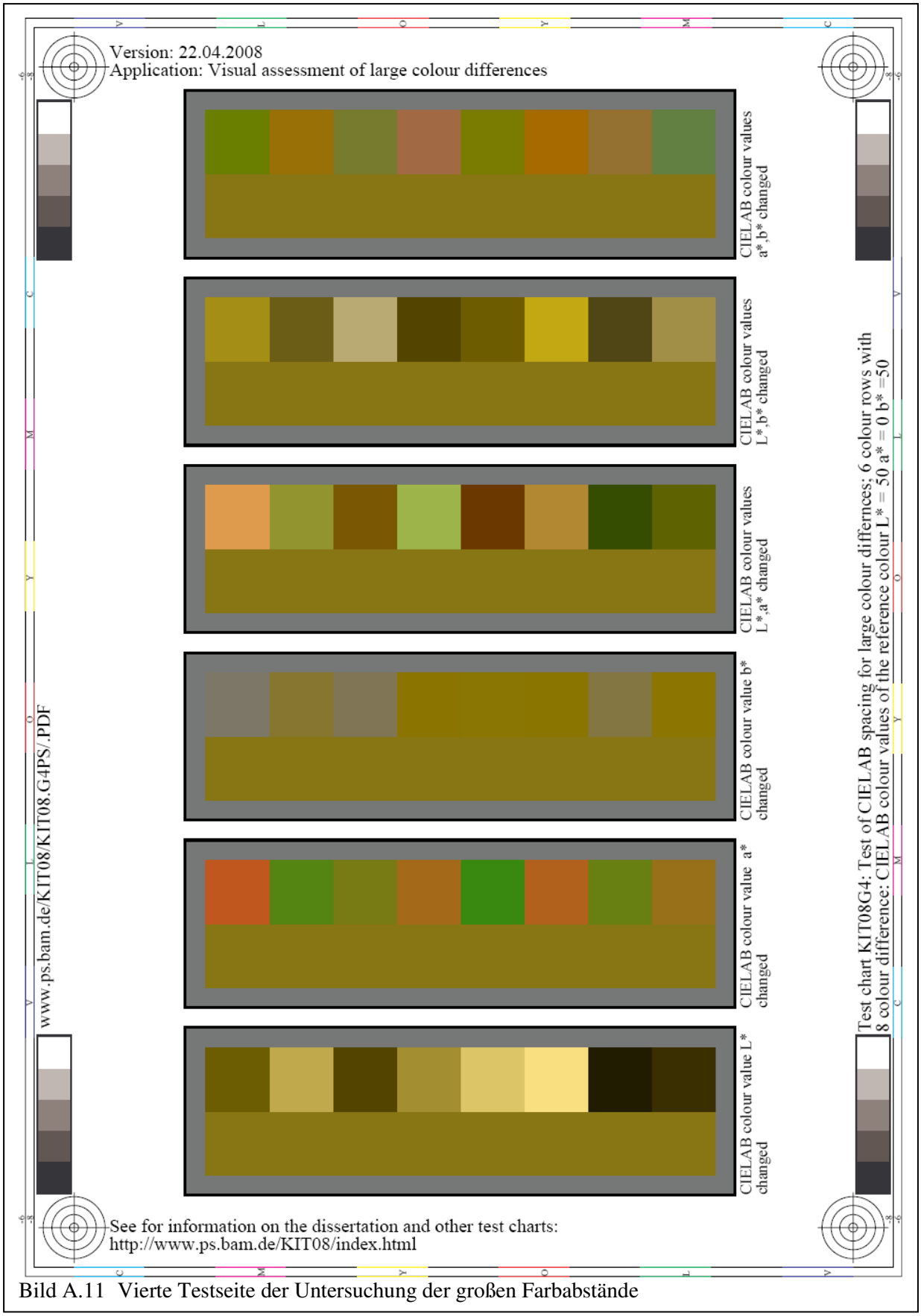

Bild A.11 Vierte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

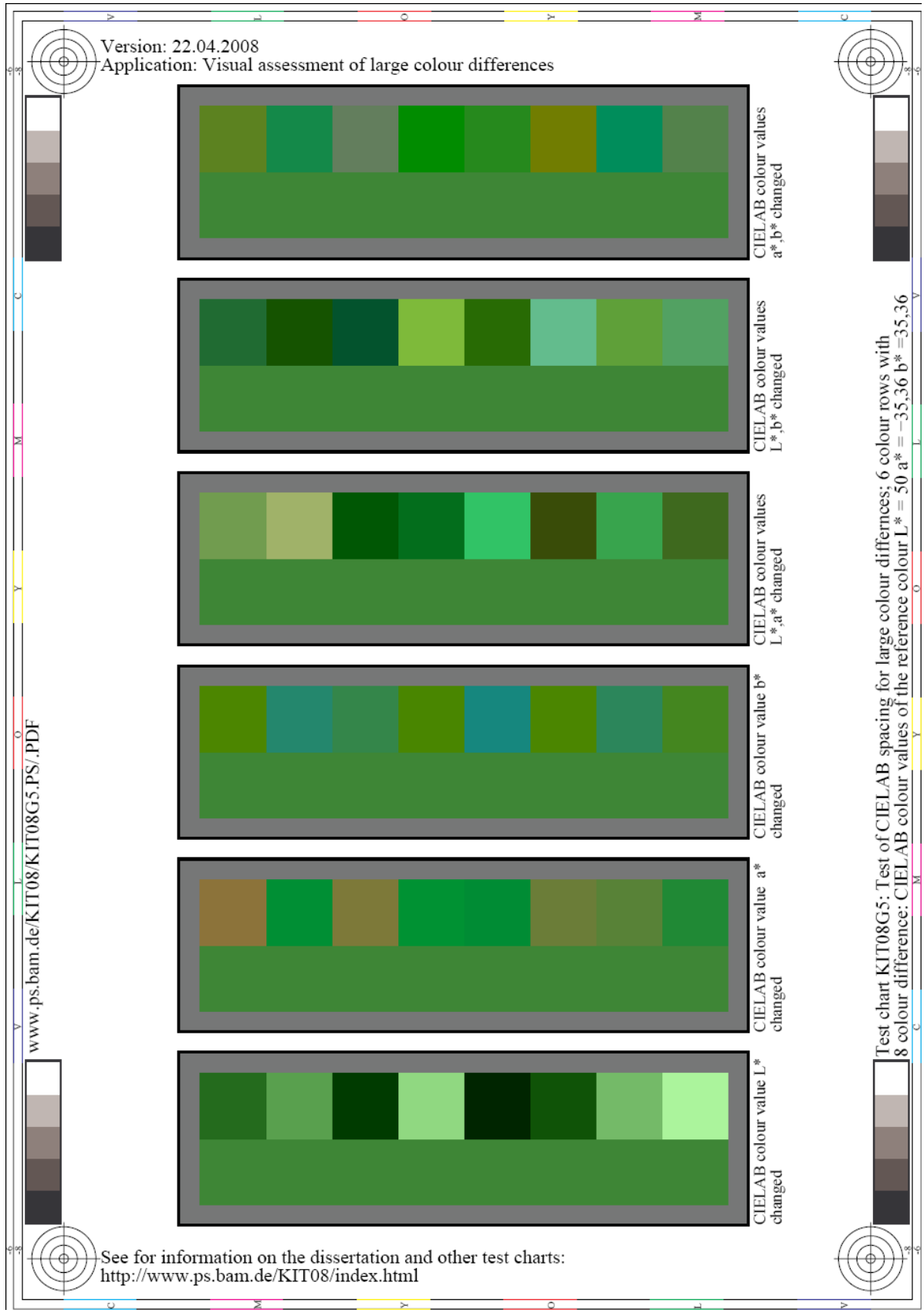

Bild A.12 Fünfte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

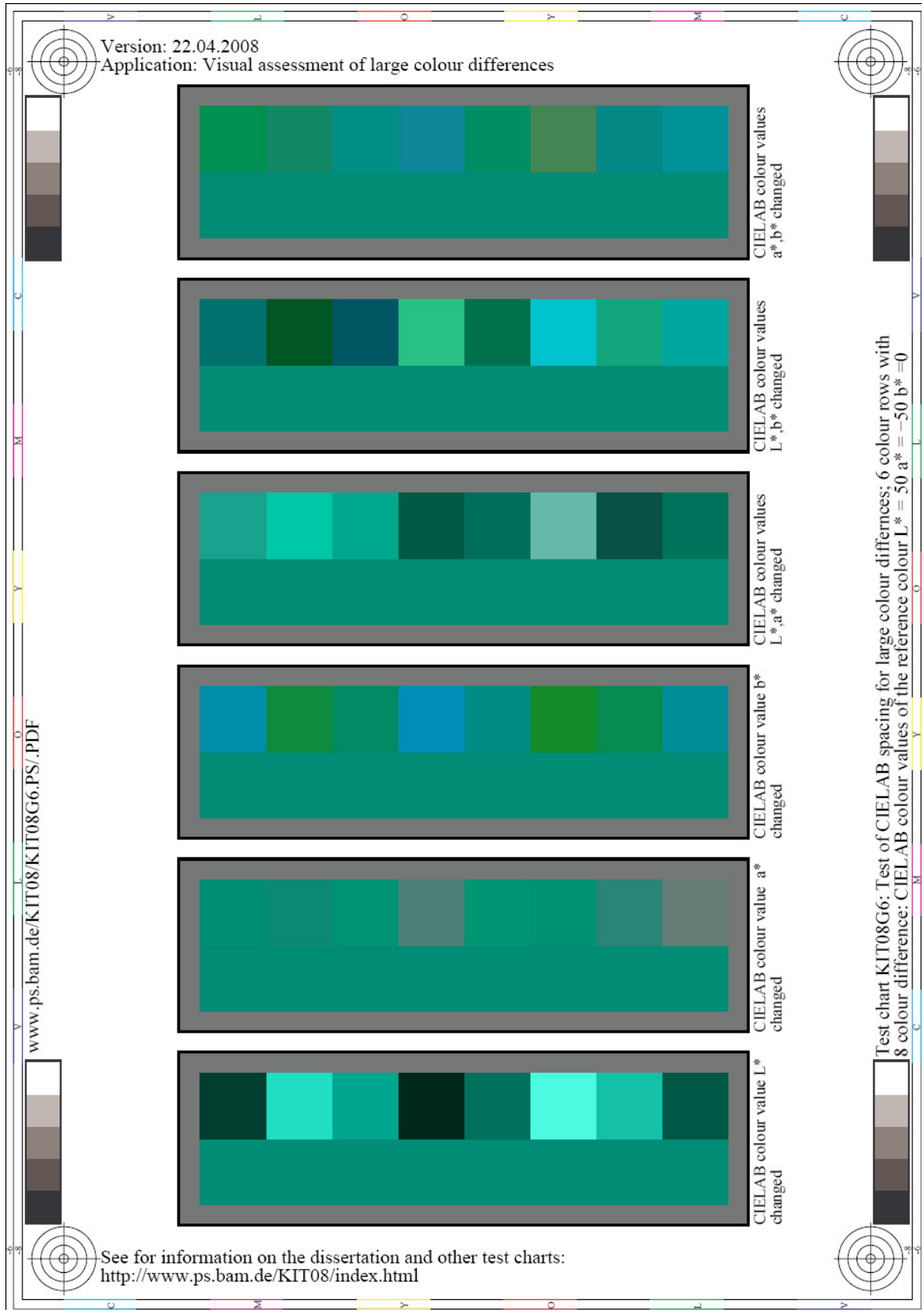

Bild A.13 Sechste Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

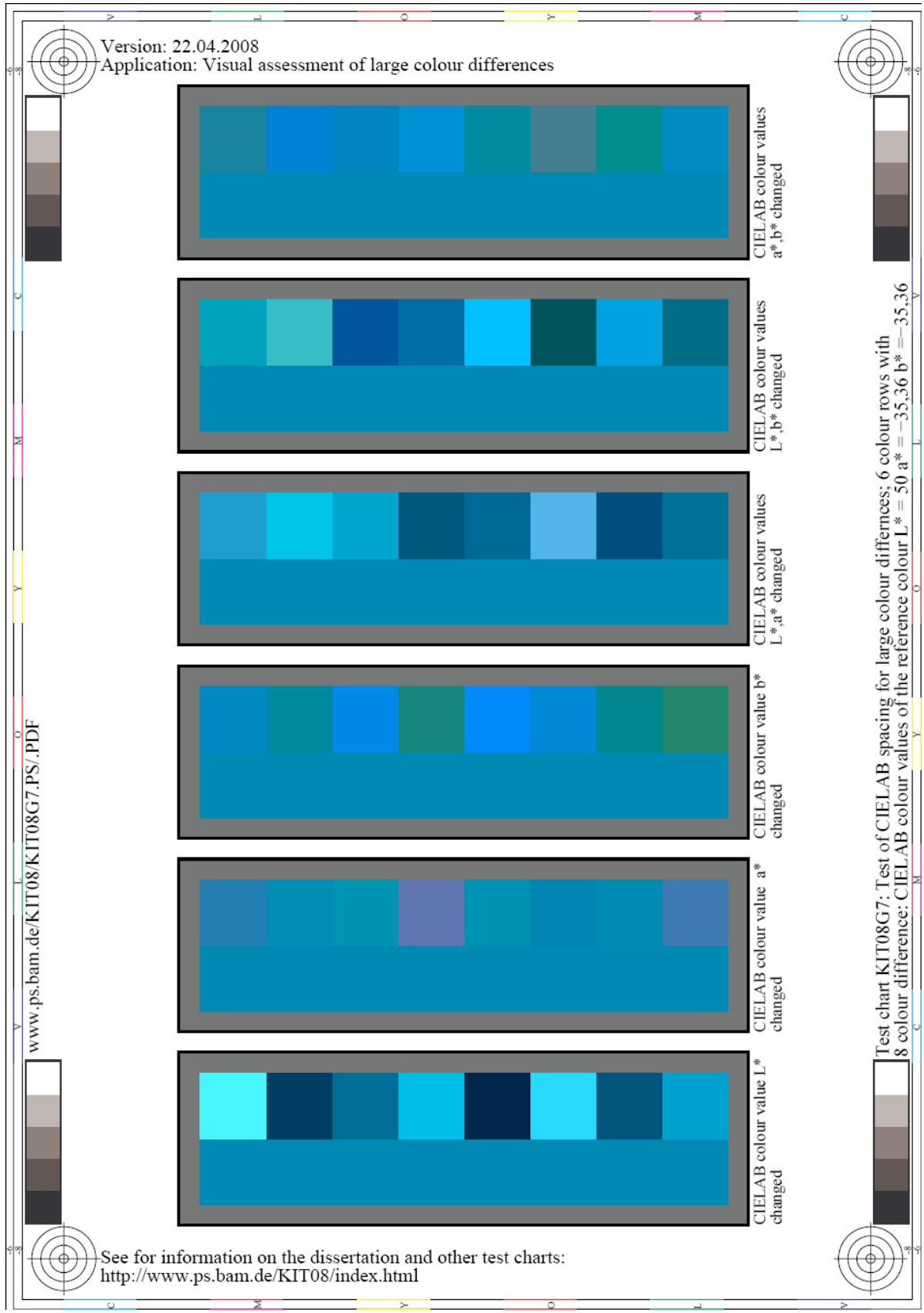

Bild A.14 Siebente Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

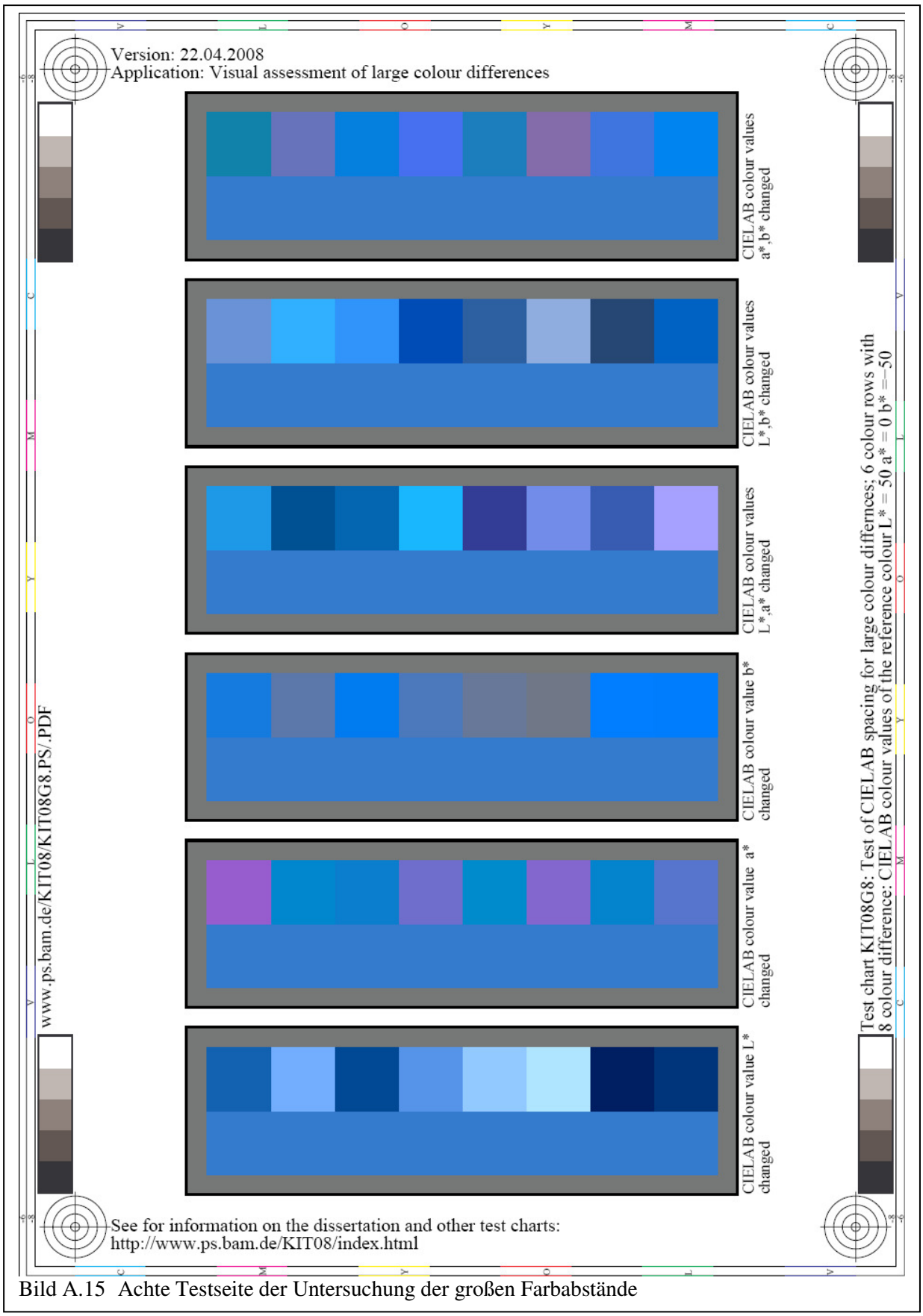

Bild A.15 Achte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

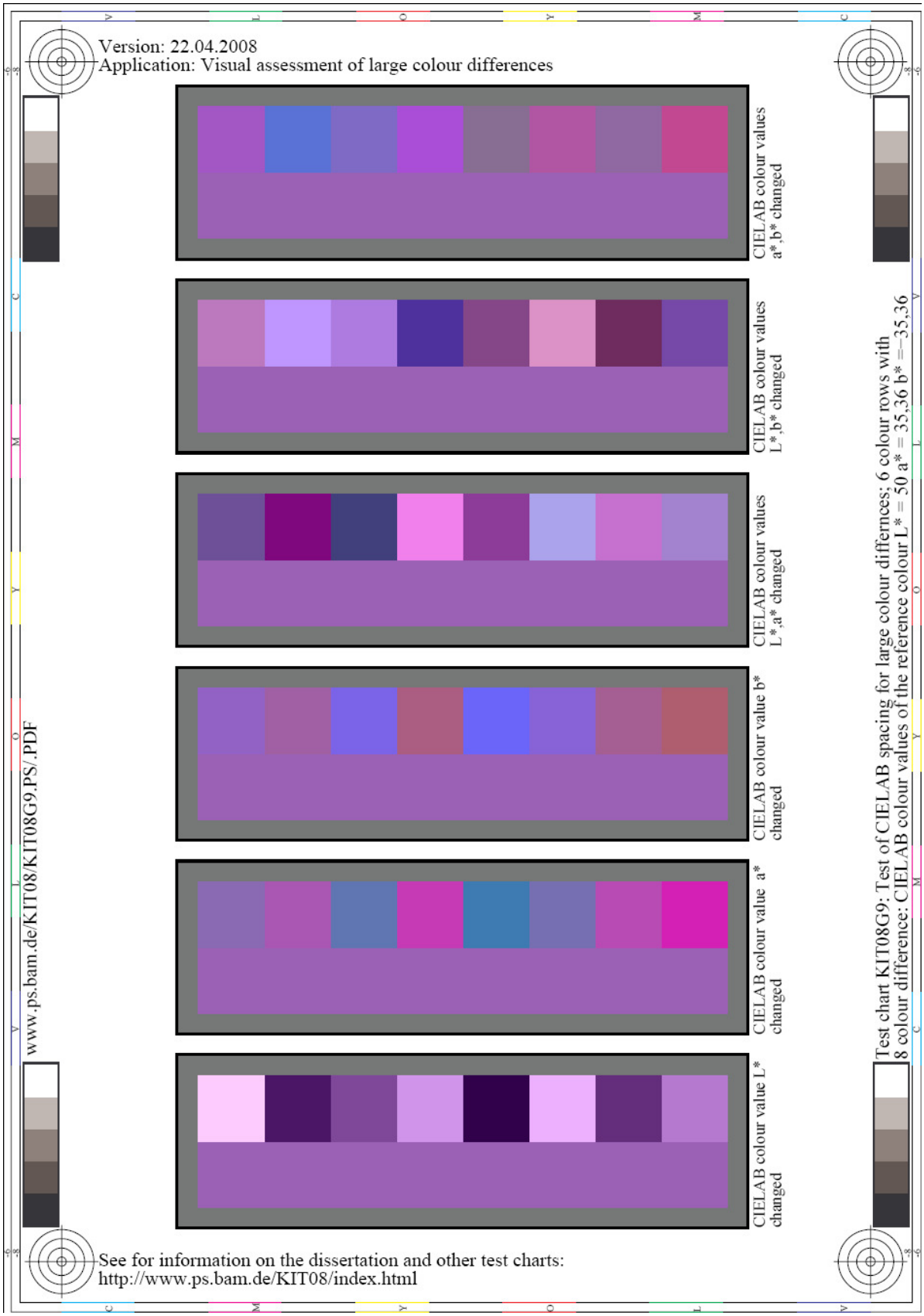

Bild A.16 Neunte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

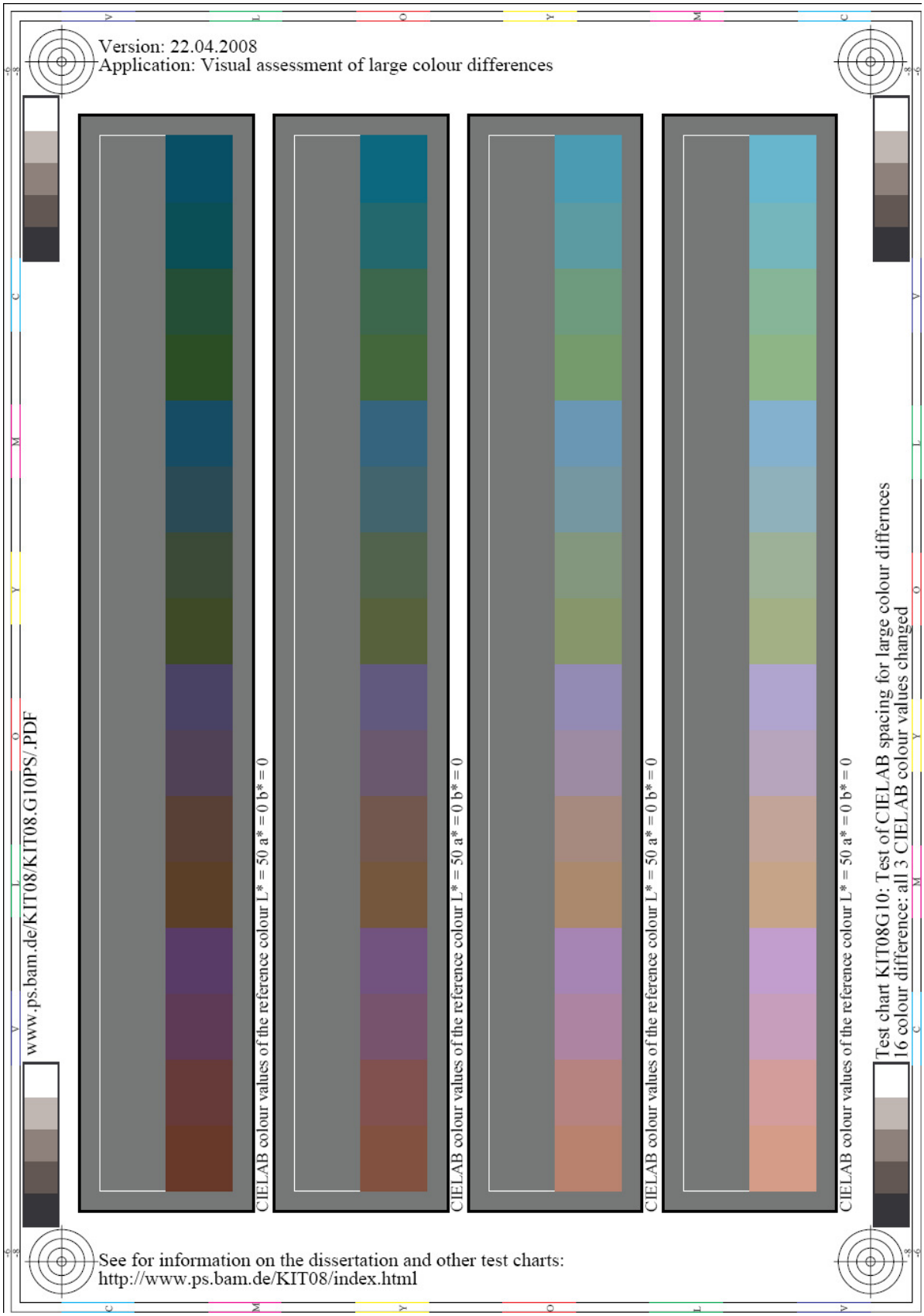

Bild A.17 Zehnte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

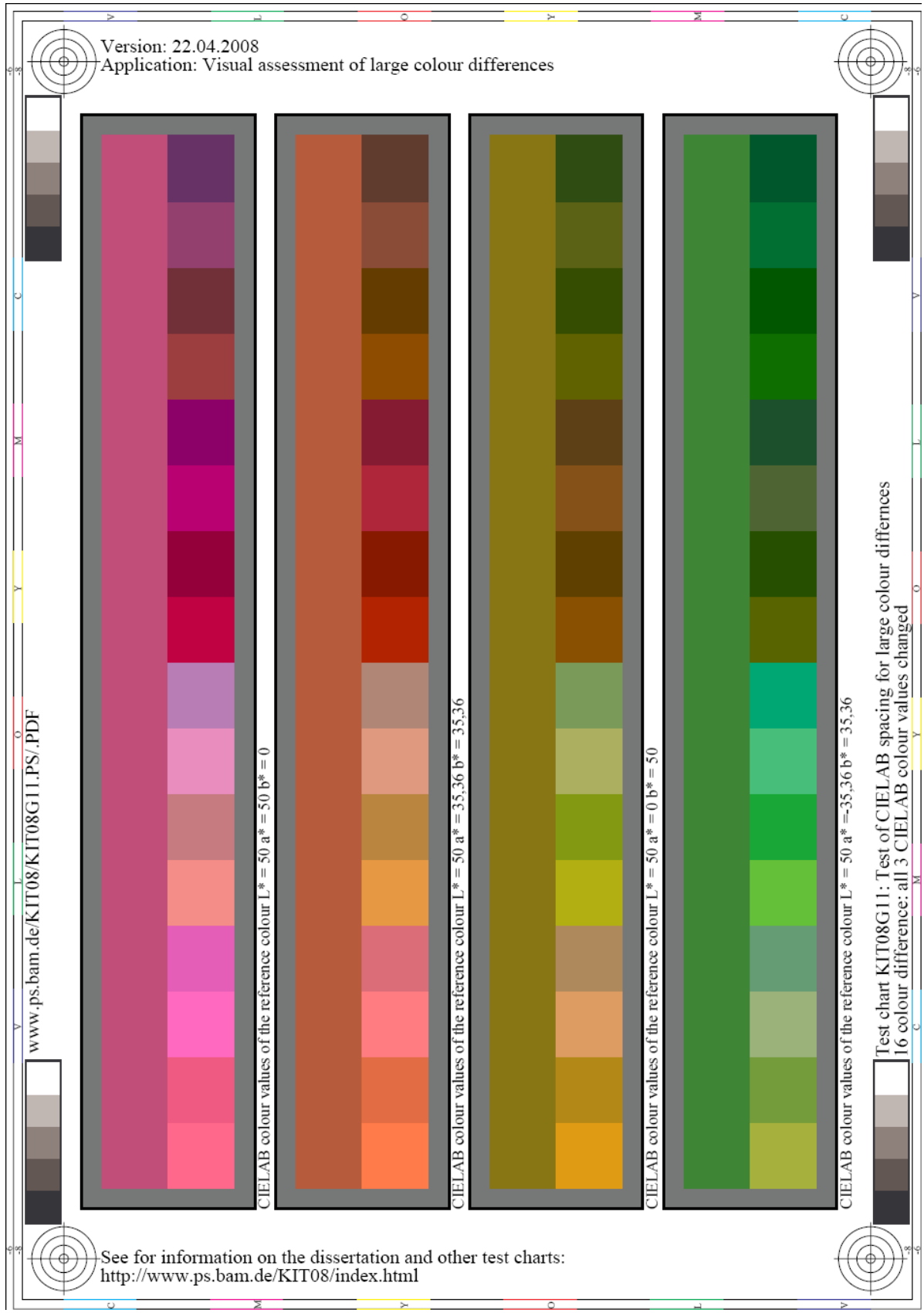

Bild A.18 Elfte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände

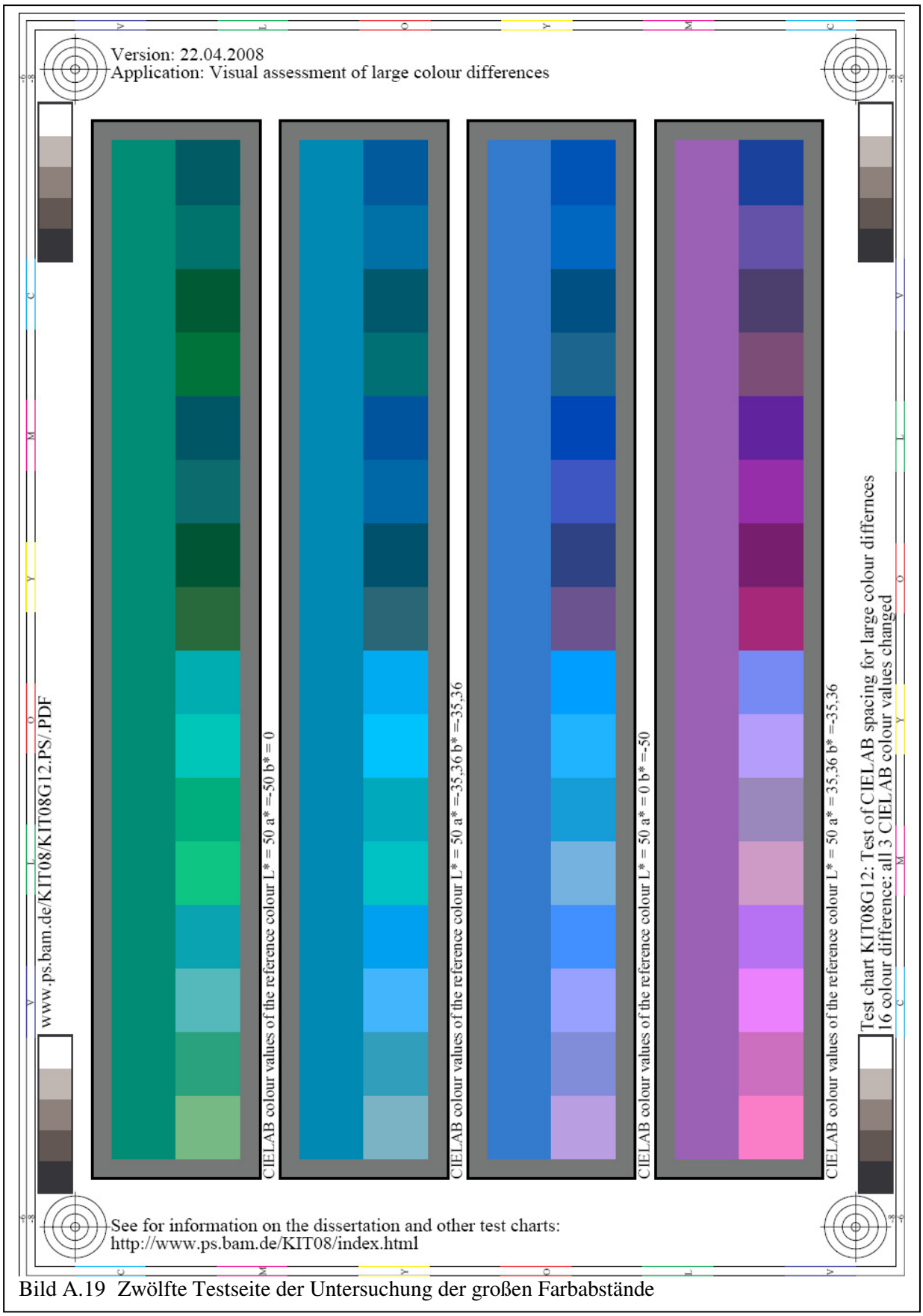

Bild A.19 Zwölfte Testseite der Untersuchung der großen Farbabstände