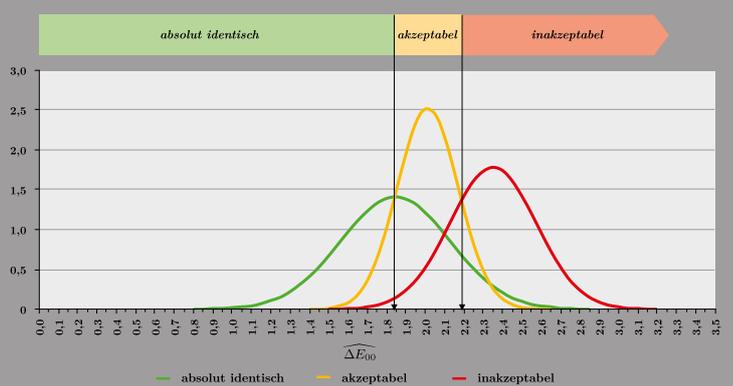
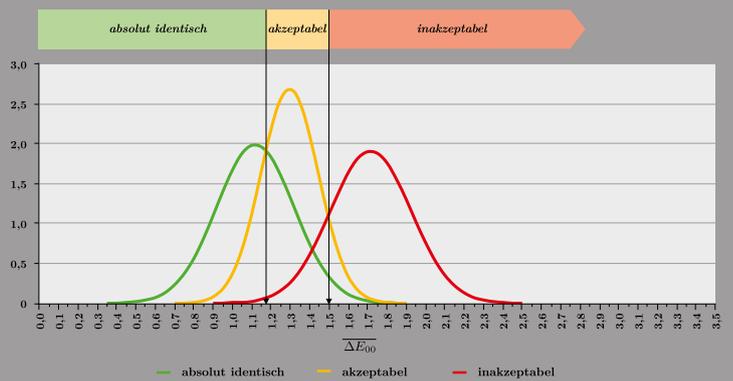


Optimierung der Übereinstimmung messtechnischer und visueller Qualitätsbewertungen von Digitalproofs





Fachbereich E
Fachrichtung Druck- und Medientechnologie

Optimierung der Übereinstimmung messtechnischer und visueller Qualitätsbewertungen von Digitalproofs

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ingenieur
vorgelegt von

CLAUDIO S. WILMANN S. M.Sc.

am 15. Juli 2010

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Stefan Brües
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Peter Urban

Datum der mündlichen Prüfung: 18. Februar 2011

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20110803-144428-8

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20110803-144428-8>]

Meiner geliebten Frau Alexandra,

unserem Sohn Julian Emil

sowie

meinen Eltern, Helga und Christian Höcker.

Mein besonderer Dank gilt:

Professor Dr. Stefan Brües, für die Betreuung des Themas, für sein stets offenes Ohr, die professionelle Beratung und sachliche Kritik, die hilfreichen Diskussionen und Anregungen sowie für die Nutzung des Labors und der Gerätschaften.

Professor Dr. Peter Urban, für die Beratung sowie hilfreichen Diskussionen und Anregungen.

Der Firma GMG GmbH & Co. KG, Tübingen, für die finanzielle Unterstützung des Eye-Tracker Experiments, die Herstellung der Probenpaare und die Nutzung verschiedener Testmotive.

Meiner Frau Alexandra Wilmanns, für ihre Geduld und Rücksichtnahme sowie ihre Bereitschaft des Verzichts auf gemeinsame Stunden.

Den 23 Probandinnen und Probanden, für ihre freiwillige Teilnahme an dem Eye-Tracker Experiment.

Dem Bundesverband Druck und Medien (bvdm) für die Nutzung der Roman16 Referenzmotive.

Dem Verband der Schweizer Druckindustrie (VSD) für die Nutzung der Visual Print Reference.

Dem Team der Technischen Fakultät der Universität Bielefeld, für die Demonstration verschiedener Eye-Tracking Systeme und die Diskussionen zur technischen Durchführbarkeit des Experiments.

Den Mitarbeitern der Firma SensoMotoric Instruments GmbH (SMI), die geholfen haben, den außergewöhnlichen Versuchsaufbau für das Experiment zu realisieren.

Dank geht auch an alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fachbereichs Druck- und Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal und an all diejenigen, die namentlich nicht erwähnt werden können, die durch ihren Zuspruch, ihre Hilfe und Unterstützung sowie ihr offenes Ohr, die Diskussionen und Gespräche dazu beigetragen haben, diese Arbeit fertigzustellen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Zusammenfassung	4
Abstract	5
Verwendete Abkürzungen und Zeichen	6
1. Einführung	7
2. Qualitätsbewertung von Digitalproofs	9
2.1. Qualitätsdefinition	9
2.2. Referenz	9
2.3. Visuelle Qualitätsbewertung	11
2.4. Messtechnische Qualitätsbewertung	15
2.5. Rahmenbedingungen der Qualitätsbewertung in der Praxis	16
2.6. Ursachen unzureichender Übereinstimmung	17
2.7. Zusammenfassung	20
3. Experimentelle Arbeiten	22
3.1. Eye-Tracker-Experiment	24
3.1.1. Aufbau	24
3.1.2. Referenzdruckbedingung, Testmotive	27

3.1.3. Probanden	31
3.1.4. Aufgabenstellung	32
3.1.5. Rohdatenaufbereitung und Datenanalyse	33
3.2. Relevante CIELAB Farbbereiche	38
3.3. Zusammenhänge zwischen Farbdifferenzen und Qualitätsbewertungen	43
4. Entwicklung einer optimierten messtechnischen Auswertungsmethode	48
4.1. Allgemeine Voraussetzungen und Zusammenhänge	48
4.2. Anwendung der optimierten Auswertungsmethode	49
4.3. Vereinfachung der Intervallgrenzen für die praktische Anwendung	51
5. Zusammenfassung und Ausblick	53
5.1. Zusammenfassung	53
5.2. Ausblick	54
Tabellenverzeichnis	56
Abbildungsverzeichnis	58
Literaturverzeichnis	61
Anhang	65
A. Referenzmotive	65
B. Reproduktion von CIEDE2000-Farbunterschieden der Modifikationsfunktion <i>f_m</i>	88
C. Wahrnehmungsschwelle und Urteilsvermögen der Probanden	94
D. Zuordnung der Farbunterschiede zu den Qualitätsbewertungen	97

E. Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung	106
F. t-Test auf unterschiedliche Mittelwerte	108
G. Berechnung der Intervallgrenzen	109

Zusammenfassung

Die in der Druck- und Medienbranche übliche messtechnische Auswertung von Digital-Prüfdrucken (*Proofs*) nach ISO 12647-7 kann im Vergleich zur Qualitätsbewertung im Rahmen einer visuellen Abmusterung, auf Grund diverser Unzulänglichkeiten, zu widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Da zum Zeitpunkt der Proofherstellung in der Regel kein Referenzdruck vorhanden ist, ist es erforderlich, dass eine messtechnische Auswertung das visuelle Qualitätsurteil mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit vorhersagen kann.

Zunächst wurden Ursachen für eine unzureichende Übereinstimmung beider Bewertungsmethoden identifiziert. In einem Experiment zur visuellen Abmusterung führten 23 Probanden einen Farbvergleich von 88 Probenpaaren mit natürlichen Bildmotiven unter den in der Druckindustrie üblichen Betrachtungsbedingungen nach ISO 3664/P1 durch. Die visuelle Qualität wurde auf einer dreistufigen Skala mit den Kategorien „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ bewertet. Mit Hilfe eines Eye-Trackers wurden die Blickbewegungen der Probanden während des Farbvergleichs aufgezeichnet. Die wahrgenommenen CIEDE2000 Farbunterschiede (ΔE_{00}) eines jeden Probenpaares wurden den Qualitätsbewertungen desselben Probenpaares zugeordnet. Auf diesen Daten aufbauend wurde eine neue messtechnische Auswertungsmethode entwickelt, mit der sich die Qualität eines Proofs mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit in eine der drei o. g. Kategorien einteilen lässt. Durch die neu entwickelte Auswertungsmethode wird somit eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der visuellen Qualitätsbewertung erzielt, als es unter Anwendung der üblichen Methode der Fall ist.

Weiterhin wurde gezeigt, dass bei der Abmusterung vor allem Neutraltönen und Hauttönen eine hohe Relevanz zu Teil wird. Diese Farbtöne sollten in einem Prüfkeil für Digitalproofs demnach eine stärkere Berücksichtigung finden als es heute der Fall ist.

Abstract

The common, ISO 12647-7 compliant, colorimetric evaluation of digital hardcopy proofs in the Print and Media Industry possibly reports contrary results in comparison to a visual quality assessment due to miscellaneous inadequacies. Since there exists no reference print at proofing time it is demandable that the colorimetric evaluation is able to predict the visual quality at a high confidence level.

Reasons for the insufficient agreement of both evaluations have been identified at first. 23 subjects performed an experiment on visual quality assessment and conducted a color comparison of 88 sample pairs with natural images under the industry's standard viewing conditions in conformance to ISO 3664/P1. The visual quality was rated using a three-step scale comprising the categories „*absolute identical*“, „*acceptable*“ and „*inacceptable*“. An eye tracking device recorded the eye movements of the subjects during comparison. The observed CIEDE2000 color differences (ΔE_{00}) of each sample pair were associated with the quality judgement of the same pair. Based on that data a new method for colorimetric evaluation has been developed to grade the quality of a hardcopy proof into one of the abovementioned three categories. Using the new evaluation method achieves a considerably better agreement with the visual quality assessment than it does using the common method.

Furthermore, it was shown that neutral colors and skin colors are of significant importance during visual quality assessment. Those colors should be taken in greater consideration in validation bars used for digital hardcopy proofs than they are today.

Verwendete Abkürzungen und Zeichen

a^*	CIELAB „Rot-Grün“-Anteil
B	Beobachter
b^*	CIELAB „Gelb-Blau“-Anteil
bvdm	Bundesverband Druck und Medien
C^*	CIELAB Buntheit [15]
C_{00}^*	LAB2000 Buntheit
CIE	Internationale Beleuchtungskommission
CIELAB	CIE $L^*a^*b^*$ Farbraum [15][11]
CMYK	Primärfarben Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz eines vierkanaligen Farbsystems
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
ΔC^*	CIELAB-Buntheits-Differenz [15]
ΔE	Allgemeiner Farbabstand (ohne Definition einer Farbabstandsformel)
$\overline{\Delta E}$	Durchschnittlicher allgemeiner Farbabstand
$\widehat{\Delta E}$	Maximaler allgemeiner Farbabstand
ΔE_{76}	Farbabstand nach der CIELAB Gesamtfarbabstandsformel [15]
ΔE_{00}	Farbabstand nach der CIEDE2000 Gesamtfarbabstandsformel [11]
ΔH^*	CIELAB-Bunton-Beitragsdifferenz [15]
ET	Eye-Tracker
F	Fixation
FD	Fixationsdauer
FDB	Farbdifferenzbild
FK	Fixationskoordinaten
FQ	Fehlerquote
f_m	(Farb-)Modifikationsfunktion
H	Häufigkeitswert eines verglichenen Farbbereichs
h_{00}	LAB2000 Buntonwinkel
ICC	International Color Consortium
ISO	International Standardization for Organization
L^*	CIELAB Helligkeit
LAB2000	Euklidisierter Farbraum der CIEDE2000 Farbabstandsformel [39]
MSD	bvdm MedienStandard Druck
P	Probe
Q	Qualitätsstufe
R	Referenz
RGB	Primärfarben Rot, Grün und Blau eines dreikanaligen Farbsystems
Rz	Relevanz
$\sigma_{\Delta E_{00}}$	Standardabweichung der CIEDE2000 Farbabstände
TIFF	Tagged Image File Format

1. Einführung

Digital-Prüfdrucke, auch *Digitalproofs* oder kurz *Proofs* genannt, spielen heute eine wichtige Rolle innerhalb drucktechnischer Arbeitsabläufe und dienen vor allem der Produktionssicherheit und Kostenreduktion. Ein Proof soll eine bestimmte Druckbedingung, z. B. den standardisierten Offsetdruck auf einem gestrichenem Papier, hinreichend genau, im Idealfall sogar *absolut identisch*, farblich simulieren. Um festzustellen, ob ein vorliegender Proof dieser Anforderung gerecht wird, bedarf es entweder einer visuellen und/oder einer (farb-)messtechnischen Qualitätsprüfung.

Die messtechnische Qualitätsprüfung erfolgt durch den Vergleich von gemessenen Farbwerten eines so genannten *Prüfkeils*, z. B. dem Fogra Medienkeil CMYK V3 Proof, zu den Referenzwerten der zu simulierenden Druckbedingung. Auf welche Weise und nach welchen Kriterien und Toleranzen die Prüfung durchgeführt werden soll, ist in technischen Richtlinien, z. B. dem MedienStandard Druck¹ (MSD), festgelegt. Im MSD werden verbindliche Normen referenziert, in denen die notwendigen Rahmenbedingungen näher beschrieben sind. Das Ergebnis der messtechnischen Prüfung kann durch die Prädikate „*bestanden*“ oder „*nicht bestanden*“ zum Ausdruck gebracht werden. Dies stellt eine sehr einfach anzuwendende und in der Praxis leicht verständliche, aber gleichzeitig eine sehr grobe Qualitätsaussage dar.

Die visuelle Prüfung, auch *visuelle Abmusterung* genannt, erfolgt unter bestimmten Betrachtungsbedingungen im direkten Vergleich des Proofs zu einer gedruckten Referenz, welche üblicherweise in dem zu simulierenden Druckverfahren hergestellt wurde. Für die visuelle Abmusterung wird im MSD keine Angabe zu dem Bewertungsschema gemacht, in der Regel ist dieses aber analog zur messtechnischen Bewertung, also ebenfalls „*bestanden*“ oder „*nicht bestanden*“.

In der Praxis kann es vorkommen, dass für einen bestimmten Proof die visuelle und die messtechnische Prüfung zu widersprüchlichen Ergebnissen kommen. Dieser Zustand ist – vor allem aus Sicht der Anwender – unbefriedigend und stellt das eigentliche Problem dar, das in dieser Arbeit adressiert wird. Das Ziel ist, die messtechnische Qualitätsprüfung dahingehend zu verbessern, dass ihr Ergebnis in möglichst guter Übereinstimmung mit der visuellen Qualitätsprüfung liegt; dies ist vor allem vor dem Hintergrund wichtig, dass

¹Der MedienStandard Druck wird herausgegeben vom deutschen Bundesverband Druck und Medien (bvdm), Wiesbaden.

eine visuelle Abmusterung zum Zeitpunkt der Proofherstellung in der Regel mangels gedruckter Referenz nicht erfolgen kann und die messtechnische Qualitätsprüfung daher den einzigen Anhaltspunkt über die visuelle Qualität des späteren Druckergebnisses liefern kann.

In der vorliegenden Arbeit werden Ursachen für die unzureichende Übereinstimmung der Ergebnisse beider Prüfungen identifiziert und entsprechende Lösungsansätze entwickelt. Ein Vorschlag zur Optimierung der Aussagekraft des visuellen Qualitätsurteils ist die Bewertung nach folgenden drei Kategorien: „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“; wegen der im Allgemeinen grundlegenden Bereitschaft zur Akzeptanz geringfügiger Farbunterschiede wird diesem Ansatz eine Schlüsselfunktion zugesprochen. Eine Befragung unter fast 100 Beschäftigten der Druckindustrie, die regelmäßig visuelle Abmusterungen durchführen, hat zudem gezeigt, dass diese Form der Bewertung von einer deutlichen Mehrheit Zustimmung fand. Diesem Ansatz muss eine verbesserte messtechnische Qualitätsbewertung schließlich ebenfalls Rechnung tragen, damit sie mit der visuellen Bewertung möglichst gut übereinstimmen kann. Die Arbeit entwickelt auch hierfür entsprechende Lösungsansätze auf Basis eines theoretischen Modells zur visuellen Qualitätskontrolle, welche mit Hilfe eines *Experimentes zur visuellen Abmusterung* zu einer neuen Methode der messtechnischen Qualitätsprüfung führen werden. Im Kern werden aus dem Experiment Kriterien und Toleranzen auf Basis einer empfindungsgemäßen Farbabstandsformel (CIEDE2000) abgeleitet, nach denen sich die Qualität mit einem hohen Grad an Zuverlässigkeit in die drei oben genannten Kategorien einordnen lässt.

Es wird zudem die Hypothese aufgestellt, dass bestimmten Farbtönen bei einer visuellen Abmusterung im Allgemeinen eine größere Relevanz zu Teil wird als anderen. Im Fall des oben genannten Fogra Medienkeils, als Repräsentant eines ISO 12647-7 [22] konformen Prüfkeils, scheint die Auswahl der Farbfelder vor allem auf die Prozesskontrolle eines analogen Druckverfahrens ausgelegt zu sein und weniger auf die visuelle Qualitätsprüfung von Digitalproofs. Mit Hilfe einer selbstentwickelten Methode wird anhand der Daten des Experimentes gezeigt, dass zu den relevanten Farbtönen vor allem Neutraltöne und Hauttöne zählen. Die oben genannte Befragung bestätigt dieses Ergebnis. Aus diesen Gründen sollte ein geeigneter Prüfkeil derartige Farbtöne in ausreichendem Maß beinhalten, damit eine messtechnische Auswertung möglichst gut mit der visuellen Qualitätsbewertung übereinstimmen kann.

2. Qualitätsbewertung von Digitalproofs

2.1. Qualitätsdefinition

Der Begriff „*Qualität*“ kann je nach Standpunkt oder Literaturquelle sehr unterschiedlich aufgefasst werden, weshalb es notwendig erscheint, diesen im Kontext dieser Arbeit einfürend zu definieren. Allgemein wird zwischen hoher und niedriger Qualität differenziert, um auszudrücken, dass sich ähnliche Erzeugnisse in bestimmten Merkmalen hinsichtlich ihrer Güte voneinander unterscheiden. Als qualitätsbestimmendes Merkmal für Digitalproofs dient hier die farbliche Übereinstimmung eines Proofs (*Probe*) zu einer Referenz. Daraus lässt sich ableiten, dass die Qualität eines Digitalproofs dann maximal ist, wenn kein Farbunterschied zur Referenz feststellbar ist. Je größer der Farbunterschied zwischen der Probe und der Referenz ausfällt, desto niedriger ist die Qualität.

Diese Formulierung des Qualitätsbegriffs trifft sowohl auf die subjektive Proofqualität zu, die im Rahmen einer visuellen Abmusterung durch einen menschlichen Beobachter bestimmt werden kann, als auch auf die objektive Proofqualität, die mit Hilfe der Farbmessstechnik und der Farbmessmetrik bestimmt werden kann. Praxisnahe wissenschaftliche Untersuchungen der letzten Jahre haben jedoch gezeigt, dass unter Anwendung heute üblicher Methoden eine deutliche Diskrepanz zwischen diesen beiden existieren kann [45, 46, 47, 48]. Daran wird deutlich, dass diese Methoden nicht optimal aufeinander abgestimmt sind. Unter verbesserten Bedingungen sollte es jedoch möglich sein, dass die subjektive und die objektive Qualitätsbewertung zu dem gleichen Ergebnis kommen können.

2.2. Referenz

Die Referenz für ein Digitalproofsystem ist die Farbwiedergabe eines bestimmten Druckprozesses unter definierten Beleuchtungsbedingungen.¹ Diese beinhaltet alle

¹Die Vorgabe bestimmter Beleuchtungsbedingungen ist notwendig, da konventionelle Digitalproofsysteme auf dem Prinzip der Metamerie basieren. Multispektrale Proofsysteme, basierend auf multispektralen Reproduktionssystemen, die eine nahezu lichtartunabhängige Simulation eines Druckprozesses ermöglichen, sind technisch zwar realisierbar [40] befinden sich gegenwärtig jedoch noch im Entwicklungsstadium.

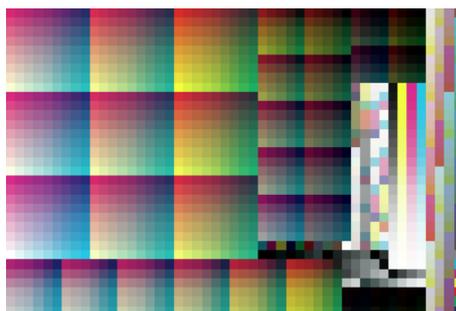


Abbildung 2.1: CMYK Testchart nach ISO 12642-2

Verfahrensschritte von der Druckformherstellung, den Farbmitteln, dem Medium, dem bildgebenden Verfahren bis hin zu dem gedruckten Exemplar. Der zu Grunde liegende Druckprozess sollte weitestgehend standardisiert sein und möglichst stabil ablaufen, andernfalls ist er als Referenz nicht oder nur bedingt tauglich.

Unter diesen Bedingungen ist es möglich den Prozess durch so genannte Charakterisierungsdaten² farbmtrisch sehr genau zu beschreiben. Grenzen in der Genauigkeit werden zum einen durch technische Randbedingungen festgelegt, z. B. durch die Anzahl der verwendeten Primärfarben oder die Größe des Druckbogens, und zum anderen durch den als notwendig empfundenen Aufwand gesetzt. Abbildung 2.1 zeigt ein Testchart zur Charakterisierung eines Vierfarben-Druckprozesses mit ca. 1.600 verschiedenen Gerätefarb-Kombinationen (CMYK) nach ISO 12642-2 [21]. Charakterisierungsdaten stellen somit eine erste, nicht-physische Form der Referenz dar. Aus diesen Daten kann ein (ICC³-)Farbprofil erstellt werden, das mathematische Funktionen und/oder Tabellen zur Farbkommunikation in modernen Computersystemen enthält. Ein Farbprofil stellt daher eine zweite nicht-physische Referenz dar. Wird mit dem Druckprozess eine Vorlage erstellt, so stellt diese eine physische Form der Referenz dar. Solche „Referenzdrucke“ beinhalten meistens typische, aber anspruchsvoll zu reproduzierende Bildmotive für den Einsatz in der visuellen Qualitätskontrolle. Die Altona Testsuite Visual [32] und die Roman16 bvdM Referenzbilder [33] sind zwei Beispiele für derartige Bildmotive (s. Abb. 2.2).

Die nicht-physische Referenz dient in erster Linie dazu, ein Proofsystem für eine bestimmte Druckbedingung voreinzustellen. Dabei soll diese Referenz farbmtrisch möglichst exakt reproduziert werden, also mit einem sehr geringen durchschnittlichen und maximalen Farbabstand, im Idealfall mit $\Delta E_{76} = 0$. Dieses Ziel kann mit heutiger Technik in mehreren iterativen Schritten annähernd erreicht werden. Trotz einer sehr exakten messtechnischen Übereinstimmung können oftmals noch visuelle Unterschiede zu einem oder mehreren Referenzdrucken festgestellt werden, deren Ursache hauptsächlich in den Schwankungen der Prozessparameter des Referenzdruckverfahrens begründet sind. Durch Feinjustage

²Charakterisierungsdaten für die wichtigsten, nach ISO 12647 standardisierten Druckprozesse werden von der Fogra e.V., München, erstellt und unter <http://www.fogra.org/> veröffentlicht.

³Das International Color Consortium (ICC) spezifiziert den Aufbau eines plattformunabhängigen Geräte-Farbprofils [7].

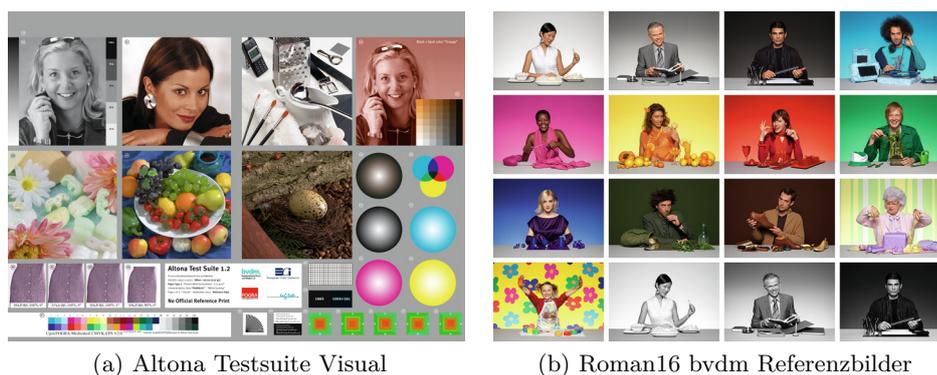


Abbildung 2.2: Beispiele für Referenzmotive zur visuellen Qualitätskontrolle

in der Proofsystemansteuerung werden diese minimiert, bis im Idealfall kein visueller Farbunterschied zu den Referenzdrucken mehr sichtbar ist. Dieser Schritt führt jedoch in der Regel dazu, dass die ΔE_{76} -Farbabstände zu den nicht-physischen Referenzwerten im Durchschnitt steigen ($\Delta E_{76} > 0$).

In Produktionsumgebungen werden Digitalproofs üblicherweise ausschließlich auf Basis einer nicht-physischen Referenz hergestellt, da das zu erzeugende Resultat eines Druckprozesses vorab simuliert werden soll; die physische Referenz kann zum Zeitpunkt der Proofherstellung also noch nicht vorliegen. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass die messtechnische Qualitätsprüfung das erwartete visuelle Ergebnis zuverlässig vorhersagt, um in der Praxis entsprechende Maßnahmen, z. B. Farbkorrekturen, zu treffen.

2.3. Visuelle Qualitätsbewertung

Das Auge eines farbnormalsichtigen Beobachters gilt als das ultimative „*Farbmessinstrument*“, obwohl die „*Messung*“ nicht objektiv ist, sondern von dem subjektiven Farbwahrnehmungsvermögen abhängig ist. Dabei kann der empfundene Farbeindruck von einem Beobachter nicht bewusst verändert werden.⁴ Das bedeutet, dass bei dem gleichzeitigen Vergleich einer homogen gefärbten Probe mit einer homogen gefärbten Referenz und unter photopischem Sehen⁵ sowie unter identischen Beleuchtungs-, Umgebungs- und Umfeldbedingungen beide Farbeindrücke entweder farblich übereinstimmend oder voneinander abweichend wahrgenommen werden.

Qualitätsbewertung homogener Farbflächen

Werden mehrere ähnlichfarbige Proben miteinander verglichen, so kann eine Rangfolge aufgestellt werden, welche Proben mit der Referenz identisch sind, welche am ähnlichsten

⁴Allenfalls kann von dem Beobachter bewusst ein unwahres Urteil geäußert werden.

⁵Photopisches Sehen beschreibt die visuelle Wahrnehmung unter Tageslichtbedingungen [43].

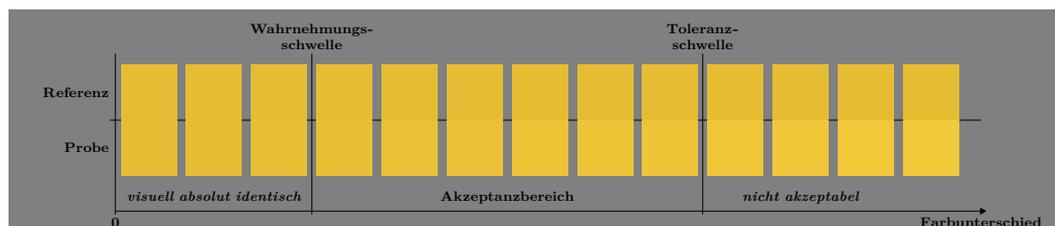


Abbildung 2.3: Vergleich ähnlichfarbiger Proben mit Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle und Toleranzschwelle sowie des Akzeptanzbereichs

oder unähnlichsten sind und bis zu welchem Grad ein wahrnehmbarer Unterschied – im Rahmen der technischen Anforderungen – noch akzeptiert werden kann. Aus einer solchen Reihe kann anschließend mit Hilfe der Farbmessung und der Farbmotrik die Farbdifferenz⁶ der Proben zu der Referenz bestimmt werden. Davon ausgehend kann einerseits die Wahrnehmungsschwelle und andererseits eine technische Toleranzschwelle als quantitative Größe abgeleitet werden, z. B. $1,0 \Delta E_{76}$ als Wahrnehmungsschwelle und $5,0 \Delta E_{76}$ als technische Toleranz.

Aus Sicht der visuellen Wahrnehmung können Farbunterschiede, die unterhalb der Wahrnehmungsschwelle liegen allgemein als „*absolut identisch*“ zur Referenz eingestuft werden, Farbunterschiede darüber als „*unterschiedlich*“. Aus technischer Sicht können Farbunterschiede die unterhalb der Toleranzschwelle liegen allgemein als technisch „*OK*“ eingestuft werden, Farbunterschiede darüber als technisch „*nicht OK*“ oder „*nicht akzeptabel*“. Der Bereich zwischen der Wahrnehmungsschwelle und der Toleranzschwelle stellt den so genannten „*Akzeptanzbereich*“ dar, da alle darin liegenden Farbunterschiede von einem sachkundigen Beobachter akzeptiert werden. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für die visuelle Einordnung der Farbunterschiede verschiedener gelblicher Proben im Vergleich zu einer gelblichen Referenz. Abbildung 2.4 stellt die Zusammenhänge zwischen dem Farbunterschied und der technischen Qualitätsbewertung sowie zwischen dem Farbunterschied und der visuellen Wahrnehmung dar und verdeutlicht das sprunghafte Verhalten beider Funktionen.

In der Realität ist der Übergang der visuellen Qualitätsbewertung von der Wahrnehmungsbis zu der Toleranzschwelle ist jedoch nicht sprunghaft sondern fließend, da die dazwischen liegenden Farbunterschiede durchaus voneinander differenziert werden können und größere Farbabstände eine niedrigere Qualität zur Folge haben als kleinere. Wie zu erkennen ist, kann die technische Qualitätsbewertung durch ihr sprunghaftes Verhalten diese feinen Qualitätsunterschiede nicht in ausreichendem Maß wiedergeben.

Qualitätsbewertung von Bildmotiven

Eine ähnliche Vorgehensweise wie für homogene Farbflächen lässt sich auch auf gedruckte Vorlagen mit bildhaften und vielfarbigen Darstellungen, z. B. Portraits,

⁶Am gebräuchlichsten ist die Verwendung einer Gesamtfarbabstandsformel, z. B. ΔE_{76} .

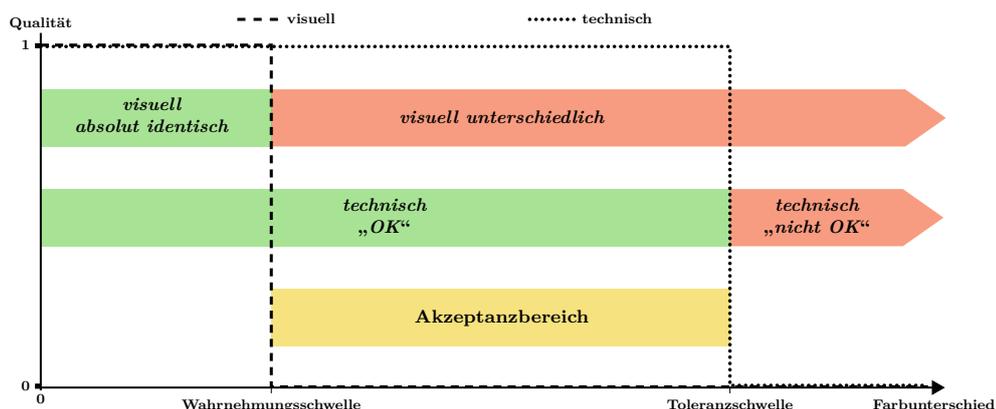


Abbildung 2.4: Gegenüberstellung der Klassifizierungen des visuellen Vergleichs mit der technischen und der visuellen Bewertung

Landschaftsaufnahmen und andere Szenen, anwenden. Die Bewertung der farblichen Übereinstimmung zu einer Referenz gestaltet sich dabei jedoch schwieriger, da in der Regel eine Vielzahl an Bildbereichen mit sehr vielen verschiedenen Farben und Farbverläufen miteinander verglichen werden müssen. Diese Vorgehensweise erfordert eine hohe Konzentration und in der Regel einen gewissen Grad an Erfahrung, um Farbunterschiede zweifelsfrei zu identifizieren. Analog zu dem Farbvergleich homogener Farbflächen existiert auch hier ein Akzeptanzbereich, in dem Farbunterschiede von den Beobachtern akzeptiert werden [16, Kap. 3.5.3][10, Kap. 4].

Der Schwierigkeitsgrad der Identifikation von Farbunterschieden erhöht sich, wenn eine messtechnisch gute Proofsimulation eines Druckverfahrens zu einem entsprechenden Referenzdruck abgemustert werden soll. Hier ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass in vielen Bildbereichen kein Farbunterschied wahrgenommen werden kann, während nur in wenigen anderen Bereichen ein akzeptabler oder inakzeptabler Farbunterschied festgestellt wird. Für das visuelle Urteil wird ein Beobachter daher abwägen müssen, wie groß die wahrgenommenen Farbunterschiede im Durchschnitt sind. Eine Ausnahme existiert für den Fall, dass bei einer überwiegend sehr guten Übereinstimmung einige wenige, aber dafür besonders starke Farbunterschiede wahrgenommen werden, die das Urteil maßgeblich negativ beeinflussen.

Aus diesem Grund erscheint es notwendig festzustellen, bei welchen Farbabständen Digitalproofs mit Bildmotiven im Allgemeinen als „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ oder „*inakzeptabel*“ bewertet werden. Die Zuordnung der Bewertungen zu der Stärke der Farbabstände muss dazu empirisch bestimmt werden. Dabei kann eine gewisse Streuung, vornehmlich bedingt durch das subjektive Wahrnehmungsvermögen der Probanden, nicht ausgeschlossen werden, sodass vereinfacht davon ausgegangen werden kann, dass sich die Bewertungen der Qualität zu den Farbabständen in den Motiven entsprechend einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktion verhält.

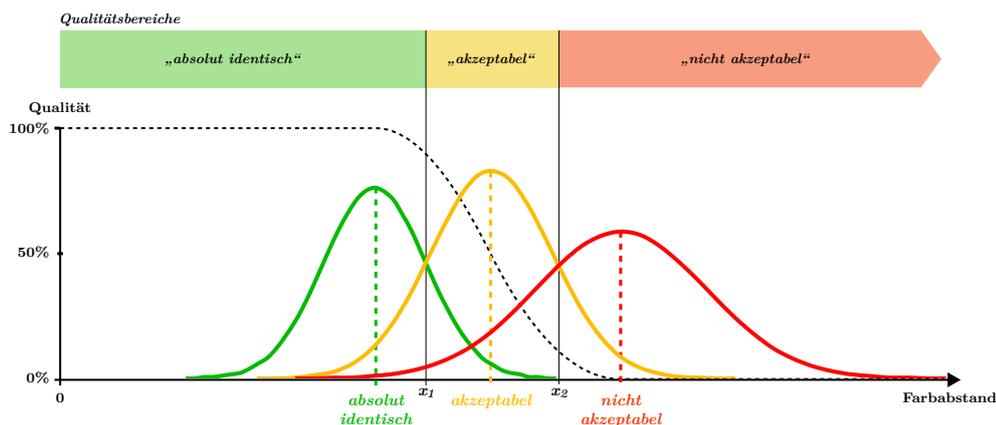


Abbildung 2.5: Zusammenhang zwischen der Qualitätsbewertung von Farbabständen in Bildmotiven und der resultierenden Qualität, durch die sich drei Qualitätsbereiche definieren lassen

Abbildung 2.5 zeigt ein theoretisches Modell des Zusammenhangs zwischen der Qualitätsbewertung visuell wahrnehmbarer Farbabstände in Bildmotiven und der daraus resultierenden Qualitätstufe. Für die drei Bewertungen „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ werden die wahrscheinlichsten Farbabstände bestimmt. Alle Farbabstände bis zu der Stufe „*absolut identisch*“ repräsentieren demnach die maximale Qualität (100%). Je größer die Farbabstände werden, desto geringer wird die Qualität. Bei ausschließlich „*akzeptablen*“ Farbabständen kann eine durchschnittliche Qualität (50%) angenommen werden. Die Qualität sinkt mit zunehmender Größe der Farbabstände weiterhin stetig, bis schließlich nur noch „*inakzeptable*“ Farbunterschiede festgestellt werden und die Qualität minimal ist (0%). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Qualität in diesem Modell nicht sprunghaft abnimmt, wie zuvor bei der technischen Qualitätsbewertung, sondern ein graduelles Verhalten abbildet.

Eine Vereinfachung dieses Zusammenhangs für die praktische Anwendung einer Qualitätsbewertung kann dadurch erreicht werden, dass drei Qualitätsbereiche in Form von Farbabstands-Intervallen gebildet werden. Sofern festgestellt werden kann, dass die zu den Qualitätsstufen identifizierten Farbabstände mit hinreichend großer Wahrscheinlichkeit voneinander unabhängig sind, können entsprechende Intervallgrenzen berechnet werden. Das erste Intervall von 0 bis zum Schnittpunkt x_1 beinhaltet alle Farbabstände, die mit großer Wahrscheinlichkeit als „*absolut identisch*“ bewertet werden. Das zweite Intervall, von x_1 bis x_2 beinhaltet alle Farbabstände, die mit großer Wahrscheinlichkeit als „*akzeptabel*“ bewertet werden. Das dritte Intervall, von x_2 bis ∞ beinhaltet alle Farbabstände, die mit großer Wahrscheinlichkeit als „*inakzeptabel*“ bewertet werden.

Dieses Modell der Bewertung von Farbabständen liefert ein deutlich schärferes Bild der tatsächlich empfundenen Qualität als es mit gegenwärtigen Methoden möglich ist.

2.4. Messtechnische Qualitätsbewertung

Die messtechnische Qualitätsbewertung beginnt durch das Vermessen der Farbfelder eines geprooften Prüfkeils mit Hilfe eines handelsüblichen Spektralfotometers unter den in ISO 13655 [23] angegebenen Bedingungen. Zur Farbkommunikation werden von dem Messgerät üblicherweise CIELAB Farbwerte ausgegeben.

Messungenauigkeiten

Es ist bekannt, dass bei diesen Farbmessgeräten technisch bedingte Ungenauigkeiten in den Messungen auftreten, die bei der Betrachtung eines einzelnen, voll funktionsfähigen Gerätes in der Regel vernachlässigbar gering sind. Die unmittelbare Gerätekalibrierung vor einer Messung sowie eine regelmäßige Wartung in Verbindung mit einer erneuten Eichung auf einen Standard stellen diesen Zustand auch über einen Zeitraum mehrerer Jahre sicher. Bei der Messung derselben Vorlage mit mehreren Messgeräten wird es jedoch zu Unterschieden der Messwerte kommen, die bei Geräten gleichen Typs in der Regel weniger stark ausgeprägt sind, als bei Messgeräten unterschiedlichen Typs oder gar unterschiedlicher Hersteller. In Einzelfällen können Farbunterschiede bis zu mehreren Einheiten ΔE_{76} festgestellt werden.

Zwar existieren mathematische Methoden, mit denen die Messwerte verschiedener Geräte in Übereinstimmung gebracht werden können [12], diese spielen im Bereich der Digitalprooftechnologie gegenwärtig jedoch keine Rolle. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse dieser Arbeit streng genommen nur in Verbindung mit dem Farbmessgerät gültig, welches auch zur Einrichtung desjenigen Proofsystems verwendet wurde, mit dem die zu bewertenden Proofs hergestellt werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass der messtechnischen Qualitätsbewertung des Prooferzeugers ein hohes Vertrauen entgegengebracht werden muss, da die Kontrollmessung eines Proofempfängers zu abweichenden Ergebnissen kommen kann.

Auswertungsmethode

Nach der Messung wird unter Anwendung einer so genannten Auswertungsmethode eine Aussage darüber getroffen, ob der Proof hinreichend genau mit der Referenz übereinstimmt oder nicht. Heute übliche Auswertungsmethoden, z. B. nach ISO 12647-7, arbeiten üblicherweise mit einer oder mehreren Farbabstandsformeln (z. B. ΔE_{76} , ΔH^* , ...) und definieren verschiedene zu prüfende Kriterien und einzuhaltende technische Toleranzen.

Um eine gute Übereinstimmung zu der visuellen Bewertung zu ermöglichen, sollte die Auswertungsmethode das typische Verhalten eines menschlichen Beobachters bei der Abmusterung optimal nachstellen. Wie bereits erläutert wurde, wird der Beobachter anhand der Abmusterung abschätzen, wie groß die wahrgenommenen Farbunterschiede

im Durchschnitt waren. Sehr starke Farbunterschiede können ebenfalls ausschlaggebend für das Urteil sein. Es liegt also nahe, dass die messtechnische Auswertungsmethode in Analogie dazu vorgehen sollte, also vor allem den durchschnittlichen und maximalen Farbunterschied berücksichtigt. Darüber hinaus sollte die Berechnung der Farbabstände auf einer Formel basieren, die in der Lage ist die Empfindung von Farbunterschieden gleichabständig auszudrücken.

Datenbasis

Je geringer die Datenbasis für die Auswertungsmethode ist, also je weniger unterschiedliche Farbfelder vermessen wurden, desto weniger aussagekräftig kann ein darauf basierendes Ergebnis sein. Aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen besitzen Prüfkeile für Digitalproofs im Vergleich zu der Gesamtmenge aller druckbaren Farben eines Druckprozesses allerdings ausgesprochen wenige unterschiedliche Farbfelder. Das in ISO 12642-2 definierte Testchart zur Charakterisierung eines Druckprozesses enthält ca. 1.600 unterschiedliche Farbfelder und ist in der Lage eine relativ große Informationsmenge zu liefern. Der Fogra Medienkeil CMYK V3 Proof, als Beispiel für einen typischen Prüfkeil für Digitalproofs, verfügt lediglich über 72 unterschiedliche Farbfelder und erlaubt somit nur ein eingeschränktes Bild. Es ist also von besonderer Bedeutung, dass für eine messtechnische Auswertung mit Hilfe eines Prüfkeils diejenigen Farben in hinreichendem Umfang zur Anwendung kommen, aus denen die aussagekräftigsten Rückschlüsse über die visuelle Qualität gezogen werden können.

2.5. Rahmenbedingungen der Qualitätsbewertung in der Praxis

In der Praxis muss die Qualitätsbewertung einigen, möglichst standardisierten Rahmenbedingungen unterliegen, damit sie auch zu einem späteren Zeitpunkt und an einem anderen Ort nachvollziehbar ist. Dazu gehören vor allem die Definition der Betrachtungsbedingungen für die visuelle Abmusterung und die Messbedingungen mit einem Farbmessgerät. Die ISO 3664 [24] definiert die Betrachtungsbedingungen „P1“ für den kritischen Vergleich von Aufsichtsvorlagen, eine entsprechende Apparatur⁷ sowie die Umgebungsbedingungen. Die Messbedingungen für die Farbmessung und die Berechnung von Farbdifferenzen mit einem Spektralfotometer sind in der ISO 13655 festgelegt.⁸

Die ISO 12647-7 definiert wie ein Digitalproofsystem arbeiten muss, damit es in der Lage ist farbverbindliche Proofs zu erzeugen. Die Norm beinhaltet die Vorgaben für den Aufbau und die Verwendung von Testcharts und Kontrollelementen zur Einrichtung eines zertifizierbaren Proofsystems, den allgemeinen Aufbau eines Prüfkeils zur

⁷Typische Bezeichnungen hierfür sind Abmusterungs-, Normlicht- und Abstimmkabine oder Prüfstation.

⁸Mit der Revision der ISO 13655 im Jahr 2009 wurden vier verschiedene Messbedingungen, M0 bis M3, festgelegt; die in dieser Arbeit verwendeten Messbedingungen entsprechen M0 auf weißer Unterlage.

Proofkontrolle und die jeweiligen Kriterien und Toleranzen nach den Farbabstandsformeln ΔE_{76} und ΔH^* . Aus messtechnischer Sicht liegt ein farbverbindlicher Proof nur dann vor, wenn alle Kriterien die angegebenen Toleranzen nicht überschreiten. Ebenfalls enthalten ist ein informativer Anhang dazu, wie die visuelle Abmusterung eines farbverbindlichen Proofs zu einem Referenzdruck erfolgen sollte; das Ergebnis einer solchen visuellen Bewertung kann entweder als „bestanden“ oder „nicht bestanden“ dokumentiert werden.

Für die Druck- und Medienbranche in Deutschland ist der MedienStandard Druck (MSD) maßgeblich [34]. Er referenziert die o. g. Rahmenbedingungen unter Verwendung des Fogra Medienkeil CMYK V3 Proof.

2.6. Ursachen unzureichender Übereinstimmung

Damit Ansätze für eine Optimierung der Übereinstimmung zwischen der messtechnischen und visuellen Qualitätsbewertung geschaffen werden können, werden im Folgenden Ursachen für eine unzureichende Übereinstimmung dargelegt, die bereits teilweise in den vorigen Abschnitten angesprochen wurden.

Farbabstandsformel

Die in ISO 12647-7 angewandte Farbabstandsformel ΔE_{76} ist auf Grund der Eigenschaften des CIELAB Farbraums ungeeignet zur wahrnehmungsgemäßen Bewertung von Farbunterschieden. Gleich empfundene Farbdifferenzen an der Wahrnehmungsschwelle zwischen sehr neutralen und sehr bunten Farbenpaaren können bis um den Faktor 10 auseinander liegen, was sich vor allem in Richtung der Buntheit bemerkbar macht [26, 25]. Dies ist eine der Hauptursachen für eine mangelhafte Übereinstimmung zwischen der visuellen und messtechnischen Qualitätsbewertung.

Es existieren mittlerweile verschiedene korrigierte Gesamtfarbabstandsformeln auf Basis von CIELAB, die hinsichtlich der Empfindung eine verbesserte Gleichabständigkeit besitzen. Wie eine aktuelle Studie der FOGRA gezeigt hat [26], ist die CIEDE2000 Formel [11] unter den Betrachtungsbedingungen ISO 3664/P1 im Vergleich von acht Farbabstandsformeln, darunter auch ΔE_{76} , am leistungsfähigsten .

Die ebenfalls in ISO 12647-7 angewandte Farbabstandsformel für die Berechnung der Bunttondifferenz ΔH^* soll dazu beitragen, dass große Abweichungen im Buntton bei den Primärfarben sowie Farbstiche in neutralen Farben vermieden werden. Allerdings wird die Bunttondifferenz als Absolutwert, also ohne Angabe des Vorzeichens betrachtet, wodurch sie ihre Aussagekraft teilweise verliert, da die Richtung der Bunttonänderung nicht mehr zu erkennen ist. Bei neutralen Farben verliert sie ebenfalls an Bedeutung, sobald entweder

Kriterium	Toleranz
Arithmetischer Mittelwert aller Farbfelder	$\leq 3,0 \Delta E_{76}$
Maximalwert aller Farbfelder	$\leq 4,0 \Delta E_{76}$
Maximalwert Primärfarben C, M, Y, K	$\leq 5,0 \Delta E_{76}$
Bunttonabweichung Primärfarben C, M, Y, K	$\leq 2,5 \Delta H^* $
Arithmetischer Mittelwert der Bunttonabweichung dreifarbig aufgebauter „Neutralfarben“	$\leq 1,5 \Delta H^* $
Maximalwert Papiertonsimulation	$\leq 3,0 \Delta E_{76}$

Tabelle 2.1: Kriterien und Toleranzen der messtechnischen Auswertung nach ISO 12647-7

die Referenz oder die Probe achromatisch ist ($C^* = 0$), da die Bunttondifferenz in diesem Fall immer gleich Null ist.⁹

Bewertungskriterien und Toleranzen der Auswertungsmethode

Wie bereits diskutiert wurde, soll die messtechnische Auswertungsmethode das typische Verhalten eines Beobachters bei der visuellen Abmusterung widerspiegeln. Dazu gehört auch, dass die Kriterien entsprechend ausgesucht sein sollten.

Die ISO 12647-7 definiert die in Tabelle 2.1 aufgeführten sechs Kriterien und Toleranzen für die messtechnische Auswertung eines Digitalproofs, die auf vier funktionale Gruppen der Farbfelder des verwendeten Prüfkeils angewandt werden. Diese vier Gruppen sind die Primärfarben, bestimmte dreifarbig (CMY) aufgebaute „Neutralfarben“, die Papiertonsimulation und die Gesamtheit aller Farbfelder.

Die oben aufgeführten Toleranzen orientieren sich vor allem an den Möglichkeiten im Zusammenspiel der beteiligten Komponenten von Digitalproofsystemen.¹⁰ Sie wurden so gewählt, dass eine möglichst große Zahl verschiedenster Systeme die Norm erfüllen kann, wobei gleichzeitig eine ausreichend hohe Qualität sichergestellt werden soll. Es ist offensichtlich, dass ein derartiger Ansatz nur einen Kompromiss darstellen kann, was ein Indiz dafür ist, dass er ungeeignet ist, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen messtechnischer und visueller Qualitätsbewertung zu gewährleisten.

Für die visuelle Bewertung der farblichen Übereinstimmung werden weder in der ISO 12647-7 noch im MSD zu überprüfende Kriterien definiert. Auch existiert keine andere Norm, in der nähere Angaben zur Durchführung und Bewertung des Abmusterungsprozesses gemacht werden. Die Ergebnisse einer visuellen Abmusterung und einer messtechnischen Bewertung nach ISO 12647-7 lassen sich daher nicht unmittelbar miteinander vergleichen.

⁹Dieser Fall existiert z. B. bei den FOGRA39 Charakterisierungsdaten für den Vollton (100%) der Primärfarbe Schwarz.

¹⁰Zu diesen zählen Drucker, Proofpapier, Farbmittel, Farbmessgeräte, Software, etc.

Bewertungsergebnis

Ein Digitalproof darf im Ergebnis nur dann als farbverbindlicher Proof nach MSD ausgezeichnet werden, wenn die Auswertung aller oben genannten Kriterien zeigt, dass die Messwerte innerhalb der Toleranzen liegen, er also technisch „OK“ ist. Liegt ein einziges Kriterium außerhalb der Toleranz, so gilt die Auswertung nicht bestanden und er ist technisch „nicht OK“, es liegt also kein farbverbindlicher Proof vor. Da die technischen Toleranzen nicht in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung definiert wurden kann diese Art der Bewertung eher zufällig als vorhersagbar mit einer Form der visuellen Qualitätsbewertung übereinstimmen.

Gleiches gilt bei der visuellen Qualitätsbewertung nach Annex D der ISO 12647-7, bei der die Beobachter den Proof abschließend als „bestanden“ oder „nicht bestanden“ einstufen sollen. Da darin nicht definiert ist nach welchen Kriterien und Toleranzen die visuelle Abmusterung erfolgen soll, ist ihr Ergebnis in hohem Maß subjektiv.

Aufbau des Prüfkeils

Der Aufbau des Prüfkeils nimmt ebenfalls bedeutenden Einfluss auf die messtechnische Auswertung. Aus praktischen Gründen muss die Anzahl der Farbfelder möglichst gering gehalten werden, damit der Material- und Zeitaufwand bei der Proofkontrolle dem Nutzen gerecht wird. Gleichzeitig müssen möglichst viele aussagekräftige Farbfelder enthalten sein, damit die messtechnische Auswertung die Proofqualität hinreichend genau widerspiegelt.

Der in ISO 12647-7 definierte Aufbau des Prüfkeils wird diesen Anforderungen nur teilweise gerecht. Zwar soll ein Digitalproof ein bestimmtes Druckverfahren möglichst exakt simulieren, hinsichtlich des Ziels dieser Arbeit kann jedoch kein Vorteil darin erkannt werden, die farbmetrische Wiedergabe verschiedener Tonwertstufen der Primär- und Sekundärfarben der Referenzdruckbedingung sowie des Übereinanderdruck der Volltöne zu überprüfen, wie es jedoch der Fall ist. Solche Farbfelder sind eher in der Prozesskontrolle konventioneller, mehrfarbiger Druckprozesse relevant, z. B. zur Bestimmung der Tonwertzunahme und Farbannahme; sie machen jedoch einen großen Teil des Prüfkeils¹¹ aus, sodass es naheliegend ist, dass die Aussagekraft des Prüfkeils unter Verwendung anderer, relevanter Farben durchaus gesteigert werden kann.

Art der visuellen Abmusterung

Je nachdem wie die visuelle Abmusterung durchgeführt wird, kann das Qualitätsurteil ebenfalls stark von dem messtechnischen Urteil abweichen. Dies liegt vor allem darin begründet, dass visuelle Kriterien nicht ausreichend definiert sind und daher der Willkür der Beobachter unterliegen. Das bedeutet, dass sie in aller Regel nicht mit den Kriterien der messtechnischen Qualitätsprüfung nach ISO 12647-7 übereinstimmen. Uneinheitliche

¹¹Im Fall des Fogra Medienkeil CMYK V3 Proof entspricht dies ca. 44% aller Farbfelder.

Betrachtungsbedingungen, z. B. Veränderungen des Umgebungslichts, deutlich variierende Betrachtungsabstände während der Abmusterung oder ein nicht neutrales Umfeld tragen zudem dazu bei, dass die visuelle Empfindung beeinflusst wird.

Komplexität der Motive

Die zu vergleichenden Motive können ebenfalls dazu beitragen, dass die visuelle Wahrnehmung beeinflusst wird, da die Komplexität eines Motivs mit zunehmendem Detaillierungsgrad und zunehmender Farbvielfalt steigt. Vereinfacht gesagt können zwei einfarbige Flächen sehr leicht miteinander verglichen werden, während die Abbildung vieler kleiner, detailreicher Objekte mit sehr unterschiedlichen Farben eine große Herausforderung für das visuelle System darstellt Farben miteinander zu vergleichen [17].

2.7. Zusammenfassung

Nach einer Definition des Qualitätsbegriffs im Rahmen dieser Arbeit wurde die Hypothese aufgestellt, dass die messtechnische und die visuelle Qualitätsbewertung in der Lage sind unter verbesserten Bedingungen zu den gleichen Ergebnissen zu gelangen. Die Referenz, die für die visuelle und messtechnische Bewertung in unterschiedlichen Formen vorliegen kann, spielt bei der Qualitätsbewertung eine wesentliche Rolle. Da eine physische Referenz zum Zeitpunkt der Digitalprooferzeugung in der Regel nicht vorliegt, sollte die messtechnische Auswertung das Ergebnis einer visuellen Qualitätsbewertung möglichst exakt vorhersagen können. An dieser Forderung orientiert sich die vorliegende Arbeit.

Anhand eines Beispiels für die Qualitätsbewertung homogener Farbflächen wurde deutlich gemacht, welche Schwächen die visuelle und die messtechnische Bewertungsmethode entsprechend der gängigen Praxis besitzen. In Analogie dazu wurde ein Modell für die Zusammenhänge zwischen der Qualitätsbewertung von Bildmotiven und den im Motiv befindlichen Farbabständen vorgestellt, das in der Lage ist, eine differenziertere Qualitätsaussage zu treffen. Dieses Modell dient im weiteren Verlauf der Arbeit der Entwicklung einer neuartigen Bewertungsmethode, die sich auf die Ergebnisse eines Experiments zur visuellen Abmusterung stützt.

Es wurde weiterhin gezeigt, wie die messtechnische Qualitätsbewertung in der Praxis durchgeführt wird und welche Schwächen dabei existieren. Die Auswertungsmethode sollte das Verhalten des Beobachters bei einer visuellen Abmusterung nachstellen, um eine gute Übereinstimmung zu der visuellen Bewertung zu ermöglichen, was nach heutigen Methoden jedoch nicht der Fall ist. Der Prüfkeil liefert die dazu notwendige Datenbasis und nimmt somit wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis, weshalb er möglichst viele aussagekräftige, also relevante Farben beinhalten sollte.

Die vorgegebenen Rahmenbedingungen für die heute üblicherweise durchgeführte Qualitätsbewertung wurden ebenfalls dargelegt, bevor anschließend Ursachen für eine unzureichende Übereinstimmung zusammengefasst wurden. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem die heute verwendete Farbabstandsformel ΔE_{76} eine der Hauptursachen ist. Zusätzlich wurden die Bewertungskriterien und Toleranzen der Auswertungsmethode, die Formulierung des Bewertungsergebnisses, der Aufbau des Prüfkeils, die Art der visuellen Abmusterung und die Komplexität der abzumusternden Motive als weitere Ursachen aufgeführt.

3. Experimentelle Arbeiten

Wie in dem vorigen Kapitel dargelegt wurde, sollen diejenigen Farbabstände identifiziert werden, bei denen im Rahmen des Farbvergleichs von Bildmotiven die wahrscheinlichste Aussage zu den drei Qualitätsstufen „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ getroffen werden kann. Zusätzlich dazu sollen abmusterungsrelevante Farben identifiziert werden, um die Aussagekraft eines Prüfkeils zu verbessern. Ein Experiment zur Wahrnehmung von Farbunterschieden in Bildmotiven bei der visuellen Abmusterung schuf dazu die Grundlage.

Im Zentrum des Experiments stand der visuelle Farbvergleich von gedruckten Motiven unter den ISO 3664/P1 Betrachtungsbedingungen. In ihrer digitalen Form lagen die Motive als TIFF-Bilddaten im CIELAB Farbraum¹ vor. Ein Teil dieser Referenzbilddatenbestände wurde mit einer Modifikationsfunktion (f_m) farblich verändert, um gezielt Farbunterschiede zu erzeugen. Die digitalen Bilddaten wurden mit Hilfe einer Digitalproof-Software auf einem kalibrierten Tintenstrahldrucker absolut farbmétrisch gedruckt.

Ein gedrucktes Probenpaar enthielt jedes Motiv zweifach, einmal als Referenz (R) und ein weiteres Mal als Probe (P), die beide von einem Beobachter farblich miteinander verglichen werden sollten. Die Probe war entweder eine exakte Kopie der Referenzbilddaten oder die durch f_m farblich modifizierte Variante. Da beide Motive dieselben Pixeldimensionen besaßen, konnten Farbunterschiede mit Hilfe einer Farbabstandsformel (ΔE) für jedes einzelne Pixel bestimmt werden. Das Ergebnis war ein indexiertes Farbdifferenzbild (FDB), in dem der Index für jedes Pixel proportional zu der Stärke des Farbabstands ist. Für die Fälle, in denen Probe und Referenz denselben Datensatz repräsentierten, existierte kein Farbunterschied und folglich auch kein Farbdifferenzbild. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die Erzeugung des Probenpaares und des Farbdifferenzbildes aus einem Referenzdatensatz.

Um die Zusammenhänge zwischen den digitalen Bilddaten und der visuellen Abmusterung herzustellen, wurden die Blickbewegungen des Beobachters (B) während des Vergleichs durch einen Eye-Tracker² (ET) aufgezeichnet. Die für diese Arbeit relevanten Informatio-

¹Es handelte sich dabei um den in der Druckindustrie üblichen CIELAB Farbraum mit der CIE Bezugslichtart D50 für den CIE 1931 Standardbeobachter (2°-Beobachter).

²Ein Eye-Tracker erfasst die Augenbewegungen und speichert diese, nach vorheriger Kalibrierung auf eine Bezugsfläche, sowohl zeitdiskret als auch ortsdiskret mit einer hohen Auflösung.

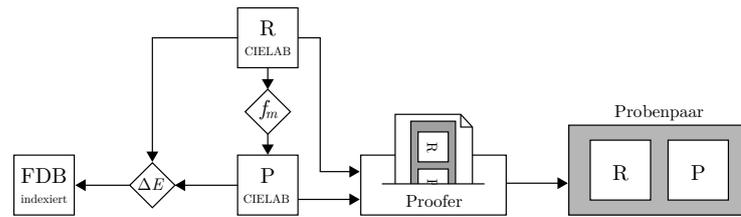


Abbildung 3.1: Erzeugung des Probenpaares und des Farbdifferenzbildes (FDB) aus den CIELAB Bilddaten eines Referenzbildes (R)

nen sind in den Fixationen enthalten, die unter Angabe spezieller Parameter aus den aufgezeichneten Rohdaten berechnet wurden. Über die Fixationskoordinaten (FK) und die Fixationsdauer (FD) konnte berechnet werden, welche Bildstellen wie lange miteinander verglichen wurden. Des Weiteren konnten die zu einer Bildstelle entsprechenden Pixel aus einem Farbdifferenzbild extrahiert werden und daraus der Farbabstand innerhalb des verglichenen Bildbereichs³ berechnet werden. Aus allen Bildbereichs-Farbabständen konnte schließlich bestimmt werden, wie groß der durchschnittliche und der maximal beobachtete Farbabstand ($\overline{\Delta E}$, $\widehat{\Delta E}$) während des Vergleichs eines Probenpaares gewesen ist.

Anschließend mussten die beobachteten Farbabstände mit der von dem Beobachter empfundenen Qualität (Q) verknüpft werden. Die Qualität der Probenpaare wurde von den Probanden auf einer dreistufigen Skala mit „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ oder „*inakzeptabel*“ ausgedrückt. Für eine hinreichend große Menge an Bildmotiven und Beobachtern kann somit jeder Qualitätsstufe der durchschnittlich und maximal wahrgenommene Farbabstand zugeordnet werden. Diese Daten fließen in das Modell zur Bewertung von Farbabständen aus Kapitel 2.3 ein, womit die Grundlage für eine messtechnische Auswertungsmethode geschaffen wurde, die mit der Qualitätsbewertung einer visuellen Abmusterung besser übereinstimmen sollte. Abbildung 3.2 stellt diesen Vorgang schematisch dar.

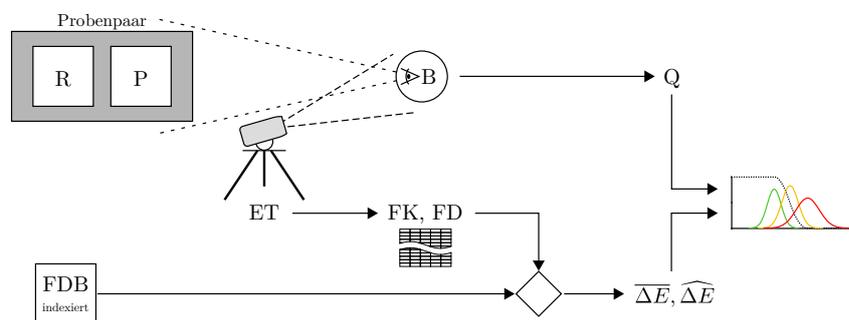


Abbildung 3.2: Aufzeichnung der Blickbewegungen des Beobachters (B) durch den Eye-Tracker (ET), Berechnung des durchschnittlichen und maximalen Farbunterschieds ($\overline{\Delta E}$, $\widehat{\Delta E}$) sowie deren Zusammenhänge mit der empfundenen Qualität (Q)

³Der Farbunterschied eines verglichenen Bildbereichs entspricht dem arithmetischen Mittelwert der Farbunterschiede aller Pixel innerhalb des Bildbereichs.

Darüber hinaus gaben die CIELAB Farbwerte des zu einer Fixation zugehörigen Bildbereichs aus dem Referenzmotiv Aufschluss darüber, welche Farben der Beobachter während der Abmusterung miteinander verglichen hat. Anhand dieser Informationen konnte festgestellt werden, ob bestimmte Farbbereiche häufiger verglichen wurden als andere. Können derartige Farbbereiche identifiziert werden, so muss diesen eine höhere Relevanz (Rz) zugesprochen werden als den Farbbereichen, die weniger häufig abgemustert wurden und die dementsprechend eine niedrigere Relevanz besitzen. Abbildung 3.3 zeigt schematisch die Bestimmung der relevanten Farbwerte.

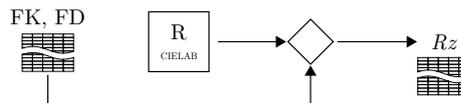


Abbildung 3.3: Bestimmung der Relevanz (Rz) verschiedener Farben aus den Fixationsinformationen (FK, FD) und den Referenzbilddaten (R)

3.1. Eye-Tracker-Experiment

3.1.1. Aufbau

Der experimentelle Aufbau bestand im Wesentlichen aus zwei Komponenten, einer Abmusterungsstation sowie dem Eye-Tracker „X-RED“ der Firma Sensomotoric Instruments inklusive Steuerungsmodul und -computer.

Der Eye-Tracker zeichnete die Blickbewegungen mit Hilfe von zwei Infrarotkameras zeitdiskret mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Ortsauflösung unter $0,1^\circ$ auf; die Genauigkeit der Aufzeichnung liegt typischerweise unter $0,5^\circ$ Beobachterwinkel [19]. Als Abmusterungsstation wurde eine für die grafische Industrie handelsübliche, zu den Betrachtungsbedingungen ISO 3664/P1 konforme Normlichtkabine vom Typ „JUST proofStation 20“ verwendet. Während der Abmusterung wurde ein Fremdlichteinfluss ausgeschlossen⁴ und zusätzlich ein neutrales Umfeld im Sichtfeld des Beobachters geschaffen.

Die Präsentationsfläche hatte eine Breite von 70 cm und eine Höhe von 50 cm und lag horizontal zentriert innerhalb der vertikalen Abmusterungsfläche der Normlichtkabine, sodass Reflexionen durch die Lichtquelle weitestgehend ausgeschlossen waren. Der Bereich innerhalb der Präsentationsfläche in dem die Blickbewegungen durch den Eye-Tracker aufgezeichnet wurden hatte eine Größe von 62 cm × 27 cm deren Mittelpunkt vom Boden aus in einer Höhe von 155 cm lag. Die Präsentationsfläche bestand aus zwei Lagen Proofpapier, zwischen denen die gedruckten Probenpaare als ganzer Bogen kantenparallel

⁴Dazu wurde die Türe geschlossen, die Deckenbeleuchtung ausgeschaltet und die Fenster vollständig mit Metallfolie verkleidet.

aufgenommen wurden, wodurch Ungenauigkeiten in der Positionierung minimiert wurden. Die hintere Lage diente sowohl der Befestigung an der Wand der Abmusterungsstation als auch als weiße Unterlage für die abzumusternden Probenpaare. Die vordere Lage enthielt zwei Aussparungen in der Größe von $26\text{ cm} \times 26\text{ cm}$ wodurch nur die beiden Motive des Probenpaares zu sehen waren. Beide Lagen wurden durch eine dünne Lage Wachskarton voneinander getrennt, sodass ein Bogen Proofpapier passgenau hineingleiten konnte. Abbildung 3.4 zeigt die Präsentationsfläche mit allen relevanten Teilbereichen und Bemaßungen.

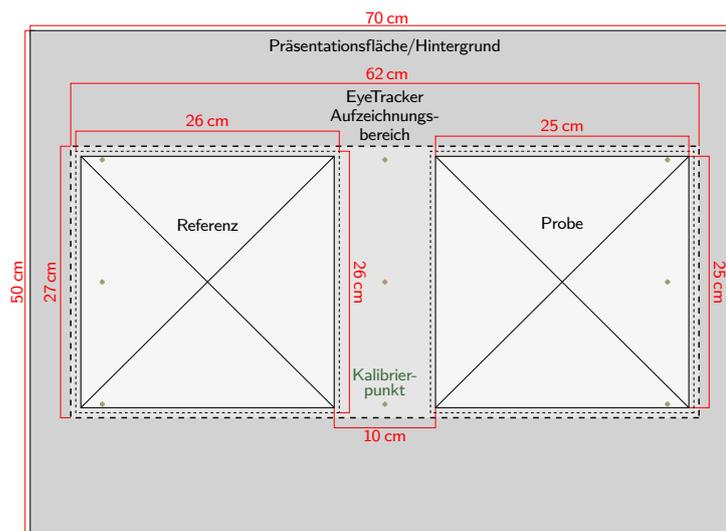


Abbildung 3.4: Präsentationsfläche mit Aufzeichnungsbereich

Die gedruckte Größe der Testmotive betrug $25\text{ cm} \times 25\text{ cm}$, bei Motiven mit ungleichem Seitenverhältnis wurden diese proportional skaliert, sodass die jeweils längere Seite 25 cm betrug. Sowohl das Referenzmotiv als auch die Probe wurden auf einer Fläche von $62\text{ cm} \times 27\text{ cm}$ in einem Druckgang und auf einem Druckbogen ausgedruckt,⁵ wodurch eventuelle Farbunterschiede zwischen diesen beiden auf ein Minimum reduziert werden konnten. Abbildung 3.5 zeigt den Ausdruck des Probenpaares für das Testmotiv Nr. 41.



Abbildung 3.5: Probenpaar des Motivs Nr. 41

⁵Die Größe dieser Fläche entsprach exakt dem Aufzeichnungsbereich des Eye-Trackers, wodurch gewährleistet war, dass die aufgezeichneten Daten den Motiven zugeordnet werden konnten.

Alle während der Abmusterung sichtbaren Flächen der Präsentationsfläche waren mit einem homogenen neutralgrauen Ton ($L^* = 50$, $C^* = 0$) bedruckt. Die Rückseite, die während der Abmusterung von dem Probenpaar verdeckt wurde, war bis auf neun kreisrunde Flächen unbedruckt, um Konformität zu der Farbmessung nach ISO 13655 zu gewährleisten. Diese neun Flächen lagen innerhalb des Aufzeichnungsbereichs und dienten zu Beginn des Experiments der Kalibrierung des Eye-Trackers. Nach dem Einführen eines Probenpaars waren die Kalibrierpunkte nicht mehr sichtbar.

Der Eye-Tracker wurde auf einer neigungsfähigen Halterung befestigt, die in horizontaler Lage auf einem Stativ angebracht war. Das Stativ wurde so auf einem Tisch positioniert, dass die horizontale Entfernung des Nodalpunkts der Halterung bis zur Präsentationsfläche 20 cm betrug. Zur Vermeidung von Erschütterungen während der Aufzeichnung hatte der Tisch keine feste Verbindung mit der Normlichtkabine und wurde auch nicht von den Probanden berührt.

Die Position des Probanden und die Ausrichtung des Eye-Trackers wurde mit Hilfe der Steuerungssoftware zu Beginn des Experiments optimiert. Die Entfernung der Probanden zum Eye-Tracker betrug ca. 65 cm, was im optimalen Arbeitsbereich des Eye-Trackers liegt. Probanden mit einer geringen Körpergröße wurden mit Hilfe eines Podestes um 12 cm in ihrer Position erhöht, um einen möglichst ähnlichen Neigungswinkel bei der Betrachtung der Vorlagen zu erzielen wie Probanden von vergleichsweise größerer Statur. Der Eye-Tracker wurde um seinen Nodalpunkt geneigt, sodass eine möglichst gute Aufzeichnung des Augenpaars möglich war. Abbildung 3.6 zeigt den vollständigen Versuchsaufbau bei eingeschalteter Deckenbeleuchtung.



Abbildung 3.6: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus

3.1.2. Referenzdruckbedingung, Testmotive

Als Referenzdruckbedingung wurde der standardisierte Offsetdruck nach ISO 12647-2 auf Basis der FOGRA39 Charakterisierungsdaten [1] gewählt, da dieser gegenwärtig einen Bezugspunkt für hohe Qualitätsansprüche in der Druckindustrie darstellt. Das ICC-Profil „ISOcoated_v2_eci.icc“ der ECI [2] ist eine FOGRA39-Interpretation und beschreibt in dieser Arbeit die Farbwiedergabe der Referenzdruckbedingung.

Da im Zentrum der Arbeit die Qualitätsbewertung von Digitalproofs mit bildhaften Motiven steht, wurde das Experiment auf Basis von natürlichen, aber anspruchsvoll zu reproduzierenden Bildmotiven aufgebaut. Die vorhandenen Bildmotive lagen entweder als RGB- oder CMYK-Daten vor; Bilddateien mit eingebettetem ICC-Profil werden hier als „kalibriert“ bezeichnet, da den geräteabhängigen Farbwerten mit Hilfe des Profils geräteunabhängige CIELAB Koordinaten eindeutig zugeordnet werden können. Einige RGB-Bilder und alle CMYK-Bilder lagen kalibriert vor. Unkalibrierten RGB-Bildern sowie den, mit dem originären sRGB-ICC-Profil [38] kalibrierten RGB-Bildern, wurde das ICC-Profil „sRGB_v4_ICC_preference_beta.icc“ des ICC [3] zugewiesen, um diese (erneut) zu kalibrieren.⁶

Sofern notwendig⁷ wurden die kalibrierten Bilder zunächst von ihrem eingebetteten Profil unter Anwendung des wahrnehmungsorientierten (perzeptiven) Rendering Intents in das Profil der Referenzdruckbedingung umgewandelt. Anschließend wurden diese kalibrierten CMYK-Bilder von der Referenzdruckbedingung absolut farbmessig in den CIELAB Farbraum umgewandelt und bildeten somit die Grundlage für das Experiment.

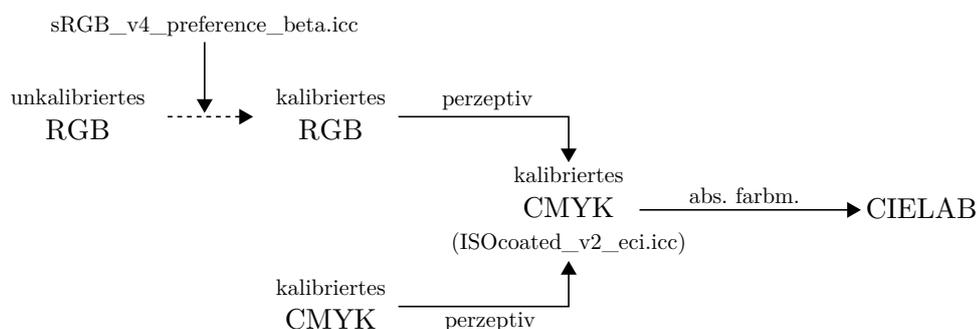


Abbildung 3.7: Erzeugung der CIELAB Referenzdaten

⁶Das ICC-Profil „sRGB_v4_ICC_preference_beta.icc“ hat den Vorteil, dass unter Anwendung des wahrnehmungsorientierten Rendering Intents bei der Transformation in den Profile Connection Space eine Expansion der Farben auf den in ISO 12640-3 definierten „Perceptual Reference Media Gamut“ [20] [18] durchgeführt wird, bevor anschließend eine Kompression in den Gamut des Zielprofils vorgenommen wird. Dadurch bleiben im Vergleich zu einer Transformation mit dem originären sRGB Profil wesentlich mehr Farbwerte erhalten, da in diesem auf Grund seiner Matrix-Struktur nur eine farbmessige Transformation möglich ist.

⁷Kalibrierte CMYK-Bilder, deren eingebettetes Profil identisch zu dem Profil der Referenzdruckbedingung ist, wurden nicht erneut in das Profil der Referenzdruckbedingung umgewandelt.

Auswahl der Testmotive

Neben den branchenüblichen Testmotiven aus der Altona Testsuite, den Roman16 bvdM Referenzbildern und der „Visual Print Reference“ [42] sowie Testbildern, die von der Firma GMG zur Verfügung gestellt wurden, kamen auch selbsterstellte Digitalfotos und Bilder aus einer Bilddatenbank in die engere Auswahl. Zunächst wurden 155 Motive ausgewählt, die von ihrem Inhalt als potenzielle Testmotive in Frage kamen, da sie unterschiedliche Orte, Landschaften und andere Szenen natürlichen Ursprungs mit oder ohne Personen darstellten. Mit Blick auf den je Proband zur Verfügung stehenden zeitlichen Rahmen während des Experiments musste sich jedoch auf eine geringere Zahl an Testmotiven beschränkt werden.⁸ Um eine Aussage darüber treffen zu können auf welche Motive verzichtet werden konnte, war eine Einordnung der Motive hinsichtlich eines gemeinsamen Merkmals notwendig. Da die Bilder inhaltlich und farblich sehr unterschiedlich waren, wurde eine Bewertung des Kontrastes c_{rms} ⁹ [29][30] je Bild vorgenommen. Die 155 Motive wurden anschließend in drei Klassen mit niedrigem, mittlerem und hohem Kontrast unterteilt. Auf diese Weise konnten Motive derselben Kontrastklasse und ähnlichem Inhalt identifiziert und von der weiteren Verwendung ausgeschlossen werden. Die Zahl wurde so auf 81 Testmotive reduziert, was innerhalb des zeitlichen Rahmens je Proband lag.

Zusätzlich zu diesen Motiven wurden sieben weitere Testmotive ausgewählt, die eine Komposition aus Bild, Text und Grafik darstellen und sich somit von natürlichen Bildmotiven unterscheiden. Anhand dieser Motive sollte untersucht werden, ob zwischen natürlichen und künstlichen Motiven ein Unterschied in der Art und Weise der Abmusterung existiert; in dieser Hinsicht konnten jedoch keine Erkenntnisse gewonnen werden. Die auf diese Weise zusammengetragenen 88 Testmotive bildeten die Grundlage für die weitere Vorgehensweise. In Abhängigkeit der Entfernung des Beobachters, wurden die Testmotive vor dem Druck in ihrer Pixelanzahl an das Auflösungsvermögen des Auges angepasst.¹⁰

Für das Ziel der Arbeit war es notwendig, dass durch das Experiment einerseits genügend Daten der wahrgenommenen Farbunterschiede erhoben werden können, um diese den visuellen Qualitätsbewertungen gegenüberzustellen und dass andererseits sichergestellt war, dass die Bewertungen der Beobachter nicht zufälliger Natur oder sogar geraten oder erfunden waren. Daraus ergab sich, dass neben genügend Probenpaaren mit

⁸Da das Experiment im Stehen durchgeführt wurde und die Probanden größtenteils berufstätig waren, also ihre Freizeit für die Teilnahme opferten, wurde angenommen, dass die zumutbare Dauer je Proband bei ca. 4 Stunden lag (inklusive der Erläuterung der Aufgabenstellung, notwendigen Pausen, etc.).

⁹Der Kontrast c_{rms} ist die mittlere quadratische Abweichung der Helligkeitswerte (L^*) aller Bildpixel.

¹⁰Unter Berücksichtigung des Auflösungsvermögens des Auges [28] und des Nyquist'schen Theorems wurden die CIELAB Bilddateien der Testmotive mit Hilfe der Software Adobe Photoshop und der Interpolationsmethode „bikubisch“ auf eine Auflösung von $120 \frac{px}{cm}$ skaliert; dieser Wert entspricht bei einer maximalen Bildgröße von 25 cm · 25 cm und bei einer Entfernung des Blickpunkts von 85 cm einer Pixelbreite und -höhe von je 1929 px.

Farbunterschieden ebenfalls genügend Probenpaare ohne Farbunterschiede präsentiert werden sollten. Bei einem Verhältnis von ca. 3:2 zwischen modifizierten und nicht modifizierten Probenpaaren sollten für beide Fälle ausreichend Daten erhoben werden können. Das bedeutet, dass ein Beobachter während des Experiments im Durchschnitt in drei von fünf Probenpaaren einen Farbunterschied wahrnehmen sollte.

Farbänderungen

Der Farbraum in dem die Farbänderungen vorgenommen wurden, ist ein euklidisierter Farbraum der CIEDE2000 Farbabstandsformel [39] der mit „LAB2000“ bezeichnet wird. Durch die euklidische Form existieren in Analogie zum CIELAB Farbraum die Helligkeitsachse L_{00}^* , die gleichzeitig die Unbuntachse ist, sowie die beiden komplementären Farbachsen a_{00}^* und b_{00}^* . Des Weiteren existieren C_{00}^* und h_{00} zur Beschreibung von Buntheit und Buntton. Abbildung 3.8 zeigt CIEDE2000-Einheits-Toleranzellipsen mit einem einheitlichen Farbabstand von $1 \Delta E_{00}$, transformiert in den CIELAB Farbraum (a) und in den LAB2000 Farbraum (b). Wie zu erkennen ist, ermöglicht LAB2000 eine wesentlich gleichmäßigere Abbildung der Toleranzellipsen als CIELAB. Dieses Merkmal von LAB2000 ermöglicht es, dass darin vorgenommene Änderungen der Farbwerte deutlich besser mit der visuellen Wahrnehmung übereinstimmen, als dies in CIELAB der Fall ist.

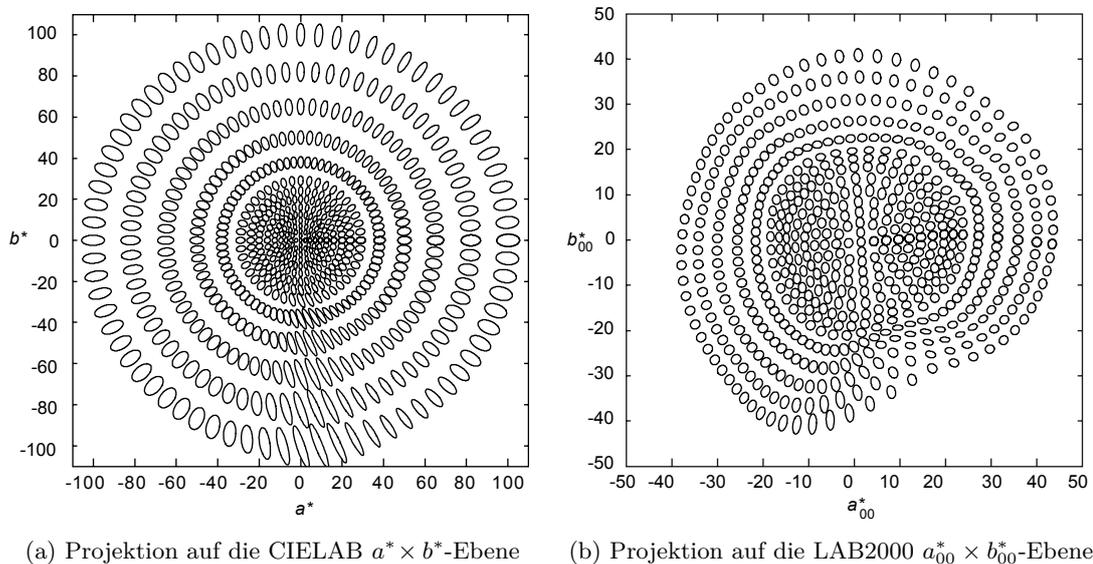


Abbildung 3.8: Einheits-Toleranz-Ellipsen der CIEDE2000 Farbabstandsformel [39]

Die farblichen Änderungen der Motive betrafen entweder die Buntheit C_{00}^* oder den Bunttonwinkel h_{00} ; die Helligkeit L_{00}^* wurde nicht verändert. Von den Farbänderungen wurden Neutraltöne bewusst ausgenommen, da das menschliche Auge in diesen Farbbereichen besonders empfindlich auf Farbunterschiede reagiert. Dadurch hätten die modifizierten Probenpaare nahezu unmittelbar nach Beginn des Vergleichs als solche

erkannt werden können, was einen sofortigen Abbruch des Vergleichs zur Folge gehabt hätte und somit zu wenige Daten für die Auswertung des Experiments aufgezeichnet worden wären. Die Formeln 3.1 und 3.2 zeigen die beiden Modifikationsfunktionen f_m und die Wertemenge für die Parameter ΔC_{00}^* und Δh_{00} , mit denen die Bilder pixelweise farblich verändert wurden.

$$C_{00\text{Aus}}^* = C_{00\text{Ein}}^* \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta C_{00}^*}{10} \right) \right] \quad \text{mit } \Delta C_{00}^* \in \{-0,75; -0,5; +0,5; +0,75; +1,0\} \quad (3.1)$$

$$h_{00\text{Aus}} = h_{00\text{Ein}} + \Delta h_{00} \quad \text{mit } \Delta h_{00} \in \{-5; -3; +3; +5\} \quad (3.2)$$

Anhang A zeigt eine verkleinerte Darstellung aller Referenzmotive, ihrer CIELAB Farbverteilung sowie für modifizierte Proben ein ΔE_{00} -Farbdifferenzbild, die verwendete Modifikationsfunktion f_m und eine Statistik der künstlich erzeugten ΔE_{00} Farbabstände.

Erzeugung der Probenpaare

Die CIELAB-Bilddaten wurden von der Firma GMG auf einem kalibriertem Proofsystem gedruckt.¹¹ Der Vergleich des Prooferfarbumfangs mit dem Farbumfang der Referenzdruckbedingung hat gezeigt, dass nahezu alle Farben absolut farbmetrisch reproduziert werden konnten, lediglich in sehr dunkel-gelblichen Farbbereichen ($23 L^*$ bis $9 L^*$) konnten wenige Farben der Referenzdruckbedingung nicht exakt reproduziert werden (s. Abb. 3.9).

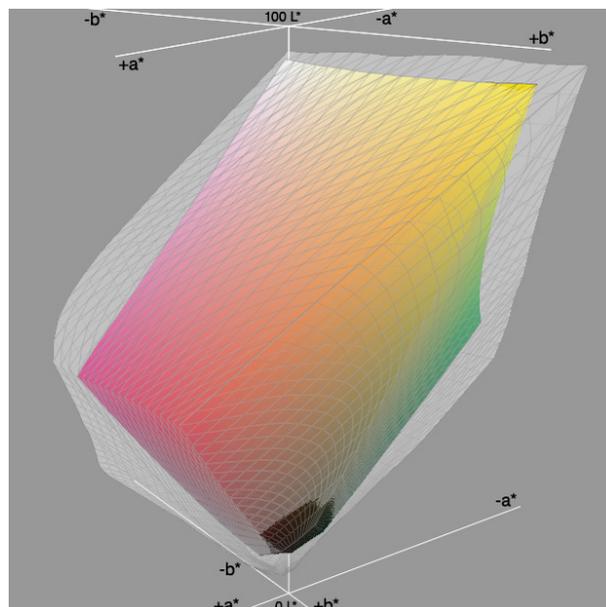


Abbildung 3.9: Vergleich des Prooferfarbumfangs (graues Gitternetz) und des Farbumfangs der Referenzdruckbedingung (farbiges Gitternetz)

¹¹Das Proofsystem bestand aus einem Epson Stylus Pro 9880 Inkjet-Drucker mit Original Epson Tinten und dem Proofpapier der Sorte „GMG Semimatt 250“; die Kalibrierung des Proofdruckers wurde mit einem Spektralfotometer vom Typ il-iSIS der Firma X-Rite durchgeführt.

Alle für die visuelle Abmusterung gedruckten Bogen wurden mit einem speziellen CIELAB Prüfkeil versehen, um damit das Proofsysteem grob auf seine Reproduktionsgenauigkeit zu untersuchen. Dieser Prüfkeil bestand aus insgesamt 24 Farbfeldern. Elf Farbfelder mit absolut neutralen Farbtönen gleichmäßig abgestufter Helligkeit je $10 L^*$, die vor allem dazu dienten, in jedem Ausdruck mögliche Farbschwankungen des Druckers zu identifizieren, da die Neutralfarben darauf besonders empfindlich reagieren. Weitere 14 Farbfelder, deren CIELAB Farbwerte den FOGRA39 Charakterisierungsdaten entnommen waren. Dabei handelte es sich um die Primärfarben der Referenzdruckbedingung: Cyan, Magenta, Gelb und Schwarz jeweils als Vollton im einfarbigen Druck, sowie im zwei-, drei- und vierfarbigen Zusammendruck; diese Farben dienten dazu, grob abzuschätzen, ob der jeweilige Ausdruck die Referenzdruckbedingung prinzipiell widerspiegelte. Abbildung 3.10 zeigt den Aufbau des speziellen CIELAB Prüfkeils.



Abbildung 3.10: Prüfkeil mit 24 CIELAB Farbfeldern zur Kontrolle der Reproduktionsgenauigkeit

Alle 88 CIELAB Prüfkeile wurden mit einem Spektralfotometer der Firma X-Rite vom Typ i1 Pro und dem automatischen Messtisch i1-iO statistisch unter Anwendung der CIEDE2000 Farbabstandsformel ausgewertet. Im Durchschnitt lag die durchschnittliche Farbabweichung bei $0,35 \Delta E_{00}$ mit einer Standardabweichung von $0,07 \Delta E_{00}$ zum Mittelwert aller Messungen. Die maximale durchschnittliche Farbabweichung betrug $0,53 \Delta E_{00}$. Da die Farbunterschiede deutlich unterhalb der visuellen Wahrnehmungsschwelle von $1,0 \Delta E_{00}$ lagen, wurden die Ausdrücke für das geplante Experiment als geeignet eingestuft.

Um sicher zu stellen, dass die durch die Modifikationsfunktion f_m künstlich erzeugten Farbunterschiede in den Probenpaaren auch tatsächlich in der erwarteten Stärke reproduziert werden konnten, wurden die erwarteten Farbunterschiede digitaler CIELAB-Testdateien mit den tatsächlichen Farbunterschieden in den absolut farbmetrischen Ausdrucken der Testdateien verglichen. Die Überprüfung kam zu dem Ergebnis, dass die künstlich erzeugten Farbunterschiede mit hoher Übereinstimmung reproduziert werden konnten (s. Anhang B).

3.1.3. Probanden

Für das Experiment stellten sich insgesamt zehn männliche und 13 weibliche Beobachter als Probanden zur Verfügung, die zum überwiegenden Teil berufsbedingt über Erfahrung mit der visuellen Abmusterung verfügten. Lediglich vier Probanden hatten zuvor noch nie an einer Abmusterung teilgenommen. Das Durchschnittsalter der Probandengruppe betrug 35 Jahre, die Altersspannweite 27 Jahre. Die Farbnormalsichtigkeit der Probanden wurde mit Hilfe des FM 100 Hue Tests [14, S. 22] getestet; dabei hat sich gezeigt, dass bei allen Probanden Anomalien in der Farbwahrnehmung ausgeschlossen werden konnten.

3.1.4. Aufgabenstellung

Die Aufgabe der Probanden bestand darin, die Probenpaare, bestehend aus dem Referenzbild in der linken Hälfte der Präsentationsfläche und dem Testbild („Probe“) in der rechten Hälfte, auf farbliche Übereinstimmung zu vergleichen und die Qualität des Übereinstimmungsgrades zu bewerten. Die Probanden bekamen vorab die Information, dass beide Bilder entweder vollständig oder in Teilbereichen farblich absolut übereinstimmen oder auch voneinander abweichen können. Den Probanden war nicht bekannt, wie viele und welche Probenpaare auf welche Art farblich modifiziert wurden, sodass bei der Abmusterung mit einkalkuliert werden musste, dass theoretisch alle Motive entweder gar nicht oder aber vollständig modifiziert waren.

Insgesamt galt es 88 Probenpaare in vier Sätzen á 22 Motive miteinander zu vergleichen. Vor Beginn der Abmusterung eines Satzes mussten die Probanden ihre Farbwahrnehmung zunächst mehrere Minuten auf die Abmusterungsbedingungen adaptieren, indem sie ihre entsprechende Position an der Abmusterungstation einnahmen. Nach jedem Satz wurde eine Pause von ca. 10 Minuten eingelegt. Die Präsentationsreihenfolge der modifizierten und nicht modifizierten Probenpaare wurde im Vorfeld zufällig ausgewählt und war für alle Probanden identisch. Damit die Probanden zu Beginn eines Vergleichs nicht durch den erstmals dargestellten Inhalt der Motive überrascht oder abgelenkt wurden, bekamen sie unmittelbar vor jedem Vergleich einen verkleinerten Farbausdruck des abzumusternden Motivs gezeigt. Auf diese Weise war dem Probanden das Motiv bereits soweit bekannt, dass er darüber entscheiden konnte, welche Motivbereiche bei der Abmusterung stärker, weniger stark oder auch gar nicht miteinander verglichen werden sollten.

Die Probanden bekamen die Anweisung, bei der Abmusterung auf dieselbe Art und Weise vorzugehen, als ob sie eine Druckfreigabe der Probe zu verantworten hätten. Für den Vergleich eines Probenpaares standen ihnen dazu bis zu 30 Sekunden Zeit zur Verfügung. Nach Ablauf der Zeit erhielt der Proband ein Signal den Vergleich sofort zu beenden und sein Qualitätsurteil für das abgemusterte Probenpaar anhand einer dreistufigen Skala zu äußern. Es war nicht zulässig keine oder eine andere als die auf der Skala enthaltenen Bewertungen abzugeben. Sollte das Urteil bereits vor Ablauf der 30 Sekunden feststehen, so wurde der Vergleich auf ein Signal des Probanden hin abgebrochen und das Ergebnis unmittelbar im Anschluss geäußert. Nach jedem Vergleich wurde das Probenpaar gegen das nächste Paar ausgetauscht, in dieser Zeit wurde dem Probanden der oben genannte verkleinerte Farbausdruck des nächsten Probenpaares gezeigt.

Folgende dreistufige Bewertungsskala stand den Probanden zur Verfügung:

- **Stufe 0, „*absolut identisch*“:** kein sichtbarer Farbunterschied; die Druckfreigabe ist gegeben.
- **Stufe 1, „*akzeptabel*“:** sichtbare, jedoch noch akzeptable Farbunterschiede; die Druckfreigabe ist gegeben.
- **Stufe 2, „*inakzeptabel*“:** deutlich sichtbare, inakzeptable Farbunterschiede; die Druckfreigabe kann nicht erteilt werden.

3.1.5. Rohdatenaufbereitung und Datenanalyse

Berechnung von Fixationen

Die von dem Eye-Tracker aufgezeichneten Rohdaten der Blickbewegungen waren für eine direkte Verwendung nicht geeignet, da sie wegen der Abtastrate von 50 Hz zu fein aufgelöst waren. Aus diesem Grund mussten mit Hilfe der Analysesoftware „BeGaze 2“¹² unter Angabe spezieller Parameter aus den Rohdaten zunächst Fixationen berechnet werden, die als Datenbasis für die weitere Analyse dienten. Der räumliche Parameter „Max. Dispersion“ beschreibt die maximale Streuung der Koordinaten, der zeitliche Parameter „Min. Duration“ beschreibt die Dauer, aus der aus aufeinander folgenden Rohdateninformationen eine Fixation berechnet werden kann.

„Max. Dispersion“ wurde mit einem Durchmesser von 2° Beobachterwinkel definiert. Für „Min. Duration“ wurde eine Dauer von 100 ms vorgegeben, was den Informationen aus fünf Abtasteinheiten entsprach.¹³ Eine unter diesen Bedingungen berechnete Fixation konnte anschließend durch die Lage ihres Mittelpunkts innerhalb des Eye-Tracker Aufzeichnungsbereichs, ihre Größe sowie ihre Dauer, für die der Blick auf dieser Bildstelle verweilte, beschrieben werden. Da davon ausgegangen wurde, dass der zu vergleichende Bereich den Bedingungen des CIE 1931 Standardbeobachters entspricht, wurde die Größe einer Fixation als Kreisfläche mit einem Durchmesser von $d = 2^\circ$ Beobachterwinkel definiert.

Die weitere Analyse baute vor allem auf den verglichenen Bildstellen und den entsprechenden digitalen Farbinformationen der Referenz und der Probe auf. Die Software BeGaze 2 stellte für diese Aufgabe jedoch keine Funktionen zur Verfügung, da sie für diesen speziellen Versuchsaufbau einerseits nicht in der Lage war die relativen Positionen von Fixationen miteinander zu vergleichen, und andererseits die zu einer Fixation zugehörigen Bildpixel nicht aus den digitalen Bilddaten extrahieren konnte. Aus diesem Grund wurde

¹²BeGaze 2 ist eine Software zur Analyse von Experimenten mit dem hier verwendeten Eye-Tracker.

¹³Der voreingestellte Standardwert für „Min. Duration“ betrug 80 ms, also vier Abtasteinheiten.

die Analyse der aus BeGaze 2 berechneten Fixationen anhand von selbst entwickelten Methoden durchgeführt.¹⁴

Voraussetzungen für verglichene Bildstellen

Mit Hilfe der Fixationen wurde die Abmusterung auf verglichene Bildstellen untersucht. Eine Bildstelle wird hier in Analogie zu den Fixationen über ihren Mittelpunkt und ihre Größe in Grad Beobachterwinkel definiert und beschreibt ebenfalls eine Kreisfläche.

Eine Bildstelle kann nur dann verglichen worden sein, wenn zwei aufeinander folgende Fixationen (F) existieren, von denen die eine innerhalb des Referenzmotivs und die andere innerhalb der Probe liegt und zusätzlich ihre beiden Mittelpunkte innerhalb eines relativen Koordinatensystems in unmittelbarer Nähe zueinander liegen, sodass ihre Kreisflächen eine gemeinsame Schnittmenge besitzen.

Abbildung 3.11 zeigt ein Beispiel für fünf aufeinander folgende Fixationen F_1 bis F_5 , zum einen innerhalb des absoluten Koordinatensystems, des Eye-Trackers zur Aufzeichnung der Blickbewegungen, und zum anderen innerhalb des relativen Koordinatensystems, das für die Probe und die Referenz identisch ist. Die Fixationen F_1 und F_2 liegen relativ gesehen sehr nahe beieinander, sodass sich ihre Radien zu einem Großteil überlappen – die Bildstelle unterhalb des Überlappungsbereichs wurde demnach von dem Beobachter verglichen. Die Fixationen F_2 und F_3 sowie F_3 und F_4 liegen so weit auseinander, dass sich ihre Radien nicht überlappen, weshalb sie für einen Vergleich nicht in Frage kommen. Ein Vergleich zwischen den Fixationen F_1 und F_3 , F_2 und F_4 , sowie F_2 und F_5 scheidet unmittelbar aus, da diese Fixationen jeweils innerhalb des Bildbereichs der Referenz oder der Probe liegen.

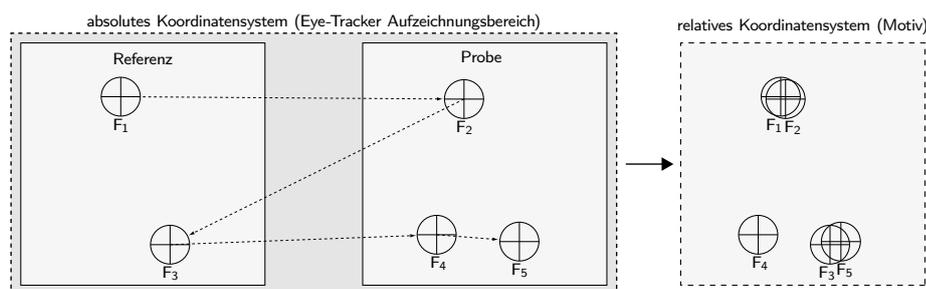


Abbildung 3.11: Beispiel für verglichene und nicht verglichene Bildstellen

Zwischenfixationen

Die manuelle Analyse einer Stichprobe von ca. 10 % aller aufgezeichneten Blickbewegungen hat ergeben, dass zu einer bestimmten Fixation F_n mindestens die drei darauf folgenden Fixationen F_{n+1} bis F_{n+3} untersucht werden mussten, um einen eindeutigen Vergleich

¹⁴Die Analyse wurde mit Hilfe von MATLAB, einer höheren Programmiersprache und interaktiven Entwicklungsumgebung zur Durchführung rechenintensiver Aufgaben, durchgeführt.

zwischen zwei Bildstellen zu identifizieren. Der Grund dafür sind äußerst kurzfristige Fixationen (*Zwischenfixationen*), die während längerer Sakkaden¹⁵ auftreten können oder auf Grund einer ungenauen Zielkoordination des Auges dazu führen, dass die anvisierte Bildstelle nicht exakt fixiert wird, sodass diese Abweichung unmittelbar danach durch eine Korrektursakkade ausgeglichen wird [31]. Anhand der Sichprobenanalyse konnte festgestellt werden, dass in diesem Experiment bis zu zwei Zwischenfixationen bei dem Vergleich zweier Bildstellen auftreten konnten. Das bedeutet, dass spätestens die dritte Folgefixation F_{n+3} zu einem Vergleich führen musste, ansonsten galt die zu F_n zugehörige Bildstelle als nicht verglichen. Weiterhin hat die Analyse der Fixationsdauern ergeben, dass Zwischenfixationen mit einer großen Wahrscheinlichkeit bis zu einer Dauer von 200 ms¹⁶ auftreten können, weshalb dieser Wert als Schwellenwert zur eindeutigen Identifikation gewählt wurde. Unter der Annahme, dass Fixation F_4 in Abbildung 3.11 als Zwischenfixation identifiziert werden konnte, gilt die Bildstelle des Überlappungsbereichs der Fixationen F_3 und F_5 ebenfalls als verglichen.

Berechnung verglichener Bildstellen

Die genaue Größe und Lage einer verglichenen Bildstelle berechnet sich aus den Koordinaten der beiden beteiligten Fixationen. Das Zentrum der Bildstelle liegt auf der halben Strecke der Verbindungsgeraden zwischen den Zentren der beiden Fixationen. Die Größe der Bildstelle ist somit abhängig von der Übereinstimmung der Zentren beider Fixationen. Obwohl eine Bildstelle hier als Kreisfläche definiert ist, wurde jedoch nicht der exakte Überlappungsbereich der Schnittmenge verwendet. Stattdessen wurden vier verschiedene Genauigkeitsstufen von „sehr hoch“ bis „niedrig“ festgelegt, wodurch die „Zielgenauigkeit“ der Probanden untersucht werden sollte – in dieser Hinsicht konnten jedoch keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Die Größe einer verglichenen Bildstelle beträgt maximal $2,0^\circ$, wenn beide Zentren der Fixationen bis zu $0,5^\circ$ voneinander entfernt liegen und minimal $0,5^\circ$, wenn sie zwischen $1,5^\circ$ und $2,0^\circ$ voneinander entfernt liegen. Abbildung 3.12 visualisiert die Größe der verglichenen Bildstellen beispielhaft für die vier Genauigkeitsstufen. F_1 und F_2 beschreiben jeweils das Zentrum der beiden verglichenen Fixationen, die durch die unterbrochenen Kreise dargestellt sind. Die graue Fläche entspricht der Toleranz von $0,5^\circ$, in der sich die beiden Fixationen innerhalb der Genauigkeitsstufe relativ zueinander bewegen können, ohne dass sich die Größe der Bildstelle ändert. M ist der resultierende Mittelpunkt der verglichenen Bildstelle, deren Größe durch den roten Kreis repräsentiert wird.

Abbildung 3.13 zeigt für Proband BB1956 die in Motiv 50 verglichenen (*rote Kreise*) und nicht verglichenen (*blaue Kreise*) Bildstellen, die aus den CIELAB Referenzmotiven für die weitergehende Analyse extrahiert wurden. Abbildung 3.14 zeigt alle verglichenen

¹⁵Sakkaden sind die Blickzielbewegungen des Auges zwischen zwei Fixationen.

¹⁶Diese Dauer ergab sich aus der Summe der durchschnittlichen Fixationsdauer und der einfachen Standardabweichung der Fixationsdauern aller durch die manuelle Analyse identifizierten Zwischenfixationen.

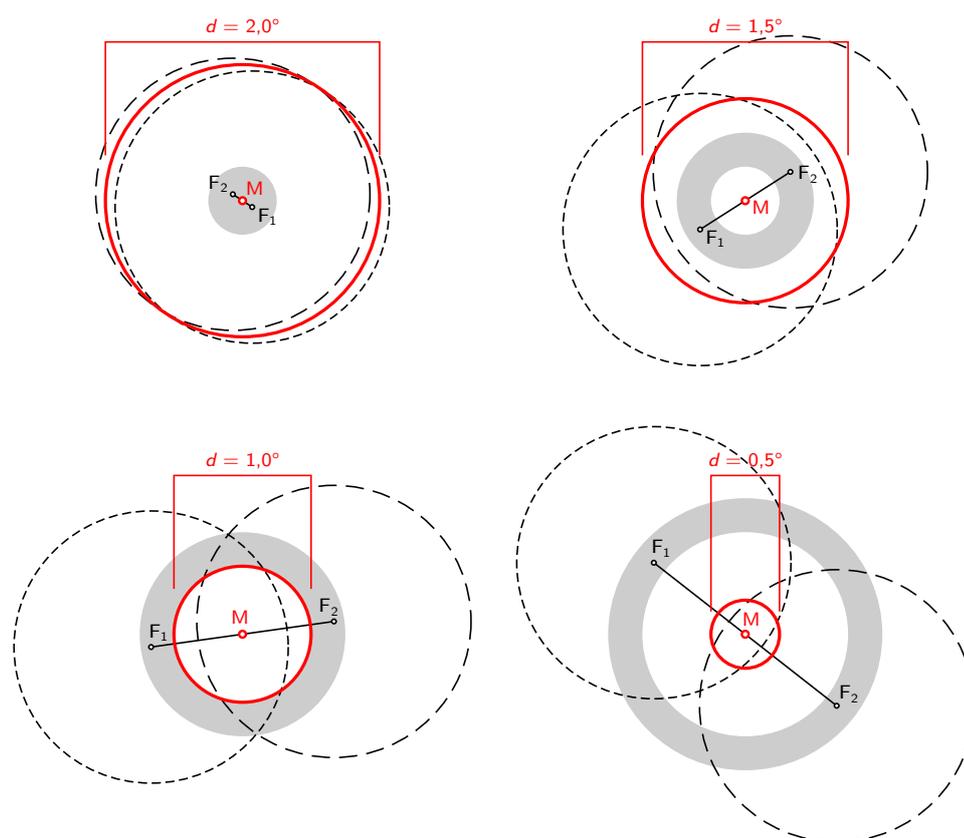


Abbildung 3.12: Größe verglichener Bildstellen (rot) mit dem Mittelpunkt M in Abhängigkeit der Fixationen F_1 , F_2

Bildstellen aus Abbildung 3.13 vor einem neutralgrauen Hintergrund in der Reihenfolge der Vergleiche.

Clusteranalyse

Die für diese Arbeit relevanten Informationen einer Bildstelle sind in den CIELAB Farbwerten ihrer Pixel enthalten. Da eine Bildstelle aus zahlreichen Pixeln mit unterschiedlichen Farben aufgebaut ist, bestand für die weitere Analyse die Notwendigkeit diese auf einige wenige, möglichst charakteristische Farben zu reduzieren. Dazu wurde die Eigenschaft des dreidimensionalen CIELAB Farbraums verwendet, dass Farbwerte als Koordinaten einzelner Punkte aufgefasst werden können. Eine Vielzahl ähnlicher Farben, wie sie in den verglichenen Bildstellen typischerweise vorkommen, bildeten somit einen Cluster, zu dem ein Mittelpunkt berechnet werden konnte und der stellvertretend für diesen Cluster stand, diesen im Folgenden also „charakterisiert“. Mit Hilfe einer Clusteranalyse¹⁷ wurden jeweils die drei charakteristischen CIELAB Farben einer verglichenen Bildstelle berechnet. Abbildung 3.15 auf der nächsten Seite zeigt für jede der aus Abbildung 3.13 verglichenen Bildstellen die drei charakteristischen CIELAB Farben.

¹⁷Die verwendete Clusteranalyse basiert auf der MATLAB-Implementierung der *K-means*-Methode.

3.2. Relevante CIELAB Farbbereiche

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass bestimmte Farbtöne existieren, die bei einer visuellen Abmusterung im Allgemeinen stärker berücksichtigt werden als andere – eine Eigenschaft, die mit dem Begriff der *Relevanz*¹⁸ beschrieben werden kann. Berichten aus der Praxis zufolge zählen dazu vor allem Neutraltöne¹⁹ und Hauttöne²⁰ [35][27], da an diese ein besonders hoher Qualitätsanspruch gestellt wird.²¹ Dieser Anspruch liegt darin begründet, dass Neutraltöne im Vergleich zu der Referenz auch möglichst neutral wiedergegeben werden sollen – also ohne sichtbaren relativen Farbstich²² – und dass Hauttöne möglichst natürlich wiedergegeben werden sollen – z. B. dass Personen mit kaukasischer Abstammung weder ungesund (*zu grünlich*) noch sonnenverbrannt (*zu rötlich*) erscheinen.

Die Häufigkeit, mit der Farbtöne für einen Farbvergleich herangezogen werden, ist hier das wesentliche Indiz für ihre Relevanz. Je häufiger ein bestimmter Farbton verglichen wurde, desto größer war seine Relevanz und umgekehrt. Daraus ergab sich, dass die durch das Experiment bestimmten charakteristischen Farben der verglichenen Bildstellen danach untersucht werden mussten, mit welcher absoluten Häufigkeit sie vertreten waren.

Diese Untersuchung steht vor dem Problem, dass aus mathematischer Sicht unendlich viele CIELAB Farben existieren, sodass es kaum möglich erscheint, zu einer einzelnen Farbe eine sinnvolle Relevanzaussage zu treffen. Aus diesem Grund wurde mit folgendem Ansatz die Relevanz *ganzer Farbbereiche* untersucht. Zu diesem Zweck wurde der CIELAB Farbraum in würfelförmige Sektoren mit einer Kantenlänge von je 10 Einheiten L^* , a^* und b^* unterteilt²³; das Zentrum eines Sektors, ausgedrückt als CIELAB Koordinaten-Tripel, steht stellvertretend für alle CIELAB Farben, die durch ihn eingegrenzt werden. Abbildung 3.16 zeigt ein 3D-Modell eines Sektors (rot), dessen Zentrum bei $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$ liegt, sowie die unmittelbar benachbarten Sektoren (grau).

Die aus dem Eye-Tracker Experiment gewonnenen charakteristischen Farbwerte aller verglichenen Bildstellen konnten somit den einzelnen Sektoren zugeordnet werden. Anschließend konnte je Sektor die Häufigkeit H aller ihm zugeordneten Farbwerte ermittelt werden.

¹⁸**Relevanz:** Bedeutsamkeit, Wichtigkeit in einem bestimmten Zusammenhang: etw. besitzt R ., gewinnt, verliert an R ., ist von [wirtschaftlicher] R . [6]

¹⁹Neutraltöne sind unbunte Farbtöne oder Farbtöne mit einem niedrigen Buntheitsanteil.

²⁰Farbtöne, die mit der Erscheinung von menschlicher Haut in Verbindung gebracht werden.

²¹Im Speziellen kann dies auch für andere Farbtöne gelten, z. B. für Farben, die mit bestimmten kommerziellen Markennamen in Verbindung gebracht werden können. Da die Arbeit den allgemeinen Fall der Abmusterung behandelt, werden derartige Spezialfälle nicht berücksichtigt.

²²Der relative Farbstich ist der relative Buntheitsunterschied einer nahezu unbunten Probe zu einer nahezu unbunten Referenz [8][5].

²³Die Größe von je 10 Einheiten L^* , a^* und b^* pro Sektor stellt einen Kompromiss zwischen einer möglichst hohen Genauigkeit und dem für die Analyse vertretbaren Rechenaufwand dar.

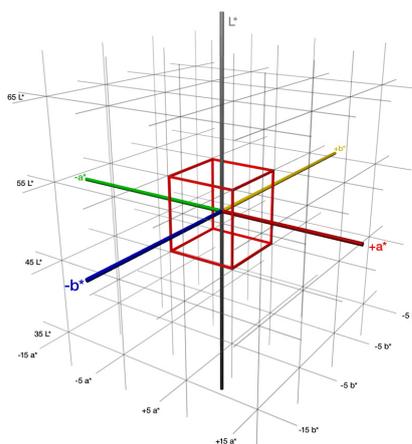


Abbildung 3.16: 3D-Modell des Sektors (rot) mit dem Zentrum $L^* = 50$, $a^* = 0$ und $b^* = 0$ und seine unmittelbar benachbarten Sektoren (grau).

Über die Häufigkeitswerte der Sektoren und die Anzahl aller Sektoren mit charakteristischen Farben, wird hier die Relevanz Rz für einen bestimmten Sektor definiert. Die Anzahl n aller Sektoren mit einem Häufigkeitswert $H > 0$ sagt dabei aus, wie viele unterschiedliche CIELAB Farbbereiche verglichen wurden. Die Summe der Häufigkeitswerte aller Sektoren entspricht der Anzahl aller verglichenen Farben.

Nach Formel 3.3 ergibt sich für den paarweisen Vergleich eines einfarbigen Probenpaares²⁴ der Relevanzwert $Rz = 1$, da es in diesem Fall nur einen einzigen Sektor geben kann, auf den der Farbwert der Referenz entfallen kann, unabhängig davon wie häufig die Referenz und die Probe miteinander verglichen wurden. Demnach repräsentiert der Rz -Wert 1 die „normale“ Relevanz. Mit zunehmender Anzahl unterschiedlicher Farben wird die Anzahl an Sektoren mit verglichenen Farben steigen, sodass die Relevanz für einen bestimmten Sektor einen der drei Zustände $Rz < 1$, $Rz = 1$ oder $Rz > 1$ annehmen wird. Die Sektoren, respektive Farbbereiche, lassen sich so in ihrer Relevanz untereinander vergleichen, worüber die relevantesten Farbbereiche bestimmt werden konnten.

$$Rz = H \frac{n}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.17 zeigt für alle Vergleiche die Sektoren mit einer Relevanz $Rz > 0$ als Kugeln innerhalb des CIELAB Farbraums. Das Zentrum einer Kugel ist identisch mit dem des jeweiligen Sektors.²⁵ Zur besseren Differenzierbarkeit wurden die Kugeln mit der CIELAB Farbe des jeweiligen Sektorzentrums eingefärbt. Es hat sich zudem gezeigt, dass die relevanten Farbtonbereiche den Farbraum der Referenzdruckbedingung nahezu vollständig abdecken.

²⁴Ein solches Probenpaar besteht aus einer einfarbigen Referenz und einer einfarbigen Probe.

²⁵Die Größe der Kugeln ist proportional zu der Relevanz des entsprechenden Sektors und wurde zur Darstellung möglichst vieler Sektoren mit Hilfe eines Skalierungsfaktors angepasst.

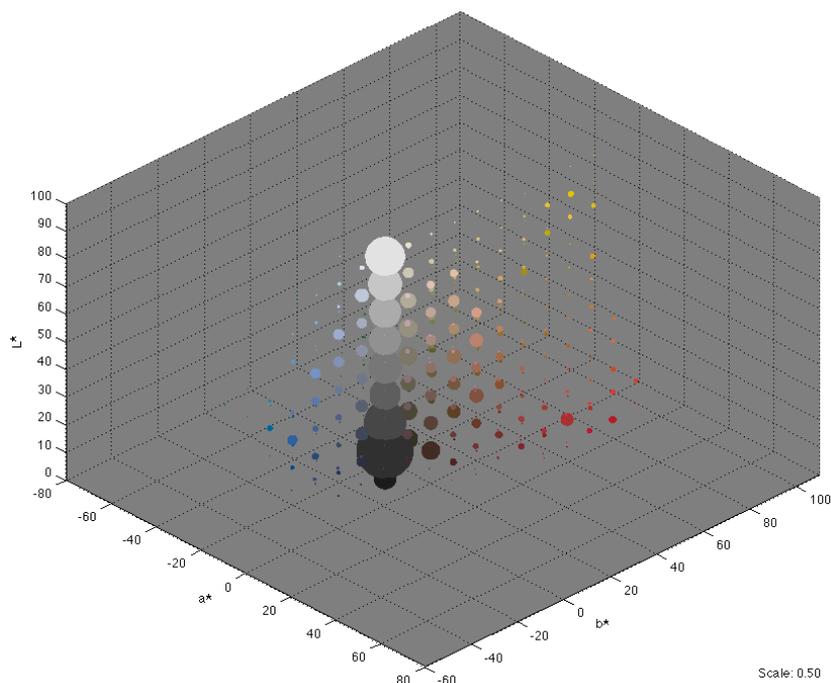


Abbildung 3.17: Darstellung aller verglichenen CIELAB Sektoren als Kugel-Diagramm (Skalierung 0,5)

Abmusterungsrelevante Farben

Anhand der Untersuchung der aufgezeichneten Blickbewegungen konnten insgesamt 528 CIELAB Sektoren mit einer Relevanz $Rz > 0$ identifiziert werden. Eine Regressionsanalyse hat ergeben, dass die experimentell bestimmten Relevanzen durch Linearkombination zweier Exponentialfunktionen sehr gut beschrieben werden können. Bei Betrachtung des Funktionsverlaufs in Abbildung 3.18 fällt auf, dass die Kurve innerhalb des ersten Viertels, ca. bis zum Schnittpunkt mit $Rz = 1$, stark abfällt und danach sehr flach, aber stetig sinkend, verläuft. Das lässt darauf schließen, dass vor allem das erste Viertel der Daten von besonders hoher Relevanz gegenüber den übrigen drei Vierteln ist.

Es wurde festgestellt, dass die neun relevantesten Farbbereiche die Neutraltöne repräsentieren, also die Sektoren, deren Mittelpunkte exakt auf der Unbuntachse liegen.²⁶ Des Weiteren konnten unter den ersten 50 Sektoren vor allem die Farbbereiche identifiziert werden in denen Hauttöne anzutreffen sind.

Darüber hinaus lieferten die Daten Grund zu der Hypothese, dass die Relevanz mit zunehmender Buntheit C^* rückläufig ist. Aus diesem Grund wurden die Buntheitswerte den Relevanzwerten gegenübergestellt. Da die Buntheitswerte verhältnismäßig stark streuen, wurde eine Regressionsanalyse auf Basis einer Polynomfunktion fünften Grades durchgeführt. Abbildung 3.19 zeigt die Buntheit C^* als Kreisflächen²⁷ und die berechnete Polynomfunktion.

²⁶Die maximale Buntheit der Sektoren mit neutralen Farben liegt bei $C^* = \sqrt{5^2 + 5^2} = 7,07$.

²⁷Die Füllfarbe der Kreisflächen entspricht der CIELAB Farbe des Sektorzentrums.

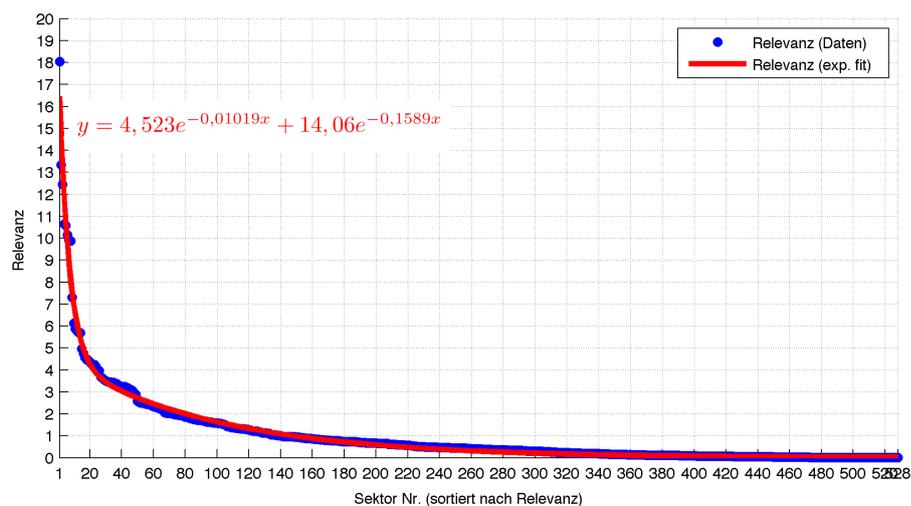
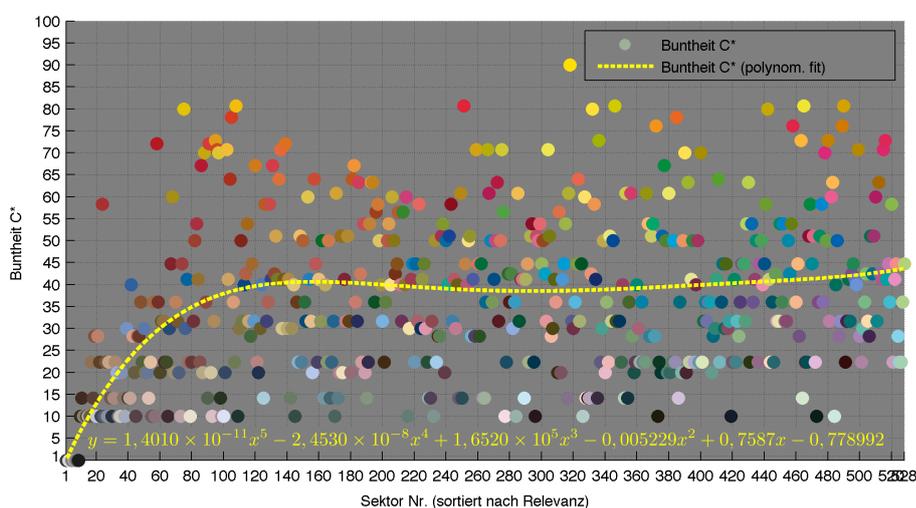


Abbildung 3.18: Relevanzen der 528 CIELAB relevanten Sektoren

Abbildung 3.19: Buntheiten C^* der 528 relevanten CIELAB Sektoren

Wie bei dem Vergleich der beiden Regressionsfunktionen in Abbildung 3.20 zu erkennen ist, sinkt die Relevanzfunktion im ersten Viertel bis auf den Normalwert $Rz = 1$ ab, während gleichzeitig die Buntheitsfunktion stark zunimmt. Für den restlichen Kurvenverlauf wird die normale Relevanz von $Rz = 1$ unterschritten und sinkt langsam, aber stetig auf $Rz = 0$ ab; gleichzeitig kann der Verlauf der Buntheitsfunktion als annähernd linear mit leichter Steigung angesehen werden. Die zuvor getroffene Hypothese konnte somit für das erste Teilstück bestätigt werden. Durch die starke Streuung der Buntheit, trifft sie auf das zweite Teilstück jedoch nur teilweise zu.

Relevanteste Farben: Neutraltöne und Hauttöne

Es kann daher festgehalten werden, dass neutrale Farben und Hauttöne für den allgemeinen Fall der Abmusterung tatsächlich zu den relevantesten Farben zählen. Die übrigen Farben sind bezüglich ihrer Relevanz als gleichwertig zu betrachten. Diese

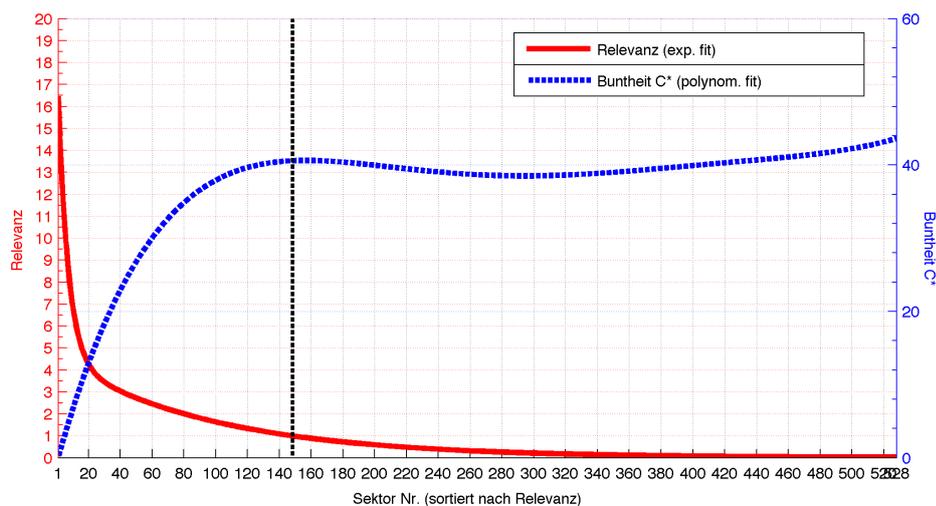


Abbildung 3.20: Gegenüberstellung der Relevanz- und der Buntheits-Regressionsfunktion

Aussagen werden zusätzlich durch eine eigens durchgeführte Umfrage zur visuellen Abmusterung gestützt, an der sich insgesamt 93 qualifizierte Personen der Druck- und Medienbranche beteiligten [44]. Wie Abbildung 3.21 entnommen werden kann, zählen Neutraltöne und Hauttöne unter den Befragten²⁸ zu den wichtigsten Farbtonbereichen. Die übrigen Antwortmöglichkeiten unterscheiden sich in ihrer Wichtigkeit nur marginal voneinander, sodass sie als gleichwertig einzustufen sind.

Wie wichtig sind Ihnen folgende Farbtonbereiche bei Ihrer Vorgehensweise?

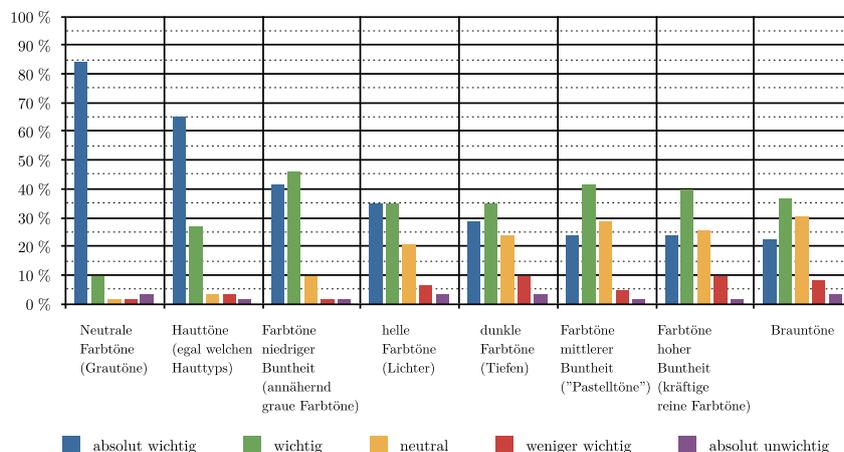


Abbildung 3.21: Ergebnisse der Umfrage bzgl. der Wichtigkeit bestimmter Farbtonbereiche bei der visuellen Abmusterung.

Farbliche Zusammenstellung eines geeigneten Prüfkeils

Wie bereits erläutert wurde, nimmt die farbliche Zusammenstellung des Prüfkeils ebenfalls bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis der messtechnischen Auswertung. Aus diesem

²⁸Von den 93 Teilnehmern der Umfrage gaben 68% an, die Abmusterung nach einer bestimmten Vorgehensweise durchzuführen, und nur an diese Teilmenge richtete sich die Frage nach der Wichtigkeit bestimmter Farbtonbereiche.

Grund erscheint es logisch, dass in einem geeigneten Prüfkeil die hier ermittelten relevantesten Farben durch einen hinreichend hohen Anteil vertreten sind. Wie groß der Anteil an neutralen Farbtönen und Hauttönen idealerweise sein sollte, kann jedoch nicht mit absoluter Gewissheit gesagt werden. Auf Grundlage der Ergebnisse erscheint ein Anteil zwischen $1/4$ und $1/3$ aller Farbfelder jedoch realistisch. Dadurch ist gewährleistet, dass der Prüfkeil die übrigen Farbtonbereiche, die von ihrer Relevanz her annähernd gleich sind, ebenfalls mit einem hinreichend hohen Anteil berücksichtigt. Da in diesen Farbtonbereichen keine aussagekräftigen Unterschiede bezüglich der Relevanz festgestellt werden konnten, sollten diese für den allgemeinen Fall möglichst gleichmäßig innerhalb des Farbraums der Referenzdruckbedingung verteilt sein, um die Aussagekraft des Prüfkeils zu maximieren.

3.3. Zusammenhänge zwischen Farbdifferenzen und Qualitätsbewertungen

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den wahrgenommenen Farbunterschieden und den daraus resultierenden Qualitätsbewertungen untersucht. Dies ist möglich, da die Farbunterschiede zwischen der Probe und der Referenz bekannt sind und den aufgezeichneten Blickbewegungen, genauer gesagt den verglichenen Bildstellen, zugeordnet werden können. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die Definition der Intervallgrenzen zur Anwendung im Rahmen einer optimierten messtechnischen Auswertungsmethode. Dazu müssen zwei Fälle unterschieden werden.

Fall a) Bewertung von Probenpaaren mit farblich unveränderter Probe

Da die Probe in diesem Fall denselben digitalen Datenbestand repräsentierte wie die Referenz, wurde erwartet, dass die Probanden keinerlei Unterschied bei der Abmusterung feststellen werden und das Urteil daher stets „*absolut identisch*“ ausfällt. Diese Erwartungshaltung wurde jedoch nicht bestätigt. Stattdessen wurden lediglich 74,5 % dieser Fälle als absolut identisch eingestuft. Demzufolge nahmen die Beobachter in den übrigen 25,5 % Farbunterschiede wahr, was aus technischer Sicht jedoch weitestgehend ausgeschlossen werden kann.²⁹ Davon wiederum wurden 24,8 % als „*akzeptabel*“ und 0,7 % als „*inakzeptabel*“ bewertet.

Offensichtlich wird die visuelle Abmusterung von identischen Proben, trotz der Einhaltung von Idealbedingungen bei der Herstellung der Probenpaare und bei den Betrachtungsbedingungen, von einem relativ großen Fehler überlagert. Die Ursachen hierfür sind wahrscheinlich in der visuellen Wahrnehmung selbst zu suchen. Einen

²⁹Im Durchschnitt lag die Farbabweichung bei der Erzeugung der Probenpaare bei $0,35 \Delta E_{00} \pm 0,07 \Delta E_{00}$, was deutlich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle von $1,0 \Delta E_{00}$ liegt (vgl. Kapitel 3.1.2).

möglichen Erklärungsansatz hierzu liefern die bekannten Wahrnehmungsphänomene, wie z. B. die chromatische Adaptation, die bei (längerer) Betrachtung einer Bildstelle zu komplementärfarbigem Nachbildern auf der Netzhaut führt und die Farbwahrnehmung dadurch stark beeinflussen kann [13].

Ein weiterer Erklärungsansatz betrifft die individuelle Wahrnehmungsschwelle [10][16] zur Erkennung von Farbunterschieden. Diese kann bei bestimmten Probanden ausgesprochen niedrig sein, sodass selbst geringste Farbunterschiede wahrgenommen wurden, und somit eine akzeptable Qualitätsbewertung möglich machte.

Fall b) Bewertung von Probenpaaren mit farblich veränderter Probe

Da in diesem Fall die Probe farblich modifiziert war, wurde erwartet, dass die Probanden bei der Abmusterung stets einen Unterschied zu der Referenz feststellen werden. Ein Ausnahmefall existiert dann, wenn bei der Abmusterung ausschließlich diejenigen (neutralen) Farbbereiche miteinander verglichen wurden, die durch die Modifikationsfunktion f_m nicht oder nur in sehr geringem Ausmaß verändert wurden, sodass der Farbunterschied visuell nicht wahrnehmbar ist. In diesem Fall würde eine modifizierte Probe trotzdem als „*absolut identisch*“ im Vergleich zur Referenz bewertet werden. Die Analyse der Daten hat ergeben, dass dies auf lediglich 1,1 % aller Abmusterungen der modifizierten Probenpaare zutreffend war und somit vernachlässigt werden konnte.

Die Bewertungen zeigen hier ein insgesamt stärker differenziertes Bild als im Fall der farblich unveränderten Probe, denn es wurden 44,7 % aller modifizierten Probenpaare „*akzeptabel*“ und 24,4 % „*inakzeptabel*“ bewertet. Demnach wurden in insgesamt 69,1 % überwiegend Farbunterschiede wahrgenommen. In den übrigen 30,9 % der Bewertungen wurde dagegen angegeben, dass die Probe absolut identisch zur Referenz ist, also deutlich häufiger, als die oben analysierten 1,1 %.

Die stärkere Differenzierung der Bewertungsunterschiede lässt jedoch darauf schließen, dass die Probanden entweder tatsächlich unterschiedlich stark ausgeprägte Wahrnehmungsschwellen zur Erkennung von Farbunterschieden besitzen oder das Urteilsvermögen eines einzelnen Beobachters im Laufe der Abmusterung stark variiert, z. B. auf Grund mangelnder Erfahrung, oder dass die Bewertung nach dem Zufallsprinzip vorgenommen wurde.

Ausschluss von Probanden mit unzureichendem Urteilsvermögen

Es konnte festgestellt werden, dass in dem Experiment kein Proband in der Lage war, für alle abgemusterten Probenpaare immer die erwartungsgemäße Bewertung abzugeben, also in jedem Fall „*richtig*“ zu bewerten, ob die Probe zur Referenz identisch oder unterschiedlich war. Aus diesem Grund musste untersucht werden ob möglicherweise ein unzureichendes Urteilsvermögen seitens einzelner Probanden vorlag. Dies war vor allem für die Bewertungen der Probenpaare mit unterschiedlichen Proben notwendig, da diese die Basis für die weitere Auswertung im Rahmen dieser Arbeit darstellen.

Sofern dem Urteilsvermögen eines Probanden bei der Bewertung unterschiedlicher Probenpaare nicht hinreichend vertraut werden konnte, mussten dessen Daten von der Analyse ausgeschlossen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen. Wie sich gezeigt hat, konnten insgesamt nur fünf Probanden mit unzureichendem Urteilsvermögen identifiziert werden, sodass die Daten der verbleibenden 18 Probanden weiter analysiert wurden. Die Untersuchung des Urteilsvermögens sowie die ausgeschlossenen fünf Probanden werden detailliert in Anhang C behandelt.

Zusammenhänge der visuellen Bewertungen modifizierter Probenpaare mit den Farbdifferenzen verglichener Bildstellen

Wie bereits zu Beginn der Arbeit erläutert wurde, wird ein Probenpaar im Allgemeinen umso wahrscheinlicher als visuell unterschiedlich wahrgenommen, je größer die Farbunterschiede zwischen den Bildstellen sind, die miteinander verglichen werden. Unter diesem Gesichtspunkt besteht daher das Interesse, die Größe derjenigen Farbunterschiede zu kennen, bei denen ein Probenpaar unter den üblichen Abmusterungsbedingungen mit großer Wahrscheinlichkeit als „*absolut identisch*“, als „*akzeptabel*“ oder als „*inakzeptabel*“ bewertet wird. Es werden also sinngemäß die Farbunterschiede gesucht, die bei einer farbmetrischen Bewertung hinreichend genau mit eben diesen Bewertungsstufen korrelieren. Die Berechnung der Farbunterschiede erfolgt hier nach der CIEDE2000 Formel, da diese gegenwärtig die beste Übereinstimmung mit visuell wahrgenommenen Farbunterschieden liefert [26].

Zwar existieren bereits Studien, die das Ziel hatten, die Wahrnehmungsschwelle für Farbunterschiede in Bildmotiven zu bestimmen, jedoch fehlen diesen die Informationen über die Farbdifferenzen in den vom Beobachter verglichenen Bildstellen. Stattdessen wird nur die Art der Bildmodifikation und eine Gesamtstatistik oder Magnitude der im Probenpaar vorhandenen Farbdifferenzen³⁰ angegeben, was jedoch als unzureichend bewertet werden muss [37][36][9][41][16]. Mit dem in dieser Arbeit durchgeführten

³⁰Üblicherweise werden die Farbdifferenzen in diesen Studien nach der ΔE_{76} Formel berechnet, was zur Folge hat, dass ihre Ergebnisse eine unzureichende Übereinstimmung mit visuell empfundenen Farbabständen aufweisen und somit nur bedingt für die Praxis tauglich sind.

Experiment existieren diese Schwachstellen nicht, da die visuellen Bewertungen den ΔE_{00} Farbdifferenzen der tatsächlich verglichenen Bildstellen gegenübergestellt wurden.

Die Ergebnisse basieren ausschließlich auf den Bewertungen der 18 Probanden, denen ein hinreichend großes Vertrauen in ihre Urteilsfähigkeit entgegengebracht werden konnte. Des Weiteren wurden nur diejenigen Probenpaare berücksichtigt, bei denen die Probe farblich modifiziert wurde, da andernfalls kein Farbabstand berechnet werden kann. Je Proband wurden die berechneten Farbumterchiede ($\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$, vgl. Abb. 3.2 auf Seite 23) den visuellen Bewertungen der Probenpaare zugeordnet (s. Anhang D). Somit konnte der durchschnittliche Farbumterchied berechnet werden, der dazu führte, dass ein Proband eine bestimmte Qualitätsbewertung vornahm.

Mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests wurden die durchschnittlichen $\overline{\Delta E_{00}}$ - und $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Werte der Probanden je Bewertungsstufe hinsichtlich der zuvor getroffenen Annahme auf Normalverteilung untersucht und für alle Fälle bestätigt (s. Anhang E). Auf dieser Basis wurde die durchschnittliche Farbdifferenz aller 18 Probanden je Bewertungsstufe berechnet. Dieser Wert repräsentiert die wahrscheinlichste Farbdifferenz nach der die entsprechende Bewertung vorgenommen wurde. Für die drei Bewertungsstufen wurden auf diese Weise die entsprechenden Farbdifferenzen für den Mittelwert und den Maximalwert sowie die dazugehörige Standardabweichung mit einer sehr hohen Genauigkeit³¹ bestimmt (s. Tabelle 3.1). Diese Werte stellen die charakteristischen Merkmale der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der drei Qualitätsstufen dar, die der Analyse im weiteren Verlauf zu Grunde gelegt werden.

Qualitätsstufe	$\overline{\Delta E_{00}}$	$\widehat{\Delta E_{00}}$
<i>absolut identisch</i>	1,1183 ($\pm 0,2006$)	1,8456 ($\pm 0,2834$)
<i>akzeptabel</i>	1,2961 ($\pm 0,1488$)	2,0128 ($\pm 0,1584$)
<i>inakzeptabel</i>	1,7161 ($\pm 0,2090$)	2,3506 ($\pm 0,2242$)

Tabelle 3.1: ΔE_{00} Farbdifferenzen und Standardabweichungen (in Klammern) nach denen im Durchschnitt die Qualitätsbewertung erfolgte

Mit Hilfe eines einseitigen Zweistichproben t-Tests wurde festgestellt, dass die $\overline{\Delta E_{00}}$ - und $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Mittelwerte der benachbarten Qualitätsstufen „*absolut identisch*“ und „*akzeptabel*“ sowie „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ mit einer Konfidenz von 95 % nicht derselben Grundgesamtheit entstammen (s. Anhang F). Dadurch ist unter praktischen Bedingungen eine hohe Robustheit bei der Anwendung sichergestellt, vor allem bei der Abgrenzung der Qualitätsstufen „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“, welche bei der Produktion von Druckerzeugnissen entscheidungsrelevant sind. Aus diesen Informationen wurde schließlich ein Grenzwert berechnet, der darüber entscheidet, welchem visuellen Qualitätsbereich ein Proof im Rahmen der messtechnischen Auswertung zugeordnet werden kann (s. Tabelle 3.2).

³¹Eine derart hohe Genauigkeit ist aus praktischer Sicht nicht notwendig. Sie dient hier lediglich dazu, Rundungsunterschiede in den Ergebnissen nachfolgender Berechnungen auf Basis dieser Werte, z. B. die Schwellenwerte zwischen den Qualitätsbereichen, zu minimieren.

Der Schwellenwert entspricht dem Schnittpunkt von jeweils zwei normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen benachbarter Qualitätsstufen, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Fehlzuweisungen minimiert wird. Abbildung 3.22 stellt diese Zusammenhänge grafisch dar.

Qualitätsbereich	Schwellenwert $\overline{\Delta E_{00}}$	Schwellenwert $\widehat{\Delta E_{00}^+}$
„absolut identisch“ – „akzeptabel“	1,17	1,84
„akzeptabel“ – „inakzeptabel“	1,50	2,19

Tabelle 3.2: ΔE_{00} -Schwellenwerte als Intervallgrenzen zwischen je zwei Qualitätsbereichen

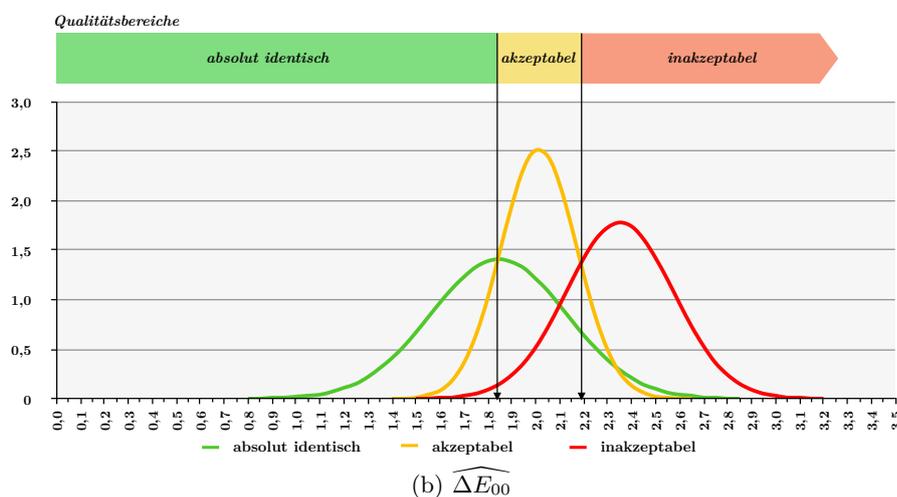
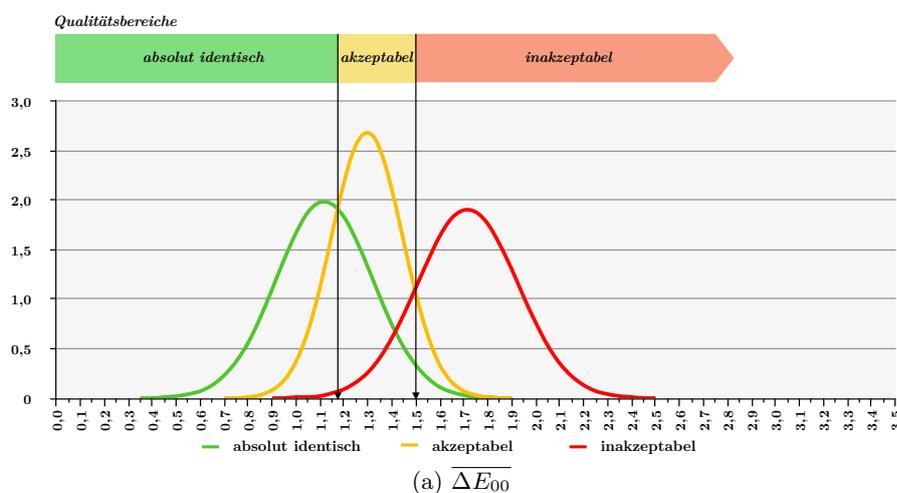


Abbildung 3.22: Normalverteilte Wahrscheinlichkeitsfunktionen der drei Bewertungsstufen sowie Qualitätsbereiche für den mittleren (a) und maximalen (b) ΔE_{00} -Farbabstand

4. Entwicklung einer optimierten messtechnischen Auswertungsmethode

Eine optimierte messtechnische Auswertungsmethode, deren Ergebnis in möglichst guter Übereinstimmung zu der visuellen Qualitätsbewertung liegt, muss die vorangegangenen Erkenntnisse aufgreifen und diese für eine praxisgerechte Anwendung auf möglichst einfache Art und Weise umsetzen. Im Folgenden werden die Voraussetzungen und Zusammenhänge einer solchen Auswertungsmethode dargelegt sowie ihre grundlegende Anwendung vorgestellt und dabei auf verschiedene Sonderfälle eingegangen. Des Weiteren werden eine alternative Form der Qualitätsbewertung und abschließend eine Vereinfachung für die praktische Anwendung vorgestellt.

4.1. Allgemeine Voraussetzungen und Zusammenhänge

In Analogie zu der bisher üblichen Auswertungsmethode nach MSD/ISO 12647-7 wird zunächst ein geeigneter Digitalproof-Prüfkeil¹ farbmessend vermessen. Für jedes Farbfeld des Prüfkeils wird der Farbabweichung nach ΔE_{00} zu dem entsprechenden Referenzwert berechnet, was die Farbabweichungs-Urmenge für die weitere Auswertung darstellt.

Die Auswertungsmethode sollte möglichst die reale Vorgehensweise der Qualitätsbewertung eines Beobachters bei der visuellen Abmusterung berücksichtigen. Wie an anderer Stelle der Arbeit dargelegt wurde, betrifft dies den durchschnittlichen und/oder maximal wahrgenommenen Farbunterschied des Probenpaares. Aus der Urmenge werden für die weitere Vorgehensweise dementsprechend der arithmetische Mittelwert ($\overline{\Delta E_{00}}$) und der Maximalwert ($\widehat{\Delta E_{00}}$) als statistische Kenngrößen ermittelt. Zusätzlich dazu kann die Standardabweichung ($\sigma_{\Delta E_{00}}$), als Streumaß der Farbabweichungen, entscheidungsrelevant sein, weshalb sie ebenfalls berechnet werden sollte.

Abbildung 4.1 zeigt die Bestimmung der statistischen Kenngrößen, ausgehend von der Farbmessung eines Prüfkeils.

¹Das Konzept eines geeigneten Prüfkeils wurde am Ende von Kapitel 3.2 vorgestellt.

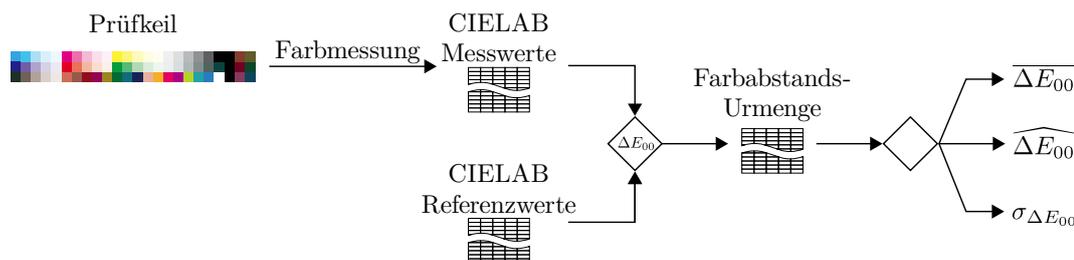


Abbildung 4.1: Bestimmung der statistischen Kenngrößen $\overline{\Delta E_{00}}$, $\widehat{\Delta E_{00}}$ und $\sigma_{\Delta E_{00}}$

Als Qualitätsstufen für eine optimierte Auswertung wird auf die drei visuellen Bewertungsstufen „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ zurückgegriffen. Wie Abbildung 4.2 entnommen werden kann, hat eine Umfrage zur visuellen Abmusterung [44] ergeben, dass dieses dreistufige Bewertungsschema von den Teilnehmern eindeutig favorisiert wurde und sich somit sehr gut als Basis für die Zielsetzung dieser Arbeit eignet.²

Wie beurteilen Sie die folgenden drei Möglichkeiten (A, B, C), um die visuelle Qualität eines Proofs im Vergleich zu einer Referenz zu bewerten?

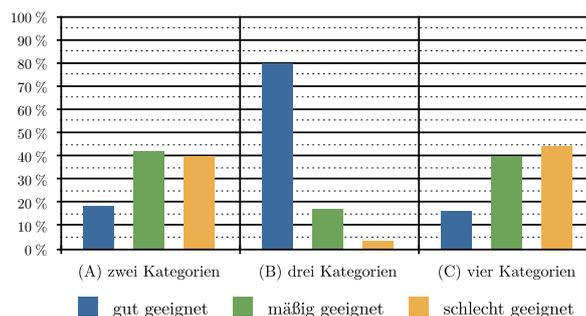


Abbildung 4.2: Ergebnisse der Umfrage zur visuellen Abmusterung auf die Frage nach der Eignung verschiedener Formen von Bewertungskategorien (eine Mehrfachauswahl war möglich)

4.2. Anwendung der optimierten Auswertungsmethode

Die Anwendung der optimierten Auswertungsmethode erfolgt dadurch, dass die, aus der Urmenge der Farbunterschiede berechneten statistischen Kenngrößen $\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$, je einem der drei Qualitätsbereiche (s. Abbildung 3.22) zugeordnet werden, welche über die aus dem Experiment bestimmten Intervallgrenzen definiert sind. Sofern beide statistischen Kenngrößen innerhalb desselben Qualitätsbereichs liegen, repräsentiert der Proof die entsprechende visuelle Qualitätstufe (s. Tabelle 4.1).

²Die beiden weiteren zur Auswahl stehenden Möglichkeiten waren ein zweistufiges Bewertungsschema („OK“, „nicht OK“) – wie es nach MSD gegenwärtig üblich ist – und ein vierstufiges Bewertungsschema („bestanden“, „knapp bestanden“, „knapp nicht bestanden“, „nicht bestanden“) – wie es bei der visuellen Qualitätsbewertung im Rahmen der ISO 12647-7 in Annex D informativ empfohlen wird.

Qualitätsstufe	Qualitätsbereich	
<i>absolut identisch</i>	$\Delta E_{00} \leq 1,17$	$\widehat{\Delta E_{00}} \leq 1,84$
<i>akzeptabel</i>	$1,17 < \Delta E_{00} \leq 1,50$	$1,84 < \widehat{\Delta E_{00}} \leq 2,19$
<i>inakzeptabel</i>	$1,50 < \Delta E_{00}$	$2,19 < \widehat{\Delta E_{00}}$

Tabelle 4.1: Definition der drei Qualitätsstufen durch Zuordnung der statistischen Kenngrößen zu den drei Qualitätsbereichen

Sonderfälle bei der Qualitätsbewertung

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die beiden relevanten Kenngrößen in zwei unterschiedliche Qualitätsbereiche fallen, sodass die Qualitätsaussage zunächst nicht eindeutig ist. In diesen Sonderfällen muss anderweitig darüber entschieden werden, ob eher dem Mittelwert oder dem Maximalwert ein stärkeres Gewicht beigemessen werden soll. Eine Hilfestellung bei dieser Entscheidung kann über die Betrachtung der Standardabweichung $\sigma_{\Delta E_{00}}$ erfolgen. Sofern die Streuung der Farbunterschiede hinreichend niedrig ist, wird es sich bei dem Maximalwert eher um einen Ausreißer handeln, sodass dieser weniger stark ins Gewicht fallen sollte und die bessere Qualitätsstufe angenommen werden kann. Eine erhöhte Standardabweichung ist dagegen ein Indiz dafür, dass verhältnismäßig viele Farbunterschiede oberhalb des Mittelwerts zu finden sind; somit sollte dem Maximalwert ein größeres Gewicht beigemessen werden und die schlechtere Qualitätsstufe angenommen werden.

Welcher konkrete Wert als Toleranz für die Standardabweichung verwendet werden soll, kann gegenwärtig nicht eindeutig angegeben werden. Eine Auswertung der Daten des Projekts „Digitale Proofsysteme 2008“ [48], bei dem der Fogra Medienkeil CMYK V3 von 23 verschiedenen Proofs vermessen wurde, lieferte Hinweise darauf, dass eine Standardabweichung von $0,5 \Delta E_{00}$ einen pragmatischen Toleranzwert darstellt, für eine genauere Definition besteht jedoch die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen.

Somit wird die zuvor vorgestellte Auswertungsmethode um den Parameter der Standardabweichung erweitert, um die Qualität für die Sonderfälle näher zu bestimmen. Sie kann in Ermangelung eines exakten Toleranzwertes jedoch immer noch ein unscharfes Bild liefern. Aus diesem Grund wird noch eine weitere, alternative Form der Auswertung vorgestellt.

Alternative Form der optimierten Auswertungsmethode

Die Vermeidung uneindeutiger Qualitätsaussagen (o. g. Sonderfälle) kann über die Definition von mehr als drei messtechnischen Qualitätsstufen erfolgen. Dazu werden die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der drei Qualitätsbereiche herangezogen, auf welche die statistischen Kenngrößen entfallen können. Da ausgeschlossen werden kann, dass der Maximalwert in einem niedrigeren Qualitätsbereich liegt als der Mittelwert,

existieren insgesamt sechs verschiedene Kombinationen, die in Tabelle 4.2 dargestellt sind. Die Reihenfolge der Qualitätsstufen ergibt sich dadurch, dass dem durchschnittlich wahrgenommenen Farbunterschied generell ein höheres Gewicht beigemessen wird, als dem maximalen Farbunterschied. Auf diese Weise wird eine Qualitätsbewertung erreicht, in der keine uneindeutigen Sonderfälle mehr existieren.

Messtechnische Qualitätsstufe	Qualitätsbereich	
	$\overline{\Delta E_{00}}$	$\widehat{\Delta E_{00}}$
1 (sehr gut)	<i>absolut identisch</i>	<i>absolut identisch</i>
2	<i>absolut identisch</i>	<i>akzeptabel</i>
3	<i>absolut identisch</i>	<i>inakzeptabel</i>
4	<i>akzeptabel</i>	<i>akzeptabel</i>
5	<i>akzeptabel</i>	<i>inakzeptabel</i>
6 (sehr schlecht)	<i>inakzeptabel</i>	<i>inakzeptabel</i>

Tabelle 4.2: Definition von sechs messtechnischen Qualitätsstufen in Abhängigkeit der drei Kombinationen der drei Qualitätsbereiche

4.3. Vereinfachung der Intervallgrenzen für die praktische Anwendung

Für die praktische Anwendung ergibt sich das Problem, dass die Intervallgrenzen mit ihrer hohen Genauigkeit auf Hundertstel ΔE_{00} , auch wenn sie rechnerisch völlig korrekt sind, nur schwer vermittelbar sind und daher kontraproduktiv wirken können. Da es üblich ist in den Normen und technischen Richtlinien der grafischen Industrie die Toleranzen für Farbabstände auf Zehntel genau anzugeben, kann davon ausgegangen werden, dass die Anwender keine Schwierigkeiten haben werden neue Vorgaben mit derselben Genauigkeit zu akzeptieren.

Diese Vereinfachung ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Übereinstimmung mit der visuellen Qualitätsbewertung nicht negativ beeinflusst wird. Die geringsten Unterschiede zu den bisher vorgestellten Ergebnissen werden dadurch erreicht, dass nur die berechneten Toleranzgrenzen, also die Schnittpunkte zwischen zwei benachbarten normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen, gerundet werden. Auf diese Weise bleibt die der Auswertung zu Grunde liegende Datenbasis unberührt, es kann lediglich zu sehr geringen Verschiebungen der Wahrscheinlichkeiten möglicher Fehlzusweisungen kommen.

Die Intervallgrenzen aus Tabelle 3.2 wurden somit auf eine Genauigkeit von $1/10 \Delta E_{00}$ gerundet (s. Tabelle 4.3). Diese Werte können wesentlich verständlicher als Toleranzgrenzen der Auswertungsmethode kommuniziert werden als die zuvor berechneten Werte mit einer Genauigkeit von $1/100 \Delta E_{00}$. Abbildung 4.3 visualisiert die drei Qualitätsbereiche und die Intervallgrenzen der optimierten Auswertungsmethode für $\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$.

Qualitätsbereich	Schwellenwert $\overline{\Delta E_{00}}$	Schwellenwert $\widehat{\Delta E_{00}}$
„absolut identisch“ – „akzeptabel“	1,2	1,8
„akzeptabel“ – „inakzeptabel“	1,5	2,2

Tabelle 4.3: Auf $1/10 \Delta E_{00}$ gerundete Grenzwerte (Intervallgrenzen) zwischen jeweils zwei benachbarten Qualitätsstufen

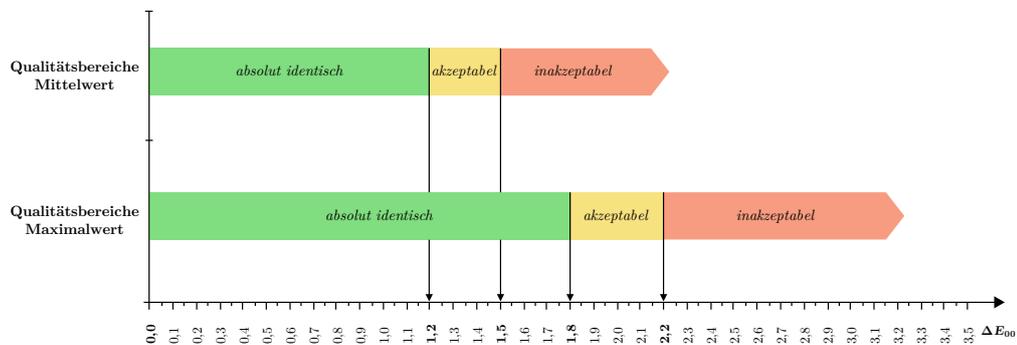


Abbildung 4.3: Auf $1/10 \Delta E_{00}$ gerundete Intervallgrenzen (Pfeile) zwischen den drei Qualitätsbereichen (Flächen) für den mittleren und maximalen Farbabstand

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Möglichkeiten zur Optimierung der Übereinstimmung zwischen der messtechnischen und visuellen Qualitätsbewertung von Digitalproofs untersucht. Mit Hilfe eines Eye-Tracker Experiments wurde die visuelle Abmusterung von bildhaften Probenpaaren unter den in der Druckindustrie üblichen Standardbedingungen nach ISO 3664/P1 näher beleuchtet. Aus den Daten der aufgezeichneten Blickbewegungen wurden die CIEDE2000 Farbabstände (ΔE_{00}) der verglichenen Bildstellen bestimmt, nach denen die Proben im Vergleich zu ihrer Referenz in die drei Qualitätsstufen „*absolut identisch*“, „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ eingeordnet wurden. Diese Erkenntnisse flossen in die Entwicklung einer neuen messtechnischen Auswertungsmethode zur Qualitätsbewertung ein und betrafen im Wesentlichen die Berechnung von Toleranzen zur Definition von drei Qualitätsbereichen, die den oben genannten visuellen Qualitätsstufen entsprechen.

Grundlage der neuen Auswertungsmethode ist ein Modell, in dem das visuelle Qualitätsurteil maßgeblich von dem durchschnittlichen und dem maximalen Farbunterschied abhängig ist, welche während einer Abmusterung wahrgenommen wurden. Aus der Urmenge aller ΔE_{00} Farbabstände eines vermessenen Prüfkeils werden die entsprechenden statistischen Kenngrößen – Mittelwert und Maximalwert – berechnet und je einem der drei Qualitätsbereiche zugeordnet. Es wurde gezeigt, dass die jeweilige visuelle Qualitätsstufe mit einer Konfidenz von 95 % vorhergesagt werden kann. Eine Vereinfachung für die praktische Anwendung wurde durch Angabe der Toleranzgrenzen zwischen den drei Qualitätsbereichen mit einer Genauigkeit von $1/10 \Delta E_{00}$ erreicht.

In der Praxis kann der Fall eintreten, dass die beiden statistischen Kenngrößen nicht immer demselben Qualitätsbereich zugeordnet werden können. Daher wurden zur exakteren Qualitätsbestimmung zwei Auswertungsvarianten vorgeschlagen. Die erste Variante verwendet zusätzlich die Standardabweichung der Farbabstände als Streumaß, jedoch bleibt mangels einer definierten Toleranz für die Streuung ein geringer Interpretationsspielraum offen. Die zweite Variante verwendet die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten der Qualitätsbereiche des durchschnittlichen und maximalen Farbabstands, wodurch alle möglichen Fälle der Qualitätsbewertung eindeutig definiert

werden; somit ist sie zum gegenwärtigen Zeitpunkt gegenüber der ersten Variante vorzuziehen.

Das Experiment hat weiterhin die Erkenntnis geliefert, dass die visuelle Abmusterung von Probenpaaren, bei denen die Probe und die Referenz farblich identisch sind, von einem relativ großen Fehler überlagert ist, da in ca. 25 % aller dieser Fälle ein vermeintlicher Farbunterschied erkannt wurde. Dies zeigt, dass die visuelle Wahrnehmung selbst unter Idealbedingungen nicht unfehlbar ist. Inwiefern dies eine Auswirkung auf die Abmusterung im Allgemeinen hat, lässt sich jedoch nicht einschätzen.

Zuletzt konnten Neutraltöne und Hauttöne als besonders abmusterungsrelevante Farbtöne identifiziert werden, wodurch eine in der Branche seit langem vertretene Hypothese wissenschaftlich bestätigt wird. Es hat sich darüber hinaus gezeigt, dass die übrigen Farbtonbereiche keine nennenswerten Unterschiede hinsichtlich ihrer Relevanz aufweisen, also als gleichwertig relevant zu betrachten sind. Diese Erkenntnisse sollten bei der Entwicklung von allgemein gültigen, für die Digitalproof-Kontrolle geeigneten Prüfkeilen berücksichtigt werden, damit die Aussagekraft der Auswertungsmethode durch die geringe Zahl an zur Verfügung stehenden Farbfeldern weiter optimiert wird.

5.2. Ausblick

Die hier vorgestellten Varianten der neuen Auswertungsmethode sind in der Lage, die visuell empfundene Qualität eines Digitalproofs mit einer hohen Wahrscheinlichkeit vorherzusagen, was in dieser Form bislang nicht möglich war. Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Verwendung eines geeigneten Prüfkeils, der die in Kapitel 3.2 identifizierten abmusterungsrelevanten Farben zu einem hinreichend hohen Anteil beinhaltet und dessen übrige Farben den Farbraum der entsprechenden Referenzdruckbedingung möglichst optimal repräsentieren. Ein solcher Prüfkeil existiert bislang nicht und auch der weit verbreitete Fogra Medienkeil CMYK V3 Proof sowie andere existierende Prüfkeile erfüllen diese Kriterien nur teilweise, sodass die neue Auswertungsmethode ihr Potenzial gegenwärtig nicht voll entfalten kann. Die Forschung und Entwicklung verbesserter Prüfkeile muss daher weiter vorangetrieben werden, um eine Optimierung der Auswertungsmethode zu erzielen.

Trotz dieser Einschränkung stellt die neue Auswertungsmethode eine Verbesserung gegenüber der üblichen Auswertung nach MedienStandard Druck bzw. ISO 12647-7 dar, da sie in der Praxis wesentlich einfacher anzuwenden ist. Anstelle von sechs verschiedenen Kriterien mit zwei unterschiedlichen Farbabstandsberechnungen (s. Kapitel 2.6) wird die Qualität anhand von zwei oder drei statistischen Kenngrößen auf Basis der wahrnehmungsgemäß gleichförmigen Farbabstandsformel CIEDE2000 (ΔE_{00}) bestimmt.

Dies stellt eine erhebliche Vereinfachung für den Anwender dar, der sich mit der Qualitätsbewertung von Digitalproofs befassen muss.

Damit sich diese neue Form der Auswertung in der Praxis etablieren kann ist jedoch noch zusätzliche Bildungsarbeit notwendig und auch ein Umdenken seitens der Anwender erforderlich. Vor allem muss der Vorteil der ΔE_{00} Farbabstandsformel vermittelt werden. Dabei geht es nicht darum, dass die Absolutwerte von Farbabständen in der Regel geringer ausfallen als die Werte anderer Formeln, sondern dass der Betrag des berechneten Farbabstands gleichabständig mit der visuellen Wahrnehmung von Farbunterschieden ist. Dadurch ist die Notwendigkeit für die „vielen“ verschiedenen Kriterien der gängigen Auswertungsmethode, welche auf Grund der Schwächen des CIELAB Farbraums und der klassischen CIELAB Farbabstandformel (ΔE_{76}) existieren, nicht mehr gegeben. Die dazu notwendige Grundlagenvermittlung muss von allen Bildungs- und Weiterbildungseinrichtungen der Druck- und Medienindustrie konsequent betrieben werden. Dazu zählen Hochschulen und Fachhochschulen, Berufskollegs und Berufsakademien genauso wie Schulungsangebote der Bundes- und Landesverbände sowie freier Unternehmensberater. Erst wenn dieses Wissen die breite Masse der Anwender erreicht hat, kann davon ausgegangen werden, dass die neue Auswertungsmethode einen ähnlichen Stellenwert erlangt, wie die heute gängige Methode.

Weiterhin müssen die bestehenden Standards und technischen Richtlinien, wie der MedienStandard Druck, die CIEDE2000 Formel sowie die hier veröffentlichte Auswertungsmethode inklusive ihrer Qualitätsbereiche und Toleranzen aufgreifen, damit die Anwender von ihrer Existenz Kenntnis erlangen und sich damit auseinandersetzen können. Für einen fließenden Übergang ist es von Vorteil, dass die neue Auswertung mit denselben farbmtrischen Daten eines Prüfkeils arbeitet, wie die gängige Proofauswertung. Dadurch besteht die Möglichkeit beide Auswertungsformen parallel zueinander zu verwenden, um eine schrittweise Eingewöhnung der Anwender zu erreichen.

Tabellenverzeichnis

2.1. Kriterien und Toleranzen der messtechnischen Auswertung nach ISO 12647-7	18
3.1. ΔE_{00} Farbdifferenzen und Standardabweichungen (in Klammern) nach denen im Durchschnitt die Qualitätsbewertung erfolgte	46
3.2. ΔE_{00} -Schwellenwerte als Intervallgrenzen zwischen je zwei Qualitätsbereichen	47
4.1. Definition der drei Qualitätsstufen durch Zuordnung der statistischen Kenngrößen zu den drei Qualitätsbereichen	50
4.2. Definition von sechs messtechnischen Qualitätsstufen in Abhängigkeit der drei Kombinationen der drei Qualitätsbereiche	51
4.3. Auf $1/10 \Delta E_{00}$ gerundete Grenzwerte (Intervallgrenzen) zwischen jeweils zwei benachbarten Qualitätsstufen	52
B.1. Gegenüberstellung erwarteter und tatsächlicher ΔE_{00} -Werte	91
B.2. Statistische Auswertung der absoluten Differenzen zwischen erwarteten und tatsächlichen ΔE_{00} -Werten	91
B.3. Perzentile der absoluten Differenzen zwischen erwarteten und tatsächlichen ΔE_{00} -Werten	91
B.4. CIELAB-Werte des CMYKick-Testcharts für die Referenzdruckbedingung (Teil 1)	92
B.5. CIELAB-Werte des CMYKick-Testcharts für die Referenzdruckbedingung (Teil 2)	93
C.1. Fehlerquoten und vermutete subjektive Wahrnehmungsschwellen der Probanden	95

D.1. Qualitätsbewertungen der Probanden AH1972 bis JB1965	98
D.2. Qualitätsbewertungen der Probanden JS1983 bis YM1982	99
D.3. Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>absolut identisch</i> “	100
D.4. Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>akzeptabel</i> “ . .	101
D.5. Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>inakzeptabel</i> “ .	102
D.6. Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>absolut identisch</i> “ . . .	103
D.7. Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>akzeptabel</i> “	104
D.8. Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „ <i>inakzeptabel</i> “	105
E.1. d_{\max} -Werte des KS-Tests der drei Qualitätsstufen für $\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$. .	106
E.2. Durchschnittliches ΔE_{00} je Proband, Mittelwert und Standardabweichung für $\overline{\Delta E_{00}}$. .	107
E.3. Durchschnittliches ΔE_{00} je Proband, Mittelwert und Standardabweichung für $\widehat{\Delta E_{00}}$. .	107
F.1. t-Werte der Mittelwerte der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktio- nen benachbarter Qualitätsstufen	108
G.1. ΔE_{00} -Schwellenwerte als Intervallgrenzen zwischen je zwei Qualitätsberei- chen	109

Abbildungsverzeichnis

2.1. CMYK Testchart nach ISO 12642-2	10
2.2. Beispiele für Referenzmotive zur visuellen Qualitätskontrolle	11
2.3. Vergleich ähnlichfarbiger Proben mit Bestimmung der Wahrnehmungs- und Toleranzschwelle sowie des Akzeptanzbereichs	12
2.4. Gegenüberstellung der Klassifizierungen des visuellen Vergleichs mit der technischen und der visuellen Bewertung	13
2.5. Zusammenhang zwischen der Qualitätsbewertung von Farbabständen in Bildmotiven und der resultierenden Qualität, durch die sich drei Qualitätsbereiche definieren lassen	14
3.1. Erzeugung des Probenpaares und des Farbdifferenzbildes (FDB) aus den CIELAB Bilddaten eines Referenzbildes (R)	23
3.2. Aufzeichnung der Blickbewegungen des Beobachters (B) durch den Eye-Tracker (ET), Berechnung des durchschnittlichen und maximalen Farbunterschieds ($\overline{\Delta E}$, $\widehat{\Delta E}$) sowie deren Zusammenhänge mit der empfundene Qualität (Q)	23
3.3. Bestimmung der Relevanz (Rz) verschiedener Farben aus den Fixationsin- formationen (FK, FD) und den Referenzbilddaten (R)	24
3.4. Präsentationsfläche mit Aufzeichnungsbereich	25
3.5. Probenpaar des Motivs Nr. 41	25
3.6. Gesamtansicht des Versuchsaufbaus	26
3.7. Erzeugung der CIELAB Referenzdaten	27
3.8. Einheits-Toleranz-Ellipsen der CIEDE2000 Farbabstandsformel [39]	29

3.9. Vergleich des Prooferfarbumfangs (graues Gitternetz) und des Farbumfangs der Referenzdruckbedingung (farbiges Gitternetz)	30
3.10. Prüfkeil mit 24 CIELAB Farbfeldern zur Kontrolle der Reproduktionsgenauigkeit	31
3.11. Beispiel für verglichene und nicht verglichene Bildstellen	34
3.12. Größe verglichener Bildstellen (rot) mit dem Mittelpunkt M in Abhängigkeit der Fixationen F_1, F_2	36
3.13. Beispiel für verglichene Bildstellen (rot) und nicht verglichene Fixationen (blau); Proband BB1956, Probenpaar Nr. 50	37
3.14. Extrahierte verglichene Bildstellen; Proband BB1956, Probenpaar Nr. 50 .	37
3.15. Charakteristische CIELAB Farbwerte der von Proband BB1956 verglichenen Bildstellen des Probenpaares Nr. 50	37
3.16. 3D-Modell des Sektors (rot) mit dem Zentrum $L^* = 50, a^* = 0$ und $b^* = 0$ und seine unmittelbar benachbarten Sektoren (grau).	39
3.17. Darstellung aller verglichenen CIELAB Sektoren als Kugel-Diagramm (Skalierung 0,5)	40
3.18. Relevanzen der 528 CIELAB relevanten Sektoren	41
3.19. Buntheiten C^* der 528 relevanten CIELAB Sektoren	41
3.20. Gegenüberstellung der Relevanz- und der Buntheits-Regressionsfunktion .	42
3.21. Ergebnisse der Umfrage bzgl. der Wichtigkeit bestimmter Farbtonbereiche bei der visuellen Abmusterung.	42
3.22. Normalverteilte Wahrscheinlichkeitsfunktionen der drei Bewertungsstufen sowie Qualitätsbereiche für den mittleren (a) und maximalen (b) ΔE_{00} -Farbabstand	47
4.1. Bestimmung der statistischen Kenngrößen $\overline{\Delta E_{00}}, \widehat{\Delta E_{00}}$ und $\sigma_{\Delta E_{00}}$	49
4.2. Ergebnisse der Umfrage zur visuellen Abmusterung auf die Frage nach der Eignung verschiedener Formen von Bewertungskategorien (eine Mehrfachauswahl war möglich)	49
4.3. Auf $1/10 \Delta E_{00}$ gerundete Intervallgrenzen (Pfeile) zwischen den drei Qualitätsbereichen (Flächen) für den mittleren und maximalen Farbabstand	52

A.1. Farbskala zur Visualisierung der ΔE_{00} -Farbunterschiede in Farbdifferenzbildern	65
B.1. TIFF-Datei des CMYKkick-Testcharts im CIELAB-Farbmodus der Referenzdruckbedingung	89
B.2. CIELAB-Werte des CMYKkick-Testcharts sowie der Farbumfang der Referenzdruckbedingung im a^*b^* -Diagramm	90
B.3. Probenpaar mit CIELAB Prüfkeil (l.), Referenz-Testchart und Probe-Testchart (r.) für $f_m = +0,5 \Delta C_{00}^*$ (Fall 2)	90
G.1. Diagramm der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der durchschnittlichen $\overline{\Delta E_{00}}$ -Werte und Schwellenwerte (Pfeile) der drei Bewertungsstufen	110
G.2. Diagramm der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der durchschnittlichen $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Werte und Schwellenwerte (Pfeile) der drei Bewertungsstufen	110

Literaturverzeichnis

- [1] www.fogra.org
- [2] www.eci.org
- [3] <http://www.color.org/srgbprofiles.xalter>
- [4] <http://www.basiccolor.de/>
- [5] DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: DIN 55981 - Bestimmung des relativen Farbstichs von nahezu weißen Proben. Beuth, Mai 1979 (DIN 55981 1979-5). – Deutsches Normenwerk
- [6] *Duden - Deutsches Universalwörterbuch*. Bd. 5. Aufl. [CD-ROM]. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, 2003
- [7] *Specification ICC.1:2004-10 Image technology colour management — Architecture, profile format, and data structure*. www.color.org. Version: May 2006
- [8] <http://www.farbmatrik-gall.de/cielab/deltae/index.html>
- [9] BABCOCK, Jason S.: *Eye Tracking Observers During Color Image Evaluation Tasks*, Rochester Institute of Technology, Diplomarbeit, October 2002
- [10] BERNS, Roy S.: *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. 3rd. John Wiley & Sons, Ltd., 2000
- [11] CIE-TC-1-48: Colorimetry, 3rd. Edition. 2004. – Forschungsbericht
- [12] DOLEZALEK., F ; KRAUSHAAR, A.: Korrektur von Messfehlern bei Farbmessgeräten / Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V., München. 2005 (52-034). – Forschungsbericht
- [13] FAIRCHILD, Mark D.: *Color Appearance Models, Second Edition*. Wiley, 2005. – ISBN 0470012161
- [14] FIELD, Gary G.: *Color and Its Reproduction Third Edition*. GATFPress Pittsburgh, 2004. – ISBN 0883624079

- [15] FNF-NORMENAUSSCHUSS-FARBE: Farbmétrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel / DIN - Deutsches Institut für Normung e. V. Version: Oktober 2007. <http://www.beuth.de/>. 2007 (DIN 6174:2007-10). – Deutsches Normenwerk
- [16] GREEN, Phil (Hrsg.) ; MACDONALD, Lindsay W. (Hrsg.): *Colour Engineering – Achieving Device Independent Color*. korrigierter Nachdruck 2003. John Wiley & Sons, Ltd., 2002. – ISBN 0471486884
- [17] HÖCKER, Claudio: *Untersuchungen zum sinnvollen Aufbau eines Farbkontrollelements und zur Anwendung einer Auswertungsmethode zur farbmétrischen Kontrolle von Digitalproofs unter visuell wahrnehmungsorientierten Kriterien*, Bergische Universität Wuppertal, Diplomarbeit, März 2007
- [18] HOLM, Jack ; TASTL, Ingeborg ; MCCARTHY, Ann ; DERHAK, Max: *Approved revision to the ICC Color Profile Specification since ICC.1:2004-10 - "Perceptual Intent Reference Medium Color Gamut"*. <http://www.color.org/>, Februar 2005
- [19] INSTRUMENTS, Sensomotoric: *SMI iView X RED Flyer 080807*. PDF, August 2008
- [20] ISO-TC130: ISO 12640-3:2007 / International Organization for Standardization. 2006 (ISO 12640-3:2007). – International Standard
- [21] ISO-TC130: ISO 12642-2:2006 / International Organization for Standardization. 2006 (ISO 12642-2:2006). – International Standard
- [22] ISO-TC130: Graphic Technology — Process Control for the production of half-tone color separations, proof and production prints — Part 7: Proofing processes working directly from digital data / International Organization for Standardization. Version: December 2007. <http://www.beuth.de/>. 2007 (ISO 12647-7:2007(E)). – International Standard
- [23] ISO-TC130: Graphic technology - Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images / International Organization for Standardization. 2009 (ISO 13655:2009). – International Standard
- [24] ISO-TC42: Viewing conditions for graphic technology and photography / International Organization for Standardization. Version: November 2000. <http://www.beuth.de/>. 2000 (ISO 3664:2000). – International Standard
- [25] JOHNSON, Tony ; GREEN, Phil: The CIE2000 colour difference formula and its performance with a graphic arts data set. In: *Advances In Color Reproduction: Proceedings Of The 28th Iarigai Research Conference* IARIGAI, Graphic Arts Technical Foundation, November 2001, S. 294

- [26] KRAUSHAAR, A. ; GESSNER, F. ; BICKEBÖLLER, C. ; KARP, P.: Untersuchung moderner Farbabstandsformeln / Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V., München. 2008 (60.054). – Forschungsbericht
- [27] L. WEATHERALL Ian ; COOMBS, Bernard D.: Skin Color Measurements in Terms of CIELAB Color Space Values / School of Consumer and Applied Sciences (IL W) and Department of Preventative and Social Medicine (BDC), University of Otago, Dunedin, New Zealand. 1992 (4 (Vol. 99.)). – Forschungsbericht
- [28] *Kapitel 9.* In: MCILWAIN, James T. (Hrsg.): *An Introduction to the Biology of Vision*. Cambridge University Press, 1996
- [29] PELI, Eli: Contrast in complex images. In: *Journal of the Optical Society of America* 7 (1990), October, Nr. 10, S. 2032
- [30] PETER J. BEX, Walter M.: Spatial frequency, phase, and the contrast of natural images. In: *Journal of the Optical Society of America* 19 (2002), June, Nr. 6, S. 1097–1106
- [31] POMPLUN, Marc: *Analysis and Models of Eye Movements in Comparative Visual Search*, Universität Bielefeld, Diss., Mai 1998
- [32] PRINT & MEDIA FORUM AG (Hrsg.): *Altona Testsuite*. 1. (Update 2005). Biebricher Allee 79, 65187 Wiesbaden, Germany: Print & Media Forum AG, 2005
- [33] PRINT & MEDIA FORUM AG (Hrsg.): *Roman16 Referenzbilder*. Biebricher Allee 79, 65187 Wiesbaden, Germany: Print & Media Forum AG, 2007
- [34] PRINT & MEDIA FORUM AG (Hrsg.): *MedienStandard Druck*. 2/2010. Biebricher Allee 79, 65187 Wiesbaden, Germany: Print & Media Forum AG, 2010
- [35] RIGAL, Jean de ; ABELLA, Marie-Laurence ; GIRON, Franck ; CAISEY, Laurence ; LEFEBVRE, Marc A.: Development and validation of a new Skin Color Chart. In: *Skin Research and Technology* 13 (2007), Februar, Nr. 1, S. 101–109
- [36] SANO, Chikako ; SONG, Tao ; LUO, M. R.: Colour Differences for Complex Images. In: *Eleventh Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications* Society for Imaging Science and Technology, 2003, S. 121–126
- [37] SONG, Tao ; LUO, Ronnier: Testing Color-Difference Formulae on Complex Images Using a CRT Monitor. In: *Eighth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications*, 2000, S. 44–48

- [38] STOKES, Michael ; ANDERSON, Matthew ; CHANDRASEKAR, Srinivasan ; MOTTA, Ricardo: *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB*. <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>. Version: November 1995, Abruf: 01. Juli 2010
- [39] URBAN, Philipp: Embedding non-Euclidean color spaces into Euclidean color spaces with minimal isometric disagreement. In: *Journal of the Optical Society of America* 24 (2007), June, Nr. 6, S. 1516 ff.
- [40] URBAN, Philipp: Spectral-based Image Reproduction Workflow – From Capture to Print. In: *Jahrbuch der Druckingenieure 2009* (2009), S. 83–91
- [41] *Kapitel 3*, Perception of Colour Differences in Large Printed Images. In: UROZ, Joan ; MOROVIC, Ján ; LUO, Ronnier: *Color Image Science – Exploiting Digital Media*. John Wiley & Sons, Ltd., 2002
- [42] VERBAND DER SCHWEIZER DRUCKINDUSTRIE (Hrsg.): *Visual Print Reference*. Schosshaldenstrasse 20, 3006 Bern, Schweiz: Verband der Schweizer Druckindustrie
- [43] WELSCH, Norbert ; LIEBMANN, Claus C. ; WELSCH, Norbert (Hrsg.): *Farben. Natur - Technik - Kunst*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, 2003. – ISBN 3827415632
- [44] WILMANNNS, Claudio: *Befragung von Fachkräften der Druck- und Medienindustrie zur visuellen Abmusterung*. 2010
- [45] WILMANNNS, Claudio ; BRÜES, Stefan ; AL. et.: Projekt Digitale Proofsysteme 2005 / Bergische Universität Wuppertal. 2005. – Forschungsbericht
- [46] WILMANNNS, Claudio ; BRÜES, Stefan ; AL. et.: Projekt Digitale Proofsysteme 2006 / Bergische Universität Wuppertal. 2006. – Forschungsbericht
- [47] WILMANNNS, Claudio ; BRÜES, Stefan ; AL. et.: Projekt Digitale Proofsysteme 2007 / Bergische Universität Wuppertal. 2007. – Forschungsbericht
- [48] WILMANNNS, Claudio ; BRÜES, Stefan ; AL. et.: Projekt Digitale Proofsysteme 2008 / Bergische Universität Wuppertal. 2008. – Forschungsbericht

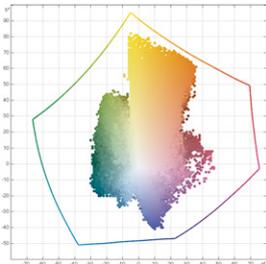
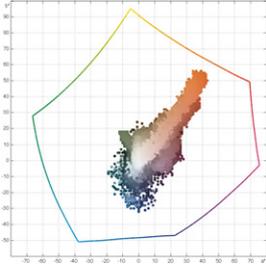
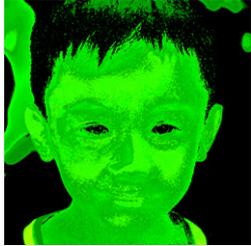
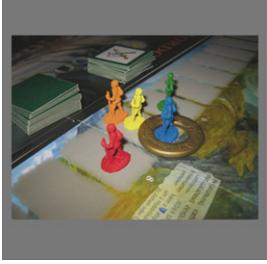
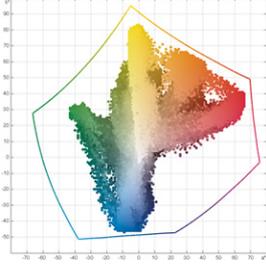
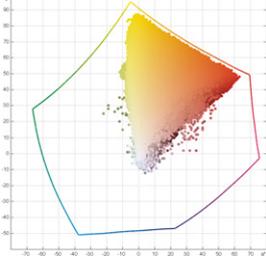
A. Referenzmotive

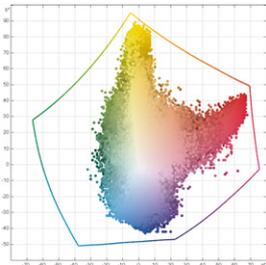
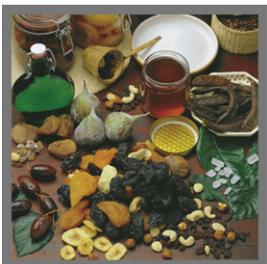
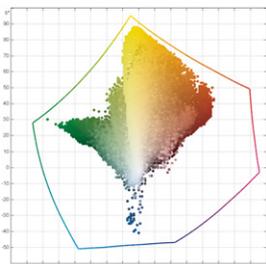
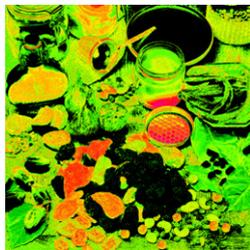
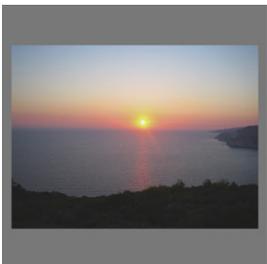
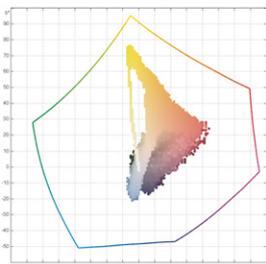
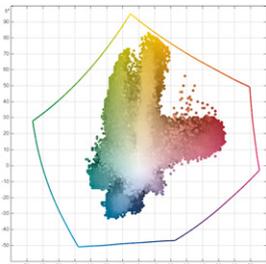
Auf den folgenden Seiten dieses Kapitels sind die Referenzmotive in der Präsentationsreihenfolge des Experiments dargestellt. Ein a^*b^* -Diagramm zeigt ihre CIELAB-Farbverteilung im Vergleich zum Farbumfang der Referenzdruckbedingung.

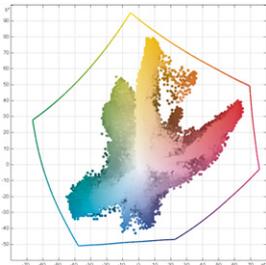
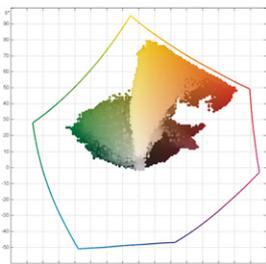
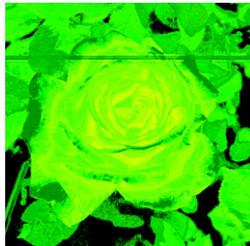
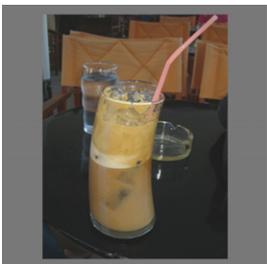
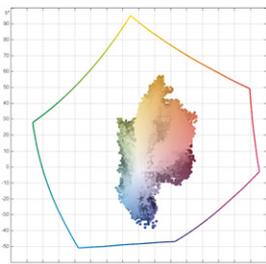
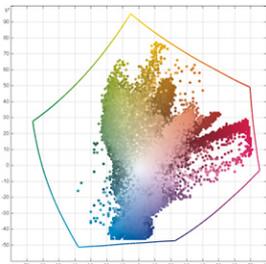
Für farblich modifizierte Proben visualisiert ein ΔE_{00} -Differenzbild die Farbunterschiede zur Referenz nach der in Abbildung A.1 dargestellten Farbskala; zusätzlich ist die verwendete Modifikationsfunktion f_m zusammen mit einer Statistik der künstlich erzeugten Farbunterschiede zwischen den digitalen CIELAB-Bilddateien angegeben.

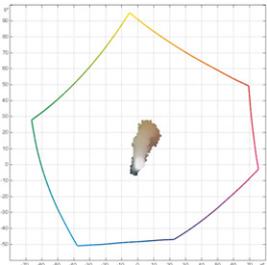
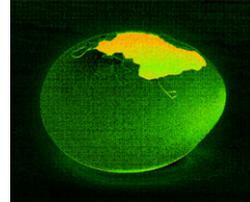
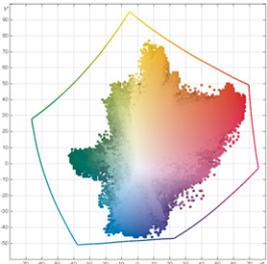
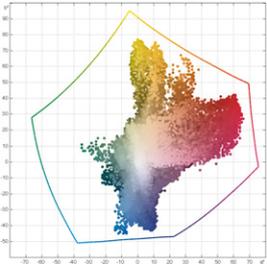
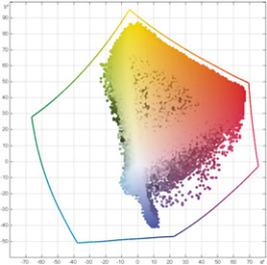


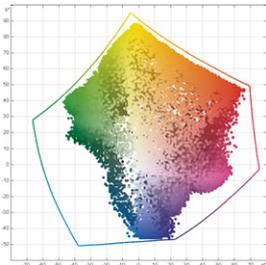
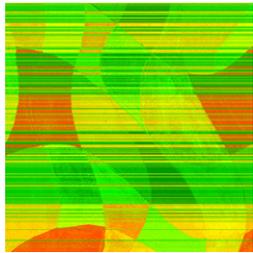
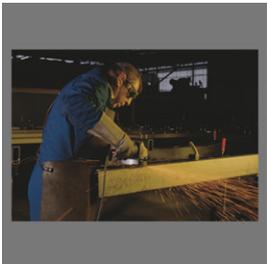
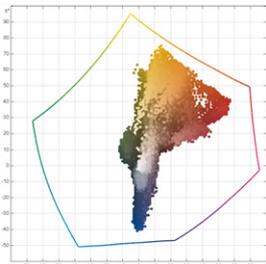
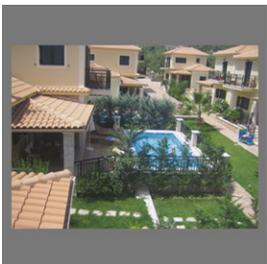
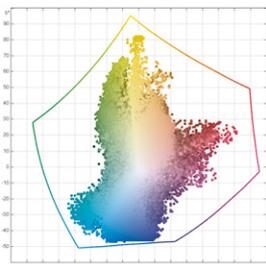
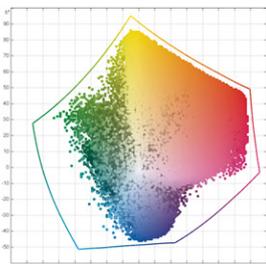
Abbildung A.1: Farbskala zur Visualisierung der ΔE_{00} -Farbunterschiede in Farbdifferenzbildern

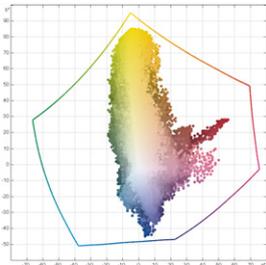
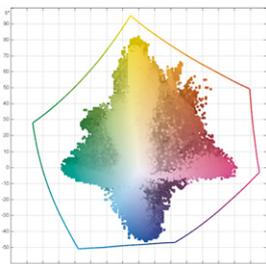
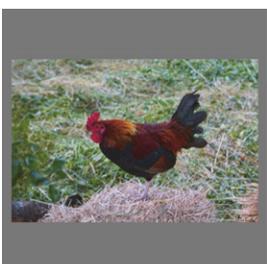
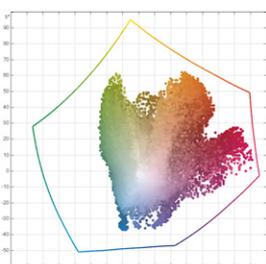
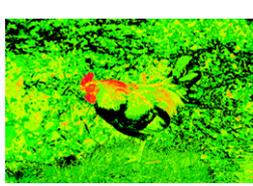
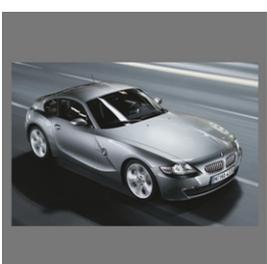
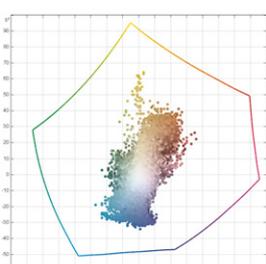
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
01			—	—
02				$+0,50 C_{00}$; $0,54$; $0,48$; $3,10$
03			—	—
04			—	—

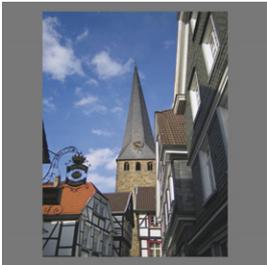
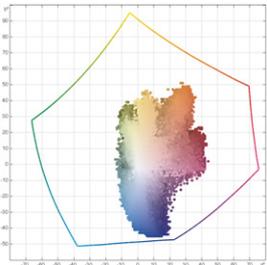
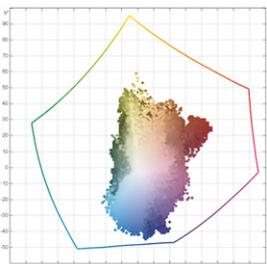
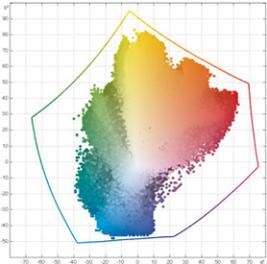
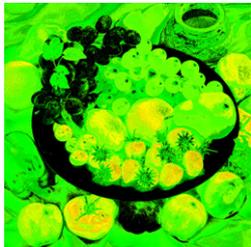
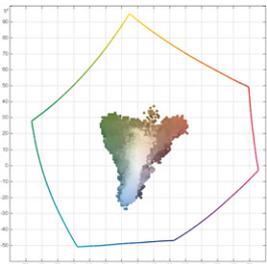
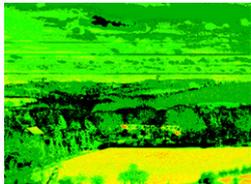
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
05				$+5 h_{00}$; 0,91; 0,81; 4,80
06				$-5 h_{00}$; 1,17; 0,96; 4,70
07			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
08			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

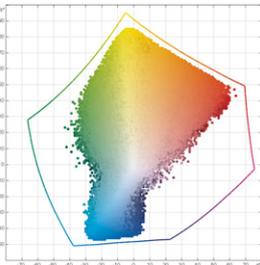
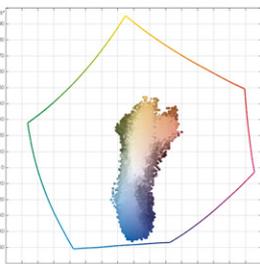
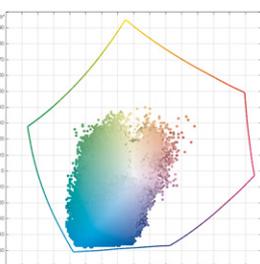
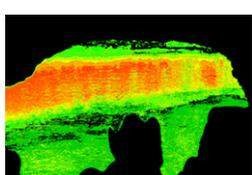
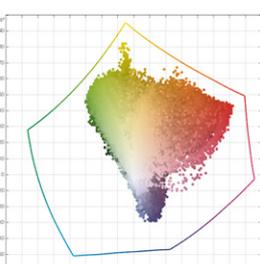
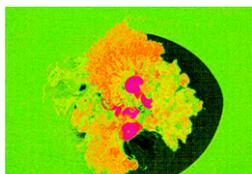
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
09				$-0,75 C_{00}$; 0,89; 0,78; 3,60
10				$-0,5 C_{00}$; 1,03; 0,50; 2,90
11				$-0,75 C_{00}$; 0,76; 0,85; 3,40
12			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

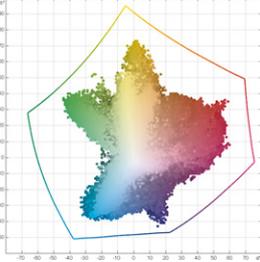
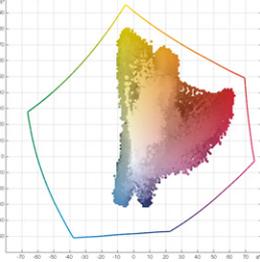
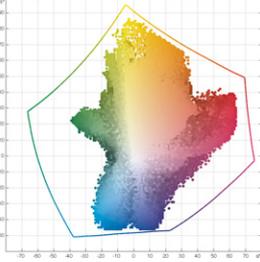
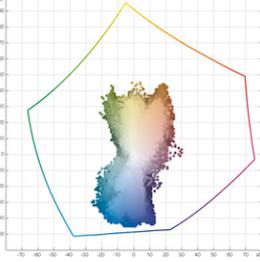
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
13				$+1,00 C_{00}$; 0,35; 0,60; 11,40
14			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
15				$+0,75 C_{00}$; 0,34; 0,57; 3,70
16			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

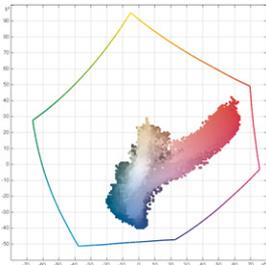
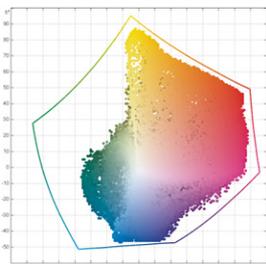
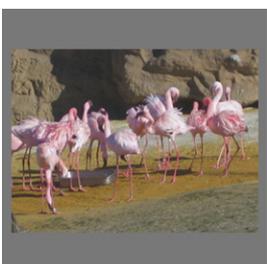
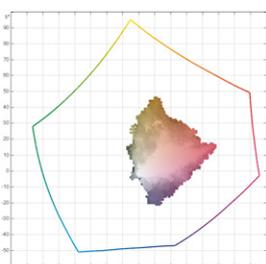
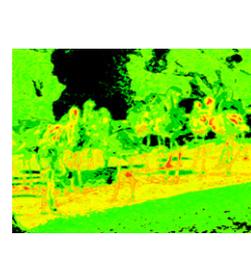
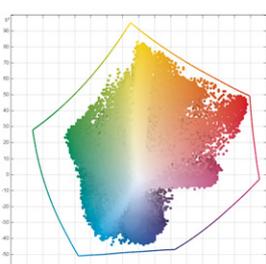
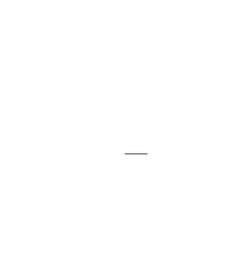
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
17				$-0,75 C_{00}$; 1,52; 0,73; 5,00
18				$-0,75 C_{00}$; 0,70; 0,84; 3,60
19				$+0,50 C_{00}$; 0,57; 0,49; 3,20
20			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

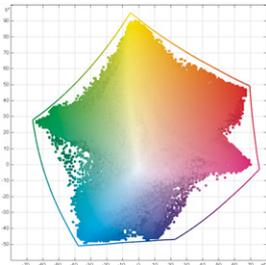
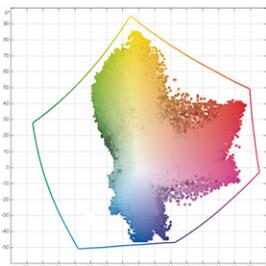
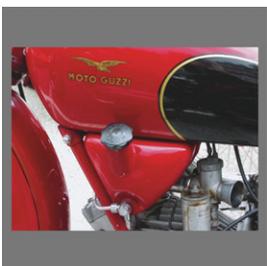
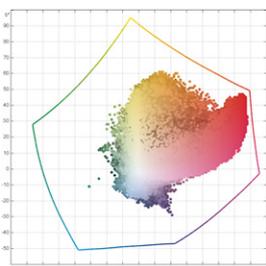
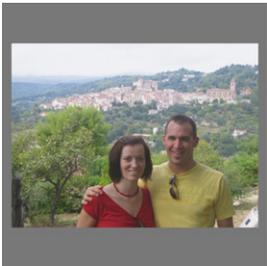
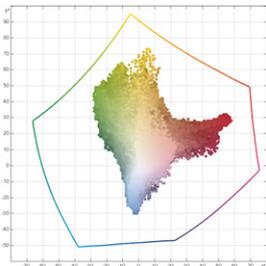
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
21				$+5 h_{00}$; 0,62; 0,73; 4,20
22			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
23				$+5 h_{00}$; 1,05; 0,67; 4,30
24			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

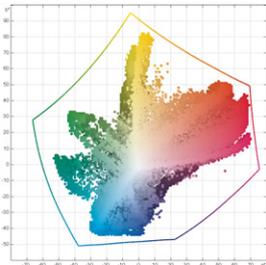
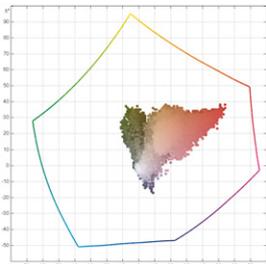
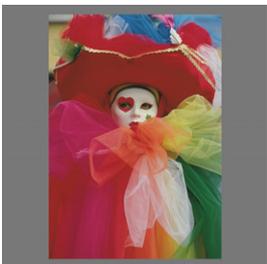
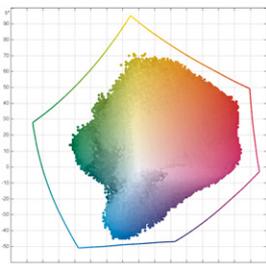
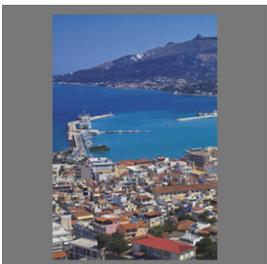
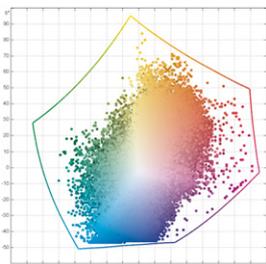
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
25				$-5 h_{00}$; 0,95; 0,86; 4,20
26				$+0,50 C_{00}$; 0,62; 0,54; 3,20
27				$+3 h_{00}$; 1,04; 0,64; 4,10
28				$+1,00 C_{00}$; 0,96; 0,60; 3,50

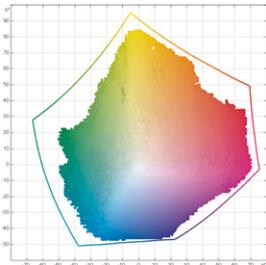
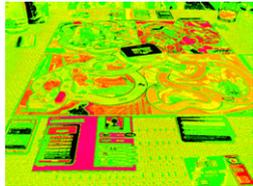
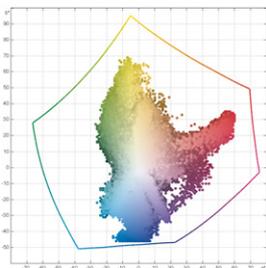
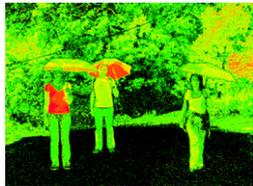
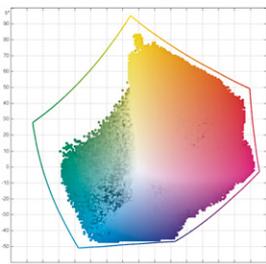
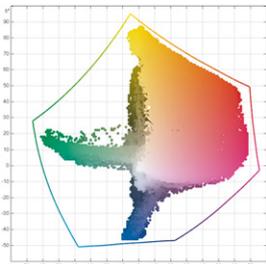
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
29				$-0,75 C_{00}$; 1,26; 0,74; 3,60
30			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
31				$-5 h_{00}$; 0,84; 0,95; 4,20
32				$-5 h_{00}$; 1,46; 0,75; 5,10

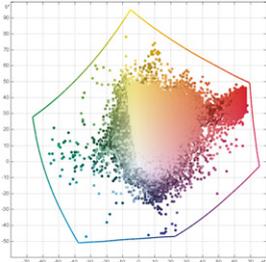
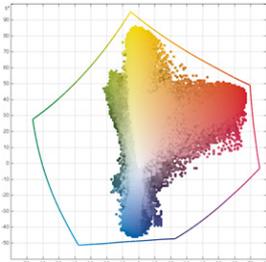
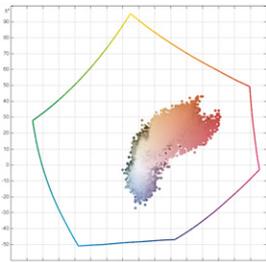
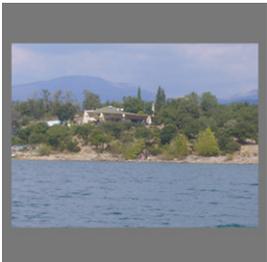
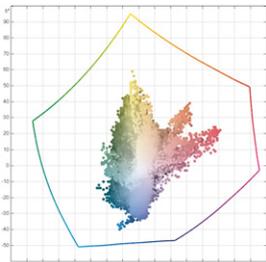
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
33				$-0,75 C_{00}$; 1,22; 0,73; 3,50
34				$-0,50 C_{00}$; 1,11; 0,55; 3,40
35			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
36			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

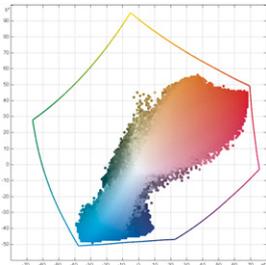
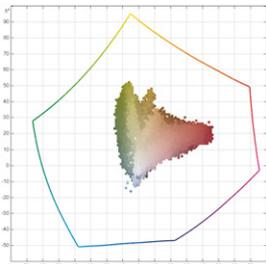
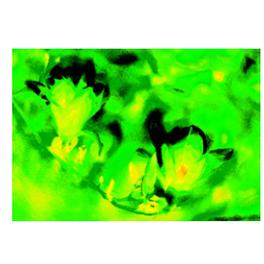
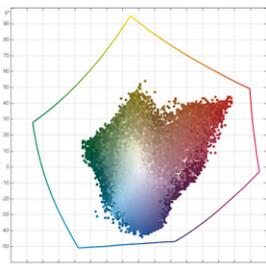
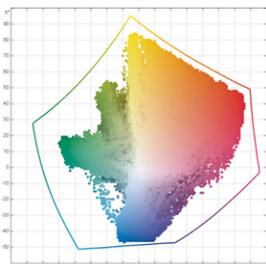
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
37				<p>—</p>
38				<p>—</p>
39				<p>$-5 h_{00}$; 1,30; 0,67; 4,10</p>
40				<p>—</p>

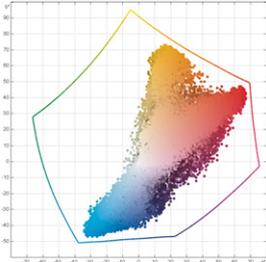
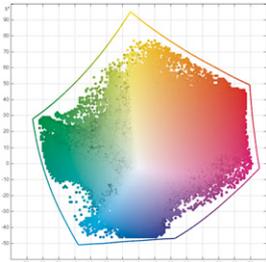
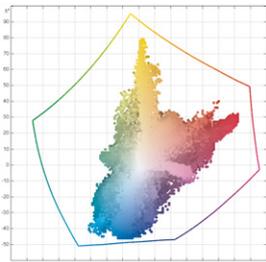
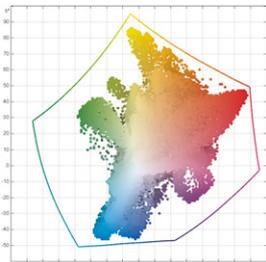
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
41				$-3 h_{00}$; 1,46; 0,74; 3,90
42			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>
43				$-5 h_{00}$; 1,83; 1,51; 4,90
44			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

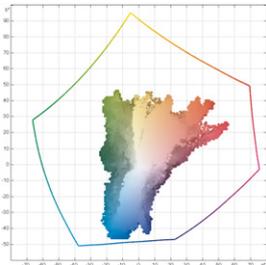
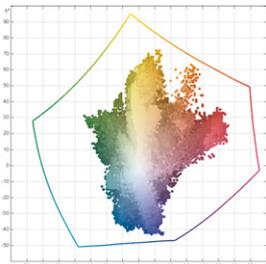
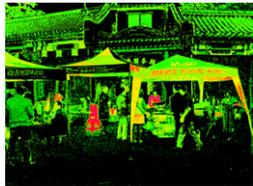
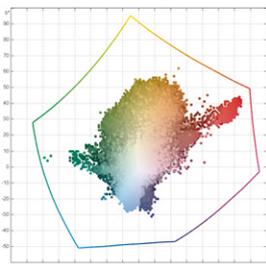
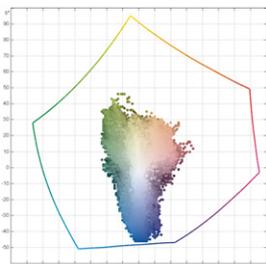
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
45			—	—
46			—	—
47				$-5 h_{00}$; 2,49; 0,96; 5,20
48			—	—

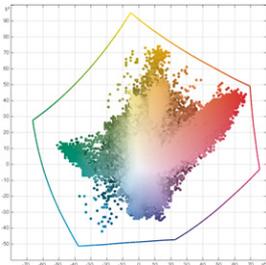
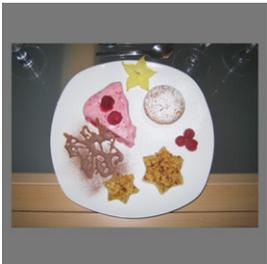
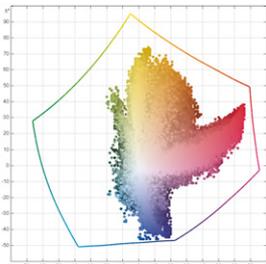
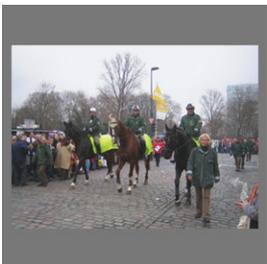
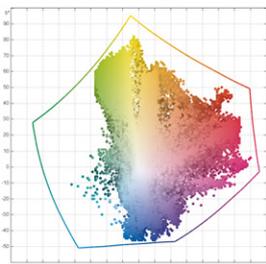
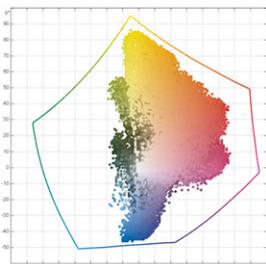
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
49				$-5 h_{00}$; 1,76; 0,71; 5,00
50				$-5 h_{00}$; 0,85; 0,79; 4,30
51				$+5 h_{00}$; 1,07; 1,14; 5,10
52				

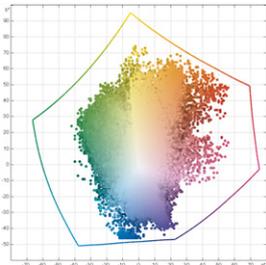
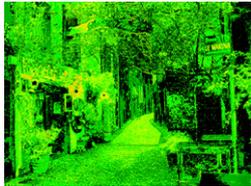
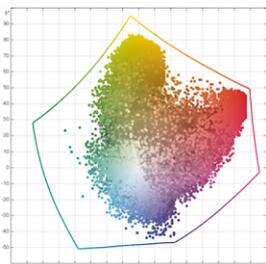
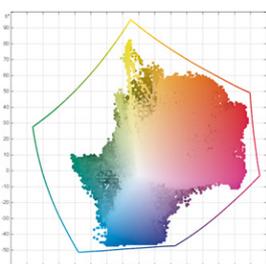
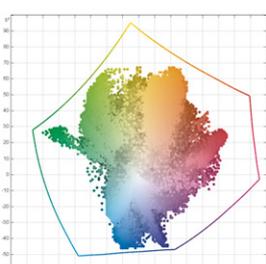
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
53				$-0,75 C_{00}$; 1,10; 0,64; 4,00
54			—	—
55			—	—
56			—	—

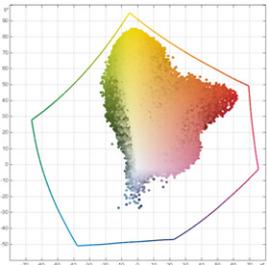
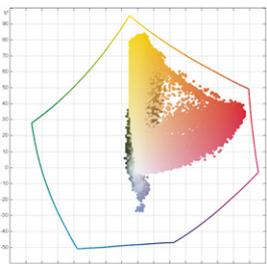
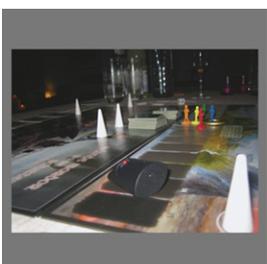
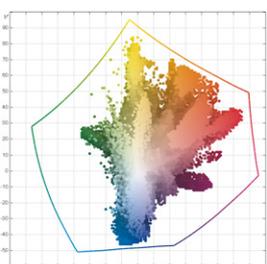
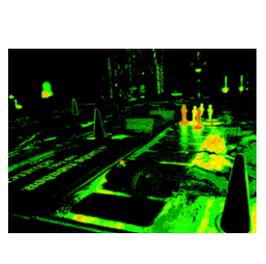
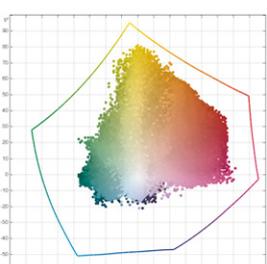
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
57				<p>—</p>
58				<p>+0,75 C_{00}; 1,08; 0,53; 3,50</p>
59				<p>—</p>
60				<p>-5 h_{00}; 1,65; 1,12; 4,90</p>

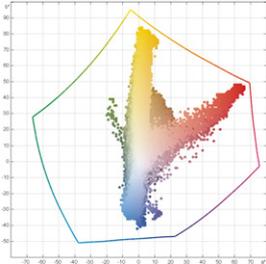
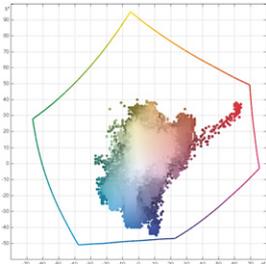
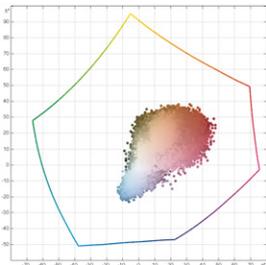
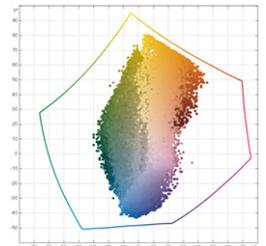
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
61				$-0,75 C_{00}$; 1,32; 0,60; 3,60
62				$-0,75 C_{00}$; 0,73; 0,83; 3,80
63				$+5 h_{00}$; 1,07; 0,72; 4,60
64				$+0,75 C_{00}$; 1,21; 0,70; 3,40

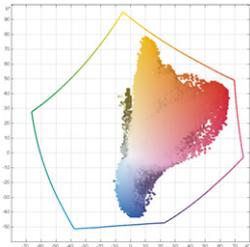
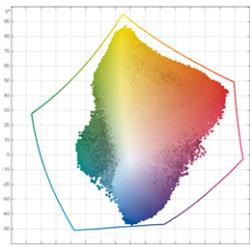
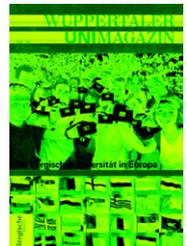
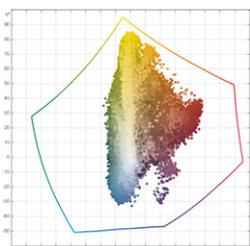
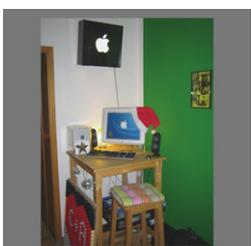
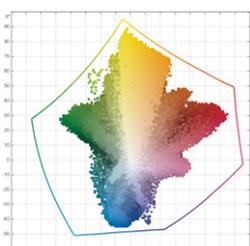
lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
65				$+0,50 C_{00}$; 0,65; 0,42; 2,80
66				$+5 h_{00}$; 0,49; 0,74; 4,90
67				$-0,75 C_{00}$; 0,72; 0,71; 3,50
68				

lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
69			—	—
70			—	—
71				$+5 h_{00}$; 0,35; 0,63; 4,60
72			—	—

lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
73				$+0,75 C_{00}$; 0,75; 0,61; 3,60
74			—	—
75			—	—
76			—	—

lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\overline{\Delta E_{00}}$
77				+3 h_{00} ; 0,79; 0,72; 3,90
78				-5 h_{00} ; 1,27; 1,60; 4,70
79				-0,75 C_{00} ; 0,26; 0,54; 3,50
80				-5 h_{00} ; 1,22; 0,90; 5,10

lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\widehat{\Delta E_{00}}$
81				$+0,75 C_{00}$; 0,73; 0,74; 3,20
82				$+0,75 C_{00}$; 0,86; 0,51; 3,50
83				$-0,50 C_{00}$; 0,64; 0,50; 3,70
84			<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">—</p>

lfd. Nr.	Vorschau	a^*b^* -Diagramm	ΔE_{00} Differenzbild	$\frac{f_m}{\Delta E_{00}}$; $\sigma_{\Delta E_{00}}$; $\frac{\sigma}{\Delta E_{00}}$
85				$-5 h_{00}$; 1,28; 0,78; 4,70
86				$-0,50 C_{00}$; 0,96; 0,59; 3,10
87				$+5 h_{00}$; 1,42; 0,95; 4,60
88				$-0,75 C_{00}$; 1,07; 0,89; 3,60

B. Reproduktion von CIEDE2000-Farbunterschieden der Modifikationsfunktion f_m

Es musste sichergestellt werden, dass die mit Hilfe der Modifikationsfunktion f_m erzeugten ΔE_{00} -Farbunterschiede in der Reproduktionskette auch tatsächlich wiedergegeben werden konnten. Dies trifft vor allem auf Farbunterschiede zu, die durch eine Funktion mit niedrigen Modifikationsparameter (s. Kap. 3.1.2, Formeln 3.1 und 3.2) erzeugt wurden, da diese in ihrer Stärke verhältnismäßig niedrig waren und unter Umständen von material- und/oder prozessbedingten Farbunterschieden hätten überlagert werden können. Sofern festgestellt werden kann, dass derart geringe Farbunterschiede hinreichend genau reproduziert werden konnten, trifft dies ebenfalls auf größere Farbunterschiede zu, die das Ergebnis eines stärkeren Manipulationsparameters sind.

Die folgenden fünf Fälle für f_m wurden untersucht:

Fall 1: $f_m = -0,5 \Delta C_{00}^*$

Fall 2: $f_m = +0,5 \Delta C_{00}^*$

Fall 3: $f_m = -3 \Delta h_{00}$

Fall 4: $f_m = +3 \Delta h_{00}$

Fall 5: $f_m = 0$ (ident. Proben)

Zur Überprüfung wurde das CMYK-Testchart „CMYKkick“ der Firma basICColor [4] mit 336 unterschiedlichen Farbfeldern als TIFF-Datei mit einer Auflösung von 300 ppi verwendet. Die geräteabhängigen CMYK-Farbwerte wurden mit Hilfe von Adobe Photoshop CS4 und dem Farbprofil der Referenzdruckbedingung (ISOcoated_v2_eci.icc) absolut farbmetrisch in den CIELAB-Farbraum konvertiert (s. Abb. B.1). Die CIELAB-Farbwerte der so erzeugten TIFF-Datei stellen somit die Referenz für die hier behandelte Überprüfung dar (s. Tab. B.4 und B.5). Wie in Abbildung B.2 zu erkennen ist, sind die so entstandenen CIELAB-Werte annähernd gleichmäßig über den Farbraum der Referenzdruckbedingung verteilt, sodass eine gute Aussage darüber getroffen werden kann, ob die durch f_m erzeugten Farbunterschiede erwartungsgemäß reproduziert wurden.

Für die Prüfung wurden die CIELAB-Werte des Testcharts für die Referenzdruckbedingung für jeden der oben genannten Fälle 1 bis 4 farblich modifiziert. Insgesamt



Abbildung B.1: TIFF-Datei des CMYKkick-Testcharts im CIELAB-Farbmodus der Referenzdruckbedingung

wurden fünf Vorlagen auf dieselbe Weise erzeugt wie die Probenpaare des Experiments. Vier Vorlagen enthielten zum einen das unmodifizierte CMYKkick-CIELAB-Testchart als Referenz und zum anderen jeweils eine der vier modifizierten Proben. Eine weitere Vorlage enthielt die unmodifizierte CIELAB-Variante sowohl als Referenz als auch als Probe und stellt damit als fünften Fall ein Probenpaar mit identischen Proben dar. Jede Vorlage enthielt zudem den in Kapitel 3.1.2 vorgestellten CIELAB Prüfkeil (s. Abb. 3.10), um zu prüfen, ob diese Testdrucke in der Reproduktionsgenauigkeit denselben geringen Schwankungen ausgesetzt waren wie die Probenpaare des Experiments. Abbildung B.3 zeigt ein CIELAB-Testdruck-Probenpaar mit Prüfkeil (links), dem Referenz-Testchart und dem Probe-Testchart (rechts) für $f_m = +0,5 \Delta C_{00}^*$ (Fall 2).

Die fünf Testdrucke wurden mit Hilfe der Proofsoftware EFI Colorproof XF 4.1 und einem EPSON Stylus Pro 7880 mit Original EPSON Tinten auf EFI Proofing Paper 200g Semimatt hergestellt.¹ Die Kalibrierung und Profilierung des Druckers erfolgte mit einem Spektralfotometer vom Typ i1-Pro und dem automatischen Messtisch i1-iO der Firma X-Rite. Die Auswertung des CIELAB Prüfkeils hat ergeben, dass die durchschnittliche Farbabweichung bei $0,26 \Delta E_{00}$ mit einer Standardabweichung von $0,05 \Delta E_{00}$ zum Mittelwert aller fünf Messungen liegt. Die maximale durchschnittliche Farbabweichung betrug $0,48 \Delta E_{00}$. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 3.1.2 kann darauf geschlossen werden, dass das für die Testdrucke verwendete Proofsystem

¹Aus organisatorischen Gründen konnte nicht auf dasselbe Proofsystem mit dem die Probenpaare für das Experiment hergestellt wurden (s. Kap. 3.1.2) zurück gegriffen werden, weshalb zur Überprüfung ein Proofsystem mit vergleichbaren Komponenten ausgesucht wurde. Beide Proofsysteme unterscheiden sich ausschließlich durch die Proofsoftware und das verwendete Proofpapier, die Drucktechnologie (Druckköpfe) und -mechanik der Drucker sowie die Original-Farbmittel von Epson sind in beiden Fällen gleich.

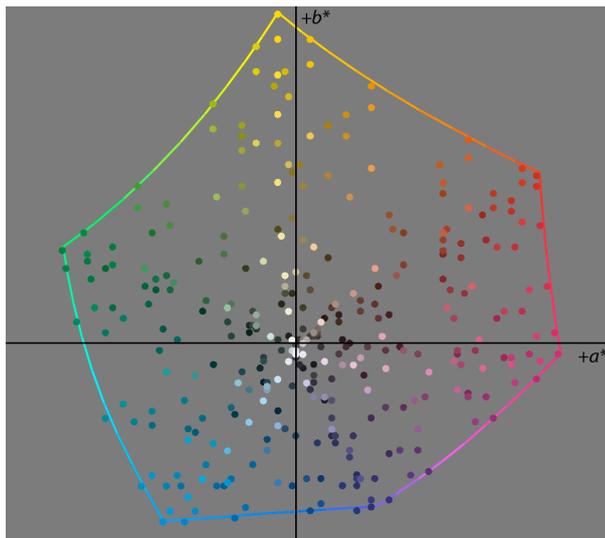


Abbildung B.2: CIELAB-Werte des CMYKkick-Testcharts sowie der Farbumfang der Referenzdruckbedingung im a^*b^* -Diagramm



Abbildung B.3: Probenpaar mit CIELAB Prüfkeil (l.), Referenz-Testchart und Probe-Testchart (r.) für $f_m = +0,5 \Delta C_{00}^*$ (Fall 2)

von der Reproduktionsgenauigkeit gleichwertig zu dem Proofsystem ist, mit dem die Probenpaare für das Experiment hergestellt wurden (vgl. Kap. 3.1.2).

Im Folgenden wird für die fünf Fälle jeweils eine zusammenfassende statistische Auswertung der erwarteten und der tatsächlichen ΔE_{00} -Farbunterschiede gegenübergestellt. Die erwarteten ΔE_{00} -Farbunterschiede wurden aus den CIELAB-Werten der digitalen TIFF-Bilder des entsprechenden Probenpaares berechnet, während die tatsächlichen ΔE_{00} -Farbunterschiede aus den gemessenen CIELAB-Farbwerten des entsprechenden gedruckten Probenpaares berechnet wurden.

Wie in Tabelle B.1 zu erkennen ist, stimmen die tatsächlichen ΔE_{00} -Farbunterschiede mit den erwarteten Werten sehr gut überein. In Fall Nr. 5 (identische Proben) sind Farbunterschiede zwar vorhanden², liegen zum Großteil jedoch deutlich unterhalb der visuellen Wahrnehmungsschwelle von $1,0 \Delta E_{00}$.

²Die festgestellten Farbunterschiede können auf Material-, Prozess- oder Messgerät bedingte Schwankungen zurückgeführt werden.

Tabelle B.2 zeigt eine statistische Auswertung der absoluten Differenzen zwischen den erwarteten und den tatsächlichen ΔE_{00} -Farbunterschieden des CMYKkick-Testcharts für jeden CIELAB-Farbwert x . In allen fünf Fällen sind zum größten Teil nur geringfügige Unterschiede feststellbar, was ein Indiz dafür ist, dass die digitalen Farbwerte mit einer hohen Genauigkeit von dem Proofsystem reproduziert wurden. Dieses Indiz wurde mit Hilfe der Perzentile der absoluten Differenzen näher untersucht. Tabelle B.3 zeigt die ΔE_{00} -Werte für verschiedene Perzentile. Von besonderer Bedeutung sind hier das 95. und 99. Perzentil, da lediglich fünf Prozent, respektive ein Prozent aller 336 Farbfelder des Testcharts, einen größeren Farbabstand besitzen als der Wert des jeweiligen Perzentils.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die mit Hilfe der Modifikationsfunktion f_m erzeugten ΔE_{00} -Farbunterschiede in der Reproduktionskette der Probenpaare des Experiments mit einer hohen Genauigkeit wiedergegeben werden konnten. Aus diesem Grund wird der in dieser Arbeit gewählte Ansatz zur Berechnung der Farbunterschiede verglichener Bildstellen aus digitalen CIELAB-Bilddaten als hinreichend genau eingestuft.

f_m	$\Delta E_{00\text{erwartet}}$			$\Delta E_{00\text{tatsächlich}}$		
	Mittel.	Std.-Abw.	Max.	Mittel.	Std.-Abw.	Max.
$-0,5 \Delta C_{00}^*$	1,13	0,52	2,08	1,19	0,51	2,39
$+0,5 \Delta C_{00}^*$	1,13	0,51	2,13	1,25	0,52	2,42
$-3 \Delta h_{00}$	1,22	0,63	2,54	1,27	0,63	3,04
$+3 \Delta h_{00}$	1,23	0,62	2,43	1,30	0,65	3,22
0 (ident. Proben)	0,00	0,00	0,00	0,25	0,11	0,80

Tabelle B.1: Gegenüberstellung erwarteter und tatsächlicher ΔE_{00} -Werte

f_m	$ \Delta E_{00\text{erwartet}}(x) - \Delta E_{00\text{tatsächlich}}(x) $		
	Mittel.	Std.-Abw.	Max.
$-0,5 \Delta C_{00}^*$	0,17	0,14	0,86
$+0,5 \Delta C_{00}^*$	0,19	0,14	0,82
$-3 \Delta h_{00}$	0,22	0,18	0,94
$+3 \Delta h_{00}$	0,21	0,18	1,22
0 (ident. Proben)	0,25	0,11	0,80

Tabelle B.2: Statistische Auswertung der absoluten Differenzen zwischen erwarteten und tatsächlichen ΔE_{00} -Werten

f_m	Perzentil					
	25	50	75	90	95	99
$-0,5 \Delta C_{00}^*$	0,07	0,14	0,24	0,35	0,41	0,57
$+0,5 \Delta C_{00}^*$	0,09	0,17	0,28	0,38	0,44	0,63
$-3 \Delta h_{00}$	0,09	0,18	0,30	0,47	0,58	0,83
$+3 \Delta h_{00}$	0,07	0,16	0,28	0,43	0,53	0,74
0 (ident. Proben)	0,18	0,24	0,31	0,38	0,44	0,55

Tabelle B.3: Perzentile der absoluten Differenzen zwischen erwarteten und tatsächlichen ΔE_{00} -Werten

SampleID	Sample_Name	LAB_L	LAB_A	LAB_B	SampleID	Sample_Name	LAB_L	LAB_A	LAB_B
1	A1	94,90	0,00	-2,00	85	D13	75,69	25,00	3,00
2	A2	42,35	-32,00	2,00	86	D14	52,94	41,00	46,00
3	A3	38,04	54,00	-14,00	87	D15	38,04	59,00	-3,00
4	A4	23,53	1,00	-26,00	88	D16	30,59	18,00	13,00
5	A5	40,00	-25,00	13,00	89	D17	47,06	68,00	48,00
6	A6	43,53	61,00	41,00	90	D18	63,14	-36,00	-7,00
7	A7	87,45	7,00	7,00	91	D19	48,63	-31,00	-16,00
8	A8	52,16	-4,00	-38,00	92	D20	31,76	42,00	19,00
9	A9	73,73	-23,00	61,00	93	D21	11,37	9,00	7,00
10	A10	23,92	22,00	-46,00	94	D22	46,27	-57,00	23,00
11	A11	26,27	9,00	24,00	95	D23	76,86	-19,00	11,00
12	A12	29,02	26,00	-1,00	96	D24	45,88	-40,00	31,00
13	A13	51,37	-40,00	-18,00	97	E1	36,86	4,00	19,00
14	A14	58,04	6,00	-15,00	98	E2	49,41	63,00	50,00
15	A15	61,57	-18,00	-38,00	99	E3	79,61	-13,00	-22,00
16	A16	50,20	-13,00	-12,00	100	E4	15,69	-10,00	-7,00
17	A17	71,76	20,00	-13,00	101	E5	89,41	-5,00	85,00
18	A18	10,59	-8,00	-10,00	102	E6	29,80	35,00	-29,00
19	A19	34,51	8,00	-45,00	103	E7	56,08	46,00	-13,00
20	A20	53,33	-1,00	49,00	104	E8	24,31	7,00	-37,00
21	A21	27,84	13,00	-3,00	105	E9	41,57	-18,00	-18,00
22	A22	47,84	74,00	-3,00	106	E10	90,98	0,00	-2,00
23	A23	50,59	68,00	3,00	107	E11	47,84	-19,00	26,00
24	A24	11,76	3,00	-6,00	108	E12	53,73	42,00	32,00
25	B1	77,65	-2,00	77,00	109	E13	11,37	9,00	-15,00
26	B2	49,41	7,00	4,00	110	E14	54,12	0,00	36,00
27	B3	52,94	-32,00	-37,00	111	E15	7,84	6,00	-6,00
28	B4	40,39	49,00	-15,00	112	E16	15,29	13,00	9,00
29	B5	85,88	6,00	27,00	113	E17	47,06	-53,00	4,00
30	B6	27,45	18,00	-37,00	114	E18	63,14	8,00	-14,00
31	B7	31,76	-11,00	6,00	115	E19	63,53	10,00	-24,00
32	B8	50,20	-36,00	-40,00	116	E20	30,98	5,00	2,00
33	B9	47,84	-20,00	31,00	117	E21	31,76	26,00	-17,00
34	B10	38,04	55,00	-21,00	118	E22	46,27	57,00	28,00
35	B11	71,37	-5,00	57,00	119	E23	76,47	26,00	-7,00
36	B12	39,61	-41,00	12,00	120	E24	47,06	61,00	-4,00
37	B13	83,53	4,00	-11,00	121	F1	71,37	22,00	73,00
38	B14	38,43	35,00	-2,00	122	F2	26,27	2,00	11,00
39	B15	27,84	16,00	-32,00	123	F3	14,90	16,00	1,00
40	B16	19,61	11,00	-26,00	124	F4	37,25	54,00	30,00
41	B17	49,02	-50,00	22,00	125	F5	93,33	-2,00	19,00
42	B18	54,90	-37,00	-50,00	126	F6	45,10	-18,00	-37,00
43	B19	16,08	0,00	0,00	127	F7	20,39	-23,00	-5,00
44	B20	43,14	-12,00	-33,00	128	F8	74,12	-5,00	-23,00
45	B21	16,08	-13,00	5,00	129	F9	44,31	66,00	-3,00
46	B22	83,92	-11,00	77,00	130	F10	36,86	31,00	31,00
47	B23	25,10	7,00	-28,00	131	F11	69,41	-13,00	37,00
48	B24	52,94	41,00	50,00	132	F12	92,94	3,00	-3,00
49	C1	94,12	-1,00	9,00	133	F13	63,92	12,00	12,00
50	C2	19,61	-1,00	1,00	134	F14	93,33	-1,00	-4,00
51	C3	49,80	64,00	35,00	135	F15	67,45	-7,00	-13,00
52	C4	67,84	16,00	42,00	136	F16	22,75	0,00	0,00
53	C5	43,53	62,00	27,00	137	F17	52,94	-58,00	26,00
54	C6	90,98	1,00	-2,00	138	F18	18,82	24,00	17,00
55	C7	39,22	42,00	26,00	139	F19	76,08	0,00	-2,00
56	C8	50,20	-24,00	-33,00	140	F20	47,84	31,00	-1,00
57	C9	21,18	0,00	15,00	141	F21	43,53	-25,00	-21,00
58	C10	82,35	2,00	0,00	142	F22	36,86	53,00	37,00
59	C11	65,49	14,00	-5,00	143	F23	61,96	0,00	-2,00
60	C12	41,57	-35,00	20,00	144	F24	52,55	-59,00	32,00
61	C13	73,33	-7,00	-12,00	145	G1	49,41	63,00	46,00
62	C14	27,06	12,00	-25,00	146	G2	45,49	56,00	43,00
63	C15	72,55	22,00	49,00	147	G3	66,27	-25,00	-38,00
64	C16	88,63	-6,00	2,00	148	G4	58,82	2,00	45,00
65	C17	34,90	-2,00	15,00	149	G5	92,16	-4,00	31,00
66	C18	29,41	31,00	-18,00	150	G6	21,96	13,00	7,00
67	C19	83,53	-11,00	84,00	151	G7	24,71	-3,00	-2,00
68	C20	30,59	19,00	10,00	152	G8	46,67	-39,00	19,00
69	C21	44,31	67,00	-10,00	153	G9	25,10	23,00	-37,00
70	C22	32,94	-2,00	-24,00	154	G10	39,22	-27,00	24,00
71	C23	48,63	-51,00	28,00	155	G11	18,82	26,00	8,00
72	C24	59,61	51,00	1,00	156	G12	19,61	2,00	-6,00
73	D1	22,75	4,00	-12,00	157	G13	61,57	5,00	4,00
74	D2	55,69	45,00	-5,00	158	G14	91,37	-4,00	46,00
75	D3	36,86	46,00	28,00	159	G15	39,61	-42,00	16,00
76	D4	24,31	-4,00	2,00	160	G16	65,10	-30,00	-27,00
77	D5	36,86	47,00	25,00	161	G17	22,75	27,00	-31,00
78	D6	74,51	-2,00	16,00	162	G18	58,04	-34,00	-47,00
79	D7	30,20	-18,00	3,00	163	G19	32,16	49,00	-13,00
80	D8	47,84	71,00	16,00	164	G20	27,45	11,00	-20,00
81	D9	32,55	4,00	-47,00	165	G21	52,16	-52,00	-20,00
82	D10	36,08	-27,00	-24,00	166	G22	24,31	7,00	3,00
83	D11	39,61	18,00	-37,00	167	G23	61,18	-41,00	22,00
84	D12	50,20	-64,00	22,00	168	G24	84,71	0,00	-2,00

Tabelle B.4: CIELAB-Werte des CMYKkick-Testcharts für die Referenzdruckbedingung (Teil 1)

SampleID	Sample_Name	LAB_L	LAB_A	LAB_B	SampleID	Sample_Name	LAB_L	LAB_A	LAB_B
169	H1	22,75	1,00	-3,00	253	K13	50,20	66,00	16,00
170	H2	61,96	-30,00	-43,00	254	K14	23,53	18,00	-40,00
171	H3	49,80	-47,00	7,00	255	K15	67,06	15,00	59,00
172	H4	56,47	3,00	2,00	256	K16	51,76	-7,00	-29,00
173	H5	29,41	-7,00	-10,00	257	K17	32,16	0,00	-40,00
174	H6	15,69	-4,00	-19,00	258	K18	40,00	46,00	-2,00
175	H7	23,14	11,00	-28,00	259	K19	40,78	-51,00	10,00
176	H8	56,86	48,00	58,00	260	K20	74,12	23,00	21,00
177	H9	36,47	0,00	-1,00	261	K21	56,86	-39,00	-36,00
178	H10	26,27	3,00	1,00	262	K22	47,45	69,00	34,00
179	H11	12,55	-1,00	3,00	263	K23	31,76	-12,00	10,00
180	H12	26,67	4,00	3,00	264	K24	73,73	-23,00	68,00
181	H13	27,06	11,00	10,00	265	L1	60,39	-22,00	-28,00
182	H14	20,00	17,00	-36,00	266	L2	10,59	14,00	1,00
183	H15	46,67	59,00	10,00	267	L3	45,88	-13,00	-46,00
184	H16	23,14	-10,00	4,00	268	L4	72,55	4,00	2,00
185	H17	26,27	6,00	-9,00	269	L5	84,71	-10,00	57,00
186	H18	24,71	-1,00	-11,00	270	L6	18,82	29,00	0,00
187	H19	86,67	-9,00	24,00	271	L7	32,16	-8,00	-5,00
188	H20	59,61	3,00	29,00	272	L8	34,51	-37,00	5,00
189	H21	45,88	56,00	39,00	273	L9	30,59	-15,00	-8,00
190	H22	44,71	47,00	-5,00	274	L10	70,98	19,00	-3,00
191	H23	68,63	-14,00	55,00	275	L11	28,63	24,00	8,00
192	H24	80,78	0,00	21,00	276	L12	77,65	-2,00	70,00
193	I1	83,92	4,00	59,00	277	L13	34,12	4,00	-38,00
194	I2	31,37	41,00	26,00	278	L14	25,49	26,00	-43,00
195	I3	20,78	-17,00	-20,00	279	L15	42,35	-40,00	-23,00
196	I4	45,88	27,00	33,00	280	L16	89,80	-4,00	-9,00
197	I5	61,96	-15,00	59,00	281	L17	68,63	38,00	-7,00
198	I6	37,65	51,00	-2,00	282	L18	50,98	69,00	-4,00
199	I7	60,39	-43,00	39,00	283	L19	83,14	4,00	78,00
200	I8	46,27	-56,00	18,00	284	L20	34,51	-39,00	15,00
201	I9	71,76	22,00	67,00	285	L21	73,33	-18,00	-29,00
202	I10	57,65	49,00	39,00	286	L22	8,63	0,00	2,00
203	I11	69,80	17,00	15,00	287	L23	28,24	-11,00	5,00
204	I12	85,10	-8,00	-15,00	288	L24	25,88	17,00	-46,00
205	I13	32,16	33,00	-36,00	289	M1	24,71	17,00	-25,00
206	I14	71,37	-11,00	8,00	290	M2	37,25	31,00	22,00
207	I15	56,08	-35,00	34,00	291	M3	41,18	-30,00	-24,00
208	I16	53,73	-27,00	-47,00	292	M4	61,57	10,00	48,00
209	I17	27,84	22,00	-44,00	293	M5	47,06	62,00	-11,00
210	I18	32,16	30,00	-30,00	294	M6	22,35	15,00	0,00
211	I19	65,88	-11,00	6,00	295	M7	42,75	43,00	33,00
212	I20	47,06	68,00	44,00	296	M8	28,63	23,00	11,00
213	I21	47,84	73,00	4,00	297	M9	60,00	52,00	-7,00
214	I22	43,92	-31,00	-40,00	298	M10	42,35	-22,00	-40,00
215	I23	43,14	-17,00	-49,00	299	M11	11,37	-13,00	4,00
216	I24	23,14	-8,00	-3,00	300	M12	24,31	11,00	-10,00
217	J1	27,06	0,00	0,00	301	M13	78,82	-2,00	51,00
218	J2	40,00	-38,00	-1,00	302	M14	83,14	16,00	-6,00
219	J3	48,63	33,00	-15,00	303	M15	89,02	-5,00	93,00
220	J4	56,86	48,00	53,00	304	M16	24,31	8,00	0,00
221	J5	39,61	43,00	16,00	305	M17	45,49	27,00	37,00
222	J6	38,43	11,00	-16,00	306	M18	48,63	-17,00	12,00
223	J7	37,65	57,00	8,00	307	M19	42,35	42,00	42,00
224	J8	54,90	43,00	10,00	308	M20	32,16	46,00	-2,00
225	J9	38,82	42,00	30,00	309	M21	48,63	-45,00	-21,00
226	J10	62,75	-14,00	44,00	310	M22	38,82	37,00	-15,00
227	J11	15,69	-3,00	12,00	311	M23	46,67	28,00	20,00
228	J12	49,02	35,00	-23,00	312	M24	39,22	15,00	-30,00
229	J13	94,90	0,00	1,00	313	N1	53,73	-43,00	-39,00
230	J14	40,39	-52,00	22,00	314	N2	31,37	-7,00	-26,00
231	J15	54,90	61,00	-6,00	315	N3	41,96	-34,00	15,00
232	J16	34,12	-4,00	33,00	316	N4	88,63	9,00	-5,00
233	J17	50,59	-61,00	6,00	317	N5	25,88	2,00	5,00
234	J18	89,80	-5,00	76,00	318	N6	22,75	21,00	-20,00
235	J19	56,86	-33,00	18,00	319	N7	27,45	-13,00	22,00
236	J20	58,82	-28,00	-9,00	320	N8	37,25	48,00	15,00
237	J21	30,20	-18,00	7,00	321	N9	66,67	15,00	65,00
238	J22	50,98	-30,00	-50,00	322	N10	60,78	10,00	62,00
239	J23	70,59	-5,00	73,00	323	N11	40,78	50,00	-22,00
240	J24	60,39	-44,00	45,00	324	N12	68,24	-15,00	62,00
241	K1	90,20	-5,00	64,00	325	N13	53,33	-55,00	10,00
242	K2	43,92	45,00	7,00	326	N14	43,53	61,00	37,00
243	K3	21,96	5,00	-11,00	327	N15	21,57	2,00	2,00
244	K4	82,75	4,00	86,00	328	N16	14,51	20,00	-9,00
245	K5	58,43	2,00	51,00	329	N17	55,29	-48,00	-17,00
246	K6	43,92	64,00	10,00	330	N18	50,20	-65,00	27,00
247	K7	29,80	38,00	-36,00	331	N19	37,25	-19,00	-40,00
248	K8	78,82	-15,00	-10,00	332	N20	58,82	50,00	17,00
249	K9	37,25	6,00	4,00	333	N21	25,88	13,00	-40,00
250	K10	55,69	-35,00	40,00	334	N22	30,98	21,00	0,00
251	K11	74,90	-22,00	42,00	335	N23	36,86	5,00	15,00
252	K12	20,78	-26,00	10,00	336	N24	94,90	0,00	-2,00

Tabelle B.5: CIELAB-Werte des CMYKick-Testcharts für die Referenzdruckbedingung (Teil 2)

C. Wahrnehmungsschwelle und Urteilsvermögen der Probanden

Es konnte festgestellt werden, dass in dem Experiment kein Proband in der Lage war, für alle abgemusterten Probenpaare immer die erwartungsgemäße Bewertung abzugeben, also in jedem Fall „*richtig*“ zu bewerten, ob die Probe zur Referenz identisch oder unterschiedlich war. Aus diesem Grund musste untersucht werden, ob die Ursachen für „*falsche*“ Bewertungen in der subjektiven Wahrnehmungsschwelle des Probanden zu suchen waren oder ob ein unzureichendes Urteilsvermögen vorlag. Da die subjektive Wahrnehmungsschwelle im Rahmen dieses Experiments nicht zuverlässig bestimmt werden konnte, wird sich im Folgenden auf das Urteilsvermögen der Probanden beschränkt.

Sofern dem Urteilsvermögen eines Probanden nicht hinreichend vertraut werden konnte, mussten dessen Bewertungen und die aus dem Eye-Tracker Experiment gewonnenen Daten von der Analyse ausgeschlossen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

Urteilsvermögen und Fehlerquote

Je mehr richtige Bewertungen ein Proband während des Experiments abgab, desto stärker konnte ihm prinzipiell in seinem Urteilsvermögen vertraut werden und umgekehrt. Für jeden Probanden wurde eine Fehlerquote (*FQ*) berechnet, die zum Ausdruck brachte, in wieviel Prozent aller abgemusterten Probenpaare eine falsche Bewertung abgegeben wurde.

Da in dem Experiment zwei unterschiedliche Arten von Probenpaaren verwendet wurden – einerseits mit unmodifizierten Proben (*identisch*) und andererseits mit modifizierten Proben (*unterschiedlich*) – musste die Fehlerquote für beide Fälle separat berechnet werden. Andernfalls konnte nicht eindeutig festgestellt werden, ob die falschen Bewertungen nicht doch von der subjektiven Wahrnehmungsschwelle des Probanden herrührten.

Nach Gleichung C.1 wurde die Fehlerquote für alle abgemusterten Probenpaare mit den zur Referenz identischen Proben berechnet. Eine falsche Bewertung lag dann vor, wenn eine andere Qualitätsstufe als „*absolut identisch*“ geäußert wurde.

$$FQ_{\text{identisch}} = \frac{\sum \text{abgem. identische Probenpaare} \neq \text{„absolut identisch“}}{\sum \text{abgem. identische Probenpaare}} \cdot 100 \% \quad (\text{C.1})$$

Nach Gleichung C.2 wurde die Fehlerquote für alle abgemusterten Probenpaare mit den zur Referenz nicht identischen Proben berechnet. Eine falsche Bewertung lag dann vor, wenn die Qualitätsstufe „*absolut identisch*“ geäußert wurde.

$$FQ_{\text{nicht identisch}} = \frac{\sum \text{abgem. unterschiedliche Probenpaare} = \text{„absolut identisch“}}{\sum \text{abgem. unterschiedliche Probenpaare}} \cdot 100\% \quad (\text{C.2})$$

Nach den Gleichungen C.1 und C.2 ergeben sich aus den Bewertungen der Probanden die in Tabelle C.1 aufgeführten Fehlerquoten.

Proband	$FQ_{\text{identisch}}$ [%]	$FQ_{\text{nicht identisch}}$ [%]	Durchschnittliche Fehlerquote [%]
AH1972	30,6	34,6	32,60
AH1977	36,1	19,2	27,65
BB1956	25,0	17,3	21,15
BB1965	13,9	51,9	32,90
BS1981	38,9	5,8	22,35
CB1967	0,0	65,4	32,70
CJ1975	11,1	25,0	18,05
CS1964	36,1	6,5	21,30
DA1979	5,6	56,5	31,05
DB1981	33,3	37,0	35,15
DM1980	19,4	26,9	23,15
JB1965	58,3	1,9	30,10
JS1983	27,8	44,2	36,00
LM1983	5,6	65,4	35,50
MB1976	36,1	28,8	32,45
MH1969	8,3	21,2	14,75
MR1971	41,7	26,9	34,30
OS1975	50,0	17,3	33,65
SH1966	22,2	3,8	13,00
SH1981	41,7	50,0	45,85
SL1979	5,6	42,3	23,95
TK1969	34,3	31,8	33,05
YM1982	5,6	7,7	6,65

Tabelle C.1: Fehlerquoten und vermutete subjektive Wahrnehmungsschwellen der Probanden

Ausschluss von Probanden mit unzureichendem Urteilsvermögen

Mit Hilfe der beiden Fehlerquoten lassen sich somit Rückschlüsse auf das Urteilsvermögen eines Probanden ziehen. Generell kann angenommen werden, dass ein Proband in der Lage war die Probenpaare sehr treffsicher zu beurteilen je niedriger die Fehlerquote ist. Eine Fehlerquote von 50 % oder höher ist dagegen ein Indiz dafür, dass bei der Bewertung offensichtlich das Zufallsprinzip zur Anwendung gekommen ist.

Probanden, die in beiden Fällen eine niedrige Fehlerquote aufweisen, waren offensichtlich in der Lage sehr exakt festzustellen, wann es sich um identische oder um unterschiedliche Proben handelte; das beste Ergebnis mit einer durchschnittlichen Fehlerquote von 6,65 % erzielte Proband YM1982.

Probanden, die in beiden Fällen eine sehr hohe Fehlerquote aufweisen, waren offensichtlich kaum in der Lage festzustellen, wann es sich um identische oder um unterschiedliche Proben handelte; das schlechteste Ergebnis mit einer durchschnittlichen Fehlerquote von 45,85 % erzielte Proband SH1981.

Von Interesse sind vor allem diejenigen Fälle, in denen eine der beiden Fehlerquoten niedrig und die andere hoch ist, da damit eine Vermutung über die Ausprägung der subjektiven Wahrnehmungsschwelle angestellt werden kann.

Probanden, die eine niedrige Fehlerquote bei unterschiedlichen Proben haben, sind offensichtlich in der Lage die vorhandenen Farbunterschiede gut zu identifizieren. Haben diese Probanden jedoch gleichzeitig eine hohe Fehlerquote bei identischen Proben, so könnte dies daran liegen, dass sie entweder in der Lage sind geringfügige Schwankungen aus dem Proof-Druckprozess wahrzunehmen, was auf eine vergleichsweise niedrige Wahrnehmungsschwelle zurückzuführen sein könnte. Eine weitere Erklärung wäre jedoch, dass die Bewertung nach dem Zufallsprinzip vorgenommen wurde, falls kein Farbunterschied wahrgenommen werden konnte. Beispielfür diese Kategorie sei Proband JB1965 erwähnt, der eine sehr hohe Fehlerquote von 58,3 % für identische Proben aufweist, dagegen jedoch eine äußerst geringe Fehlerquote von 1,9 % für unterschiedliche Proben aufweist.

Probanden, die eine hohe Fehlerquote bei unterschiedlichen Proben haben, hatten anscheinend Schwierigkeiten die vorhandenen Farbunterschiede zu identifizieren. Wenn diese Probanden gleichzeitig eine sehr niedrige Fehlerquote bei identischen Proben aufweisen, könnte dies darauf zurückzuführen sein, dass diese eine vergleichsweise niedrige Wahrnehmungsschwelle für Farbunterschiede besitzen. Ein weiterer Erklärungsansatz ist jedoch auch hier, dass im Zweifel die Bewertung nach dem Zufallsprinzip vorgenommen wurde. Da diese Probandengruppe für die weitere Auswertung, die ausschließlich auf den Bewertungen der unterschiedlichen Proben aufbaut, jedoch entscheidend ist, müssen diejenigen Probanden ausgeschlossen werden, denen in ihrem Urteilsvermögen nicht hinreichend vertraut werden kann. Dies ist, wie bereits oben genannt, der Fall, wenn die Fehlerquote 50,0 % oder höher ist; zutreffend auf die Probanden BB1965, CB1967, DA1979, LM1983 und SH1981.

Aus diesem Grund wurden die Daten der in Tabelle C.1 rot dargestellten Probanden von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

D. Zuordnung der Farbunterschiede zu den Qualitätsbewertungen

Tabellen D.1 und D.2 zeigen die von den Probanden für das jeweilige Probenpaar geäußerten Qualitätsbewertungen.

Für eine verkürzte Schreibweise der Bewertungsstufen in den Tabellen wurde folgendes Schema verwendet:

- 0 = „*absolut identisch*“,
- 1 = „*akzeptabel*“,
- 2 = „*inakzeptabel*“.

Tabellen D.3 bis D.8 zeigen die von den Probanden wahrgenommenen durchschnittlichen und maximalen ΔE_{00} Farbabstände aller verglichenen Bildstellen für das jeweilige Probenpaar.

Probenpaar	AH1972	AH1977	BB1956	BB1965	BS1981	CB1967	CJ1975	CS1964	DA1979	DB1981	DM1980	JB1965
01	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
02	2	1	1	1	2	0	2	1	1	2	0	1
03	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
04	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
05	1	0	2	0	1	0	1	2	1	1	1	1
06	1	2	1	0	2	0	1	-	-	-	1	2
07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09	1	2	2	1	2	1	1	1	0	2	2	2
10	1	2	2	1	2	0	1	-	-	-	2	2
11	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	2
12	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
13	1	1	2	0	2	0	1	1	1	1	0	1
14	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
16	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1
17	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	2
18	2	1	2	1	2	0	2	2	1	1	2	2
19	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	2	1
20	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
21	1	2	1	0	2	1	1	1	0	1	1	2
22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
23	0	1	1	0	2	1	1	2	0	2	0	1
24	1	0	0	0	2	0	0	1	1	0	1	0
25	1	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1
26	1	0	0	0	1	1	0	2	0	1	0	0
27	0	1	0	1	2	0	1	2	0	1	1	1
28	1	1	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1
29	0	1	2	1	2	0	2	2	1	0	2	2
30	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
31	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1
32	0	1	0	0	2	0	1	2	1	0	0	1
33	1	2	1	1	2	1	1	-	-	-	2	1
34	0	1	1	0	2	0	0	1	0	0	2	1
35	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
36	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
39	1	2	1	0	2	0	1	1	0	1	1	1
40	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
41	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1
42	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
43	2	2	2	1	2	1	2	-	-	-	2	2
44	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1
45	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
46	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
47	1	2	2	1	2	1	2	2	1	1	2	2
48	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1
49	1	2	1	1	1	0	1	-	-	-	0	1
50	0	2	1	1	2	0	1	1	1	2	1	2
51	2	2	1	0	2	1	1	2	1	2	2	1
52	1	2	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
53	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2
54	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
55	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
56	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
57	0	1	0	1	1	0	1	0	0	2	0	1
58	0	2	1	0	2	0	0	1	0	0	0	2
59	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
60	1	2	1	1	2	1	1	2	0	2	2	1
61	0	2	2	1	2	0	1	2	0	1	1	2
62	1	2	1	1	2	0	2	2	1	0	2	1
63	1	0	0	0	2	0	0	1	0	2	2	1
64	1	0	1	1	2	0	0	2	0	0	1	2
65	0	0	1	1	2	1	0	1	0	0	0	1
66	1	1	1	1	2	0	1	1	0	0	1	2
67	1	2	1	1	2	0	1	2	1	1	1	1
68	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
69	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
72	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
73	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1
74	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
77	0	1	1	0	2	0	1	2	0	0	2	1
78	1	2	1	1	2	2	2	-	-	-	2	2
79	1	0	1	0	2	0	1	2	0	0	0	1
80	0	2	0	0	2	0	1	2	0	1	0	1
81	1	1	0	0	2	0	1	2	0	0	1	2
82	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
83	1	2	1	0	2	1	1	1	1	1	2	2
84	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
85	1	1	1	0	2	0	2	2	0	1	1	1
86	1	1	1	1	2	0	2	1	1	0	2	2
87	1	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2
88	0	1	0	0	2	0	0	2	1	0	1	1

Tabelle D.1: Qualitätsbewertungen der Probanden AH1972 bis JB1965

Probenpaar	JS1983	LM1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SH1981	SL1979	TK1969	YM1982
01	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
02	1	0	0	0	2	1	1	1	1	1	1
03	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
04	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
05	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1
06	1	0	1	1	0	1	1	0	1	-	2
07	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
08	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
09	1	0	2	2	1	0	1	1	1	1	2
10	1	0	2	1	2	1	2	1	1	-	2
11	2	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2
12	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
13	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
15	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1
16	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
17	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
18	1	0	1	1	1	2	2	1	0	1	2
19	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
20	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0
21	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
24	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
25	1	0	1	1	2	1	2	1	1	1	2
26	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
27	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
28	1	1	2	1	2	2	1	0	1	1	2
29	0	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2
30	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
32	0	0	1	1	2	0	1	0	0	1	1
33	1	1	2	1	2	2	2	0	0	-	2
34	0	0	2	1	2	1	2	0	0	0	1
35	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1
36	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
38	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2
40	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
41	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1
42	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
43	2	1	2	2	2	2	2	2	2	-	2
44	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
45	0	0	0	0	1	2	0	1	0	-	0
46	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
47	2	1	1	2	1	2	2	0	2	2	2
48	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
49	0	0	1	1	0	1	2	0	0	-	2
50	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
51	1	1	2	1	2	0	1	1	2	1	2
52	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0
53	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
56	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
57	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
58	1	0	1	0	2	1	1	1	0	1	1
59	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
60	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2
61	2	0	1	2	2	2	2	1	1	2	1
62	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2
63	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1
64	0	0	2	1	2	1	1	0	1	0	1
65	0	0	0	1	2	1	1	1	1	0	1
66	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1
67	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2
68	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
69	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0
70	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
73	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1
74	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
76	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
77	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
78	2	1	2	2	2	2	2	1	2	-	2
79	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1
80	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0
81	1	0	0	2	1	0	1	1	1	-	1
82	1	0	2	1	1	0	1	0	1	1	2
83	0	0	2	1	1	0	2	1	1	1	1
84	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
85	0	0	2	0	1	1	2	0	1	1	1
86	0	1	1	1	0	2	1	0	2	-	1
87	0	1	2	2	2	2	1	1	2	0	2
88	1	0	2	1	0	1	1	0	1	0	1

Tabelle D.2: Qualitätsbewertungen der Probanden JS1983 bis YM1982

Motiv-Nr.	f_m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C								0,53			0,40	0,51				1,04		
5	+5h		1,31											1,31	1,07				
6	-5h																		
9	-0,75C																		
10	-0,5C																		
11	-0,75C																		
13	+1C								0,49		0,65	0,85					1,22	0,64	
15	+0,75C	0,72	0,74	0,62	0,50	0,66	0,44		0,63		1,22	0,54	0,64			0,60	0,57		
17	-0,75C	1,64	1,25			1,56	1,63		1,56		1,63	1,44	1,60			1,54			
18	-0,75C																		
19	+0,5C	0,70				0,74						0,58	0,87	0,67		0,90	0,61	0,72	
21	+5h								1,39		1,24	1,38	1,49	1,30		1,28	0,70		
23	+5h	1,28																	1,17
25	-5h								0,73	0,68		0,81			0,60	0,83			
26	+0,5C		1,03	0,57		0,82					1,25	1,30	1,15						
27	+3h	1,14		1,41															
28	+1C																		1,16
29	-0,75C	1,75						1,71			1,76								
31	-5h	1,42		2,01		1,61		1,27			1,54	1,61	1,65			1,35	1,56		
32	-5h	1,72		2,24				1,93	2,03		1,89			1,71		1,84			
33	-0,75C															1,33			
34	-0,5C	1,20				1,14		1,03			0,92					1,32	1,04		
39	-5h																		
41	-3h	1,44				1,54	1,40	1,35	1,61		1,70	1,50	1,56	1,36		1,59	1,89		
43	-5h																		
47	-5h																		
49	-5h																		
50	-5h	1,50																	
51	+5h								2,10		2,04	1,21		1,54			1,71		
53	-0,75C	1,40													1,66				
58	+0,75C	1,40				1,35		1,27	1,41			1,57				1,04			
60	-5h																		
61	-0,75C	1,61																	
62	-0,75C																		
63	+5h		1,47	0,83		1,17		1,37			1,27	1,46						1,09	
64	+0,75C	0,69	1,46			1,66		1,42			1,51	0,80					1,24		
65	+0,5C	0,69	0,98			0,70		0,74	0,73		0,67	0,80					0,64		
66	+5h							0,97			0,80	0,92					0,46		
67	-0,75C																		
71	+5h				0,61	0,85		0,72			0,51	0,75	0,78	0,71	0,74	0,87	0,60		
73	+0,75C	1,00	0,92		0,81			0,81	0,81		0,77			0,83	1,07				
77	+3h	1,12						1,14				1,48	0,97		1,16				
78	-5h																		
79	-0,75C	1,35	0,70					0,86	0,71		0,41	0,34			0,46				
80	-5h			1,82				2,13			1,67				1,14				
81	+0,75C			1,13				0,90				0,82			0,87				
82	+0,75C										0,93				1,09				
83	-0,5C										1,72			0,95					
85	-5h										1,03								
86	-0,5C							1,00			1,63			1,04					
87	+5h										1,62							1,89	
88	-0,75C	1,26		1,33		1,30		1,23					1,09					1,28	
Mittelwert		1,27	1,16	1,33	0,64	1,16	1,16	1,16	1,20	0,68	1,25	0,88	1,20	1,21	1,14	1,10	1,14	1,04	1,41

Tabelle D.3: Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „absolut identisch“

Motiv-Nr.	f_m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C		0,84				0,95			0,53	0,86				0,68	0,71	0,31		0,80
5	+5h	1,63		0,99	1,45	1,64		1,26	1,62	1,42		1,09	1,52	1,29	1,09	1,19	1,19	1,10	
6	-5h	1,54		1,19		1,61			1,54		1,73	1,99	1,95	1,61	1,61	1,41	1,82	1,41	
9	-0,75C	1,68				1,75	1,04				1,49			1,63	1,35	1,47	1,47	1,41	
10	-0,5C	1,46				1,43					1,34				1,48		1,12		
11	-0,75C	1,34	1,72			1,02	1,32	1,12		0,92				1,25	0,47	1,38			1,21
15	+0,75C			1,46	1,77			0,70		0,35	0,51	1,64		1,42	0,53	0,36			0,72
17	-0,75C		1,51					1,07			1,25	0,77	1,11	0,68	1,42	1,54			1,97
18	-0,75C		0,74	0,71			0,70	0,77	1,01	0,58	0,64			0,71	0,80				
19	+0,5C		1,43	0,90		0,80				1,51	1,02	0,84	1,32	1,09	1,03				0,99
21	+5h	1,19		1,31		1,47		1,07		1,18	1,10	1,38	1,68	1,54	1,25			1,29	
23	+5h	1,31		1,09	0,77	1,23		0,54		1,62	0,72			1,18	1,34	1,00		0,57	0,81
25	-5h	0,77				1,38		1,08	1,31	0,92	1,01	1,46	0,90	1,95	1,27	1,35	1,10	1,10	1,18
26	+0,5C		1,31			1,06	0,99			0,92				0,81	1,26	1,60	1,97		
27	+3h		1,90		1,34		1,57		1,67	1,05		2,30		2,12				2,31	2,15
28	+1C	1,25	2,20			2,24				1,85		2,13	2,16		1,18	1,34	1,00		
29	-0,75C		2,21	1,49		1,81				1,86	1,49			1,36	1,27	1,60			
31	-5h		1,13	1,47		1,16	1,34	1,53	1,48	1,32	1,38	1,63	1,46	1,48	1,41	1,05			
32	-5h		2,21	1,54						1,42		1,67							
33	-0,75C																		
34	-0,5C		1,57																1,42
39	-5h	1,57		1,51															1,16
41	-3h			1,54															
43	-5h																		
47	-5h	2,56						2,74		1,88		2,54		2,22					
49	-5h	1,70		1,91	1,84	2,09						2,16	1,77		1,79				
50	-5h			1,51		1,71	0,66		1,66	1,42	1,42		1,66	1,32	1,56	1,13	1,36	1,51	1,22
51	+5h			2,35		1,55				1,71	1,71		1,68	1,25	1,46	1,46		1,55	
53	-0,75C	1,31																1,25	
58	+0,75C			1,45						1,66	1,36	1,68		1,25	1,47			1,29	
60	-5h	2,19		1,54		1,72			1,44		1,97	1,80	2,56	2,17	1,85	1,34	2,62		1,54
61	-0,75C					1,52		1,30		0,91	0,97	1,80			1,82		1,66		
62	-0,75C	1,64		1,23						1,14		2,09					1,42		
63	+5h	1,03												1,25	0,94	1,21	1,42		
64	+0,75C	1,49		1,43					1,65				1,47	1,23	1,24	1,02	1,02		1,54
65	+0,5C			0,70			0,66			0,73			0,63	0,64	0,64	0,70			0,76
66	+5h	1,11	1,06	1,08		1,05	0,62		1,07		1,01		0,97	1,03	1,15	0,76		0,87	0,75
67	-0,75C	1,11	0,74	1,09		1,58		0,98	0,98	0,86	1,01		1,15	0,97	0,95	0,86		1,01	
71	+5h		0,94	0,63		1,01	0,57		0,79	0,41				0,94	0,42			0,71	0,56
73	+0,75C			0,94		1,35	0,80			0,88	1,28	1,00	0,84	0,84	0,90			1,22	0,79
77	+3h		1,56	1,41						1,13		1,38			1,31	1,51		1,22	1,39
78	-5h	2,31		2,07															
79	-0,75C	0,62		0,39		0,84				0,37				0,62	0,89			0,75	0,58
80	-5h					1,47		2,03		1,77		1,41	1,49	1,76	1,44				
81	+0,75C	1,35	1,18			1,08								1,06	1,07	0,72			1,10
82	+0,75C	1,63	0,81	1,06	0,78	1,10	1,05	1,27	1,02	0,86	0,60	0,98	0,90	1,14	1,14	0,85	1,20	0,85	1,20
83	-0,5C	0,92		1,06		0,90	0,95	0,91			1,01	0,91	0,91	0,85		1,64	2,00	0,86	1,04
85	-5h	1,88	1,91	2,24				1,87	2,13	1,94				1,60	1,96			2,00	2,06
86	-0,5C	1,13	1,26	1,12			0,85					1,20	1,19			1,17		2,00	1,04
87	+5h	2,38		1,82				1,90								1,79			
88	-0,75C		1,75						1,58	1,52	1,14	1,66	1,32	1,24	1,24	1,22	1,23	1,29	1,18
Mittelwert		1,49	1,41	1,31	1,33	1,39	0,96	1,30	1,39	1,18	1,17	1,66	1,32	1,24	1,24	1,19	1,28	1,29	1,18

Tabelle D.4: Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „akzeptabel“

Motiv-Nr.	f_m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C	0,90			0,96	0,76	1,06	0,79						0,92					
5	+5h			1,09	1,25					1,55									1,31
6	-5h		1,54		1,63			1,28	1,32	1,55		1,85	1,67						1,20
9	-0,75C		1,38	1,84	1,20				1,53	1,52		1,21		1,52	1,58				1,32
10	-0,5C		1,34	1,48	1,74	2,01	1,50	1,76	1,42	1,18	1,40	1,78	1,71	1,55	1,61	2,02		1,24	1,65
11	-0,75C	1,80	1,97	2,10	0,72														
13	+1C			1,16															
15	+0,75C							1,59		1,70									
17	-0,75C	1,08		1,28	1,48	1,14	1,04		1,39	0,96				1,25	1,38				1,01
19	+0,5C								0,75	0,75									
21	+5h		1,14		1,01														
23	+5h				1,45		1,25	1,27						1,22					
25	-5h		1,65		1,29		1,04		1,45						1,16				1,38
26	+0,5C						0,89												
27	+3h				1,44		1,18												
28	+1C			1,09	1,00			0,97	1,25			1,89		0,70	1,28				
29	-0,75C			1,87	1,99	1,59	1,61		1,96	1,93		1,87	2,00	1,80	1,85				1,45
31	-5h																		
32	-5h				2,18		1,98							1,86					
33	-0,75C		1,73		1,72				1,58			1,75		1,42	1,46				1,45
34	-0,5C				1,16				1,15			1,41		0,98	1,23				
39	-5h		1,32		1,62														1,53
41	-3h																		
43	-5h	3,20	3,12	2,47	2,88	3,37			2,48	3,09	2,62	3,35	3,20	3,13	2,24	2,55	2,86		3,15
47	-5h		2,15	2,30	2,75	3,22	2,49		2,47	2,63	2,32		2,73		2,33	2,94	2,69	2,34	2,69
49	-5h		2,24													1,66			2,00
50	-5h		1,72		1,36			1,78		1,56									
51	+5h	2,37	2,00		2,05				2,01	2,20		2,43		2,25			2,16		
53	-0,75C		1,44	1,33	1,42	1,51	1,18	1,31	1,60	1,41	1,31	1,65	1,40		1,23	1,19	1,39		1,24
58	+0,75C		1,64		1,20				1,71	1,71				1,33					
60	-5h		2,41		0,99		1,69	1,88	2,47			2,52						1,95	1,88
61	-0,75C		1,91	1,21	1,64		1,53			1,60	1,70		1,86	1,57	1,58	1,70		1,66	
62	-0,75C	2,14	2,14		2,70	2,84	1,27		1,49			1,37	1,43	1,43	1,13	1,37		0,89	
63	+5h				1,30			1,39	1,80										
64	+0,75C				1,19		1,16			1,57		1,77		1,79					
65	+0,5C													0,66					
66	+5h				1,40					1,09						0,71			0,89
67	-0,75C		1,44		1,10		0,97					1,36							
71	+5h	0,93																	
73	+0,75C																		
77	+3h				0,47		1,24		1,53										
78	-5h		2,84		1,84				2,60										
79	-0,75C				1,18						1,94	3,34	2,69	2,80	2,33	3,17	3,04		2,45
80	-5h		1,81		1,82		1,64												
81	+0,75C				0,81		0,88			0,92			0,95						
82	+0,75C																		
83	-0,5C		1,03		0,89				0,97	0,89		1,50			0,91			1,31	
85	-5h				1,30	1,95	1,75					1,00			2,53				
86	-0,5C				1,33	1,36			1,28	1,11		1,57					1,20		
87	+5h		1,96		1,58	2,41	1,87		2,26	2,11		2,10	2,20	2,15	2,13		1,83		1,87
88	-0,75C				1,42		1,39		1,68			1,68							
Mittelwert		1,71	1,82	1,60	1,46	2,01	1,39	1,46	1,68	1,54	1,88	1,90	1,98	1,62	1,69	1,72	2,17	1,61	1,65

Tabelle D.5: Durchschnittliche ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „inakzeptabel“

Motiv-Nr.	f_m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C								1,00		2,38	1,10	1,19				1,81		
5	+5h		2,07											2,73					
6	-5h														2,10				
9	-0,75C																		
10	-0,5C																		
11	-0,75C																		
13	+1C																		
15	+0,75C	1,38	1,20	1,32	1,07	1,97	1,22		1,22		1,68	2,08				2,12	2,03		
17	-0,75C	2,31	1,88			2,32	2,52		1,34		2,48	1,15	1,08	1,12		1,11	1,26		
18	-0,75C								2,41			2,16	2,35			2,57			
19	+0,5C	0,96				1,05						1,10	1,16	1,10		1,58	1,00	1,09	
21	+5h								1,91		1,91	1,84	2,20	2,13		2,77	1,34		1,90
23	+5h	1,99														1,59			
25	-5h																		
26	+0,5C		1,32	1,30		1,33			1,30	1,29	1,82	1,31			1,31	1,31			
27	+3h	1,94		1,99								2,00	1,63					1,91	
28	+1C																		
29	-0,75C	2,44						2,45			2,19								
31	-5h	2,46		2,55		2,61		2,51			2,55						2,20	2,53	
32	-5h	2,87		3,31				3,36	3,20		3,08						2,62		
33	-0,75C																2,14		
34	-0,5C	1,52				1,68		1,78			1,35						1,71	1,76	
39	-5h																		
41	-3h	1,80	2,30			2,17	2,17	2,23	2,18		2,12	1,94	2,26	2,29		1,88	2,30		
43	-5h																		
47	-5h																		
49	-5h																		
50	-5h	2,66							3,45		3,44	2,63					2,12		
51	+5h																		
53	-0,75C																		
58	+0,75C	1,86				1,98		1,90	2,04			1,76				1,60			
60	-5h																		
61	-0,75C	2,36																	
62	-0,75C							2,87											
63	+5h		1,99	2,58		1,86					2,33	1,93						1,98	
64	+0,75C	2,20				2,28		2,17			2,22							1,64	
65	+0,5C	1,11	1,38			1,29		1,17	0,94		1,11	0,99						1,12	
66	+5h							1,71			1,84	2,02					1,30		
67	-0,75C																		
71	+5h				1,18	1,66		2,15			1,45	1,79	1,41	2,33	1,25		1,24	1,40	
73	+0,75C	1,49	1,34		1,33			1,55	1,24		1,50				1,55		1,59		
77	+3h	1,82						2,16				1,99		1,59			2,00		
78	-5h																		
79	-0,75C	1,69						1,73	1,60		1,49	1,27					1,53		
80	-5h	2,69		2,63					2,85		2,77						2,22	2,32	2,58
81	+0,75C			1,94				1,96				1,95							
82	+0,75C																		
83	-0,5C										1,21				1,92				
85	-5h										2,48			1,97					
86	-0,5C							1,33			1,53			1,22					
87	+5h										3,11		2,35	1,47				2,55	
88	-0,75C	1,98	1,74	2,24	1,19	1,88	1,97	2,07	1,90	1,29	2,09	1,85	1,79	1,99	2,00	1,59	1,84	1,77	2,24
Mittelwert																			

Tabelle D.6: Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „absolut identisch“

Motiv-Nr.	f_m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1981	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C		1,15	1,20			1,15			1,09	1,11				1,19	1,18	0,67	1,19	1,19
5	+5h	2,29			1,85	2,20		1,90	1,87	2,20		2,10	2,16	2,21	2,14			2,22	
6	-5h	2,14		2,51		2,35			2,75		2,86	2,57	2,69		2,80		2,19		
9	-0,75C	2,67				2,32	2,24				2,74			2,66		1,83	2,01	2,57	
10	-0,5C	1,64				1,65					1,74				1,69	1,71	1,56		
11	-0,75C															2,20			
13	+1C	2,02	2,23			2,04	2,22	2,12		1,82		2,15	2,08	2,08	1,94				1,92
15	+0,75C			2,43	2,44			1,13		1,19	1,20	2,48			1,24	0,99		2,42	1,61
17	-0,75C		1,92					2,13			2,09	1,87	2,05	1,60	2,39	1,62		2,16	2,47
18	-0,75C		1,05	1,01			1,20	1,08	2,25	1,10	1,08			1,07					
19	+0,5C		2,01	1,70						2,48	2,25	2,26	2,72	2,41	2,17				2,21
21	+5h	2,23		2,42		1,31		2,57		2,48				2,52	1,96	1,72		1,95	
23	+5h	2,40		1,80		1,99		1,30		1,93	2,51	2,38	2,51	2,52	1,96	1,72		2,39	
25	-5h	1,29			1,30	1,36		1,90	1,89	1,89	1,32	1,32	1,32	1,92	1,33	1,68		1,33	1,34
26	+0,5C		1,98			2,00		1,90	1,89	1,89	1,90	2,08		1,92	1,33	1,68		2,00	1,69
27	+3h	1,77	2,24			1,98	1,98			1,95	1,90	1,36		2,37	1,60	1,79		2,37	
28	+1C		2,61		2,19				2,50	1,54				2,21				3,16	2,71
29	-0,75C		2,67			3,05	2,53			2,93		2,51		2,77					
31	-5h		2,67			2,21				1,86	2,14	2,77	2,77						
32	-5h		1,35	2,46		2,21				2,93		2,91	2,14		1,66				1,79
33	-0,75C		2,08	1,66		1,74	1,66	2,13	2,06	1,91	2,03	1,52	1,52	1,91	2,11	1,45			
34	-0,5C			2,04		1,74	1,88			1,97		2,03	1,98	1,91					
39	-5h		1,94									2,08						2,29	2,09
41	-3h																		
43	-5h																		
47	-5h	3,28		2,88	2,36	3,03		3,29		2,01		3,28	3,28	3,39					
49	-5h	2,05		2,75		2,36			2,80	2,01		3,45	2,27	2,93					
50	-5h			2,82		2,53	2,07			2,68	3,00	2,72	1,99	2,24	2,57	1,98	2,56	3,02	2,90
51	+5h												2,72	1,68	2,07	2,63	2,71	2,71	
53	-0,75C	1,63												1,68	2,07	2,07	1,73	1,73	
58	+0,75C			1,99						3,28	1,91	1,92	3,47	3,26	3,33	2,46	3,34	1,88	
60	-5h	3,20		2,43		3,21			2,02	3,28	3,45	3,47	3,47	3,26	3,33	2,46	3,34	1,88	
61	-0,75C			2,87		2,31		2,11		2,61	2,55	2,87	2,87	3,26	2,86	2,87	2,87	2,45	
62	-0,75C	2,82								2,13				2,08	1,91	2,09	2,09		
63	+5h	1,99		2,09					2,42	2,13		1,77	1,77	2,08	1,91	2,09	2,09		
64	+0,75C	1,61		1,06			1,04			1,07		1,91	1,91	2,19	2,19	1,64		2,30	
65	+0,5C			1,06		2,03	1,06		2,00	1,07		1,14	1,14	1,12	1,12	1,04	1,08		1,16
66	+5h	2,14		2,31		2,05			2,00	1,07		1,55	1,55	1,57	2,31			1,63	1,88
67	-0,75C	1,85		1,97		2,05		2,04	1,79	1,76	1,79	1,94	1,94	1,65	1,67		1,48	1,58	
71	+5h		1,25	1,27		1,55	1,41		2,05	1,05		1,52	1,52	1,44				1,33	1,27
73	+0,75C			1,49		1,84	1,38			1,54	2,10	1,52	1,52	1,44	1,69	1,49		1,33	1,31
77	+3h		1,86	1,81						1,83		2,09	2,09	1,44	1,89	3,24		2,12	2,03
78	-5h	3,30		3,41						1,69								2,00	2,03
79	-0,75C	1,40		1,71		1,28		2,89		2,77		1,55	1,55	1,68	1,48	2,10		2,00	2,03
80	-5h					2,76			1,96	2,77		2,20	2,42	2,77	2,77	2,10		2,00	2,03
81	+0,75C	1,97		1,66		1,96			1,96	1,69		2,20	2,42	2,77	2,77	2,10		2,00	2,03
82	+0,75C	1,99		1,26	1,06	2,05	1,49	1,96	1,44	2,77	1,94	2,20	2,42	2,77	2,77	2,10		1,52	1,95
83	-0,5C	1,18		1,22	1,06	1,17	1,20	1,23	1,44	1,44	1,89	1,39	1,39	1,28		1,06	1,52	2,00	1,95
85	-5h	2,47		2,91		1,17		3,07	2,91	1,44		1,16	1,16	1,26	1,01	0,94	1,41	2,00	1,24
86	-0,5C	1,44		1,60			1,68		2,91	2,77		1,68	1,68	2,05	2,56	2,52	2,52	3,00	2,70
87	+5h	2,51		2,51				3,06		2,77		1,68	1,68	2,05	2,56	2,52	2,52	3,00	2,70
88	-0,75C		2,34						2,31	2,53	2,18	2,24	2,24		2,21	2,51	2,06	2,09	1,93
Mittelwert		2,12	1,86	2,06	1,87	2,09	1,64	2,11	2,19	1,97	2,11	2,35	1,99	2,01	2,09	1,88	1,85	2,09	1,93

Tabelle D.7: Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „akzeptabel“

Motiv-Nr.	f _m	AH1972	AH1977	BB1956	BS1981	CJ1975	CS1964	DB1981	DM1980	JB1965	JS1983	MB1976	MH1969	MR1971	OS1975	SH1966	SL1979	TK1969	YM1982
2	+0,5C	1,09			1,12	1,16	2,03	1,54											
5	+5h			2,12	2,01									1,14					2,81
6	-5h		2,21		2,04			2,58	2,81	2,43		2,54	2,58						2,55
9	-0,75C		2,04	2,58	1,74				1,66	2,55		1,64	1,68		1,60				1,67
10	-0,5C		1,63	1,65	1,57			2,18	2,11	1,67		2,20	1,71	2,21	2,23	2,14		2,19	2,18
11	-0,75C		2,20	2,20	2,03	2,18	1,91	2,18	2,11	2,18	2,17								
13	+1C		2,23	1,93	1,33														
15	+0,75C							2,40		2,29									
17	-0,75C			2,10	2,13	2,08	2,05		2,12	1,73					2,09	2,14			1,87
19	+0,5C								1,10	1,57									
21	+5h		1,24		1,44		2,35	2,35											
23	+5h				1,96		1,84		2,44					1,82		1,76			1,94
25	-5h		1,85		2,59		1,33												
26	+0,5C				2,01		1,89												
27	+3h				2,01				1,95			1,99		0,87					
28	+1C			1,82	1,99	2,01	2,23	1,71	2,39	2,28		2,36	2,17	2,26	2,01				2,37
29	-0,75C			2,37	2,10	2,01													
31	-5h																		
32	-5h				2,35		2,55												
33	-0,75C		2,09		1,79	3,37			2,19			2,30		2,74	2,08	1,88			2,06
34	-0,5C				1,56	3,22			1,51			1,56		1,82	1,53				
39	-5h		2,07		1,77														2,11
41	-3h				2,26														
43	-5h	3,20	3,49	3,27	3,08	3,37			3,18	3,09		3,50	3,36	3,26	3,51	3,19	3,52		3,31
47	-5h		3,12	3,16	2,97	3,22	3,23		3,47	3,16			3,16	3,39	3,23	3,32		3,44	3,41
49	-5h		3,20												1,95				3,42
50	-5h		2,53		2,42			2,95		1,84									
51	+5h	2,58	3,02		2,56			2,87	2,99			2,97		3,00			2,16		
53	-0,75C		1,85	1,64	1,64	1,55	1,59	1,68	1,98	1,59	1,64	2,04	2,11	1,70	1,87	1,72	1,79		1,71
58	+0,75C		1,83		1,51					1,88									
60	-5h		2,88		1,36		3,40	3,38	3,32			3,42						3,00	3,44
61	-0,75C		2,42	2,13	1,80		2,15		2,83	2,19	2,23		2,31	2,17	2,48	2,30		2,47	
62	-0,75C		2,83		2,85	2,89	2,83		2,83			1,53	2,82	2,83	2,81			3,00	2,85
63	+5h				1,99			2,09	2,04										
64	+0,75C				1,96		2,10			2,20		2,42		2,15					
65	+0,5C													1,10					
66	+5h				2,78		1,69			1,56		1,70				1,72			1,86
67	-0,75C		1,75		1,79														
71	+5h	1,85																	
73	+0,75C																		
77	+3h				1,33		1,92		1,94										
78	-5h		2,95		3,25			3,17											
79	-0,75C				2,02						3,40	3,49	3,35	3,30	3,43	3,34	3,41		3,42
80	-5h		2,15		2,75		2,64												
81	+0,75C				1,83		1,35			1,88			1,94						
82	+0,75C																		
83	-0,5C		1,19		1,20				1,20	1,15		1,95				1,09			2,00
85	-5h				2,05	2,41	2,36		1,57			1,27			2,57				
86	-0,5C				1,63	1,74			1,57	1,55		2,79					1,74		
87	+5h		2,41		2,44	2,48	3,01		2,51	2,56		2,56	2,52	2,52	2,73				2,60
88	-0,75C				2,10		2,01					2,41							
Mittelwert		2,19	2,30	2,25	2,02	2,28	2,20	2,34	2,29	2,07	2,74	2,37	2,43	2,13	2,61	2,18	2,64	2,79	2,48

Tabelle D.8: Maximale ΔE_{00} Farbabstände der Qualitätsstufe „inakzeptabel“

E. Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung

Die durchschnittlichen $\overline{\Delta E_{00}}$ - und $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Werte der Probanden (s. Tabellen E.2 und E.3) wurden je Qualitätsstufe hinsichtlich der zuvor getroffenen Annahme auf Normalverteilung mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests (KS-Test) untersucht.

Der KS-Test prüft ob die Nullhypothese $H_0 : F_X(x) = F_0(x)$ bei einem gegebenen Signifikanzniveau α angenommen werden kann. $F_0(x)$ entspricht hier einer Normalverteilung mit dem Mittelwert und der Standardabweichung der Verteilung der durchschnittlichen ΔE_{00} -Werte der aufgezeichneten Beobachtungen für die jeweilige Qualitätsstufe (siehe Ende der Tabellen E.2 und E.3). Die Nullhypothese wird angenommen, wenn die maximale Summendifferenz d_{\max} des KS-Tests die kritische Größe d_α des vorgegebenen Signifikanzniveaus nicht übersteigt.

Das zu prüfende Signifikanzniveau wurde hier mit $\alpha = 0,01$ festgesetzt. Die Anzahl n der beobachteten Ereignisse entspricht der Anzahl an den in der Auswertung berücksichtigten Probanden je Qualitätsstufe, somit ist $n = 18$ für alle sechs Fälle. Die kritische Größe beträgt bei 18 Beobachtungen und dem vorgegebenen Signifikanzniveau $d_\alpha = 0,371$.

Tabelle E.1 zeigt die berechneten Werte für d_{\max} der aufgezeichneten Beobachtungen der drei Qualitätsstufen für $\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$.

Qualitätsstufe	d_{\max}	
	$\overline{\Delta E_{00}}$	$\widehat{\Delta E_{00}}$
<i>absolut identisch</i>	0,2612	0,1263
<i>akzeptabel</i>	0,1525	0,1306
<i>inakzeptabel</i>	0,1518	0,1429

Tabelle E.1: d_{\max} -Werte des KS-Tests der drei Qualitätsstufen für $\overline{\Delta E_{00}}$ und $\widehat{\Delta E_{00}}$

Da alle berechneten d_{\max} -Werte kleiner sind als der Wert für d_α konnte die Nullhypothese bei dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ für alle sechs Fälle angenommen werden.

Somit wurde die Annahme aus Kapitel 2.3 auf Seite 12 bestätigt, dass die durchschnittlichen $\overline{\Delta E_{00}}$ - und $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Werte je Proband bei der jeweiligen Qualitätsstufe einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktion folgen (s. Abbildungen G.1 und G.2).

Proband	<i>absolut identisch</i>	<i>akzeptabel</i>	<i>inakzeptabel</i>
AH1972	1,27	1,49	1,71
AH1977	1,16	1,41	1,82
BB1956	1,33	1,31	1,60
BS1981	0,64	1,33	1,46
CJ1975	1,16	1,39	2,01
CS1964	1,16	0,96	1,39
DB1981	1,16	1,30	1,46
DM1980	1,20	1,39	1,68
JB1965	0,68	1,18	1,54
JS1983	1,25	1,17	1,88
MB1976	0,88	1,66	1,90
MH1969	1,20	1,32	1,98
MR1971	1,21	1,24	1,62
OS1975	1,14	1,24	1,69
SH1966	1,10	1,19	1,72
SL1979	1,14	1,28	2,17
TK1969	1,04	1,29	1,61
YM1982	1,41	1,18	1,65
Mittelwert	1,1183	1,2961	1,7161
Standardabweichung	0,2006	0,1488	0,2090

Tabelle E.2: Durchschnittliches ΔE_{00} je Proband, Mittelwert und Standardabweichung für $\overline{\Delta E_{00}}$

Proband	<i>absolut identisch</i>	<i>akzeptabel</i>	<i>inakzeptabel</i>
AH1972	1,98	2,12	2,19
AH1977	1,74	1,86	2,30
BB1956	2,24	2,06	2,25
BS1981	1,19	1,87	2,02
CJ1975	1,88	2,09	2,28
CS1964	1,97	1,64	2,20
DB1981	2,07	2,11	2,34
DM1980	1,90	2,19	2,29
JB1965	1,29	1,97	2,07
JS1983	2,09	2,11	2,74
MB1976	1,65	2,35	2,37
MH1969	1,79	1,99	2,43
MR1971	1,99	2,01	2,13
OS1975	2,00	2,09	2,61
SH1966	1,59	1,90	2,18
SL1979	1,84	1,85	2,64
TK1969	1,77	2,09	2,79
YM1982	2,24	1,93	2,48
Mittelwert	1,8456	2,0128	2,3506
Standardabweichung	0,2834	0,1584	0,2242

Tabelle E.3: Durchschnittliches ΔE_{00} je Proband, Mittelwert und Standardabweichung für $\widehat{\Delta E_{00}}$

F. t-Test auf unterschiedliche Mittelwerte

Basierend auf den Ergebnissen des KS-Tests aus Anhang E wurde mit Hilfe des einseitigen Zweistichproben t-Tests untersucht, ob die $\overline{\Delta E_{00}}$ - und $\widehat{\Delta E_{00}}$ -Mittelwerte (aus Tabellen E.2 und E.3) der benachbarten Qualitätsstufen „*absolut identisch*“ und „*akzeptabel*“ sowie „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ nicht aus derselben Grundgesamtheit stammen. Es wurde geprüft, mit welcher Konfidenz die Nullhypothese $H_0 : \mu_X = \mu_Y$ (der Mittelwert der Zufallsvariable X ist gleich dem Mittelwert der Zufallsvariablen Y) zurückgewiesen werden kann und statt dessen die Alternativhypothese $H_1 : \mu_X \neq \mu_Y$ angenommen werden kann. Dies ist der Fall, wenn der berechnete t-Wert größer ist als die Prüfgröße PG der t-Verteilung für ein bestimmtes Signifikanzniveau und eine bestimmte Anzahl an Freiheitsgraden.

Bei der Berechnung der Konfidenz muss berücksichtigt werden, dass bei dem einseitigen Zweistichproben t-Test dasselbe Signifikanzniveau zu Grunde gelegt werden muss, wie es für den zweiseitigen t-Test der Fall wäre. Ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ entspricht somit einer Konfidenz von 95 %; zur Berechnung wird jedoch das einseitige Vertrauensniveau $\frac{\alpha}{2} = 0,025$ herangezogen.

Die Anzahl an Freiheitsgraden df errechnet sich aus der Anzahl n der in der Auswertung berücksichtigten Probanden je Qualitätsstufe ($n = 18$). Somit ist $df = 34$ für alle vier getesteten Fälle. Die Prüfgröße beträgt für das angegebene einseitige Signifikanzniveau bei der vorliegenden Anzahl an Freiheitsgraden $PG = 2,032$.

Tabelle F.1 stellt die aus den Mittelwerten und Standardabweichungen aus den Tabellen E.2 und E.3 berechneten t-Werte der Mittelwerte der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen benachbarter Qualitätsstufen dar.

Da die t-Werte aus Tabelle F.1 stets größer sind als die Prüfgröße PG kann für alle vier Fälle die Alternativhypothese H_1 bei einer Konfidenz von 95 % angenommen werden.

benachbarte Qualitätsstufen	t-Wert	
	$\overline{\Delta E_{00}}$	$\widehat{\Delta E_{00}}$
<i>absolut identisch, akzeptabel</i>	3,056	2,273
<i>akzeptabel, inakzeptabel</i>	7,052	5,306

Tabelle F.1: t-Werte der Mittelwerte der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen benachbarter Qualitätsstufen

G. Berechnung der Intervallgrenzen

Auf Grund der Ergebnisse aus Anhang E und Anhang F konnten die Intervallgrenzen (Schwellenwerte) zwischen je zwei Qualitätsstufen als Schnittpunkte ihrer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen mit dem Mittelwert und der Standardabweichung aus Tabellen E.2 und E.3 bestimmt werden (s. Tabelle G.1).

Da zwischen zwei sich überlagernden Normalverteilungen mit unterschiedlichen Standardabweichungen zwei Schnittpunkte existieren, wurde die Wahl des jeweiligen Schnittpunkts in Abhängigkeit der Lage des Mittelwerts der Normalverteilung für die Qualitätsstufe „akzeptabel“ gewählt.

Für den Schwellenwert zwischen den Qualitätsbereichen „*absolut identisch*“ und „*akzeptabel*“ wurde der Schnittpunkt der Wahrscheinlichkeitsfunktion „*absolut identisch*“ mit dem Ast links des Mittelwerts der Wahrscheinlichkeitsfunktion „*akzeptabel*“ gebildet.

Für den Schwellenwert zwischen den Qualitätsbereichen „*akzeptabel*“ und „*inakzeptabel*“ wurde der Schnittpunkt zwischen dem Ast rechts des Mittelwerts der Wahrscheinlichkeitsfunktion „*akzeptabel*“ und der Wahrscheinlichkeitsfunktion „*inakzeptabel*“ gebildet.

Abbildungen G.1 und G.2 zeigen die normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen und die ΔE_{00} -Schwellenwerte (Schnittpunkte) aus Tabelle G.1.

Qualitätsbereich	Schwellenwert $\overline{\Delta E_{00}}$	Schwellenwert $\widehat{\Delta E_{00}}$
<i>absolut identisch – akzeptabel</i>	1,17	1,84
<i>akzeptabel – inakzeptabel</i>	1,50	2,19

Tabelle G.1: ΔE_{00} -Schwellenwerte als Intervallgrenzen zwischen je zwei Qualitätsbereichen

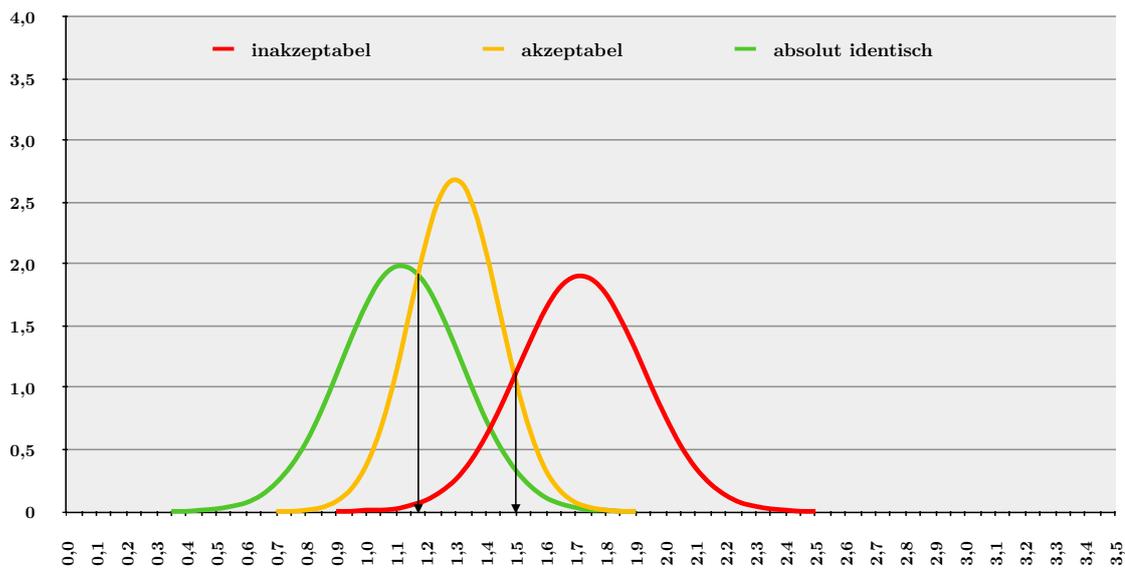


Abbildung G.1: Diagramm der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der durchschnittlichen ΔE_{00} -Werte und Schwellenwerte (Pfeile) der drei Bewertungsstufen

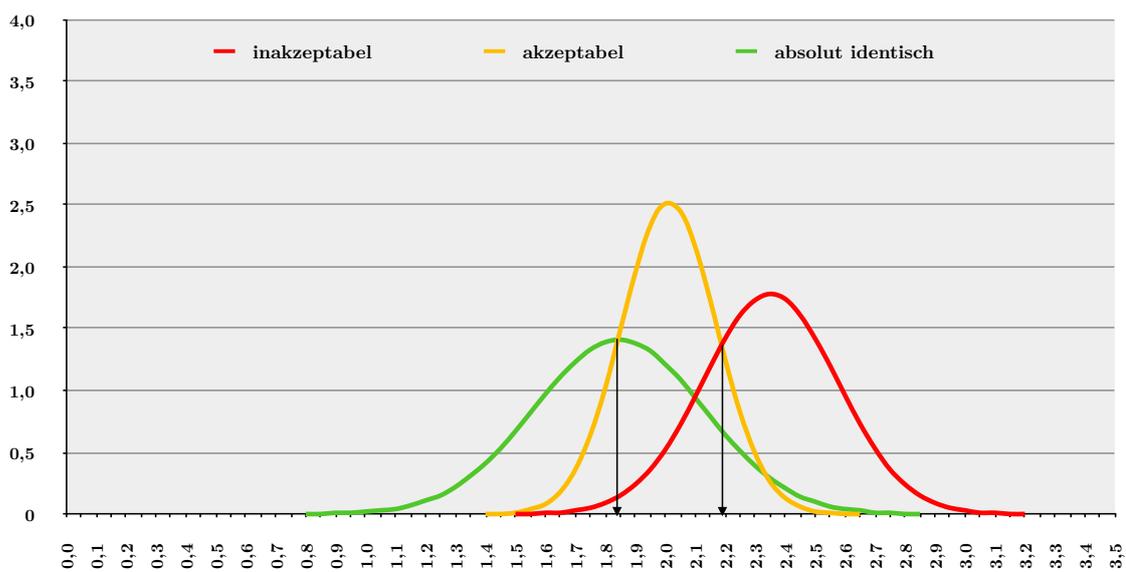


Abbildung G.2: Diagramm der normalverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der durchschnittlichen ΔE_{00} -Werte und Schwellenwerte (Pfeile) der drei Bewertungsstufen