



Report

2
2021

ISSN 1860-2835

Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.

Herausgegeben vom Vorstand der DfwG

Verantwortlich: Dr. Andreas Kraushaar



*Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.
im Deutschen Verband Farbe*



Inhaltsverzeichnis

<i>Impressum</i>	4
<i>Liebe Farbgemeinde</i>	6
<i>Programm der DfwG-Jahrestagung 2021</i>	8
<i>Tagesordnung zur Hauptversammlung</i>	12
<i>Kandidaten für die Vorstandswahl und für die Kassenprüfer</i>	13
<i>Kassenbericht des Schatzmeisters</i>	14
<i>Bericht der Kassenprüfer</i>	15
<i>Helligkeitswahrnehmung strukturierter Oberflächen</i>	16
<i>Herleitung und Kritik an den CIE-Normvalenzsystemen nach Guild und Wright</i>	26
<i>COLOR!O – Mit Farbe durchs Layout</i>	40
<i>Reaktion der Buntpigmente auf unbunte Pigmente</i>	45
<i>Auch das noch!</i>	57

Impressum

Präsident *Dr. Andreas Kraushaar*

Telefon 089/43182335

E-Mail kraushaar@fogra.org

Vize-Präsident *Prof. Dr. Christoph Schierz*

Telefon 03677/693731

E-Mail Christoph.schierz@tu-ilmenau.de

Schatzmeister *Dr. Carsten Steckert*

Telefon 030/6032554

E-Mail Carsten.steckert@gmx.de

Sekretärin *Dr. Karin Bieske*

Telefon 03677/693737

E-Mail Karin.bieske@tu-ilmenau.de

Geschäftsstelle *Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.
(DfwG)
c/o Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 10 05 65
D-98684 Ilmenau*

Bankverbindung *IBAN: DE81 1005 0000 2060 0235 83*

Vereinsregister *VR 4979 NZ, Amtsgericht Charlottenburg (Berlin)*

DfwG-Report 2021/2

Arbeitsgruppenleiter

Farbbildverarbeitung

Dr. Andreas Kraushaar

Telefon

089/43182335

E-Mail kraushaar@fogra.org

Farbmetrik und Grundlagen

Prof. Dr. Christoph Schierz

Telefon

03677/693731

E-Mail Christoph.schierz@tu-ilmenau.de

Appearance

Christian Dietz

Telefon

089/435715660

E-Mail Christian.Dietz@seu.konicaminolta.eu

Multigeometrie

Dr. Alfred Schirmacher

Telefon

0531/592-4510

E-Mail Alfred.schirmacher@ptb.de

Internet

www.dfwg.de

Verleger und Herausgeber

Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.

ISSN 1860-2835

Redaktion und Layout

Werner Rudolf Cramer

Druckbetreuung

Andreas Kraushaar

Titelbild

color!o

Für die Inhalte von fachlichen Artikeln sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

Liebe Farbgemeinde,

kennen Sie Vectoria oder Mr. Si-Em-Wai-Käh? Nicht? Dann aber Er-Geh-Beh oder zumindest El-Abeh – auch nicht. Es sind die Protagonisten eines Comics, die locker und cool die Berührungsgängste mit dem Farbmanagement abbauen. Erfahren Sie über die Genese zu "Color!o – Mit Farbe durchs Layout" in dieser Ausgabe. Frau Zedler war so nett uns auch eine Leseprobe zu spendieren, die ich jedem ans Herz legen möchte.

Im Vorstand sind wir nach wie vor optimistisch unsere Jahrestagung am 5. – 7. Oktober 2021 in Kerpen-Horrem bei Köln in Präsenz durchführen zu können. Sollte es die Lage nicht ermöglichen, werden wir wie im letzten Jahr auf eine Online-Tagung zurückgreifen – müssen. Schauen Sie also regelmäßig auf die Webseite! Dort finden Sie auch die Anmeldung zur Jahrestagung sowie das Programm. Letzteres ist freilich auch in dieser Ausgabe enthalten samt der Tagesordnung für unsere diesjährige Hauptversammlung. Es gibt neben der Vorstandswahl einiges zu berichten und zu diskutieren: ein mögliches neues DfwG-Logo oder den DfwG-Fellow als Auszeichnung für besonders engagierte Farbenfreunde. Ich freue mich ganz besonders auf den extra Themenblock zum 90sten Geburtstag des 1931-2°-Normalbeobachters, den wir auf Anregung von Prof. Khanh dankbar aufgenommen haben.

Inhaltlich beginnt unsere zweite Ausgabe diesen Jahres mit einem Vortrag vom Süddeutschen Kunststoffzentrum (SKZ) aus Würzburg. Frau Linda Mittelberg und Kolleginnen berichten über die Helligkeitswahrnehmung strukturierter Oberflächen. Ein weiterer, exzellenter Beitrag, der die Verschmelzung von Farbe und Appearance verdeutlicht. Im Anschluss berichtet Christian Greim von der Hochschule Mittweida aus seiner Masterarbeit, in der er die Herleitung des CIE-Normvalenzsystems kritisch aufdröselte und ausführlich dokumentiert. Der Reaktion der Buntpigmente in der Mischung mit unbunten Pigmenten widmet sich Werner Rudolf Cramer. Dabei geht es u. a. darum, ob ein Reflexionsspektrum ein Maximum oder eher eine Reflexionsplateau aufweist.

Lassen Sie mich abschließend noch auf eine Nachricht von Ellen Carter, Editor von Color Research and Application, hinweisen. Sie geht in den Ruhestand und man sucht bei

DfwG-Report 2021/2

Wiley einen Nachfolger oder eine Nachfolgerin. Wenn Sie Interesse haben, sprechen Sie mich gerne an. Ich leite die Information weiter.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen einen schönen Sommer, aber vermeiden Sie zu viel UV-Strahlung.

bleiben Sie negativ und denken Sie positiv!

Liebe Grüße,

Andreas Kraushaar



DfwG-Jahrestagung 2021 in Kerpen-Horrem bei Köln

Karin Bieske

Die niedrigen Infektionszahlen und die erreichte Impfrate stimmen uns optimistisch, dass unsere diesjährige DfwG-Jahrestagung wieder in Präsenz möglich sein wird. In der Zwischenzeit wurde dank der eingereichten Beiträge ein interessantes Programm zusammengestellt. Herzlichen Dank für die Einreichungen!

Programm der DfwG-Jahrestagung 2021

5. bis 7. Oktober 2021 | Image Engineering GmbH |
Im Gleisdreieck 5 | 50169 Kerpen-Horrem

Dienstag, 5. Oktober 2021

18:00 Uhr Vorabendtreffen
Brauhaus Em Kölsche Boor, Eigelstein 121 – 123, 50668 Köln

Weitere Informationen finden Sie auf unserer Webseite.

Mittwoch, 6. Oktober 2021

9:00 Uhr	Arbeitssitzung AG Farbmeterik und Grundlagen	<i>Schierz</i>
9:45 Uhr	Arbeitssitzung AG Multigeometrie	<i>Schirmacher</i>
11:00 Uhr	Arbeitssitzung AG Appearance	<i>Schmollgruber/ Dietz</i>

12:00 Uhr Registrierung

13:00 Uhr Eröffnung der Jahrestagung
Begrüßung durch den DfwG-Präsidenten und Grußworte des Gastgebers

13:15 Uhr **Kolloquium 90 Jahre CIE 1931**

Manuel Spitschan; University of Oxford, UK
Physiologische Grundlagen der Farbwahrnehmung

Christoph Schierz, TU Ilmenau
Vom Spektrum zur Farbe: wo stehen wir?

Bernhard Hill, Aachen
Farbmeterik und Absorption im Auge am Beispiel des visuellen Vergleiches von Bildschirm mit Auflichtfarben

Berthold Oberhollenzer, Fogra

Farbkommunikation zwischen zwei Welten: Wenn D50/2°- und D65/10°-
Farbmesswerte im digitalen Textildruck aufeinandertreffen

Andreas Kraushaar, Fogra; Tran Quoc Khanh, TU Darmstadt

Podiumsdiskussion

16:30 Uhr DfwG-Hauptversammlung mit Wahl
(siehe Tagesordnung zur Hauptversammlung)

19:30 Uhr Tagungsabend in einem Traditionsrestaurant in der Kölner Innenstadt
Anfrage läuft, wir informieren auf unserer Web-Seite

Donnerstag, 7. Oktober 2021

9:00 Uhr **Vortragsblock: Farbwahrnehmung und -visualisierung**

Simeon Geiger, ILU, Ulm

Farbcharakterisierung von 3D-Druckobjekten:
Top Down versus Bottom Up

Marco Mattuschka, Vizoo, München

Beschreibung des Glanzes von dielektrischen Materialien im physikalisch
basierten Rendering

Carl Florian Weber, TU Darmstadt

Psychophysikalische Untersuchungen am Glanz von gedruckten metalli-
sierten Oberflächen

Werner Rudolf Cramer, Münster

Reaktion von Buntpigmenten auf unbunte Pigmente

11:10 Uhr **Vortragsblock: Kameratechnik und Sensorik**

Udo Krüger, TechnoTeam, Ilmenau

Äquivalenzgrad von Tristimuluswerten von LEDs unter Berücksichtigung
von Messunsicherheit und Korrelation

Dietmar Wüller, Image Engineering GmbH, Kerpen-Horrem

Farbkalibrierung und Korrektur von Kameras

13:00 Uhr Besichtigung der Labore in der Image Engineering GmbH

14:00 Uhr *Johannes Fließbach, TU Darmstadt*

Modifikation und Kalibrierung einer handelsüblichen Kamera zur Auf-
nahme von Leuchtdichtebildern

Paul Myland, TU Darmstadt

Farbkorrektur von typgleichen Farbsensoren über Sensor-Binning

Vortragsblock: Farbe interdisziplinär

Kazim Hilmi OR, Hamburg

Zwie- oder Mehrspalt eines interdisziplinär aktiven Farbwissenschaftlers

Julian Klages, TU Darmstadt

Warum Metriken ohne Helligkeitskomponente zur Beschreibung der Farbpräferenz nicht ausreichen

Stephan Pusch, bfw-Leipzig

COLOR!O – Mit Farbe durchs Layout

16:30 Uhr Ende der Jahrestagung

Anmeldung

Für die Anmeldung zur Jahrestagung ist ein Online-Formular auf der DfwG-Internetseite freigeschaltet. Dort finden Sie alternativ auch ein Anmeldeformular im PDF-Format, dass Sie ausgefüllt bitte per Mail an: Sekretariat@DfwG.de senden.

Vorabendtreffen und Tagungsabend

Für unser traditionelles Treffen am Vorabend und unseren Tagungsabend sind Gaststuben in der Kölner Innenstadt angefragt. Wir informieren rechtzeitig auf unseren Webseiten. Bitte vermerken Sie auf der Anmeldung Ihr Interesse für unsere Planung.

Und wenn es dann anders kommt

Falls eine Präsenzveranstaltung nicht möglich sein sollte, werden wir einen anderen Rahmen für unsere Veranstaltung organisieren (ein Online-Meeting wie im Vorjahr) und rechtzeitig darüber informieren.

Übernachtung

Im Hotel Müller Köln (www.hotel-mueller-koeln.net Brandenburger Str. 20; 50668 Köln) ist ein Kontingent für 15 Personen vom 5. bis 7. Oktober 2021 reserviert, dass Sie über die Geschäftsstelle Sekretariat@DfwG.de nach dem Prinzip „First come – First served“ buchen können. Die Zimmerpreise betragen für ein Einzelzimmer (3) 55,00 Euro pro Zimmer pro Nacht mit Frühstück und für ein Doppelzimmer zur Einzelbelegung (12)

DfwG-Report 2021/2

65,00 Euro pro Zimmer pro Nacht mit Frühstück. Eine kostenlose Stornierung ist bis 7 Tage vor Anreise möglich, danach werden 80 % Stornokosten berechnet.

Über weitere Übernachtungsangebote informieren wir Sie auf unserer Web-Seite.

Der Gastgeber hat darüber informiert, dass die Räumlichkeiten unter Einhaltung der Hygienebedingungen für 42 Personen zeitgleich Platz bieten.

Die Ausrichter und der DfwG-Vorstand freuen sich auf viele Teilnehmer und Teilnehmerinnen, interessante Vorträge, Diskussionen und Gespräche.



Tagungsort: Image Engineering GmbH in Kerpen-Horrem

Tagesordnung zur Hauptversammlung

6. Oktober 2021 | Image Engineering GmbH |
Im Gleisdreieck 5 | 50169 Kerpen-Horrem

1. Genehmigung der Tagesordnung
2. Genehmigung des Protokolls der Online-DfwG-Mitgliederversammlung am 16. September 2020 (DfwG-Report 3/2020)
3. Bericht des Präsidenten
4. Ehrungen und Vergabe des Förderpreises
5. Kassenbericht 2020 des Schatzmeisters (DfwG-Report 2/2021)
6. Bericht der Kassenprüfer (DfwG-Report 2/2021)
7. Bericht der Sekretärin
8. Entlastung des Vorstands für das Geschäftsjahr 2020
9. Wahl des Vorstandes
10. Wahl der Kassenprüfer
11. Verschiedenes
 - Umstellung der Beitragszahlung auf SEPA-Lastschriftverfahren
 - Umgang mit Beitragsrückständen
 - Ehrungsformat DfwG-Fellow
 - neues DfwG-Logo
 - Unterstützung für den farbwissenschaftlichen Nachwuchs
12. Termin und Tagungsort der nächsten Mitgliederversammlung

Kandidaten für die Vorstandswahl

Der derzeit aktive Vorstand stellt sich wieder zur Wahl. Keine anderen Wahlvorschläge wurden bisher unterbreitet.

Es kandidieren als:

Präsident:	Andreas Kraushaar, Fogra
Vize-Präsident:	Christoph Schierz, TU Ilmenau
Schatzmeister:	Carsten Steckert, Berlin
Sekretärin:	Karin Bieske, TU Ilmenau

Kandidaten für die Kassenprüfer

1. Kassenprüfer:	Günther Döring, Berlin
2. Kassenprüfer:	Frank Rochow, Berlin
Ersatzkassenprüfer:	Florian Süßl, Berlin

Kassenbericht des Schatzmeisters

*Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.
im Deutschen Verband Farbe*



Einnahmen - und Ausgabenrechnung für das Geschäftsjahr 2020

Saldo am 01.01.2020				
0	Anfangsbestand	Bank-Konto	12.183,17 €	
		Gesamt		12.183,17 €
<hr/>				
Einnahmen Ideeller Bereich				
2110	Mitgliedsbeiträge		6.790,00 €	
2400	Sonstige Einnahmen / Gutschriften		415,00 €	
		Gesamt		7.205,00 €
<hr/>				
Ausgaben Ideeller Bereich				
2700	Mitgliederverwaltung		-544,00 €	
2702	Porto		-105,40 €	
2753	Abgaben Fachverband		-563,00 €	
2802	Geschenke, Jubiläen, Ehrungen		-4,50 €	
		Gesamt		-1.216,90 €
<hr/>				
Einnahmen Zweckbetrieb				
6510	Eintrittsgelder/ Tagungseinnahmen		0,00 €	
		Gesamt		0,00 €
<hr/>				
Ausgaben Zweckbetrieb				
6670	Aufwendungen für bezogene Waren		0,00 €	
6670	Vereinsmitteilungen		-4.228,49 €	
6680	Aufwendungen für bezogene Dienstleistungen		-1.364,21 €	
6680	Webhosting DfwG Homepage		-82,82 €	
6810	Reisekostenerstattung		-72,00 €	
		Gesamt		-5.747,52 €
<hr/>				
Saldo am 31.12.2020		Bank-Konto	12.423,75 €	
		Gesamt		12.423,75 €

Berlin, den 16.07.2021

Carsten Stäckert
(Schatzmeister)

Bericht der Kassenprüfer

*Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V.
im deutschen Verband Farbe*



Protokoll der Kassenprüfung für 2020

Am 9. Juli 2021 wurde die Prüfung der DfwG-Kasse für das Jahr 2020 von uns gemeinsam durchgeführt.

Geprüft wurden Anfangs- und Endbestand des Girokontos 206 002 3583 für das Jahr 2020, die Ausgabenbelege komplett sowie die Einnahmenbelege stichprobenartig für Beitragszahlungen, die von den für ein Jahr geltenden Beträgen abweichen.

Ergebnis:

Laut Auszügen der Berliner Sparkasse stimmt für das Girokonto der Bestand am 31.12.2020 mit dem Endbestand überein, der sich aus dem Anfangsbestand per 31.12.2019 und den Einnahmen und Ausgaben im Geschäftsjahr 2020 ergibt.

Die Buchführung ist transparent und übersichtlich. Sowohl in der Einnahmen-/Ausgabenliste und auf den Ausgabebelegen als auch in den Kontoauszügen sind alle Kontobewegungen fortlaufend nummeriert. Einnahmen und Ausgaben sind in separaten Tabellen festgehalten. Das hat die Prüfung sehr erleichtert und angenehm gemacht. Abweichungen wurden keine festgestellt.

Zusammenfassend wird aufgrund der Prüfung der Belege für das Kalenderjahr 2020 die Ordnungsmäßigkeit der Kassenführung der DfwG bescheinigt. Wir schlagen daher vor, den Schatzmeister Carsten Steckert für das Jahr 2020 zu entlasten.

Berlin, den 12. Juli 2021

Dipl.-Ing. Frank Rochow
(Kassenprüfer)

Dr. rer. nat. Günter Döring
(Kassenprüfer)

Helligkeitswahrnehmung strukturierter Oberflächen

Linda Mittelberg, Michael Heilig, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Martin Bastian

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Felicitas Muth, Wilfried Kunde

Lehrstuhl für Psychologie III, Universität Würzburg

Einleitung

Geht es um die Entscheidung, ob ein technisch vergleichbares Produkt einem Konkurrenzprodukt vorgezogen wird, so ist häufig der visuelle Gesamteindruck, im englischen „Appearance“ genannt, das entscheidende Kaufkriterium. Dabei bezeichnet Appearance einen rein subjektiven Eindruck, welcher zumeist über die Farbe, d. h. etwas erscheint heller, dunkler, oder einfach andersfarbig, ausgedrückt wird [1 bis 6]. Häufig hat sich aber nicht die Farbe, sondern die Oberfläche (Struktur, Glanzgrad etc.) geändert. Dadurch wird dem Betrachter fälschlicherweise der Eindruck einer Farbveränderung suggeriert. Messtechnisch kann die Appearance von Produkten aktuell nicht trivial erfasst werden.

Appearance gewinnt als Ausdruck für die optische Anmut für das Produktdesign, vor allem für die Qualitätssicherung in industriellen Branchen mit konsumorientierter Ausrichtung, zunehmend an Bedeutung. Daher widmeten sich von Juli 2018 bis August 2020 SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, ein Institut der Zuse-Gemeinschaft, und der Lehrstuhl für Psychologie III der Universität Würzburg in einem gemeinsamen Forschungsprojekt den Zusammenhängen zwischen farbmtrischen und psychologischen Kenngrößen zur Appearance-Bewertung von Kunststoffprobekörpern. Das Forschungsprojekt orientierte sich dabei an den maßgeblich für die industriellen Anwendungen relevanten Appearancebestimmenden Parametern der Farbgebung und der Oberflächenstrukturierung.

Aktuell ist es nicht möglich, messtechnisch erfasste Parameter einer Oberflächenstruktur mit dem subjektiven Eindruck eines Probanden in Einklang zu bringen. Damit ist nicht feststellbar, ob die Appearance zweier Oberflächen als zueinander akzeptabel eingestuft wird oder nicht. Bisher ist zudem unbekannt, ab welchem Maß einer Änderung der Oberflächenstruktur die visuell als Änderung der Farbe erfasst wird. Trotz Übereinstimmungen von Messwerten für optische Parameter innerhalb vorgegebener Toleranzbereiche kommt es demnach bei visuellen Abmusterungen zu inakzeptablen Beurteilungen und damit zu Reklamationen. Die daraus resultierenden Iterationsschleifen sind sowohl zeit- als auch kostenintensiv.

Für einen universell gebräuchlichen Umgang mit Appearance ist daher der Transfer eines Sinneseindrucks in Messgrößen ebenso bedeutungsvoll und herausfordernd wie eine Harmonisierung von messtechnisch erfassbaren Parametern mit ihrer korrespondierenden visuellen Bewertung.

In dem Forschungsvorhaben wurde die Appearance-Attribute Rauheit, Farbe und Glanz über instrumentell erfassbare Messgrößen mit konventioneller Messtechnik bestimmt. Zusätzliche experimentelle Probandenstudien lieferten Daten zur strukturinduzierten Farbwahrnehmung des menschlichen Betrachters. Anschließend wurden diese statistisch ermittelten Wahrnehmungsschwellenwerten der Probanden zur Farberscheinung mit den Messwerten für Farbe und Glanz korreliert.

Versuchsdurchführung

Spritzgießen der Prüfplatten

Es wurden Prüfplatten ($100 \times 100 \times 3,0 \text{ mm}^3$) unter Direkteinfärbung (Vormischung Farbmasterbatch Sicoversal*X, grau, 00-069205 von BASF in der Konzentration 2 % und Basispolymer ABS Terluran GP22 von Ineos Styrolution, Dosierung: Schnecke 35 mm, 20 D) im Spritzgießverfahren auf der Spritzgießmaschine BA1300/30 mm, WITTMANN BATTENFELD DEUTSCHLAND GMBH unter zusätzlichem Einsatz einer Mischdüse zur optimierten Homogenisierung der Farbmittel hergestellt.

Laserstrukturierung der Prüfplatten

Auf Kunststoffplatten mit konstanter Einfärbung wurden unterschiedliche Topografien mittels Laser erzeugt. Zur Strukturierung der Kunststoffoberflächen wurde der CO₂-Laser Speedy 100 C45 der Firma TROTEC LASER GMBH mit einer Laserwellenlänge von 10,6 μm verwendet. Die Maximalleistung des Lasers betrug 45,0 W, die maximale Lasergeschwindigkeit 2,80 m/s. Zur Strukturierung wurden Felder in der Lasersoftware als Laserdruckjob angelegt, welche sich in der Transparenz zu einer schwarzen Fläche unterschieden. Deswegen werden nachfolgend Transparenzwerte angegeben, mit welchen die Topografien gelasert wurden. Die auf die Kunststoffplatten übertragenen Topografie bzw. Strukturierung wurden aus diesen graphischen Darstellungen der kontrastierten Flächen über die Software umgesetzt und der Laser generierte über die jeweilige vorgegebene Druckauflösung eine definierte Topografie mit Strukturen. Die Transparenz des Druckfeldes geht demnach auch mit einer Strukturknappheit einher— je höher die Transparenz des Druckfeldes ist, desto weniger Strukturen werden gelasert.

Farb- und Glanzmessungen

Die farbmetrische Charakterisierung der Probekörper wurde in Reflexion und unter Berücksichtigung der Struktureffekte auf die Farb- bzw. Helligkeitswahrnehmung mit folgenden Geräten vorgenommen:

- X-RITE, 964 ($0^\circ/45^\circ$)
- BYK ADDITIVES & INSTRUMENTS SPECTRO2GUIDE ($45^\circ/0^\circ$)

Je Probekörper wurde an fünf unterschiedlichen Positionen auf der Oberfläche des Probekörpers gemessen. An jeder Position wurden drei Messungen ausgeführt. Die Messwerte wurden nach DIN EN ISO 11664-4 in CIELAB für Lichtart D65 und den 10° Beobachter ausgegeben. Die CIE L*-Werte wurden als arithmetische Mittelwerte sowohl über die Messungen an den einzelnen Messpositionen als auch über die fünf unterschiedlichen Messpositionen auf der Oberfläche des Probekörpers gebildet.

Es wurden die Glanzmessungen mit dem Gerät RHOPOINT IQ des Herstellers RHOPOINT INSTRUMENTS unter 20°; 60° und 85° in zwei orthogonal zueinander ausgerichteten Richtungsorientierungen auf der Probenoberfläche ausgeführt. Als Referenzplatte wurde eine unbehandelte Platte mit hochglanzpolierter Oberfläche eingesetzt.

Messungen der Topografie

Mit dem TRACEiT® der Firma INNOWEP GmbH wurden die gelaserten Oberflächen und ihre Referenzen untersucht und flächige Rauheitskennwerte nach der DIN EN ISO 25178-2:2012 für diese Oberflächen ermittelt. Nach der Aufnahme von 5 mm x 5 mm Messfeldern wurden diese in der Software "MountainsMap® 7.4" von Digital Surf® weiterverarbeitet. Bei den Rohprofilen wurde die Form durch ein Polynom fünften Grades entfernt. Anschließend wurde das Primärprofil durch einen Gaußfilter mit 0,25 mm Wellenlänge gefiltert, um die Welligkeit zu entfernen. Ausgewertet wurden danach verschiedene flächige Kenngrößen wie beispielsweise die Schiefe S_{sk} .

Probandenstudien

Zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle von Probanden wurde die Konstanzmethode als Verfahren angewendet [7]. Den Probanden wurden im Verlauf der Studie gleichzeitig zwei Probekörper dargeboten. Der Standardreiz (SR) wurde über den Verlauf der Studie und auch zwischen den Versuchspersonen nicht verändert. Der zweite Probekörper diente jeweils als Vergleichsreiz (VR). Dessen Ausgangsmaterial hatte dieselbe objektive Einfärbung wie das Ausgangsmaterial des Standardreizes, allerdings unterschieden sich die beiden Probekörper in ihrer Oberflächenstrukturierung. Für die Erzeugung der Strukturen über Laserbearbeitung wurde ein Wertebereich identifiziert, bei dem der visuelle Eindruck der jeweiligen Randkategorien als heller oder dunkler mit annähernder Sicherheit von allen Probanden korrekt klassifiziert werden sollten. Dieser Bereich erstreckte sich auf Transparenzwerte zwischen 30 und 90 % in 5 %-Stufen.

Pilotuntersuchungen mit ersten Probanden ergaben, dass vor allem im mittleren Bereich eine bessere Ausdifferenzierung in der objektiven Gleichheit der Strukturierungsstufen erforderlich ist, um präzisere Aussagen über subjektive Wahrnehmungsdifferenzierungen der Probanden zu treffen. Aus diesem Grund wurden zusätzlich im Bereich 50 % bis 70 % Transparenz weitere Zwischenstufen mit Kontrastunterschieden von 2 % in der Transparenz eingeführt.

Hieraus resultierte eine absolute Probenzahl von 19 unterschiedlich strukturierten ABS-Platten.

In einer weiteren Studie wurde die Maximum Likelihood Difference Scaling (MLDS) Methode angewandt, um zu untersuchen, ob Probanden Oberflächenunterschiede über das gesamte Probenspektrum gleich gut diskriminieren.

Probanden, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Vor Beginn des Versuchs bearbeiteten die Probanden 36 Tafeln zur Prüfung des Farbensinnes und des Farbsehens [8]. Das Testergebnis wurde den Probanden unmittelbar nach der Bearbeitung der Tafeln mitgeteilt. Eine Beteiligung an der Studie war mit maximal vier Fehlern möglich.

Die Studie folgte den gängigen ethischen Richtlinien und wurde durch die Ethikkommission des Instituts für Psychologie der Humanwissenschaftlichen Fakultät der Julius-Maximilians-Universität Würzburg als ethisch unbedenklich qualifiziert (GZ 2019-05).

Ergebnisse

Farb-, Glanz- und Strukturmessungen

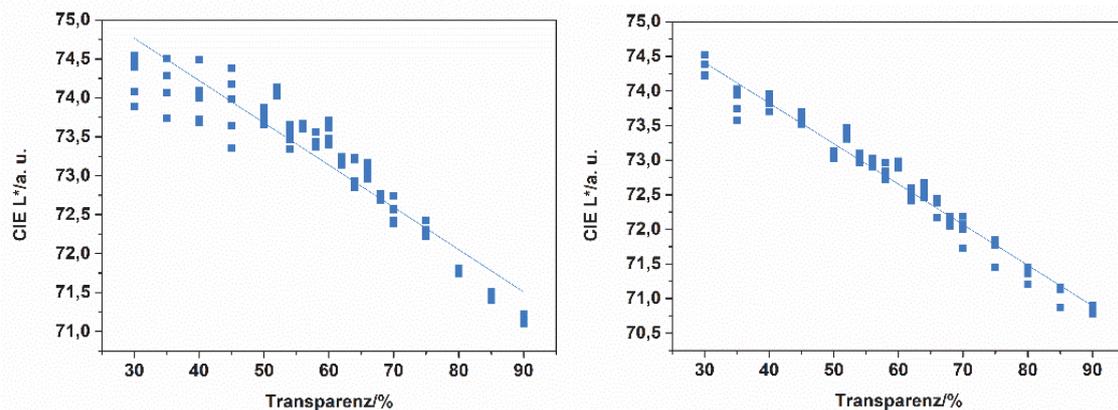


Abbildung 2: Reflexionsfarbmessung der Probekörper von Serie I. Links: Ausgeführt mit dem Gerät X-RITE 964, graphische Auftragung der CIE L*-Werte gegen die [%]-Transparenzwerte.

Rechts: Ausgeführt mit BYK ADDITIVES & INSTRUMENTS, SPECTRO2GUIDE 45°/0°, graphische Auftragung der CIE L*-Werte gegen die [%]-Transparenzwerte.

Die Farbmessung in Reflexion lieferte CIE L*-Werte, welche gegen die [%]-Transparenzen, stellvertretend für Strukturcharakteristika der Probenoberflächen, aufgetragen wurden (s. Abbildung 2). Mit beiden Messsystemen konnte jeweils ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen den Werten für die Transparenzen und den Helligkeitsattributen nachgewiesen werden.

Ein interessanter Parameter, der sich aus der Strukturbeurteilung ergibt, ist die Schiefe der skalenbegrenzten Oberfläche S_{sk} , welcher die Asymmetrie der Höhenverteilung beschreibt. Bei der Auftragung vom Glanz, gemessen unter 60° in horizontaler Messrichtung, und von S_{sk} gegen die gemessene Helligkeit L^* (s. Abbildung 3) konnte jeweils ein linearer Zusammenhang abgeleitet werden. Damit scheint die Schiefe S_{sk} ein geeigneter Parameter der Oberfläche für die Korrelation mit den gemessenen Helligkeitswerten zu sein. Je kleiner S_{sk} , desto heller erscheint die Oberfläche.

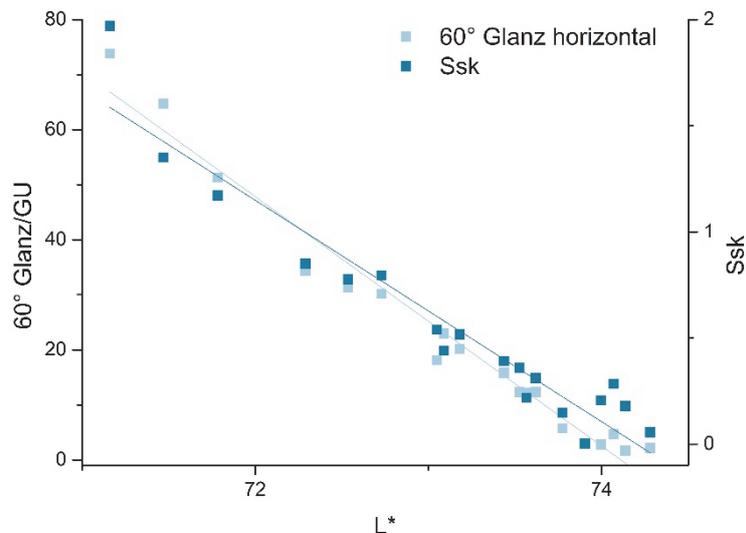


Abbildung 3: 60° Glanz und Schiefe Ssk aufgetragen gegen die gemessene Helligkeit L* mit jeweils linearem Fit.

Probandenstudien

Für die Auswertung der Probandenstudien wurde der Zusammenhang zwischen physikalischen Unterschieden und der Häufigkeit der wahrgenommenen Helligkeitsunterschiede in eine Richtung (VR heller als SR) ermittelt. Die Auswertung der Studie, an der 32 normalsichtige Probanden zwischen 19 – 66 Jahren ($M = 30,16$, $SD = 11,80$; 5 männlich, 1 linkshändig) teilnahmen, zeigte, dass die Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden umso wahrscheinlicher war, je größer die objektiven Oberflächenunterschiede der Probekörper waren.

Den normalsichtigen Probanden wurden zunächst Probenpaare bestehend aus SR und VR derselben unbunten Tönung, jedoch mit Unterscheidungen durch Texturvariationen, unter einem Betrachtungswinkel von 45° dargeboten (SR = Konstant, 60 % Transparenz, VR austauschbar). Es sollte zunächst unterschieden werden, ob Helligkeitsunterschiede erkennbar waren. Waren SR und VR objektiv gleich, so sollten die Personen zufällig entscheiden, ob der VR heller oder dunkler war. Dieser Punkt der Unterscheidungsschwelle liegt bei 50 % und wird als Point of Subjective Equality (PSE) bezeichnet. An diesem Punkt sind die beiden Reize für den Betrachter subjektiv gleich.

Üblicherweise wird eine Unterschiedsschwelle bestimmt, die sich im Bereich zwischen 25 % und 75 % befindet. Oberflächenunterschiede, die sich in diesem Rahmen bewegen, sind kaum wahrnehmbar und gelten folglich als akzeptabel. Es wird erwartet, dass die Helligkeitsunterscheidung für den unbunten Bereich umso wahrscheinlicher ist, je größer die Oberflächenunterschiede zwischen den Probekörpern (SR vs. VR) sind.

Tabelle 1: Modell der binären logistischen Regression

	B (SE)	95 %-KI für Odds Ratio		
		Untergrenze	Odds Ratio	Obergrenze
Einschluss				
Konstante	6,848* (0,199)		1.039,21	
VRreiz	-0,121* (0,003)	0,881	0,886	0,892

$R^2 = 0,68$ (Hosmer & Lemeshow), $0,36$ (Cox & Snell), $0,48$ (Nagelkerke). Modell
 $X^2(1) = 2.683,20$, $p < 0,001$ * $p < 0,001$

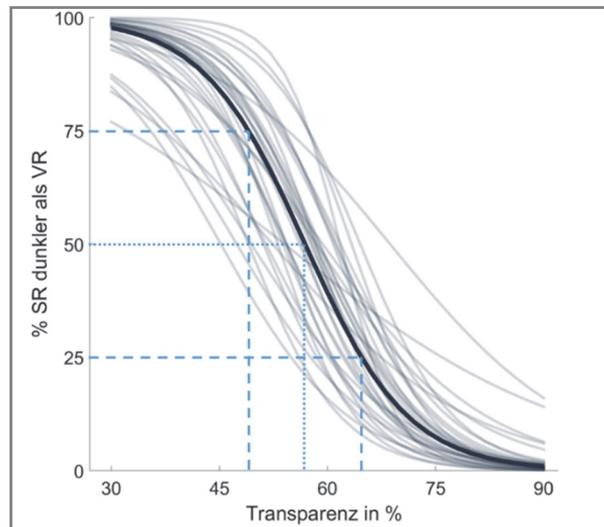


Abbildung 4: Binär logistische Funktionen der Helligkeitseinschätzungen der Probanden. Die dunkle Linie zeigt die mittlere logistische Regressionsfunktion

Die Häufigkeit von Wahrnehmungsunterschieden folgt in der Regel einer logistischen Funktion physikalischer Reizunterschiede [9]. Aus diesem Grund wurde mithilfe von IBM SPSS [10] eine binär logistische Funktion mit den beiden Ergebnissen ‚heller‘ und ‚dunkler‘ mittels Regression an die erhobenen Daten angepasst und der PSE bestimmt. Zudem wurde der vorher definierte Toleranzbereich der Wahrnehmungsschwelle zwischen 25 % und 75 % festgestellt. In diesem Bereich lag eine erhebliche Unsicherheit bei den Betrachtern vor, die Helligkeitsunterschiede zuverlässig entdecken zu können. Die Qualitätsschwankungen der Probekörper und produktionsbedingte Strukturunterschiede können in diesem Bereich vernachlässigt werden.

Die subjektive Übereinstimmung (PSE) lag erwartungsgemäß sehr nahe bei der objektiven Gleichheit der beiden Probenkörper, bei 56,7 % Transparenz. Die geringfügige Abweichung von 60 % ist vermutlich auf Antworttendenzen, den SR generell als heller zu bewerten, zurückzuführen. Der Toleranzbereich spannte sich je 9,1 % zu beiden Richtungen der objektiven Gleichheit. Die an den Datensatz angepasste Modell-Regressionsgleichung (s. Tabelle 1) war in der Lage 74,7 % der Probandenurteile korrekt zu klassifizieren. Die Regressionsgleichungen für jeden einzelnen Probanden klassifizierten zwischen 62,6 % - 86,8 % der jeweiligen Urteile korrekt. Abbildung 4 zeigt die Regressionskurven für alle Probanden einzeln (hellgraue Linien) und die angepasste Regressionskurve für die gesamte Stichprobe (dunkelgraue Linie). Die Schnittpunkte der blauen Parallelen zur x-Achse markieren den Punkt subjektiver Gleichheit (bei 50 %) und die Unterschiedsschwellen (bei 25 % bzw. 75 %).

Das erwartete Ergebnis stellte sich in Form einer logistischen Funktion dar (Abbildung 5, links). Als Unterschiedsschwelle galt per Konvention derjenige physikalische

Unterschied, der in nicht mehr als 50 % der Beobachtungszeitpunkte zu einem subjektiven Wahrnehmungsunterschied führte.

Je größer die [%]-Transparenz einer Vergleichsprobe, umso geringer die Wahrscheinlichkeit, dass sie als heller als die Referenzprobe mit ausgewählter konstanter [%]-Transparenz wahrgenommen wird (Abbildung 5, links). Ebenso zeigte sich im Bereich von Δ Transparenz = ± 10 % Transparenzstufen, die Unsicherheit der Betrachter dahingehend zu sagen, welche Probe heller war. Dies ist allgemein typisch für Reize, die im Bereich der Unterschiedsschwelle liegen. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse lässt sich beurteilen, dass Unterschiede der [%]-Transparenz von weniger als 10 % in weniger als 30 % der Beobachtungszeitpunkte zu wahrgenommenen Helligkeitsunterschieden an den Oberflächen der eingesetzten Probenkörpern führten. Darüberhinausgehende Oberflächenunterschiede werden verlässlich als unterschiedlich hell wahrgenommen. Es korrelierten auch die Unterschiede in Helligkeitsattributen L^* mit den Unterschieden in den Oberflächentexturen (Abbildung 5, rechts). Aus den erhobenen Daten lässt sich schlussfolgern, dass bereits Unterschiede im Bereich $\Delta L^* < 0.5$ subjektiv gering ins Gewicht fallen.

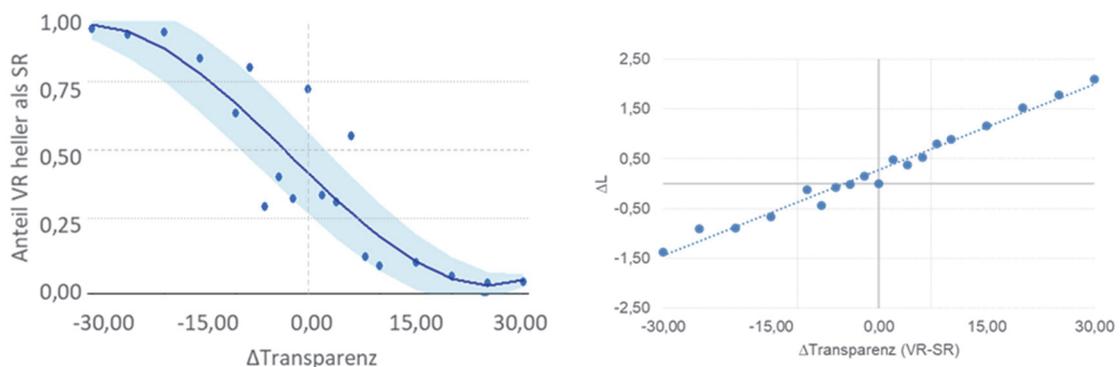


Abbildung 5: Links: Zusammenhang zwischen dem Unterschied in [%]-Transparenz und dem Anteil der „heller“-Beurteilungen in % (VR: Vergleichsreiz, SR: Standardreiz). Die blaue Fläche repräsentiert das statistische Konfidenzintervall der logistischen Regression.

Rechts: Zusammenhang zwischen der Transparenz und Unterschieden auf der L^* -Achse. Die beiden Parallelen zur y-Achse kennzeichnen den Toleranzbereich, innerhalb dessen Probanden Schwierigkeiten hatten, Unterschiede eindeutig zu erkennen.

Das Ergebnis der MLDS Methode legt nahe, dass die Diskriminierung dieser Unterschiede über den gesamten Bereich der untersuchten Strukturunterschiede gleich gut ist.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Zusammenhänge zwischen gemessener Helligkeit L^* und gemessenem Glanz sowie ausgewählten Oberflächenparametern bestehen. Insbesondere der Oberflächenparameter Schiefe S_{sk} korreliert linear mit der gemessenen Helligkeit L^* . Ähnliche Korrelationen sind in der Literatur für Bilder strukturierter Oberflächen bereits beschrieben [11]. Im Forschungsvorhaben wurden diese Zusammenhänge nun erstmals an physischen Probekörpern und mit kommerzieller Messtechnik gezeigt.

Wichtige Erkenntnisse ergaben sich aus der psychologischen Studie zum wahrnehmbaren Helligkeitsunterschied bei unterschiedlicher Oberflächenstrukturierung der Probekörper. Ein messtechnisch ermittelter Unterschied von $\Delta L^* < 0,5$ eines VR zum SR konnte von den Probanden nicht als signifikant heller bzw. dunkler erkannt werden. Dies entspricht einer Änderung von S_{sk} von etwa 0,26. Es konnte anhand des MLDS gezeigt werden, dass die Sensitivität der Probanden auf die Unterschiede in der Oberflächenstruktur bezüglich der Helligkeit über den gesamten untersuchten Bereich der Strukturunterschiede gleich war.

Es sind weiterführende Forschungsprojekte mit dem Ziel einer Appearance-Leitlinie geplant, welche einen stärkeren Fokus auf Oberflächenparameter (z. B. die Schiefe S_{sk}) legen, welche sich aus Bildgebungsstatistik ermitteln lassen. Dabei soll der Fokus auf der Ermittlung der Änderungen der Farbe oder Oberflächenmerkmale liegen, ab denen Probanden einen VR zu einem SR als verlässlich als ungleich einstufen.

Interessierte Industrieunternehmen und Personen sind eingeladen, sich beim SKZ oder der Uni Würzburg zu melden, um den Abschlussbericht des Forschungsvorhabens zu erwerben oder Folgeprojekte zu begleiten, dabei Anregungen einzubringen und frühzeitig von den Ergebnissen zu profitieren.

Das Vorhaben (20094 N) der Forschungsvereinigung "Fördergemeinschaft für das Süd-deutsche Kunststoff-Zentrum e.V." wurde zwischen 01.07.2018 und 31.08.2020 über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ansprechpartner:

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum
Dr. Linda Mittelberg
l.mittelberg@skz.de
+49 (0) 931 4104 - 458

Lehrstuhl für Psychologie III Uni Würzburg
Prof. Dr. Wilfried Kunde
wilfried.kunde@uni-wuerzburg.de
+49 (0) 931 3182 645

Literatur

- [1] Uwe Schröder: Farbton-Management für die globale Produktion. Kunststoffe 2005 1, S. 81–83
- [2] ASTM E284: Standard Terminology of Appearance. 2017
- [3] CIE: Proceedings of the Expert Symposium on Visual Appearance. 19 - 20 October 2006, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, France. CIE X, 032, Buch. Vienna: Comm. Internat. de l'Eclairage 2007
- [4] A framework for the measurement of visual appearance. CIE technical report CIE 175:2006, CIE, Vienna 2006
- [5] Hunt, R. W. G. u. Pointer, M. R.: Measuring colour. Wiley-IS&T series in imaging science and technology. Chichester: Wiley 2011
- [6] Christian Eugène: Measurement of "total visual appearance": a CIE challenge of soft metrology. 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man, Science & Measurement. Annecy 2008
- [7] T. Hochrein, W. Franz, J. Botos, O. Stübs, M. Bastian: Zwischen Täuschung und Realität. Kunststoffe 2014 7, S. 50–54
- [8] Bergmann Tiest, W. M. u. Kappers, A. M. L.: Analysis of haptic perception of materials by multidimensional scaling and physical measurements of roughness and compressibility. Acta psychologica 121 (2006) 1, S. 1–20
- [9] Watson, A. B.: Probability summation over time. Vision Research 19 (1979) 5, S. 515–522
- [10] IBM Corp.: IBM SPSS Statistics for Windows. Armonk, NY: IBM Corp. 2017
- [11] Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L. u. Adelson, E. H.: Image statistics and the perception of surface qualities. Nature 447 (2007) 7141, S. 206–209

Herleitung und Kritik an den CIE-Normvalenzsystemen nach Guild und Wright

Dipl.-Ing.(FH) Christian Greim M.A., Hochschule Mittweida

1 Zusammenfassung

Die CIE-Normvalenzen werden in Lehrbüchern oft einfach als gegeben vorausgesetzt, manchmal sogar als die Empfindlichkeitskurven der unterschiedlichen Zapfentypen angegeben.¹ Diese sind aber erst aus unterschiedlichen Messungen errechnet worden. Die einzelnen Schritte sollen hier einmal ausführlich dargestellt und hinsichtlich Herleitung und Genauigkeit kritisch gewürdigt werden. In einem letzten Abschnitt wird die Frage untersucht, wie weit die vielfach verwendeten Lineartransformationen bei der Herleitung der Normvalenzen im Widerspruch stehen zur Verwendung nicht-linearer Übertragungskurven bei der Definition anderer CIE-Farbenräume wie CIELAB oder CIECAM02.

2 Einordnung

Dieser Artikel bildet den ersten Teil einer Serie, welche den Inhalt zweier Vorträge bei der Jahrestagung der DfwG und die Masterthesis des Autors² umfasst. Am Ende soll die These belegt werden, dass es mittels der Programmieretechnik neuronaler Netze möglich ist, erstens das Farbsehen insgesamt als neuronales Netz aufzufassen und auf diese Weise zweitens Farbenräume gefunden werden können, bei denen kleine Farbabstände gleichmäßiger als bisher bewertet werden können. Ziel wäre ein wirklich gleichabständiger Farbenraum.

3 Beschreibung idealer Versuche nach Wright

Die Versuche von Wright (1928) bzw. Guild (1931) sind sozusagen die Grundlage aller Farbmatrik. Trotzdem sollte man sich immer im klaren sein, wie

die resultierenden Normspektralwertfunktionen messtechnisch ermittelt und mathematisch hergeleitet wurden. Sie wurden nämlich nur indirekt ermittelt. Im Folgenden wird beschrieben, wie eine Ideale Herleitung ausgesehen hätte. Der realen Herleitung wird dann ein eigenes kleines Kapitel gewidmet.

Das sichtbare Licht wird zunächst in einzelne Wellenintervalle von jeweils etwa 10 nm Breite eingeteilt. Es ergäben sich also im Bereich von 400 bis 700 nm dreißig Wellenintervalle³. Beispielsweise aus Abbildung 15 ergibt sich, dass ein Bereich von 380 bis 780 nm sinnvoller ist. Wenn man eines dieser Wellenintervalle ansprechen und messtechnisch auswerten will, ergeben sich Messkurven ähnlich wie in Abbildung 1 und 2 gezeigt. Formal wurden eigentlich Optimalfarben angestrebt, die per Definition *höchstens zwei Sprungstellen von 0 auf 1 oder umgekehrt aufweisen*.⁴ Aufgabe der Versuche ist es nun, einen monochromatischen Farbreiz aus der Mitte jedes schmalen Wellenintervalls durch eine Mischung aus drei anderen monochromatischen Farbreizen zu beschreiben.⁵ Dabei wird jedes mögliche Wellenintervall 380 bis 390 nm, 390 nm bis 400 nm und sofort bis 770 bis 780 nm, getrennt untersucht. Unsere Abbildung 1 zeigt in etwa ein mo-

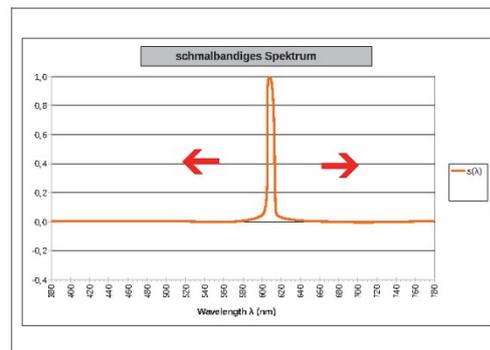


Abbildung 1: monochromatisches Spektrum, schematische eigene Darstellung, wie sie ein Spektralphotometer liefert

nochromatisches Spektrum bei 605 nm. Real ergeben sich eher schmalbandige, denn wirklich monochromatische Spektren.

1 [Böhringer 2014], Seite 5

2 [Greim 2020]

3 [Guild 1931], Seite 158 und 164

4 [DIN 5033-1: 217-10], Seite 10

5 [DIN 11664-1], Seite 10

Idealerweise hätten die monochromatischen, realiter schmalbandigen Spektren $s(\lambda)$ aus folgenden drei monochromatischen Spektren gemischt werden sollen: für die kurzen Wellenlängen ein monochromatisches Spektrum mit einem Maximum bei 435,8 nm, für die mittleren Wellenlängen eines mit einem Maximum bei 546,1 nm und schließlich für

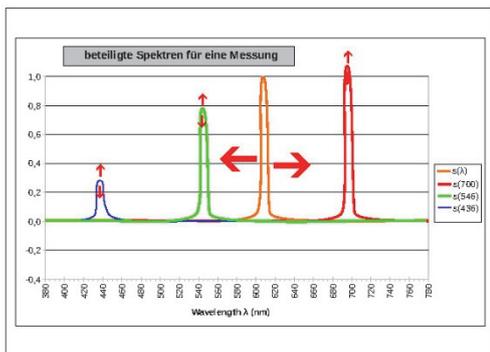


Abbildung 2: idealisierte eigene Darstellung aller beteiligten Spektren in einer Messung im Sinne von Guild und Wright

den langwelligen Bereich mit einem Maximum bei 700 nm,⁶ wobei die Wellenlängen 435,8 nm und 546,1 nm von einer Quecksilberdampfampe zusammen mit weiteren Wellenlängen emittiert werden⁷. Es sollten also bei den Experimenten nur Optimalfarben, angenähert durch schmalbandige Spektren verwendet werden. Diese sind im normalen Leben aber eher eine Ausnahmerecheinung, der wir allenfalls in Gestalt eines Schmetterlings oder Regenbogens begegnen. Im Normalfall sehen die Spektren von Farbreizen eher aus, wie in den Abbildung 3 und 4 gezeigt. Diese sind modellhaft so gewählt, dass sie vielleicht sogar als gleichfarbig wahrgenommen würden.

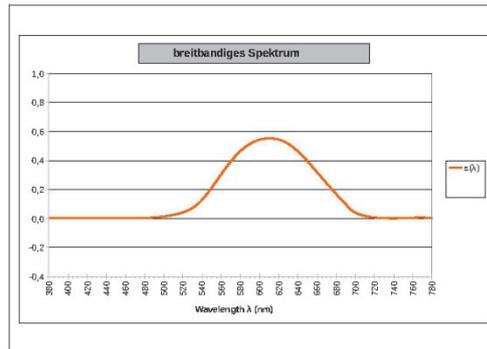


Abbildung 3: breitbandiges Spektrum

Die Grundüberlegung der Farbforscher zur Zeit Wright und Guild für die Messungen war, dass letztlich jeder Farbreiz wie modellhaft in Abbildung 3 und Abbildung 4 gezeigt, aus unterschiedlichen Anteilen solcher monochromatischer Farbreize wie in Abbildung 1 oder 2 gezeigt zusammengesetzt ist.

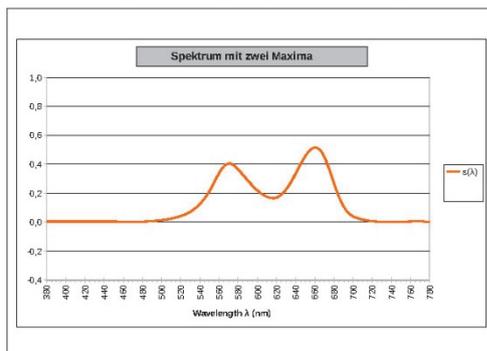


Abbildung 4: Spektrum mit zwei Maxima. Es können aber auch viele Maxima sein.

An den tatsächlichen Versuchen sind für jede Messung eines monochromatischen Referenzspektrums $s(\lambda)$ drei weitere monochromatische Spektren in unterschiedlicher Stärke beteiligt, wie in Abbildung 2 gezeigt. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 5 gezeigt. Ein Beobachter blickt auf ein zweigeteiltes rundes Betrachtungsfeld. In unserer Darstellung Abbildung 5 wird links das möglichst monochromatische Referenzspektrum $s(\lambda)$ projiziert, dessen Maximum bei jedem Versuch variiert wird, so dass schließlich das gesamte sichtbare Licht durchschritten wird, also erste Messung bei 380 nm,

6 [DIN 11664-1], Seite 10

7 [Wikipedia] Quecksilberdampfampe, 24.2.2021

zweite Messung bei 390 nm usw. bis 780 nm. Mittels eines Helligkeitsreglers kann dafür gesorgt werden,

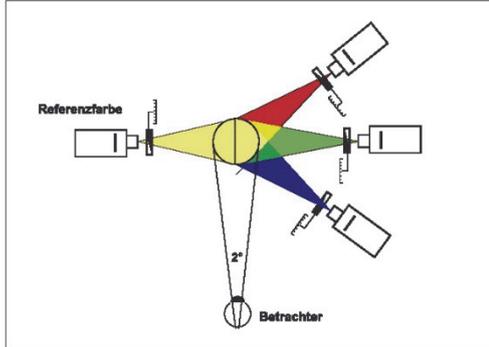


Abbildung 5: Prinzipieller Versuchsaufbau bei Guild und Wright, nach [Kamm 1987]

dass die unterschiedlichen Referenzspektren $s(\lambda)$ für den Beobachter immer gleich hell erscheinen. Rechts werden immer die gleichen drei Primärvalenzen, $s(435,8)$, $s(546,1)$ und $s(700)$, mit Maxima bei 435,8, 546,1 und 700 nm, projiziert. Mit den 2° wird letztlich die Größe des Betrachtungsfeldes angegeben. Je nach Größe des Betrachtungsfeldes muss der Beobachtungsabstand so gewählt werden, dass der Raumwinkel 2° beträgt.

Die Beobachter sollen nun die Intensität der Primärvalenzen, $s(435,8)$, $s(546,1)$ und $s(700)$, mittels dreier Helligkeitsregler jeweils so verändern, dass die linke und rechte Bildhälfte nicht zu unterscheiden sind. Auf diese Weise wird für jedes $s(\lambda)$ ein Mischungsverhältnis aus $s(435,8)$, $s(546,1)$ und $s(700)$ ermittelt. Für jeden Versuch würde ein Satz Formeln folgender Form entstehen: $s(380) = r_1 \cdot s(700) + g_1 \cdot s(546,1) + b_1 \cdot s(435,8)$; $s(390) = r_2 \cdot s(700) + g_2 \cdot s(546,1) + b_2 \cdot s(435,8)$; bis $s(780) = r_{40} \cdot s(700) + g_{40} \cdot s(546,1) + b_{40} \cdot s(435,8)$. Die so gewonnenen Werte r_1 bis r_{40} , g_1 bis g_{40} , b_1 bis b_{40} lassen sich dann ihrerseits wieder als Kurven in Abhängigkeit von der zugehörigen Wellenlänge von $s(\lambda)$ darstellen. Diese werden dann mit $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ bezeichnet. Das Ergebnis wird in Abbildung 6 dargestellt.

Bei dem Graphen springen sofort die negativen Werte der $r(\lambda)$ -Kurve ins Auge. Und damit die Frage: Was soll eine negative Farbe sein? Wir untersuchen hier aber noch keine Farben, sondern Mischungsverhältnisse. Besser sollten wir fragen: Wie

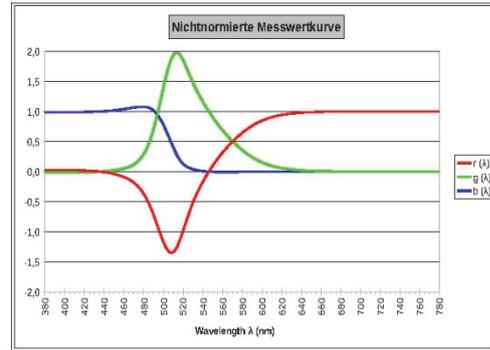


Abbildung 6: Versuchsergebnis von Guild und Wright, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

kommen diese negativen Werte zu Stande? Bei den Experimenten wurde schnell klar, dass sich viele Farben $s(\lambda)$ nicht aus den drei anderen $s(435,8)$, $s(546,1)$ und $s(700)$ mischen lassen. Um nun trotzdem ein Mischungsverhältnis angeben zu können wurde eine der Grundfarben $s(435,8)$, $s(546,1)$ oder $s(700)$, meist jedoch $s(700)$ zusätzlich auf die Seite des Referenzspektrums $s(\lambda)$ projiziert, wie in Abbildung 7 dargestellt.

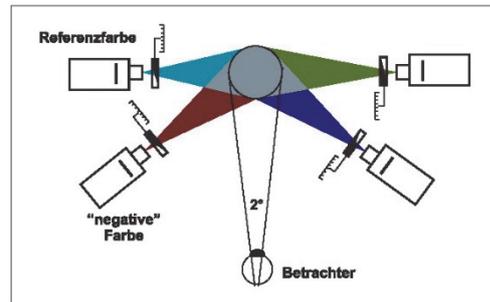


Abbildung 7: Prinzipieller Versuchsaufbau bei Guild und Wright, nach [Kamm 1987] für „negative“ Farben oder besser virtuelle Farben.

In der Abbildung 7 wird $s(700)$ mit auf das Referenzspektrum $s(\lambda)$ projiziert. Auch hier kann die Intensität mittels Helligkeitsregler verändert werden. Nur wird diese bei der Formel mit einem negativen Vorzeichen berücksichtigt, also beispielsweise: $s(500) = b_{10} \cdot s(435,8) - r_{10} \cdot s(700) + g_{10} \cdot s(546,1)$.⁸ Die

⁸ [Guild 1926], Seite 107ff und 117f

ses Vorgehen mutet zu Recht erst einmal etwas befremdlich an, aber wie wir in den nächsten Kapiteln sehen werden, fußt darauf die ganze Farbmimetrik nach CIE. Es scheint also zu funktionieren, könnte aber bei Nichtlinearität des Farbschens Probleme verursachen.

4 Die realen Versuche nach Wright und Guild

Die im Vorangegangenen Kapitel beschriebenen Versuche und Berechnungen sind nach DIN EN ISO/CIE 11664-1: 2020-3 tatsächlich die experimentelle Grundlage der Farbmimetrik und sollten auch so funktionieren. Wright und Guild haben sie aber tatsächlich so nie gemacht. In der gerade erwähnten DIN wird das angedeutet, indem dort auf Seite 10 wörtlich steht: *Die CIE 1931-Spektralwertfunktionen, Wright [1][2] und von Guild [3] abgeleitet.* Was bedeutet das konkret? Wright hat für seine Experimente tatsächlich monochromatisches Licht der Wellenlängen, 460 nm, 530 nm und 650 nm verwendet⁹, also grundlegend andere als die normgerechten 435,8 nm, 546,1 nm und 700 nm¹⁰. Guild verwendet monochromatisches Licht nur als Referenz¹¹ für die Primärvalenzen werden Filter verwendet.¹² Die Transmissionskurven dieser Filter werden von Guild nie veröffentlicht.

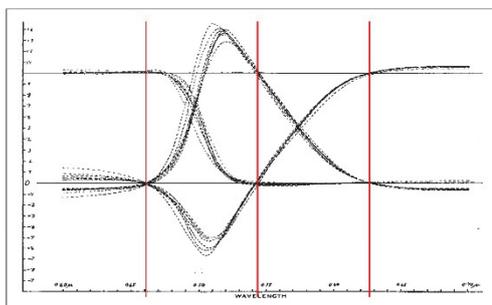


Abbildung 8: Reproduktion der Messergebnisse von Guild [Guild 1931], Seite 158 mit eigenen roten Strichen, um zu zeigen, wo vermutlich die Maxima der verwendeten Filter für seine Primärvalenzen liegen

Wie man aus Abbildung 8 visuell ermitteln kann, müssten die Maxima der verwendeten Filter für Guilds Primärvalenzen bei etwa 461 nm, 543 nm und 627 nm gelegen haben. Wer sich im einzelnen dafür interessiert, wie die Ergebnisse von Wright und Guild in die CIE 1931-Spektralwertfunktionen umgerechnet wurden, sei auf eine Arbeit aus dem Jahr 2009 von A. D. Broadbent von der Université de Sherbrooke in Kanada verwiesen. Ein wichtiger Teil der Arbeit lässt sich aus Abbildung 9 ersehen. Hier sind die Ergebnisse von Wright (gepunktet) und Guild (durchgezogen) analog Abbildung 6 mittels Lineartransformation umgerechnet, als ob die Primärvalenzen bei normgerechten 435,8 nm, 546,1 nm und 700 nm gelegen hätten.¹³

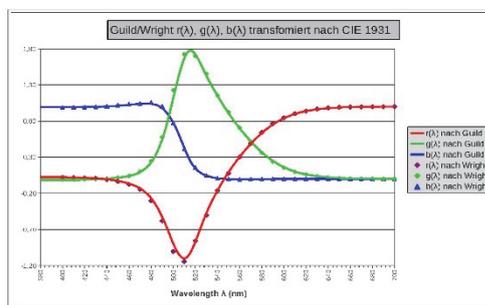


Abbildung 9: Abweichungen von $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ jeweils nach Guild und Wright, linear transformiert nach normgerechten Primärvalenzen 435,8 nm, 546,1 nm und 700 nm [Broadbent 2009], Seite 9 und zugehörige Excel-Datei, eigene Formatierung. Vergleiche Abbildung 6

Der wichtige Unterschied zwischen beiden ist, dass Wright tatsächlich in allen Fällen mit monochromatischem Licht arbeitet, was dem damaligen Postulat nach Verwendung von Optimalfarben entspricht, während Guild für die Primärvalenzen Filter verwendet, deren Transmissionskurven er wie gesagt nie veröffentlicht hat. J. Guild hat seine Experimente zudem erst veröffentlicht, nach dem klar war, dass sowohl seine Ergebnisse, als auch die bereits 1928 von Wright gewonnenen, sich durch einfache Lineartransformationen in die von der CIE gewünschten monochromatischen Primärvalenzen bei 435,8 nm, 546,1 nm und 700 nm umrechnen lassen und zu annähernd gleichen Ergebnissen führen. Guilds Nichtveröffentlichung der Transmissions-

9 [Broadbent 2009], Seite 2

10 DIN EN ISO/CIE 11664-1:2020-03, Seite 10

11 [Guild 1931], Seite 152-156

12 [Broadbent 2009], Seite 7

13 [Broadbent 2009], Seite 9

kurven, sowie die späte Veröffentlichung seiner Experimente lassen sich am schlüssigsten damit erklären, dass er selbst die Verwendung nichtmonochromatischer Primärvalenzen für problematisch hielt. Die Unterschiede zwischen Guild und Wright halten sich aber, wie man in Abbildung 9 sehen kann, tatsächlich in sehr engen Grenzen.

5 Von den Messergebnissen zu den Normvalenzen

5.1 Einführung der $V(\lambda)$ -Kurve

Die Farbvalenzen wie in den Abbildungen 6 oder 9 zu sehen, liefern noch keine gute Beschreibung für das menschliche Farbsehen. An den Enden des Spektrums bei 380 nm und bei 780 nm würde beispielsweise nach Abbildung 6 ein strahlendes Blau oder strahlendes Rot leuchten. Das widerspricht Messungen zur Helligkeitswahrnehmung von reinen Spektralfarben, die schon aus dem Jahr 1924 stammen¹⁴, wonach die Helligkeitswahrnehmung zu den Enden des Spektrums hin immer geringer, mithin die Farben immer dunkler werden. Diese CIE1924 $V(\lambda)$ ¹⁵-Kurve, welche die spektrale Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges beschreibt, spielt für die weiteren Überlegungen noch eine große Rolle, weshalb sie in Abbildung 10 wiedergegeben ist.

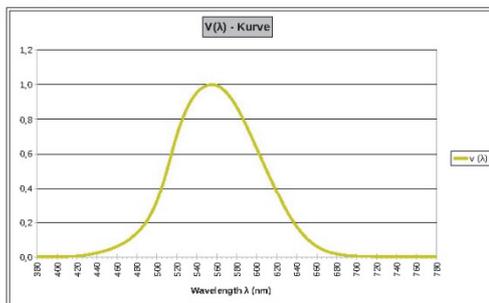


Abbildung 10: CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

¹⁴ [Wyszecki 1982], Seite 256f

¹⁵ Im Deutschen gesprochen: Vau-Lambda

Die eigentlichen Messungen für die Normspektralwertfunktionen enden mit Abbildung 6. An den Messergebnissen wurde nur noch insofern etwas berechnet, als dass sie auf 1 normiert wurden. Das heißt, jedes Messwerttripler wurden mit einem individuellen Faktor multipliziert, so dass folgender Zusammenhang gilt:

$$r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda) = 1$$

Außerdem sollten die Messergebnisse mit der CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve in Einklang gebracht werden. Würde man nun dieses $V(\lambda)$ einfach mit den jeweiligen $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ im mathematischen Sinne falten. Erhielte man Kurven, wie in Abbildung 11

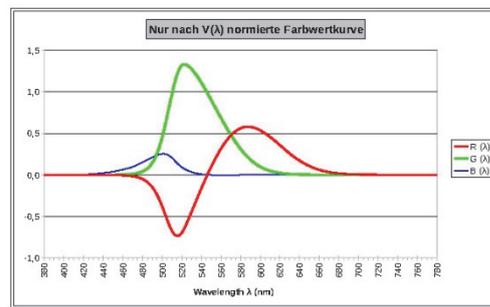


Abbildung 11: Ergebnisse von Guild und Wright nur verrechnet mit CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

gezeigt. Die Faltung geschieht so, dass bei einem bestimmten λ die jeweiligen Werte miteinander multipliziert werden, also $R(\lambda) = r(\lambda) \cdot V(\lambda)$, oder konkreter beispielsweise: $R(550) = r(550) \cdot V(550)$. Schrittweise wird diese Multiplikation für alle λ , aber für jede Primävalenz, also $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ getrennt durchgeführt. Man erhält dann drei Kurven $R(\lambda) = r(\lambda) \cdot V(\lambda)$, $G(\lambda) = g(\lambda) \cdot V(\lambda)$ und $B(\lambda) = b(\lambda) \cdot V(\lambda)$.

Wenn man also die bisherigen Messwerte einfach mit $V(\lambda)$ falten würde, erhielte man ein Ergebnis wie in Abbildung 11 gezeigt. Es fällt auf, dass die Blaukurve in Relation zu den beiden anderen sehr geringe Ausschläge zeigt und es sehr weite Bereiche mit negativen Zahlenwerten gibt. Solche Primärvalenzen wären zwar möglich, aber sehr unpraktisch in der späteren Anwendung.

5.2 Berechnung von R(λ), G(λ) und B(λ)

Damit nun sinnvollere Farbwerte entstehen, wurden folgende Zusammenhänge postuliert, die für die Farbvalenzen R(λ), G(λ) und B(λ) gelten sollten:¹⁶

$$1. r(\lambda) = \frac{R(\lambda)}{R(\lambda) + B(\lambda) + G(\lambda)}$$

$$2. g(\lambda) = \frac{G(\lambda)}{R(\lambda) + B(\lambda) + G(\lambda)}$$

$$3. b(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{R(\lambda) + B(\lambda) + G(\lambda)}$$

$$4. \alpha \cdot R(\lambda) + \beta \cdot G(\lambda) + \gamma \cdot B(\lambda) = V(\lambda)$$

wobei α, β- und γ bis dahin noch nicht bekannt sind und ebenfalls erst einmal postuliert werden. Der Zusammenhang Nummer 1 soll vereinfacht geschrieben werden:

$$r = \frac{R}{R+B+G} \text{ daraus folgt}$$

$R = r(R+B+G)$ daraus folgt beispielsweise

$$\frac{R}{G} = \frac{r(R+B+G)}{g(R+B+G)} = \frac{r}{g} \text{ durch Analogie folgen dar-}$$

aus diverse weitere Zusammenhänge:

$$\frac{G}{R} = \frac{g}{r}; \frac{B}{G} = \frac{b}{g}; \frac{R}{B} = \frac{r}{b}; \frac{G}{B} = \frac{g}{b}; \frac{B}{R} = \frac{b}{r}$$

daraus folgt ferner:

$$R = r \cdot \frac{R}{r} = r \cdot \frac{G}{g} = r \cdot \frac{B}{b}$$

$$G = g \cdot \frac{R}{r} = g \cdot \frac{G}{g} = g \cdot \frac{B}{b}$$

$$B = b \cdot \frac{R}{r} = b \cdot \frac{G}{g} = b \cdot \frac{B}{b} \text{ aus diesen Zusammenhän-}$$

gen unter Verwendung des Postulates Nummer 4 können wir folgern:

$$V = \alpha \cdot r \cdot \frac{R}{r} + \beta \cdot g \cdot \frac{R}{r} + \gamma \cdot b \cdot \frac{R}{r} = \frac{R}{r} \cdot (\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b)$$

$$V = \alpha \cdot r \cdot \frac{G}{g} + \beta \cdot g \cdot \frac{G}{g} + \gamma \cdot b \cdot \frac{G}{g} = \frac{G}{g} \cdot (\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b)$$

$$V = \alpha \cdot r \cdot \frac{B}{b} + \beta \cdot g \cdot \frac{B}{b} + \gamma \cdot b \cdot \frac{B}{b} = \frac{B}{b} \cdot (\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b)$$

Durch Umstellen wird aus diesen Formeln:

$$R = \frac{r \cdot V}{\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b}; \quad G = \frac{g \cdot V}{\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b};$$

¹⁶ Die folgenden Gleichungen in diesem Kapitel nach Ch. Schierz, persönliche Mitteilung vom 1. 3. 2020 und analog [Wyszecki 1982], Seite 135f

$B = \frac{b \cdot V}{\alpha \cdot r + \beta \cdot g + \gamma \cdot b}$ wenn wir ein neu einzuführendes $N(\lambda)$ ¹⁷ folgendermaßen definieren:

$$N(\lambda) = \frac{1}{\alpha \cdot r(\lambda) + \beta \cdot g(\lambda) + \gamma \cdot b(\lambda)} \text{ ergeben sich}$$

schließlich folgende Zusammenhänge:

$$R(\lambda) = r(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$$

$$G(\lambda) = g(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$$

$$B(\lambda) = b(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$$

Die für $N(\lambda)$ notwendigen Faktoren α, β- und γ sind auch nach diesen Rechenschritten noch unbekannt. Leider ergibt sich trotz der vielen Zusammenhänge kein Gleichungssystem mit dem sich die die Faktoren einfach ermitteln ließen. Deshalb müssen die Werte letztlich durch schrittweise Näherung ermittelt werden.¹⁸ Sie lauten: α = 1,0000, β = 4,5907 und γ = 0,0601.

Wie gerade gezeigt, wird zur Berechnung von R(λ), G(λ) und B(λ) aus r(λ), g(λ) und b(λ) nicht mit einer einfachen V(λ)-Funktion gefaltet, sondern mit einer anderen Funktionskombination aus V(λ)·N(λ), wie in Abbildung 12 gezeigt. Diese Kurve beinhaltet zwar die V(λ)-Kurve, aber zusätzlich noch eine andere, die wir in den vorangegangenen Gleichungen mit N(λ) bezeichnet haben, weil durch sie eine gewisse Normierung geschieht.

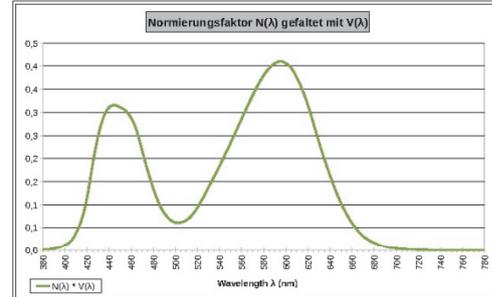


Abbildung 12: Mit dieser Kurve $N(\lambda) \cdot V(\lambda)$ und nicht mit einer $V(\lambda)$ -Kurve werden die einzelnen Kurven $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, und $B(\lambda)$ tatsächlich errechnet, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

Die reine Kurve zur Normierung, $N(\lambda)$ ist in Abbildung 13 zu sehen.

¹⁷ Der Faktor $N(\lambda)$ wird hier wegen seiner Wichtigkeit und für eine schlüssigere Argumentation vom Autor eingeführt

¹⁸ [Wyszecki 1982], Seite 136

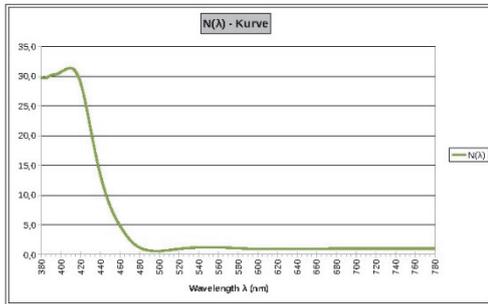


Abbildung 13: $N(\lambda)$, alleine eigener Graph mit Zahlwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

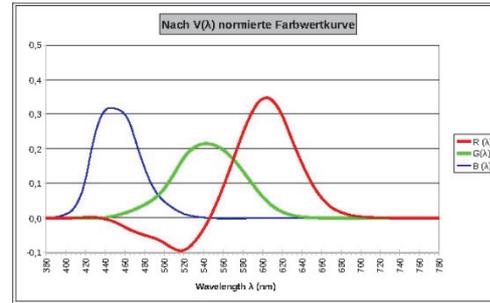


Abbildung 14: Faltung von $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ mit CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve mit Normierung $N(\lambda)$, eigener Graph mit Zahlwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f

Es ist durchaus erhellend, diese abstrakten Terme zur Normierung einmal darzustellen, wie das in den Abbildungen 12 und 13 gezeigt wird. Auffällig dabei sind die hohen Werte auf der Ordinate von $N(\lambda)$, die rechnerisch so sein müssen aber keine physikalische Einheit haben. Hier wird nur jeweils einer Wellenlänge ein Zahlwert zugeordnet.

Es gilt also: $N(\lambda) = 1 : (r(\lambda) \cdot 1,00002 + g(\lambda) \cdot 4,59069 + b(\lambda) \cdot 0,06007)$. Mit dieser Normierung werden, wie klar ersichtlich die in Abbildung 11 kaum mehr vorhandenen $b(\lambda)$ -Werte wieder deutlich angehoben. Zudem erhält man, was Ziel dieser abstrakten Normierung war, folgenden Zusammenhang: $V(\lambda) = R(\lambda) \cdot 1,0000 + G(\lambda) \cdot 4,5907 + B(\lambda) \cdot 0,0601$. Wenn man also die gewonnenen Primärvalenzen $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ und $B(\lambda)$ unter Berücksichtigung der genannten Faktoren verknüpft, erhält man die genormte Helligkeitskurve $V(\lambda)$. Man sollte sich dabei aber im Klaren sein, dass die Normierung und die konstanten Faktoren 1,00002, 4,59069 und 0,06007 mehr oder weniger heuristisch gewählt sind, um eben den oben beschriebenen Zusammenhang mit $V(\lambda)$ zu erreichen. Ein weiterer Schritt zur Berechnung der endgültigen Normspektralwertfunktionen lautet also: $R(\lambda) = r(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$; $G(\lambda) = g(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$; $B(\lambda) = b(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot N(\lambda)$; zu sehen in Abbildung 14.

5.3 Berechnung von X, Y und Z

Um nun noch die negativen Farbwerte insbesondere von $R(\lambda)$ zu beseitigen, wurden die kurven $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ und $B(\lambda)$ miteinander linear kombiniert und zwar nach der Formel:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.768831 & 1.751709 & 1.130135 \\ 1.000019 & 4.590609 & 0.060067 \\ 0.000000 & 0.056507 & 5.594169 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{bmatrix}$$

Die Zahlen in dieser Matrix sind notwendig zur Errechnung des 2°-Beobachters. Die Zahlen für die Errechnung von Y haben wir schon bei der Errechnung von $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ und $B(\lambda)$ kennen gelernt, nämlich $\alpha = 1,0000$, $\beta = 4,5907$ und $\gamma = 0,0601$. Da Y gleich $V(\lambda)$ sein soll, gilt: $Y = R(\lambda) \cdot 1,0000 + G(\lambda) \cdot 4,5907 + B(\lambda) \cdot 0,0601$. X und Z werden analog aus $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ und $B(\lambda)$ mit Hilfe der oben angegebenen Matrix errechnet, also $X = R(\lambda) \cdot 2,7688 + G(\lambda) \cdot 1,8517 + B(\lambda) \cdot 1,1301$. Die über α , β und γ hinausgehenden sechs Zahlen dieser Matrix sind ebenfalls durch Näherungsverfahren gewonnen und sorgen nicht nur für das Verschwinden negativer Farbwerte, sondern auch dafür, dass die aufsummierten Werte in 10 nm-Schritten für alle drei Normvalenzen die gleiche Summe ergeben. Man könnte auch sagen, dass das Integral unter den Graphen jeweils die gleiche Summe ergibt. Als Graphik erhält man die grundlegenden Normspektralwertfunktionen für den CIE-XYZ-Farbenraum (2°-Normalbeobachter) Abbildung 15:

19 [Fairman 1997], Seite 18, wird laut Wikipedia englisch „CIE 1931 color space“, 11. Januar 2020 auch vom CIE-Standard so definiert

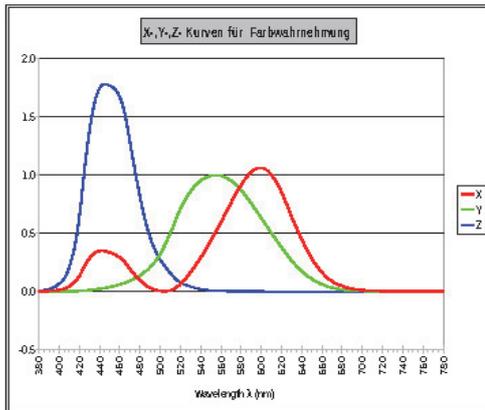


Abbildung 15: Aus der Abbildung 14 mit der Formel oben errechnete Werte für die Normvalenzen von CIE-XYZ

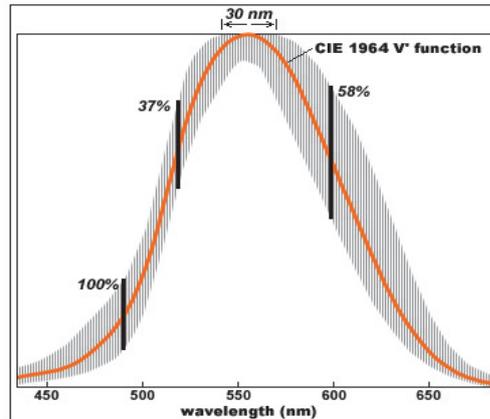


Abbildung 16: individual variations in photopic sensitivity results for 52 individuals, based on heterochromatic step by step brightness matching; from Gibson & Tyndall (1923) aus [MacEvoy 2015]

6 Die CIE-Normspektralwertfunktionen und die Physiologie

6.1 Die $V(\lambda)$ -Kurve und ihre Variationsbreite

Die Ergebnisse von Guild und Wrigth scheinen in Stein gemeißelt zu sein. Vom einfachsten Lehrbuch für Auszubildende²⁰ bis zu modernsten Forschungen, werden die dort gewonnenen Normvalenzen allenfalls ein wenig modifiziert, aber nicht grundsätzlich überprüft. Das mag daran liegen, dass die Herleitung von den experimentell gewonnenen Ergebnissen hin zu den fertigen Normvalenzen mathematisch unbestreitbar ist, aber es werden wie oben gezeigt viele Annahmen aus mathematisch-formalen Gründen gemacht und kaum aus physiologischen Gründen. Eine herausragende Schlüsselrolle spielt die 1923 gewonnene $V(\lambda)$ -Kurve. Dass diese keineswegs unstrittig ist, zeigt Abbildung 16.

Das diese auch von anderer Seite durchaus umstritten ist, zeigt auch ein Text des Colour & Vision Research laboratory, dessen Leiter momentan Andrew Stockman ist:

Die Daten der CIE von 1931 für die spektralen Farbempfindlichkeiten für den 2-Grad-Beobachter, bilden die übliche Grundlage für die angewandte Farbmetrik. Sie basieren auf den Farbkoordinaten, die von Guild (1931) und Wright (1928) gewonnen wurden, die aber nur eine relative Messung des Verhältnisses der notwendigen drei Grundfarben beschreiben, um jede reine Spektralfarbe darstellen zu können. Wohingegen Farbempfindlichkeitsfunktionen (CMF) absolute Werte für die Reizenergie liefern müssten. Um nun von den Daten von Wright und Guild auf die Farbempfindlichkeitsfunktionen schließen zu können, wurde angenommen, dass die spektrale Helligkeitsfunktion $V(\lambda)$, der CIE von 1924 eine Linearkombination der drei Farbempfindlichkeitsfunktionen (CMF) ist. Für eine genaue Beschreibung des Verfahrens und die tabellarischen Daten siehe das Buch von Wyszecki und Stiles von 1982 [Wyszecki 1982]. Es ist schon seit langem klar, dass die CIE 1924- $V(\lambda)$ -Funktion, mit Hilfe derer die CIE 1931 2-Grad-Beobachter-Normspektralwertfunktionen gewonnen wurden, die niedrigen Wellenlängen unter 460 nm stark unterschätzt, was zu Fehlern bei den kurzen Wellenlängen führt.²¹

20 [Böhringer 2014], Seite 5

21 Gesamter kursiver Text [CVRL], dort im Menü „Older CIE Standards“, dort „Colour matching functions“, dort der zugehörige Informationstext. Eigene Übersetzung.

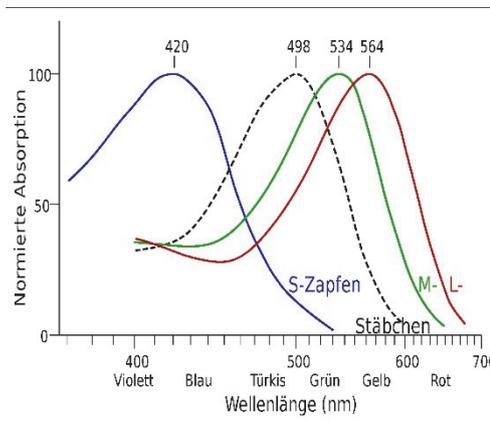


Abbildung 17: Spektrale Absorptionskurven der verschiedenen Sehpigmente der Fotorezeptoren. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Maxima auf 100 Prozent gesetzt. Wikipedia „Zapfen (Auge) vom 6.7.2019“ nach [Dartnall 1980], Seite 505

6.2 Die Normvalenzen und die Zapfen

Zugegebenermaßen waren aber beispielsweise die tatsächlichen spektralen Empfindlichkeiten der Zapfen im Auge, wie in Abbildung 17 gezeigt, seinerzeit noch nicht bekannt. Sie resultieren tatsächlich aus Messungen an Versuchspersonen.

Die Datenlage wird auf der Website des Colour & Vision Research laboratory (cvrl) wie folgt beschrieben: Microspectrophotometric (MSP) results from the eyes of seven persons. Four kinds of spectra were obtained with absorbance peaks at the following wavelengths: rods, 496.3 +/- 2.3 nm (n=39); red cones, 558.4 +/- 5.2 nm (n=58); green cones, 530.8 +/- 3.5 nm (n=45); and blue cones 419.0 +/- 3.6 nm (n=5).²²

Die Maxima der Absorptionskurven weichen doch erheblich von denen bei Wright bzw. den späteren Überlegungen der CIE ab. Ein Ähnliches Bild ergibt sich, wenn wir die Abbildung 14 betrachten im Vergleich zur Abbildung 18. Diese Abbildung entstammt einer neueren Untersuchung aus dem Jahr 2016²³, die rechnerisch die Abweichungen des

22 Data from Table 2 of Dartnall, H. J. A., Bowmaker, J. K., & Mollon, J. D. (1983). Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. Proceedings of the Royal Society of London, B 220, 115-130., Gefunden auf [cvrl]

23 [Fairchild 2016]

Farbsehens bei unterschiedlichen Beobachtern nachzuvollziehen versucht. Die rechnerischen Ergebnisse sind dargestellt und stimmen recht gut überein mit den gemessenen Streubreiten wie man sie bei Wyszecki & Stiles nachlesen kann²⁴.

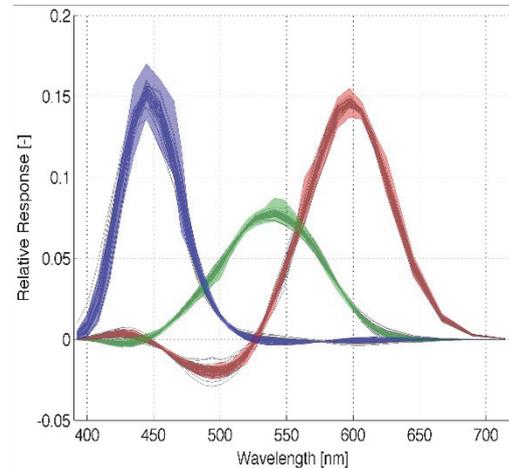


Abbildung 18: Aus [Asano 2015], Seite 43

Auch die neueren Überlegungen der CIE von 2006, die Maxima der Absorptionskurven zu berücksichtigen, fußen letztlich wieder auf den Normvalenzen von Wright, aus denen sie per Lineartransformation abgeleitet werden. Sie sind in Abbildung 19 dargestellt.

Diese normierten spektralen Empfindlichkeiten der menschlichen Zapfen werden aber letztlich auch wieder aus CIE-X, -Y und -Z abgeleitet. In der Form

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad ^{25}$$

Die Parameter a1 bis c3 werden ebenfalls wieder empirisch ermittelt. Beim Vergleich dieser speziellen LMS-Spektralkurven mit den Absorptionsspektren der Fotorezeptoren fällt auf, dass die Maxima der Absorptionskurven für die Rot- oder L-Zapfen und der Grün- oder M-Zapfen recht gut übereinstimmen, während die Maxima für die Blau- oder S-Zapfen um etwa 25 nm auseinander liegen. Man er-

24 [Wyszecki 1982], Seiten 343 und 345

25 [Wikipedia en], „CIE 1931 color space“, 24. Januar 2020

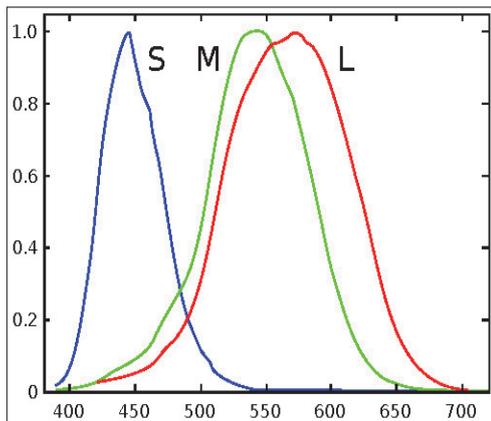


Abbildung 19. The normalized spectral sensitivity of human cone cells of short-, middle- and long-wavelength types. Wikipedia englisch „CIE 1931 color space“ basierend auf Daten aus [Stockman 1993], Seite 2516ff

kennt das beim Vergleich von Abbildung 19 mit Abbildung 17. Durch Linearkombinationen lässt sich anscheinend keine gute Übereinstimmung mit Empfindlichkeitskurven der Farbrezeptoren erreichen.

6.3 Die Normierungskurve $N(\lambda)$ und die Filter im Auge

Die Normierungskurve $N(\lambda)$ aus Abbildung 13, die eigentlich nur rechnerisch zu begründen ist, damit die Blau-Rezeptoren $b(\lambda)$ nicht unterbewertet werden, hat ein wenig Ähnlichkeit mit Kurven, welche die Optische Dichte der Linsen im menschlichen Auge beschreiben. Ergebnisse einer entsprechenden physiologischen Untersuchung sind in Abbildung 20 gezeigt²⁶.

Die mehr rechnerisch ermittelten Tabellenwerte des Colour & Vision Research laboratory in Abbildung 20 sind nur logarithmisch angegeben und mussten noch entsprechend umgeformt werden, um sie mit $N(\lambda)$ vergleichen zu können. Das Ergebnis ist in Abbildung 22 gezeigt.

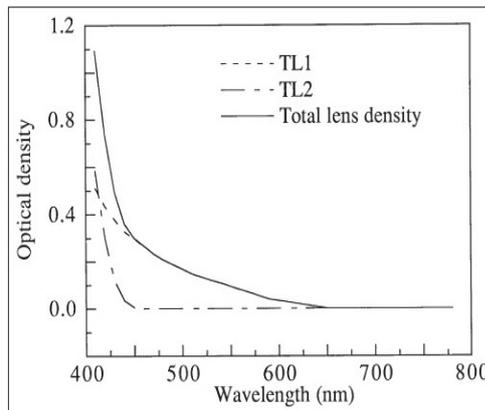


Abbildung 20: [Xu 1997], Seite 955

In der analogen Abbildung 21 wurde im Gegensatz zu Abbildung 22 eine Kombination aus Linsen- und Macularpigment-Transmission verwendet, die $N(\lambda)$ vielleicht etwas besser entspricht. Der orangefarbene Graph stellt eine Kombination der Filterfunktionen der Linse und des Macularpigmentes im Auge dar.²⁷ Diese muss noch mit 100 multipliziert werden, um die Größenordnung von $N(\lambda)$ zu erreichen. Man sieht, die beiden Graphen haben nur sehr entfernt miteinander zu tun. Der Orangefarbene Graph ist insbesondere, was den Anteil des Macularpigmentes anlangt, laut Stockman²⁸ unsicher, da die Dichte des Macularpigmentes bei Menschen sehr unter-

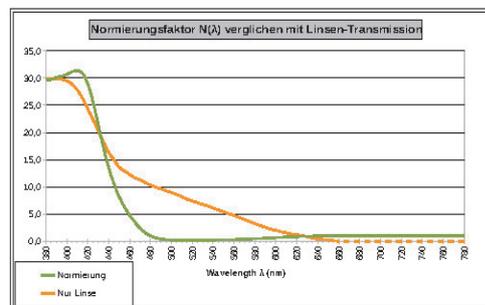


Abbildung 22: Vorab-Normierung $N(\lambda)$ vor Faltung von $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ mit CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f, im Vergleich mit Linsen-Transmission gemäß Stockman [cvrl], „Lens density spectra“

26 [cvrl] dort unter dem Begriff „Lens density spectra“ zu finden

27 [cvrl] dort unter dem Begriff „Lens density spectra“ zu finden
 28 [cvrl] dort unter dem Begriff „Macular pigment optical density“ zu finden

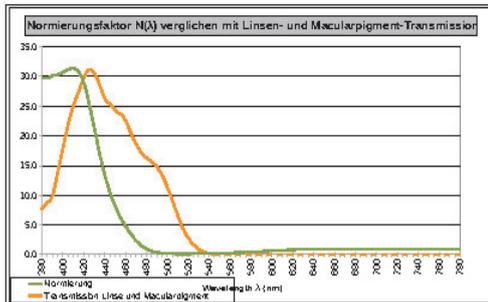


Abbildung 21: Vorab-Normierung $N(\lambda)$ vor Faltung von $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ und $b(\lambda)$ mit CIE1924 $V(\lambda)$ -Kurve, eigener Graph mit Zahlenwerten aus [Wyszecki 1982], Seite 750f im Vergleich mit Linsentransmission gefaltet mit Macularpigment-Transmission gemäß Stockman [cvt], „Lens density spectra“

schiedlich ist. Ob die trotzdem vorhandenen Ähnlichkeiten der beiden Graphen physiologische Gründe haben, oder nur zufällig sind, wäre sicherlich eigene Untersuchungen wert. Hier wird erstmalig wenigstens der Versuch gezeigt, eine physiologische Entsprechung für $N(\lambda)$ anzugeben.

6.4 Die Genauigkeiten

Dass die CIE-Normspektralwertfunktionen in entsprechenden Veröffentlichungen sogar bis auf die achte Nachkommastelle angegeben werden, ist für Berechnungen wahrscheinlich notwendig. Die experimentellen Grundlagen und die physiologischen Tatsachen werden damit aber doch ein wenig überstrapaziert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die CIE-Normspektralwertfunktionen ab den experimentell ermittelten Graphen in Abbildung 6 und 9 mathematisch elegant und sinnvoll ermittelt wurden. Rein physiologisch betrachtet, lassen sie sich aber bisher nicht schlüssig begründen. Für einige mathematisch notwendige Operationen, die zur Herleitung von CIE X,Y und Z notwendig sind, lassen sich dennoch wie gezeigt, lose physiologische Entsprechungen finden.

7 Problem der Lineartransformationen

7.1 Bereits verwendete nicht-lineare Farbreize

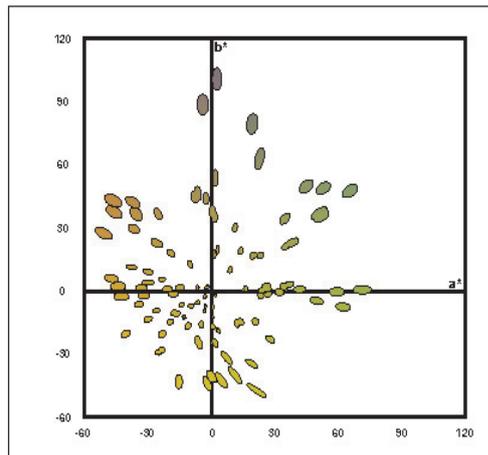


Abbildung 23: MacAdam und andere Ellipsen im CIE-Lab-Farbenraum dargestellt aus [Luo 2000], Seite 341

In den vorangegangenen Kapiteln wurde deutlich gezeigt, dass zur Herleitung der CIE-Normspektralwertfunktionen an unterschiedlichen Stellen häufig Lineartransformationen verwendet wurden. Dem widerspricht formal mathematisch, die Definition des schon 1976 eingeführten CIE-Lab-Farbenraums, der ein erster Schritt in Richtung gleichabständiger Farbenraum darstellt. Dabei wurde anders als im CIE-XYZ-Farbenraum oder im CIE-Yxy-Farbenraum davon ausgegangen, dass die Lichtenergie eines Reizes und die Stärke des resultierenden Sinneseindrucks nicht in einem linearen Zusammenhang stehen, sondern kleine Lichtmengen vergleichsweise starke Sinneseindrücke erzeugen, während eine weitere Erhöhung der Lichtmenge den Sinneseindruck nur noch vergleichsweise wenig ändern kann. In der Abbildung 24 ist die Übertragungskennlinie für CIE-Lab in der Mitte Dunkelblau dargestellt. Dabei ist die Lichtmenge in Prozentzahlen von 1 bis 100 und die Stärke des angenommenen Sinneseindrucks von 0 bis 1 angegeben. Die Übertragungskennlinie ergibt sich gemäß der Definition von CIE-Lab nach der Formel²⁹:

29 [Richter 1996, Seite 91]

$$y = 1,16 \cdot \sqrt[3]{\frac{x}{100}} - 0,16$$

Die Abbildung 23 zeigt Ellipsen innerhalb derer Farben als nicht unterschiedlich wahrgenommen werden. Diese experimentell und rechnerisch ermittelten Ellipsen sind um so kleiner je näher sie der Grauchse in der Mitte des Koordinatensystems von Lab liegen. Dort sind demnach die Möglichkeiten unseres Farbsehens, Unterschiede zu erkennen, empfindlicher als in den Bereichen mit gesättigteren Farben.

Daraus ergibt sich, dass die Farben in der Nähe der Grauchse noch stärker gewichtet werden müssten, als es der CIE-Lab-Farbenraum ohnehin schon tut. Um diese Schwäche auszugleichen, gibt es mehrere Vorschläge. Gegenüber den meisten anderen hat die sogenannte DIN99-Farbabstandsformel den entscheidenden Vorzug, durch mathematische Verzerrung einen neuen Farbenraum zu erzeugen. Dort werden die Farbkoordinaten des CIE-Lab-Farbenraumes nochmals umgerechnet und zwar nach der Formel unter der Annahme, dass nur Werte zwischen 0 und 1 entstehen dürfen³⁰:

$$y = \frac{1}{1,7} \cdot \ln(1 + 0,045 \cdot x)$$

Die Entsprechende Übertragungskennlinie findet sich in Abbildung 24 orange, die zweite Linie von unten. Die Helligkeit wird für DIN99 etwas anders errechnet, nämlich nach der Formel³¹:

$$y = 105,51 \cdot \ln(1 + 0,0158 \cdot x)$$

Man sieht, dass die Helligkeiten nicht ganz so stark angehoben werden müssen wie die Farben. Nun haben wir also Übertragungskennlinien aus unterschiedlichen Farbenräumen. Zum ersten diejenige durch den CIE-Lab-Farbenraum zum zweiten dieje-

nigen durch DIN99. Wenn man entsprechend kombiniert, erhält man in der Abbildung 24 die oberste Kurve in Braun und die dritte von oben in grün.

In seiner Masterthesis hat der Autor auf Grundlage des Weber-Fechner'schen-Gesetzes und eigener Überlegungen einen Vorschlag für eine Reiz-Reaktions-Kurve für das Farbsehen gemacht, der bisher aber nicht weiter verfolgt wurde.³²

7.2 Linear oder nicht-linear?

Oben wurde beschrieben, wie nicht-lineare Zusammenhänge bei der Farbmimetik zumindest im CIE-

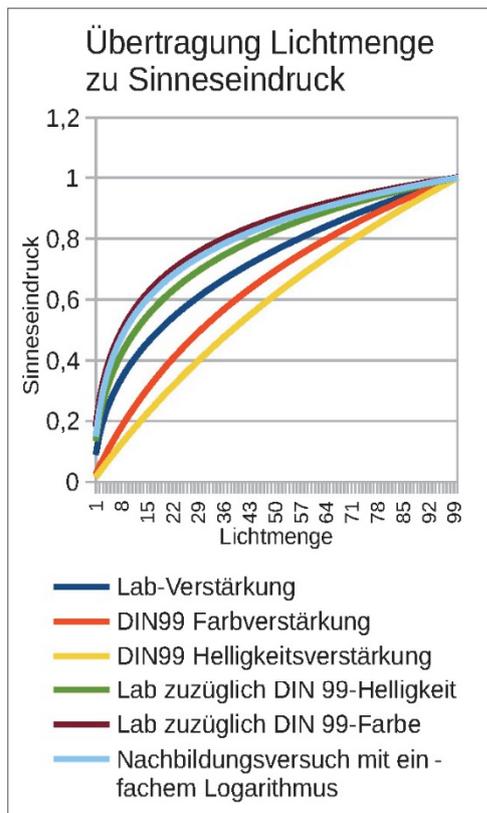


Abbildung 24: Unterschiedliche Kurven, die Lichtmenge zu Sinneseindruck oder Reiz zu Reizreaktion beschreiben.

Lab-Farbenraum verwendet werden. Nun geht aber die Farbmimetik bei ihren Experimenten bis hin zum CIE-XYZ-Farbenraum von ausschließlich linearen

30 [Wikipedia] „DIN99-Farbraum“, 24. Januar 2020

31 [Wikipedia] „DIN99-Farbraum“, 24. Januar 2020

32 [Greim 2020], Seite 25

Zusammenhängen von Reiz und Farbvalenz aus. Wenn man nun entgegen der Norm³³ Farbvalenz und Sinneseindruck gleichsetzen würde, entspräche dem Reiz ein Sinneseindruck multipliziert mit einem festen Faktor. Es entsteht hier ein anscheinend unüberbrückbarer Widerspruch zwischen linear und nicht-linear. Die entscheidenden Versuche von Wright wurden mit monochromatischen Spektren durchgeführt. Die Versuche Guild und später von MacAdam wurden hauptsächlich mit Filtern starker Sättigung und begrenzt auf kleine Spektralbereiche durchgeführt. Insbesondere bei ganz entscheidenden Versuchen von Wright wurden also nur sehr kleine Teile der jeweiligen Farbvalenzen angesprochen. Wenn wir davon ausgehen, dass die monochromatischen Spektren tatsächlich nur etwa 10 nm breit waren, dann werden selbst in günstigsten Kombinationen die Farbvalenzen überschlagsweise zu höchstens 25% angesprochen, in den weitaus meisten Fällen viel weniger. Wenn wir die Abbildung 24 aus Kapitel 7.1 betrachten, sehen wir deutlich, dass die meisten Übertragungskurven bei Lichtmengen von bis zu 15% sich annähernd linear verhalten. Somit dürften die häufigen Lineartransformationen bei der Berechnung der CIE-Normspektralwertfunktionen kein reales Problem darstellen, auch wenn die eingangs gemachten prinzipiellen Überlegungen dies nahelegen.

Die üblichen Reiz-Reaktions-Kurven künstlicher neuronaler Netze nutzen übrigens oft bewusst Kurven, die sich in den Bereichen mit kleinen Beträgen der Eingangswerte annähernd linear verhalten, dann langsamer ansteigen und bei sehr starken Reizen einer Sättigung zustreben.³⁴ Diese sogenannte Sigmoidfunktion soll in einem späteren Beitrag, zur Betrachtung der Farbmétrie als neuronales Netz, noch genauer beschrieben werden.

³³ DIN 5033-1: 2017-10

³⁴ [Lippe 2005], Seite 50

Literaturverzeichnis

[Asano 2015]

Yuta Asano: Individual Colorimetric Observers for Personalized Color Imaging, PhD Dissertation, Rochester Institute of Technology, ergänzt durch: http://www.rit.edu/cos/colorscience/re_AsanoObserverFunctions.php

[Böhringer 2014]

Böhringer Joachim, Bühler Peter, Schlaich Patrick, Sinner, Dominik: Kompendium der Mediengestaltung II. Medientechnik, 6., Vollständig überarbeitete Und Erweiterte Auflage ed. 2014. X.media.press. Web.

[Broadbent 2009]

Arthur D. Broadbent: Calculation from the original experimental data of the CIE 1931 RGB standard observer spectral chromaticity co-ordinates and color matching functions, http://www.cis.rit.edu/mcsl/research/broadbent/CIE1931_RGB.pdf ursprünglicher Link leider nicht mehr verfügbar.

[CIE 1926]

CIE. (1926). Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings, 1924. Cambridge: Cambridge University Press.

[CIE 1932]

CIE. (1932). Commission Internationale de l'Éclairage Proceedings, 1931. Cambridge: Cambridge University Press.

[cvrl]

<http://www.cvrl.org/> The Colour & Vision Research laboratory database originated at the University of California at San Diego in 1995. In 2001, the database and CVRL moved to the Institute of Ophthalmology at University College London, where they continue today.

[Dartnall 1980]

J. K. Bowmaker, H. J. A. Dartnall: Visual pigments of rods and cones in a human retina. In: The Journal of Physiology. Bd. 298, Januar 1980, ISSN 0022-3751, S. 501–511

[DfwG-Report]

DfwG Report, Informationen für Mitglieder der Deutschen farbwissenschaftlichen Gesellschaft e.V., Veröffentlicht in der Deutschen Nationalbibliothek unter ISSN 1860-2835, Typisch 3 Ausgaben pro Jahr

[DIN 11 664-1]

Farbmétrie – Teil 1: CIE farbmétrische Normalbeobachter (ISO/CIE 11 664-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO/CIE 11 664-1:2019

[Fairchild 2016]

Yuta Asano, Mark D. Fairchild, Laurent Blondé: Individual Colorimetric Observer Model, Published: February 10, 2016 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145671>

[Fairman 1997]

Hugh S. Fairman, Michael H. Brill, Henry Hemmendinger: How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data, First published: February 1997

[Greim 2020]

Christian Greim: Entwicklung eines gleichabständigen Farbraumes mittels neuronaler Netze, basierend auf klassischen Messergebnissen, Masterarbeit an der Hochschule Mittweida 2020

[Guild 1926]

J. Guild: A trichromatic colorimeter suitable for standardisation work, Transactions of the Optical Society 27 106

[Guild 1931]

- J. Guild: The Colorimetric Properties of the Spectrum, aus Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, VOL. 230, Pp. 149-187.
[Kamm 1987]
- Kamm, Prof. Dr. Gunther: Farbmatrik mit Blick auf Repro und Druck ; Zeitschrift „Der Druckspiegel“, Ausgabe 10/1987
[Lippe 2005]
- Lippe, Wolfram-Manfred, Soft-Computing. Mit Neuronalen Netzen, Fuzzy-Logic und Evolutionären Algorithmen, Verlag: Springer, Berlin (2006)
[Luo 2000]
- M. R. Luo,* G. Cui, B. Rigg: The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000, Colour & Imaging Institute, University of Derby, UK, aus COLOR research and application, Volume 26, Number 5, October 2001, Seite 340 bis 350
[MacEvoy 2015]
- <https://www.handprint.com/HP/WCL/color2.html> Last revised 08.I.2015 • © 2015 Bruce MacEvoy, gelesen am 4.7.2017. Darstellungen dieser Web-Site werden häufig verwendet, wegen der nicht immer klaren Quellenlage dort, allerdings in der Regel geprüft an [Wyszecki 1982]
[Richter 1996]
- Richter, Klaus: Computergrafik und Farbmatrik. Farbsysteme, PostScript, geräteunabhängige CIE-Farben. - Taschenbuch 1996, ISBN: 9783800717750 [ED: Softcover], [PU: Technische Akademie Wuppertal - VDE-Verlag Berlin 1996], 15,2*21,2 cm, 288 Seiten,
[Stockman 1993]
- Andrew Stockman, Donald I. A. MacLeod, and Nancy E. Johnson: Spectral sensitivities of the human cones, Vol. 10, No. 12/ December 1993 Journal of the Optical Society of America, Seite 2491ff.
[Wikipedia] Suchbegriff, Datum
<https://de.wikipedia.org/wiki/„Suchbegriff“> und Datum, an dem die Seite gelesen wurde
[Wright 1928]
- Wright, W. D. (1928). A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours. Transactions of the Optical Society, 30, 141-164.
[Wyszecki 1982]
- Wyszecki, Günther , Stiles, W. S.: Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data Formulae, Second Edition, Repr. of the 1982 ed. 2000 - Wiley & Sons
[Xu 1997]
- Jun Xu, Joel Pokorny, and Vivianne C. Smith: Optical density of the human lens; Journal of the Optical Society of America A Vol. 14, Issue 5, pp. 953-960 (1997)

COLOR!O – Mit Farbe durchs Layout

von Thomas Oberbuchner, Stephan Pusch und Sylvia Zedler

Entstehungsgeschichte des wohl einzigen Comics zum Thema Colormanagement

Eines Tages nach Unterrichtsschluss standen wir wieder einmal um unsere Fiery-RIPs herum und sinnierten über Theorie und vor allem Praxis des ICC-basierten Farbmanagements. Wir, das sind Sylvia Zedler (Ausbilderin am Berufsförderungswerk Leipzig), Thomas Oberbuchner (dto., inzwischen im Ruhestand) und Stephan Pusch (Mediengestalter, Absolvent des Berufsförderungswerkes Leipzig). Zusammengeführt hat uns die gemeinsame Arbeit in der Ausbildung von Mediengestaltern.

Einig waren wir uns darin, dass der Unterrichtsstoff mitunter (eher oft) recht trocken daherkam. Rendering intents, black point compensation, ICC-Profile, Linearisierung, Profilierung usw. wirkten nicht eben einladend.

Wie aber ließe sich das ändern? Nach vielem Hin und Her fiel plötzlich das Wort „Comic“. Das war die Initialzündung, dann gab es viel Arbeit, vor allem für Stephan Pusch als großartigen Zeichner. Er erledigte komplett das Design und schuf sowohl die Bühne als auch die darauf agierenden Protagonisten.

Die Vorgaben in Form von Texten und Dialogen stammten überwiegend von Thomas Oberbuchner, aber selbstverständlich konnte jeder „seinen Senf dazugeben“. Sylvia Zedler war erste und kritische Rezensentin und kümmerte sich um Organisatorisches und vor allem die Druckdatenerstellung.

Das Ergebnis halten Sie jetzt in der Hand. Es ist unserer Kenntnis nach der einzige Comic im Reich von google, der sich mit Colormanagement befasst. Er wendet sich an Auszubildende und Mitarbeiter, die im beruflichen Alltag mit dem Thema konfrontiert sind, und auch gern mal drüber lachen möchten.

Viel Spaß beim Lesen wünscht das COLOR!O-Team

Thomas Oberbuchner (Idee und Text) thomas@oberbuchner.de

Stephan Pusch (Idee, Zeichnungen und Farben) puschstephan@gmail.com

Sylvia Zedler (Redaktion und Marketing) info@zedler-design.de

Mit Dank an das Berufsförderungswerk Leipzig, das mit seiner Unterstützung das Projekt ermöglichte.

Die nachfolgenden Comics sind aus dem COLOR!O-Buch entnommen.





DIE JACKE!

LUND DA STEHT DRIN, WIE DAS WEISSESTE WEISS UND DAS SCHWÄRZESTE SCHWARZ UND ROT UND BLAU UND SO WEITER AUSZUSEHEN HABEN...



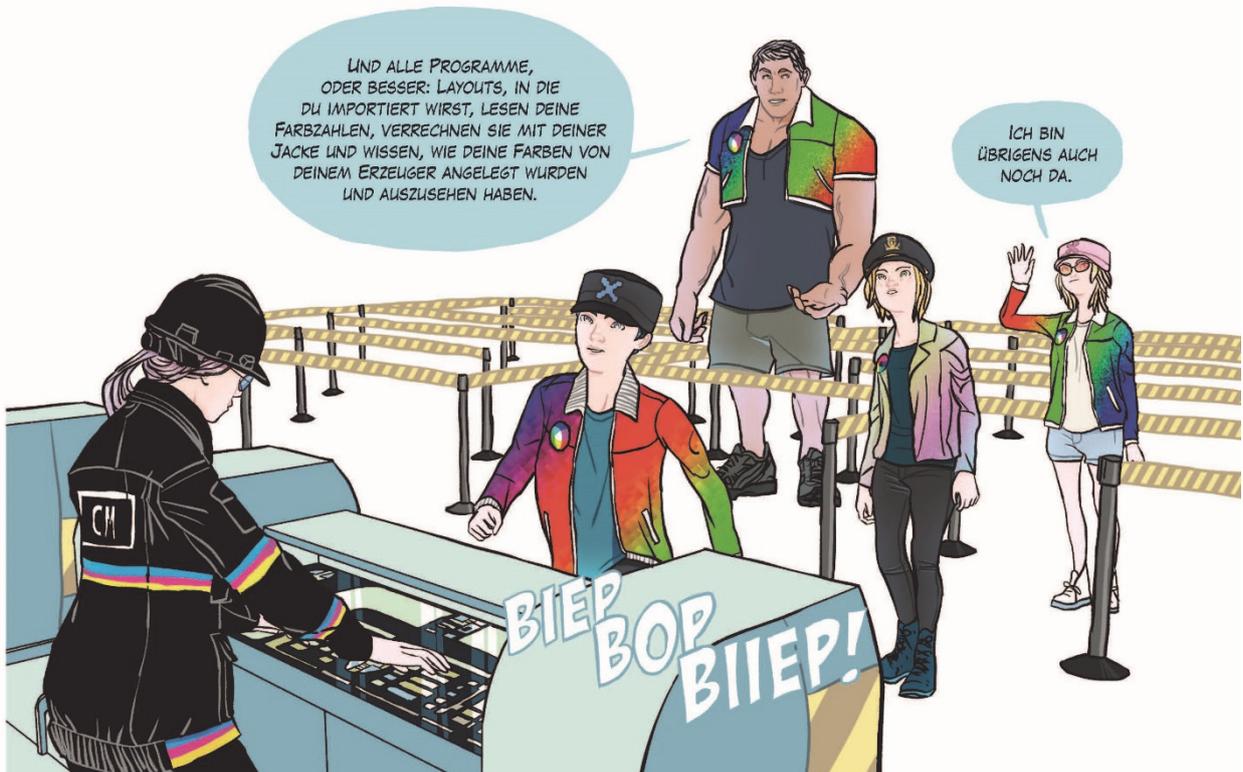
DIE HABEN DAFÜR SOGAR EINE SPRACHE ERFUNDEN, DIE WIRKLICH ALLE SICHTBAREN FARBEN NEUTRAL, ALSO EMOTIONSLOS BESCHREIBT. SIE NENNEN SIE...



EL-ABEH!

ALSO SCHLUSS MIT "MEIN BLAU IST BLAUER ALS DEINS"!





Reaktion der Buntpigmente auf unbunte Pigmente

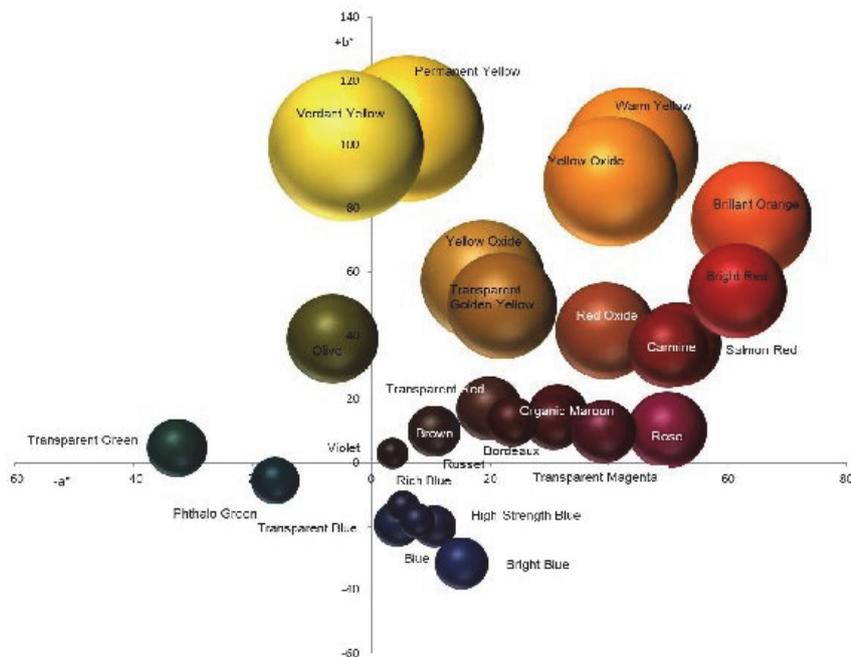
Werner Rudolf Cramer, Münster

Pigmente bringen Farben in unser Leben. Allerdings sind Pigmente selbst nicht farbig: Sie manipulieren das einfallende Licht in unterschiedlicher Art und Weise. Die dann reflektierten Lichtstrahlen lösen in der Netzhaut des Auges einen optischen Reiz aus, der im Gehirn zu einer Farbempfindung führt. Farben entstehen also nur im Gehirn. Für die meisten Menschen ist die diese Tatsache schwer vorstellbar, da sie doch nach draußen in eine farbige Welt sehen. Farben sind auch vom Licht abhängig, bei dem es sich meistens um weißes Sonnenlicht handelt. Würde man einen roten Gegenstand mit grünem Licht bescheinen, würden wir diesen Gegenstand als schwarz empfinden. Da sich die empfundene Farbe des Gegenstandes je nach Beleuchtungslicht ändert, kann er selbst nicht farbig sein.

Unsere heutige Farbtheorie baut auf Annahmen aus dem 19. Jahrhundert auf. Einerseits hatte Alexander von Humboldt die Drei-Farben-Theorie (Drei-Zonen-Theorie) entwickelt, wonach unser Sehen auf der Basis der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau passiert. Im Gegensatz dazu stand die Vier-Farben-Theorie von Ewald Hering, der die Theorie der Gegenfarben entwickelte. Dabei standen sich die Farben Gelb und Blau und Rot und Grün gegenüber. Das entspricht unseren Empfindungen, wonach kein Gelb bläulich und kein Blau gelblich ist. Das Gleiche gilt für Rot und Grün: Kein Rot kann grünlich und kein Grün kann rötlich sein. Beide Theorien wurden von Kries zur Zonentheorie kombiniert, die auch Grundlage für die CIE-Darstellungen wurde. Auch Professor Wilhelm Ostwald, Nobelpreisträger für die Definition der Katalyse, und Henry William Munsell trugen wesentlich zur physiologischen Sichtweise der Farben bei.

Heute rechnen die Farbmessgeräte und deren Software die physikalischen Messwerte der Reflexionen automatisch in die physiologischen und von der CIE definierten Farbwerte $L^*a^*b^*$ um. Diese „Übersetzung“ der physikalischen Werte in physiologische Farbwerte stellen einen entscheidenden Schritt für die Farbbeurteilung dar. Die $L^*a^*b^*$ -Farbwerte zeigen dem Mitarbeiter oder Nuanceur im Lacklabor die eindeutige Farbposition seines Lackmusters an. Unabhängig von subjektiven Beurteilungen lassen sich durch eine Farbmessung objektive Darstellungen erreichen. Allerdings beinhaltet die Beschreibung durch die physiologischen Farbwerte auch Nachteile: Die Farbwerte

spiegeln zwar auch die übliche Darstellung einer Farbe wider, sie ist aber nach Umrechnung in $L^*C^*h^\circ$ -Werte besser erkennbar. Während die a^*b^* -Werte die Anteile auf den entsprechenden Rot-Grün- und Gelb-Blau-Achsen bestimmen und damit den Farbort bestimmen, liefert die $L^*C^*h^\circ$ -Darstellung eine bessere Anschaulichkeit: Der L^* -Wert ist bei beiden Darstellungsarten der gleiche, der C^* -Wert berechnet sich aus den a^*b^* -Werten und zeigt den Abstand des Farbortes vom Nullpunkt des Koordinatensystems. Der Wert C^* steht für die Buntheit des Musters. Der h° -Wert wird in Grad angegeben und ergibt den Winkel zur Rot-Achse ($+a^*$). Damit ist eine Farbe beschrieben: Farbton (h°), Buntheit (C^*) und Helligkeit (L^*). Diese Einteilung entspricht auch unserer Farbempfindung.

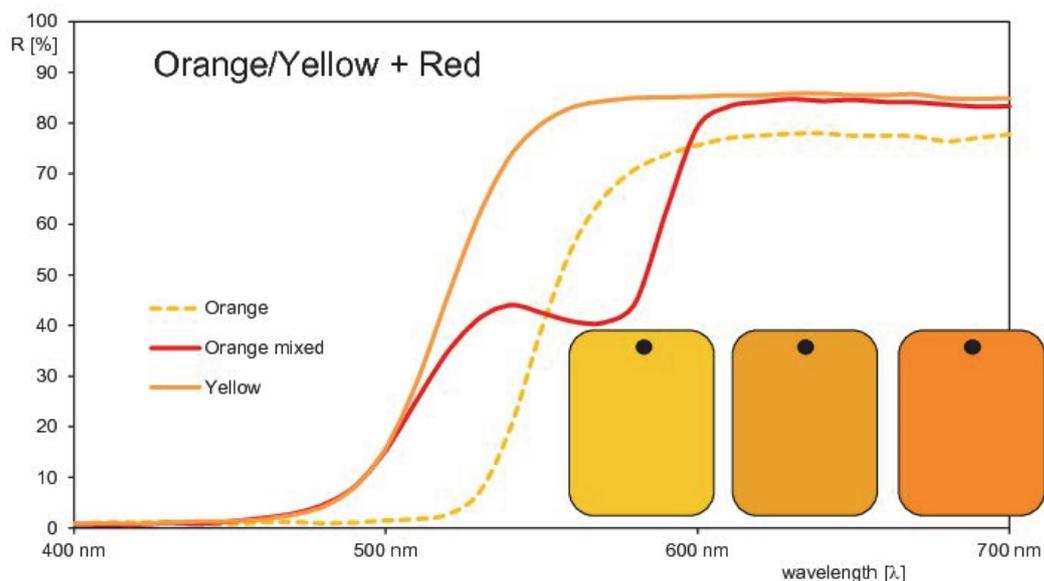


*So sieht beispielhaft die Verteilung der Buntpigmente in einem Mischsystem aus. Die Position der Kugeln entspricht den gemessenen a^*b^* -Farbwerten, ihre Größe der jeweiligen Helligkeit. Ihre Farbe entspricht den $L^*a^*b^*$ -Werten, die in RGB-Werte umgerechnet wurden. Gemessen wurden die Reflexions- und Farbwerte bei $D65$ und der $45^\circ:0^\circ$ -Geometrie.*

Zum Nuancieren reichen diese Angaben aber nicht aus, denn die Farbempfindung passiert bei uns im Kopf und hat mit den Pigmenten nur bedingt etwas zu tun. Dem Auge und Gehirn ist es egal, ob ein Orange aus Gelb und Rot gemischt wurde oder ob es als einzelnes Pigment vorliegt. Da das Gehirn die Reflexionen in Farbempfindungen „übersetzt“ lassen sich bestimmte Eigenschaften der Pigmente nicht erkennen. Ein gelbes

Pigment reflektiert nicht nur im gelben Spektralbereich, sondern auch im grünen und im roten. Beide Bereiche werden vom Gehirn zu Gelb gemischt und ergeben mit dem gelben Bereich eine helle und intensive Farbe.

Das gemischte Orange hat im Vergleich zu einem Orangepigment hat eine Sattelform in seiner Reflexion und ist als solches leicht zu erkennen. Auch Purpur, das vom Gehirn aus den beiden Farben des jeweiligen Spektrumsende zusammengesetzt wird und nicht im Spektrum vorkommt, lässt sich über dessen Reflexionskurven bestimmen. Reflexionskurven sind nicht nur wichtig bei der Beurteilung von Buntpigmenten, sondern auch von Aluminium- und Interferenzpigmenten. Bei diesen kommt noch eine Winkelabhängigkeit der Farbe hinzu, wobei bei Interferenzpigmenten eine Abhängigkeit der resultierenden Farbe vom Beleuchtungs- und vom Beobachtungswinkel gegeben ist.

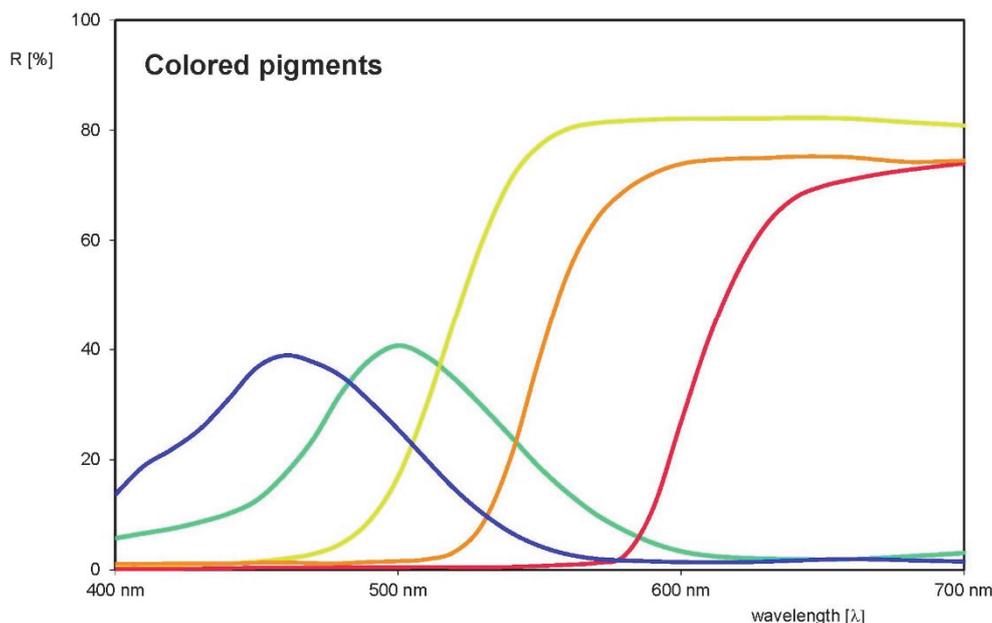


Unser Auge und Gehirn können nicht zwischen einem Orange-Pigment und einer Mischung eines gelben und roten Buntpigmentes unterscheiden. Die Reflexionsmessung zeigt deutlich die gemischte Farbe mit einem Sattel.

Pigmente liefern keine idealen Farben. Je nach chemischer Basis und Herstellungsverfahren variieren sie in ihrer Farbe: Es gibt keine neutralen Farben bei den Pigmenten. Aufgrund ihres Farbcharakters tendieren sie in unterschiedliche Richtungen. Ein gelbes Pigment kann rötlich oder grünlich sein, aber niemals bläulich. Arbeite ich im rötlichen Bereich, macht es keinen Sinn mit einem grünen Gelb zu tönen. Man sollte immer mit

den Pigmenten tönen, die farblich am nächsten liegen. Außerdem besitzen Pigmente eine unterschiedliche Farbestärke, d.h. eine Mischung Orange sollte man mit dem Gelb-Pigment beginnen und wenig Rot zu geben. Würde man mit einem Rot beginnen, so könnte man zum Schluss die hundertfache Menge an Gelb benötigen.

Neben der Beschreibung über ihren Farbton, Buntheit und Helligkeit lassen sich Buntpigmente in zwei Gruppen einteilen: In der einen Gruppe befinden sich die Pigmente, deren Reflexionen ein ausgesprochenes Maximum zeigen. Das trifft für blaue, grüne und blauviolette Pigmente zu. Sie zeigen im kürzerwelligen Spektralbereich Maxima mit entsprechenden Flanken. Im Gegensatz zu dieser Gruppe besitzt die zweite Gruppe, in der sich gelbe, orangefarbene und rote Pigmente befinden, auffällige Reflexionsplateaus. Hier steigt die Reflexion in Richtung längerwelligen Spektralbereich an und bleibt bis zum Spektrumsende auf einem hohen Reflexionsniveau. Die Position der Flanke zu diesem Reflexionsplateau ist typisch für Gelb, Orange oder Rot.

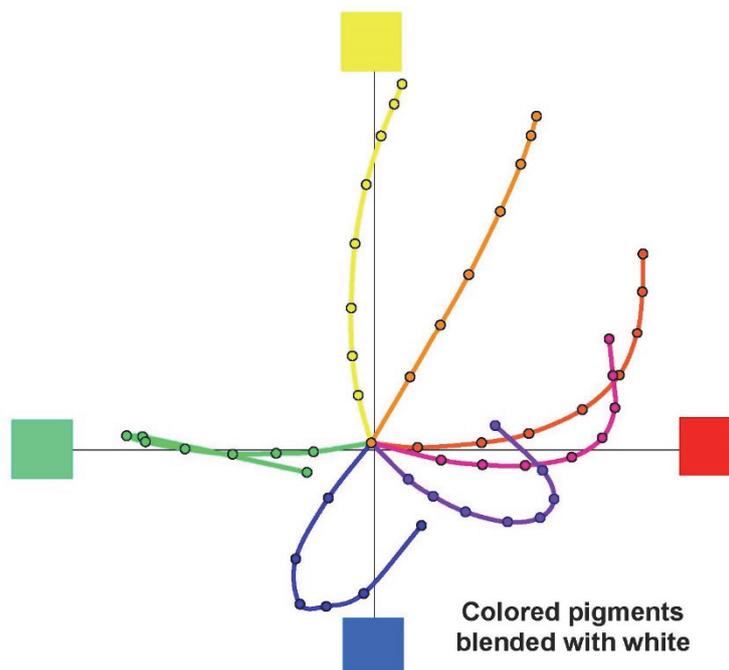


Grüne und blaue Buntpigmente besitzen grundsätzlich ein Reflexionsmaximum, während gelbe, orangefarbene und rote Buntpigmente ein Reflexionsplateau besitzen.

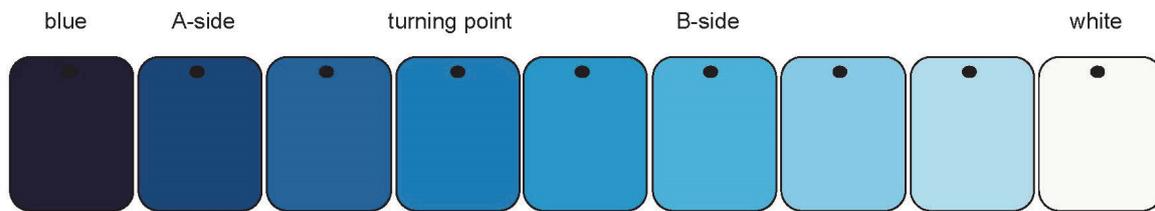
Dieses unterschiedliche Reflexionsverhalten spiegelt sich im unterschiedlichen Mischverhalten mit weißen Pigmenten wider: Mischt man gelbe und rote Buntpigmente mit einem Weißpigment, so verläuft die Mischreihe mehr oder weniger direkt zwischen den

Pigmenten. Ein gelbes Buntpigment kann beim Zumischen eines Weißpigmentes einen leichten „Schlenker“ zum Olivgrünen machen, findet aber ansonsten seinen direkten Weg zum unbunten Weiß. Rotpigmente zeigen oft einen größeren „Schlenker“ ins Bläuliche, wenn sie mit Weiß gemischt werden. Aber auch bei ihnen geht die Reihe der resultierenden Mischfarben zwischen den beiden Ausgangsfarben.

Ein anderes Mischverhalten zeigen blaue und grüne Pigmente: Werden sie mit Weiß gemischt, so steigen zunächst die Buntheit und die Helligkeit an. Erreichen sie den Wendepunkt, so nimmt von dort die Buntheit ab, während die Helligkeit in Richtung Weiß weiter zunimmt. Die verbindende Kurve der Farbwerte ähnelt einer Schleife mit einem Wendepunkt mit der höchsten Buntheit. Während bei den Ausmischungen von Gelb und Rot mit Weiß die Buntheit kontinuierlich abnimmt und die Helligkeit kontinuierlich zunimmt, ändert sich bei grünen und blauen Pigmenten die Buntheit beim Zumischen von Weiß: Zunächst nimmt sie zu, um ab dem Wendepunkt wieder abzunehmen.

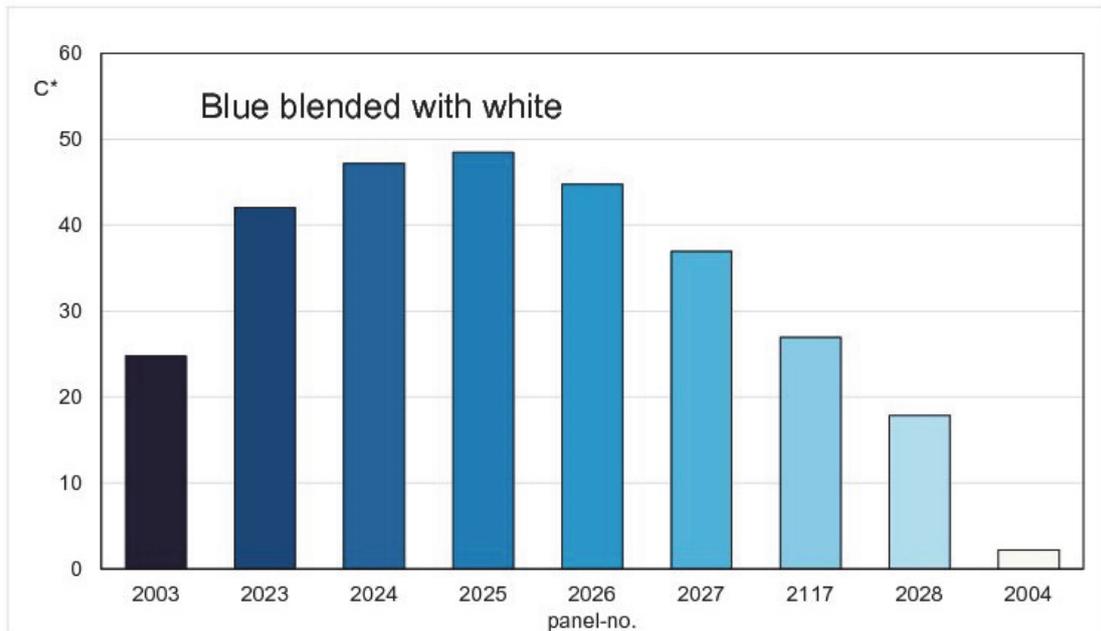


In Mischreihen mit einem Weißpigmenten zeigen grüne, blaue und blauviolette Buntpigmente einen Wendepunkt bei höchster Buntheit. Gelbe, orangefarbene und rote Buntpigmente besitzen keine Wendepunkt in vergleichbaren Mischreihen.

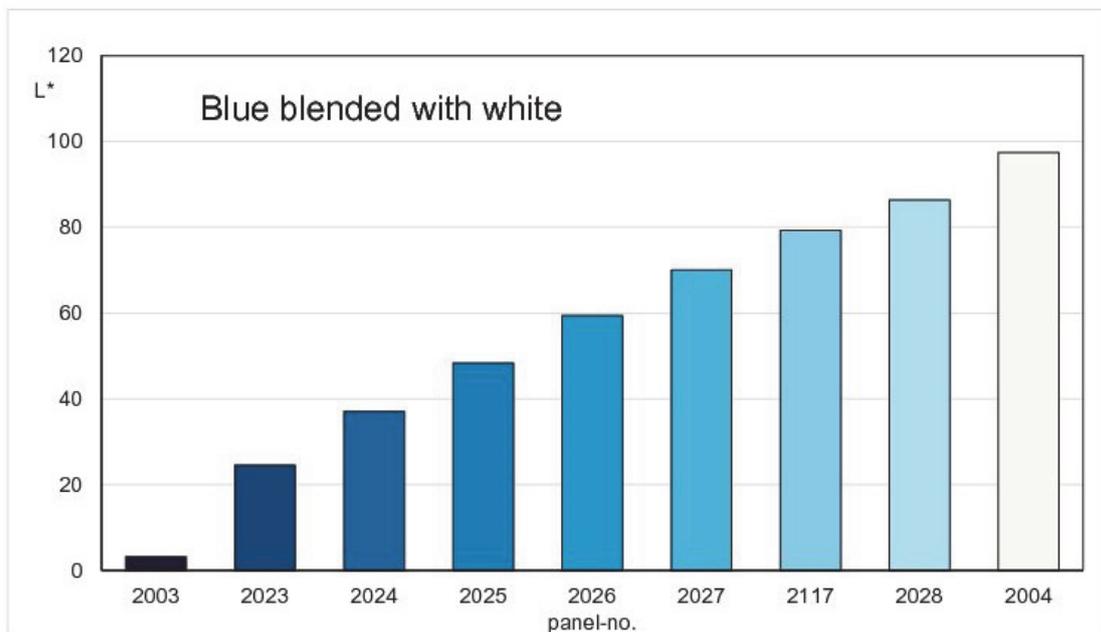


In der Mischreihe von Blau nach Weiß teilt der Wendepunkt auch die Reaktionen auf Zugaben: Auf der A-Seite ergibt die Zugabe des blauen Buntpigmentes einen Abfall der Buntheit, während sie auf der B-Seite zu einer Zunahme der Buntheit bis zum Wendepunkt führt. Die Zugabe des Weißpigmentes bewirkt auf der A-Seite eine Zunahme der Buntheit, auf der B-Seite einen Abfall der Buntheit.

Dieses Verhalten hat Auswirkung auf das Nuancieren: Befindet ich mich farblich zwischen dem Blaupigment und dem Wendepunkt (A-Seite), so erreiche ich durch Zumischen des Blaupigmentes einen Abfall der Buntheit und der Helligkeit. Befindet ich mich auf der B-Seite zwischen Wendepunkt und dem Weißpigment, so würde bei Zugabe des Blaupigmentes die Buntheit steigen und die Helligkeit sinken. Gäbe ich anstelle des Blaupigmentes Weiß zu einer Ausmischungen zwischen Blaupigment und Wendepunkt (A-Seite), so würden die Buntheit und die Helligkeit steigen. Auf der B-Seite des Wendepunktes würde die Zugabe von Weiß einen Abfall der Buntheit und eine Zunahme der Helligkeit bewirken. Aus diesem Grund ist die Kenntnis des jeweiligen Wendepunktes beim Nuancieren wichtig.



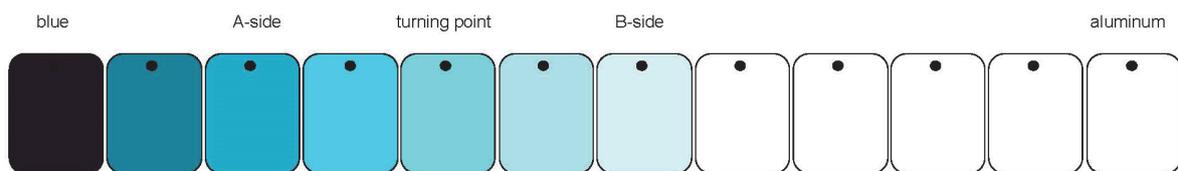
In der blau-weißen Mischreihe steigt die Buntheit vom Blau bis zum Wendepunkt an, um danach wieder zu sinken.



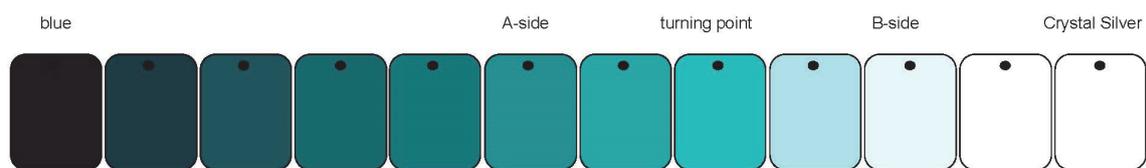
In der blau-weißen Mischreihe steigt die Helligkeit vom Blau bis Weiß kontinuierlich an.

Da Effektpigmente wie Aluminiumpigmente und auch weiße Interferenzpigmente unbunt sind, ist ein Vergleich ihres Verhaltens auf Buntpigmente interessant. Aluminiumpigmente werden nach ihrem Herstellungsverfahren in „cornflakes“ und „silverdollars“ eingeteilt. Weiterhin unterscheiden sie sich in der Pigmentgröße (Flakegröße).

Zusätzlich wird das Verhalten weißer Interferenzpigmente gegenüber Buntpigmenten dargestellt. Interferenzpigmente bestehen aus einer Trägerplättchen, welches mit einem starkbrechenden Metalloxid wie beispielsweise Titandioxid ummantelt ist. Durch diesen Aufbau wird das einfallende Licht zunächst an der Oberfläche teilweise reflektiert. Der andere Teil reflektiert wiederum teilweise an der Grenzschicht zwischen Metalloxid und Trägerplättchen. Dieser Teil verlässt das Pigment parallel zum ersten Teil und interferiert mit ihm. Die Schichtdicke des Metalloxids entscheidet über die resultierende Farbe. Mit geringer Schichtdicke entstehen in der Produktion weiße, dann mit steigender Schichtdicke gelbe, rote, blaue und anschließend grüne Interferenzpigmente. Im Gegensatz zu den bunten Interferenzpigmenten zeigen die weißen keine Farbverschiebung, wenn man bei gleichem Differenzwinkel vom Glanz den Beleuchtungswinkel ändert.



Bei Mischungen von grünen und blauen Buntpigmenten mit Aluminiumpigmenten ergibt sich das gleiche optische Verhalten wie bei Mischungen der Buntpigmente mit Weißpigmenten: Anstieg der Buntheit vom Buntpigment bis zum Wendepunkt mit anschließenden Abfall.

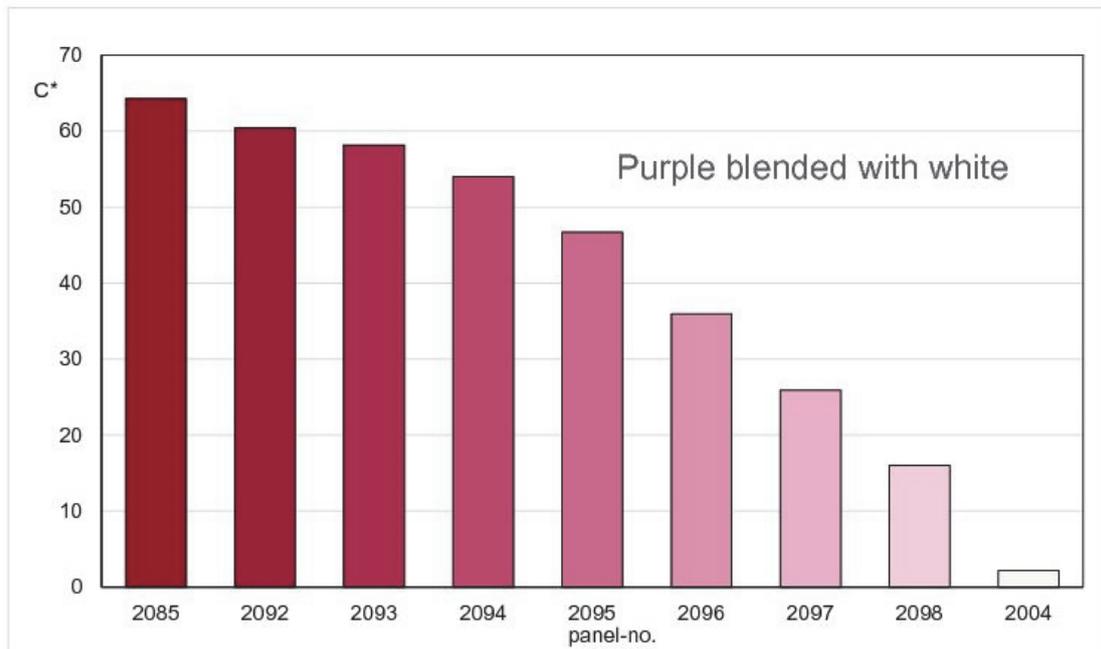


Das gleiche optische Verhalten lässt sich mit weißen Interferenzpigmenten erkennen. Auch hier teilt sich die Mischreihe in eine A- und eine B-Seite ein.

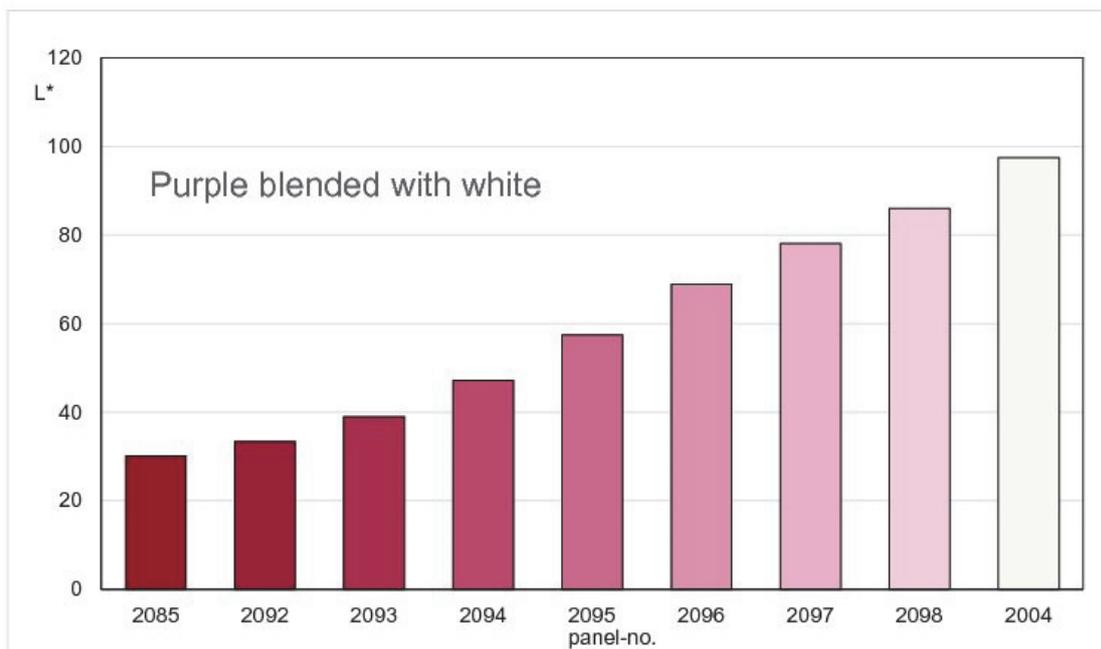
Spritzt man ein weißes Interferenzpigment und ein Aluminiumpigment auf Musterbleche (Postkartengröße) auf, so wirkt zunächst das weiß lackierte Blech heller. Allerdings muss man beachten, dass zwischen der Ober- und Unterkante eines Musterbleche etwa 20°-Differenz bestehen. Ein Messgerät misst meistens eine Fläche von 8 – 12 mm und zeigt nahe am Glanz eine deutlich höhere Helligkeit nahe am Glanz beim Aluminiumpigment. Beobachten lässt sich dieses, wenn man die Bleche zwischen Fingern und Daumen hält. Drückt man sie dann zusammen, guckt man im gebogenen Teil in den

Glanz oder nahe am Glanz. Wichtig sind bei allen Beobachtungen die gleichen Bedingungen. Das gilt auch für den Vergleich einer visuellen und industriellen Abmusterung. In der Regel nimmt man beim Beurteilen eines Musterbleches am Fenster oder in der Lichtkabine andere Geometrien beim Hoch- und Runterkippen ein, als beim Messgerät vorgegeben sind. Beim Messgerät bleibt der Beleuchtungswinkel immer gleich, während er sich bei der visuellen Beobachtung am Fenster oder in der Lichtkabine kontinuierlich ändert. Derartige Diskrepanzen führen dazu, wir ein weißes Interferenzpigment als heller empfinden als ein Aluminiumpigment: Wollte man eine Ausmischung mit einem Aluminiumpigment aufhellen, führt die Zugabe eines weißen Interferenzpigmentes in die falsche Richtung.

Mischt man ein Aluminiumpigment mit einem Blau- oder Grünpigment, so zeigt die Mischreihe ein vergleichbares Verhalten wie eine Mischreihe mit einem weißen Absorptionspigment: Beginnend beim blauen Pigment beginnt bei Zugabe des Aluminiumpigmentes die Buntheit und die Helligkeit der Mischung zu steigen. Wie bei einem weißen Pigment steigern sich Buntheit und Helligkeit bis zu einem Wendepunkt. Ab diesem (B-Seite) nimmt die Buntheit ab, während die Helligkeit in Richtung Aluminiumpigment zunimmt. Auch hier gilt fürs Nuancieren, dass die Zugabe von Aluminium-Pigment die Buntheit und Helligkeit steigert, wenn man sich farbmäßig zwischen den Farbort des Blaupigmentes und dem Wendepunkt befindet (A-Seite). Steht man mit der Ausmischung auf der anderen Seite des Wendepunktes (B-Seite), so führt die Zugabe von Aluminium-Pigment zu einer Abnahme der Buntheit bei gleichzeitiger Zunahme der Helligkeit.



Gelbe, orangefarbene und rote Buntpigmente zeigen in Mischreihen mit einem Weißpigment einen kontinuierlichen Abfall der Buntheit.



Die Helligkeit steigt in der gleichen Mischreihe kontinuierlich in Richtung Weiß an.

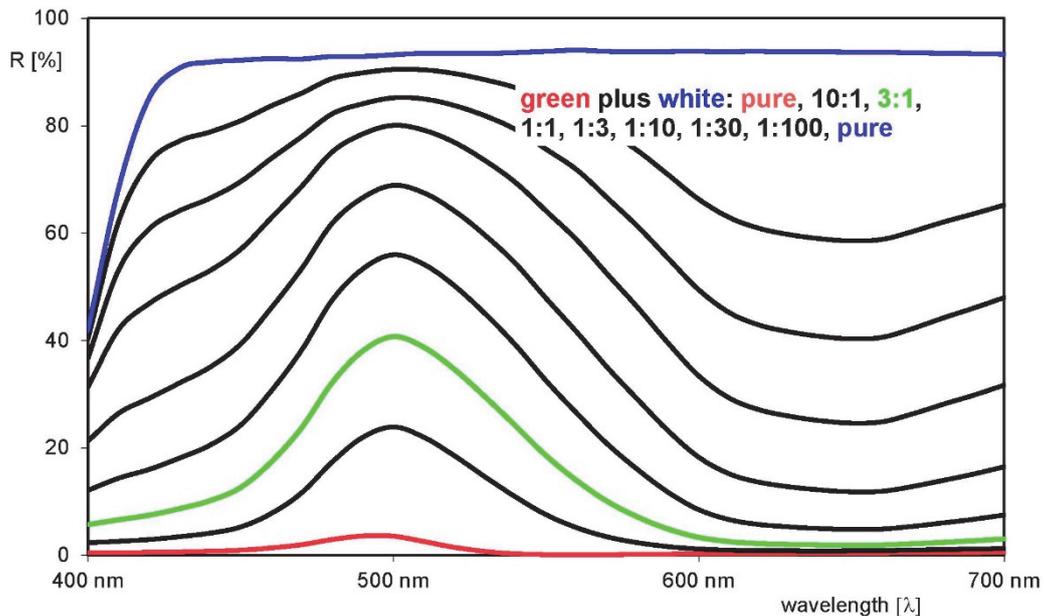
Gibt man zu einer Ausmischung, deren Farbort sich zwischen Blaupigment und Wendepunkt befindet (A-Seite), noch Blaupigment hinzu, so nehmen Buntheit und Helligkeit ab. Befindet sich der Farbort auf der B-Seite zwischen Wendepunkt und dem

Aluminium-Pigment, so bewirkt die Zugabe von Blaupigment eine Zunahme der Buntheit und eine Abnahme der Helligkeit. Das Aluminium-Pigment verhält sich beim Mischen mit blauen oder grünen Buntpigmenten genauso wie ein Weißpigment. Ein Unterschied zwischen den verschiedenen Typen und Arten von Aluminiumpigmenten ist nicht auszumachen.

Auch bei weißen Interferenzpigmenten lässt sich das gleiche Verhalten feststellen. Weiße Interferenzpigmente zeigen gegenüber ihren bunten Varianten keine Farbverschiebung im sichtbaren Spektralbereich. Eine Verschiebung der Reflexionen aufgrund des veränderten Winkels des einfallenden Lichtes findet im nicht-sichtbaren UV-Bereich statt. Trotz oder mit der Verschiebung zeigen aber auch bunte Interferenzpigmente das vorgestellte Verhalten.

Weiße Interferenzpigmente waren zuerst im Farbprogramm der Autohersteller im 3-schichtigen Lackaufbau mit weißer Untergrundfarbe, Effekt-Basislack und Klarlack. Es folgten verschiedene Ausmischungen von Perlglanzpigmenten mit Buntpigmenten in nahezu allen Farbprogrammen der Autohersteller. Heute findet man meistens Kombinationen aller drei Pigmentarten, wobei verschiedenen Vorteile ausgenutzt werden.

Mischt man weiße Interferenzpigmente mit blauen und grünen Buntpigmenten, so ergibt sich ein gleiches Verhalten wie bei den Mischreihen mit Weiß: Zunächst wachsen die Buntheit und die Helligkeit ab dem blauen und grünen Pigment bis zu einem Wendepunkt (A-Seite), ab dem die Buntheit sinkt und die Helligkeit weiter wächst bis zum weißen Interferenzpigment (B-Seite). Auch hier ist beim Nuancieren wichtig, auf welcher Seite des Wendepunktes man beim Nuancieren startet: Zwischen dem Buntpigment und dem Wendepunkt wachsen Buntheit und Helligkeit, wenn man weißes Interferenzpigment zugibt. Auf der B-Seite des Wendepunktes sinkt die Buntheit und die Helligkeit steigt bei der weiteren Zugabe von weißem Interferenzpigment. Entsprechend sinken Buntheit und Helligkeit, wenn das Buntpigment zur Mischung zugegeben wird, wenn man sich auf der A-Seite zwischen Buntpigment und Wendepunkt befindet. Befindet man sich auf der B-Seite des Wendepunktes, so sinkt die Buntheit und die Helligkeit bei Zugabe des Buntpigmentes.



Die Reflexionskurven der blau-weißen Mischreihe zeigt deutlich einen anfänglichen Anstieg der Reflexionen im niedrig-welligen Spektralbereich. Ab der Wendepunkt (grüne Linie: 3:1) steigt die Reflexionskurve auch im längerwelligen Spektralbereich.

Das Zumischen eines weißen Pigmentes, eines weißen Interferenzpigmentes oder eine Aluminiumpigmentes zu einem roten oder gelben Buntpigment erhöht dessen reflektionsniedrigen Spektralanteile schneller und stärker als die reflektionsstarken Spektralanteile. So können die Reflexionen eines Gelbpigmentes im niedrigen Reflexionsbereich etwa 90-mal niedriger liegen als die eines Weißpigmentes. Im längerwelligen Bereich ist der Unterschied deutlich geringer. Beim Zumischen von Weiß wird der reflexionsniedrige Bereich überproportional in der Reflexion angehoben.

Nimmt man eine grünes oder blaues Buntpigment, so werden deren Reflexionsmaxima zuerst angehoben. Wenn dann die reflektionsniedrigen Bereich auch angehoben werden, verweißlichen die resultierenden Mischungen und die Buntheit nimmt ab. Und die folgenden Mischungen nehmen weiter an Helligkeit zu.

Die Farbreaktionen eines Pigmentes gehören zum grundlegenden Wissen, um erfolgreich Farben zu nuancieren. Die Nuancierschritte lassen sich so auf eine Mindestzahl reduzieren.

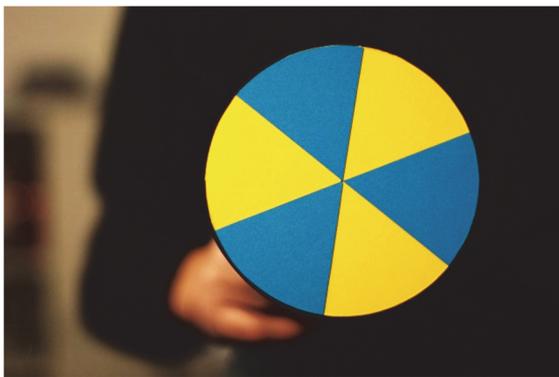
Auch das noch!

W.R.Cramer

Schon Altmeister Goethe hat sich intensiv mit Farben beschäftigt. Seine Farbenlehre baute er auf Mischversuchen mit Pigmentfarben auf. Er folgerte daraus, dass Grün eine Mischfarbe sei, während Gelb, Rot und Blau die Grundfarben sind.

Farben entstehen aber nur in unserem Gehirn, und das mischt Farben additiv. Bietet man dem Auge, dessen Netzhaut den Lichtreiz empfängt und als optischen Reiz ans Gehirn weiterleitet, die beiden Farben Gelb und Blau mit schnellem Wechsel an, so entsteht im Gehirn kein Grün, sondern eine neutrale Farbe.

Goethe hat übrigens eine Apparatur gebaut, mit der eine Scheibe mit gelb-blauen Fläche mit einer Handkurbel gedreht werden konnte. Da das Ergebnis (kein Grün!) nicht in seine Theorie passte, nannte er dieses Ergebnis „scheinbare Mischung“.



gelb-blaue Scheibe in Ruhe



die Scheibe in Drehung



Subtraktives Mischen von Pigmentfarben



