

Sättigung im CIELAB-Farbsystem und LSh-Farbsystem

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor rerum naturalium habilitatus (Dr. rer. nat. habil.)

genehmigte

Habilitationsschrift

von Frau

Dr. rer. nat. Eva Lübbe
(Fleischer)

geboren am 20.09.1950 in Leipzig (Deutschland)

Gutachter:

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Schierz, TU Ilmenau, Sektion
Maschinenbau, Fakultät für Lichttechnik

Prof. Dr. rer. nat. Christa Neumeyer, Johannes Gutenberg Universität
Mainz, Institut für Zoologie

Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh, TU Darmstadt, Institut für
Elektromechanische Konstruktionen, Fachgebiet Lichttechnik

Verteidigung am 19.1.2011

Bibliographische Information der deutschen Bibliothek.

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliothek;
detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN: 9783842329881

Books on Demand GmbH, Norderstedt 2011

EvaLuebbe@aol.com

Die Verwertung der Texte und Abbildungen ist ohne Zustimmung der Autorin urheberrechtswidrig.

Kurzfassung

Bisher fehlte eine Formel, die die Sättigung im CIELab-Farbraum für die Anwender befriedigend beschreibt.

Es werden in dieser Arbeit zunächst ausführlich die Begriffe Buntheit und Sättigung geklärt. Der Begriff Sättigung erweist sich dabei als kompliziert, erstens weil er in den letzten Jahren einem Bedeutungswandel unterlag und zweitens weil in manchen Wissenschaften gar nicht exakt zwischen Buntheit und Sättigung unterschieden wird.

Die Buntheit, so wie sie von der Farbwissenschaft definiert ist, stellt für viele Anwender ein Problem dar. Sie erwarten einen Farbraum mit drei von einander unabhängigen Größen und nach der Ansicht der meisten Nutzer sollte er symmetrisch sein. Das heißt, es gibt ein Problem mit dem Begriff der Buntheit, der die Helligkeit beinhaltet. Der Farbraum wird von den Anwendern im Bereich Gelb als zu ausgedehnt empfunden.

Diese Probleme sind erst in den letzten Jahren akut geworden, weil in zunehmendem Maße die Farbmessung auch in Bereichen außerhalb der Farbabstandsmessung zur Anwendung kommt.

Es ist deshalb ein weiteres Ziel der Arbeit, einen auf der Farbmessung beruhenden Farbraum anzubieten, der nicht ganz so unsymmetrisch ist wie der CIELAB –Farbraum.

Bisher und auch in den modernen Farberscheinungsmodellen wird die Formel

$$S = \frac{C}{L} \quad (0.1)$$

zur Beschreibung der Sättigung genutzt. Dabei ist C ein Maß für die Buntheit und L ein Maß für die Helligkeit. Es wird gezeigt, warum diese Formel die Anwender nicht befriedigt.

Eine neue Formel lässt sich aus einer verbalen Definition des Begriffes Sättigung von Manfred Richter ableiten:

$$S^+ = \frac{C}{\sqrt{L^2 + C^2}} 100 \% \quad (0.2)$$

Es muss gezeigt werden, dass diese Gleichung die Sättigung beschreibt. Dazu sollte vorrangig die DIN 6164 verwendet werden, da diese DIN Sättigungsstufen ausweist. Bei dem Versuch, die Sättigungsformel mit den empirischen Werten der DIN 6164 zu verifizieren, musste festgestellt werden, dass dieses System einen etwas geänderten Sättigungsbegriff verwendet. Die aktuelle Definition der CIE entspricht nicht dem, was die meisten Anwender unter Sättigung verstehen.

Der Beweis der Sättigungsformel mit Hilfe der DIN 6164 erwies sich als aufwändig, weil zunächst die Sättigungslinien wieder rekonstruiert werden mussten, die durch begradigende Linien, die die Messwerte verbinden, verloren gegangen waren. Richter machte Annahmen über die Linearität der Sättigungsstufen innerhalb der Bunttöne, die, wie sowohl durch seine eigenen Messungen als auch durch visuelle Betrachtungen gezeigt werden kann, nicht im gesamten Farbenraum gegeben sind. Es kann gezeigt werden, dass sich bei Korrektur der Abstände der Sättigungslinien in der Normfarbtafel ein linearer Zusammenhang zwischen der mit der Formel berechneten Sättigung und den Sättigungsstufen der DIN 6164 ergibt.

In der in der DIN 6164 ausführlich untersuchten gelben Ebene konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Formel mit den visuellen Ergebnissen ermittelt werden.

In einigen Bereichen (Bunttönen) konnte keine perfekte Übereinstimmung zwischen der Formel und den empirischen Untersuchungen der DIN 6164 festgestellt werden, insbesondere werden im Rot-Purpur-Bereich etwas zu hohe Sättigungswerte ermittelt.

Deshalb wird in dieser Arbeit noch das japanische System PCCS hinzugezogen. Durch dessen Untersuchung kann gezeigt werden, dass die Ursachen für diese Abweichungen nicht in der neu vorgeschlagenen Formel begründet sind.

Man hat mit der neuen Formel für die Sättigung die Möglichkeit, diese aus den Größen zu bestimmen, die ein Farbmessgerät liefert. Das ist für die Anwender ein Fortschritt.

Mit Hilfe der Sättigung kann ein neuer Farbenraum entwickelt werden, der LSh-Farbenraum. Er ist ein Raum mit drei quasi voneinander unabhängigen Größen.

Der LSh-Farbenraum ist wesentlich symmetrischer als der LCh-Farbenraum und Gelb fällt nicht mit extrem hohen Werten aus dem Rahmen. Das macht die Anwendung des Farbenraumes in der Praxis einfacher. Die größere Symmetrie des LSh-Farbenraumes und die Berücksichtigung des Sättigungseffektes lassen möglicherweise Vorteile gegenüber dem LCh-Farbenraum bei der Farbabstandsbewertung erwarten.

In diesem LSh-Farbraum ergibt sich Platz für die Empfindungen Braun und Oliv.

Die Formel beschreibt auch einen bisher nach Meinung der Autorin nicht in der Literatur benannten, aber manchen Anwendern bekannten Effekt: Durch geringfügiges Zumischen von Schwarz ist eine Steigerung der Sättigung möglich. Dass die Formel diesen Effekt wieder gibt, spricht dafür, dass es sich um eine grundlegende Formel handelt.

Es lohnt sich, die Sättigungslinien genauer zu betrachten, weil sich in ihnen offenbar die Sättigungen unserer Grundempfindungen zeigen.

Die Effekte in den Sättigungslinien brachten die Autorin auf ein neues Farbestehungsmodell, das einen Farbraum mit drei Komplementärfarbenpaaren besitzt. Diese Komplementärfarbenpaare lassen sich mit den experimentell gefundenen Gegenfarbenzellen in Zusammenhang bringen.

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei der HTWK, Frau Prof. Herzau-Gerhard und Frau Clement, bei beim Sächsischen Institut für die Druckindustrie, Frau Genest und bei Herrn Leber (Berufsförderungswerk Leipzig) bedanken, die es mir ermöglichten, Farbmessungen durchzuführen. Ebenso stellte mir Herr Kraushaar die Messtechnik der FOGRA großzügig zur Verfügung.

Weiterhin danke ich den Probanden für die geduldige Begutachtung des PCCS Systems.

Des Weiteren danke ich Herrn Albert, für die Veröffentlichung der Formel in der Zeitschrift Phänomen Farbe und Herrn Prof. Hartman (TU Dresden) für die Möglichkeit, die Formel im Februar 2007 an der TU Dresden vorzustellen.

Herrn Prof. Schierz und Herrn Prof. Hill danke ich für ihre fachlichen Hinweise. Insbesondere bedanke ich mich für zahlreiche Literaturhinweise bei Prof. Schierz.

Dem Sohn von Manfred Adam, Hartmut Adam, danke ich für das Vertrauen bei der Sichtung des Nachlasses.

Inhaltsverzeichnis

0	Zielstellung -Motivation	9
1	Einleitung: Systeme zur Beschreibung der Farbempfindung	10
1.1	Entstehung der Farbempfindung	10
1.1.1	Das menschliche Auge und die neuronale Verarbeitung der Signale	10
1.1.2	Beschreibung der Farbempfindung - Empfindungsmaße	20
1.1.3	Farbmessung	22
1.1.4	Ermittlung von Empfindungsgrößen allgemein und von visuellen Größen	25
1.2	Überblick über Farbsysteme	26
1.2.1	Allgemeines	26
1.2.2	Aufbau und Eigenschaften von Farbkreisen	26
1.2.3	Farbräume, die den Doppelkegel verwenden	28
1.2.4	Der physiologische Farbraum PCS	30
1.2.5	CIE-Farbräume	30
1.3	Die Sättigung der Farbe	34
1.3.1	Definitionen des Begriffs Sättigung	34
1.3.2	Helmholtzsättigung im xy-Farbraum	36
1.3.3	Die Sättigung im CIELUV-Farbraum	37
1.3.4	Sättigungsstufen der DIN Farbenkarte 6164	38
1.3.5	Buntheit und Sättigung im CIELAB-Farbraum	39
1.3.6	Sättigung in Farberscheinungsmodellen	39
1.3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse zu maximaler und minimaler Sättigung	40
1.3.8	Der Begriff der Reinheit	42
1.3.9	Einfluss des Umfeldes auf die Sättigung	43
1.3.10	Definition der Sättigung im Bereich der Physiologie und in den Medienwissenschaften	45
2	Vorschlag einer neuen Sättigungsformel	46
2.1	Möglichkeiten zur Verbesserung der Symmetrie des CIE-Farbraumes	46
2.1.1	Änderung des Raumes	46
2.1.2	Normierung des CIE-Raumes	46
2.2	Eine neue Formel für die Sättigung	47
2.2.1	Herleitung der Formel	47

2.2.2	Welche maximale Sättigung ist möglich?	48
3	Überprüfung der Formel	49
3.1	Überprüfung der Formel an Druckfarben	49
3.2	Überprüfung der Formel an Folien	51
3.3	Überprüfung der Formel mit der empirischen Sättigung nach DIN 6164	56
3.3.1	Vergleich der Formel mit Messwerten des Digitalen Farbatlas	56
3.3.2	Erläuterungen zur DIN 6164 und zur TGL 21579	58
3.3.3	Überprüfung der Formel an Hand der DIN 6164	67
3.4	Überprüfung der Formel mit dem PCCS	77
3.5	Überprüfung am Ostwaldschen Farbkreis	81
3.6	Zusammenfassende Schlussfolgerung	83
4	Diskussion	84
4.1	Untersuchung der Eigenschaften des LSh-Farbraumes	84
4.2	Betrachtung einiger zur Zeit verwendeter Farbräume	92
4.2.1	CMYK System	92
4.2.2	Natural Color System	92
4.2.3	RAL System	94
4.2.4	Caparol System	96
4.3	Farb-Ellipsen	97
4.4	Farbsättigung und Farbabstand	97
4.5	Effekte in den Sättigungslinien	100
5	Zusammenfassung	107
	Literatur	109
	Anhang	117

0 Zielstellung -Motivation

In den letzten Jahren ist die Farbmessung nicht mehr nur zur Farbabstandsbewertung genutzt worden, sondern auch viele Gestalter haben begonnen, mit den Messwerten von Farbmessgeräten zu arbeiten. So wurden moderne Farbsysteme mit Messwerten ausgestattet. Dadurch sind zahlreiche Fragen zu den Zahlenwerten und auch zu den Begriffen Buntheit und Sättigung aufgetaucht.

Die Anwender können mit den großen Buntheitswerten von Gelb nichts anfangen. Deshalb bemühte sich die Autorin um eine Erklärung für die großen Werte von Gelb und um eine Größe, die sich aus den Farbmessungen ableiten lässt. Sie soll auch die Buntheit oder auch die Sättigung so beschreiben, dass der Anwender des gesamten Farbraumes mit dieser Größe in der Praxis etwas anfangen kann. Beim Blick auf Farbabstände geht manchmal der Blick für den gesamten CIELAB-Farbraum verloren. Deshalb war ein Ziel dieser Arbeit, die Unsymmetrie des CIELAB-Farbraumes aufzudecken und zu zeigen, dass er sich in den, den Anwendern bekannten, Doppelkegel transformieren lässt.

Weiterhin sollen die Unterschiede zwischen den Begriffen Buntheit und Sättigung herausgearbeitet werden, weil in der Praxis keine konsequente Verwendung der Begriffe stattfindet.

In den Farberscheinungsmodellen der letzten Jahre wird die Sättigungsformel

$$S = C/L \quad (0.1)$$

verwendet. Dabei ist C ein Maß für die Buntheit (von engl. „chroma“) und L ein Maß für die Helligkeit (von engl. „lightness“). Diese Formel kann man aber einem Praktiker nicht empfehlen, denn man merkt bei der Arbeit mit dieser Formel, dass sie den visuellen Eindrücken stark widerspricht.

Besonders einfach lässt sich das an folgendem Beispiel zeigen: Sattes Gelb und sattes Violett:

	L	C	S = C/L
Gelb	90	90	1,0
Violett	25	50	2,0

Das Violett wird zwar als etwas satter empfunden als das Gelb, aber nicht als doppelt so satt.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es daher, eine Sättigungsformel zu finden und zu zeigen, dass die mit der vorgeschlagenen Formel berechneten Sättigungswerte der Empfindung entsprechen.

Die Ziele der Arbeit können so zusammengefasst werden:

- Symmetrisierung des CIELAB- Farbraumes
- Klarheit über die Begriffe Buntheit und Sättigung
- Eine Formel für die Sättigung im CIELAB Farbraum
- Nachweis der Richtigkeit der Formel
- Erstellen eines neuen LSh-Farbraums

1 Einleitung: Systeme zur Beschreibung der Farbempfindung

1.1 Entstehung der Farbempfindung

1.1.1 Das menschliche Auge und die neuronale Verarbeitung der Signale

Voraussetzungen zum Entstehen einer Farbempfindung sind im Allgemeinen ein Farbreiz und ein Lebewesen mit einem farbtüchtigen Auge. Auf die Fälle, in denen eine Farbempfindung durch Abruf aus dem Gedächtnis entsteht, soll hier nicht eingegangen werden.

Der Farbreiz besteht aus elektro-magnetischer Strahlung, die von einem Selbstleuchter emittiert wird und entweder auf direktem Weg das Auge erreicht oder indirekt über Körper, die sich im Strahlengang befinden, zum Auge gelangt. Der Farbreiz enthält somit Informationen über die Lichtquelle, aus der er stammt, und über den Körper, von dem er remittiert wurde oder den er transmittiert hat.

Der Mensch kann Strahlung zwischen 380 und 780 nm mit dem Auge registrieren. Tiere haben zum Teil einen anderen Spektralbereich, den Sie visuell wahrnehmen können.

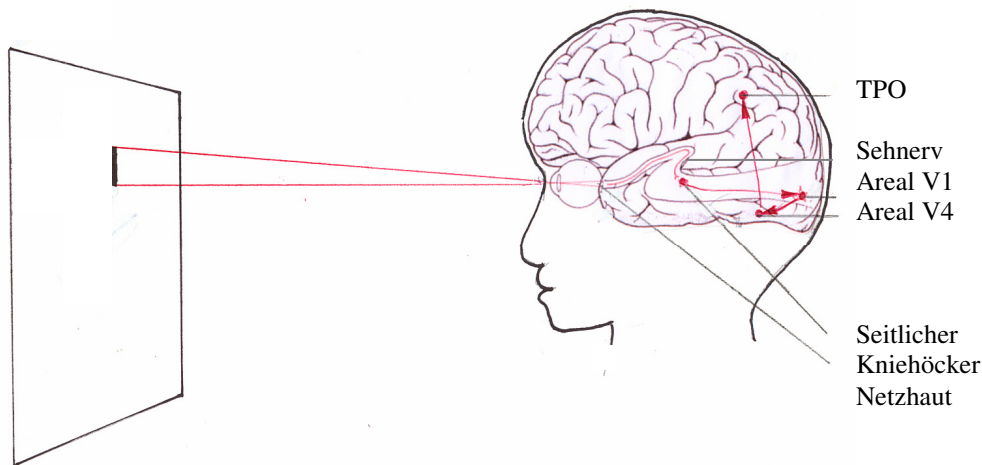


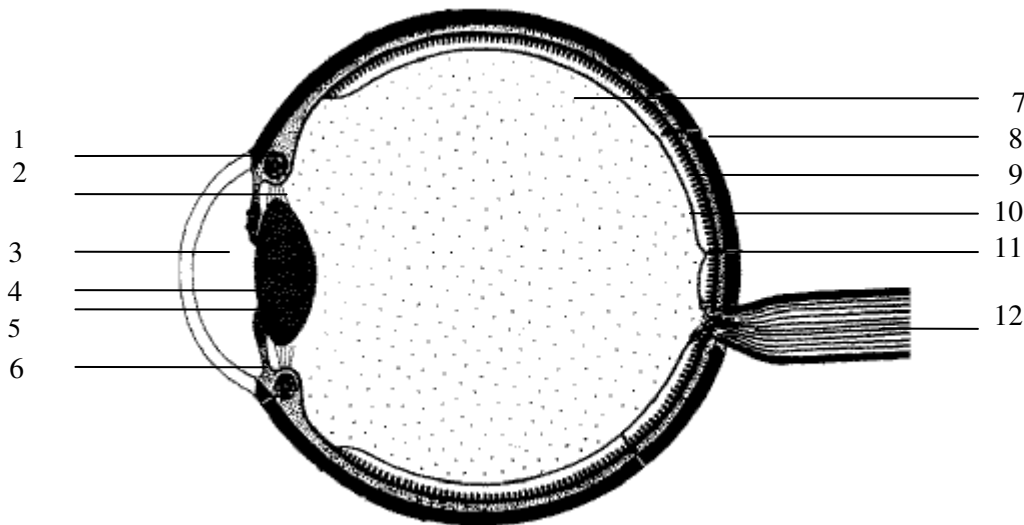
Abb. 1.1.1 Entstehung einer Farbempfindung. Wenn elektromagnetische Strahlung des Wellenlängenbereichs 380...780 nm auf das Auge trifft, entsteht im Areal V4 die Farbempfindung.

Das menschliche Auge hat drei Arten von Farbrezeptoren, die in verschiedenen Wellenlängenbereichen empfindlich sind. Diese sind unter der Bezeichnung Zapfen bekannt. Des Weiteren besitzt der Mensch noch lichtempfindliche Stäbchen, die schon bei geringerer Helligkeit ansprechen und die beim Sehen in der Dämmerung und in der Nacht genutzt werden. Insgesamt umfasst der Empfindlichkeitsbereich des Auges 15 Zehnerpotenzen.

Die gleiche Farbempfindung kann dabei durch Licht verschiedener spektraler Zusammensetzung erzeugt werden. Farbreize unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, die die gleiche Farbempfindung hervorrufen, bezeichnet man auch als bedingt gleiche Farben, im Unterschied zu unbedingt gleichen Farben bei identischen Farbreizen. Bedingt gleiche oder auch metamere Farben erscheinen dem Beobachter bei einer bestimmten Beleuchtung gleich, bei einer anderen Beleuchtung können sie sich unterscheiden.

Bei den weiteren Betrachtungen soll als Auge stets das menschliche Auge im Mittelpunkt stehen. Die Augen der Tiere sind zum Teil wesentlich anders aufgebaut. Denken wir z.B. an das Facettenauge von Insekten. Aber auch der Spektralbereich, der wahrgenommen werden kann, kann sich von demjenigen des Menschen unterscheiden. So kann z.B. die Honigbiene im UV-Bereich sehen, in einem Bereich, in dem der Mensch kein Sehvermögen hat, der langwellige Bereich, der beim Menschen zu roten Farbempfindungen führt, ist dagegen für die Honigbiene unsichtbar. Einige Tierarten sind zu Farbempfindungen gar nicht fähig. So sehen z. B. Fledermäuse und Kängurus eine schwarzweiße Welt.

Abb. 1.1.2 zeigt einen horizontalen Querschnitt durch das menschliche Auge.



1 Ringmuskel	5 Linse	9 Aderhaut
2 Aufhängung (Zonulafasern)	6 Iris	10 Netzhaut
3 vordere Augenkammer	7 Glaskörper	11 Gelber Fleck (Fovea)
4 Pupille	8 Lederhaut	12 Sehnerv

Abb. 1.1.2 Schnitt durch das menschliche Auge

Die Brechkraft der Linse ist veränderlich und kann durch die Akkommodation an verschiedene Entfernungen angepasst werden. Der Querschnitt des einfallenden Lichtbündels wird über die Öffnung der Pupille mit Hilfe der Irisblende geregelt. Die vom Menschen betrachteten Gegenstände werden auf die Netzhaut (Retina) am Augenhintergrund abgebildet.

Die Netzhaut hat an der von der Einfallsrichtung des Lichts abgewandten Seite lichtempfindliche Sinneszellen. Diese Sinneszellen lassen sich in stäbchen- und zapfenförmige unterteilen. Das Auge besitzt 4-7 Millionen zapfenförmige Zellen, die an der Stelle des deutlichsten Sehens am stärksten konzentriert sind. In diesem Bereich gibt es keine Stäbchen. Stäbchen gibt es 110-125 Millionen in den anderen Bereichen der Netzhaut. Abb. 1.1.3 zeigt einen schematischen Schnitt durch die Netzhaut des Menschen.

Am blinden Fleck befinden sich keine Photorezeptoren. Dort passieren die Sehnerven, zu einem Strang vereinigt, die Netzhaut. Über die Sehnerven erfolgt die Weiterleitung der Signale zum Gehirn, zum seitlichen Kniekörper und danach zum visuellen Cortex. Die Information jeder Sehfeldhälfte wird in dem der betreffenden Sehfeldhälfte gegenüberliegenden Teil des visuellen Cortex verarbeitet. Es gibt verbindende Nervenstränge, die einen Informationsaustausch der beiden Gehirnhälften ermöglichen.

Die optischen Informationen werden zunächst zum Areal V1, der primären Sehrinde, geleitet, anschließend wird im Areal V4 die Farb-Informationen erzeugt. Die Informationen über Farbe, Form und Bewegung werden anschließend im „Dreiländereck“, das zwischen Temporal-, Parietal- und Okzipitallappen (TPO) liegt, zusammengeführt.

Die Signalverarbeitung des Auges erfolgt auf der Sensorebene nach der Helmholtz'schen Dreikomponententheorie und anschließend nach der Heringschen Gegenfarbentheorie. Die Heringsche Gegen-

farbentheorie besagt, dass Rot-Grüne und Blau-Gelbe Gegenfarbensignale erzeugt werden. Diese Verarbeitung in zwei nacheinander geschalteten Zonen wurde schon 1905 von Kries angenommen.

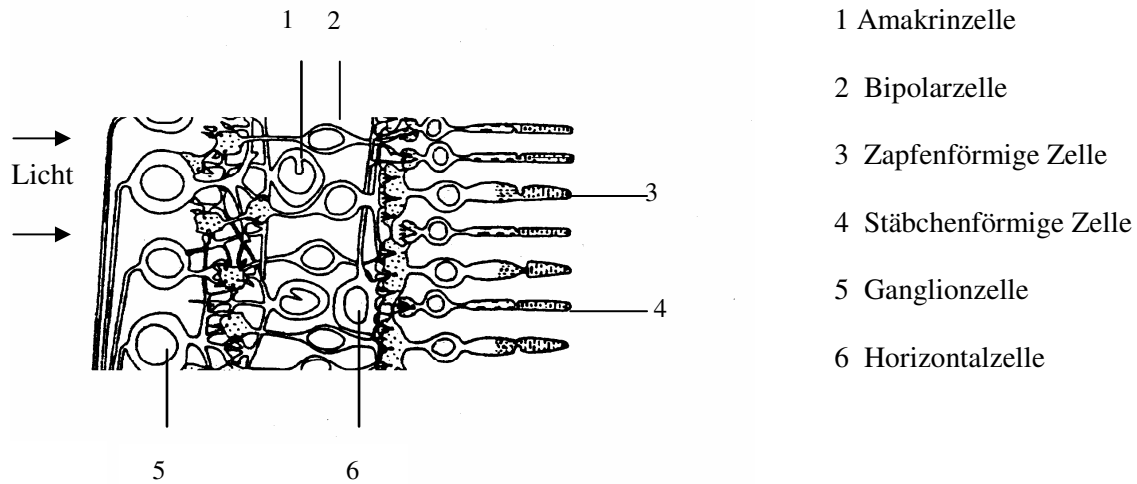


Abb. 1.1.3 Schematischer Schnitt durch die Netzhaut; die lichtempfindlichen Zellen befinden sich auf der vom Licht abgewandten Seite des Zellverbandes

Das chiasma opticum ist der Kreuzungspunkt der Sehbahnen. Im corpus geniculatum laterale (Kniehöcker) findet bereits ein Teil der Signalweiterverarbeitung statt.

Das menschliche Auge bewertet Farbunterschiede mit drei Arten von Zapfen für drei unterschiedliche Wellenlängenbereiche. Diese Zapfen haben nach Marks, Dobelle und Mac Nichol [71] Empfindlichkeitsmaxima im kurzwelligen Bereich bei 445 nm, bei mittleren Wellenlängen von 533 nm und im langwelligen Bereich bei 570 nm.

Abb. 1.1.4 zeigt die relative spektrale Empfindlichkeit der L-, M- und S-Zapfen. L steht für den langwelligen, M für den mittleren und S („short“) für den kurzwelligen Bereich des Spektrums.

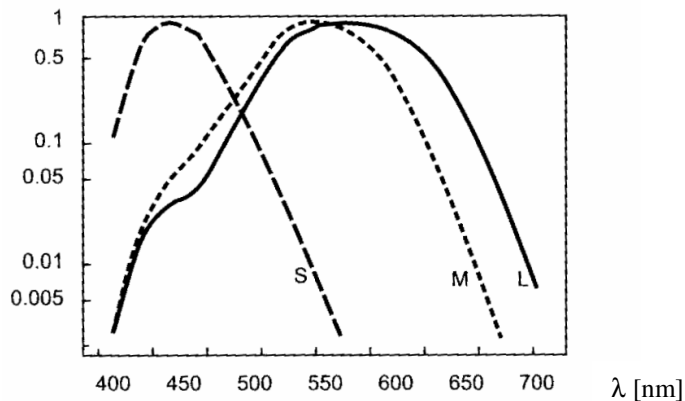


Abb. 1.1.4 Relative spektrale Empfindlichkeit der Augen-Rezeptoren S (short), M (middle) und L (long). Die Maxima der L und M Zapfen liegen dicht beieinander

Neuere Arbeiten, wie z.B. von Walraven [101] zeigen, dass es im roten und im grünen Wellenlängenbereich sogar zwei Typen gibt, d. h. insgesamt kommen 5 Maxima vor, von denen aber nicht jeder Mensch alle besitzt, sondern es gibt verschiedene Kombinationen.

Die Anzahl der Zapfen L : M : S verhält sich nach Russell [86] wie 10:5:1.

Die Stäbchen sind Sensoren mit größerer Empfindlichkeit für Helligkeit. Der spektrale Verlauf der Hellempfindlichkeit ist dem spektralen Verlauf der Empfindlichkeit der Sensoren für den mittleren Bereich sehr ähnlich.

Nach von Kries [52] dienen die Zapfen in erster Linie dem Tagessehen (photopisches Sehen), während die Stäbchen beim Nachtsehen (skotopisches Sehen) zum Einsatz kommen.

Die Signale der drei Arten von Zapfen und der Stäbchen werden neuronal weiterverarbeitet.

Die Signale der drei Zapfen werden nach der Zonentheorie, einer Kombination der Dreifarben- und Vierfarbentheorie, so weiterverarbeitet, dass sich blau-gelbe und rot-grüne Gegenfarbenseignale ergeben. Abb.1.1.5. zeigt eine schematische Darstellung der Bildung von Gegenfarbenseignalen aus Summen- und Differenzsignalen.

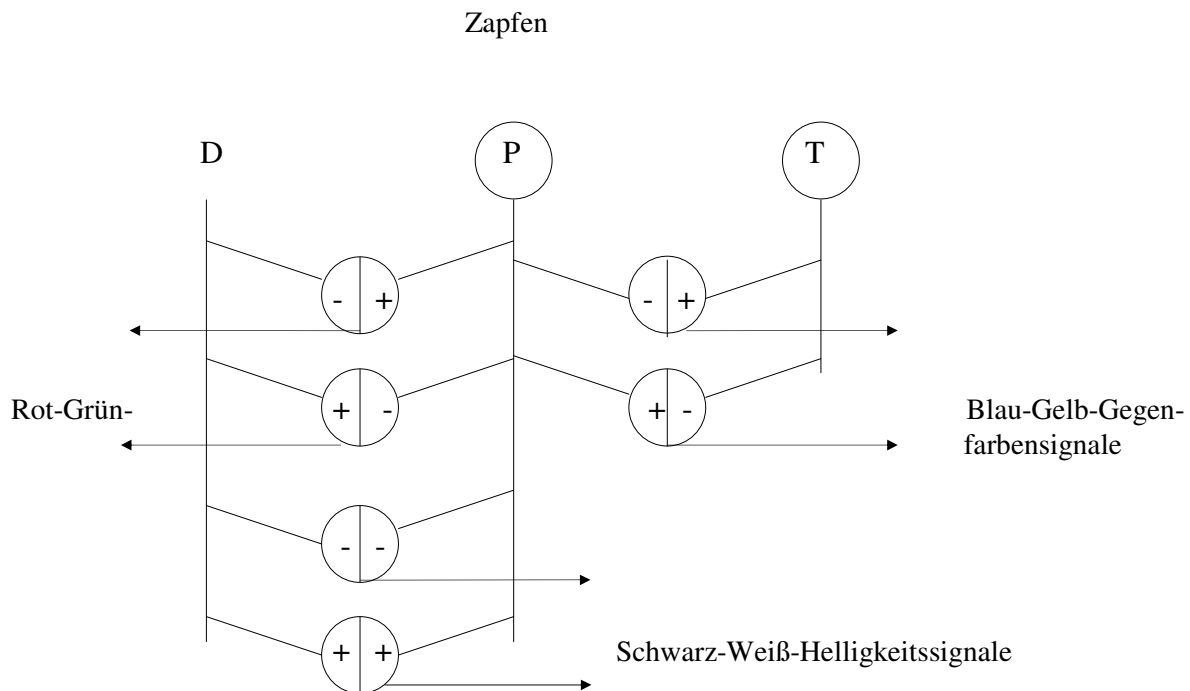


Abb. 1.1.5 Entstehung von Gegenfarbenseignalen in der Zonentheorie

Aus den Signalen der drei Zapfen werden Rot-Grün-Gegenfarbenseignale, Blau-Gelb-Gegenfarbenseignale und Helligkeitssignale abgeleitet.

D (M)-Zapfen mit maximaler Empfindlichkeit im mittleren Spektralbereich

P (L)-Zapfen mit maximaler Empfindlichkeit im langwelligen Spektralbereich

T (S)-Zapfen mit maximaler Empfindlichkeit im kurzwelligen Spektralbereich

Eine Verarbeitung der Signale nach der Zonentheorie wird schon 1905 von Kries [52] angenommen. Die Zonentheorie verbindet die Dreikomponententheorie von Young und Helmholtz mit der Gegenfarbentheorie von Hering.

Neuere Untersuchungen von Creutzfeldt [13] belegen, dass die tatsächliche Verarbeitung wesentlich komplizierter ist, denn es konnten im Gehirn im *circulus geniculatus lateralis* insgesamt 7 Zelltypen nachgewiesen werden:

- schmalbandige (N-narrow) im kurzwelligen (S-short) Bereich: NS-Zellen
- breitbandige (W-wide) im kurzwelligen Bereich: WS-Zellen
- breitbandige im mittleren Bereich (M-middle): WM-Zellen
- breitbandige im langwelligen Bereich (L-long): WL-Zellen
- schmalbandige im langwelligen Bereich: NL-Zellen

- lichtempfindliche Zellen LI, die auf sämtliches sichtbare Licht reagieren
- breitbandige Zellen, die auf Signale der S- und L-Zapfen reagieren: W-SL-Zellen

Bei der Verarbeitung wird die Umfeldhelligkeit mit verarbeitet. Die spektrale Antwort der Neuronen hängt von dem Helligkeitsverhältnis zwischen der Farbanregung und dem Umfeld ab.

Bei einem Helligkeitsverhältnis von Probe/Umfeld $Y_{pr}/Y_u < 0,01$ sind nur noch die N-Zellen aktiv. Am stärksten werden die N-Zellen bei $Y_{pr}/Y_u \cong 0,1$ erregt. Bei $Y_{pr}/Y_u > 10$ werden nur noch die W-Zellen angeregt. In dem Bereich, in dem beide Zellen ansprechen, ist die beste Farbunterscheidbarkeit gewährleistet. Bei sehr hoher und sehr niedriger Helligkeit der Probe ist die Farbunterscheidbarkeit eingeschränkt.

Bei $Y_{pr}/Y_u \cong 10$ werden die W-Zellen in verschiedener Weise angeregt. Farben mit $\lambda < 570$ nm erregen die WS-Zellen und hemmen die WL-Zellen. Farben mit $\lambda > 570$ nm erregen die W-Zellen und hemmen alle N-Zellen. Dadurch erscheinen Rot und Grün bei so großer Helligkeit vergelblicht und verweißlicht. Das stimmt mit dem bekannten Bezold-Brücke-Effekt überein.

Die Summe der Aktivitäten der Neuronen repräsentiert die Breite (Verweißlichung).

N- und W-Zellen scheinen sich komplementär in Bezug auf die Helligkeit zu verhalten, S- und L-Zellen in Bezug auf die Farbe.

WM-Zellen können zwischen Gelb und Weiß unterscheiden, während W-SL-Zellen auf Purpur reagieren.

Damit ist Purpur als Empfindungsqualität vorhanden.

Der L-Rezeptor hat sein Maximum bei 560 nm, d. h. im Grüngelb.

Bis jetzt existiert noch kein Modell, das diese komplizierte Verarbeitung befriedigend beschreibt.

Am Ende der Verarbeitung kommen die drei Empfindungsmaße Farbton, Helligkeit und Sättigung zustande, d.h., der Mensch verarbeitet die Signale der insgesamt vier verschiedenen Sensorarten (drei Zapfenarten und eine Stäbchenart) in drei Empfindungsmaße. Dabei hat bei der Beurteilung von Farben im allgemeinen der Farbton den Vorrang, danach die Merkmale Helligkeit und Sättigung.

Probe + Umfeld

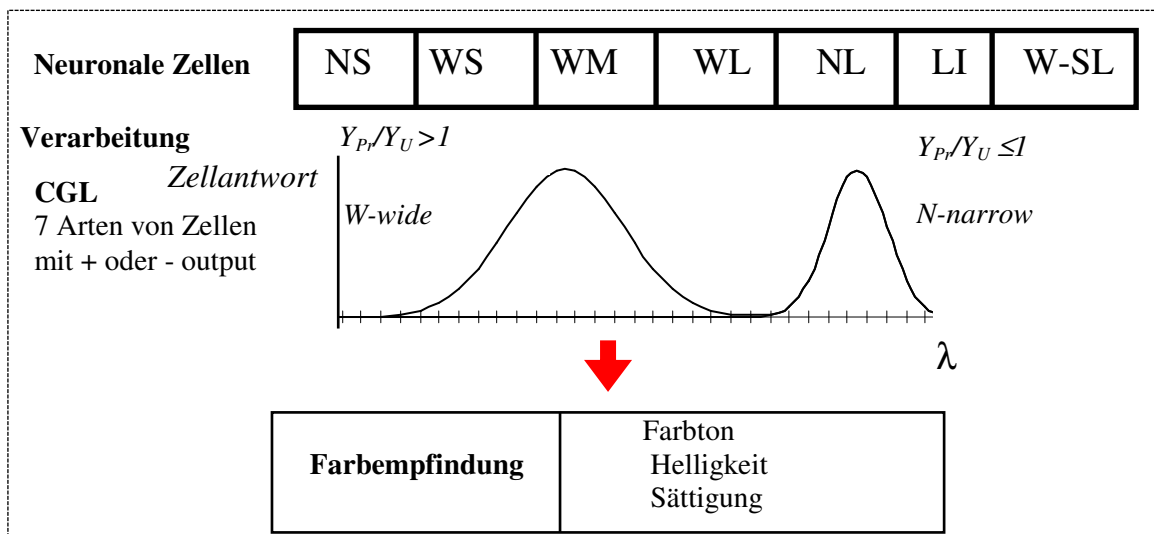
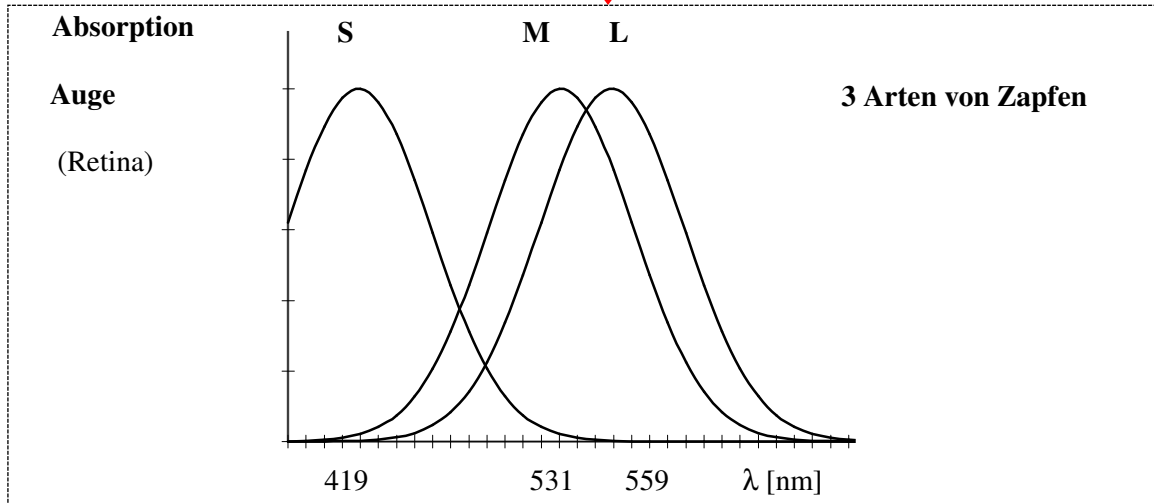


Abb. 1.1.6 Entstehung einer Farbempfindung .Am Ende der Verarbeitung kommen die drei Empfindungsmaße Farbton, Helligkeit und Sättigung zustande,

Wellenlängenunterscheidbarkeit

Der Mensch hat nicht in allen Wellenlängenbereichen eine gleich gute Wellenlängenunterscheidbarkeit. Dort, wo zwei Sensoren beteiligt sind, ist die Auflösung größer, als wenn nur ein Sensor beteiligt ist (Abb. 1.1.7).

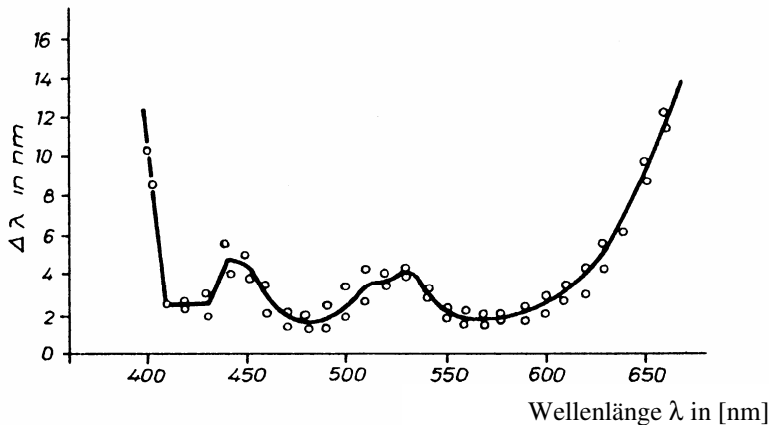


Abb. 1.1.7 Wellenlängenunterscheidbarkeit beim Menschen nach Bedford und Wyszecki [5]. Dort, wo zwei Rezeptoren beteiligt sind, ist die Auflösung größer als wenn nur ein Rezeptor beteiligt ist

Die Wellenlängenunterscheidbarkeit des menschlichen Auges ist bei 420 nm, bei 480 nm und bei 570 nm am größten. Das heißt, sie ist am größten, wenn die Wellenlänge zwischen zwei Empfindlichkeitsmaxima der Zapfen liegt. Ähnliche Ergebnisse liegen auch von Wright [108] vor.

Es gibt drei Wellenlängen, bei denen eine Änderung der Helligkeit nicht zu einer Farbtonverschiebung führt (Abney-Effekt). Diese Wellenlängen liegen bei 476, 530 und 576 nm. Untersuchungen dazu sind u.a. bei Kurtenbach zu finden [54].

Abb. 1.1.8 zeigt, dass die Hellempfindlichkeitskurven in der Mitte des sichtbaren Spektrums bei 555 nm für Tagsehen und bei 507 nm für Nachtsehen ein ausgeprägtes Maximum haben.

Abb. 1.1.8 Spektrale Hellempfindlichkeitskurve für Tages- und Nachtsehen für den 2⁰ Normalbeobachter (CIE 1924)

Helligkeitsempfinden in Abhängigkeit von der Leuchtdichte

Das Helligkeitsempfinden ist in Bezug auf die relative Leuchtdichte stark nicht-linear. Dieser Zusammenhang lässt sich näherungsweise mit dem Weber-Fechnerschen Gesetz beschreiben:

$$S = k \log I + \text{const.}, \quad (1.1)$$

wobei S für die subjektive Empfindung und I für den physiologischen Reiz steht.

Das Auge passt sich jeweils an die Leuchtdichte des Bezugsweiß Y_w so an, dass „Weiß“ wieder als „Weiß“ empfunden wird. Mit wachsendem Verhältnis Y/Y_w steigt die empfundene Helligkeit zunächst steil an, dann wesentlich geringer. Dieses Verhalten kann mit der 3. Wurzelfunktion günstig beschrieben werden:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} - 16 \quad (1.2)$$

In neueren Arbeiten (Stevens) werden Potenzfunktionen mit verschiedenen Exponenten zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Reiz und Reizantwort verwendet [33].

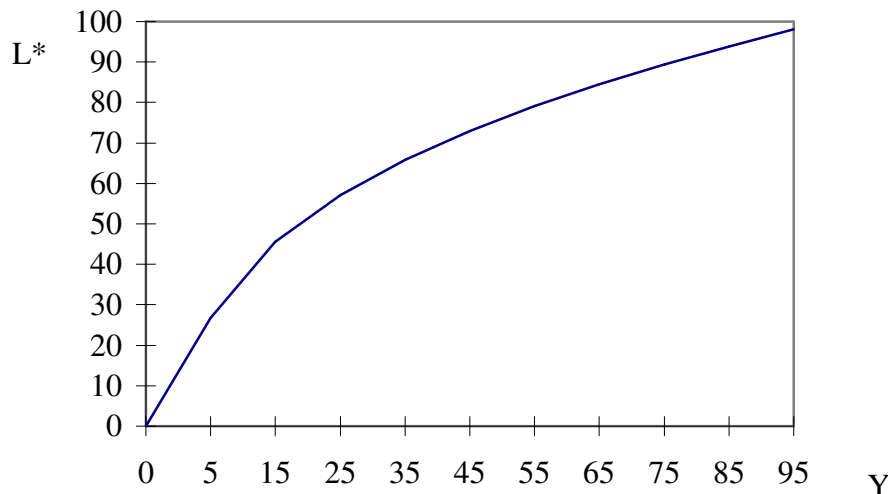


Abb. 1.1.9 Empfundene Helligkeit L^* in Abhängigkeit von der Leuchtdichte Y

Diese psychophysischen Gesetze werden in Kap. 1.1.4 weiter diskutiert. Die nichtlineare Abhängigkeit der Empfindung vom physikalischen Reiz liegt beim Menschen nicht nur für den Sehprozess vor. Auch das menschliche Gehör und andere Sinne zeigen ein ähnliches Verhalten.

Rezeptive Felder und laterale Hemmung

Nur im Bereich des schärfsten Sehens, in der Fovea, gibt es zu jedem Photorezeptor eine Signal weiterleitende Ganglienzelle. In den anderen Bereichen ist eine starke Signalkonvergenz erforderlich, da auf über 100 Millionen Photorezeptoren nur etwa eine Million Neuronen kommen.

Den Bereich der Retina, deren Photorezeptoren auf ein einzelnes Neuron im Sehnerv einwirken, bezeichnet man als rezeptives Feld. Die einzelnen rezeptiven Felder überlappen sich und ändern ihre Form entsprechend dem Adaptationszustand. Die Überlagerung ergibt eine Signaldivergenz, durch die ein Photorezeptor mehrere Ganglienzellen beeinflussen kann. Eine Vergrößerung der rezeptiven Felder ermöglicht es, die Lichtempfindlichkeit auf Kosten der Sehschärfe zu erhöhen.

In den Photorezeptoren bilden sich bei Erregung Aktionspotentiale, die einige Millivolt über dem Potential im Ruhezustand liegen. In den Ganglienzellen wird der Ruhezustand durch eine bestimmte Folge von elektrischen Impulsen charakterisiert, eine Erregung ergibt eine Änderung der Impulsfrequenz, wobei die Erregung die Frequenz erhöhen oder erniedrigen kann. Bei einer Erhöhung spricht man von Erregung, bei einer Erniedrigung der Frequenz von Hemmung.

Die rezeptiven Felder der meisten Ganglienzellen bestehen aus einem Zentrum und einem Umfeld. Die Zentren sind im Bereich höchster Sehschärfe nur einige Bogenminuten groß, während sie an der Retinaperipherie eine Größe von 3° bis 5° erreichen.

Man unterscheidet zwei Arten von Ganglienzellen, On-Zentrum-Zellen und Off-Zentrum-Zellen. Bei den On-Zentrum-Zellen wird bei Belichtung des Zentrums des rezeptiven Feldes die Aktivität der Ganglienzellen erhöht, während es bei den Off-Zentrum-Zellen bei Belichtung des Zentrums zu einer Hemmung kommt. Beide Arten liegen in nahezu gleicher Anzahl vor und jeder Photorezeptor kann auf beide Arten einwirken. Es existieren damit zwei parallele Bahnen für die Hell- und Dunkelwahrnehmung bei gegebener Adaptation. Ganglienzellen mit On-Zentrum können schnelle Zunahmen der Lichtintensität im Zentrum ihres rezeptiven Feldes mitteilen, Ganglienzellen mit Off-Zentrum übermitteln schnelle Abnahmen der Lichtintensität im rezeptiven Feld.

Photorezeptoren können über die Horizontalzellen benachbarte Photorezeptoren beeinflussen. Eine Belichtung des Umfeldes bewirkt über eine hemmende Horizontalzellensynapse eine Signalumkehr im On- und Off-Kanal. Durch diese lateralen Hemmungsmechanismen entstehen in der Netzhaut konzentrische, antagonistische rezeptive Felder.

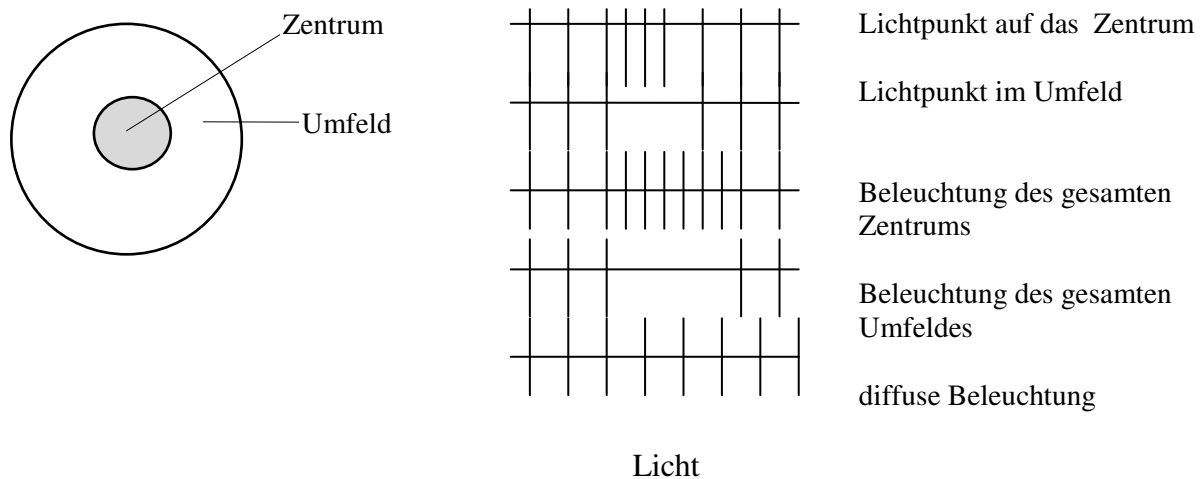


Abb. 1.1.10 Rezeptives Feld der Netzhaut, bestehend aus Zentrum und Umfeld, und Zellantworten (Aktionspotentialmuster) einer On-Zentrum-Ganglienzelle bei verschiedenen Beleuchtungen

Man unterscheidet drei Typen von rezeptiven Feldern. Typ I sind einfache Gegenfarbennetze, Typ II hat einen spektral entgegengesetzten Charakter (Doppel-Gegenfarbennetze) und Typ III hat keinen gegensätzlichen Input.

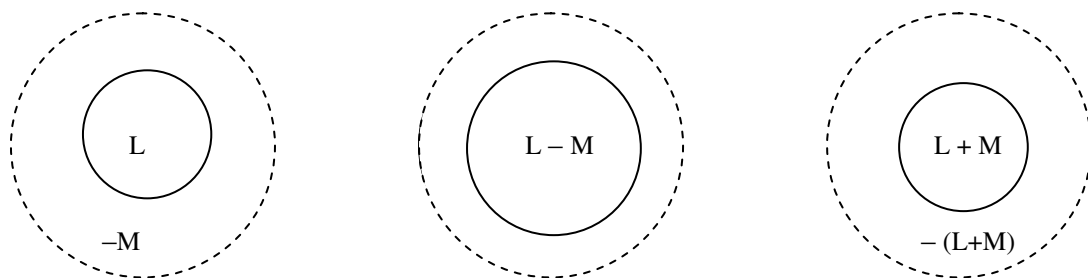


Abb 1.1.11 Typen von Gegenfarbennetzen; Typ I sind einfache Gegenfarbennetze, Typ II hat einen spektral entgegengesetzten Charakter (Doppel-Gegenfarbennetze) und Typ III hat keinen gegensätzlichen Input.

Bei den einfachen Gegenfarbennetzen werden Zentrum und Umfeld von verschiedenen Zapfensignalen erregt. Ihre Funktion ist Kontrastverstärkung und Farbkonstanz. Nach Schmidt [90] und Valberg [100] tragen sie nicht zur Farbwahrnehmung bei.

Es gibt M-S Zellen die auf Reize reagieren, die man als Gelb empfindet, S-L-Zellen reagieren auf Reize, die man als Blau empfindet, M-L-Zellen, reagieren auf Reize, die als blau-grün empfunden werden und L-M-Zellen, auf Reize die als rot empfunden werden. Weiterhin wurden Zellen gefunden mit einem Input von S-(L+M) im Zentrum und (L+M)-S in der Umgebung. Auch die umgekehrte Konfiguration existiert, allerdings weniger häufig. Das heißt, es gibt sechs Sorten von Gegenfarbennetzen zur Farbwahrnehmung.

Die einfachen Gegenfarbennetze kommen sowohl in der Retina als auch im Corpus geniculatum laterale vor, die Doppelgegenfarbennetze nur im visuellen Cortex.

Die unterschiedlichen retinalen Ganglienzellen können außerdem in Zellen vom Typ M (magnozellulär) oder Typ P (parvozellulär) klassifiziert werden, je nachdem, ob ihre Axone in einer magnozellulären oder parvozellulären Schicht des Corpus geniculatum laterale enden. Die einfachen Gegenfarbennetze sind vom Typ P während die Doppelgegenfarbennetze sowohl vom Typ P als auch vom Typ M sein können. Es gibt damit zwei Typen von Verarbeitungswegen, den magnozellulären und den parvozellulären, die auch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten arbeiten. Die Informationen des S-Zapfens werden durch eine eigene Klasse von so genannten coextensiven einfachen Gegenfarbennetzen (K-Zellen) übertragen.

Die Zellen und ihr Verhalten sind als Gesamtüberblick von Valberg in [100] dargestellt, sowie in den Lehrbüchern der Neurologie zu finden.

Gesichtsfeld

Die Retina bedeckt einen großen Teil der Innenseite des Augapfels. Dadurch besitzt das Auge ein größeres Gesichtsfeld als z.B. ein Weitwinkelphotoapparat. Es ist in der Lage, beim Geradeausblicken Bewegungen wahrzunehmen, die an der Seite oder seitlich hinten stattfinden. Wenn man geradeaus sieht und weder Kopf noch Augen bewegt, kann man noch unter folgenden Winkeln sehen: Von geradeaus bis zur Obergrenze $50-60^{\circ}$, von geradeaus bis zur Untergrenze $60-70^{\circ}$. Das ergibt ein vertikales Gesichtsfeld von ca. 120° . Horizontal in Richtung Schläfe liegt die Grenze bei 100° . Das horizontale Gesichtsfeld beträgt somit 200° .

Da die Zapfen im Sehzentrum konzentriert sind und von dort aus stark abnehmen, ergibt sich, dass an den äußeren Gebieten des Gesichtsfeldes nur Schwarz-Weiß-Empfindungen möglich sind.

Farbenfehlsichtigkeit

Organische Störungen an den Zapfen der Netzhaut, die angeboren oder erworben sein können, führen zur teilweisen oder zur totalen Farbenfehlsichtigkeit.

Man unterscheidet folgende Formen der Farbenfehlsichtigkeit: Wenn eines der Reizzentren teilweise ausfällt, spricht man von anomalen Trichromaten. Es kommen folgende Fälle vor, der letzte dieser drei Fälle nur sehr selten:

- Protanomale (rotgestört)
- Deuteranomale (grüngestört)
- Tritanomale (blaugestört).

Fällt eines der Reizzentren ganz aus, spricht von Dichromaten oder von Zweifärbler:

- Protanopen (rotblind)
- Deuteranopen (grünblind)
- Tritanopen (blaublind)

Für die Dichromaten sieht eine bestimmte Stelle des Spektrums unbunt aus. Im Falle der Protanopie und der Deuteranopie liegt dieser Wellenlängenbereich im Blau-Grün, nicht sehr weit voneinander entfernt. Im seltenen Fall der Tritanopie liegt die unbunte Stelle im gelben Spektralbereich. Mit Hilfe der Dichromaten ist es möglich, die Lage der Primärvalenzen zu bestimmen.

Sehr selten kommt der Ausfall aller drei Reizzentren vor (1:40000). Dann ist nur Schwarz-Weiß-Sehen möglich und man spricht von Monochromaten oder Achromaten.

Der Fall des Schwarz-Weiß-Sehens kann auch bei intakten Reizzentren und corticalen Läsionen eintreten.

1.1.2 Beschreibung der Farbempfindung - Empfindungsmaße

Beschreibung des Farbreizes durch die Farbvalenz

Man kann einen Farbreiz durch die Angabe von drei Zahlenwerten, durch die Farbvalenz, charakterisieren. Die Farbvalenz ist eine objektiv messbare Größe, die in Anlehnung an das Normfarbensystem definiert ist. Die drei so genannten Normfarbwerte X, Y, Z ergeben sich als Integrale über die Farbreizfunktion $S_\lambda b(\lambda)$ und die drei Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$:

$$\begin{aligned} X &= k \int S_\lambda b(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int S_\lambda b(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int S_\lambda b(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1.3)$$

Dabei bedeuten:

λ	Wellenlänge
S_λ	Spektrum der Beleuchtung
$\beta(\lambda)$	Remissionsfunktion des beleuchteten Objektes
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktionen
k	Konstante

Farbreize unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, die die gleiche Farbempfindung hervorrufen, bezeichnet man als Farben mit gleicher Farbvalenz.

Aus der Farbvalenz kann man nicht auf das Spektrum des Farbreizes rückschließen. Die Angabe der Farbvalenz ist damit eine unvollständige Beschreibung des Farbreizes.

Die Farbvalenz bestimmt das Verhalten des Farbreizes in der additiven Mischung, das heißt zur Vorhersage des Mischergebnisses von Farben braucht man nur die Farbvalenzen zu kennen und nicht die spektrale Zusammensetzung des Farbreizes. Das Verhalten des Farbreizes bei der additiven Mischung wird durch die Grassmannschen Gesetze beschrieben:

1. Jeder Farbreiz kann eindeutig als eine Linearkombination von drei Primärvalenzen dargestellt werden.
2. Farbreize mit gleicher Farbvalenz erzeugen unabhängig von ihrer spektralen Zusammensetzung identische Wirkungen in der additiven Mischung
3. Alle additiven Farbmischreihen sind stetig.

Beschreibung der Farbempfindung – Empfindungsmaße

Im Alltag werden Farbempfindungen verbal beschrieben und es werden im allgemeinen nicht drei Begriffe verwendet. Das Wichtigste ist eine Beschreibung des Buntones. Der Begriff für den Bunton wird dann oft noch durch ein Adjektiv ergänzt, wie z. B. „helles Rot“ oder „sattes Gelb“. Manchmal findet ein Vergleich mit einem Gegenstand statt, dann wird nur ein Begriff verwendet, z. B. Flieder, Orange.

Für eine exakte, wissenschaftliche Farbbeschreibung benötigt man drei Größen für die eigentliche Infeldfarbe und zusätzlich ist die Beschreibung der Beleuchtung und des Umfeldes erforderlich.

Alle weiteren Kenngrößen lassen sich aus diesen drei berechnen.

Die Farbwissenschaft verwendet, seit 1976 der CIELAB-, bzw. der CIELCh- Farbraum geschaffen wurde, die drei Begriffe Bunton, Buntheit und Helligkeit zur Beschreibung der Farbe. Die englischen Begriffe sind Hue für Farbton, Chroma für Buntheit und Lightness für Helligkeit.

Ob Buntheit oder Sättigung das bessere Empfindungsmaß ist, ist nicht leicht zu beantworten.

Nach einer Untersuchung von M. Richter beschreiben unvoreingenommene Versuchspersonen eine Farbe mit Worten, die den Größen Bunton, Helligkeit und Sättigung entsprechen [80].

Im Folgenden sollen die Definitionen der CIE zusammengefasst werden:

Unter **Bunton** (früher Farbton) versteht man jene Eigenschaft, in der sich zum Beispiel eine rote von einer gelben oder einer violetten Farbe unterscheidet.

Helligkeit (im Englischen Lightness) ist das Merkmal einer Gesichtsempfindung aufgrund dessen eine Fläche mehr oder weniger stark Licht reflektierend oder durchlässig beurteilt wird.

Weiterhin gibt es noch **Brightness**, die absolute Helligkeit einer Farbe. Für diesen Begriff fehlt ein deutscher Begriff.

Buntheit (Chroma) ist das Merkmal einer Gesichtsempfindung, aufgrund dessen eine bezogene Körperfärbung mehr oder weniger bunt erscheint, beurteilt im Vergleich zu einer ähnlich beleuchteten, weiß oder stark durchlässig erscheinenden Farbe.

Im Englischen wird noch den Begriff **Colourfulness** verwendet, den man mit Farbstärke übersetzen könnte und der im Gegensatz zu Buntheit die absolute Größe der Farbeempfindung meint.

Helligkeit und Buntheit sind bezogene Größen, Brightness und Colorfulness sind absolute Größen.

So, wie die Buntheit von Seiten der Farbwissenschaft definiert ist, ist sie keine unabhängige Größe, sondern sie hängt von der Helligkeit ab. Je größer die Helligkeit, desto größere Buntheiten sind möglich. Das bedeutet, dass Gelb auf Grund der großen Helligkeit eine größere Buntheit hat als die anderen Farben.

Für die meisten kann Rot, Blau und Grün genauso bunt vorkommen wie Gelb, denn fast alle bekannten Farbsysteme sind symmetrisch.

Asymmetrien sind nur von dem Farbsystem des Malers Munsell [76] bekannt. Dort haben Rot, Orangerot, Gelb und Violetblau die höchsten „Munsell-Chroma-Werte“, während Grün, Blaugrün und Blau die geringsten Werte haben.

Untersuchungen zur Buntheit sind insofern nicht einfach durchzuführen, als dass man bei den verwendeten Farbproben nicht sicher ist, ob man nicht noch eine Probe mit einem bunteren Pigment finden kann.

Der Begriff **Sättigung** ist insofern kompliziert, weil es zwei nichtidentische Definitionen gibt (siehe Kapitel 1.3.1).

Ein Hauptproblem ist weiterhin, dass der Begriff Sättigung oft, auch in wissenschaftlichen, aktuellen Publikationen, anstelle des Wortes Buntheit verwendet wird, insbesondere wenn dies Publikationen aus dem Bereich der Physiologie sind.

Des Weiteren muss noch der Begriff **Reinheit** erwähnt werden, der ebenfalls als Empfindungsmaß einer Farbe verwendet wird und mit dem der Anteil von Schwarz, Weiß oder Grau in einer Farbe beschrieben wird (siehe Kapitel 1.3.8).

Die gesamten hier erwähnten Größen dienen der Beschreibung der Empfindung, daneben gibt es noch rein physikalische Größen, die ebenfalls zur Beschreibung von Farbreizen und Lichtern verwendet werden, wie z. B. die Leuchtdichte.

1.1.3 Farbmessung

Im Gegensatz zur Signalverarbeitung beim Menschen verarbeitet ein Farbmessgerät nur die Signale des Infeldes. Eine Umfeldhelligkeit wird bisher meist nicht berücksichtigt. Die Beschreibung der Farbe beschränkt sich auf Zahlenwerte, eine direkte Messung der Empfindung kann nicht stattfinden.

Wie man Abb. 1.1.4 entnehmen kann, liegen die M- und die L-Kurve sehr dicht beieinander und unterscheiden sich damit wesentlich von den Kurven des Normalbeobachters, die in Abb. 1.1.12 dargestellt sind und die den Farbmessgeräten zugrunde liegen.

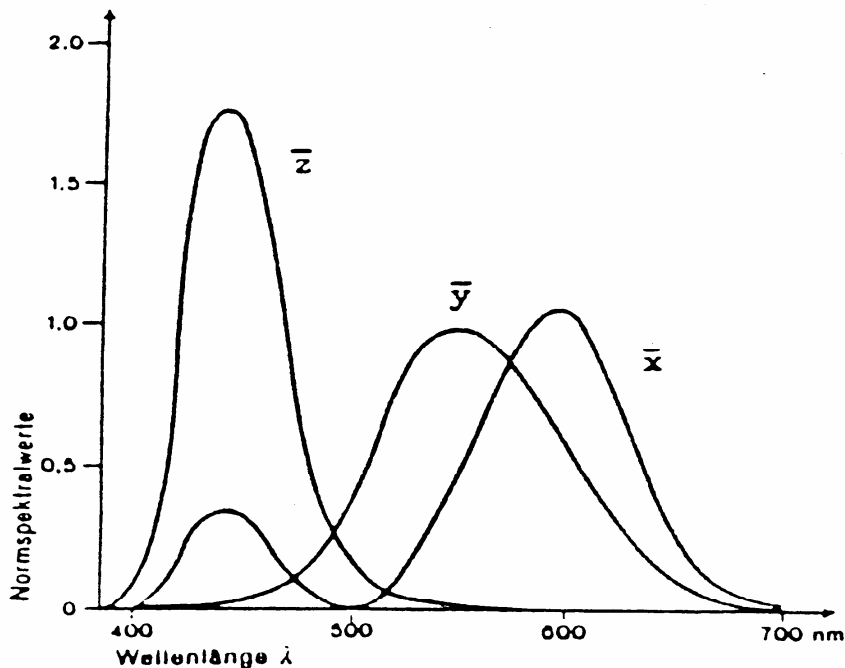


Abb. 1.1.12 Normspektralwertfunktionen. Die CIE hat mit Hilfe dieser Kurven den Normalbeobachter definiert. Die abgebildeten Kurven entsprechen dem 2° Beobachter.

Die CIE hat mit Hilfe dieser Normspektralwertkurven den Normalbeobachter definiert. Es wird dabei zwischen einem Beobachtungswinkel von 2° und von 10° unterschieden. Die abgebildeten Kurven entsprechen dem 2° Beobachter. Die Messung der Farbvalenz einer Farbe nach dem Dreibereichsverfahren kommt dem Sehen mit dem Auge insofern nahe, als die Messung mit drei breitbandigen Filtern unterschiedlicher Wellenlängenempfindlichkeit erfolgt.

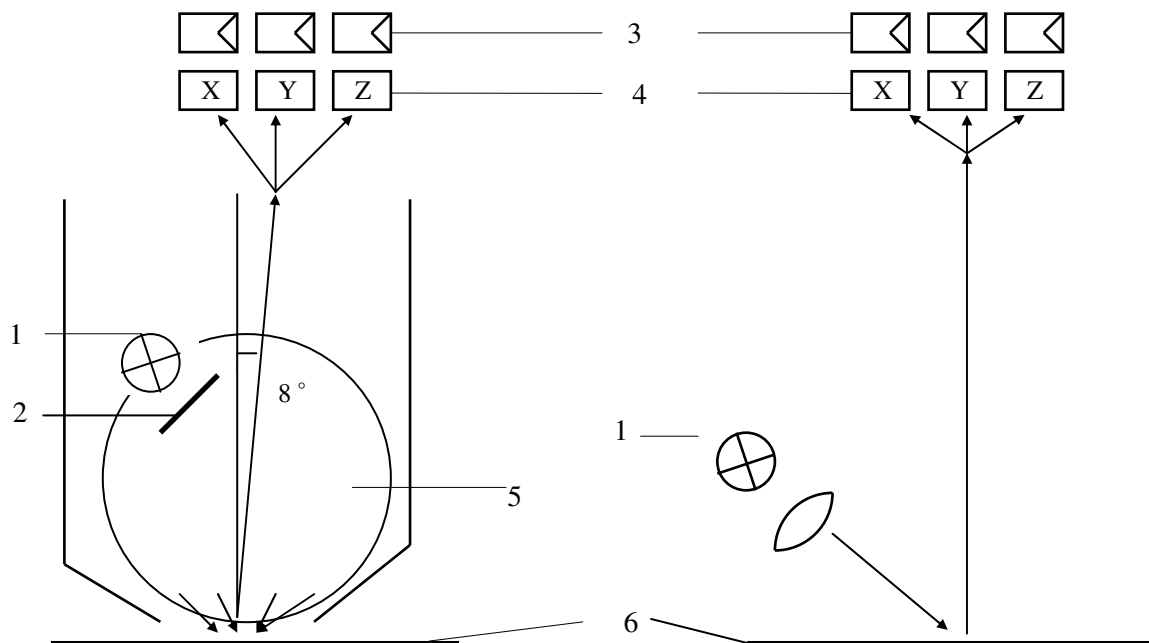
Weitere Messverfahren zur Ermittlung der drei Farbkennzahlen einer Farbvalenz sind das Spektralverfahren und das Gleichheitsverfahren. Das Spektralverfahren beruht auf der Bestimmung der Farbreizfunktion mit den üblichen spektralfotometrischen Geräten. Anschließend werden die Normfarbwerte entsprechend dem Normvalenzsystem errechnet, wie in Kapitel 1.1.2 erläutert. Zur Farbmessung nach dem Gleichheitsverfahren dient ein visuelles Fotometer. Drei Farbreize werden in ihrer Intensität so lange verändert, bis die entstehende Mischfarbe der zu messenden Farbe gleicht. Die Farbmaßzahlen der Vergleichsfarbe können in einfacher Weise aus den Einstellungen des Messgerätes berechnet werden. Desweiteren liegt eine Farbbestimmung nach dem Gleichheitsverfahren vor, wenn Farben durch Vergleich mit Farbkarten oder Atlanten bestimmt werden.

Die Dreibereichsgeräte dienen der Ermittlung von Farbvalenzen, mit Spektralphotometern ermittelt man das Spektrum von Farbreizen und daraus die Farbvalenzen.

Im Dreibereichsgerät wird eine definierte Beleuchtung unter Verwendung von drei definierten Filtern zur Ermittlung der Farbvalenz genutzt. In der DIN 5033 [18] sind mögliche technische Varianten von Dreibereichsgeräten vorgegeben.

Die DIN 5033 zur Farbmessung lässt zwei verschiedene Geometrien zu, $0^\circ/45^\circ$ (Lichteinfall unter 0° , Lichtempfang unter 45°) und $45^\circ/0^\circ$ bei gerichteter und $d/8^\circ$ und $8^\circ/d$ bei diffuser Beleuchtung (Abb. 1.1.13).

Das Zulassen von zwei prinzipiell verschiedenen Geometrien, $0^\circ/45^\circ$ und $45^\circ/0^\circ$ bei gerichteter und $d/8^\circ$ und $8^\circ/d$ bei diffuser Beleuchtung, führt dazu, dass die Messergebnisse von Geräten mit unterschiedlicher Geometrie prinzipiell nicht vergleichbar sind. Aber auch bei Geräten unterschiedlicher Hersteller mit gleicher Geometrie kommt es zu beträchtlichen Abweichungen.



- | | |
|------------------|----------------------|
| 1 Lichtquelle | 4 Filter |
| 2 Shutter | 5 Ulbrichtsche Kugel |
| 3 Photoempfänger | 6 Messprobe |

Abb. 1.1.13 Beispiele für von der Norm zugelassene Messgeometrien

Im Spektralphotometer wird das Spektrum eines Farbreizes gemessen, das meist mit Hilfe eines Prismas erzeugt wird (Abb. 1.1.14).

Die Auflösung der einzelnen Spektralphotometer liegt im Allgemeinen zwischen 10 und 20 nm. Es ist eine Beleuchtung eingebaut, weitere standardisierte Beleuchtungen können rechnerisch simuliert werden. Damit ist es möglich, die Remissionskurven, die sich bei verschiedenen Beleuchtungen ergeben, zu vergleichen.

Die Spektralphotometer haben damit gegenüber dem menschlichen Auge einen wesentlichen Vorteil: Metamere Farben, d.h. Farben, die der Mensch unter bestimmten Beleuchtungsbedingungen als gleich wahrnimmt, können unterschieden werden.

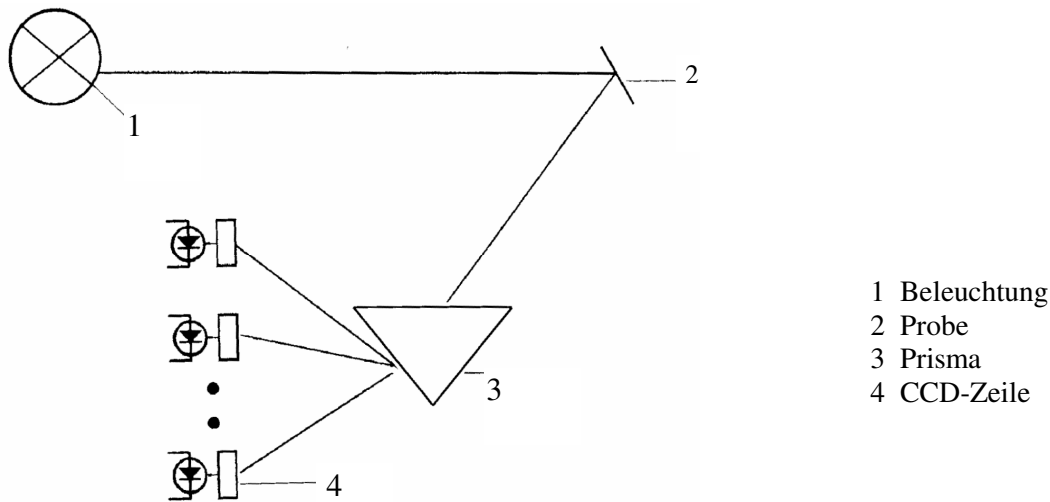


Abb. 1.1.14 Prinzip eines Spektralphotometers

Die Existenz von mehr als drei Primärvalenzen, z. B. von fünf, die bei manchen Menschen von Walraven [83] festgestellt wurde, deutet auf eine Weiterentwicklung des menschlichen Auges zur besseren Farbumterscheidung bei Metamerie hin.

Allen Spektralphotometern liegen die Kurven des Normalbeobachters zugrunde. Die drei Farbsignale werden unter Nutzung dieser Kurven entsprechend dem gewählten Farbraum und der gewählten Beleuchtung errechnet.

Bei der Farbmessung erheben wir den Anspruch, eine Empfindung zu messen. Das Farbsehen ist ein sehr komplexer Vorgang. Ein Farbmessgerät kann das menschliche Sehen nicht in vollem Umfang nachbilden. Das menschliche Auge arbeitet z. B. mit Kontrastverstärkung (Simultankontrast und Helligkeitskontrast) des Infeldes in Bezug auf das Umfeld. Der Einfluss der Helligkeit des Umfeldes auf die Helligkeit des Infeldes kann inzwischen mathematisch in die Farbmessung einbezogen werden [63].

Bei der Arbeit mit unterschiedlichen Geräten ist zunächst die Wahl folgender Messbedingungen zu beachten:

- Lichtart
- Normalbeobachter (2° oder 10°)
- Messgeometrie
- Verwendetes System von Farbkoordinaten

Man kann zusammenfassend feststellen, dass die Absolutwerte, die mit verschiedenen Geräten gemessen wurden, im Allgemeinen nicht vergleichbar sind und die Farbabstandswerte unterschiedlicher Gerätetypen mit gleicher Geometrie nur bedingt vergleichbar sind. Eine Angabe des verwendeten Gerätetyps ist sinnvoll.

Probleme bei der Messung von Farben mit Messgeräten ergeben sich nicht nur aus den unterschiedlichen Geometrien der Messgeräte sondern auch dadurch, dass versucht wird, die gemessenen Werte in Größen umzurechnen, die der menschlichen Empfindung entsprechen. So ist der Farbabstand eine physikalisch messbare Größe, die durch geeignete Umrechnung an die menschliche Empfindung angepasst wird. Seit 1976 der Farbabstand im CIELAB-Farbraum definiert wurde, werden ständig Versuche unternommen, die Farbabstandsformeln zu verbessern.

1.1.4 Ermittlung von Empfindungsgrößen allgemein und von visuellen Größen

Bei der Bestimmung von Empfindungsgrößen unterscheidet man indirekte und direkte Skalierungsmethoden. Bei den indirekten Skalierungsmethoden urteilt die Versuchsperson, ob zwei Reize identisch oder unterscheidbar sind. Die Versuchsperson gibt dazu nur „Ja/Nein“-Urteile ab.

Bei den direkten Skalierungsmethoden vergleicht die Versuchsperson die Unterschiede von Empfindungsqualitäten direkt miteinander. Sie ordnen den Reizintensitäten Zahlen zu.

Dies ist bei den indirekten Methoden nicht so einfach möglich. Durch Zuordnungen der Differenzen der Empfindungsgrößen zu den entsprechenden Reizen, kann der Zusammenhang zwischen Reizintensitäten I und Empfindungsgrößen E direkt bestimmt werden. Durch indirekte Methoden kann nur die Weber-Konstante c und damit das Produkt aus c' und ΔE gemessen werden, nicht direkt ΔE .

Weber-Gesetz:

$$\frac{\Delta I}{I} = c = c' \Delta E \quad (1.4)$$

I Intensität des Reizes

ΔI Reizunterschied

ΔE Unterschied in der Empfindungsgröße E

c Weber-Konstante

Fechner-Gesetz:

$$E = \frac{1}{c} \ln \left(\frac{I}{I_s} \right) = k \cdot \log \left(\frac{I}{I_s} \right) \quad (1.5)$$

I_s Schwellintensität:

Das Fechner-Gesetz wurde 1957 durch die Arbeiten von Stevens abgelöst. Für unterschiedliche Sinne gilt eine Potenzfunktion mit unterschiedlichen Exponenten n gemäß der folgenden Gleichung (1.6):

$$E = k_1 \left(I / I_0 \right)^n - k_2 \quad (1.6)$$

Bei der visuellen Beurteilung von Farben muss noch die DIN 5033 zur Farbmessung berücksichtigt werden. Das heißt, visuelle Abmusterungen müssen vor grauem Hintergrund, bei Tageslicht und von normalsichtigen Personen durchgeführt werden. Das Tageslicht kann in einer Abmusterungskabine erzeugt werden. (D50 oder D65) oder man verwendet Tageslicht bei bedecktem Himmel.

Bei den weiter unten beschriebenen visuellen Abmusterungen wurden die Urteile zunächst von der Autorin gefällt, im Weiteren wurden jeweils zwei normalsichtige Männer hinzugezogen. Diese relativ geringe Zahl ist durchaus ausreichend, wie von Schuler und Mitarbeitern in [92] erwähnt wird. Dort wird u. a. beschrieben, dass Ostwald allein mit seinen Augen zu sinnvollen Urteilen kam:

“Offenbar stellt Ostwalds Vorgehen, die Anordnung der Farbtöne gemäß seinen eigenen Empfindungen vorzunehmen, eine sehr genaue Annäherung an die allgemeinen physiologischen Voraussetzungen dar. Dies konnte durch das auf Empirik basierende DIN-System nicht wesentlich optimiert werden.“

Bei der Untersuchung im Abschnitt 3.5, wo es um sehr feine Unterschiede geht, wurden 10 Versuchspersonen befragt.

Für die Kontrolle der Formel mit dem auf die Buntheit abgestimmten System PCCS (Abschnitt 3.4) wurden die visuellen Urteile von 14 Personen ermittelt. Eine solche umfassende Untersuchung erschien zusätzlich angebracht, um den Begriff der Sättigung, wie ihn die Autorin redefiniert hat, und die Formel zu testen.

1.2 Überblick über Farbsysteme

1.2.1 Allgemeines

Mit Farbsystem werden im Allgemeinen systematische Anordnungen von Farben gemeint. Seit der Antike hat der Mensch begonnen, solche Farbordnungssysteme aufzustellen und es sind ca. 200 solcher Systeme bekannt. Angefangen von linearen Anordnungen von Aristoteles über flächenhafte Darstellungen, wobei der Kreis die häufigste flächenhafte Ordnung ist, bis zu räumlichen Gebilden, bei denen z. B. Doppelkegel auffallen. Insbesondere haben sich viele Maler und Physiker mit der Darstellung der Farbordnungssysteme beschäftigt und es gibt auch zahlreiche Bücher, die einen Überblick über die Farbordnungssysteme geben (z. B. von Schwarz [93] und Silvestrini [94]).

Die Übersicht in Abb. 1.1.15 gibt einen Überblick über die Ordnungsprinzipien von Farbsystemen im engeren, hier benötigten, Sinne.

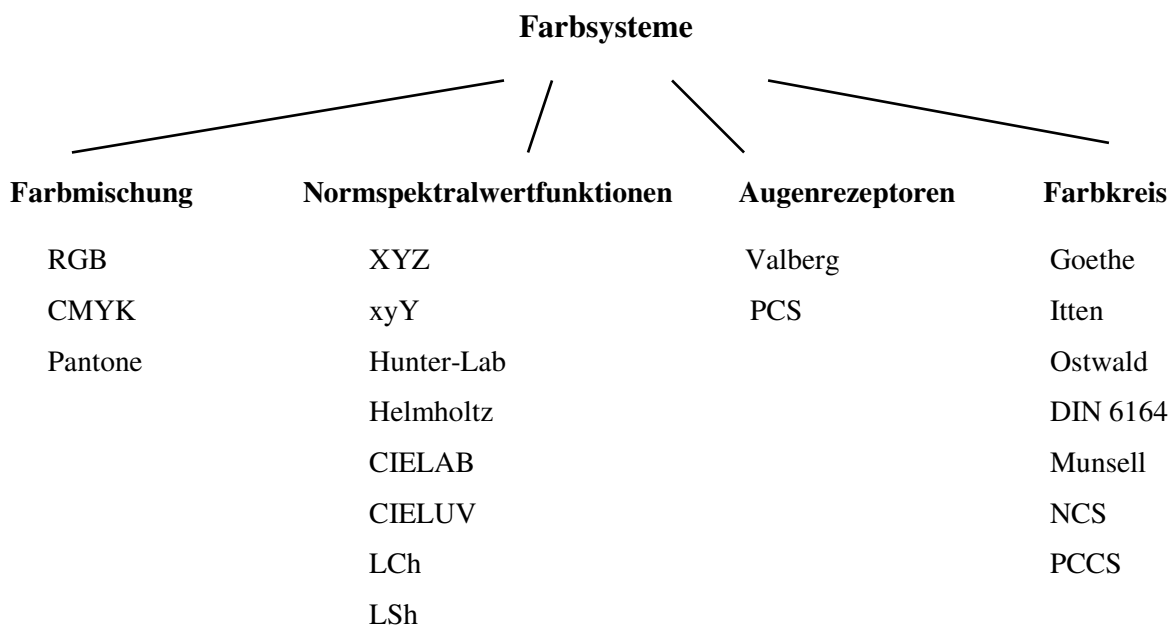


Abb. 1.1.15 Ordnungsprinzipien von Farbsystemen

Farbsysteme können auf dem Farbkreis, auf der Farbmischung von Bildschirmfarben (Rot R, Grün G, Blau B) oder Druckfarben (Cyan C, Magenta M, Yellow Y (Gelb) und Key K (Schwarz)) oder auf den Normspektralwertfunktionen bzw. den Rezeptoren des Menschen für langwellige, mittelwellige und kurzwellige Strahlung beruhen. Sie haben dabei unterschiedliche Zwecke. So kann die Absicht der Darstellung sein, z. B. unterschiedliche Größen der Farbräume von Drucker, Bildschirm und Scanner miteinander zu vergleichen, bzw. diese verschiedenen Farbräume ineinander umzurechnen. Die auf Farbkreis oder Farbmischung basierenden Systeme sollen Maler und Designer bei der Farbauswahl oder der Farbmischung unterstützen. Auch in der industriellen Farbgebung und im Druck wird mit Farbmischsystemen gearbeitet, z. B. um Rezeptierungen zu berechnen.

1.2.2 Aufbau und Eigenschaften von Farbkreisen

Farben lassen sich von der Empfindung her in einem Kreis anordnen. Das ist nicht selbstverständlich, hat doch blaues Licht Wellenlängen mit einem Maximum bei ca. 450 nm, während Licht, das rot erscheint, eine Wellenlänge von ca. 650 nm hat. Purpur kommt in der Natur (im Regenbogen) nicht vor. Es existiert nur als Mischung bzw. als Körperfarbe, schließt aber dennoch den Empfindungskreis.

Sehr viele Farbsysteme basieren auf diesem Farbkreis, wobei es unterschiedliche Ansichten darüber gibt, wie viele Farben der Kreis beinhalten sollte und welche Farbe oben stehen sollte.

Oft erfolgt die Anordnung so, dass sich Kompensativfarben im Farbkreis gegenüber liegen oder man stellt Urfarben einander gegenüber oder man versucht den Kreis möglichst empfindungsgemäß gleichabständig zu gestalten.

Dabei versteht man unter dem Begriff „Kompensativfarben“, Farben, die sich bei der additiven Mischung kompensieren und Grau ergeben. Unter Urfarben versteht man Rot, Grün, Blau und Gelb, und zwar jeweils die „reine“ Farbe, d. h. das Rot darf weder bläulich noch gelblich wirken.

Der Farbkreis kann auch eine Kombination aus diesen Möglichkeiten sein, wie es beim Farbkreis von Manfred Adam in Abb. 1.2.1 der Fall ist.

In Abb. 1.2.1 links sehen wir seinen Farbkreis und rechts die von ihm verwendeten dominanten bzw. kompensativen Wellenlängen.

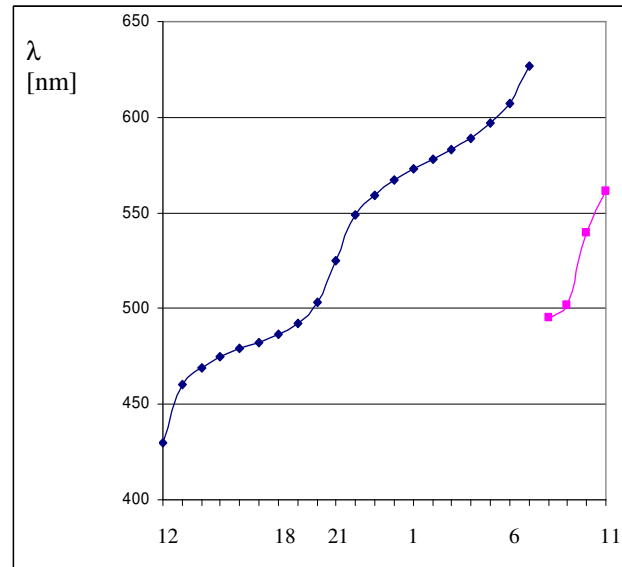
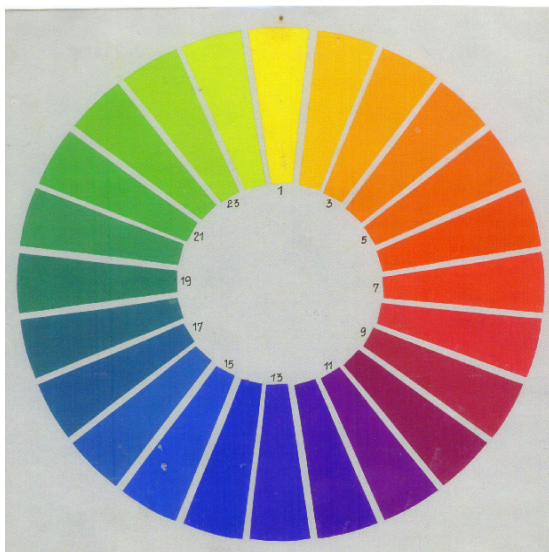


Abb. 1.2.1 Farben lassen sich der Empfindung nach zu einem Kreis anordnen. Links: Farbkreis von Manfred Adam. Rechts: Dominante (schwarz dargestellt) bzw. kompensative (magenta dargestellt) Wellenlänge im Farbkreis. Buntton T13 (Violettblau) und T1 (Zitronengelb) sowie T9 (Purpurrot) und T20 (Smaragdgrün) sind etwa komplementär, aber nicht T7 (Mittelrot) und T 21,5 (Urgrün). Dem Cyanblau der Drucker entspricht T17.

Untersucht man subjektiv gleichabständige 24-teilige Farbkreise, wie den in Abbildung 1.2.1. oder auch den 24-teiligen Kreis des japanischen Systems PCCS, so stellt man fest, dass dort, wo die Wellenlängenunterscheidbarkeit hoch ist, bei 440 nm, bei 525 nm und bei 615 nm die dominanten Wellenlängen, die man den Farbcharts zuordnen kann, weit auseinander liegen, d. h. einen Abstand von mehr als 15 nm haben, während in den anderen Bereichen kleinere Abstände der dominanten Wellenlängen zu finden sind (Abb.1.2.1 rechts).

Richter hat in [82] einen ganz ähnlichen wellenförmigen Verlauf im gleichabständigen Farbtonkreis ermittelt.

Bei Betrachtungen von Farbkreisen muss beachtet werden, dass in allen Farbkreisen Gelb neben einem dunkleren Blau verwendet wird. Manfred Adam hat die Helligkeit im Farbkreis systematisch untersucht und anschließend in seinem Farbkreis völlig symmetrisch verwendet (siehe Abb. 1.2.2). Der Farbkreis in Abb.1.2.1 hat als hellsten Buntton T1 Zitronengelb.

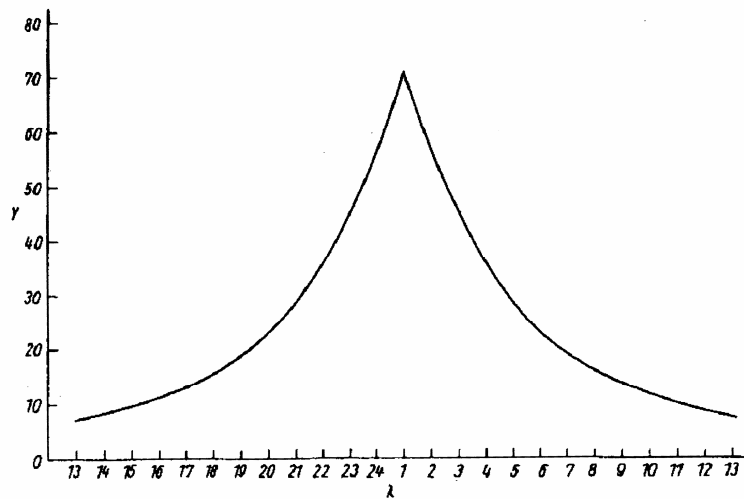


Abb. 1.2.2 Helligkeit im Farbtonkreis in Abhängigkeit von der Zahl des Bunttones nach M. Adam [2].

1.2.3 Farbsysteme, die den Doppelkegel verwenden

Die Abb. 1.2.3 zeigt den Ostwaldschen Doppelkegel.



Abb. 1.2.3 Ostwaldscher Farbraum (Modell der Sammlung Farbenlehre in Dresden)

Der Farbraum von Wilhelm Ostwald (Doppelkegel), der auch heute noch eine große Bedeutung für die Gestalter hat, besitzt ein gleichseitiges Dreieck als Grundlage. Dieses Dreieck wird auch heute noch im Schwedischen NCS-System verwendet. Manfred Adam berücksichtigte die Helligkeit und entwickelte damit den Ostwaldschen Doppelkegel zum schiefen Doppelkegel weiter (siehe Abb. 1.2.4).

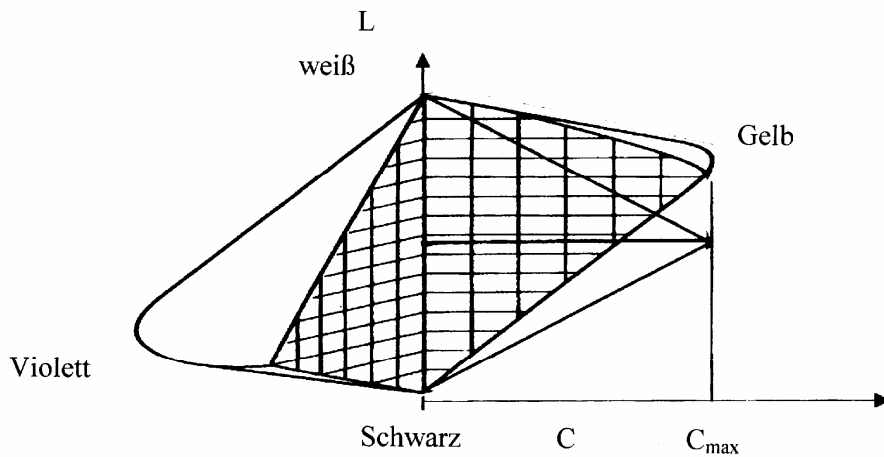


Abb. 1.2.4 Schiefer Doppelkegel, nach Adam mit dem gleichseitigen Dreieck von Ostwald

Da Adam und Ostwald von einem gleichseitigen Dreieck mit Seitenlänge 100 ausgehen, ergibt sich ein C_{\max} von 87:

$$C_{\max} = \sqrt{100^2 - 50^2} = 87 \quad (1.7)$$

Pope (1880-1974) schlägt etwas Ähnliches vor, nur ist der Raum wesentlich gestreckter (Abb. 1.2.5).

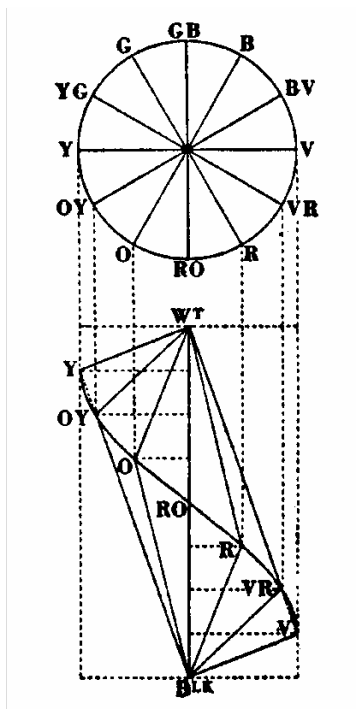


Abb. 1.2.5 Farbraum von Pope aus Schwarz [93]

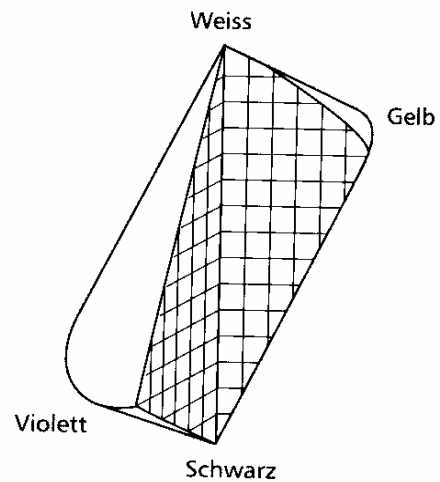


Abb. 1.2.6 Schiefer Doppelkegel nach A. Schwarz [93]

Einen weiteren Doppelkegel stellt Andreas Schwarz in [93] vor (Abb. 1.2.6). Die Doppelkegel von Pope und Schwarz sind deutlich schlanker als der von Ostwald, d. h. für ihn ist die Helligkeitsachse viel länger als die Buntheitsachse.

1.2.4 Der physiologische Farbraum PCS

Von Campenhausen [11] wurde der Farbraum PCS entwickelt, der nicht auf ästhetischen Farburteilen basiert, sondern auf physikalischen und physiologischen Messgrößen. Die Zapfenerregungen E_S , E_M und E_L werden über die Naka-Rushton-Beziehung berechnet:

$$E_s = \frac{I \cdot A_s}{I \cdot A_s + \sigma}, \quad (1.8)$$

wobei

E_S, E_M, E_L Erregung des jeweiligen Photorezeptors

I Intensität des eingestrahnten Lichts

σ Faktor der selektiven chromatischen Adaption

In der Abb. 1.2.7 sind die Ostwaldschen Farbcharts dargestellt, die gemessen und in das PCS übertragen wurden. Das Ostwaldsche System ist im psychologischen Farbraum von spindelförmiger Gestalt.

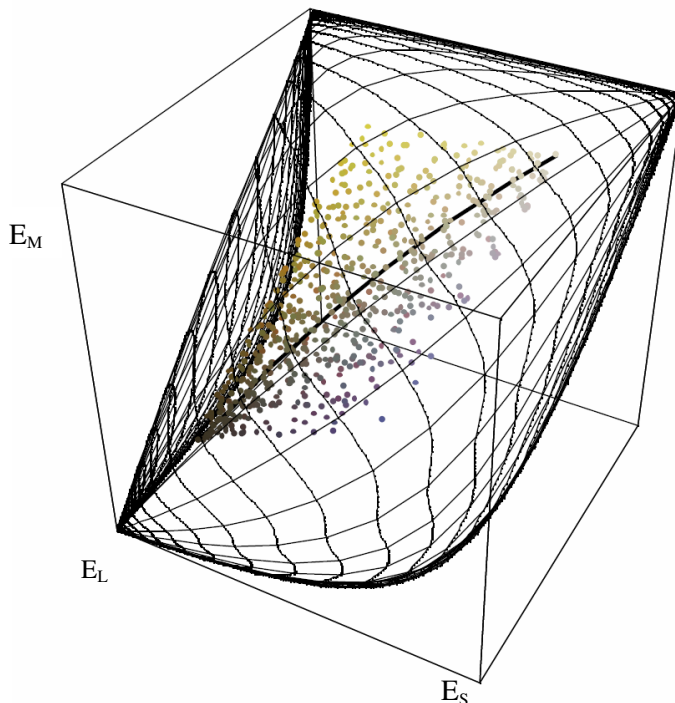


Abb. 1.2.7 Physiologischer Farbraum mit den Zapfenerregungen E_S , E_M und E_L . Die Achse E_L ist in die Tiefe des dargestellten Körpers gerichtet.

1.2.5 Die CIE-Farbräume

Die CIELAB-Farbräume basieren auf den Normalspektralwertfunktionen.

Abb. 1.2.8 und Abb. 1.3.3 zeigen die x-y-Ebene des CIE-Farbraumes. Außen auf dem Spektralfarbenzug befinden sich die Spektralfarben von monochromatischem Licht. In Abbildung 1.2.8 sind die Linien gleichen Bunttons eingetragen. Die Körperfarben nehmen nur einen kleinen Teil der Fläche ein. Als Beispiel für Körperfarben sind in Abb. 1.3.3 die Druckfarben Cyan C, Magenta M und Gelb G für drei verschiedene Druckfarbensorten eingezeichnet.

Der xyY-Farbraum lässt sich mit Hilfe der folgenden Gleichungen in den anschaulicheren $L^*a^*b^*$ -Farbraum umrechnen:

$$\text{Für } X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n > (24/116)^3$$

sind folgende Gleichungen definiert:

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 \quad (1.9)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n} \right] \quad (1.10)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n} \right] \quad (1.11)$$

L^* entspricht der Helligkeit, a^* bezeichnet man als Rot-Grün-Buntheit und b^* als Gelb-Blau-Buntheit.

Für $X/X_n \leq (24/116)^3$ wird

$$\sqrt[3]{X/X_n} \text{ in (1.10) ersetzt durch } (841/108) \cdot (X/X_n) + 16/116 \text{ (Analog für } Y/Y_n \text{ und } Z/Z_n)$$

L^* entspricht der Helligkeit, a^* bezeichnet man als Rot-Grün-Buntheit und b^* als Gelb-Blau-Buntheit.

Für $X/X_n \leq (24/116)^3$ wird

$$\sqrt[3]{X/X_n} \text{ in (1.10) ersetzt durch } (841/108) \cdot (X/X_n) + 16/116 . \quad (\text{Analog für } Y/Y_n \text{ und } Z/Z_n)$$

a^* und b^* lassen sich in die Buntheit C^* und den Bunttonwinkel h^*_{ab} umrechnen:

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (1.12)$$

$$h^*_{ab} = \arctan(b^*/a^*) \quad (1.13)$$

Mit dieser Definition ergibt sich für Gelb eine wesentlich größere Buntheit als für alle anderen Farben. Für die subjektive Wahrnehmung kann Rot, Blau und Grün genauso bunt vorkommen wie Gelb. Das zeigt sich darin, dass fast alle bekannten Farbsysteme symmetrisch sind.

Das heißt, der Buntheitsbegriff nach CIELAB ist nicht identisch mit dem Begriff der Anwender.

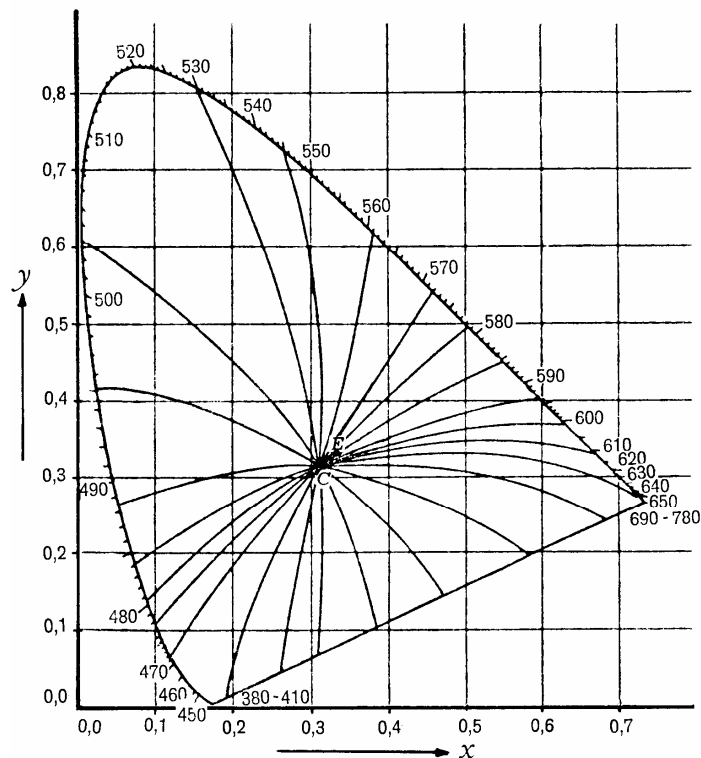


Abb. 1.2.8 CIE-Farbraum (xyY -Farbraum) mit Linien gleichen Bunttons

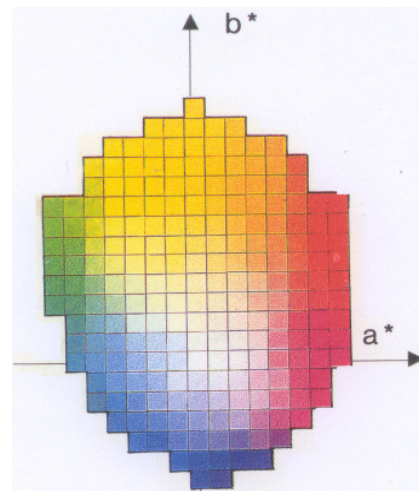


Abb. 1.2.9 CIELAB-Farbraum nach der Darstellung eines Messgeräteherstellers.

Der CIELAB-Farbraum wurde in Zusammenhang mit der Farbabstandsbewertung geschaffen. Wegen seiner Anschaulichkeit hat er in den letzten Jahren Eingang in andere Anwendungsbereiche gefunden. Den Anwendern fällt dabei sehr deutlich die Unsymmetrie des Farbraumes auf. In Abb. 1.2.9 ist ein vereinfachter Schnitt durch den Raum in ähnlicher Weise dargestellt, wie er von einem Messgerätehersteller vermittelt wird.

Teilweise erkennt man Bemühungen zur Korrektur der Unsymmetrie. R. Kuehni zeigt in [53] die Änderung der Berechnung der Rot-Grünbuntheit a und der Blau-Gelbbuntheit b .

Der LCh-Farbraum ist eine Darstellung des Lab-Farbraumes in Zylinderkoordinaten (Abb. 1.2.10).

Er hat gegenüber den anderen im Farbmessgerät zur Verfügung stehenden Farbräumen den Vorteil, dass er menschlichen Empfindungsgrößen angepasst ist, indem er die Größen Buntheit h_{ab} , Helligkeit L^* und Buntheit (Chroma C^*_{ab}) verwendet.

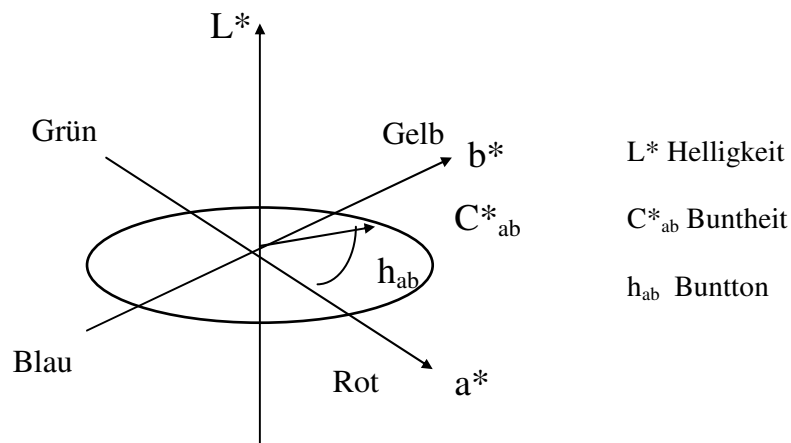


Abb. 1.2.10 LCh-Farbraum

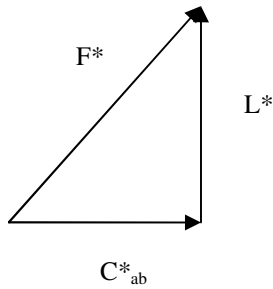


Abb. 1.2.11 Farbe F^* bestehend aus Helligkeits- und Buntheitskomponente in einer Farbton-Ebene des LCh-Farbraumes

In einer Bunnton-Ebene (Ebene konstanten Buntones h_{ab}) des LCh-Farbraumes kann eine Farbe F^* vektoriell zusammengesetzt werden aus Buntheitsvektor C^*_{ab} und Helligkeitsvektor L^* .

Realtiver CIELAB Farbraum, Natural Color Connection Space (NCCS)

Seit wenigen Jahren gibt es noch den neuen Farbraum der CIE, den NCCS. Er verwendet relative Koordinaten, die relative Buntheit c^* und die Helligkeit t^* (triangle lightness), die aus einem gleichseitigen Dreieck abgeleitet werden. Wir sind damit dem Ostwaldschen Farbraum und dem NCS sehr nahe. In diesem neuen Farbraum gilt die Ostwaldgleichung, nach der die Summe aus Farb-, Schwarz- und Weißanteil einer Farbe 1 ergibt.

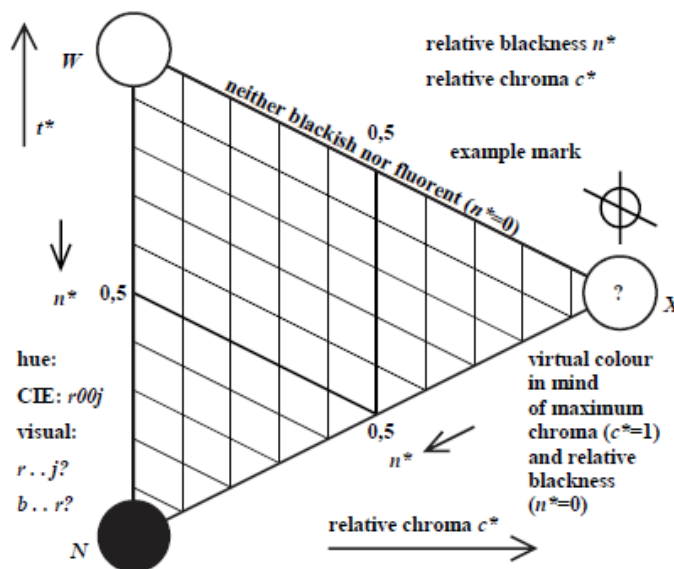


Abb. 1.2.12 Relativer CIELAB Farbraum, Natural Color Connection Space (NCCS)(<http://www.bam.de>)

1.3 Die Sättigung der Farbe

1.3.1 Definitionen des Begriffs Sättigung

Sättigung ist das Merkmal einer Gesichtsempfindung, aufgrund dessen eine Fläche mehr oder weniger bunt erscheint, beurteilt proportional zu ihrer Helligkeit.

Die DIN 5033 Teil 1 erklärt, „Die Sättigung beschreibt das Verhältnis der Buntheit zur Helligkeit.“ Diese Definition soll im folgende als „neue“ bezeichnet werden. Dieser Definition steht die folgende alte gegenüber:

Unter Sättigung versteht man nach M. Richter den „Buntanteil an der gesamten Farbempfindung“. Durch Zumischen von Weiß oder Grau wird die Farbe entsättigt und heller. Das Zumischen von idealem Schwarz sollte nach M. Richter die Sättigung nicht verändern, sondern nur die Helligkeit verringern.

Betrachtet man Farbmuster, so hat man den Eindruck, dass sich beim Zumischen von kleinen Mengen Schwarz die Sättigung nicht gemäß Richter [79] konstant bleibt, sondern man sogar eine geringe Vergrößerung des Sättigungseindrucks wahrnehmen kann.

Bei großem Schwarzanteil empfindet man ein getöntes Schwarz, das man nicht mehr als gesättigte bunte Farbe bezeichnen würde.

Unbunte Farben wie Weiß, Schwarz oder Grau haben die Farbsättigung Null.

Man kann den Begriff der Sättigung auch mit Farbfolien erklären:

Legt man z. B. rote Farbfolien übereinander, so erreicht man bei einer bestimmten Anzahl einen Eindruck von maximaler Sättigung. Er wird mit weiter zunehmender Folienanzahl nicht mehr roter. Während sich die absorbierte Lichtmenge noch ändert, erreicht die Empfindung einen Grenzwert.

An dieser Stelle erscheint es sinnvoll, den Begriff der Optimalfarben einzuführen. Unter Optimalfarben versteht man theoretische Körperfarben, deren Remissionsfunktion zwei Sprungstellen besitzen, d.h. bei bestimmten Wellenlängen findet ein sprunghafter Übergang von 0,0 auf 1,0 oder umgekehrt statt. Optimalfarben sind bei gegebener Farbart die hellsten und bei gegebenen Buntton und gegebener Helligkeit die am stärksten gesättigten Farben. Durch Pigmente können sie nicht realisiert werden.

Das Fechner-Gesetz (2. psychophysisches Gesetz) besagt, dass die Wahrnehmung nicht linear mit dem Reiz wächst, sondern mit dem Logarithmus des Reizes (siehe Kap. 1.1.4).

Das Fechner-Gesetz ist physiologisch auf die nichtlineare Arbeitsweise der Rezeptoren zurückzuführen. Es gilt näherungsweise bei mittleren Reizintensitäten. Größere Abweichungen werden bei niedrigen und hohen Reizintensitäten festgestellt. Das dritte psychophysisches Gesetz (Thurstone-Gesetz) beschreibt die subjektiven Wahrnehmungsschwellen ausschließlich durch Reizintensitäten an der Schwelle.

Der Begriff „Buntheit“ ist relativ neu und hat sich noch nicht voll durchgesetzt. Er ist nicht einmal im 15 bändigen Brockhaus zu finden. Viele Anwender verwenden den Begriff Sättigung anstatt des Begriffes Buntheit. Man erkennt das auch daran, dass viele Darstellungen des Ostwaldschen Farbraumes (Abb. 1.3.1) an der x-Achse fälschlicherweise die Bezeichnung Sättigung verwenden.

Der Unterschied zwischen Buntheit und Sättigung wird an den Farben Braun und Oliv besonders deutlich. Braun und Oliv können gesättigt sein, aber sie werden nicht als sehr bunt empfunden.

Richter fasst in [80] die historischen Sättigungsdefinitionen zusammen: „Stellt man sich eine gesättigte Körperfarbe vor, so kann man einerseits von ihr verlangen, dass sie ihren farbigen Charakter recht ausgeprägt zeigt, wenn man sie als „gesättigt“ ansprechen will [Hering]. Offenbar ist das dann der Fall, wenn sie bei möglichst geringer Weißbeimischung die höchsterreichbare Leuchtdichte (die geringstmögliche Schwarzbeimischung) aufweist. Luther hat nachgewiesen, daß diese Eigenschaft den Ostwaldschen Vollfarben zukommt... Dieser Heringschen Sättigungsdefinition steht die Graßmann-Helmholtzsche gegenüber, die nur die Weißbeimischung einer Farbe in Rechnung zieht und die Leuchtdichte unbeachtet lässt. Im Sinne dieser Definition sind die spektralen Farbreize die gesättigtsten, die normalerweise erzeugbar sind. Da diese Definition nicht nur auf Körperfarben, sondern auch auf farbige Lichter anwendbar ist, hat man ihr in der Literatur vor der erstgenannten im allgemeinen den Vorzug gegeben und versteht unter S ä t t i g u n g den Grad der Weißbeimischung zu einer gewissen Farbe.“

Die folgende Abbildung soll den „alten“ Sättigungsbegriff verdeutlichen:

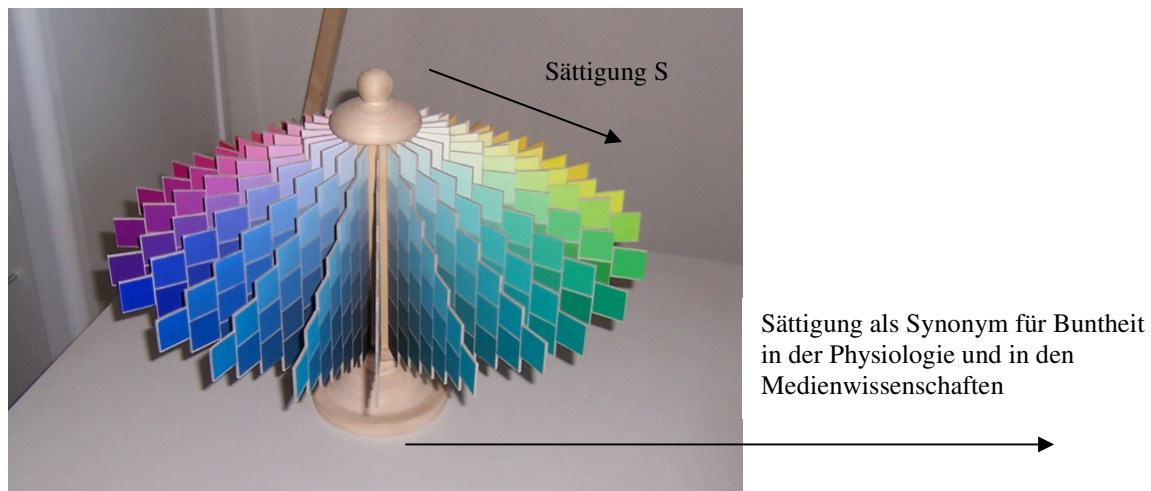


Abb. 1.3.1 Darstellung der Sättigung S nach Hering im Ostwaldschen Farbraum

Die gesättigtsten Farben befinden sich außen an der unteren Begrenzung des Doppelkegels. Auf dieser Begrenzung befinden sich die Farben, denen Schwarz zugemischt ist. Die obere Begrenzung enthält im Gegensatz dazu die mit reinem Weiß aufgehellten Farben.

Interessant sind die Versuche von Juan zum neuen Sättigungsbegriff. Er führte Experimente zur Sättigung mit Farbwürfeln durch. Die Versuche und Empfindungen seiner Versuchspersonen beschreibt er folgendermaßen:

“In the training session, observers were instructed that the colour appearance in each side of cube has the same saturation, but different lightness and colourfulness. The concept of colourfulness divided by lightness was then introduced to explain this phenomenon. An interesting point is that most observers described a colourful sample as high saturation while a colour close to ‘white’ was judged to have low saturation. They all agreed that saturation is not the same attribute as lightness and colourfulness because a darker colourful sample could be highly saturated. In the case of scaling saturation for neutral colours, half of them thought that black should be the most saturated colour rather than zero due to the definition of the CIE. Therefore they were excluded in the experiment.”

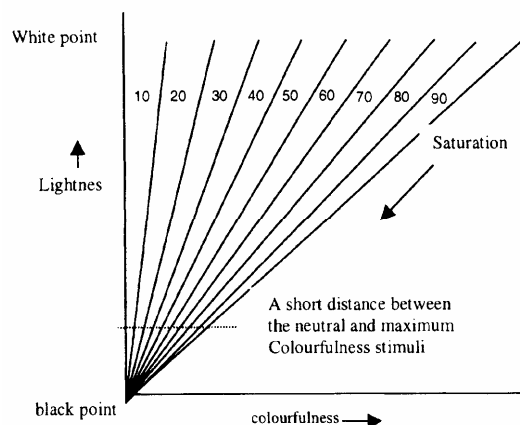


Abb. 1.3.2 Darstellung des neuen Sättigungsbegriffes nach Juan [49]. Der neue Sättigungsbegriff führt zu dem eingetragenen Sprung zwischen maximaler Sättigung und der Sättigung Null am Koordinatenursprung.

Diese Beschreibung der Empfindung und die Abb. 1.3.2 zeigen deutlich die Problematik des neuen Sättigungsbegriffes. Die Versuchspersonen nahmen das Wachsen der Sättigung von innen nach außen wahr und sollten aber das Wachsen in Richtung Koordinatenursprung sehen. Der neue Sättigungsbegriff führt zu dem eingetragenen Sprung zwischen maximaler Sättigung und der Sättigung Null am Koordinatenursprung.

1.3.2 Helmholtzsättigung im xyY-Farbraum

Die Sättigung nach Helmholtz lässt sich mit dem „spektralen Farbanteil“ p_e beschreiben: Durch den Farbort der Farbe F wird eine Linie vom Unbuntpunkt P_u bis zum Spektralfarbenzug gezogen (siehe Abb. 1.3.3).

$$p_e = \frac{x_F - x_U}{x_S - x_U} \quad (1.14)$$

Für das abgebildete Beispiel ergibt sich als Schnittpunkt und damit als dominante Wellenlänge λ_d der Farbe F 510 nm mit der Koordinate x_s . Der spektrale Farbanteil der Farbe F ergibt sich als Streckenverhältnis, wobei x_u die Abszisse des Unbuntpunktes ist.

$$p_e = \frac{x_F - x_U}{x_S - x_U} = \frac{0,15 - 0,33}{0,02 - 0,33} = 0,58 \quad (1.15)$$

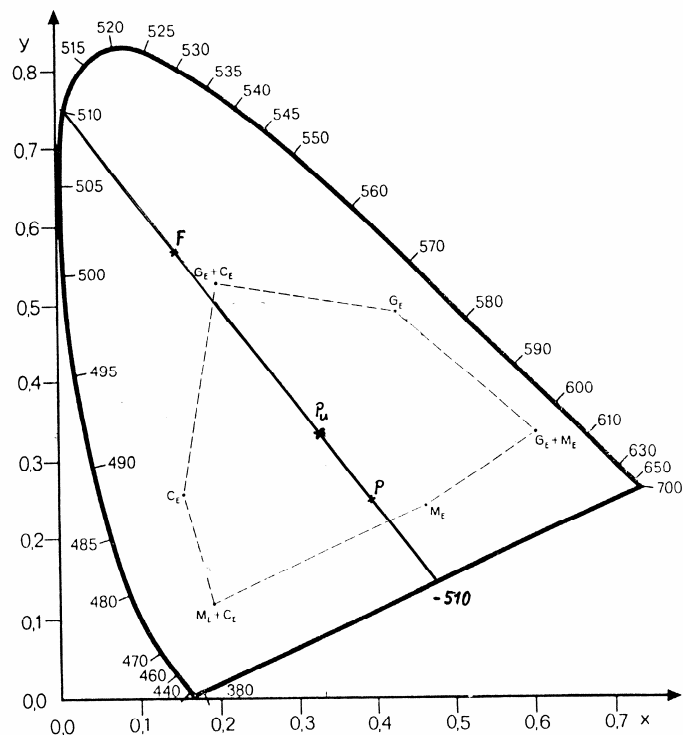


Abb. 1.3.3 CIE-Farbraum mit der Darstellung der Farben mit der dominanten Wellenlänge von 510 nm und der Farben mit der kompensativen Wellenlänge von -510 nm und mit den Druckfarben der Europascalala

Liegt der Farbort der Farbe im Bereich der Purpurfarben P, so wird der Schnittpunkt der Geraden mit der Purpurlinie gebildet und es wird als Wellenlänge die gleiche Wellenlänge gewählt, die sich bei Verlängerung der Geraden über den Unbuntpunkt hinaus mit dem Spektralfarbenzug ergibt, und diese wird mit negativem Vorzeichen versehen. Im abgebildeten Beispiel ergibt sich -510 nm.

In diesem Fall bezeichnet man die Wellenlänge als kompensative Wellenlänge λ_c .

Der spektrale Farbanteil nach Helmholtz beschreibt somit die Sättigung einer Farbe bezogen auf die maximal mögliche Sättigung einer Lichtfarbe. Diese Helmholtz-Maßzahl nützt für die Beschreibung der Sättigung, die die Gestalter meinen, nicht viel und damit wird dieser Begriff von den Gestaltern auch nicht verwendet.

1.3.3 Die Sättigung im CIELUV-Farbraum

Die **CIE-UCS-Farbtabel 1960** mit den Farbwertanteilen u und v ist durch folgende lineare Transformation aus der Normfarbtabel abgeleitet, bzw. aus den Normfarbwerten X , Y und Z errechenbar:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (1.16)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (1.17)$$

Als Hellbezugswert Y wird der Normfarbwert Y beibehalten.

Dieses System diente 1976 nach einer Modifikation als Grundlage für den

L*u*v*-Farbraum CIE 76 (CIELUV).

Die Koordinaten dieses Farbraumes sind:

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{(Y/Y_n)} - 16 \quad (1.18)$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_n) \quad (1.19)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_n) \quad (1.20)$$

mit $v' = 1,5v$ und $u' = u$.

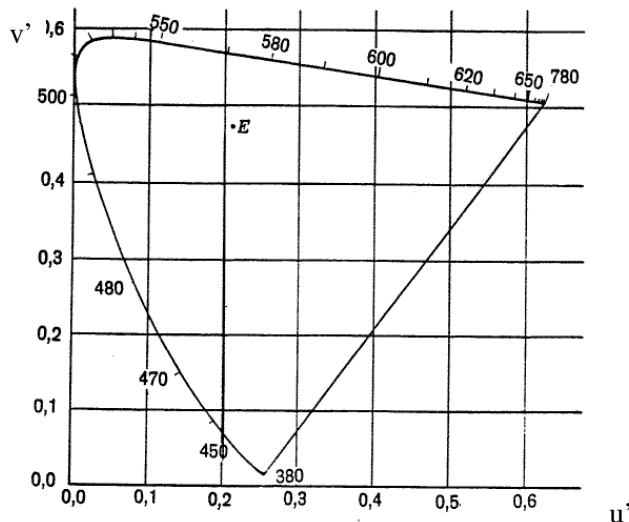


Abb. 1.3.4 $u'v'$ -Farbtabel (CIE 1976)

Da dem $L^*u^*v^*$ -Farbraum eine $u'v'$ -Farbtabel zugeordnet ist (Abb. 1.3.4), die eine projektive Transformation der Normfarbtabel darstellt, bleiben geradlinige Verbindungen bei additiven Farbmischungen in der xy -Farbtabel auch in der $u'v'$ -Farbtabel gerade.

In diesem System ist Buntheit definiert als:

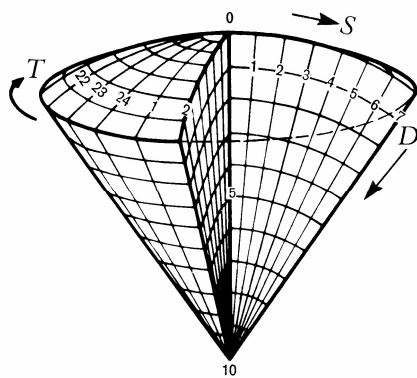
$$C_{uv}^* = \sqrt{(u^{*2} - v^{*2})} \quad (1.21)$$

Und die Sättigung kann daraus berechnet werden:

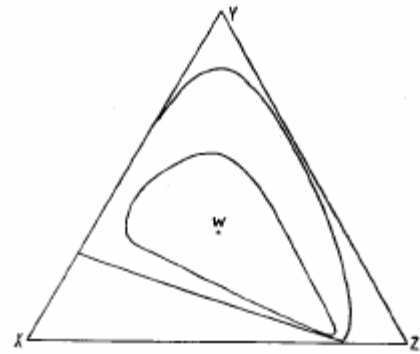
$$S_{uv}^* = \frac{C_{uv}^*}{L^*} \quad (1.22)$$

Dieses System hat auch heute noch Bedeutung und wird u. a. für die Grafische Industrie empfohlen. Allerdings hat es sich gegenüber dem $L^*a^*b^*$ -System nicht durchsetzen können. Überwiegend wird heute das $L^*a^*b^*$ -System genutzt, in dem aber eine Sättigung nicht definiert wurde.

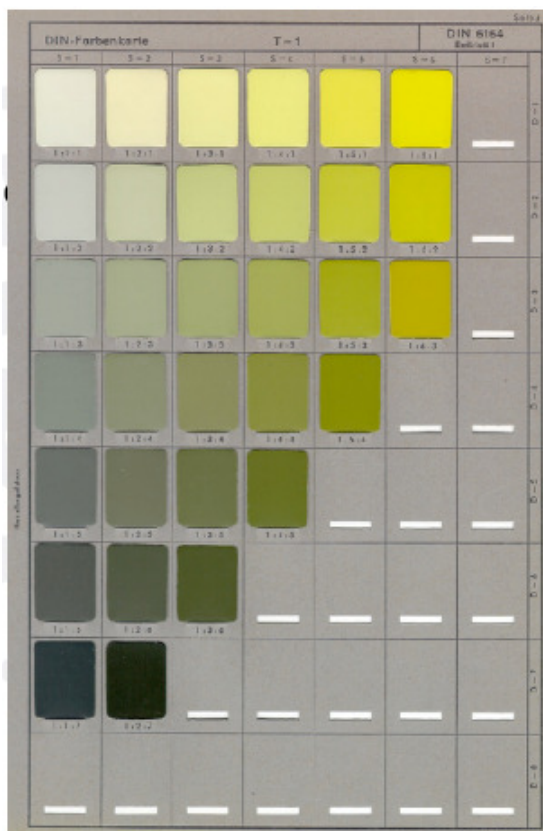
1.3.4 Sättigungsstufen der DIN Farbkarte 6164



a)



b)



c)

Abb. 1.3.5 a) DIN Farbkörper
 b) experimentell bestimmte Linien empfindungsgemäß gleicher Sättigung [81]
 c) eine der Seiten der DIN Farbkarten

Die DIN-Farbkarte 6164 wurde von M. Richter entwickelt und erstmals 1953 veröffentlicht. Ein großer Teil der Auflage wurde mutwillig zugunsten des NCS Systems zerstört. Grundlage der DIN-Farbkarte ist ein relativ gleichabständiger Farbkreis mit 24 Bunttönen. Die Farbe wird mit den drei Größen Buntton T, Sättigungsstufe S und Dunkelstufe D beschrieben. Die Dunkelstufe wird aus der Relativhelligkeit A/A_0 in Bezug auf die zugehörige Optimalfarbe berechnet. Der Buntton ist über den Bunttonwinkel definiert. Die Sättigungsstufen sind gleichabständige Kreislinien, die von der Sättigungsstufe $S = 6$ nach innen ($S = 0$) und nach außen gehen, wobei die Linie $S = 6$ experimentell bestimmt wurde. Die Druckfarbe Gelb hat die Sättigungsstufe $S = 6,47$. Man erkennt in Abb. 1.3.5 a), dass die Sättigungsstufe einem Winkel, gemessen von der Helligkeitsachse aus, entspricht.

1.3.5 Buntheit und Sättigung im CIELAB-Farbraum

Die Berechnung der Buntheit C^*_{ab} im CIELAB-Farbraum erfolgt gemäß Kap. 1.2.5 aus den Normspektralwertfunktionen X, Y, Z als geometrische Addition aus der Rot-Grün-Buntheit a^* und der Blau-Gelb-Buntheit b^* .

Eine Sättigungsgröße hingegen wurde im CIELAB-Farbraum ursprünglich nicht definiert. In den letzten Jahren findet man jedoch die Verwendung der folgenden Formel:

$$S^*_{ab} = C^*_{ab}/L^* \quad (1.23)$$

zur Bestimmung der Sättigung. Es bedeuten:

S^*_{ab} Sättigung im CIELAB-Farbraum

L^* Helligkeit

C^*_{ab} Buntheit

Diese Größe S^*_{ab} hat das Problem, dass für L^* gegen Null, die Sättigung stark anwächst. Außerdem kommen Werte größer als 1 vor, was in Anbetracht des üblichen Sprachgebrauchs des Begriffs der Sättigung, nicht der Fall sein sollte.

1.3.6 Sättigung in Farberscheinungsmodellen

In den letzten Jahren sind mehrere Farberscheinungsmodelle (Colour appearance models) entwickelt worden, um unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen und verschiedene Umfelder bei der Farbbeschreibung zu berücksichtigen:

ATD

LLAB

RLAB

Nayatani

Hunt

CIECAM

Für den Begriff der Sättigung werden folgende Beschreibungen verwendet:

Im **RLAB System** verwendet M. Fairchild [28] folgende Ableitung der Sättigungsformel:

“Saturation is defined as colorfulness relative to the brightness, chroma is defined as colorfulness relative to the brightness of a white and lightness is defined as brightness to the brightness of a white. Therefore saturation can be defined as chroma relative to lightness.”

Er kommt damit zu der Formel:

$$S^R = \frac{C^R}{L^R} \quad (1.24)$$

Dabei sind C^R und L^R wie C^*_{ab} und L^* im CIELAB System definiert. Das R steht für Reproduktion.

Bei dieser Formel besteht wieder das Problem, dass bei sehr dunklen Farben $L^R > C^R$ werden kann und damit ein sehr großer Sättigungswert S^R entsteht.

Hunt arbeitet direkt mit der Formel

$$S = \frac{C}{L} \quad (1.25)$$

Im **CIECAM02 Farberscheinungsmodell**, das ein Nachfolger von CIECAM97 ist, wird für die Beschreibung der Sättigung die Formel

$$S = 100 \sqrt{\frac{M}{Q}} \quad (1.26)$$

verwendet, wobei M eine Größe ist, die ein Korrelat zur Buntheit (Colorfulness) ist und Q ein Korrelat zur Helligkeit (Brightness). Ausführlich wird diese Formel von Moroney und Mitarbeitern in [75] beschrieben.

Für Colorfulness und Brightness gibt es keine exakte Übersetzung ins Deutsche. Im Unterschied zu Chroma und Lightness sind es Größen, die nicht auf das Umfeld bezogen sind. Man könnte Brightness mit absoluter Helligkeit übersetzen.

Im CIECAM Farberscheinungsmodell werden auch Chroma und Helligkeit (Lightness) neu berechnet. Eine Zusammenfassung der Formeln dieses Systems ist im Anhang zu finden.

In [29] findet ein Vergleich einiger Farbmodelle statt und der Autor M. Fairchild ist erstaunt, wie gut das CIELAB Farbmodell abschneidet.

1.3.7. Zusammenfassung der Ergebnisse zu maximaler und minimaler Sättigung

Von den ca. 200 existierenden Farbmodellen sind die meisten symmetrisch aufgebaut. Viele bekannte, die auf Ostwald zurückgehen, haben von ihm den Aufbau als gleichseitiges Dreieck übernommen oder weiterentwickelt. Das trifft auf das schwedische NCS, das japanische PCCS und auch auf das System von Manfred Adam zu.

Ostwald hat seinen Farbkreis so aufgebaut, dass sich kompensative Wellenlängen gegenüber stehen. Das muss man bei Vergleichen mit dem CIELAB System beachten, das mit dem Ziel der Gleichabständigkeit aufgebaut ist. Dadurch können nicht exakt die gleichen Bunttöne verglichen werden.

Betrachtet man die unsymmetrischen Farbmodelle, so fällt auf, dass diese auf verschiedene Weise unsymmetrisch sind (Tabelle 1).

Tabelle 1 Maximale und minimale Buntheit/Sättigung der unsymmetrischen Farbmodelle

	Vergleichsgröße	Maximum	Minimum
CIELAB	Buntheit	Gelb	Blau
Munsell	Munsell-Chroma	1.Rot, 2.Orange	Blau, Grün
Richter/ DIN 6164	Sättigung	Grün	Gelb

Die Tabelle 1 zeigt, dass es offensichtlich keine einheitliche Meinung bezüglich der maximalen und minimalen Buntheit/Sättigung gibt.

Man muss allerdings beachten, welche Größe betrachtet wird. Das CIELAB System basiert auf der Buntheit und so, wie die CIE die Buntheit definiert hat, ist sie von der Helligkeit der Farbe abhängig. Damit ist verständlich, dass Gelb den größten Wert erreicht und das Minimum bei Blau liegt.

M. Richter vergleicht die Sättigung verschiedener Bunttöne indem er Farben gleicher Helligkeit gegenüber stellt, beziehungsweise er versucht, das Problem durch die Verwendung einer Relativhelligkeit zu beseitigen.

In der Tabelle 1 wurde der Begriff Munsell-Chroma verwendet, weil Munsell bei seinen Untersuchungen eher Sättigung als Buntheit meinte [60]. Bei Munsell kommen die höchsten Sättigungsstufen für Rot (18) und Orange (14) vor, Gelb kann 12 erreichen. Beim Blau und Grün gibt es abhängig vom Buntton Unterschiede. Himmelblau kommt bis 6 vor, dagegen Royalblau bis 14. Apfelgrün wird bis Stufe 6 angegeben, dagegen Jade bis 10. Auf Grund dieser Unregelmäßigkeiten wird dieses System teilweise als Baum bezeichnet. Bei der Schaffung eines solchen Systems muss man bedenken, dass man nicht nur das visuelle System beurteilt, sondern es auch in der Praxis immer mit verschiedenen satten Pigmenten zu tun hat.

Das CIELAB-System und die DIN 6164 beinhalten einen ziemlichen Widerspruch in der Einschätzung der Farbe Gelb. Während das CIELAB System Gelb als bunter bewertet als alle anderen Bunttöne, wird Gelb von System der DIN 6164 mit den wenigsten Sättigungsstufen (7) beschrieben.

Die hohen Sättigungsstufen, die von Richter für Grün (16) im DIN System angenommen sind, stehen im Widerspruch zu den Annahmen von Adam für das TGL System [98]. Adam geht von einem symmetrischen System aus. Auf diese Unterschiede wird im Kapitel 2.4.7 eingegangen.

Sehr viele aktuelle Arbeiten, so die von Valberg, K. Richter, oder K. Kuehni gehen von symmetrischen Farbräumen aus und schaffen entsprechend symmetrische Farbmodelle oder versuchen, die Achsen des CIELAB Farbenraumes so zu korrigieren, dass sich ein symmetrischer Raum ergibt.

An dieser Stelle soll noch eine Untersuchung erwähnt werden, in der eine Untersuchung zur Buntheit, als Sättigung bezeichnet, von Marre (1996) beschrieben wird (Abb. 1.3.6).

„Trägt man den Logarithmus des reziproken Wertes eines eben feststellbaren Unterschiedes, nämlich

$$\log \frac{\Phi_\lambda + \Phi_w}{\Phi_\lambda} \tag{1.27}$$

für die erste Stufe vor Weiß über der Wellenlänge auf, so erhält man die Kurve der spektralen Sättigungsunterscheidung für die erste Stufe vor Weiß. Dabei bezeichnet Φ_w den Lichtstrom des Weißlichtes und Φ_λ den Lichtstrom des monochromatischen Lichtes, der erforderlich ist, um den ersten Bunteindruck vor Weiß zu erzeugen.“...Für Gelb ist die Schwelle am kleinsten. Bei Gelb wird bereits bei sehr kleinen Abweichungen von Weiß eine Sättigung empfunden, viel früher als bei anderen Farben

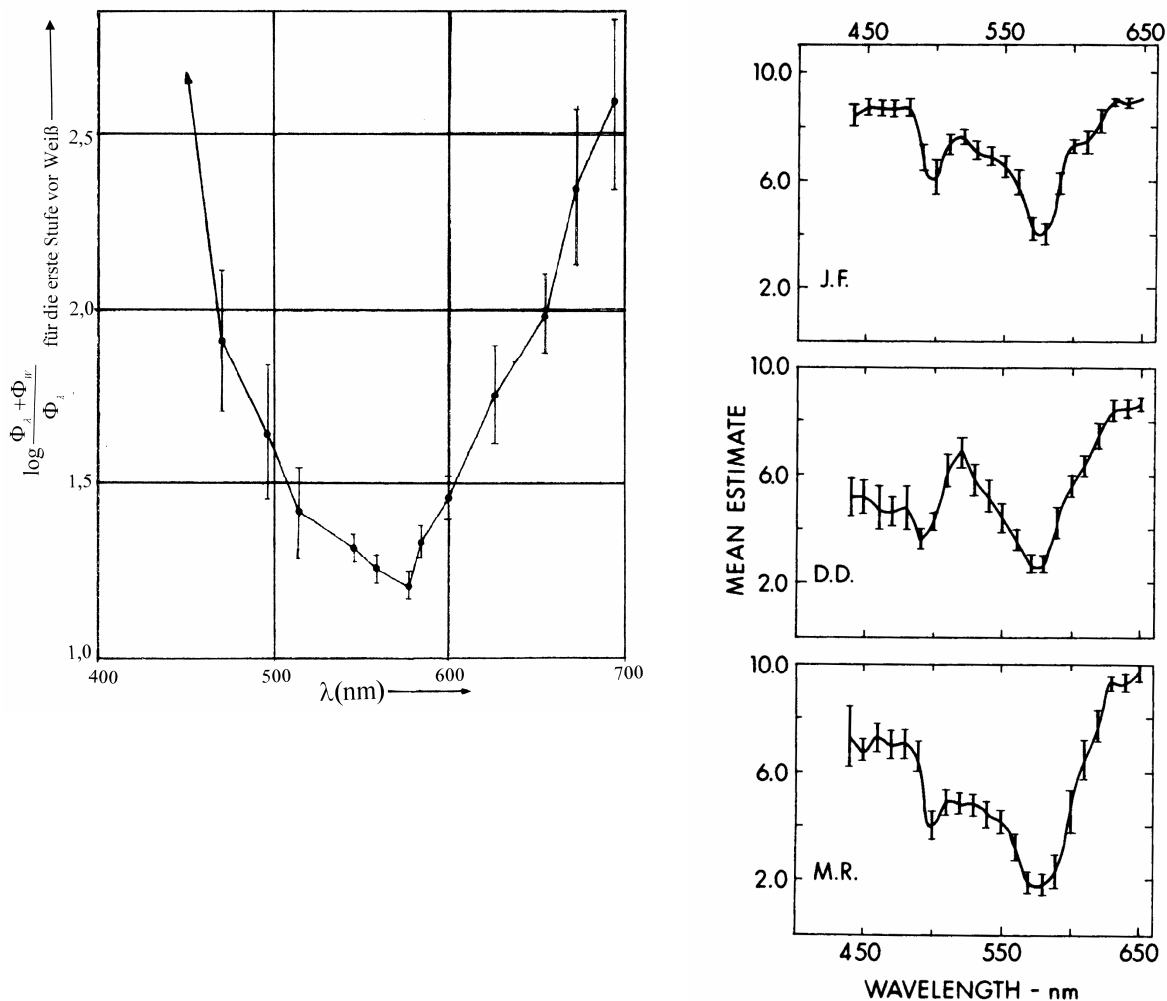


Abb. 1.3.6 Wellenlängenabhängigkeit der Sättigungsunterunterscheidung, links nach Marre [70] und rechts nach Jacobs [45] für drei Versuchspersonen, die vertikalen Striche entsprechen einer Standardabweichung

Die geringste Empfindlichkeit für Sättigungsänderungen besteht in der Mitte des Spektrums. Das Minimum liegt bei 577 nm. Da es sich bei diesen Versuchen um Weißzumischung zur Spektralfarbe handelt, können die Begriffe Buntheit und Sättigung hier als Synonyme eingesetzt werden. Vergleicht man den Verlauf mit der Hellempfindlichkeit (Abb. 1.1.8) so kann man nahezu von entgegengesetztem Verhalten sprechen. Im mittleren Bereich des sichtbaren Spektrums, der als Gelb empfunden wird, ist die Hellempfindlichkeit maximal.

Berechnet man aus den Zapfenempfindlichkeiten Gegenfarbensignale, wie es z.B. von Wolf und Scheibner [106] getan wurde, so erhält man die spektralen Gegenfarbensignale:

$$m(\lambda) = 1,0050 S(\lambda) - 0,0477 M(\lambda) - 0,0858 L(\lambda) \quad (1.28)$$

$$s(\lambda) = 0,1102 S(\lambda) + 1,5117 M(\lambda) - 1,1249 L(\lambda) \quad (1.29)$$

$$l(\lambda) = \quad \quad \quad + 0,3661 M(\lambda) - 0,6582 L(\lambda) \quad (1.30)$$

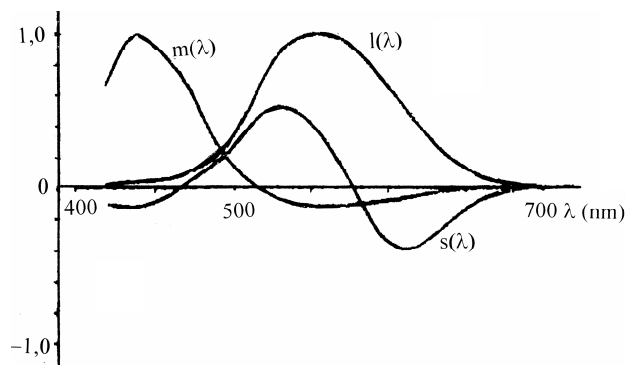


Abb. 1.3.7 Gegenfarbenfunktionen nach Wolf und Scheibner [106]

Der kurzwellige Rezeptor S liefert keinen Beitrag zur Helligkeit, die durch die dritte der Gleichungen repräsentiert wird.

Addiert man die Gegenfarbenfunktionen vektoriell, bzw. berechnet die chromatischen Momente, so ergibt sich eine Funktion mit drei Maxima und drei Minima, wobei das stärkste Maxima im gelben Bereich liegt.

Die Maxima entsprechen den Empfindungen Cyan, Gelb und Magenta und die Minima den Empfindungen Violettblau, Grün und Orangerot.

1.3.8 Der Begriff der Reinheit (purity)

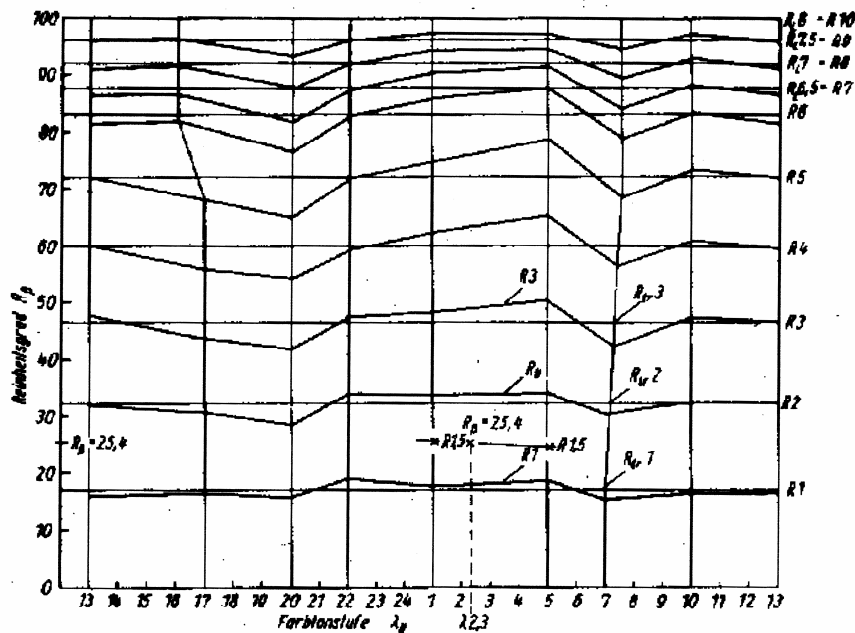
Unter der farbmetrischen Reinheit versteht man die Menge an monochromatischem Licht in der Farbmischung mit weißem Licht. (CIE-Definition). Des Weiteren wird der spektrale Farbanteil, (die Sättigung nach Helmholtz) als purity bezeichnet.

Der Begriff der Reinheit wird noch in Bezug auf Farbmischungen von Malmitteln benutzt, im Sinne einer Zumischung von Weiß, oder Schwarz zu einer gesättigten Ausgangsfarbe. Von Ostwald wurden in diesem Zusammenhang die Begriffe Verweißlichung und Verschwärzlichung eingeführt. Insbesondere Maler verwenden den Begriff der Reinheit in diesem Sinn.

Es soll noch hier die Definition des Reinheitsgrades R_B von Manfred Adam in der TGL 21579 aufgeführt werden [98]. Ausgehend von der xy-Darstellung der CIE Farbkarte definiert er einen Reinheitsgrad R_B und eine Reinheitsstufe R_N . Der Reinheitsgrad R_B entspricht dem Abstand eines Farbpunktes vom Unbuntpunkt in Bezug auf den Abstand der Vollfarbe vom Unbuntpunkt:

$$R_B = \frac{r_F}{r_V} 100 \% . \quad (1.31)$$

Die Reinheitsstufen sind empirisch ermittelte Stufen, die aus dem Reinheitsgrad über ein Nomogramm (Abb. 1.3.8) zu bestimmen sind:



13 violettblau 17 Cyanblau 20 Smaragdgrün 22 Mittelgrün 1Gelb 5 Orangerot 7 Mittelrot 10 Purpurviolett

Abb. 1.3.8 Reinheitsstufen in Abhängigkeit vom der Zahl des Farbtons und vom Reinheitsgrad nach Manfred Adam (TGL 21579).

1.3.9 Einfluss des Umfeldes auf die Sättigung

Das Umfeld beeinflusst wie allgemein durch den Simultankontrast bekannt, Helligkeit und Bunton. Ob die weitere Beeinflussung Buntheit oder Sättigung oder beide betrifft, ist empirisch schwer zu entscheiden. Das Problem wird noch dadurch vergrößert, dass die Experimente aus dem Bereich der Physiologie den Begriff Sättigung als Synonym für Buntheit verwenden.

In den Versuchen von Juan [49] (vgl. Abb. 1.2.3 oben) wurde die Annahme zu Grunde gelegt, dass das Umfeld nur Helligkeit und Buntheit einer Farbe beeinflusst, nicht aber die Sättigung.

Diese Annahme steht im Widerspruch zu mehreren aktuellen Arbeiten zum Simultankontrast, die eine Beeinflussung der Sättigung durch das Umfeld zeigen. So berichtet Ekroll [25] über die folgenden Effekte:

Infelder beliebiger Farben erscheinen gesättigter, wenn sie sich in einem homogenen grauen Umfeld befinden. (Abb.1.3.9) Diese Erscheinung wird nach Brown und MacLeod (1997), Gamut Expansionseffekt genannt.



Abb. 1.3.9 Infelder erscheinen gesättigter vor grauem Umfeld und vor der Komplementärfarbe (die Infelder sind alle gleich)

Bei farbigem Umfeld kommen ungesättigte Infeld-Farben nur für komplementäre Bunttöne vor. Vor Blau gibt es kein ungesättigtes Blau. Bei achromatischem Umfeld fehlen niedrig gesättigte Farbtöne jeden Farbtons (Abb. 1.3.10).

Diese erst vor kurzen gefundene Tatsache hat Bedeutung für das visuelle Abmustern von Farbproben. Es ergibt sich die Frage, ob eine Beurteilung von niedrig gesättigten Farben vor grauem Untergrund stattfinden sollte. Beim Betrachten der Tafeln der DIN 6164 nimmt man einen Sprung zwischen der Sättigungsstufe 0 und der Stufe 1 wahr (Abb. 1.3.5 c). Dieser Sprung kann mit einem von Ekroll [25] gefundenen Effekt erklärt werden.

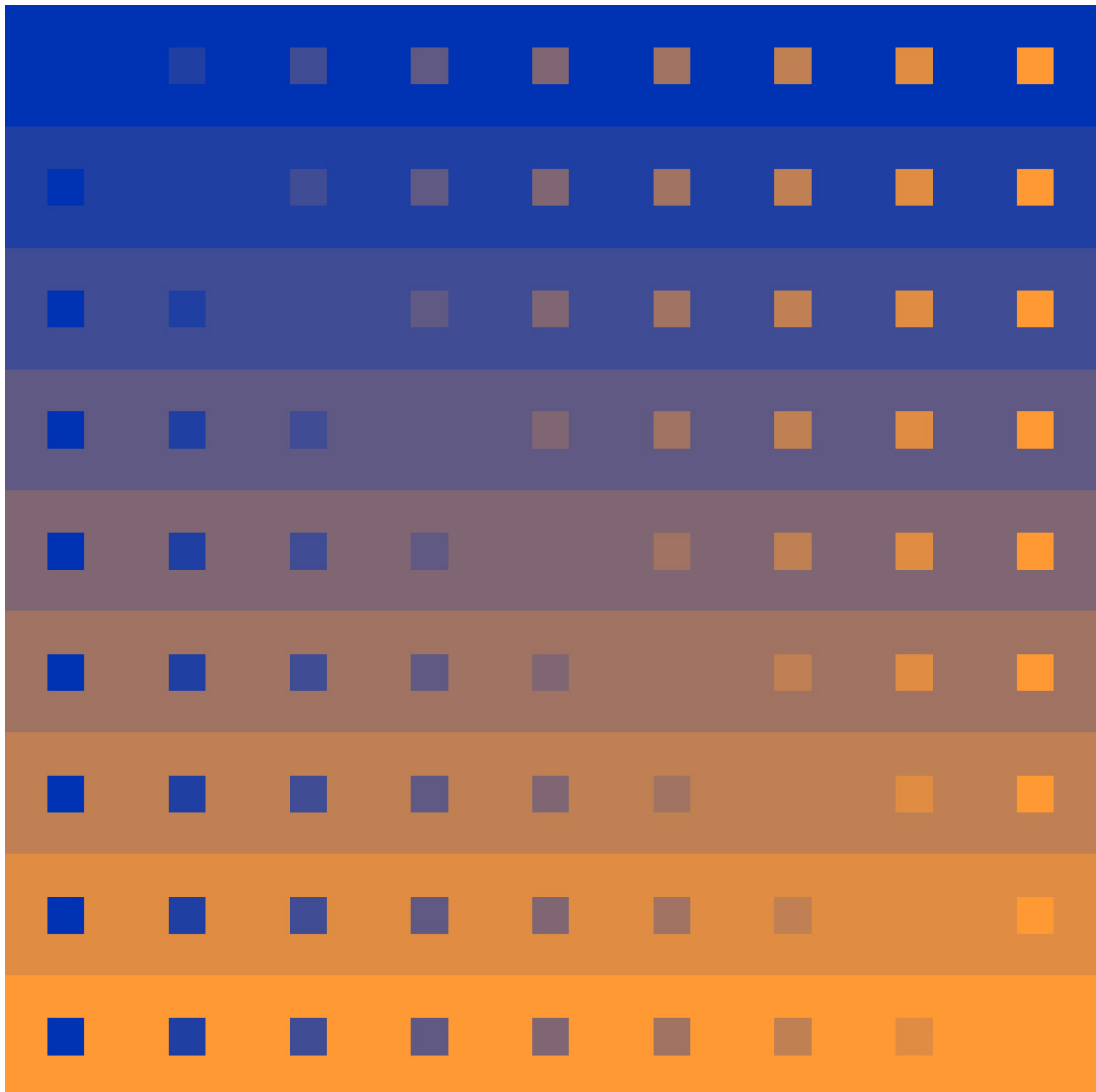


Abb. 1.3.10 Bei chromatischem Umfeld kommen ungesättigte Infeld-Farben nur für komplementäre Bunttöne vor (Ekroll [25]). Die kleinen Quadrate in jeder Reihe sind physikalisch identisch. Die oberen Reihen, mit dem blauen Umfeld, enthalten viele ungesättigte gelbe Felder; andererseits enthalten die Felder vor gelben Umfeld kein Gelb mit geringer Sättigung. Sie enthalten mehr blaue Felder mit geringer Sättigung. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich der obersten mit der untersten Reihe.

Für die Wirkung des Umfeldes genügt schon die Ausbildung des Umfeldes als schmaler Rand, wie die Autorin in [63] zeigen konnte.

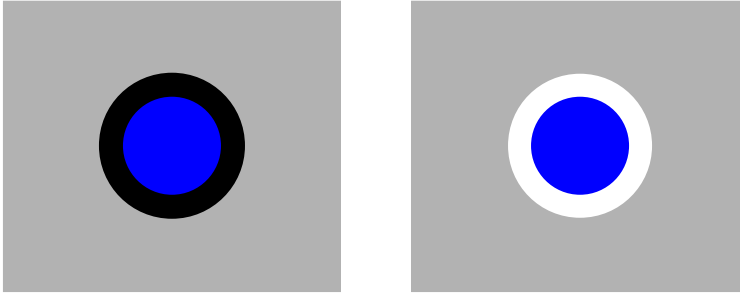


Abb. 1.3.11 Umfeldwirkung auch schon bei einem schmalen Rand

1.3.10 Definition der Sättigung im Bereich der Physiologie und in den Medienwissenschaften

Im Bereich der Physiologie und in den Medienwissenschaften ist es üblich, den Sättigungsbegriff noch so zu verwenden, wie es üblich war, als es den Begriff der Buntheit noch nicht gab, d.h., quasi als Synonym für Buntheit. So kann man auch an aktuellen wissenschaftlichen Darstellungen die horizontale Achse des Ostwald-Farbsystems mit der Bezeichnung Sättigung finden.

Bei Dudel [22] findet man folgende Definition und Beschreibung des Begriffes Sättigung:

„Unter Sättigung versteht man den Grad der Buntheit einer Farbe im Vergleich zum gleichhellen Unbunt (Weiß). Sättigung ist die Eigenschaft, die eine kräftige Buntfärbung von einer blassen weißlichen Farbe unterscheidet, wie beispielsweise Rot von Rose. Die Sättigung hängt ab von der Reinheit (purity) eines Reizes, d.h., vom Grad in dem die farbtongleiche Wellenlänge in dem Reiz vorherrscht. Monochromatische Spektralreize weisen die höchste Sättigung auf.

Die Empfindlichkeit für Sättigungsunterschiede wird bestimmt, indem man entweder die Zahl der Sättigungsstufen zwischen Weiß und der Spektralfarbe oder aber den ersten feststellbaren Unterschied von Weiß zur Spektralfarbe misst.“

Der RGB-Farbraum wird für Computerdarstellungen genutzt und ist etwas prinzipiell anderes als die Farbräume für Körperfarben. Es werden Lichtfarben additiv gemischt. Farben werden auf Monitoren durch additive Mischung von rotem, grünem und blauem Licht erzeugt. Sind die drei Farben Rot, Grün und Blau mit maximaler Intensität (Helligkeit) vorhanden, so ergibt sich Weiß.

Da es schwierig ist, aus dem RGB-Farbraum, der ein Würfel ist, Farbvorstellungen zu entwickeln, werden die RGB-Werte in anschaulichere Systeme umgerechnet. Dadurch ergeben sich in der Computergrafik der HSV-Farbraum und der HLS-Farbraum mit den Größen Farbton (Hue H), Helligkeit (Lightness L bzw. Value V) und Sättigung S. Diese beiden Räume werden teilweise als Doppelpyramide und teilweise als Doppelkegel dargestellt.

Der von der Firma Tektronix entwickelte HLS-Farbraum wird als Doppelkegel dargestellt und alle Farben außen auf dem Kegel haben die maximale Sättigung, für Rot, Grün und Blau ist der Maximalwert 255, für gemischte Farben ist der Wert etwas geringer. Das heißt, auch mit Weiß gemischte Farben werden als voll gesättigt bezeichnet. Diese Benutzung des Begriffes Sättigung entspricht nicht der allgemeinen Verwendung des Begriffes Sättigung.

Beim HSV-Raum ist eine Farbe mit Weißanteil nicht voll gesättigt.

Bei den Darstellungen wird die horizontale Achse oft als S bezeichnet. Die Sättigung entspricht aber nicht dem Abstand von der Unbuntachse. Deshalb wäre die Bezeichnung Chroma C an dieser Achse richtiger. Ausführlich beschäftigt sich Gisela Schnabel [91] mit der Sprachverwirrung um den Begriff Sättigung in der Computergrafik.

2. Vorschlag einer neuen Sättigungsformel

Die Anwender können mit der großen Unsymmetrie des CIELAB-Farbraums nichts anfangen, sie brauchen einen Farbraum, der symmetrisch ist. Deshalb sollen im folgenden die Möglichkeiten diskutiert werden, den CIELAB-Farbraum symmetrischer zu gestalten.

2.1 Möglichkeiten zur Verbesserung der Symmetrie des CIE-Farbraumes

2.1.1 Änderung des Raumes

Man könnte den CIELAB- Farbraum symmetrischer gestalten, wenn man die a- und b-Achsen verändern würde. Diese Idee wurde schon mehrfach aufgegriffen. Z. B. zeigt Kuehni [53] diese Möglichkeit.

Weiterhin wäre ein neuer Farbraum auf der Basis der L-,M- und S-Rezeptoren denkbar. Dieser Weg wurde von Valberg in [100] verfolgt und es gibt auch eine Ausarbeitung der CIE zu diesem Thema [12].

2.1.2 Normierung des CIE-Raumes

In Abb. 2.1.1. ist ein senkrechter Schnitt durch den CIELAB-Farbenkörper in der Gelb-Violettblauen Ebene ($90^\circ - 270^\circ$) für die Druckfarben des Vierfarbendrucks zu sehen (nach [64]). Die Messpunkte stellen die Begrenzung der Ebene dar; d. h. Mischung von Gelb bzw. Violett (dem Übereinanderdruck von Magenta mit Cyan) mit Papierweiß oder mit Schwarz.

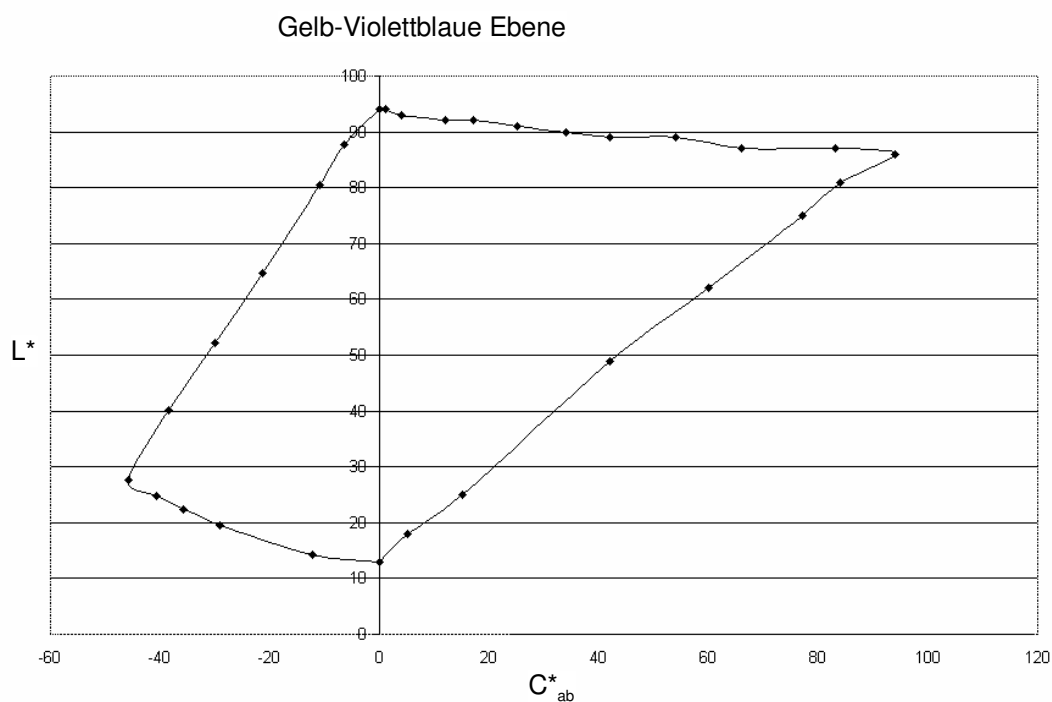


Abb. 2.1.1 Gelb-Violettblaue Ebene des CIELAB- Farbraumes für Druckfarben, Helligkeit in Abhängigkeit von der Buntheit.

Diese Ebene wurde mit der folgenden Gleichung auf die Buntheit 87 normiert (siehe Abb. 2.1.2).

$$C_n^* = \frac{C_{ab}^*}{C_{ab,max}^*} 87 \quad (2.1)$$

Bei einer einheitlichen Normierung aller Farben auf 87 sollte man allerdings bedenken, dass es sich damit um eine Maßnahme handelt, die für die Praxis nicht sehr einfach durchzuführen ist, da für alle Farbtöne erst das $C_{ab,max}^*$ bestimmt werden müsste.

Die Normierung des CIELAB Systems zeigt, dass eine Transformation zwischen dem CIELAB-Farbsystem und den schiefen Doppelkegeln der Gestalter möglich ist.

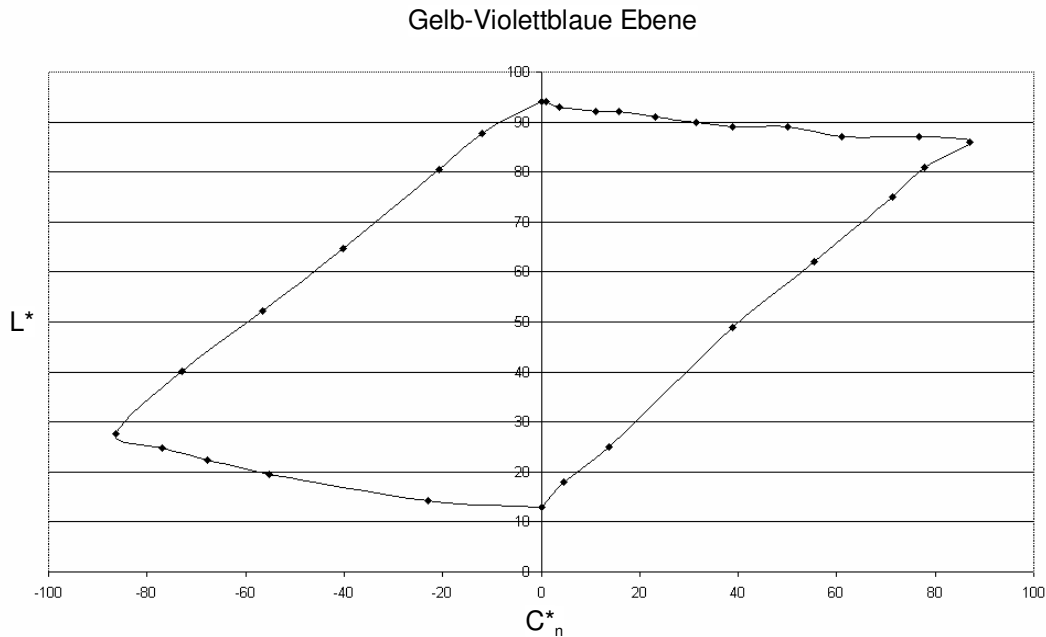


Abb. 2.1.2 Gelb-Violettblaue Ebene des CIELAB-Farbraumes, Helligkeit in Abhängigkeit von der normierten Buntheit

2.2 Eine neue Formel für die Sättigung

2.2.1 Herleitung der Formel

Wie lässt sich die Sättigung im LCh-Raum ermitteln? Bisher ist im CIELAB-Farbraum der Begriff der Sättigung nicht befriedigend definiert.

Nach Manfred Richter versteht man unter Sättigung das Verhältnis der Buntheit zum Gesamtfarbeeindruck. Entsprechend dieser Definition sollte die folgende Gleichung zur Beschreibung der Sättigung geeignet sein:

$$S^+ = \frac{C_{ab}^*}{\sqrt{L^{*2} + C_{ab}^{*2}}} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

- S⁺ Sättigung (neu)
- C^{*}_{ab} Chroma, Buntheit (nach CIELAB)
- L* Lightness, Helligkeit (nach CIELAB)

Es wird die Größe Chroma durch den Gesamteindruck der Farbe (Colorfulness, „Farbstärke“) dividiert, wobei für die Farbe im CIELAB Farbraum der Vektor aus Buntheit und Helligkeit verwendet wird. Da die Sättigung oft in % angegeben wird, wurde in die Gleichung noch der Faktor 100 % eingefügt.

Um die Darstellung zu vereinfachen, wird – wenn nicht anders vermerkt – im folgenden Text für C^{*}_{ab} das Symbol C, für L* das Symbol L und für h_{ab} das Symbol h verwendet.

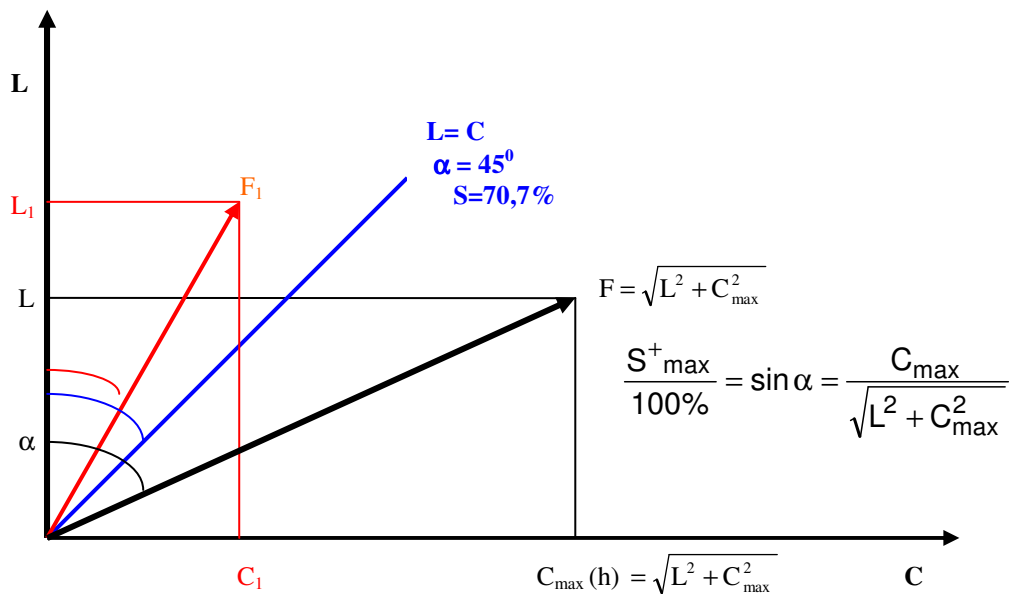


Abb. 2.2.1 Darstellung einer Farbe F_1 und einer Farbe F mit maximaler Sättigung im LC-Diagramm

Die Sättigung ist im Wesentlichen der Sinus des Winkels α . Dabei ist α der Winkel zwischen Farbvektor und Helligkeitsachse (Abb. 2.2.1).

$$S^+ = \frac{C}{\sqrt{L^2 + C^2}} \cdot 100\% = \sin(\alpha) \cdot 100\% \quad (2.3)$$

2.2.2 Welche maximale Sättigung einer Farbe ist möglich?

$$S^+_{\max} = \sin(\alpha_{\max}) \cdot 100\% = \frac{C_{\max}}{\sqrt{L^2 + C_{\max}^2}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

$S^+ = 100\%$ kann nicht erreicht werden, da L in der Praxis nicht Null werden kann. Selbst Schwarz hat Helligkeitswerte um 10.

Von den Druckfarben wird der höchste Wert für S^+ vom Übereinanderdruck von Gelb und Magenta mit $S^+ \approx 87\%$ erreicht. Das stimmt genau mit dem Ostwaldschen Wert überein.

Bei maximaler Sättigung ist die unterste Begrenzung des Farbraumes erreicht.

Benutzen wir Druckfarben, so können wir die Winkel und Sättigungswerte aus Tabelle 2 für den Farbkörper der Druckfarben ermitteln.

Tabelle 2 Winkel und Werte S^+ der maximalen Sättigung der Druckfarben des Vierfarbendrucks

	C	C/Y	Y	Y/M	M	M/C
α [°]	42,38	55,89	47,52	60,03	55,45	58,87
S^+_{\max}	67,40	82,80	73,76	86,63	82,36	85,60

3. Überprüfung der vorgeschlagenen Formel

3.1 Überprüfung der Formel an Druckfarben

Ein experimenteller Nachweis der Richtigkeit der vorgeschlagenen Formel ist nicht einfach, weil man es mit dem Messen von einer Empfindung zu tun hat. Für Helligkeit und Farbton sind Versuche bekannt, zu Sättigung ist vergleichsweise wenig zu finden. Auch fehlt es bei Versuchspersonen im Allgemeinen an Übung in der Beurteilung der Sättigung von Farben. Die Sättigungsempfindung ist immer eng mit den Empfindungen für Helligkeit und für den Farbton verknüpft. Zuerst kommt man bei der Suche nach einem Prüfverfahren intuitiv auf die Idee, reine Farben gegenüberzustellen, diese visuell abzumustern und mit der aus den Messwerten für Helligkeit und Chroma berechneten Sättigung zu vergleichen.


Die dabei empfundene Sättigung sollte festgehalten werden, sowie die Messwerte der Farbmuster. Die visuellen Abmusterungen sollten durch mehrere Personen geschehen.

Zunächst wurden bereits ausgemessene Farbmuster verwendet und an Hand von Stichproben überprüft, ob die Formel wie erwartet, die Sättigung beschreibt. Dazu wurden Druckkontrollstreifen eingesetzt, in Abstufungen gedruckte Muster aus Vierfarben- und Siebenfarbendruck, sowie Sonderfarben.

Von diesen Versuchen, sollen hier nur beispielhaft einige Messungen an Druckfarben wiedergegeben werden, von denen erwartet wird, dass der Leser, sich die Farbe vorstellen kann

Setzen wir Helligkeits- und Buntheits-Werte für maximal bunte Druckfarben in die Gleichung für die Sättigung ein, so erhalten wir für S^+_{\max} Werte von 67 bis 87 (Tabelle 3). Maximal bunte Druckfarben sind Druckfarben, deren Flächendeckungsgrad auf dem Papier 100% beträgt, d. h. Farben ohne Zumischung von Papierweiß und ohne Schwarzzumischung.

Tabelle 3 Vergleich der Werte von Helligkeit, Buntheit (Chroma) und Sättigung bei Druckfarben (Vierfarbendruck)



	C	C/Y	Y	Y/M	M	M/C
L*	55,9	47,0	86,6	45,5	48,2	27,6
C* _{ab}	51,0	69,4	94,6	78,9	70,0	45,7
S ⁺	67,4	82,8	73,8	86,6	82,4	85,6

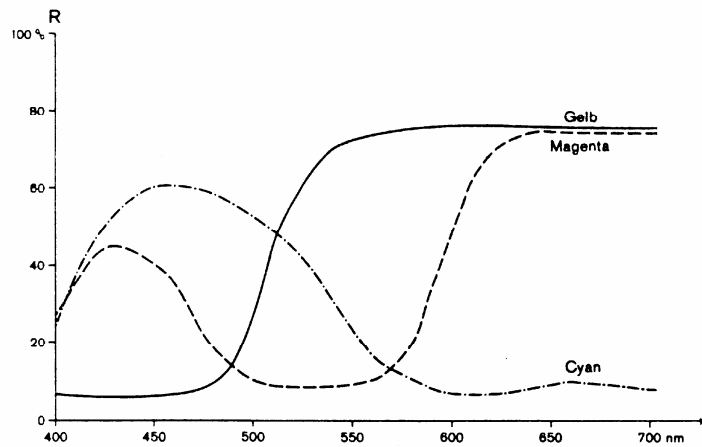
- C Cyan (Türkisblau)
- C/Y Übereinanderdruck aus Cyan und Yellow (Gelb)
- Y Yellow (Gelb)
- Y/M Übereinanderdruck aus Yellow und Magenta
- M Magenta (Pink)
- M/C Übereinanderdruck aus Magenta und Cyan

Man erkennt in der Tabelle 4, dass die Mischfarben erster Ordnung höhere Sättigungs-Werte aufweisen als die Druckgrundfarben.

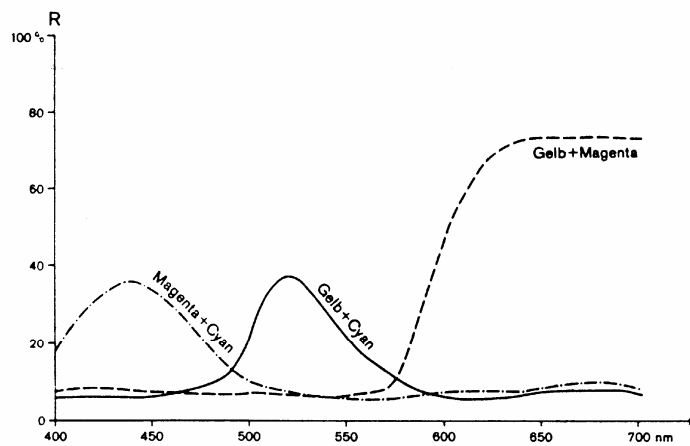
Das stimmt mit der Empfindung beim Betrachten der Druckfarben überein. Cyan wirkt am wenigsten satt.

Man kann die höhere Sättigung der Mischfarben 1. Ordnung anhand der Remissionsfunktionen erklären. Die Abbildungen 3.1.1 zeigen die Remissionsfunktionen der Druckfarben. Die Mischfarben erster Ordnung haben nicht so breite Spektren wie die Druckgrundfarben. Man bezeichnet sie auch als 1/3 Farben, im Unterschied zu den Druckgrundfarben, die man als 2/3 Farben bezeichnet, weil sich ihr Spektrum über ca. 2/3 des sichtbaren Bereiches erstreckt.

Unbunte Farben wie Weiß, Grau und Schwarz haben extrem breite Spektren. Sie remittieren im gesamten sichtbaren Bereich und ergeben damit die Sättigung Null.



a) Remissionsfunktionen der Druckgrundfarben



b) Remissionsfunktionen der Mischfarben 1. Ordnung

Abb. 3.1.1 Remissionsfunktionen der Druckfarben des Vierfarbendrucks

Im Weiteren sind noch die Sättigungswerte von Drucksonderfarben, die aus Farbmessungen mit einem Gretag-SPM 100-II ermittelt wurden, dargestellt (Tabelle 4).

Tabelle 4 Sättigung von HKS Farben (100% Flächendeckung)

		C	L	h	S ⁺	S ⁺	S ⁺ _{vis}
33K	violett	85,13	36,91	324,51	91,75	11	11
43K	blau	82,80	29,66	288,30	94,14	12	12
44K	blau	53,18	39,39	260,55	80,36	7	5
47K	türkis	63,45	48,82	235,19	79,25	6	7
53K	blaugrün	70,68	63,01	178,14	74,64	1	4
60K	grün	66,47	52,19	134,51	78,65	5	6
67K	hellgrün	91,13	70,39	120,56	79,14	2	3
3K	gelb	109,91	88,13	89,50	78,02	3	1
5K	orange	101,27	81,16	77,78	78,03	4	2
7K	orange	105,71	65,56	56,58	84,98	9	8
22k	rot	85,66	55,35	32,52	83,99	8	10
27k	pink	83,42	46,99	349,80	87,13	10	9
	Mittelwert				82,51		

Vergleicht man visuell die beiden blauen Farben, so wirkt eindeutig 43 K gesättigter als 44 K, ebenso wirkt 33 K besonders satt. Es konnte eine gute Übereinstimmung der berechneten Sättigung mit dem visuellen Eindruck festgestellt werden.

3.2. Überprüfung der Formel für S^+ an Folien

Da man beim übereinander legen von Farbfolien den Sättigungseffekt wahrnehmen kann, wurde eine weitere Erprobung an Farbfolien durchgeführt. Dazu wurden Transparentfolien hergestellt, für die drei Stufen der Bedruckung gewählt wurden; reine Farben in 100 % Flächendeckung, mittelstark eingefärbte, leicht verweißlicht wirkende Folien und schwach eingefärbte. Für den Sättigungsversuch wurden die bedruckten Folien schrittweise übereinander gelegt, jeweils L und C mit dem Farbmessgerät gemessen. Anschließend wurde S^+ berechnet. Der visuelle Eindruck wurde verbal festgehalten. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zu sehen.

Bei der Farbmessung von Folien ist wichtig, dass die Messung und visuelle Abmusterung senkrecht zur Folie erfolgt, denn nur dann kann der Sättigungseffekt gemessen werden. Im schrägen Reflektionslicht beobachtet man im Wesentlichen die Reflektion der obersten Folie. Seitlich betrachtet sehen die Folien wesentlich bunter aus, als wenn man senkrecht auf die übereinander gelegten Folien blickt.

Die Messwerte für die blauen Folien sind als Beispiel in der Tabelle 5 zu finden.

Tabelle 5 zur Folienmessung stark eingefärbter Folien (Bsp: Blaue Folien)

	L^*	a^*	b^*	C^*_{ab}	S^+	$S=C^*_{ab}/L^*$
1	45	-25	-53	58,6	79,3	1,3
2	27	-3	-58	58,1	90,7	2,2
3	17	10	-54	54,9	95,5	3,2
4	11	15	-48	50,3	97,7	4,6
5	8,4	15	-42	44,6	98,3	5,3
6	6,4	14	-37	39,6	98,7	6,2
7	5,4	10,4	30,7	32,4	98,6	6,0

Man erkennt an der Abbildung 3.2.1, dass sich mit steigender Schichtzahl, der Sättigungswert der Hundert annähert. In der letzten Spalte sind Sättigungswerte eingetragen, die nach der bisherigen Sättigungsformel ermittelt wurden.

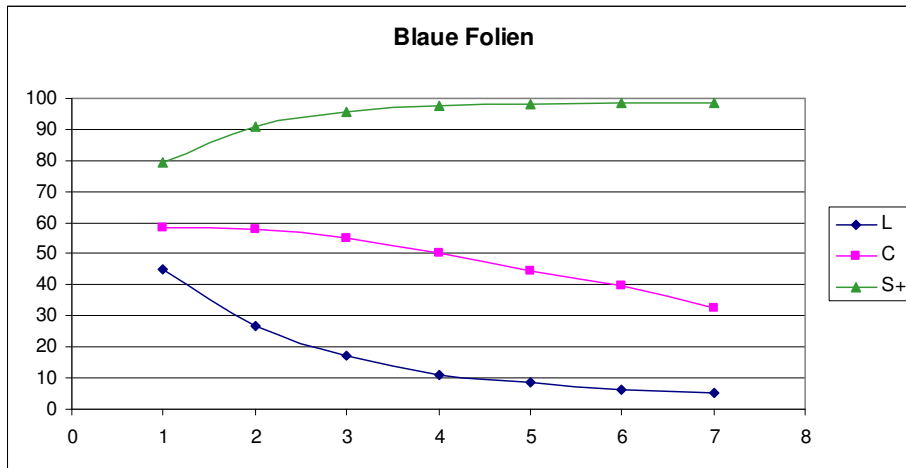


Abb. 3.2.1 Blaue Folien: Helligkeit L, Buntheit C und Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien.

Die Helligkeit nimmt schneller ab als die Buntheit, wie es auch in den Messwerten zum Ausdruck kommt.

Man erkennt, dass sich bei den grünen Folien eine stärkere Abnahme der Buntheit ergibt, als bei den blauen und roten Folien. Die Sättigung S^+ erreicht hier bei 5 Folien ein Maximum, das geht in der menschlichen Wahrnehmung mit einer Verschwärzlichung einher.

Eine solch starke Verschwärzlichung ist bei Magenta und den blauen Folien nicht zu erkennen. Das stimmt mit dem Verlauf in den Abb. 3.2.2 bis 3.2.5 überein.

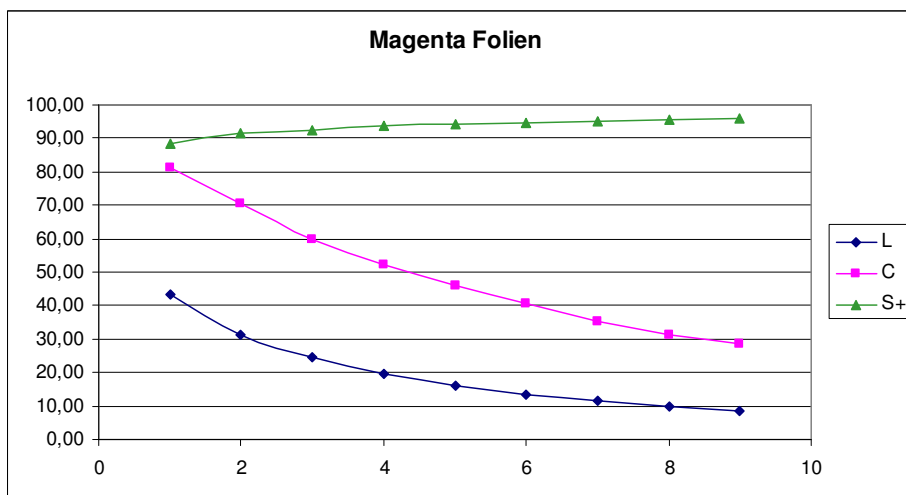


Abb. 3.2.2 Magenta Folien: Helligkeit L, Buntheit C und Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien.

Arbeitet man mit Folien, die weniger kräftig eingefärbt wurden, so kann man mit zunehmender Folienzahl zunächst ein deutliches Anwachsen von Buntheit und Sättigung beobachten, während nach dem Erreichen eines Maximums beide Größen wieder abnehmen. Bei mittelstark gefärbten (bedruckten) Folien erreicht C das Maximum nach 2 bis 3 Folien, während die Sättigung nach 4 Folien das Maximum hat. Der Sättigungswert, der maximal erreicht wird (Abb. 3.2.5) beträgt 86%.

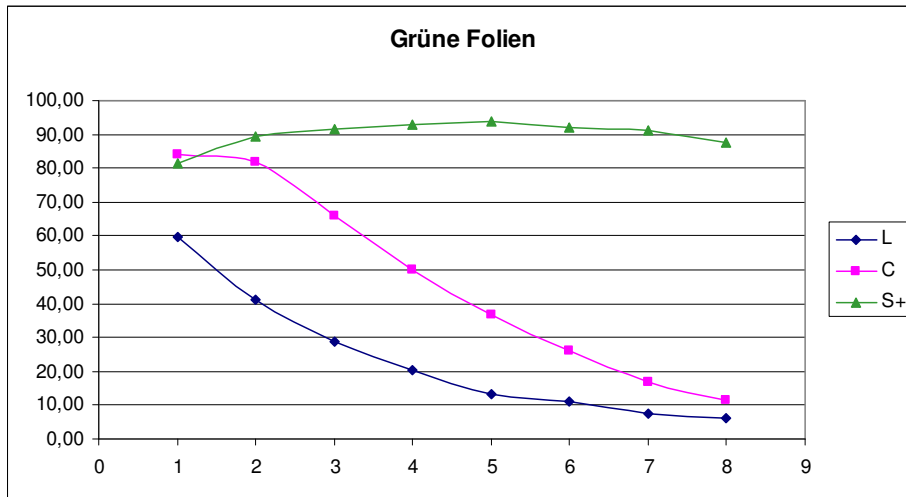


Abb. 3.2.3 Grüne Folien: Helligkeit L, Buntheit C und Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien.

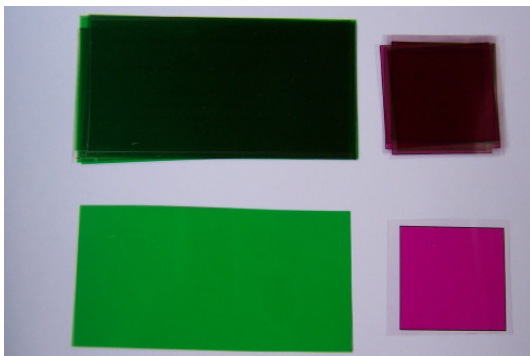


Abb. 3.2.4 Links: eine und acht grüne Folien. Rechts: eine und acht magenta Folien.

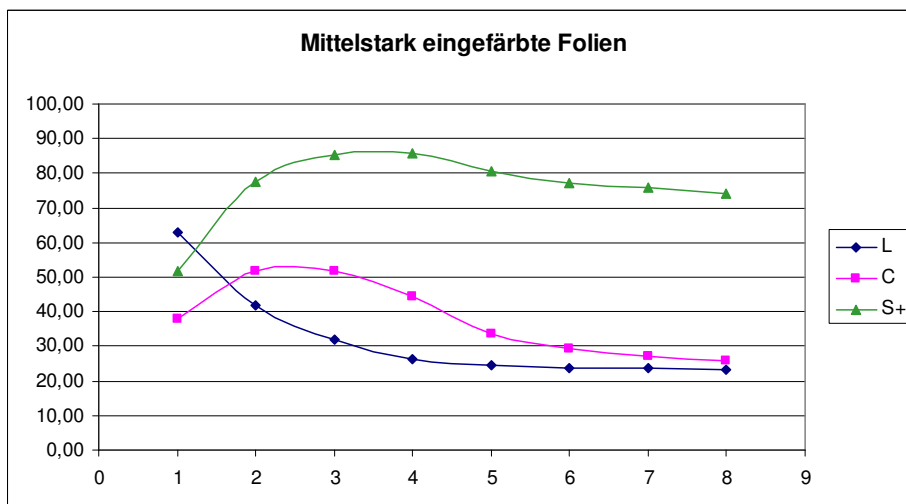


Abb. 3.2.5 Mittelstark gefärbte Magenta-Folien: Helligkeit L, Buntheit C und Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien.

Bei schwach eingefärbten Folien ist der maximal zu erreichende Sättigungswert noch geringer (75% in Abb. 3.2.6). Das Maximum der Buntheit C wird wieder vor dem Maximum der Sättigung S^+ erreicht.

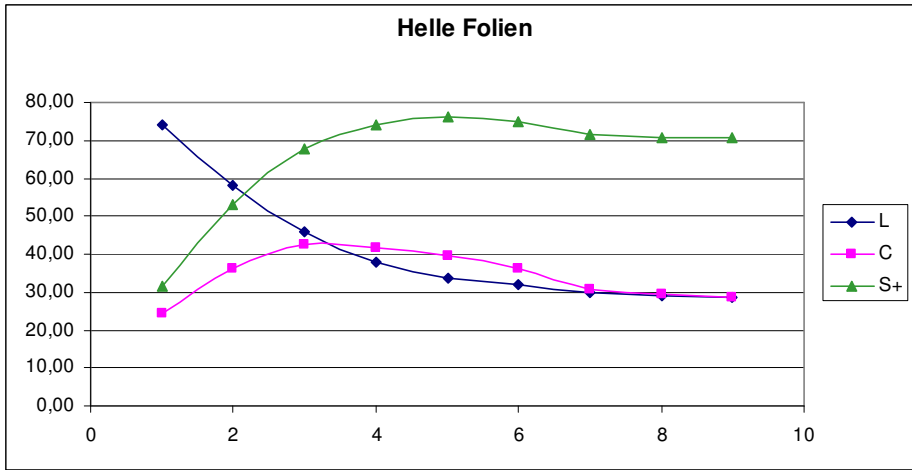


Abb. 3.2.6 Hellmagenta-Folien: Helligkeit L , Buntheit C und Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Anzahl der Folien.

Ab sechs übereinander liegenden Folien ergibt sich der Eindruck einer leichten Vergrauung. Das stimmt gut damit überein, dass die berechnete Sättigung S^+ abnimmt.



Abb. 3.2.7 Helle Folien

Bei der Messung der magenta und der grünen Folien wurden auch die Remissions-Spektren gemessen.

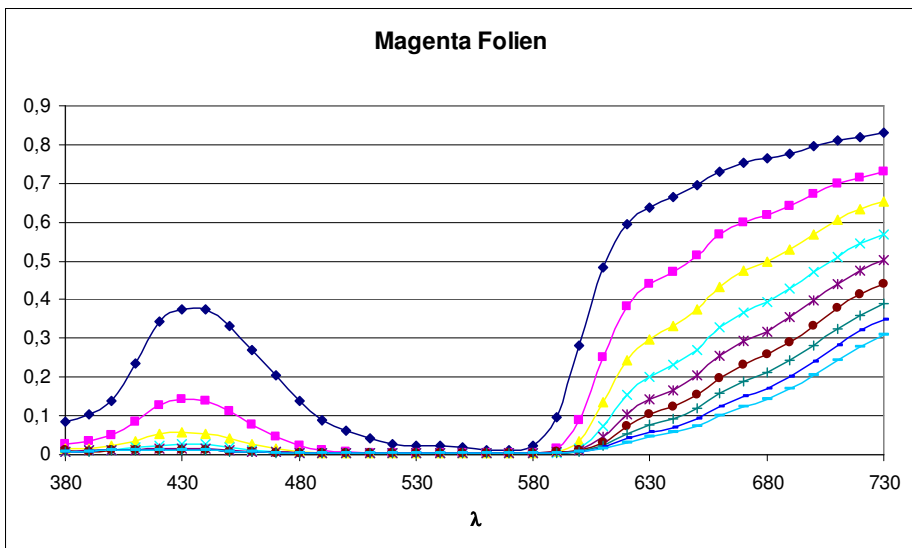


Abb. 3.2.8 Remissionsspektren der magenta Folien. Die oberste Kurve entspricht einer Folie, die unterste entspricht 8 übereinander gelegten Folien.

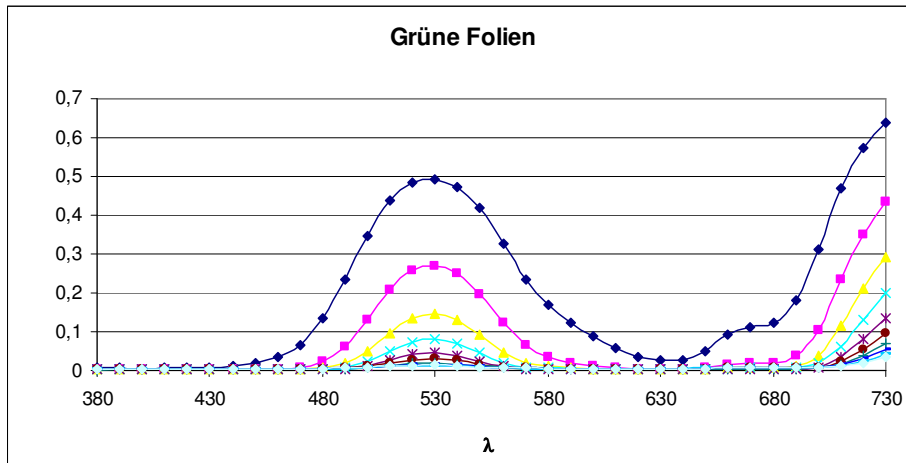


Abb. 3.2.9 Spektren der grünen Folien. Die oberste Kurve zeigt das Spektrum einer einzelnen Folie, die unterste entspricht 8 übereinander gelegten Folien.

Die oberste Kurve in Abb. 3.2.8 und 3.2.9 zeigt das Spektrum einer einzelnen Folie. Die zweite Kurve zeigt das Spektrum von zwei übereinander gelegten Folien usw.

Man erkennt an den beiden Abbildungen sehr deutlich, wie mit wachsender Folienganzahl die Remission geringer wird und das Spektrum schmaler.

Während bei den acht übereinander gelegten roten Folien noch deutlich der spektrale Verlauf zu erkennen ist, ist bei den acht grünen Folien kaum noch eine spektrale Remission vorhanden. Während bei den acht roten Folien die Sättigung noch maximal ist, nimmt bei den grünen die Sättigung bereits wieder ab.

Zum Vergleich mit der bisherigen Sättigungsformel wurde in der folgenden Abbildung die Messung mit den blauen Folien mit Hilfe der bisherigen Sättigungsformel ausgewertet (siehe auch Tabelle 6, rechte Spalte).

Es zeigt sich zunächst (hier bis zu sechs Folien) ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl der Folien und dem Verhältnis C/L.

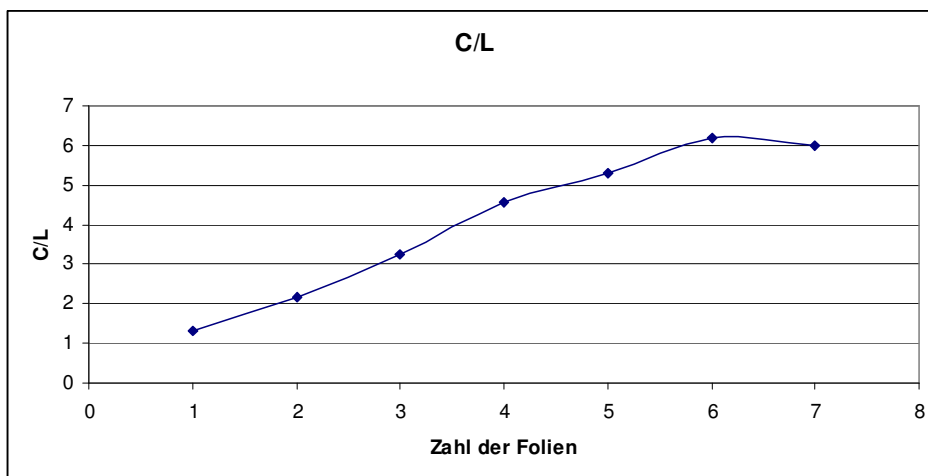


Abb. 3.2.10 Blaue Folien, Sättigung berechnet mit $S = C/L$

Der wahrgenommene Zusammenhang ist aber keinesfalls linear.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Versuch mit den unterschiedlich eingefärbten Folien zeigt, dass die vorgeschlagene Formel für S^+ zur Beschreibung der Empfindung der Sättigung geeignet ist.

3.3 Überprüfung der Formel für S^+ mit der empirischen Sättigung nach DIN 6164

3.3.1 Vergleich der Formel für S^+ mit Messwerten des Digitalen Farbatlas

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Formel mit Hilfe systematischer Farbzusammenstellungen zu überprüfen. Da die DIN 6164 auf umfangreichen empirischen Untersuchungen zur Farbsättigung beruht, wurde ein Vergleich der vorgeschlagenen Sättigungsformel mit diesem System durchgeführt.

Zunächst wurde ein Vergleich der Formel für S^+ mit den Daten des Digitalen Farbatlas durchgeführt. Der Digitale Farbatlas ist eine Sammlung von Farbmessungen der verschiedensten Farbsysteme von Holger Eberding. Man kann mit wenig Aufwand, d. h. man braucht weder ein Farbmessgerät noch das Farbsystem an sich, die Farbmaßzahlen der Farbcharts bekommen. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass man nur Zahlen real existierender Farben erhält. Nachteil ist, dass man nicht prüfen kann, ob eventuell ein Messfehler vorliegt und ein weiterer Nachteil ist, dass einige real existierende Farbcharts nicht gemessen vorliegen, weil sie sich visuell kaum unterscheiden. Das betrifft zum Beispiel die Dunkelstufe 7 und 8. Dort gibt es nur sehr wenige Messwerte. Die dem Digitalen Farbatlas zu entnehmenden Werte gehen bis zur Sättigungsstufe 6. Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Untersuchung.

26 Messwerte der gelben Ebene (T1) sind in der Abbildung 3.3.1 und 3.3.3 zu sehen.

Um den Vergleich anschaulich darzustellen, wurden alle Werte für die Sättigungsstufe des DIN Systems mit dem Faktor 11,4 multipliziert. Dadurch ergibt sich ein gleich großer Wertebereich, der über der Buntheit C aufgetragen wurde. Man erkennt in der Abbildung 3.3.1 eine sehr gute Übereinstimmung der Werte dieser Ebene. Teilweise sind die Werte direkt übereinander liegend. Die Werte auf einer waagrechten Linie entsprechen jeweils einer der Sättigungsstufen von 1 bis 6.

Die benachbarten Werte ergeben sich durch die verschiedenen Dunkelstufen.

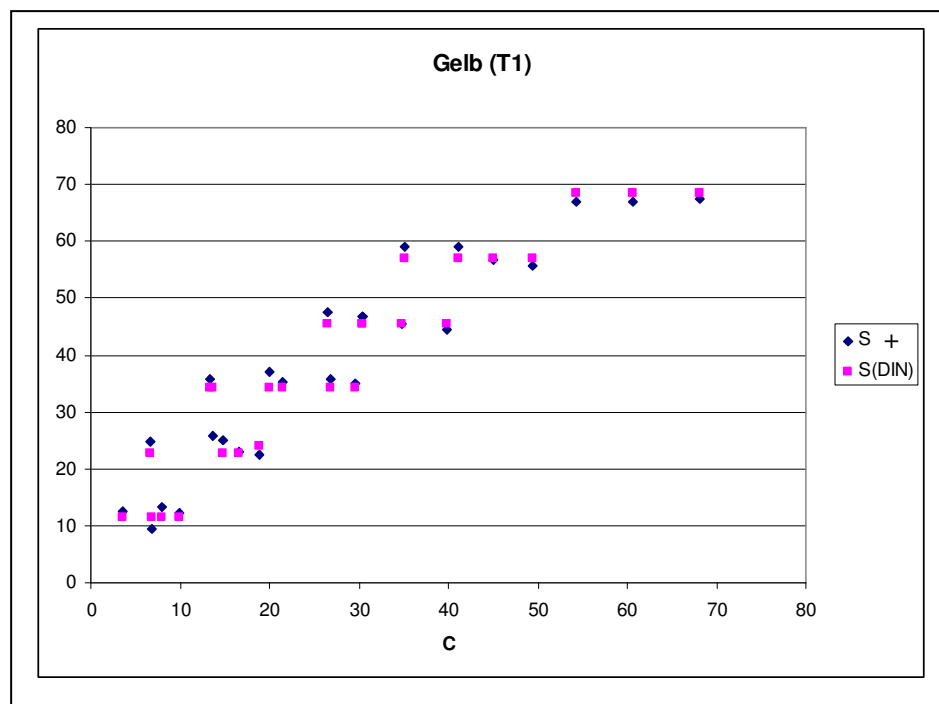


Abb. 3.3.1 Berechnete Sättigung S^+ und Sättigungsstufen $S(DIN)$ in Abhängigkeit von der Buntheit C.

Es wurden alle ungeraden Bunttöne, nach Möglichkeit, d. h., falls vorhanden, in 6 Sättigungsstufen und in mehreren Dunkelstufen gemessen.

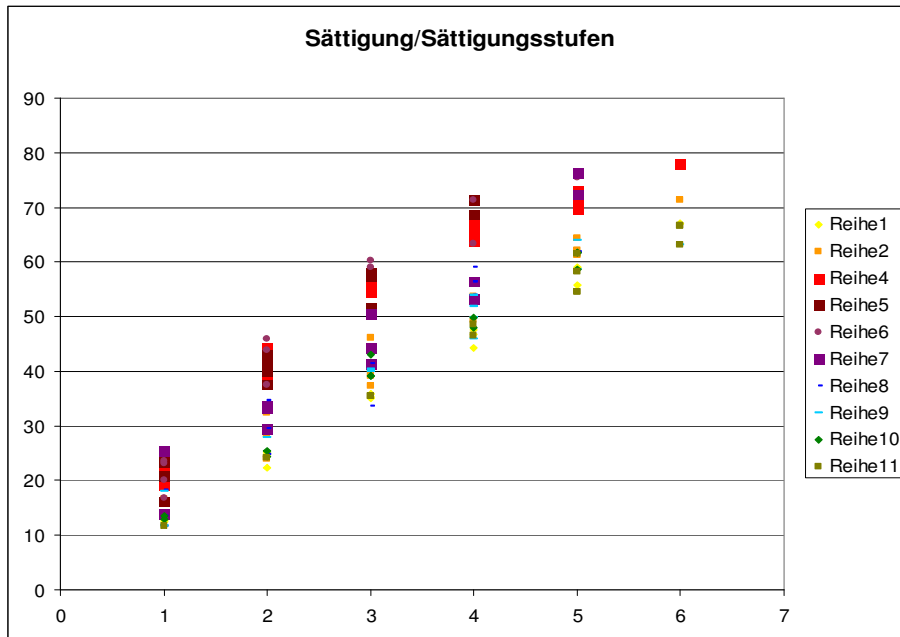


Abb. 3.3.2 Mit der Formel berechnete Sättigung S^+ über den Sättigungsstufen der DIN 6164 (ungerade Bunttöne). Die Farben der Messpunkte sind den realen Farben angepasst.

Die Messpunkte sind farblich so dargestellt, dass in etwa der Bunnton zu erkennen ist, zu dem die Messpunkte gehören. Das Gesamtergebnis ist in Abb. 3.3.2 dargestellt.

Die Messpunkte erfüllen einen breiten Streifen. Das ergibt sich zum Teil daraus, dass die visuellen Werte ganzzahlig vorliegen. Der Korrelationskoeffizient für die 173 Messwerte in Abb. 3.3.2 beträgt 0,915.

Violett und Rot haben generell höhere Sättigungswerte, Gelb und Gelbgrün haben die niedrigsten Werte.

Betrachtet man die Bunttöne einzeln, so fällt auf, dass sich für einige wie Gelb (T1) und Orange (T3) exakte Geraden ergeben, während das für andere wie für Rot (T7) und Blau (T17) nicht der Fall ist. Der besonders gebogene Verlauf für Rot ist in der Abb. 3.3.5 zu sehen. In den Abb. 3.3.3 bis 3.3.5 ist für die Bunttöne 1 und 3 die berechnete Sättigung über den Sättigungsstufen aufgetragen.

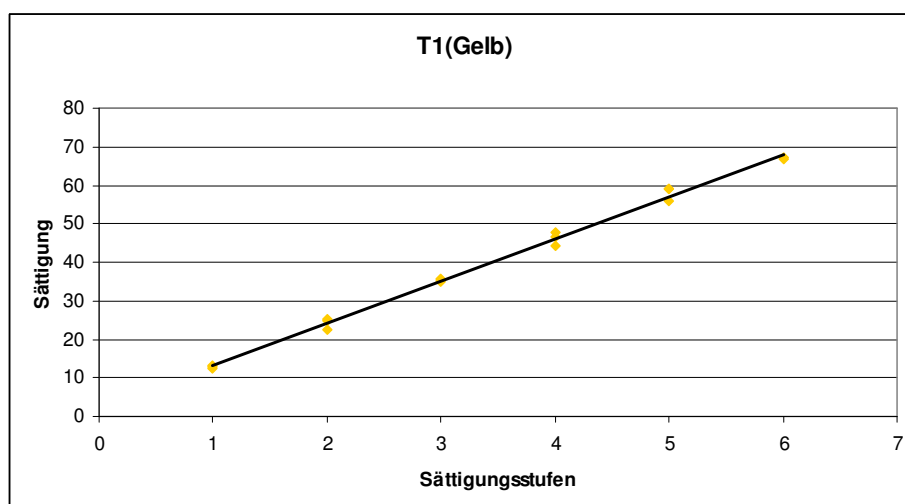


Abb. 3.3.3 Sättigung S^+ und Sättigungsstufe für der Bunnton T1

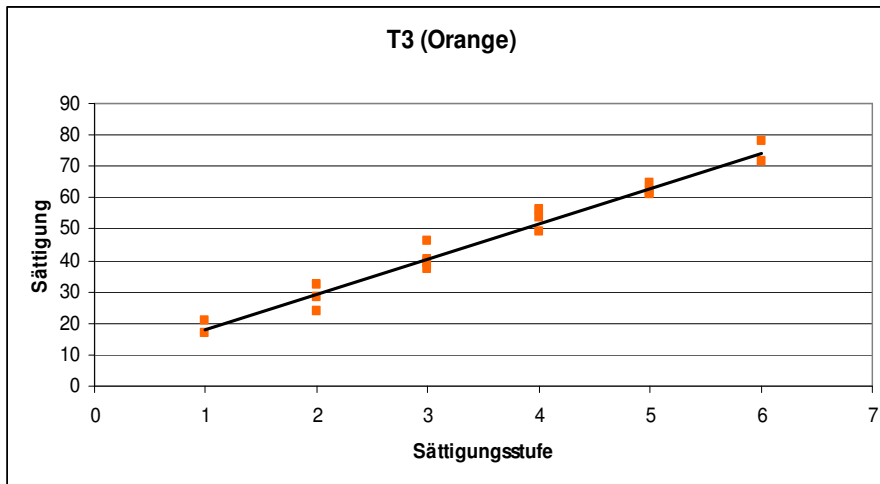


Abb. 3.3.4 Sättigung S^+ und Sättigungsstufe für der Bunnton T3

Für die Bunttöne, für die kein linearer Verlauf der Sättigung bestimmt worden war, wurden im weiteren die Sättigungswerte noch einmal mit Hilfe der Zahlen-Werte nach DIN 6164 ermittelt und im Detail mit den ausgefärbten Charts verglichen. Außerdem wurden auch noch die Bereiche betrachtet, die nicht als Muster vorliegen, insbesondere der sehr große Grün-Bereich und die Sättigungsstufe 7 bei Gelb, die erst neuerdings als Chart vorliegt. Diese Untersuchungen werden ab Kap. 3.3.3 vorgestellt.

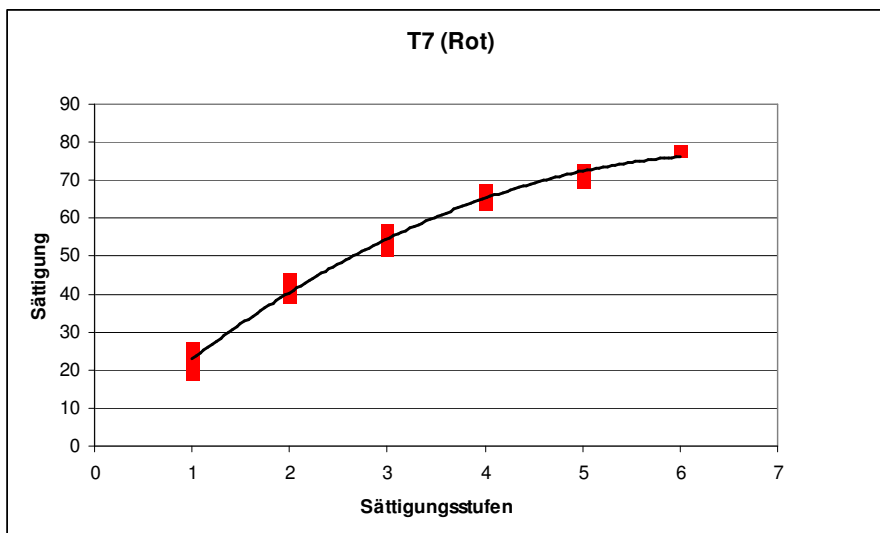


Abb. 3.3.5 Sättigung S^+ und Sättigungsstufe für der Bunnton T7

3.3.2 Erläuterungen zur DIN 6164 und zur TGL 21579

Zuerst soll die DIN 6164 zusammenfassend dargestellt werden. Auch ist die historische Entwicklung dieser DIN sehr interessant, sowohl was die verwendete Methodik zur Ermittlung der Sättigungsstufen anbelangt, als auch in Hinblick auf den Sättigungsbegriff. Erwähnt werden sollte auch am Rande die TGL 21579, die nicht den Sättigungsbegriff betrachtet, sondern die Reinheit.

Die DIN 6164 basiert auf einem gleichabständigen Farbkreis, während die TGL 21579 auf der Gegenüberstellung der kompensativen Wellenlängen von Gelb und Violettblau aufbaut und ausgewählte Farben, wie Urfarben und Druckgrundfarben enthält. Die TGL ist ein Reinheitssystem und kann deshalb nicht zur Überprüfung der Sättigungsformel eingesetzt werden. Es kann nur an einigen ausgewählten Stellen (Weißzumischung) eine Übereinstimmung der beiden Systeme geben. Bei Kenntnis der Reinheitslinien der TGL 21579, die bei Darstellung in der Normfarbtafel einen deutlichen Sättigungseffekt zeigen (siehe Abb. 3.3.12), verblüfft der Verlauf der Sättigungslinien in der DIN 6164, die einen

ausgesprochen gleichmäßigen Verlauf zeigen (siehe Abb. 3.3.7). Nur im Purpurgebiet sind die Abstände der Linien nicht gleich groß. Nicht nur in der TGL 21579, sondern auch bei neuen Arbeiten, wie zum Beispiel der von Valberg [100], findet man einen deutlichen Sättigungseffekt.

Wie bereits erwähnt, verwendet die DIN 6164 die drei Größen Bunttonzahl T, Sättigungsstufe S und als Maß für die Helligkeit die Dunkelstufe D. Die Dunkelstufe kann mit einer Gleichung aus dem Hellbezugswert A (im Normvalenzsystem Y) berechnet werden kann:

$$D = 10 - 6,1723 \cdot \lg \left(40,7 \cdot \frac{A}{A_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Dabei ist A_0 der maximal mögliche Hellbezugswert der gleichen Farbart: „Die Dunkelstufen einer Farbart werden von der hellstmöglichen Körperfarbe (das ist die Optimalfarbe der betreffenden Farbarten) aus gezählt, der die Dunkelstufe $D = 0$ zugeordnet wird.“ (Zitat aus der DIN 6164 Teil 1 Seite 2).

Der Farbkreis für das System wurde von M. Richter in der Sättigungsstufe 6 mit Farbkärtchen schrittweise mit dem Ziel der visuellen Gleichabständigkeit und mit dem Ziel, 24 Bunttöne zu verwenden, aufgebaut [80, 81]. Dazu legte er 296 Personen ein Sortiment von 120 Farbkärtchen aus Ostwalds System vor und ließ sie ausgehend von Grün möglichst gleichabständige Farbkreise bilden. Von diesen Farbkreisen wurden dann die Kreise von Personen ausgesondert, die in Hinblick auf Farbe ungeschult waren. Zurück blieben 32 Kreise, aus denen er dann einen Mittelwert bildete.

Die zweite Aufgabe war dann die Erstellung von Reihen gleicher Farbsättigung. Die Beurteilung von Farben unterschiedlichen Bunttones in Hinblick auf die Sättigung ist nicht einfach. Als die Autorin ungeübten Personen Farben unterschiedlicher Bunttöne zur Beurteilung der Sättigung vorlegte, war festzustellen, dass sie sich dazu nicht in der Lage fühlten.

Auch Richter hatte zunächst dieses Problem. In „Farbensättigung“ [80] schreibt er: „Es mag hier kurz die Frage gestreift werden, ob ein Urteil über die Sättigung von Farben verschiedenen Farbtönen überhaupt gefällt werden kann. Vor Beginn der Versuche war man daher auch recht skeptisch, ob die Durchführung nicht etwa an der Unmöglichkeit eines Urteils scheitern würde. Indessen ergab sich bald, dass alle Versuchspersonen an Hand der Apparatur leicht begriffen, worum es sich handelte. Nach kurzer Übung waren sie bereits imstande sehr sichere Urteile zu fällen.“ Zunächst arbeitete Richter mit einer Apparatur, bei der farbiges Licht abgeglichen wurde. Diese Apparatur wurde durch den Krieg zerstört und die weiteren Abmusterungen erfolgten mit Farbaufstrichen. Die eigentliche Versuchsdurchführung geschah in der folgenden Weise:

„Der Beobachter blickt in das Martens-Photometer MP und sieht in dessen Gesichtsfeldhälften zwei Farben, die sich im Farbton zwar merklich, aber nicht sehr stark unterscheiden. Diese Farben werden erzeugt durch Farbkreisel, deren Fläche durch die Hilfslinsen H scharf auf die Eintrittspupillen des Photometers so abgebildet werden, dass jeweils ein etwa 1 cm großer Fleck der Kreiselscheibe wirksam ist. Die eine Kreiselscheibe (Festreiz) enthält einen Buntsektor mit einem gleichhellen Grausektor, dessen Größe bei der ersten Versuchsstufe willkürlich gewählt werden konnte, während er sich bei allen übrigen aus dem Ergebnis des vorherigen Versuches ergab.

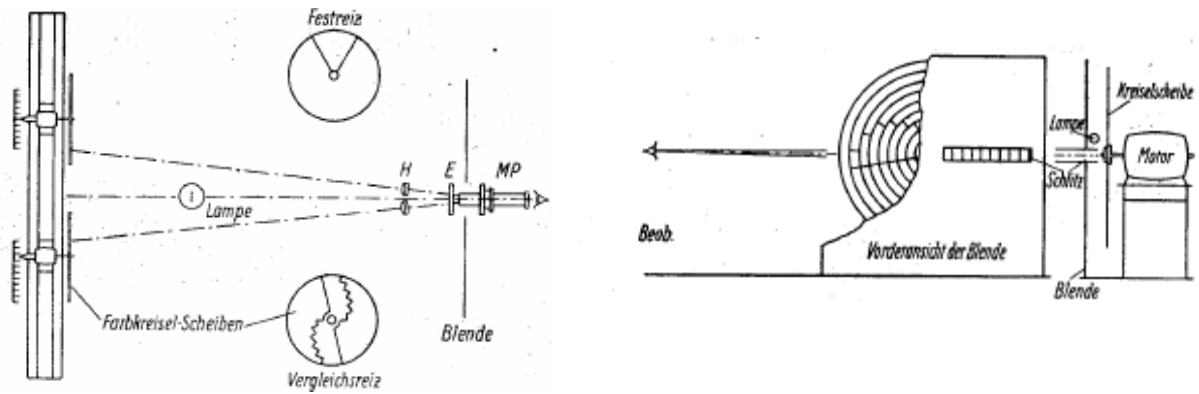


Abb. 3.3.6 Versuchsaufbau von Richter
 Links: Bestimmung einer Farbreihe empfindungsgemäß gleicher Sättigung nach der Vollreihenmethode
 Rechts: Versuchsanordnung für die Ermittlung gleichabständiger Sättigungsreihen

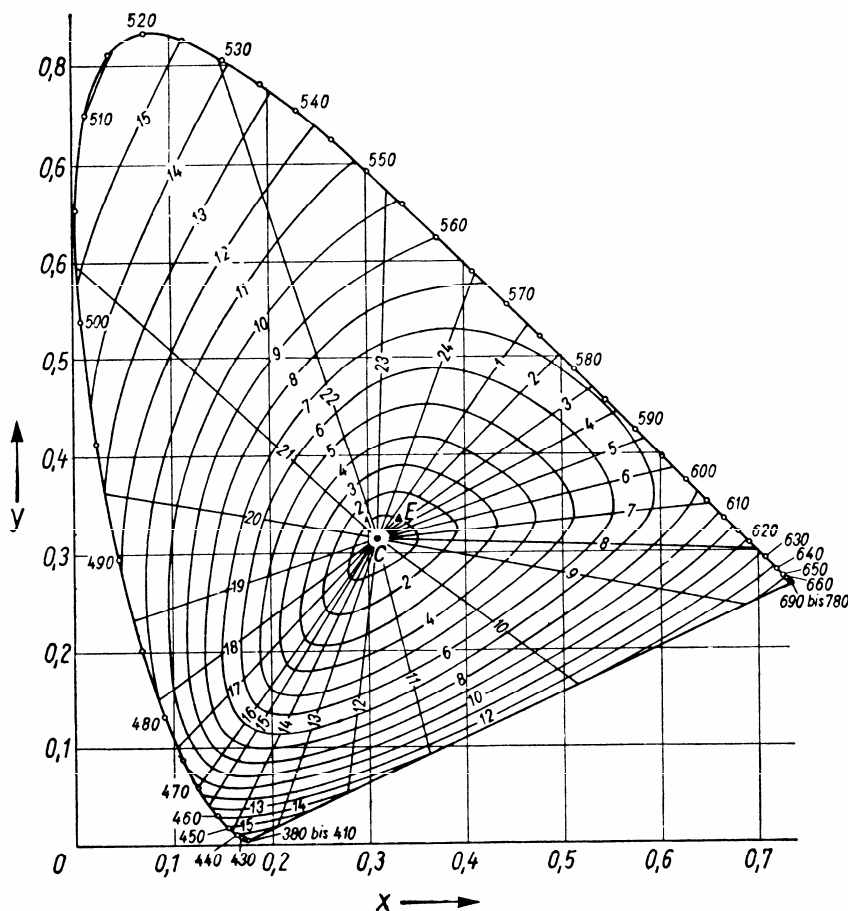


Abb. 3.3.7 Lage der Linien gleichen Bunttons und der Linien gleicher Sättigung in der Normfarbtafel (DIN 6164 Teil 1 nach Richter)[79]

Die zweite Kreiselscheibe trug eine etwas farntonverschiedene Buntscheibe und darauf einen gleichhellen Stufensektor in Grau. Die Stufenbreiten waren so gewählt, dass das Bild auf der Eintrittspupille des Photometers diese jeweils nur eine Stufe erfassen ließ. Der Motor mit dem Vergleichsreiz konnte nun seitlich so verschoben werden, dass verschiedene Stufen, also verschiedene Sättigungen des Vergleichsreizes in der zugehörigen Gesichtsfeldhälfte des Photometers erscheinen konnten. Die Versuchsperson hatte nun die Aufgabe zu beurteilen, ob die beiden im Gesichtsfeld erscheinenden Farben ihr gleichgesättigt erschienen oder nicht. Für Helligkeitsgleichheit war durch die Wahl der

Farbscheiben gesorgt; kleine Ausgleichungen durften auch am Photometer vorgenommen werden. Der Versuchsperson wurden nun in willkürlichem Wechsel die verschiedenen Sättigungsstufen des Vergleichsreizs wie sie durch die Stufenscheibe vorgesehen waren, einzeln dargeboten. In jedem einzelnen Falle hatte die Versuchsperson zu beurteilen, ob der Vergleichsreiz gesättigter, sättigungsgleich oder weißlicher gegenüber dem Festreiz erschien. Jeder der zehn vorgesehenen Sättigungsstufen, deren Grenzen in einem Vorversuch jeweils so bestimmt worden sind, dass die äußersten Stufen mit Sicherheit als zu gesättigt bzw. zu weißlich beurteilt wurden, erschien 20mal im Gesichtsfeld bei jeder Versuchsperson. Die Reihenfolge war willkürlich, aber ein für allemal festgelegt. Die Urteile der Versuchspersonen wurden protokolliert und zur Konstruktion je einer Kurve für das Urteil „zu gesättigt“ und „zu weißlich“ benutzt. Es wurden also die bekannten psychometrischen Funktionen der Vollreihenmethode aufgestellt.“

Nachdem so für Gelb die Sättigungslinie bestimmt war, wurden die weiteren Linien mit etwas geringerem Aufwand erstellt. Richter verwendete dazu eine große Kreisscheibe, die mit Farbscheiben gleichen Farbtons und gleichhellen Grauscheiben so besteckt war, dass sich eine Stufenscheibe mit beliebig veränderlichen Sektorenwinkeln in den einzelnen Stufen ergab und diese Scheibe wurde dann in der in der Abbildung 3.3.6 rechts gezeigten Apparatur verwendet:

„Bei Rotation der Scheibe erschien im Schlitz eine Folge von farbton- und helligkeitsgleichen Farben, deren Sättigungen durch Veränderung der Sektoren beliebig eingestellt werden konnten. Nun wurde als Anfangsfarbe der Reihe Unbunt und als sechste Stufe jene Sättigung eingestellt, die sich aus dem soeben geschilderten Versuch ergeben hatte. Die Aufgabe der Versuchsperson war es nun, die dazwischen liegenden fünf Stufen so einzustellen, dass eine gleichabständige Reihe entstand. Diese Reihe war auch über die sechste Stufe hinaus noch so weit aufzubauen, wie es die Sättigung des Buntfarbenaufstriches erlaubte.“

Das Ergebnis des Versuches sind die in der Abbildung 3.3.8 zu erkennenden Linien.

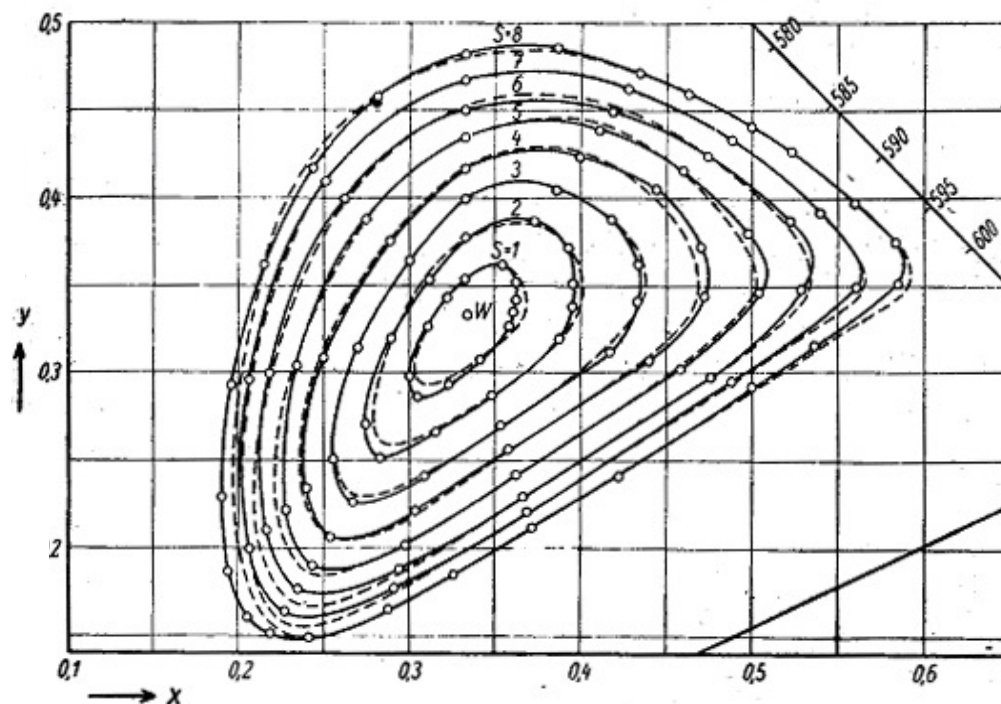


Abb. 3.3.8 Von M. Richter 1950 ermittelte Linien gleicher Sättigung in der Normfarbtabelle [82].

Vergleicht man die Abbildungen 3.3.7 und 3.3.8 so wird deutlich, dass Richter seinen Sättigungsbegriff zwischen 1950 und 1963 verändert hat. Während er in der Veröffentlichung von 1950 schreibt, dass man zur Schaffung von Stufen gleicher Sättigung „passende“ Bunttöne zusammenstellen muss, d. h. einen Farbkreis mit einem Gelb, das heller als das Blau ist, verwenden muss, stellt er in der Erläuterung zur DIN 6164 [81] Farben gleicher Helligkeit zusammen. Das lässt sich mit folgenden Zitaten

verdeutlichen: „Es braucht bloß an die Zusammenstellung Gelb-Blau erinnert zu werden, in der das Gelb erheblich heller sein muss als das gleich gesättigte Blau, wenn beide zueinander passen, einander gleichwertig sein sollen.“ [82]

„Der Versuchsperson wurde in einer Hälfte des Gesichtsfeldes eines Photometers eine bestimmte Farbe dargeboten. In der anderen Gesichtsfeldhälfte konnte ihr eine Reihe anderer Farben eines benachbarten Farbtons gezeigt werden. Diese Farben unterschieden sich in der Sättigung voneinander, während die Helligkeit konstant gehalten war.“ [81]

Dieser neue Sättigungsbegriff beinhaltet einerseits wissenschaftliche Exaktheit, indem genau festgelegt wird, welche Farben zu vergleichen sind, nämlich gleich helle, andererseits werden zu einem ziemlich satten Gelb zum Teil stark mit Weiß aufgehellte Farben gelegt. In der DIN 6164 wird darauf hingewiesen, dass der Farbkreis in Dunkelstufe 1 und Sättigungsstufe 6 gebildet wurde:

„Der Buntton T bezieht sich auf eine 24teilige, in sich zurücklaufende Folge von Bunttönen, die so ausgewählt sind, dass für eine Farbenfolge der Sättigungsstufe $S = 6$ und der Dunkelstufe $D = 1$ die Unterschiede von Farbe zu Farbe möglichst gleichgroß empfunden werden.“ (DIN 6164 Teil 1 Seite 2) Das ist aber insofern gar nicht möglich, als in Dunkelstufe 1 meist nur 2 oder 3 Sättigungsstufen vorliegen.

Die Ergebnisse seiner Untersuchungen aus den 60er Jahren sind in der Abbildung 3.3.9 zu sehen. Änderungen fallen besonders bei Gelb auf. Der Abstand der gemessenen Punkte gleicher Sättigung wächst mit zunehmender Sättigung, während bei seinen ersten Untersuchungen ein Sättigungseffekt erkennbar ist. Besonders deutlich kann man auch ohne nachzumessen eine Abnahme des Abstandes im Purpurbereich feststellen.

Diese Versuchsergebnisse wurden von Richter in das $L^*u^*v^*$ -System transformiert. In diesem System wirken die Linien ziemlich gleichabständig. Schaut man aber genau hin oder misst nach, so findet man im Purpurbereich mit zunehmender Sättigung kleiner werdende Abstände, während die Abstände im Gelb wachsen.

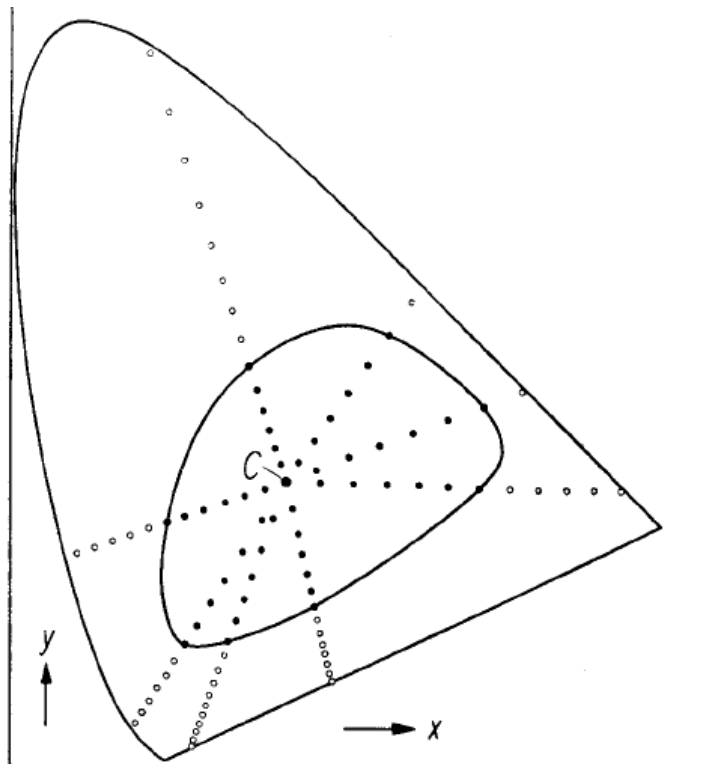


Abb. 3.3.9 1963 von M. Richter ermittelte Sättigungsstufen für Farben gleicher Helligkeit, dargestellt in der Normfarbtafel. Die acht Strahlen der untersuchten Bunttöne wurden in sechs Stufen gleichen Sättigungsunterschieds unterteilt (volle Kreise) und nach Abb. 3.3.10 extrapoliert (offene Kreise).

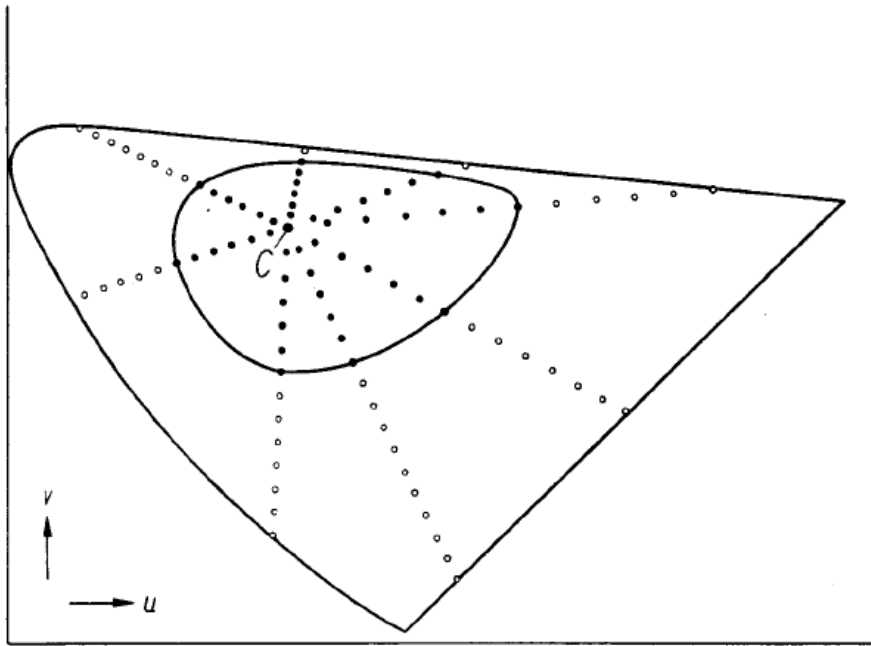


Abb. 3.3.10 Transformation der Messwerte von Abb. 3.3.4 in die die Luv Farbtafel [81]. Die Teilungspunkte auf den einzelnen Buntonstrahlen sind jeweils gleich weit voneinander entfernt.

Die beiden Abbildungen 3.3.9 und 3.3.10 sind aus den Sonderdrucken zur DIN 6164 [81] entnommen.

Nach Transformation in den $L^*u^*v^*$ Raum, kam Richter zu der Meinung, dass ein gleichabständiges System vorläge:

„Später hat man dann herausgefunden, dass diese Abstände, wenn sie in das UCS-Diagramm [...] übertragen werden, praktisch gleich werden. Allerdings bleiben sie auf den verschiedenen Farbtonstrahlen verschieden groß. Aber durch diese Gleichabständigkeit auf den einzelnen Farbtonstrahlen konnte man die Teilungspunkte ausgleichen und über die gefundene Kurve gleicher Sättigung hinaus noch extrapolieren“, wie das Abb. 3.3.10 zeigt.

In der gültigen DIN 6164 (1980/81) befindet sich dazu folgende Erklärung: „Die Einheit des Sättigungsabstandes $r_1 = r_6/6$ ist aus den Werten r_6 abgeleitet, die für die Farben der experimentell ermittelten Sättigungslinie $S = 6$ gelten. Diese Festlegung beruht auf der experimentell gefundenen Tatsache, dass die Sättigungsstufen auf den Buntonstrahlen in der Farbtafel des $L^*u^*v^*$ -Farbenraumes (CIE 1976) eine lineare Teilung ergeben.“

Das bedeutet, die Abstände werden in unzulässiger Weise normiert. Das könnte die Erklärung für die gebogenen Kurvenverläufe sein.

Die Abbildung 3.3.11 zeigt einen Überblick über die 24 Farbtafeln, die zur DIN 6164 gehören. Es gibt diese 24 Farbtafeln in matter und glänzender Ausführung. Abbildung 3.3.11 bezieht sich auf die Ausgabe der DIN 6164 von 1953. Bei der Ausgabe von 1980/1981 haben die einzelnen ausgefärbten Bunttöne andere maximale Sättigungsstufen: So ist z. B. Gelb (T2) weiterhin bis Stufe 6 ausgefärbt, während Rot (T7) und Grün (T21) jetzt in 8 Stufen ausgefärbt vorliegen. Gelb T1 besitzt jetzt zwei siebte Kärtchen.

Die eigentlichen Farb-Muster der Norm sind allerdings 1987 zurückgezogen worden. Das heißt, zur Zeit sind nur die Farbkoordinaten genormt.

Die Farbtonunterschiede innerhalb der einzelnen Seiten machen Probleme bei der visuellen Beurteilung. Diese wurden allerdings von Richter bewusst in Kauf genommen, um für die Bunttöne als Geraden in der x- y Ebene zu haben. Das heißt, es wird so getan, als ob sich bei Weiß- oder Schwarz- Zumischung der Bunton nicht verändert. Er ändert sich aber deutlich. Abb. 1.2.8 zeigt den tatsächlichen Verlauf der Linien gleichen Buntons. Bei der Beurteilung der Sättigung der Farbkärtchen sieht man jeweils die gesamte Farbe, einschließlich Buntonunterschied und Helligkeitsunterschied. Das macht die Beurteilung der Sättigung nicht einfach.

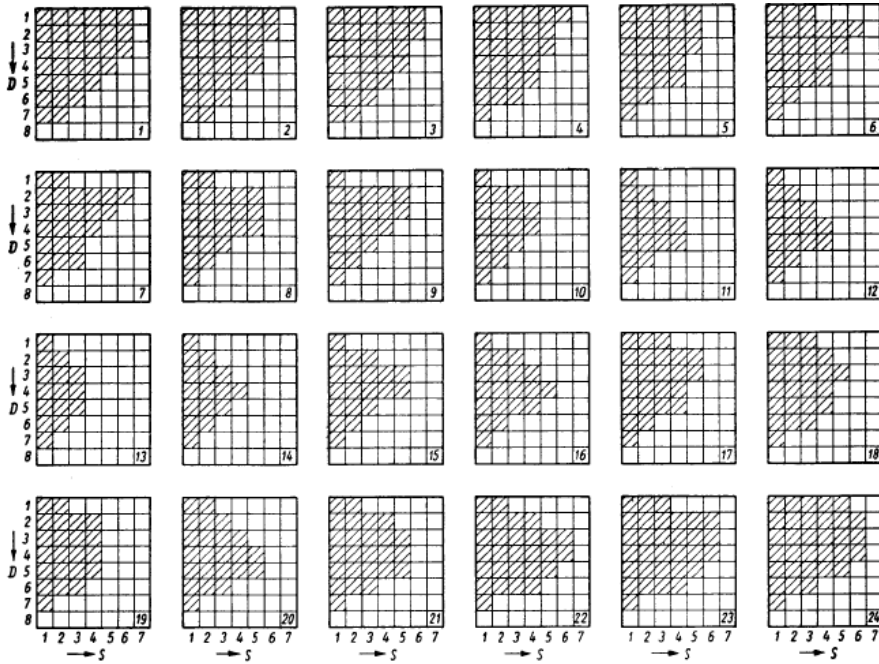


Abb. 3.3.11 Ausgefärbte Muster in den Ebenen der DIN 6164 in der ersten Version nach Richter[81]

In Abb. 3.3.7 sind die gewählten Geraden für die 24 Bunttöne zu erkennen.

Es fällt auf, dass der Buntton 7 (Rot) 8 Sättigungsstufen besitzt, während die gelben Bunttöne (T2 und T3) nur 6 besitzen. Dies obwohl im CIELAB-System Gelb als besonders bunt eingestuft wird.

Dass die DIN 6164 im gelben Bereich nur maximal 7 Sättigungsstufen hat, liegt vermutlich an der Herangehensweise von Richter und kann nur durch das Ziel, Farben gleicher Helligkeit zu vergleichen, erklärt werden. Zu einem relativ satten Gelb sind nicht für alle Bunttöne passende satte Pigmente vorhanden. Bei dunklen Farben können prinzipiell keine passend hohen Sättigungsstufen gefunden werden. Es müssen aufgehellte ausgewählt werden. Auf diese Weise ist erklärbar, dass ein System entstanden ist, das für Gelb deutlich weniger Stufen als für alle anderen Farben zulässt.

Vergleicht man die Ausdehnung der Linie gleicher Sättigung in der Sättigungsstufe 6 in Abbildung 3.3.8 mit der Linie in Abbildung 3.3.9, misst die Längen der Geraden entlang der Bunttonlinien für T15 und T1 und bildet das Verhältnis der Längen von T15/T1, so ergibt sich für den ersten Sättigungsbegriff ein Längenverhältnis von 1,29; während sich für den neuen Sättigungsbegriff die Blau- und Gelb-Achse um den Faktor 1,09 unterscheiden. Der an die Messungen angelegte, sozusagen gelbe Maßstab, hat sich also mit dem neuen Sättigungsbegriff verlängert. Man ist mit Sättigungsstufe 7,5 bei T1 am Rande der Normfarbtafel (Abb. 3.3.7). Es ist sozusagen für höhere Sättigungswerte gar kein Platz mehr da, bzw. man gelangt sehr nahe an die Optimalfarbe.

Die TGL 21579 geht von einer gleichen Anzahl von Stufen für alle Bunttöne aus (Abb. 3.3.12). Vergleicht man Abbildung 3.3.12 mit Abb. 3.3.7 so sieht man den großen Unterschied zwischen der DIN 6164 und der TGL 21579. Im Falle der Weißzumischung ist die Sättigung mit der Reinheit gleichzusetzen. Der Linienvverlauf müsste gleich sein. Man sieht aber drei deutliche Unterschiede:

- Zahl der Linien für verschiedene Bunttöne
- Sättigungseffekte in den Linien der TGL 21579
- gleichabständige Linien der DIN 6164.

Arbeitet man mit Rechenvorschriften der TGL 21579, so man kann Dreiecke für die einzelnen Farbtöne konstruieren. Abb. 3.3.13 zeigt ein solches Dreieck.

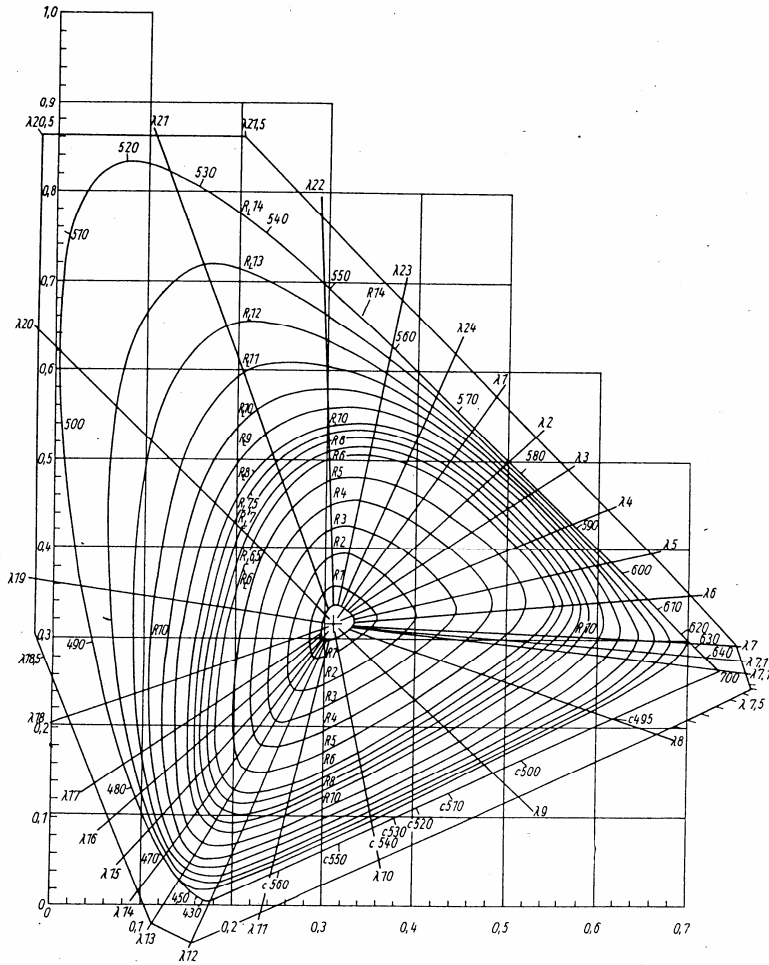


Abb. 3.3.12 Reinheitsstufen in der TGL 21579

Bei dieser Dreieckskonstruktion nach den Vorschriften der TGL kann das Millimeterpapier heutzutage durch die Arbeit mit Excel ersetzt werden. Verwendet man die gewonnenen Farbpunkte und trägt sie in ein Diagramm $L = f(C)$ ein, so ergeben sich Dreiecke wie in Abbildung 3.3.13.

Die Helligkeitsstufe H_N ist mit dem Normspektralwert Y über folgende Gleichung verknüpft:

$$H_N = \frac{10}{2,10} (\log Y + 0,17) \quad (3.1)$$

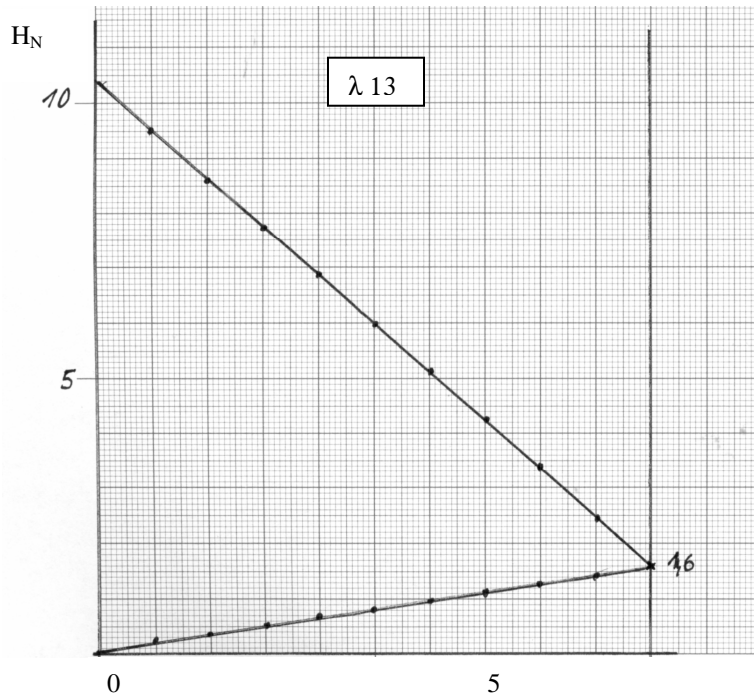


Abb. 3.3.13 Helligkeitsstufe H in Abhängigkeit von der Reinheitsstufe R für den Bunton 13 nach M. Adam (Eigenhelligkeit der Vollfarbe $H_N = 1,6$)

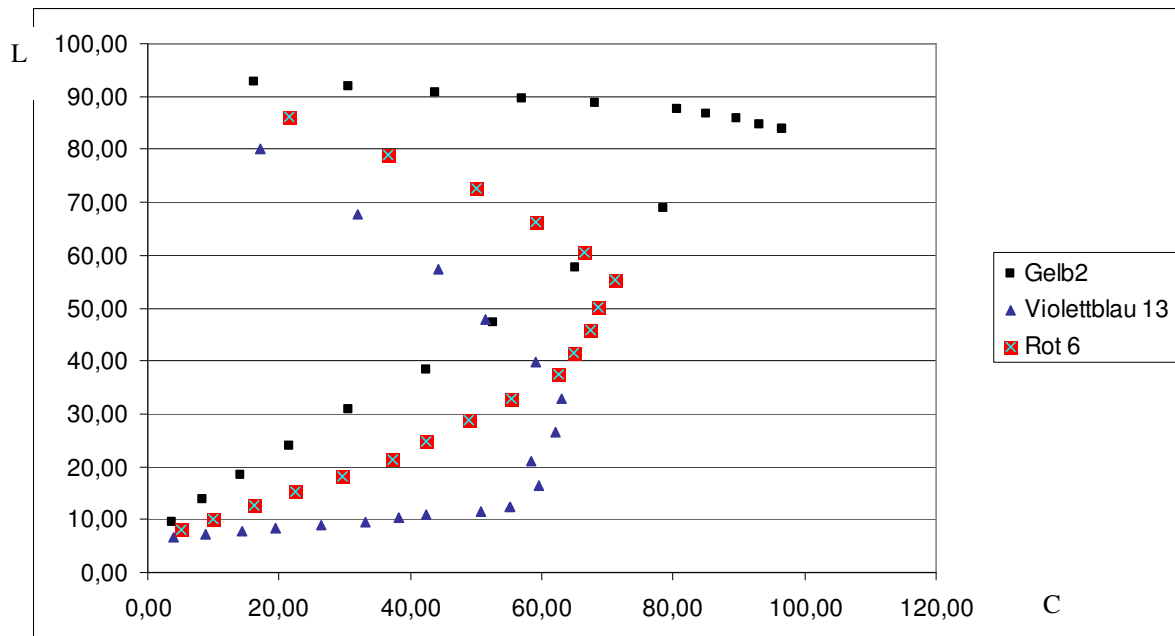


Abb. 3.3.14 Adamsche Dreiecke konstruiert nach den Vorschriften der TGL 21597 und den Daten der TGL 21597 für die Farben 2, 13 und 6 nach Transformation in die LC-Ebene

Eigentlich sollten sich bei der Darstellung in der LC-Ebene Dreiecke wie in Abb. 2.1.1 ergeben. Man erkennt in Abb. 3.3.14 aber abgerundete Dreiecke, wobei das gelbe Dreieck deutlich spitzer ist als das violettblaue und das rote. Das bedeutet, die Reinheitslinien haben einen etwas zu starken Sättigungseffekt. Man könnte damit sagen, die Wahrheit der Sättigungslinien muss zwischen der DIN 6164 und der TGL 21597 liegen.

Zur Überprüfung der Formel für S^+ muss die DIN 6164 ausgewählt werden, denn nur die DIN hat Sättigungsstufen, die TGL 21579 ist ein Reinheitssystem.

Dass unterschiedlich viele Sättigungsstufen in den verschiedenen Bunttönen vorkommen, ist für die Praxis zunächst nicht so ausschlaggebend, weil die meisten Körperfarben höchstens bis Stufe 6, 7 oder 8 vorliegen.

In der TGL21597 ist der Bereich der Körperfarben vom Bereich der Lichtfarben abgegrenzt. Bei der Arbeit mit den Zahlenwerten der DIN 6164 muss man beachten, dass für viele der enthaltenen Zahlentripel in der Realität keine entsprechenden Körperfarben vorkommen.

Zum Beispiel gibt es beim Buntton Rot (T7) in Dunkelstufe 1 nur zwei rosa Felder, d. h. nur zwei Sättigungsstufen. Mit der Tabelle lassen sich aber für Dunkelstufe 1 (zartes rosa) für sieben Farben xyz-Werte entnehmen und damit Lab-Werte berechnen.

3.3.3 Überprüfung der Formel für S^+ an Hand der DIN 6164

Der erste visuelle Eindruck der Autorin von den Charts der DIN 6164 ist, dass die Abstufung der Muster in den Spalten sehr ausgewogen ist, dagegen erscheinen die untersten Zeilen teilweise zu fein gestuft. Möglicherweise ein subjektiver Eindruck, denn die Charts wurden von einer großen Zahl von Personen abgestimmt.

Betrachtet man die erste Seite (Buntton T1) der DIN 6164, so fällt visuell ein starker Sprung zwischen dem gelben Chart 6 und dem gelbgrünen Chart 7 auf.

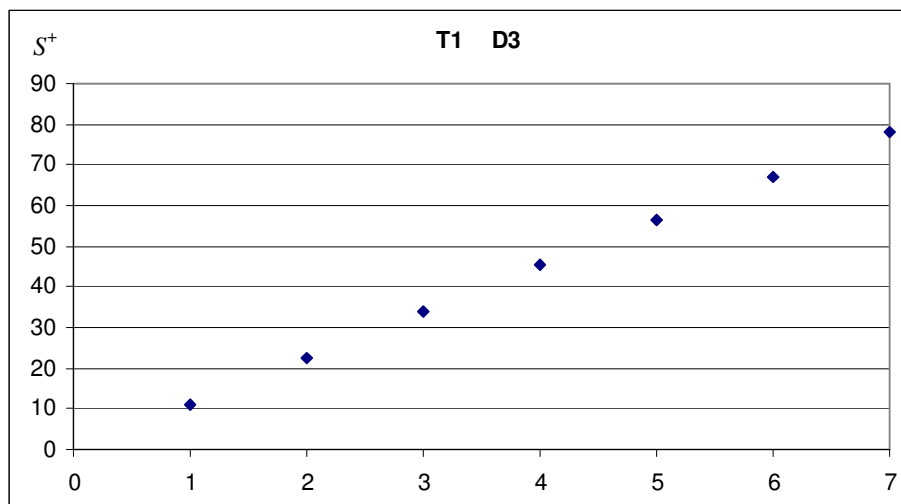


Abb. 3.3.15 Berechnete Sättigung S^+ in Abhängigkeit von den Sättigungsstufen für Gelb (T1: D3)

Der Sprung ist so groß, als gehörten noch zwei Charts dazwischen. Trotzdem passen berechnete Sättigung S^+ und die Sättigungsstufe nach Richter sehr gut zusammen (Abb. 3.3.15). Der visuell stark abweichende Eindruck kommt vermutlich durch den Bunttonsprung von Gelb nach Gelbgrün zustande. Man muss bei visuellen Urteilen auf dieses Problem achten. Das Problem der Bunttonabweichungen wurde von Richter ja bewusst in Kauf genommen, um in der Normfarbtafel Geraden für den jeweiligen Buntton zu haben.

Der Verlauf der berechneten Sättigung von Rot (T7:D3) ist mit allen, nach der DIN 6164 möglichen und in der vorliegenden DIN 6164 auch ausgefärbten, 8 Sättigungsstufen in den Abbildungen 3.3.16 und 3.3.17 zu sehen.

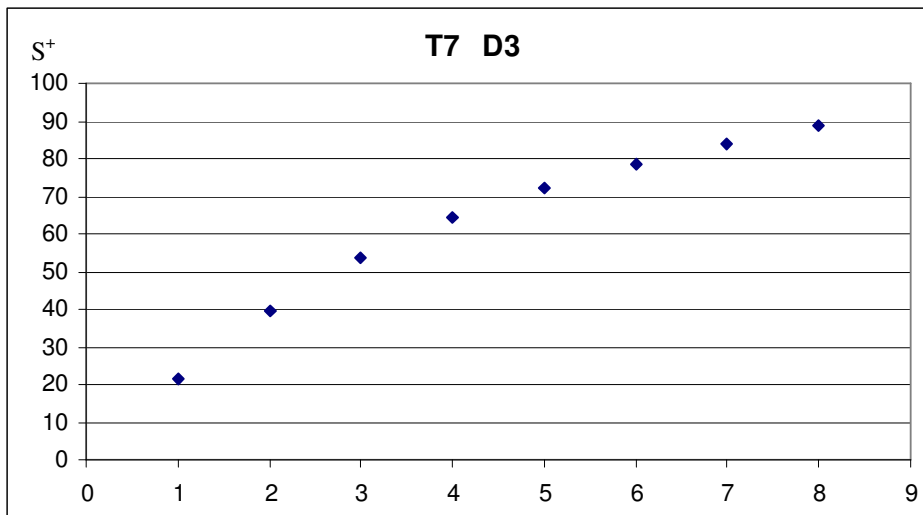


Abb. 3.3.16 Berechnete Sättigung S^+ in Abhängigkeit von den Sättigungsstufen für Rot (T7: D3)

Betrachtet man die ausgefärbten Charts so fällt auf, das die visuellen Abstände am Anfang größer als bei hohen Sättigungsstufen sind. Im Grunde entspricht der gebogene Verlauf der Kurve dem erst starken und dann schwächeren Anstieg der Sättigung der Muster, den man wahrnimmt.

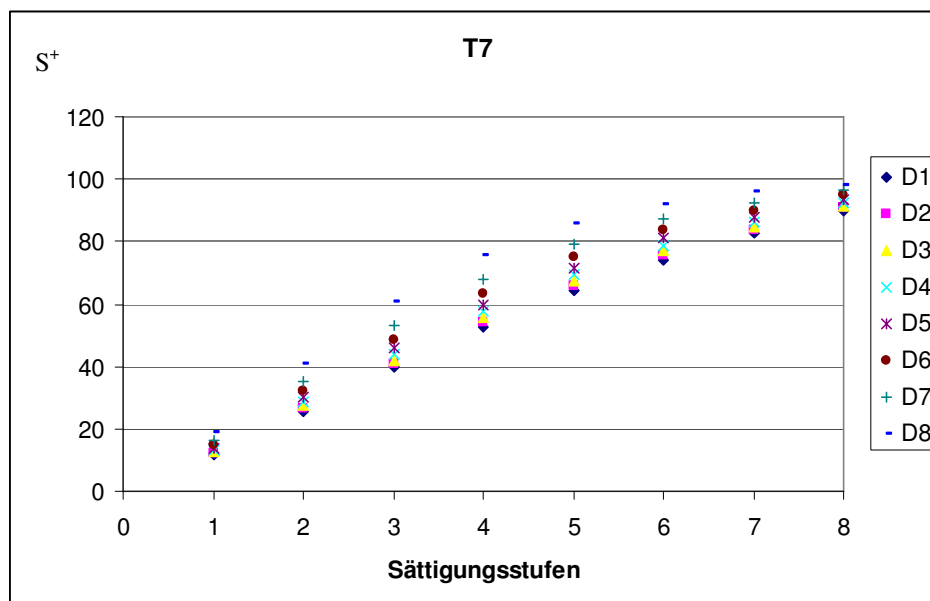


Abb. 3.3.17 Berechnete Sättigung S^+ für Rot T7 in Abhängigkeit von den Sättigungs- und Dunkelstufen der DIN 6164

Die achte Dunkelstufe wurde in der Darstellung weggelassen, weil sie in der Praxis nur 2 Charts besitzt. In der siebenten Dunkelstufe sind die visuellen Abstände sehr gering. Man kann kaum Unterschiede wahrnehmen.

Es wurden nun die Abbildungen 3.3.8 und 3.3.9 vergrößert ausgedruckt, die Abstände der Linien gemessen und damit die Sättigungsstufen korrigiert. Vergleiche dazu die Abbildung 3.3.18 und die Abbildungen und Tabellen im Anhang.

Für Blau T17 lag ebenfalls ein sehr gebogener Verlauf vor. Blau, mit den Zahlenwerten der DIN 6164, die bis Stufe 10 reichen, ergibt den Verlauf gemäß Abbildung 3.3.19. Ausgefärbt liegt T17 Blau nur bis zur 6. Stufe vor.

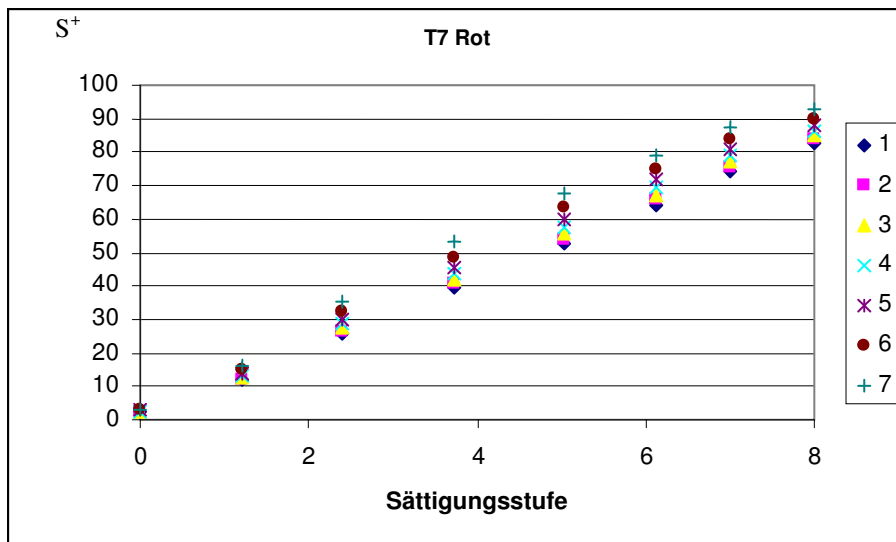


Abb. 3.3.18 Berechnete Sättigung S^+ für Rot T7 mit korrigierten Abständen der Sättigungslinien über den Sättigungsstufen für sieben Dunkelstufen

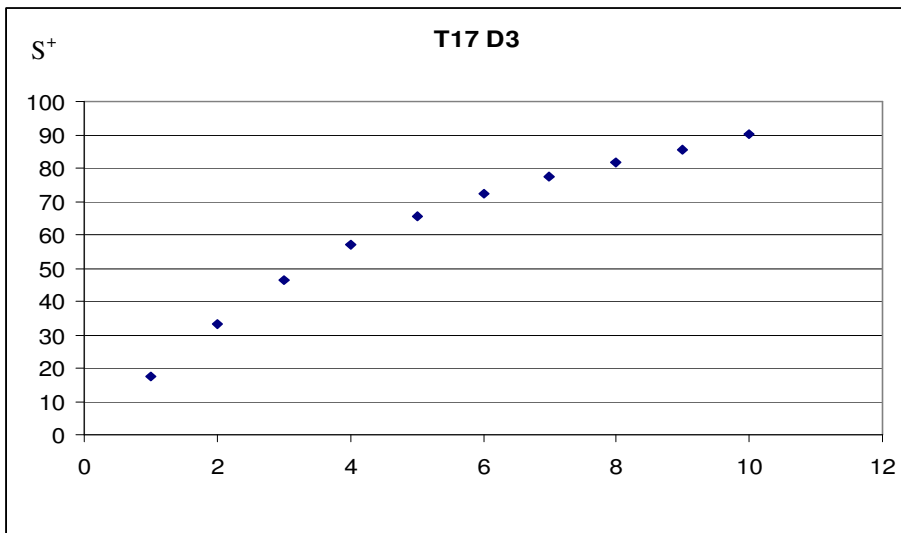


Abb. 3.3.19 Berechnete Sättigung S^+ über den Sättigungsstufen der DIN 6164 für T17 Dunkelstufe 3

Der leicht gekrümmte Verlauf entspricht wieder dem visuellen Eindruck der Autorin, der bis zur Stufe 6 vorliegenden Muster. In Abbildung 3.3.19 erkennt man deutlich abnehmende Abstände der Sättigungslinien. Durch Korrektur der Abstände wird der gekrümmte Verlauf beseitigt (Abb. 3.3.20).

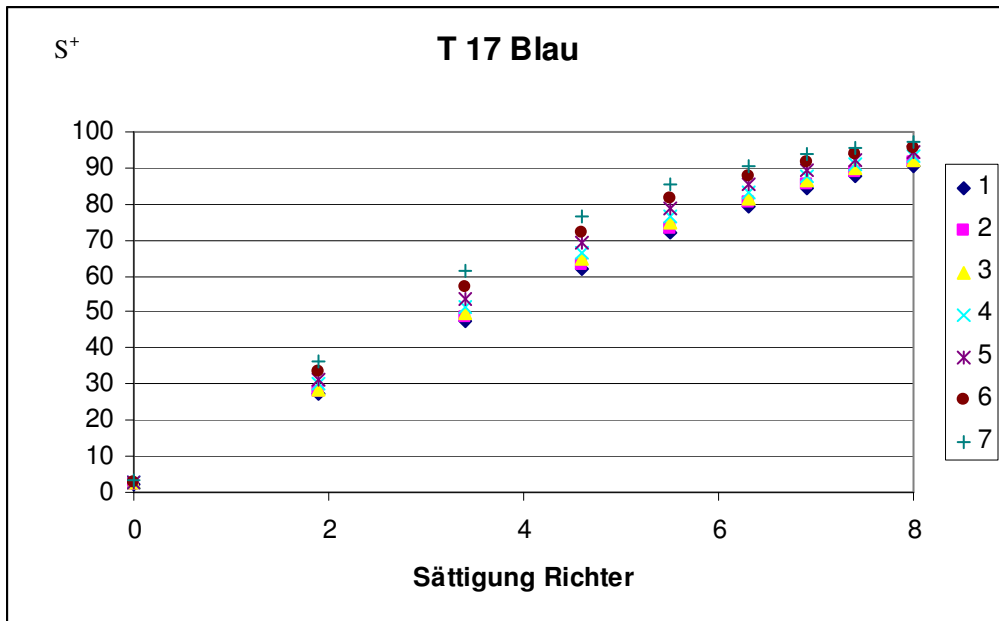


Abb. 3.3.20 Berechnete Sättigung S^+ über den Sättigungsstufen der DIN 6164 für T17 Dunkelstufe 3 mit korrigierten Abständen.

Grün sollte noch gesondert betrachtet werden, weil im grünen Bereich nach Richter besonders viele Stufen möglich sind. Die folgende Abbildung zeigt Dunkelstufe 3, in der 6 ausgefärbte Muster vorliegen.

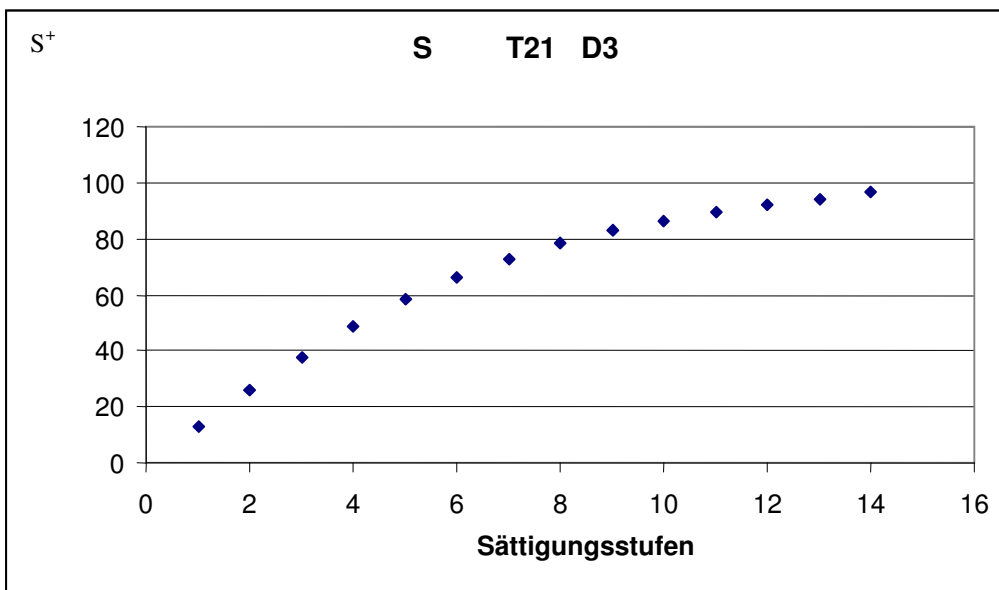


Abb. 3.3.21 Berechnete Sättigung S^+ in Abhängigkeit von den Sättigungsstufen für Grün (T21: D3)

Zwischen 2 und 5 wirkt die Stufung linear. Die Stufe zwischen 1 und 2 wirkt etwas größer. Die Kurve ist in dem tatsächlich vorliegenden Bereich ziemlich linear.

Nach Abstandskorrektur ergibt sich der Verlauf gemäß Abb. 3.3.22.

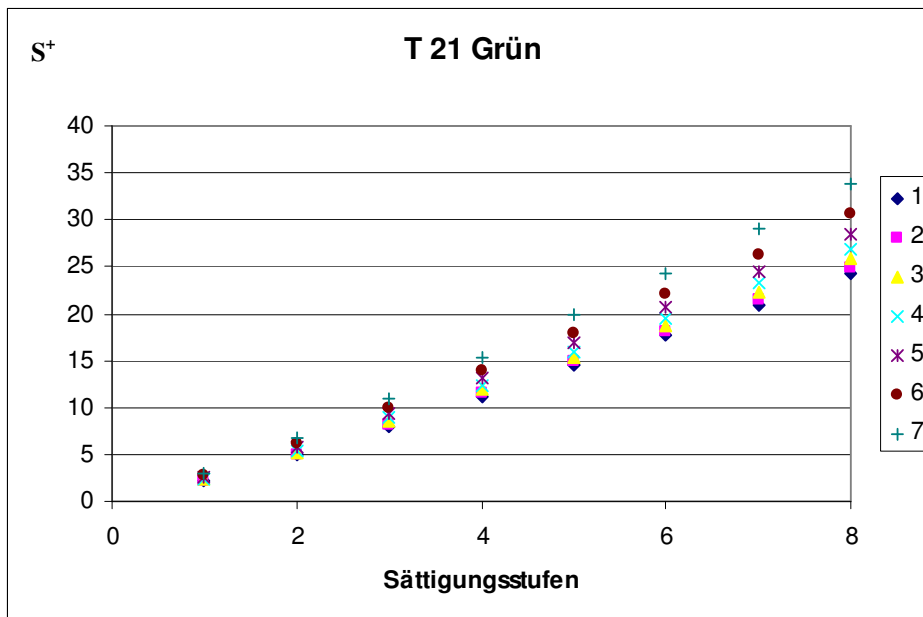


Abb. 3.3.22 Korrigierte Abstände für den Buntton T21; Sättigung S^+ in Abhängigkeit von der Sättigungsstufe

Der gebogene Verlauf in Abb. 3.3.21 lässt sich mit den korrigierten Abständen beseitigen.

In der Abbildung 3.3.23 wird der Verlauf der Helligkeit über der Buntheit dargestellt. Das erscheint interessant für diesen Fall der besonders starken Extrapolation gleichgroßer Abstände hinein in den nicht untersuchten Bereich.

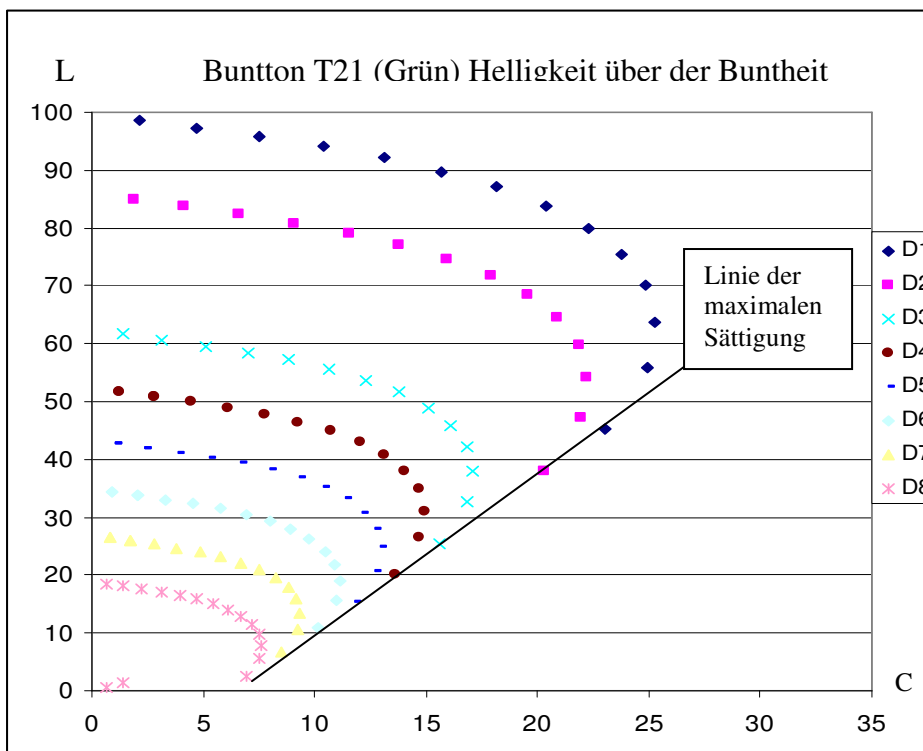


Abb. 3.3.23 Buntton T21 (Grün) Helligkeit L in Abhängigkeit von der Buntheit. Man erkennt, dass der Zusammenhang nicht eindeutig ist: Bei hoher Buntheit gibt es zwei Werte für die Helligkeit.

Es sind die 14 Sättigungsstufen und die Dunkelstufen 1 bis 8 dargestellt. Die Abbildung ist uneindeutig. Bei hoher Buntheit gibt es zwei Werte für die Helligkeit.

Außerdem erkennt man, dass sich, würde man in die Abbildungen Sättigungslinien eintragen (Verbindungslien der Werte gleicher Sättigung), diese im negativen Bereich schneiden würden und

nicht im Koordinatenursprung, wie man es erwartet hätte. Das stimmt damit überein, dass die visuellen Abstände in den hohen Dunkelstufen wesentlich kleiner als bei niedrigen Dunkelstufen sind.

In die Abb. 3.3.23 wurde die Linie der maximalen Sättigung (Sättigungsstufe 14) eingetragen.

Buntton T23 ist noch interessant, weil er in dem Bereich liegt, in dem die Korrekturen mittels Abb. 3.3.8 bzw. 3.3.9 entgegengesetzt verlaufen müssten. Während es nach dem ersten Sättigungsbegriff in Abb. 3.3.8 konstant zu fallenden Abständen kommt, zeigt Abb. 3.3.9 zunehmende Abstände entlang der Bunttonstrahlen in Richtung zunehmender Sättigung im hellen Bereich der Normfarbtafel.

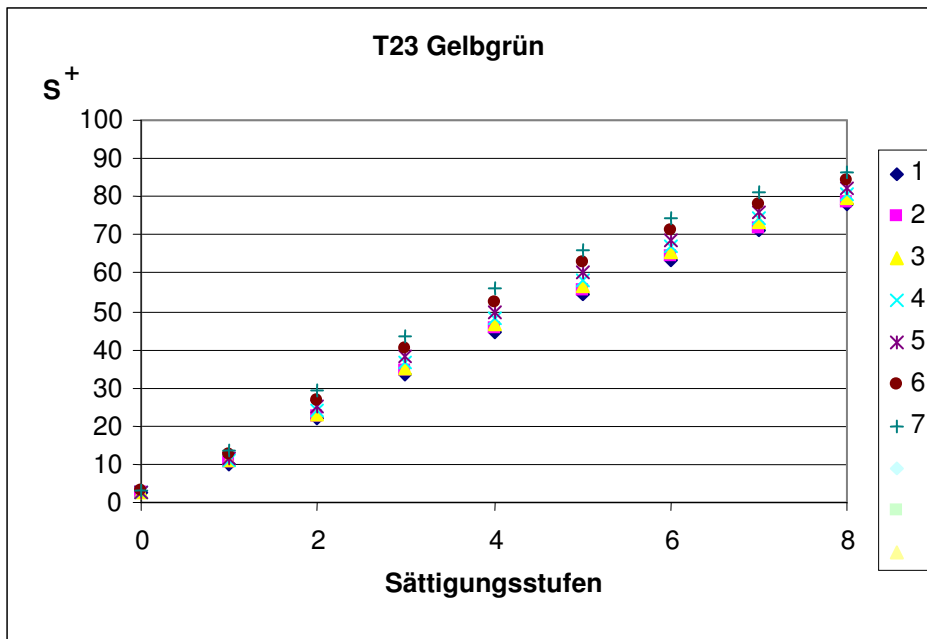


Abb.3.3.24 Berechnete Sättigung S^+ in Abhängigkeit von den Sättigungsstufen für Gelbgrün (T1:D3) mit unkorrigiertem Verlauf der Sättigungslinien

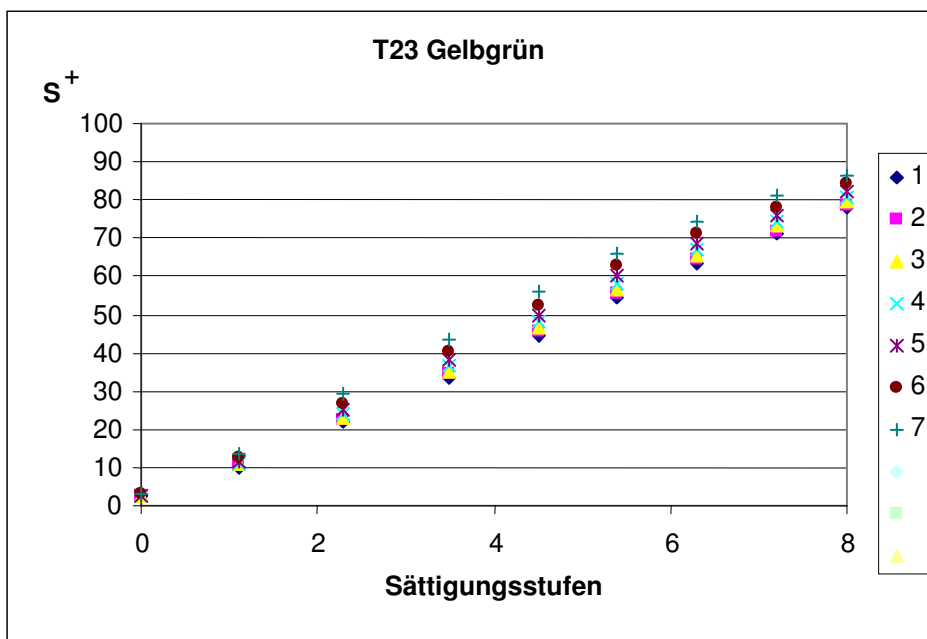


Abb. 3.3.25 Berechnete Sättigung S^+ in Abhängigkeit von den Sättigungsstufen für Gelbgrün (T1:D3). Mit korrigierten Abständen der Sättigungslinien (aus Abb. 3.3.8)

Man erkennt, dass eine Korrektur mit Hilfe der Abstände in Abbildung 3.3.9 eine Korrektur in der falschen Richtung ergeben würde. Der hier neu vorgeschlagene Sättigungsbegriff S^+ entspricht dem bisherigen Sättigungsbegriff. Das ist auch zu erwarten, da er aus der alten Definition von Richter abgeleitet wurde.

Eine Korrektur ist auch bei allen Abständen im purpur- und violettblauen Bereich nötig. Abb. 3.3.26 zeigt als Beispiel T15 nach der Korrektur der Abstände.

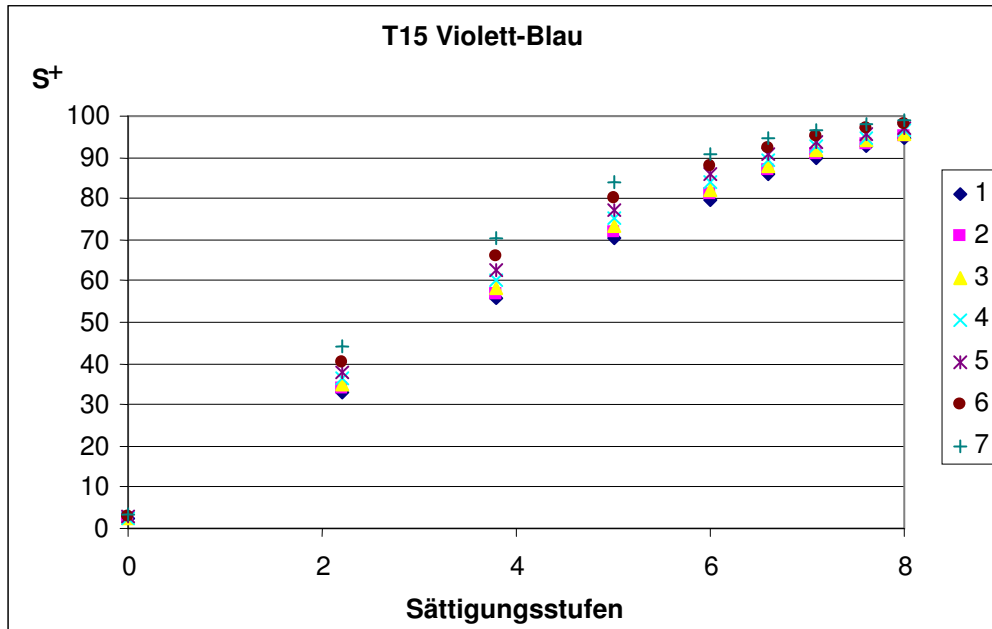


Abb. 3.3.26 Sättigung S^+ über den Sättigungsstufen für Violett-Blau nach Korrektur der Abstände mit Hilfe der Abb. 3.3.8

Die Abbildung 3.3.27 zeigt einen Gesamtüberblick über alle Bunttöne. Die berechneten Sättigungswerte wurden für Dunkelstufe 0 bzw. für die Optimalfarben über der Zahl des Bunttones aufgetragen.

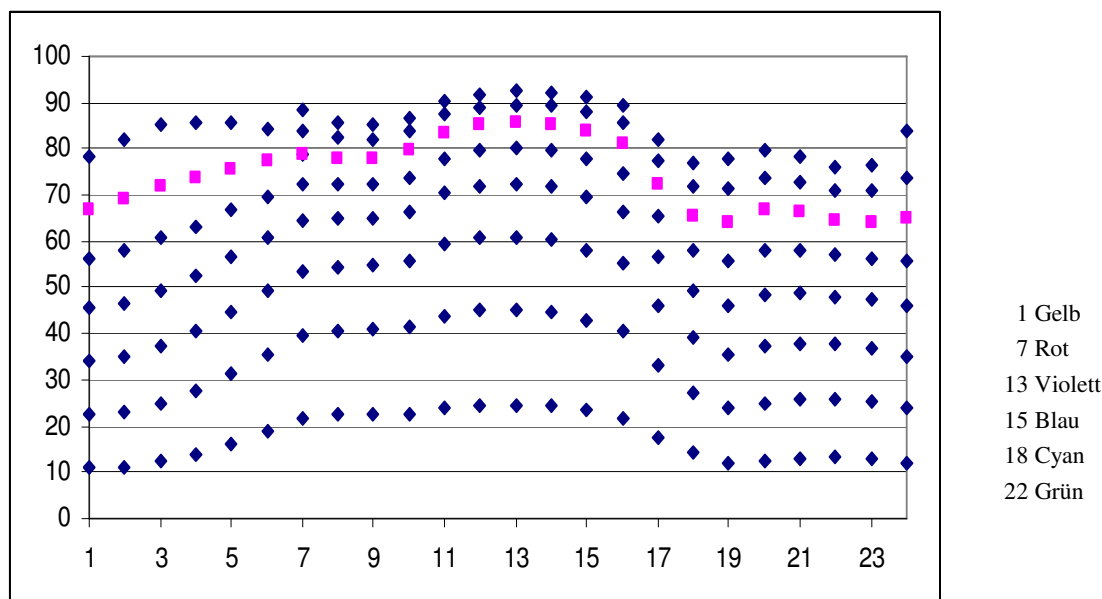


Abb. 3.3.27 Errechnete Sättigung S^+ über der Bunttonzahl (7 bzw., wo vorhanden, 8 Sättigungsstufen berücksichtigt), Dunkelstufe DO bzw. Optimalfarben.

In Abb. 3.3.27 ist die Sättigungsstufe 6 farblich hervorgehoben, weil es die von Richter empirisch als Linie gleicher Sättigung bestimmte Stufe ist.

In Abb. 3.3.28 sind alle in der DIN vorgesehenen Sättigungsstufen in jeweils vier Dunkelstufen dargestellt. Man erkennt, dass hohe Dunkelstufen eine höhere Sättigung S^+ als helle ergeben. Weiterhin erhält der Rot-Violette Bereich höhere Werte.

Für die real existierenden Muster in der von Richter visuell gut untersuchten Farbe Gelb (Abb. 3.3.3) hat sich keine Abhängigkeit der berechneten Sättigung von der Dunkelstufe ergeben.

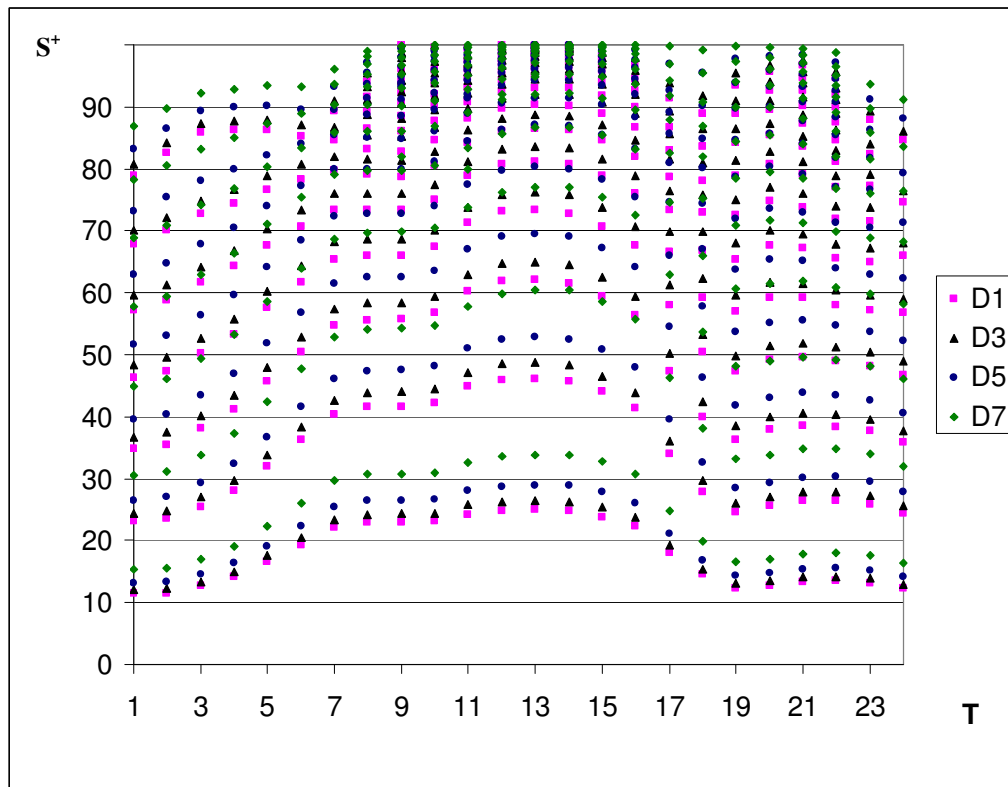


Abb. 3.3.28 Errechnete Sättigung S^+ über der Bunttonzahl (alle Sättigungsstufen der DIN 6164 berücksichtigt), vier Dunkelstufen.

Berechnet man den Mittelwert aus den 24 Werten für die Sättigung S^+ für die Sättigungsstufe 6, Dunkelstufe 0, so ergibt sich:

$$S^+_m = 74,25 \text{ mit einer Standardabweichung von } \sigma = 7,64.$$

In Abbildung 3.3.29 ist der Verlauf des Abstandes der Sättigungslinien über dem Buntton aufgetragen.

Während nach dem alten Sättigungsbegriff die Abstände der Sättigungslinien vom Unbuntpunkt aus gesehen, abnehmen, fällt beim neuen Sättigungsbegriff im Gelb und im grüngelben Bereich eine Zunahme des Abstandes der Sättigungslinien auf (Abb. 3.3.30). Beim alten Sättigungsbegriff gibt es innerhalb der Bunttonlinien bei einigen Bunttönen Stellen, an denen keine Abnahme erfolgt, so bei den Tönen 5, 19 und 21.

Die Kurvenverläufe in Abb. 3.3.29 haben zwei Maxima, bei Bunton T1 und T15 und zwei Minima bei T7 und T21. Ein ähnlicher Kurvenlauf ist auch für den Reinheitsgrad in Abhängigkeit von Bunton bei Adam zu finden [2]

Abb. 3.3.30 zeigt den Verlauf des Abstandes der Sättigungslinien über dem Buntton für den neuen Sättigungsbegriff. Betrachten wir Abb. 3.3.30, so sehen wir ein Maximum von T11 bis T15 (Violett bis Blau) und das Minimum erstreckt sich von Gelbgrün (T22) nach Gelb T1 (Gelb).

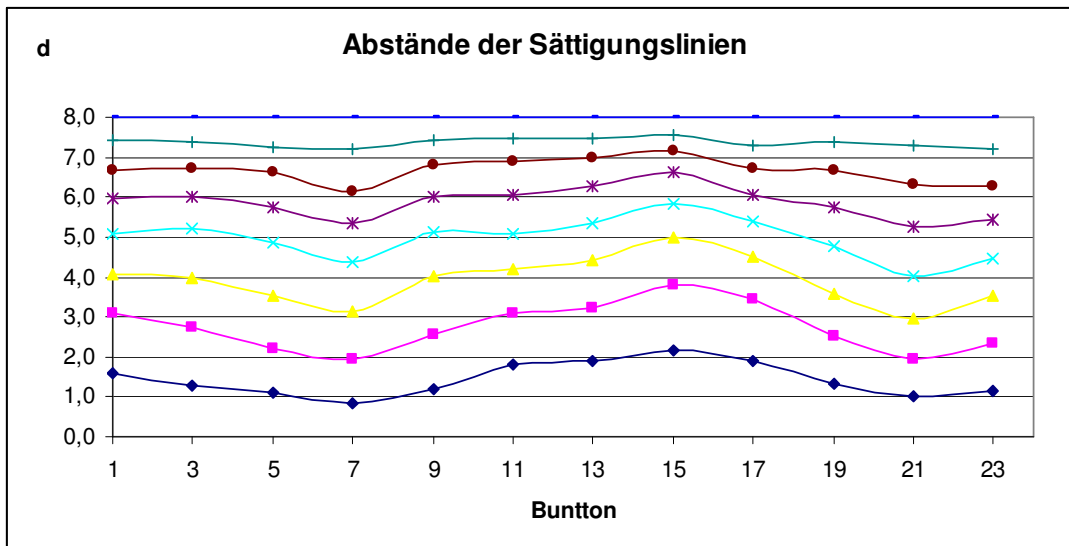


Abb. 3.3.29 Verlauf der Abstände der Sättigungslinien vom Unbuntpunkt in der xy-Ebene über dem Buntton, normiert auf 8 für die Sättigungsstufe 8. Die Darstellung beginnt bei Gelb T1.

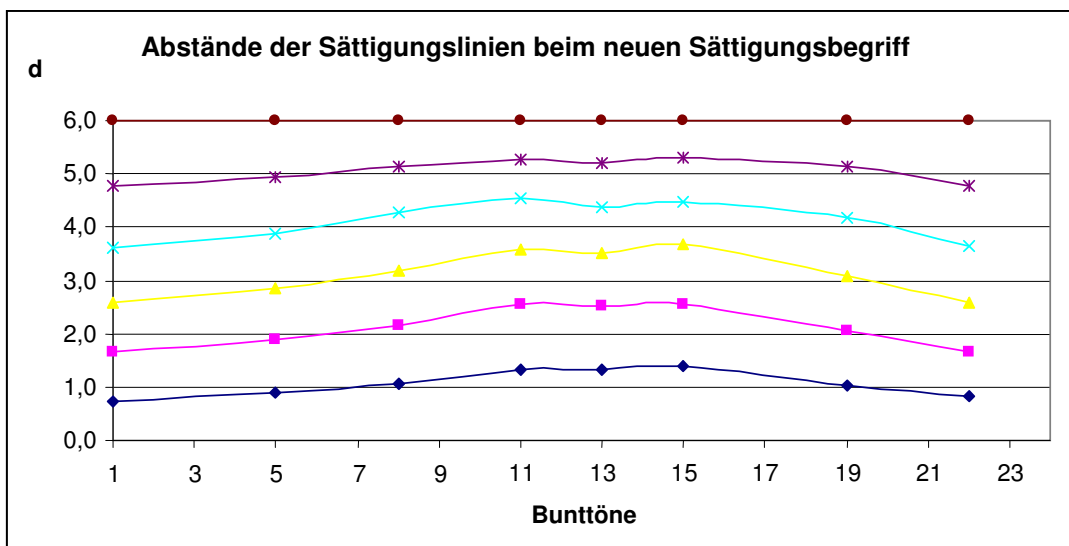


Abb. 3.3.30 Verlauf der Abstände der Sättigungslinien vom Unbuntpunkt über dem Buntton, normiert auf 6 für die sechste Sättigungsstufe. Die Darstellung beginnt bei Gelb T1.

Keinesfalls kann man aber die Abstände innerhalb der einzelnen Bunttonlinien einfach gleich machen.

Es liegt somit mit der DIN 6164 eine umfangreiche Datensammlung vor, die von gleichen Abständen der Sättigungslinien ausgeht. Das ist eine Unkorrektheit, die korrigiert werden müsste.

Der hier neu entwickelte Sättigungsbegriff mit der Formel für S^+ , deckt sich mit dem alten Sättigungsbegriff, wie bei der Betrachtung von Grüngelb gezeigt werden konnte.

Es ist nun noch die Frage der Abhängigkeit der Sättigung vom Buntton zu klären. Wie oben zu sehen, besonders in Abb. 3.3.28, werden mit S^+ für den Bereich Rot-Violett größere Werte gemessen als für die anderen Bunttöne.

Um zu entscheiden, ob S^+ eine mögliche Abhängigkeit der Sättigung vom Buntton nicht berücksichtigt oder ob die Abweichungen möglicherweise andere Ursachen haben, wurde noch ein weiteres System betrachtet. Es wurde der Adamsche Farbkreis ausgemessen. Das Ergebnis der Messung ist in der

Abbildung 3.3.31 zu sehen. Auch dort sehen wir größere Sättigungswerte im Rot-Violetten Bereich (Buntton 10 bis 14). Die Bunttöne werden auch bei Adam von Gelb aus gezählt.

Was an dem Adamschen Kreis auffällt, ist besonders schwaches Grün. Die Bunttöne 16 und 17 haben nur Chroma-Werte von 31.

Es ist anhand dieses auch visuell nicht gleich satt wirkenden Farbkreises nicht zu entscheiden, ob die Formel im rot-violetten Bereich zu große Werte liefert und damit einen bunttonabhängigen Korrekturfaktor benötigt oder nicht.

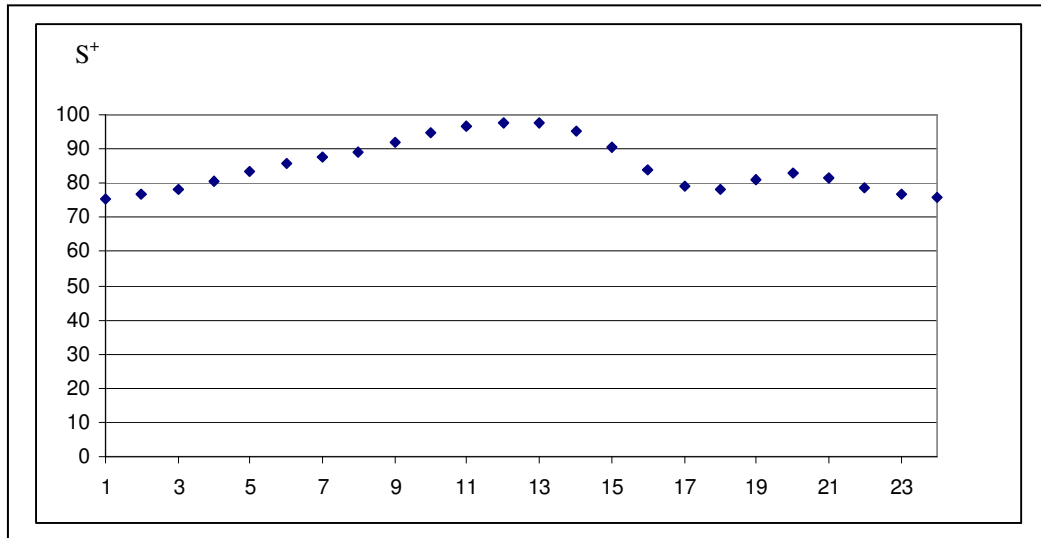


Abb. 3.3.31 Berechnete Sättigung S^+ für die 24 Bunttöne des Adamschen Farbkreises, Buntton 1 ist Gelb

Deshalb wurde noch ein weiteres Farbsystem hinzugezogen, das visuell sehr gleichabständig wirkt.

3.4 Überprüfung der Formel für S^+ mit dem PCCS

Um die oben aufgeworfene Frage nach einer eventuell zu großen Bewertung des Rot-Violetten Blau-Bereiches zu entscheiden, wurde noch das japanische System PCCS betrachtet.

Das PCCS wirkt sehr ausgewogen und harmonisch. Der Farbkreis, der sich mit den Charts bilden lässt, wirkt ausgewogener als der von Adam oder Ostwald.

Es können von mir keine deutlichen Unterschiede in der Sättigung der Charts v1 bis v24 (v = Vollfarben) festgestellt werden. Das Chart 21 wirkt ganz minimal satter.

Es wurden deshalb zunächst die 24 Vollfarben dieses Systems ausgemessen. Dieses System, das visuell besonders ausgewogen wirkt, hat auch Messwerte mit besonders geringen Schwankungen: Für die Farbcharts V1 bis V24 konnte ein Mittelwert für die Sättigung S^+ von 79,35 mit einer Standardabweichung von 3,57 ermittelt werden (Abb. 3.4.1 oben).

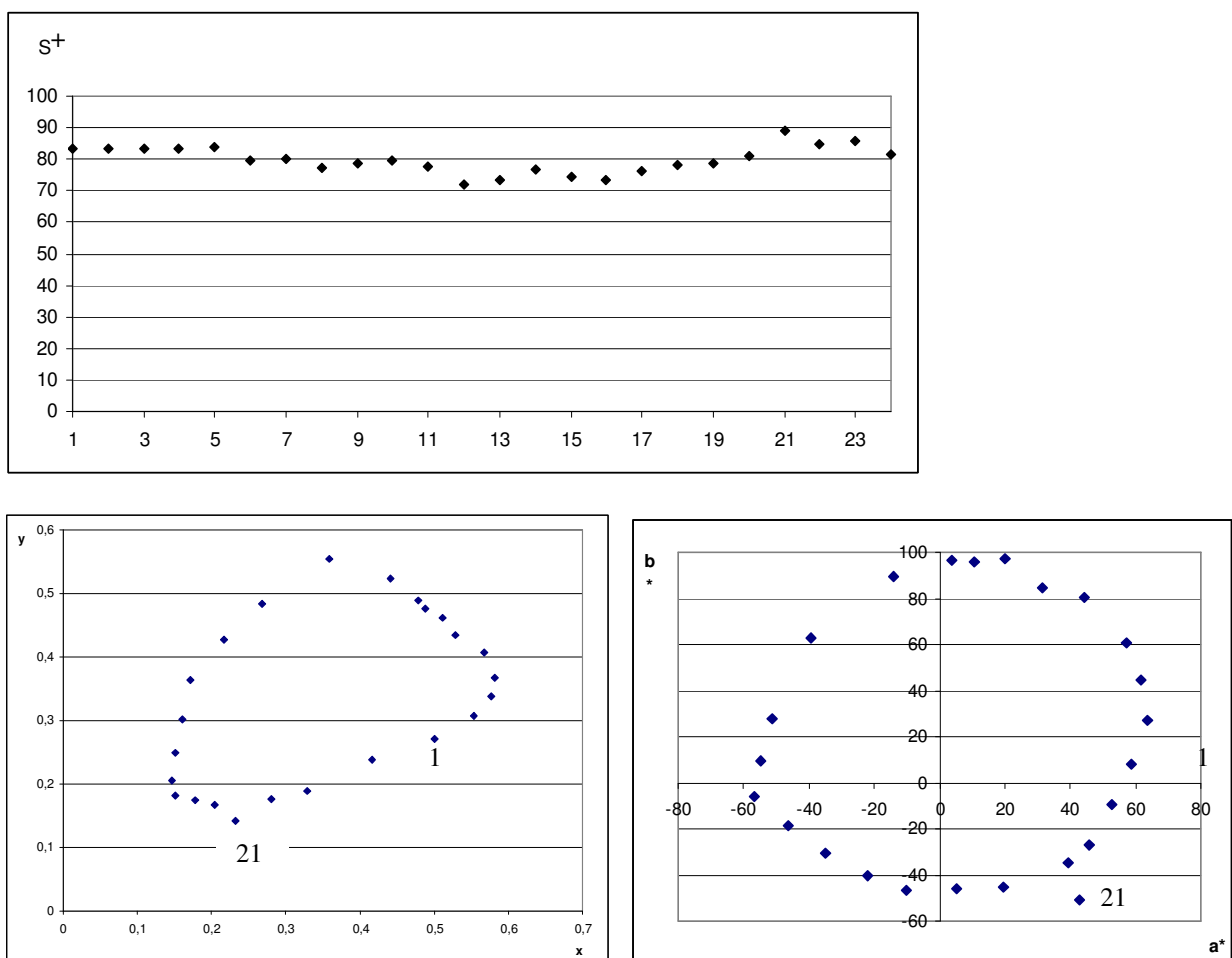


Abb. 3.4.1 Berechnete Sättigung S^+ der Bunttöne v1 bis v24 des Systems PCCS (oben), Lage der Punkte im xyY-System (links) und im $L^*a^*b^*$ System rechts. Die Darstellung beginnt bei Vollton 1(Rot). Der Ton 21(violett) fällt nicht nur bei der Berechnung aus dem Rahmen, sondern auch visuell

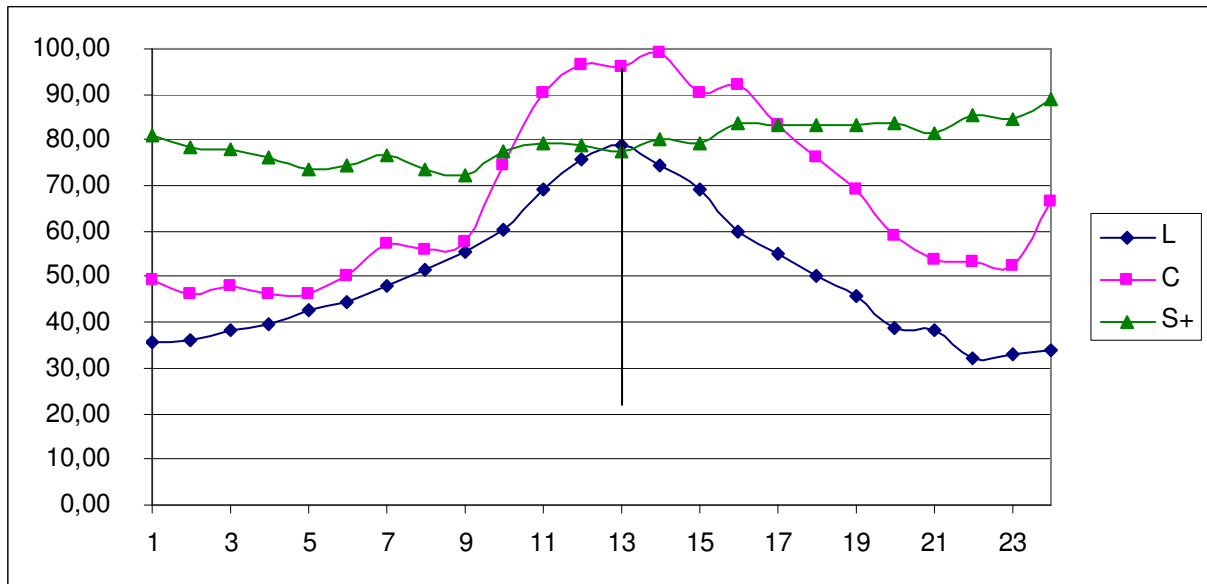
Das System beginnt bei v1 im roten Bereich. Der Buntton, für den die größte Sättigung berechnet wird, ist v21 (violett), die geringste Sättigung wird für v12 (grün) berechnet.

Die Lage der Punkte im xyY System und im $L^*a^*b^*$ System ist darunter abgebildet.

Der Ton 21(violett) fällt nicht nur bei der Berechnung von S^+ aus dem Rahmen, sondern auch visuell.

Die geringe berechnete Schwankung von S^+ stimmt gut mit der geringen visuellen Schwankung überein.

Abbildung 3.4.2 zeigt noch einmal den Zusammenhang der drei Größen L, C und S⁺ für das japanische System. Dabei wurde die Darstellung so gewählt, dass sich die Symmetrie der Helligkeit im Farbsystem besonders gut zeigt; eine Symmetrie auf die auch schon Adam in seinem System hingewiesen hat. Wenn man genau hinschaut erkennt man, dass die Helligkeit hier nicht völlig symmetrisch ist. Im purpur-violetten Bereich liegen die Werte niedriger als im blau-türkisen Bereich. Bei gleicher Helligkeit liegen die Buntheitswerte im orangerot-rot-violetten Bereich höher als im türkis-grünen-Bereich.



Blau Türkis Grün Gelbgrün Gelb Orange Rot Purpur Violett

Abb. 3.4.2 Buntheit C, Sättigung S⁺ und Helligkeit L im PCCS Farbraum

Das PCCS System eignet sich gut, um eine visuelle Abmusterung mit mehreren Probanden durchzuführen und damit eine neue Sättigungsskalierung zu schaffen. Beim DIN System sind die Farbtenschwankungen innerhalb eines Farbtones so groß, dass man keinem Probanden eine solche Abmusterung zumuten mag, bzw. die Farbtenschwankung erschwert die Beurteilung der Sättigung.

Das PCCS hat einen Farbkreis mit 24 Farbtönen, nur 12 davon sind in Abstufungen als Charts vorhanden. Es genügt aber mit diesen 12 Farbtönen zu arbeiten, denn wie sich bei den Abmusterungen zeigte, erfordert schon das Abmattern von 12 Farbtönen große Anstrengung und Konzentration der Probanden. Für jeden der 12 Töne gibt es 14 Abstufungen, d. h. es müssen $12 \cdot 14 = 168$ Farbcharts betrachtet und an einen Platz auf der vorgegebenen Skalierung gelegt werden.

Ist es möglich, von Probanden eine stufenlose Einteilung von Farbcharts nach der Sättigung zu verlangen, oder schafft man nur eine Einteilung in vorgegebene Stufen? Es wäre natürlich erstrebenswert, eine kontinuierliche Einstufung vorzunehmen zu lassen.

Im Folgenden wird zunächst die gewählte Strategie für die visuelle Abmusterung erläutert:

Als erstes erhält der Proband eine Erklärung zum Unterschied zwischen Buntheit und Sättigung. Erst danach kann mit der visuellen Probenabmusterung begonnen werden.

Für die visuelle Abmusterung wurde auf einer mittelgrauen Unterlage zunächst eine Skala von 0 bis 100 % mit Linien von links nach rechts markiert.

Links oben wird bei 0 % ein weißes Chart zur Festlegung des Nullpunkts vorgegeben, sowie darunter graue und ein schwarzes. Der Proband erhält nun die Aufgabe, für den ersten der zwölf Farbtöne, das ihm am sattesten erscheinende Chart rechts oben zu platzieren. Dabei ist die Frage zu entscheiden, wie weit rechts, d. h. wie nahe an 100 % das Chart gelegt werden muss. Dazu muss sich der Proband vorstellen, dass es noch sattere Farben als die vorgelegten Charts geben könnte; dass also das Satteste wahrscheinlich an einen Platz unter 100 % zu legen ist. Als nächstes werden die Charts mit Weißzumischung empfindungsgemäß zwischen Null und dem Sattesten von links nach rechts verteilt. Diese Aufgabe fällt den meisten Probanden leicht. Als nächstes müssen noch die mit Grau und Schwarz gemischten Farbcharts passend zu den grauen Charts darunter platziert werden. Dabei wird die Reihe

der Charts mit Weißzumischung als Maßstab für das Hinlegen genutzt. Bei dieser Aufgabe ergaben sich, wie in den Zahlenwerten im Anhang zu erkennen, starke Schwankungen. „Wie groß ist die Farbsättigung eines getönten Grau?“ Diese Frage zu entscheiden fällt den meisten Probanden schwer. Nachdem alle Charts des jeweiligen Farbtons platziert sind, wird die Lage der einzelnen Charts an den Skalenlinien abgelesen und auf dem für die Abmusterung erstellten Formblatt notiert. Vom ersten Farbton (2) blieb dabei zum Vergleich mit den nächsten das satteste Chart liegen und der Proband erhielt die Charts des nächsten Farbtons (4). Es wurde entsprechend der Nummerierung der Farbtöne des PCCS vorgegangen. Die Abmusterung erfolgte entsprechend ISO 3664 bei der für die grafische Industrie empfohlenen Lichtart D50 (Tageslicht mit Farbtemperatur 5000 K) und einer Beleuchtungsstärke von 2000 lux. Abb. 3.4.3 zeigt die Abmusterungskabine Highlight 2000 mit D 50 und mit den Charts des ersten Farbtons.

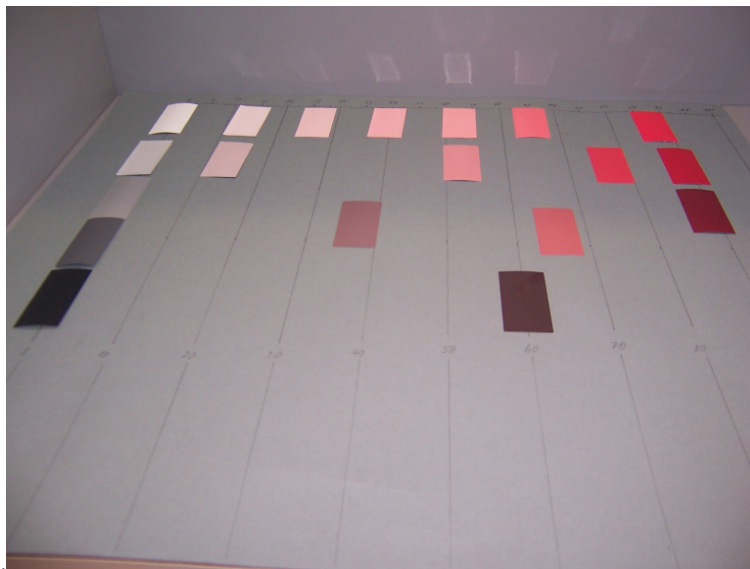


Abb.3.4.3 Visuelle Abmusterung der Charts des ersten Farbtons in der Lichtkabine mit Lichtart D50

Eine solche Abmusterung dauert pro Proband anderthalb bis zwei Stunden. Die 14 teilnehmenden Probanden waren normalsichtig; es waren 6 Frauen und 8 Männer (die Autorin war keine Probandin). Die Ergebnisse der Abmusterung sind in Tabelle A2.9 im Anhang dargestellt. Die ersten Spalten enthalten die Abmusterungswerte der Probanden P1 bis P14, In der nächsten Spalte ist der daraus berechnete Mittelwert zu sehen, die vorletzte Spalte enthält die zugehörige Standardabweichung und in der letzten sind die Werte von S_{CIECAM} dargestellt.

Betrachtet man diese Ergebnisse, so fallen sehr starke Streuungen bei den grauen (g) Proben und den dunkelgrauen (dkg) auf, während die mit weiß aufgehellten Proben geringe Schwankungen zeigen. (Sigma-Werte in der Tabelle 2.9 im Anhang).

Das Gesamtergebnis der visuellen Untersuchung ist in Abbildung 3.4.4 dargestellt. Die Abbildung 3.4.4 enthält außerdem einen Vergleich zur Sättigung im System CIECAM02.

Die Sättigung im CIECAM02 System wurde auf den Seiten 39/40 im Überblick erläutert und ist im Detail im Anhang A1 dargestellt. Die Berechnung der Sättigung erfolgte mit einem Excelprogramm der TU Ilmenau, in das die X-, Y- und Z-Werte, der Weißpunkt für Lichtart D50 ($X_w = 96,42$; $Y_w = 100,00$; $Z_w = 82,49$), die Hintergrundhelligkeit $Y_B = 20$ und die adaptive Leuchtdichte $L_A = 127,32 \text{ cd/m}^2$ eingetragen wurden. Die adaptive Leuchtdichte wurde dabei entsprechend Anhang A1 Gleichung A1.1 ermittelt:

$$L_A = \frac{2000 \cdot 20 \text{ cd}}{\pi \cdot 100 \text{ m}^2} = 127,32 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \quad (3.2)$$

Man erkennt an Hand der Abbildung 3.4.4, dass die vorgeschlagene Sättigung S^+ besser mit der visuell bestimmten Sättigung korreliert als die Sättigung im CIECAM02. Der Verlauf der Sättigung in

CIECAM02 in Abhängigkeit von den visuellen Werten ist zu flach, während S+ gut mit den Mittelwerten aus der visuellen Abmusterung übereinstimmt. Bei kleinen Sättigungswerten werden nach der Sättigungsformel im CIECAM02 viel zu große Werte bestimmt, d. h., die Kurve geht nicht durch den Nullpunkt.

Der Korrelationskoeffizient für S+ beträgt $r = 0,97$, während er für die Sättigung nach CIECAM02 einen Wert von $r = 0,95$ hat. Würde man die Kurve für CIECAM02 durch den Nullpunkt legen, würde der Korrelationskoeffizient für diese Kurve noch schlechter.

Betrachtet man die 2Sigma-Grenze für den Achsenabschnitt, so ergibt sich bei S+ (Standardfehler des Achsenabschnitts = 1,00, Achsenabschnitt = -0,67) ein Bereich von -2,67 bis 1,32. Da dieses Intervall den Nullpunkt enthält, ist der Achsenabschnitt nicht signifikant von Null verschieden.

Für die Sättigung in CIECAM02 ergibt sich 13,15 bis 16,18 bei einem mittleren Achsenabschnitt von 14,66 und einem Standardfehler von 0,76. Das heißt, die Kurve geht nicht durch den Nullpunkt.

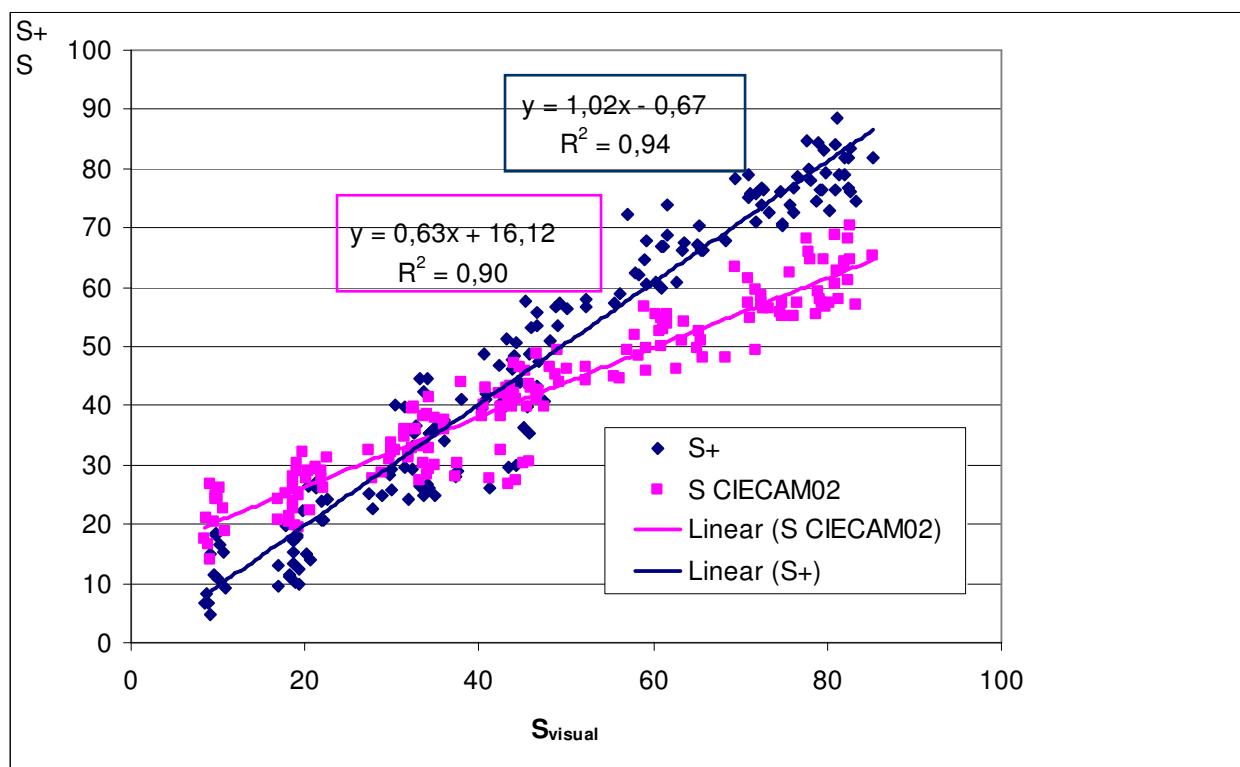


Abb. 3.4.4 Ergebnis des visuellen Abmusterungsversuches mit dem PCCS; aus den Messwerten der Charts wurde einmal S+ bestimmt und zum Vergleich die Sättigung S im CIECAM02. Bei der Darstellung wurden sämtliche Ergebnisse der 14 visuellen Abmusterungen berücksichtigt. Jeder Datenpunkt entspricht einem Mittelwert über 14 Testpersonen.

3.5 Überprüfung mit dem Ostwaldschen Farbkreis

Es wurde noch nach einem System gesucht, das es quasi auf einen Blick ermöglicht, die Gültigkeit der Formel für S^+ zu demonstrieren, z. B. bei einem Vortrag auf einer Tagung. Man sollte dazu möglichst große Teile des Farbraumes im Blick haben. Die Wahl fiel auf den Ostwaldschen Farbkreis, wie er in Abb. 3.5.1 zu sehen ist. Die Abbildung 3.5.1 kann nur zur Veranschaulichung des Tests dienen. Nach Einscannen und Drucken sind andere Abweichungen zu erkennen als im Original.

Auf den ersten Blick wirkt der Ostwaldsche Farbkreis sehr ausgewogen und man empfindet die 2 * 24 Farbcharts als annähernd gleich satt. Schaut man aber genauer hin, bemerkt man doch Unterschiede. Man sollte die Unterschiede vor dem Messen bzw. vor der Demonstration der Messergebnisse feststellen lassen. Bei dieser Untersuchung ist quasi schon eine Vorauswahl gut zusammenpassender Charts getroffen worden und die Versuchsperson muss keine Staffelung der Charts vornehmen. Die Versuchspersonen erhielten die Aufgabe, alle 48 Charts zu vergleichen, und die Charts anzugeben, die als besonders satt empfunden werden und außerdem die, die als besonders wenig satt empfunden werden. Das ist eine vergleichsweise einfache Aufgabe.



Abb. 3.5.1 Farbton-Harmonie nach Ostwald (Muster-Schmidt Verlag)

Die Messwerte sind in Abbildung 3.5.2 grafisch dargestellt und in Tabellenform im Anhang zu finden. In Tabelle 6 ist das Urteil von 6 (***) Männern und 4 Frauen (**) zu diesem Test zusammengefasst, die die Beurteilung einzeln und voneinander unabhängig durchführten und die normalsichtig sind.

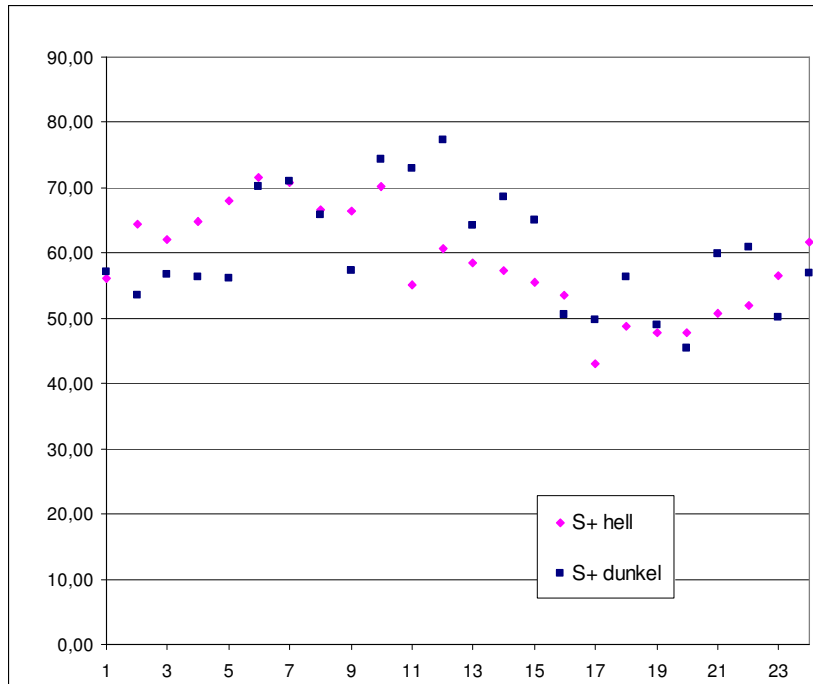


Abb. 3.5.2 Berechnete Sättigung S^+ der Farbton-Harmonie nach Ostwald (Sättigung über der Farbtonzahl)

Tabelle 6 Subjektive Sättigungsabweichung im Ostwaldschen Farbkreis

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
*	**				*	*			**							--			-			**	**	
	*					*			*										-				*	
	**					*			**										-				*	
	*					*	*		**	*	**		*	*			--	-	-	-		*	**	*
						*			**		*		*	*		-			-				*	

Die obere Hälfte der Tabelle bezieht sich auf die hellen Charts, die untere Hälfte auf die dunklen.
* bedeutet satter, - bedeutet weniger satt.

Man muss, wenn man einen solchen Test durchführt, bedenken, dass das Urteil über die Charts vom Aussehen der unmittelbar benachbarten Charts beeinflusst ist. Weiterhin müssen abgegebene Urteile, wie zum Beispiel „A erscheint heller als B“ hinterfragt werden, weil manche der Antworten sich auf die Helligkeit und nicht auf die Satttheit beziehen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein solcher Versuch sinnvoll machbar ist, dass Abweichungen der Sättigung vom Durchschnitt ermittelt werden konnten, die nahezu allgemein erkennbar sind und man kann die Abweichungen in den Messwerten wieder finden.

In Übereinstimmung mit dem visuellen Urteil ergeben sich wieder für den Rot-violetten Bereich größere Sättigungswerte S^+ als für den türkisblauen und grünen Bereich.

3.6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Die besonders geringen Sättigungswerte für Gelb und Gelbgrün treten nur bei den Zahlenwerten des DIN 6164 System auf, liegen also quasi an der Erstellung des DIN-Systems, das nur für den gelben Bereich visuell abgemustert wurde.

Teilweise, insbesondere beim Ostwaldschen und Adamschen Farbkreis und beim HKS System, wurden für die Sättigung im orangerot-rot-violetten Bereich etwas höhere Werte ermittelt als im türkis-grünen Bereich. Die visuellen Werte liegen aber ebenfalls im orangerot-rot-violetten Bereich etwas höher.

Bei der Untersuchung des japanischen Farbsystems, das sehr gleichmäßig aufgebaut ist, konnten keine signifikanten Schwankungen von einzelnen Farbbereichen ermittelt werden. Im dunkelgrauen Bereich konnte die Tendenz festgestellt werden, dass die roten Töne etwas satter wirken als die grün-blauen, die gleiche Tendenz zeigt sich auch in den berechneten Werten. Allerdings sind die Schwankungen der visuellen Abmusterung bei den grauen Proben so groß, dass sie als nicht signifikant betrachtet werden müssen.

Die visuelle Untersuchung des japanischen Systems hat sehr deutlich die Überlegenheit der neuen Formel gegenüber der bisherigen Sättigungsformel gezeigt. Außerdem ergab sich eine schlechte Korrelation der Sättigung im CIECAM02 System mit den visuellen Ergebnissen. Die Kurve, die die Sättigung im CIECAM02 Raum beschreibt, geht nicht durch den Nullpunkt

Zusammenfassend kann man nach diesen Untersuchungen sagen, dass die Formel für S^+ die Sättigung gut beschreibt. Sie steht in Übereinstimmung mit dem alten ursprünglich von Richter verwendeten Sättigungsbegriff.

4. Diskussion

4.1 Untersuchung der Eigenschaften des LSh-Farbraumes

Verwendet man zur Farbdarstellung anstelle der Achsen L und C die Achsen L und S, so hat das den Vorteil, dass durch eine einfache Umrechnung der Farbraum quasi normiert und die Ausdehnung relativ gleichmäßig ist. Der störende große Wert für Gelb ist damit beseitigt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem LSh- und dem LCh-Farbraum besteht darin, dass dunkle gesättigte Farben wie Braun im LSh-Farbraum weiter entfernt von der Unbuntachse liegen als im LCh-Farbraum, denn Braun ist gesättigt aber nicht besonders bunt.

Viele Farbräume der Computergrafik sind LSh-Farbräume. Man erkennt das sofort am Wert für Braun.

Wir können den LCh-Farbraum mit Hilfe der Formel

$$C_n = \frac{C}{C_{\max}(h)} 87 \quad (4.1)$$

C_n	normierte Buntheit
$C_{\max}(h)$	maximale Sättigung in Abhängigkeit vom Farbton
C	Buntheit

normieren. Eine solche Normierung bietet eine Umrechnungsmöglichkeit zwischen dem CIELCh-Farbraum und dem Ostwaldschen/Adamschen Farbraum. Man könnte diesen Farbraum als LC_nh -Farbraum bezeichnen.

Welches sind die Empfindungsmaße, Bunton (Farbton), Helligkeit und Buntheit oder Bunton (Farbton), Helligkeit und Sättigung?

Über diese Frage sollten wir nachdenken, um eventuell die Vorteile des einfacheren LSh-Raumes für die Farbabstandsmessung zu nutzen. Welche Empfindungsmaße gibt es? Nehmen wir die Sättigung oder (und) die Buntheit oder beides wahr? Können wir die Stärke der Gesamtempfindung in Helligkeit und Buntheit aufteilen? Und sollte die Buntheit dann nicht unabhängig von der Helligkeit sein und nicht wie im CIELAB-System mit der Helligkeit korrelieren?

Sprechen wir davon, dass ein Rot bunter als ein anderes ist oder sagen wir gesättigter? Oder sprechen wir gar von Sättigung und meinen Buntheit? Für Braun ist der Unterschied besonders deutlich.

M. Richter hat, eine Untersuchung [80] durchgeführt, um die wahrgenommenen Empfindungsmaße zu ermitteln. Er hat den Versuchspersonen Farbmuster vorgelegt und hat sich die empfundenen Farben verbal beschreiben lassen. Dabei konnte er feststellen, dass die Begriffe Farbton, Helligkeit und Sättigung die Begriffe sind, die zur Farbbeschreibung verwendet werden.

In Abb. 4.1.1 sehen wir Sättigung und Buntheit noch einmal als Flächendeckungsgrad zweier Farben im Druck verdeutlicht. Als besonders gesättigt empfindet man die letzte Spalte, bis auf die letzten vier Felder, die eher Schwarz bzw. als getöntes Schwarz empfunden werden.

Die Daten für die Messergebnisse in Abbildung 4.1.3 und 4.1.4 sind dem Digitalen Farbatlas von Holger Eberding entnommen.

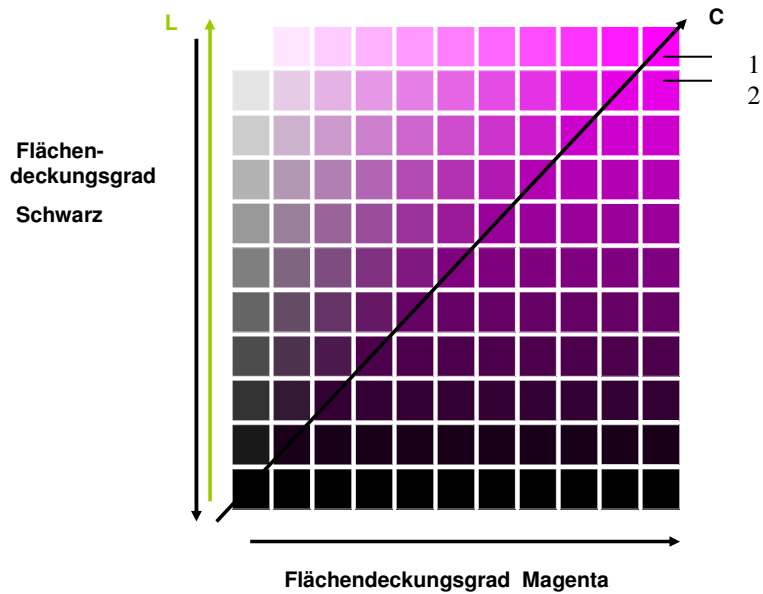


Abb. 4.1.1 Zusammendruck von Magenta und Schwarz in Abhängigkeit vom Flächendeckungsgrad

Abb. 4.1.2 zeigt die Messwerte für die ersten fünf Reihen aus Abbildung 4.1.1 und der Reihe mit 80 % und 100 % Schwarz. In Abb. 4.1.3 sind diese Werte in Sättigungswerte umgerechnet.

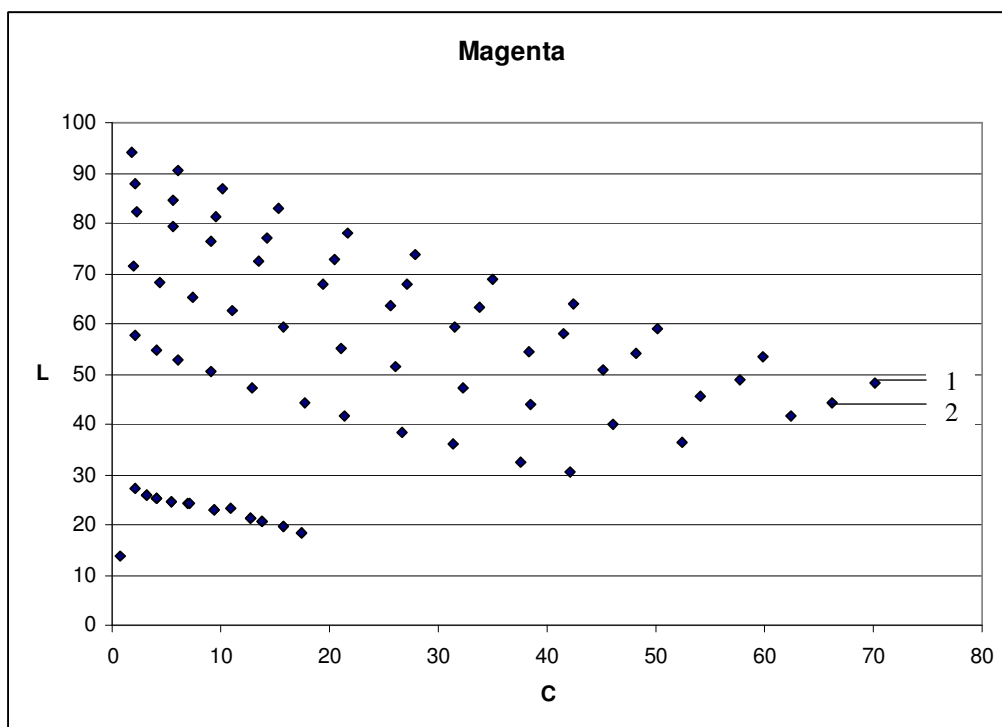


Abb. 4.1.2 Magenta-Ebene des CIELAB- Farbraums: Helligkeit L in Abhängigkeit von der Buntheit C

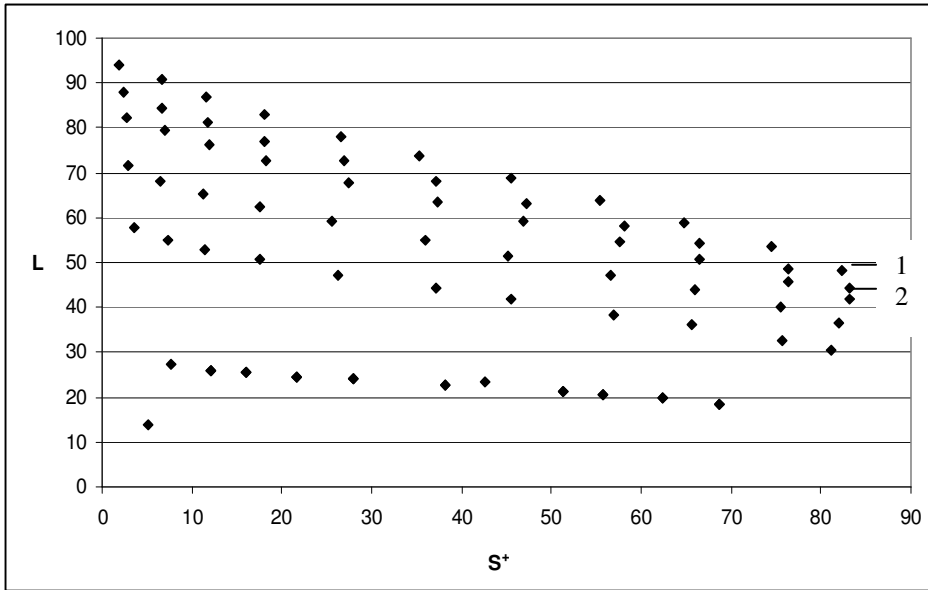


Abb. 4.1.3 Magenta-Ebene des CIELAB-Farbraums: Helligkeit L in Abhängigkeit von der Sättigung S^+

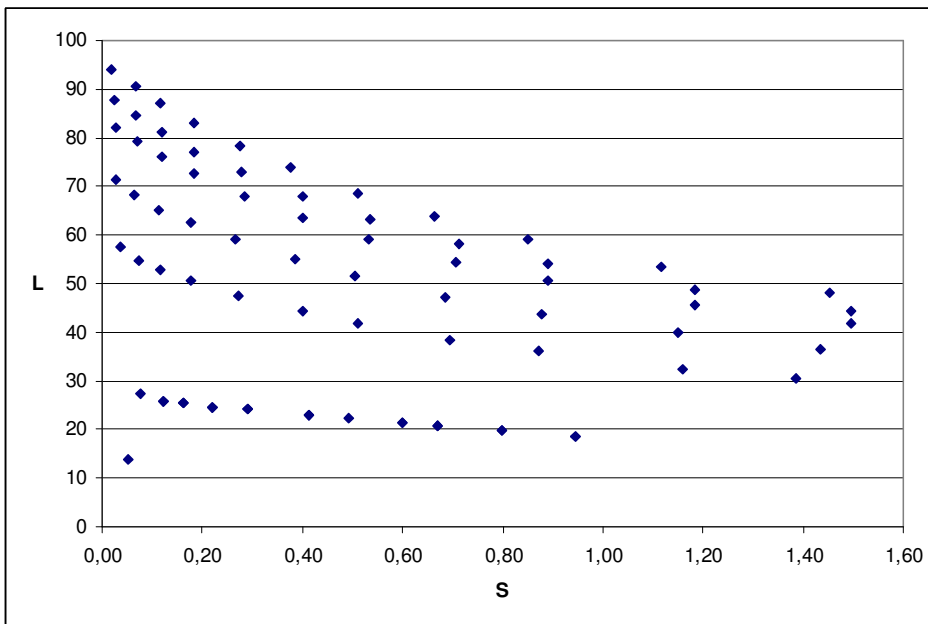


Abb. 4.1.4 Magenta-Ebene des CIELAB-Farbraums: Helligkeit L in Abhängigkeit von der Sättigung $S=C/L$

Von links nach rechts wächst der Flächendeckungsgrad von Magenta in Stufen von 10 %. Von oben nach unten nimmt der Flächendeckungsgrad von Schwarz zu.

In Abb. 4.1.3 erkennt man nahezu senkrechte Linien, die dem gleichen Flächendeckungsgrad von Magenta entsprechen. Im LCh-Farbraum verlaufen diese Linien in Richtung des Schwarzpunktes (Abb. 4.1.2). In Abb. 4.1.4 sind zum Vergleich die Werte für $S=C/L$ eingetragen. Man sieht, dass sich hier weniger deutlich senkrechte Linien gleicher Sättigung ergeben und dass bei großen Sättigungen sehr große Abstände der Linien auftreten.

Betrachtet man die beiden mit 1 und 2 markierten Charts in Abb. 4.1.1 und die zugehörigen Punkte in den Abbildungen 4.1.2 und 4.1.3, so sieht man, dass C_{\max} nicht exakt gleich S_{\max} ist. Das Feld mit der geringen Schwarzzumischung (2) wird als gesättigter berechnet als das Feld 1. Das ist ein sehr interessanter Effekt. Unterhält man sich darüber mit Gestaltern, so können sie bestätigen, dass geringe Schwarzzumischungen den Eindruck der Sättigung verstärken. Dieser geringe, den Gestaltern bekannte

Effekt, wird von der Formel für S^+ wiedergegeben. Das spricht dafür, dass die Formel keine Näherungsformel ist, sondern den grundlegenden Zusammenhang zwischen den Größen Helligkeit, Sättigung und Buntheit beschreibt. Der Effekt, dass durch minimale Zugaben von Schwarz eine Verstärkung der Sättigung eintritt, ist nach Erkenntnis der Autorin noch nicht in der Literatur beschrieben und hat auch keinen Namen.

An Abb. 4.1.1 und 4.1.3 erkennt man, dass geringe Zumischungen von Schwarz die Sättigung nicht verringern, dass jedoch bei hohen Flächendeckungsgraden von Schwarz eine Abnahme der Sättigung erfolgt und dass dann, sobald nur ein rötlich getöntes Schwarz wahrgenommen wird, die Buntheit gegen Null geht. Geringe Zumischungen von Schwarz (Reihe 2 und 3) ergeben etwas höhere Sättigungswerte als reines Magenta (Reihe 1). Damit gibt die Gleichung die menschliche Empfindung genau wieder.

Die Messungen wurden wiederholt, weil im digitalen Farbatlas in den dunklen Reihen nicht alle Messwerte vorliegen. Dazu wurden die Magenta-Schwarz-Felder eines CMYK Atlases gemessen. Diese zusätzlichen Messungen erschienen erforderlich, um den Verlauf der berechneten Sättigungslinien bei hohen Schwarzanteilen sehen zu können.

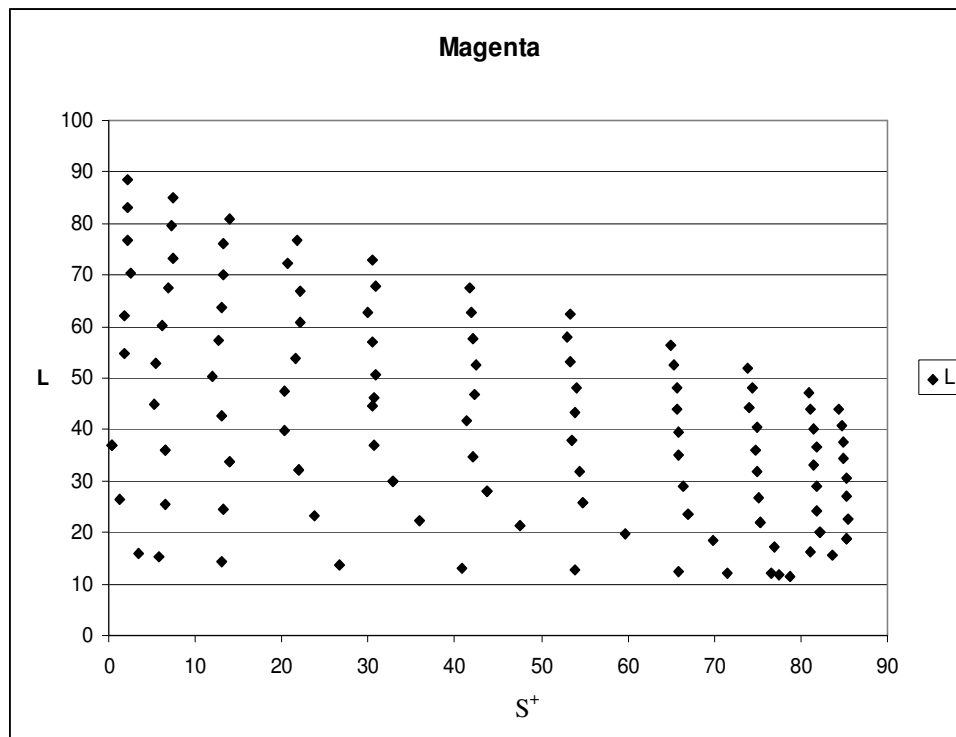


Abb. 4.1.5 Sättigungslinien berechnet mit Formel für S^+ aus dem CMYK-Atlas, Magentastufen in Abständen von 20%

Man erkennt in Abbildung 4.1.5 an den Punkten rechts unten, dass eine Abnahme der Sättigung bei 90 und 100% Schwarz erfolgt.

In Abb. 4.1.6 sehen wir einen senkrechten Schnitt durch den CIELAB-Farbenkörper in der Gelb-Violettblauen Ebene ($90^\circ - 270^\circ$) für die Druckfarben des Vierfarbendrucks. Die Messpunkte stellen die Begrenzung der Ebene dar; d. h. Mischung von Gelb bzw. Violett (dem Übereinanderdruck von Magenta mit Cyan) mit Papierweiß oder mit Schwarz.

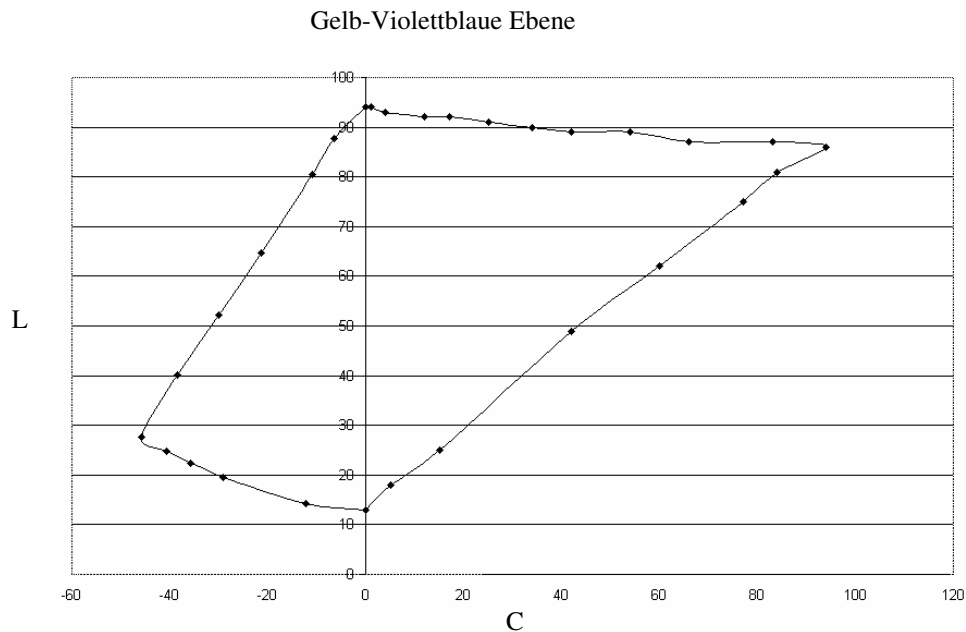


Abb. 4.1.6 Gelb-Violettblaue Ebene des CIELAB- Farbraumes, Helligkeit in Abhängigkeit von der Buntheit

Diese Ebene wurde in eine Sättigungsebene (Abszisse S^+ statt C) umgerechnet. Abb. 4.1.7 zeigt die Gelb-Violettblaue Ebene als Sättigungsebene.

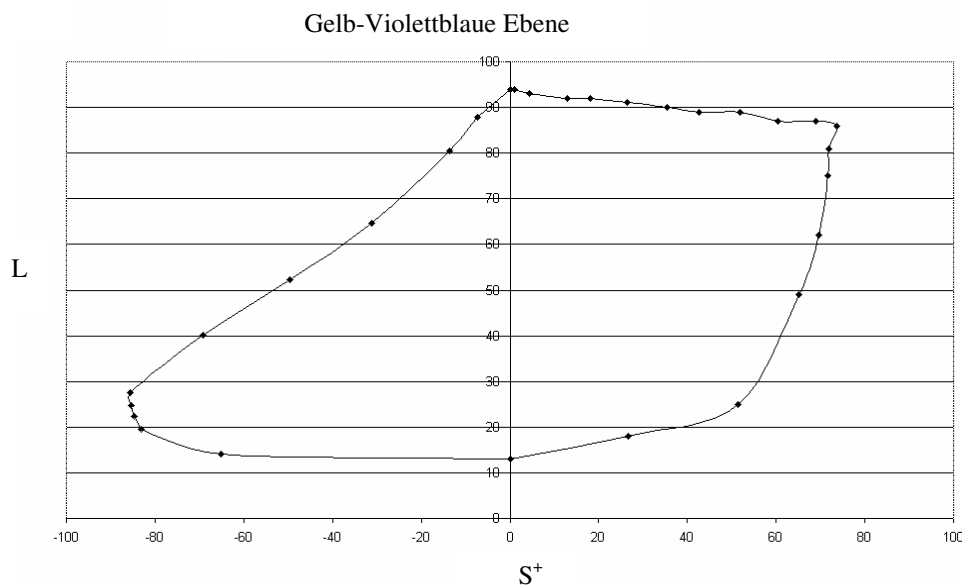


Abb. 4.1.7 Gelb-Violettblaue Ebene des CIELAB- Farbraumes, Helligkeit in Abhängigkeit von der Sättigung S^+

Wie in Abb. 4.1.8 zu sehen ist, kann mit Hilfe der Sättigung ein neuer Farbraum entwickelt werden, der LSh-Farbraum.

Wie der Vergleich zwischen den Abb. 4.1.6 und 4.1.7 zeigt, ist der LSh-Farbraum wesentlich symmetrischer als der LCh -Farbraum; und Gelb fällt nicht mit extrem hohen Werten aus dem Rahmen. Das macht es für die Anwender einfacher, die einzelnen Ebenen des Farbraumes grafisch darzustellen und die Flächen mit Farbmustern zu gestalten. Die Schnittebenen des Farbraums sind weniger dreieckig, sondern gebogen. Den gebogenen Farbraum können wir als einen Teil des physiologischen Farbraumes betrachten, der ähnlich gebogen ist [11].

Man erkennt in Abb. 4.1.8 den Platz, der sich automatisch für die Empfindungen Braun und Oliv im Farbraum ergibt.

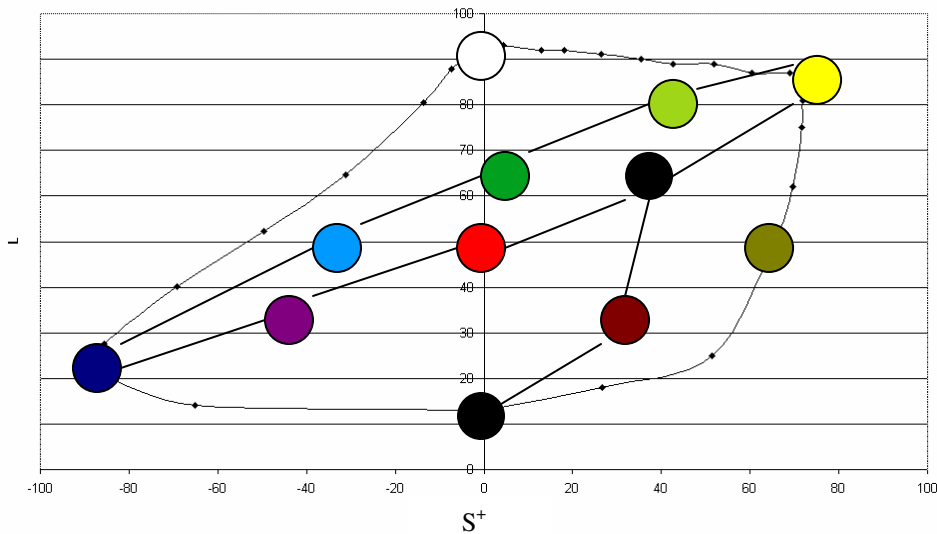


Abb. 4.1.8 LSh-Farbraum mit Farbellipse und den Empfindungen Braun und Oliv

Vergleicht man bekannte Farbräume der Gestalter, so kann man eine Einordnung der verschiedenen Farbräume nach den Kriterien Buntheit oder Sättigung vornehmen. Dabei muss man aber bedenken, dass die existierenden Systeme empirisch erstellt worden sind; es müssen demnach nicht unbedingt reine Systeme sein, sondern es können auch Kombinationen von Buntheit und Sättigung vorkommen.

Schierz [89] hat den LSh-Farbraum für Optimalfarben untersucht. Dazu hat er zunächst kartesische Koordinaten im LSh-Farbraum eingeführt:

$$a^+ = a^* \cdot \frac{S^+}{C_{ab}^*} \tag{4.10}$$

$$b^+ = b^* \cdot \frac{S^+}{C_{ab}^*} \tag{4.11}$$

Dabei ist a^+ die Rot-Grün-Buntheit und b^+ die Blau-Gelbbuntheit im LSh-Farbraum.

Mit Hilfe dieser Größen kann man die extremen Punkte des Farbraumes betrachten und damit die Eigenschaften des LSh- mit den Eigenschaften des LCh-Farbraum vergleichen.

Die folgenden Abbildungen 4.1.9 bis 4.1.14 wurden von Schierz [89] erstellt. Weitere Abbildungen zum Vergleich der Farbräume LSh und LCh für andere Helligkeiten sind im Anhang zu finden.

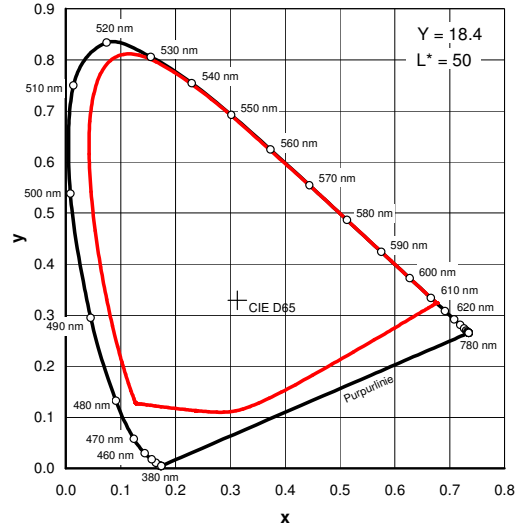


Abb. 4.1.9 Optimalfarben für $L^* = 50$ im xy -Diagramm

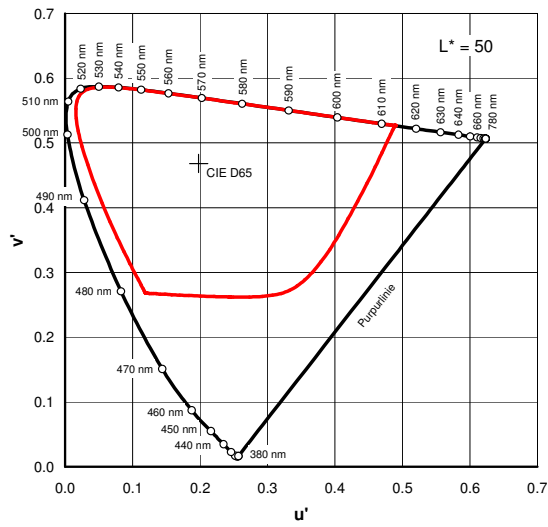


Abb. 4.1.10 Optimalfarben für $L^* = 50$ im $u'v'$ -Diagramm

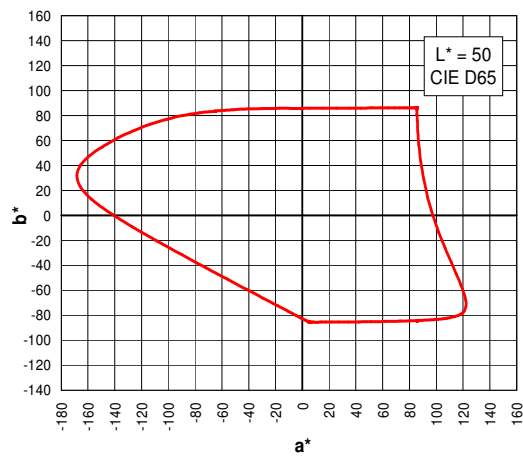


Abb. 4.1.11 Optimalfarben für $L^* = 50$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

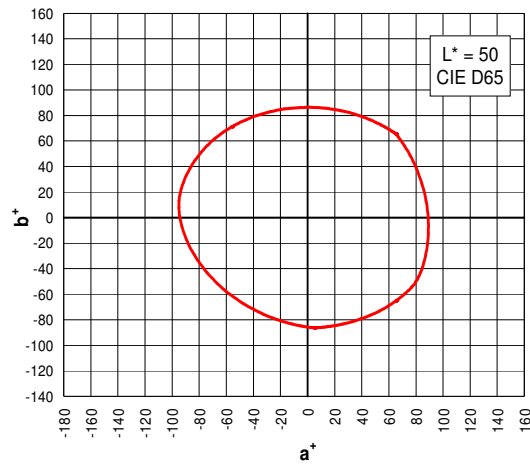


Abb. 4.1.12 Optimalfarben für $L^* = 50$ im $L^*a^+b^+$ -Diagramm

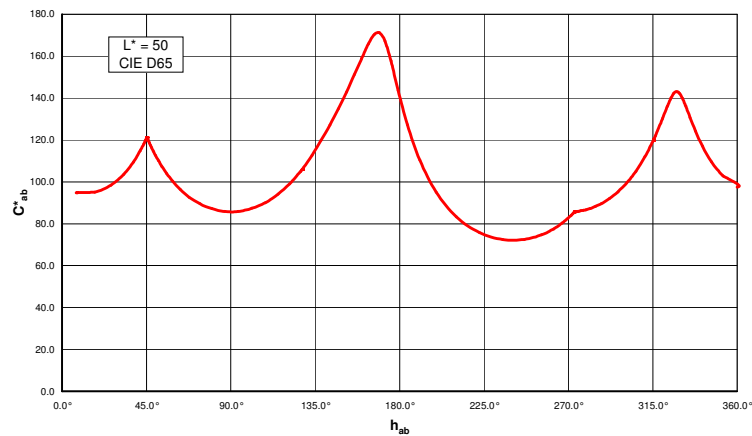


Abb. 4.1.13 Buntheit in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 50$

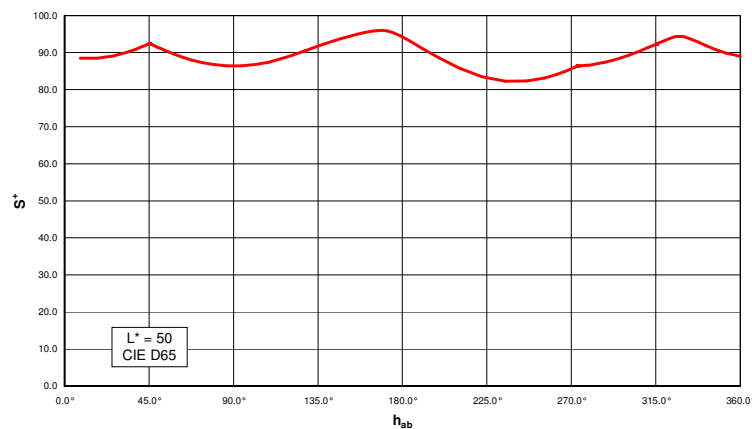


Abb. 4.1.14 Sättigung in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 50$

Vergleicht man die $L^*a^+b^+$ -Diagramme mit den entsprechenden $L^*a^*b^*$ -Diagrammen, so wird die größere Symmetrie des LSh Farbraumes deutlich. Auch die Darstellung der Sättigung über dem Buntton zeigt deutlich geringere Schwankungen als die der Buntheit. Nur für die sehr hohe Helligkeit $L = 90$ ist auch der LSh-Farbraum unsymmetrisch.

Man kann zusammenfassend sagen, dass mit der Einführung des LSh- Farbraumes ein ziemlich symmetrischer Farbraum geschaffen wurde. Da sich die Messung der Größen L und C des CIELAB Farbraumes in der Praxis inzwischen etabliert hat, wird es für die Anwender nützlich sein, den bereits bekannten Raum mit Hilfe der Sättigung jetzt als ziemlich symmetrischen Raum nutzen zu können.

4.2 Betrachtung einiger zur Zeit verwendeter Farbräume

4.2.1 CMYK System

Das CMYK System ist das in der Druckindustrie, im Vierfarbendruck verwendete System der Druckfarben Cyan C, Magenta M, Gelb (Yellow Y) und Schwarz.

Auf diesem System beruhen die im Kapitel 4.1 durchgeführten Messungen. Insbesondere zeigt die Abb. 4.1.1 die im Druck übliche Darstellung von Farbzusammendruckern in Abhängigkeit vom Flächendeckungsgrad der Druckfarben. Auch in Kapitel 3.1 (Seite 49) wurde schon auf das System zurückgegriffen.

4.2.2 Natural Color System

Im Folgenden sollen Schnitte durch den NCS-Farbraum betrachtet werden, um zu sehen, ob der Raum auf der Basis der Buntheit oder der Sättigung aufgebaut ist oder möglicherweise auch keine Ordnung nach einem dieser beiden Kriterien enthält. Dazu betrachten wir die gelbgrüne Ebene des NCS (Abb. 4.4.5). Die Originalcharts wurden gemessen und anschließend wurde S^+ errechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.2.6 und 4.2.7 zu sehen.

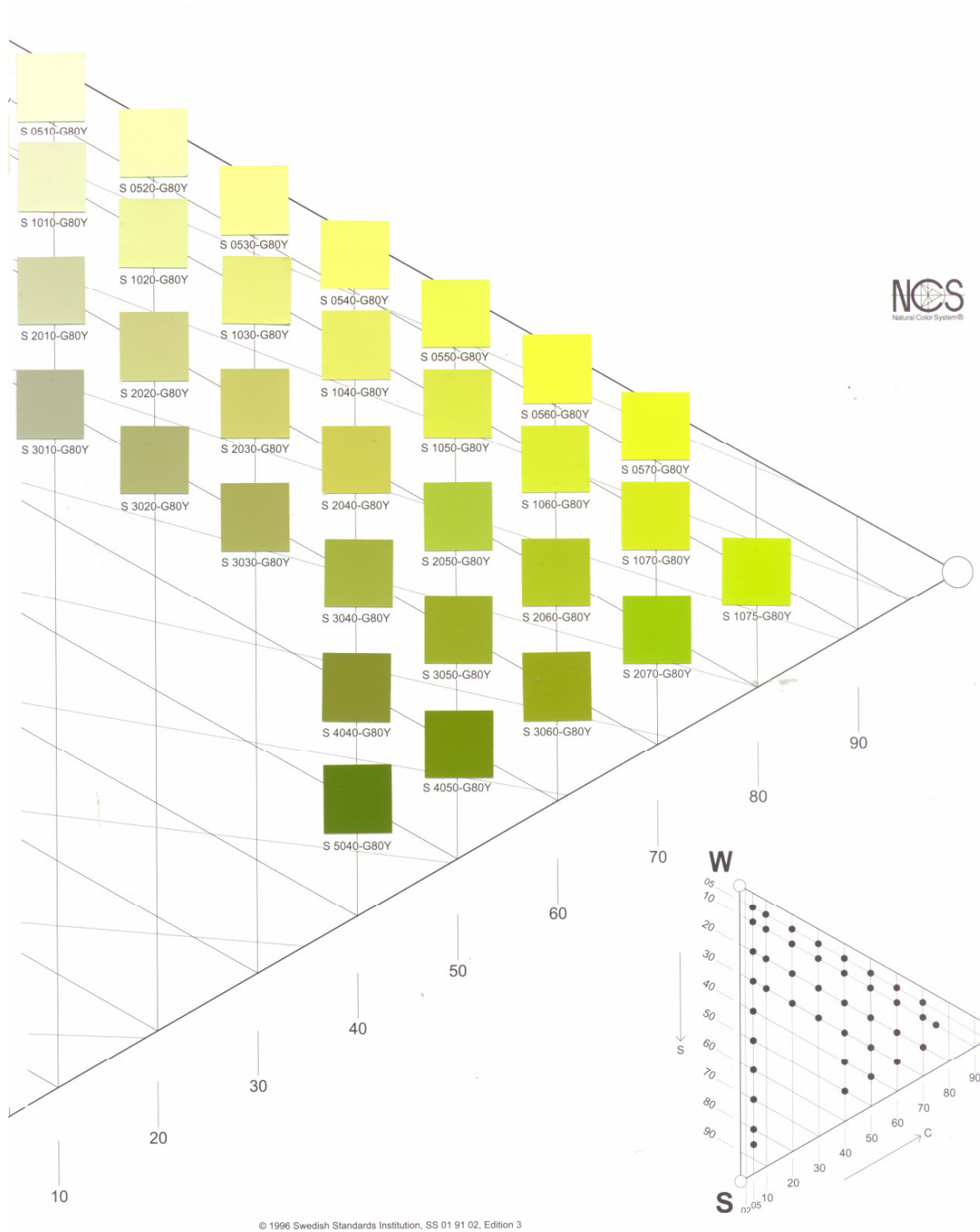


Abb. 4.2.5 Teil der grünelben Ebene -G80Y des NCS

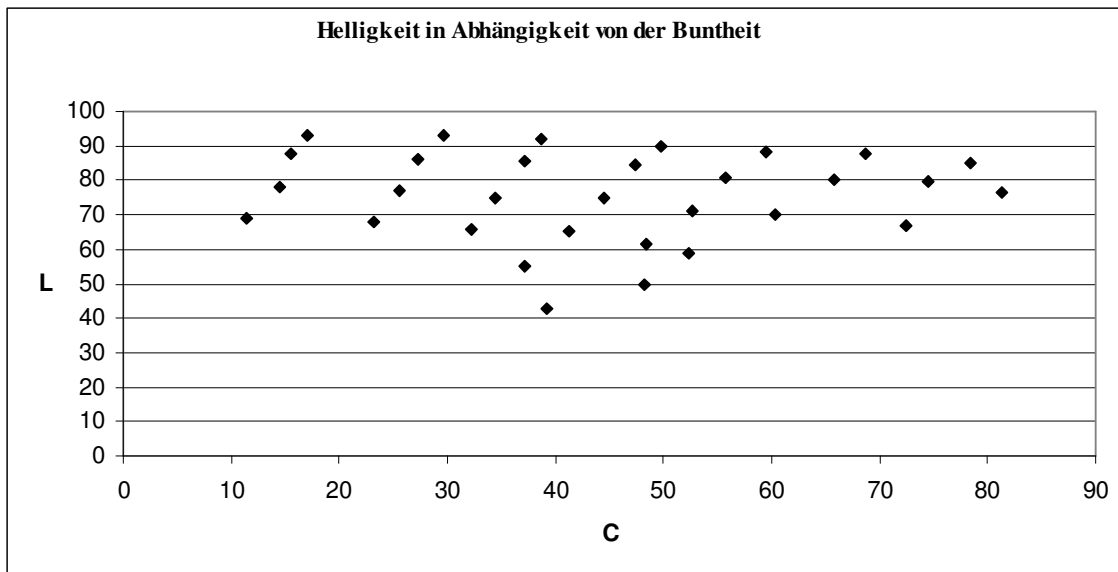


Abb. 4.2.6 Helligkeit in Abhängigkeit von Buntheit (-G80Y des NCS)

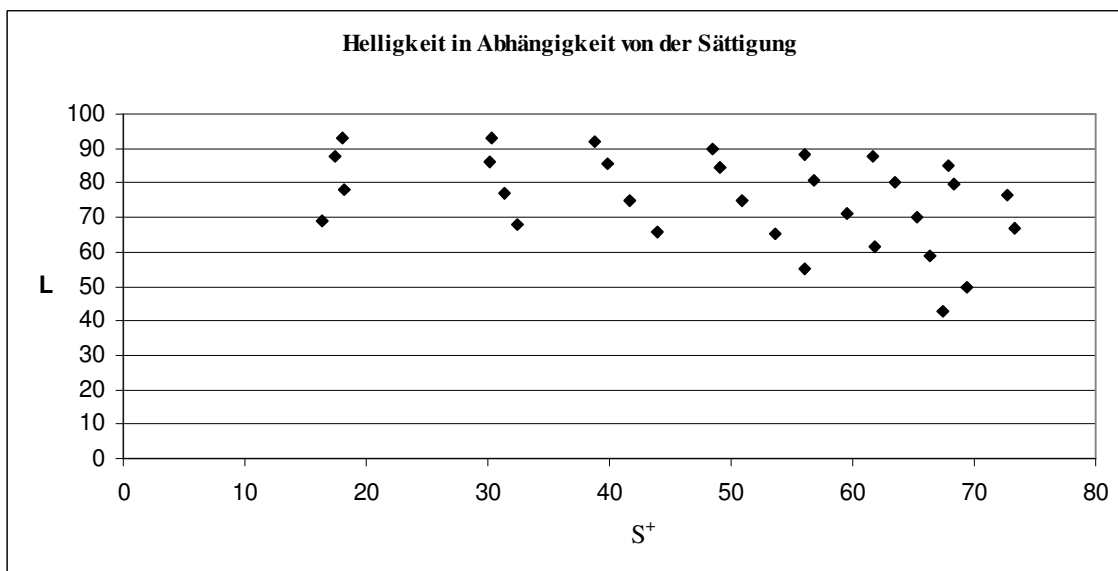


Abb. 4.2.7 Helligkeit in Abhängigkeit von der Sättigung S^+ (-G80Y des NCS)

Man erkennt an Abb. 4.2.6 und 4.2.7, dass das NCS-System weder nach Buntheit noch nach Sättigung aufgebaut ist.

4.2.3 RAL Design System

Ein schiefer, abgerundeter Doppelkegel liegt beim RAL Design System vor. Das RAL Design System ist eng an das CIELAB-System angelehnt und hat die LCh-Werte des CIELAB- Systems übernommen und als H-L-C codiert. Die Farbproben sind so gewählt, dass die Dreiecksspitze verbreitert wurde und man dadurch im gesättigten Bereich mehr Farbmuster zur Verfügung hat.

Man könnte es um die Sättigungswerte ergänzen und hätte damit eine bessere Anpasstheit an das Empfinden. Abb. 4.2.8, 4.2.9 und 4.2.10 zeigen die Farbtonenebene 160 des RAL Design Systems. Die Messwerte sind dem Digitalen Farbatlas entnommen.

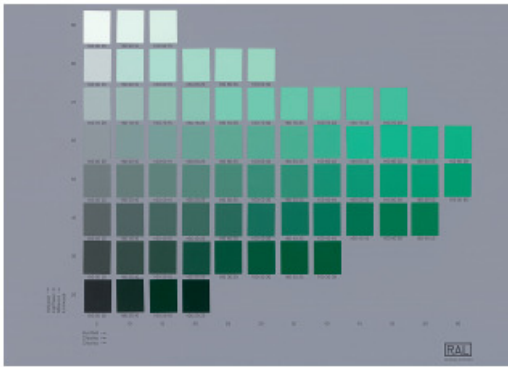


Abb. 4.2.8 Farbtonebene 160 des RAL Design System

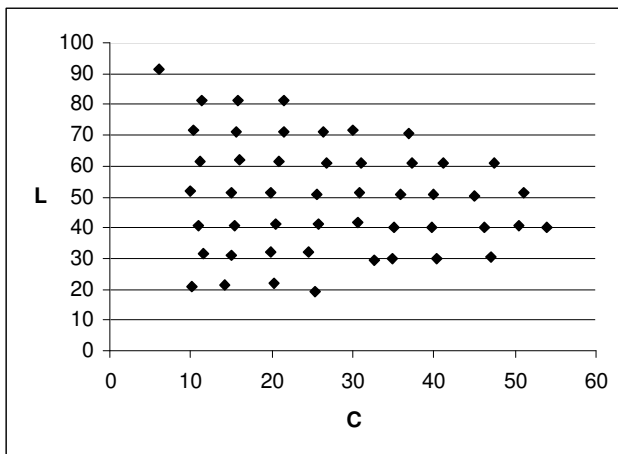


Abb 4.2.9 Farbtonebene 160 des RAL Design System, Helligkeit in Abhängigkeit von der Buntheit

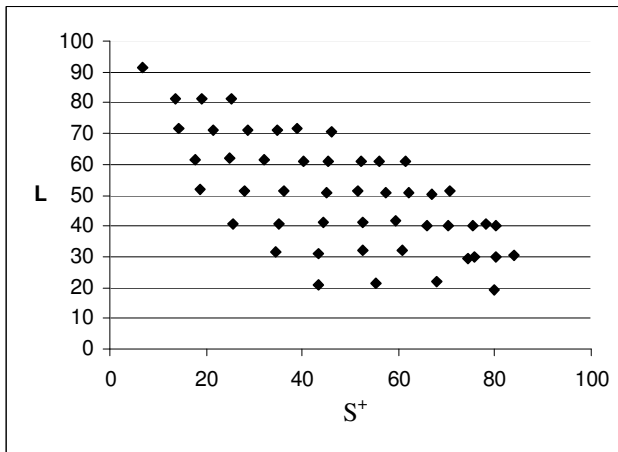


Abb. 4.2.10 Farbtonebene 160 des RAL Design System, Helligkeit in Abhängigkeit von der Sättigung S^+

Man erkennt in Abb. 4.2.9 näherungsweise senkrechte Linien und kann damit sagen, dass das RAL-System auf der Buntheit basiert.

4.2.4 Caparol System

Auch das Caparol System ist eng an das CIELAB System angelehnt. Es wird eine Gradeinteilung des Farbkreises in insgesamt 360° und eine Verteilung der Farben zu den Bunttonwinkeln vorgenommen, die dem CIELAB-System entsprechen. Allerdings wird der Farbtonwinkel in Richtung des Uhrzeigersinns gezählt und 0° befindet sich oben. Vom CIELAB System werden auch die Begriffe Helligkeit, Chroma und Farbtonwinkel übernommen. Interessant ist die Verwendung des Begriffes Grad der Buntheit für Chroma. Ausgehend von gesättigten Farben wird mit 6 Aufhellungsstufen gearbeitet, d. h. es wird von gleich vielen Sättigungsstufen für alle Farben ausgegangen. Abb. 4.2.11 links zeigt die dem Farbtonwinkel 80 zugeordnete Ebene des Caparol Systems. Abb. 4.2.11 rechts zeigt die sechs Sättigungsstufen.

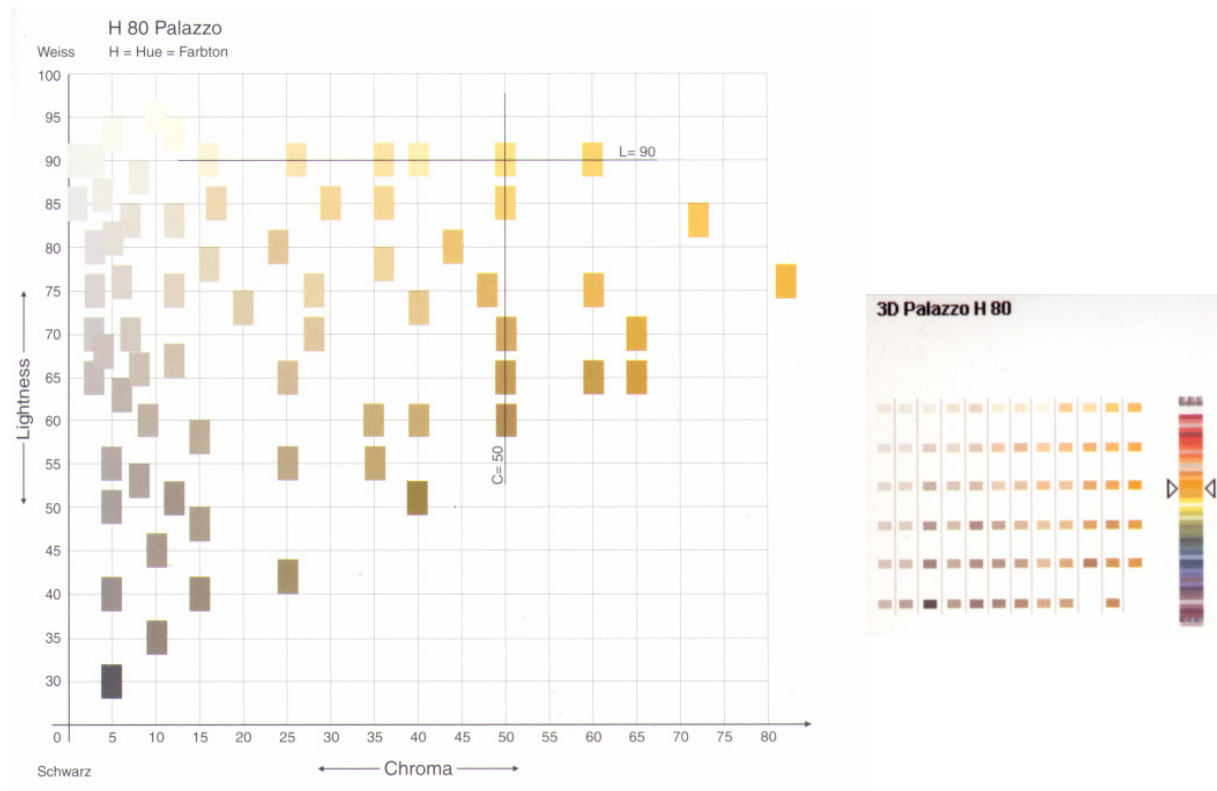


Abb. 4.2.11 links: Helligkeit in Abhängigkeit von der Buntheit im Caparol System
rechts: sechs Sättigungsstufen im Caparol-System.

Das Caparol System berücksichtigt die Helligkeit der Farben und könnte leicht mit den passenden Sättigungswerten des CIELAB Systems versehen oder als Sättigungssystem umgestaltet werden.

4.3 Farb-Ellipsen

Man spricht im allgemeinen vom Farbkreis. Auf Grund der unterschiedlichen Helligkeit liegen in dem schiefen Doppelkegel maximal gesättigte Farben jedoch auf einer Ellipse.

In einem System, das auf der Sättigung basiert, ist die Ellipse etwas weniger exzentrisch als im LCh-System. Beim LCh-System führt die Unsymmetrie, bzw. der große Chroma-Wert für Gelb dazu, dass der große Durchmesser der Ellipse wesentlich größer als der kleine ist.

Um die Durchmesser der Ellipsen zu ermitteln, wurden als Stützwerte Sonderfarben verwendet, die eine möglichst große Sättigung aufweisen und den Optimalfarben nahe kommen.

In Tabelle 7 wurden die Originalfarben von Manfred Adam verwendet und in Tabelle 8 die Farben des japanischen Systems PCCS Harmonic Cards 201, das ebenfalls auf Ostwald basiert.

In der sechsten und siebenten Spalte sind die Durchmesser der Ellipsen zu finden, wobei bei der Berechnung des Durchmessers der Gelb-Blau-Achse D_{Y+B} die Differenz der Helligkeiten berücksichtigt ist, während der geringe Unterschied der Helligkeiten von Rot und Grün bei der Berechnung des Durchmessers der Rot-Grün-Achse D_{R+G} vernachlässigt wurde. Die letzte Spalte enthält das Verhältnis der Durchmesser im LCh- und im LSh-System.

Tabelle 7 Vergleich der Werte von Helligkeit L, Buntheit (Chroma) C und Sättigung S^+ von ausgewählten Sonderfarben (M. Adams Originalfarben)

	Gelb L1	Rot L7	Violettblau L13	Grün L19	DR+G	DY+B	DY+B/ DR+G
h	93,3	27,3	287	179,8			
L	79,7	51,9	42,3	50			
C	74,5	55,8	45	36,8	92,6	125,2	1,35
S⁺	68,3	73,2	72,9	59,3	132,5	144,2	1,09

Tabelle 8 Vergleich der Werte von Helligkeit L, Buntheit (Chroma) C und Sättigung S^+ von ausgewählten Sonderfarben (PCCS Harmonic Cards 201)

	Gelb V8	Rot V2	Violettblau V19	Grün V14	DR+G	DY+B	DY+B/ DR+G
h	85,7	25,1	274,8	183,5			
L	79	45,8	36,2	47,8			
C	97,3	67,6	43,1	58,6	126,2	146,8	1,16
S⁺	77,6	82,8	76,6	77,5	160,3	163,5	1,02

Die Ellipsen nach Tabelle 7 sind etwas länglicher als die aus Tabelle 8. Die Ellipse im Sättigungssystem nach Tabelle 8 ist fast ein Kreis.

4.4 Farbsättigung und Farbabstand

Der Farbabstand ist eine wichtige Kenngröße zur Qualitätskontrolle von Produkten. Deshalb ist es wichtig, dass die Farbabstandsformel der Messgeräte der Farbunterschieds-Empfindung des Menschen entspricht.

Der Farbabstand zweier Farben 1 und 2 ergibt sich nach der CIELAB-Formel zu:

$$\Delta E_{ab}^* = \left[(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2 \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

oder

$$\Delta E_{ab}^* = \left[(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

wobei

$$\Delta H_{ab}^* = 2(C_{ab1}^* \cdot C_{ab2}^*)^{1/2} \sin\left(\frac{\Delta h_{ab}}{2}\right). \quad (4.4)$$

Die Farbabstandsproblematik setzt sich dabei aus zwei Komponenten zusammen:

1. Anordnung von Farbpaaeren im räumlichen Modell
2. Erreichen einer maximalen Empfindung für Farbe (Farbsättigung)

Zur Darstellung von Farben dient im CIELAB-System der Zylinder. Der Zylinder hat folgende, in Abb. 4.4.1 dargestellte Eigenschaft.

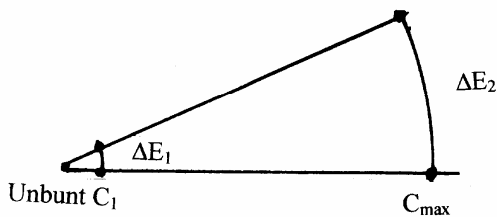


Abb. 4.4.1 Farbabstand innen und außen in der Buntheitsebene des Farbzylinders

Betrachten wir ein Farbpaar mit einem Farbtonwinkelunterschied von beispielsweise 26° . Wenn dieses Paar eine kleine Buntheit hat, so ist der Abstand im Farbraum kleiner als wenn es eine große Buntheit hat. Zwar ist der empfundene Farbabstand bei großer Buntheit größer als bei kleiner, aber nicht in so starkem Maße.

Der Abstand des Farbpaaeres ist proportional zum Radius des Raumes, d. h. zu C. Wir müssen den Farbabstand, der durch die Anordnung im zylinderförmigen Farbmodell entsteht, korrigieren und diese Korrektur muss abhängig von C bzw. von S sein.

1993 wurde von mir die Formel (4.5) vorgestellt [63], die sich inzwischen gut in der Praxis bewährt hat. Praktiker bevorzugen diese einfache Formel, die auch noch nachträglich eine Korrektur der mit der CIELAB-Formel (1976) ermittelten Farbabstände erlaubt.

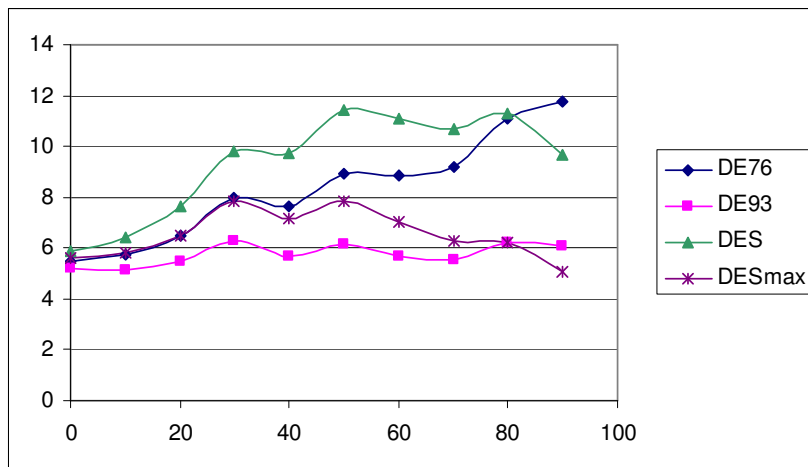
$$\Delta E_{93} = \frac{\Delta E}{1 + \frac{C}{70}}, \quad (4.5)$$

Der Vorteil dieser Formel gegenüber der CIE 94 –Formel wurde ausführlich in [63] dargestellt.

Für den LSh-Farbraum können wir die folgende Formel erproben:

$$\Delta E^* = \frac{\Delta E}{1 + \frac{S^*}{S_{\max}^*}} \approx \frac{\Delta E}{1 + \frac{S^*}{87}} \quad (4.6)$$

Abb. 4.4.2 zeigt ein Beispiel für den Farbabstand.



a) Farbabstand in Abhängigkeit von der Buntheit



b) Druckkontrollstreifen Magenta (Flächendeckungsgrad wächst in 10 % Schritten)

Abb. 4.4.2 Farbabstände zwischen den benachbarten Kontrollfeldern, berechnet nach CIELAB 1976 (DE76) und nach obigen Formeln (DE93 und DES).

Die Farbabstände benachbarter Felder im Druckkontrollstreifen werden als näherungsweise gleich empfunden, bei hohen Flächendeckungsgraden werden die Abstände etwas geringer empfunden. Der erste Abstand zwischen 0 und 10 % wird etwas größer als die anderen empfunden.

Man sieht in Abb. 4.4.2 a, dass der mit der Buntheit zunehmende Farbabstand, der sich bei der Berechnung nach der CIELAB Formel ergibt, nicht gut mit der menschlichen Empfindung übereinstimmt. Die Berechnung des Farbabstandes mit Hilfe der Sättigung ergibt am Ende des Druckkontrollstreifen den gewünschten kleineren Farbabstand. Die beiden Formeln, die den Farbabstand mit Hilfe der Buntheit C bzw. mit Hilfe der Sättigung S^+ korrigieren, nähern den gemessenen Farbabstand gut an den empfundenen Farbabstand an.

Es müssten umfangreiche Untersuchungen, insbesondere bei dunklen Farben durchgeführt werden, um zu sehen, ob der Sättigungsraum besser zur Farbabstandsbeschreibung geeignet ist als der Buntheitsraum. Bei dunklen Farben ergeben sich im Sättigungsraum größere Abstände als im Buntheitsraum.

Allerdings erhebt sich die Frage, welchen Hintergrund man für die Beurteilung visueller Farbabstände im dunklen Bereich verwenden sollte. Farbabstände werden nach Vorschrift vor einem mittelhellen Grau beurteilt. In der Druckpraxis werden Farben meistens vor weißem Hintergrund betrachtet. Farbabstände im dunklen Bereich erscheinen größer, wenn man sie vor dunklem Grau abmüstert als vor hellem. Dieses Problem müsste eigentlich, wie im CIECAM Modell versucht, berücksichtigt werden, wenn man Farben visuell abmüstert. Allerdings würde sich das praktische Problem ergeben, den Hintergrund beim Abmüstern dauernd zu wechseln, d. h. man müsste praktisch mindestens 10 verschiedene graue Hintergründe zur Verfügung haben, um das Umfeld nicht nachträglich korrigieren zu müssen. Das würde aber der zur Zeit vorliegenden Vorschrift zur visuellen Abmusterung widersprechen.

Die von der FOGRA durchgeführte Untersuchung zum Vergleich von Farbabstandsformeln [32] bezog die obige, auf der Sättigung basierende Formel mit ein und ergab für kleine Farbabstände (bis $\Delta E = 5$) das zweitbeste Abschneiden dieser Formel hinter der Farbabstandsformel CIEDE 2000.

Ein Vergleich der visuellen Ergebnisse von großen Farbdifferenzen $\Delta E > 10$ ergab eine bessere Korrelation mit der CIELAB- als mit der CIEDE2000- Formel wie im Technischen Report CIETC1-63, im Juni 2009 in Budapest vorgestellt wurde.

4.5 Effekte in den Sättigungslinien

Wir haben in Kapitel 3.3 gesehen, dass die Schwankungen in den Sättigungslinien wichtige Messeffekte sind, die keineswegs ausgleichend werden dürfen.

Adam hat in seiner Arbeit ähnliche Effekte in den Reinheitslinien gefunden (Abb. 1.3.8).

Die folgende Abbildung 4.5.1 zeigt die Lage der von Adam verwendeten Farben in der Normfarbtafel.

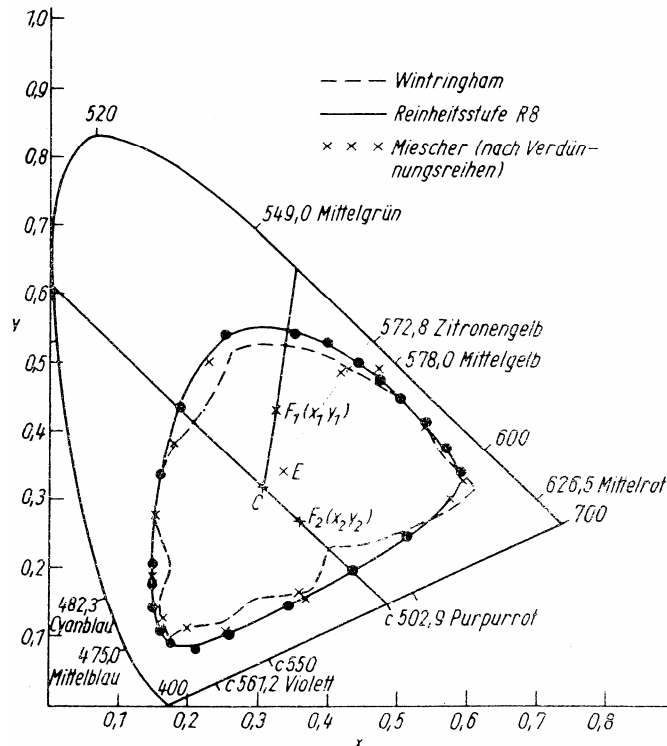


Abb. 4.5.1 Darstellung der Adamschen Farben und Reinheitslinien nach Adam, Miescher und Wintringham in der Normfarbtafel (TGL 21579)

Um die Lage der Minima und Maxima genauer angeben zu können, wurden mit Weiß aufgehellte Farben des PCCS gemessen. Das PCCS System unterscheidet sich von den deutschen Systemen dadurch, dass es wesentlich besser an die Empfindung angepasst ist. Es wurde nicht die Vereinfachung gemacht, Geraden im xy-System für die Bunttöne zu verwenden, sondern es wurden die empfindungsgemäß richtigen Töne gewählt. Das heißt, jede Ebene ist ausgewogen und man wird nicht durch Bunttonschwankungen abgelenkt (Abb. 4.5.2). Man erkennt gebogene Linien, die jeweils zu einem Buntton gehören. Weiterhin gehören die Punkte zu empfindungsgemäß gleichen Sättigungsstufen.

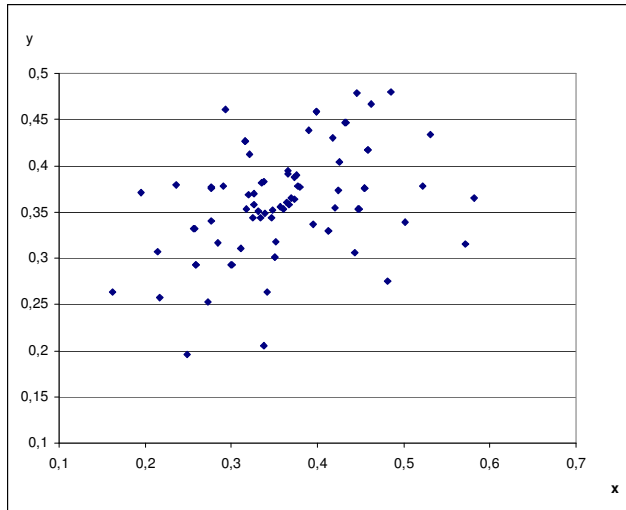


Abb. 4.5.2 Ein Teil der Farbmuster des PCCS in der Normfarbtafel. Man erkennt, dass die Punkte zu radial verlaufenden gebogenen Linien gehören.

Welche Zusammenhänge sind es, die zu den Effekten in den Sättigungslinien gehören?

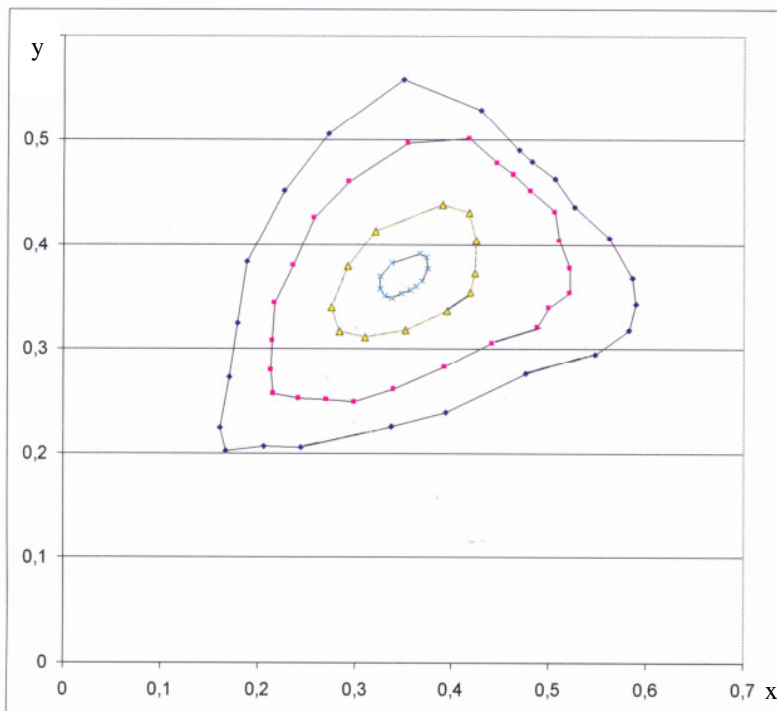


Abb. 4.5.3 Sättigungslinien(Linien gleicher Sättigung) im PCCS. Man erkennt bei den Abständen zur Volltonlinie drei Maxima und drei Minima. Die Maxima liegen bei Blau, Grün und Rot

Berechnet man für das PCCS System die Abstände relativer Sättigung, d. h. S^+ bezogen auf die Sättigung der Volltonfarbe, so ergibt sich Abb. 4.5.4. Es sind jeweils die Abstände zum Unbuntpunkt aus den gemessenen x- und y Werten ermittelt worden und auf die Abstände der Volltonfarbe Farbe v bezogen. In der Abbildung sind die Farben so angeordnet, dass die Darstellung symmetrisch ist, Gelb hat die Nummer 14. Der Beginn, Nr. 2 in der Abbildung ist Violettblau (20). Man erkennt, ein starkes Maximum bei Gelb und zwei weitere schwache, des Weiteren drei Minima. Auffällig ist aber, dass es drei Maxima und drei Minima sind. Sollte das nicht mit den drei Rezeptoren und der Verarbeitung der drei Rezeptorsignale zusammenhängen?

Zeigen sich in den Sättigungslinien Grundempfindungen und die zugehörigen Komplementärfarben?
 Zu dem gefundenen grünlichen Blau ist Orangerot die Komplementärfarbe, zu grünlichem Gelb Violett-
 blau und zu Rot bläuliches Grün (Abb. 4.5.9).

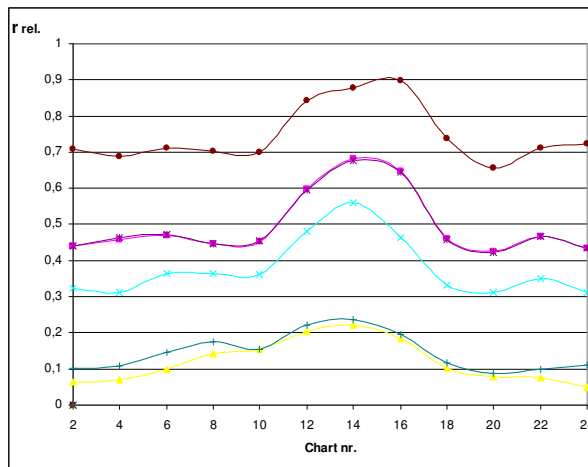


Abb. 4.5.4 relative Abstände bezogen auf den Volltonabstand von Unbuntpunkt, von Linien gleicher Sättigung im PCCS. Die Darstellung beginnt bei Violettblau, 14 ist Gelb und 24 Purpur.

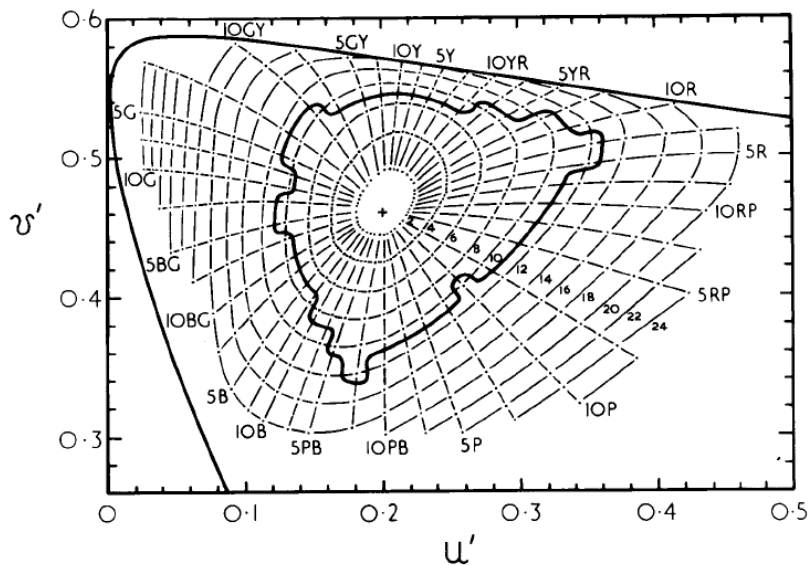


Abb. 4.5.5 Linie der verfügbaren Charts mit Munsell-Value 5 im $Lu'v'$ System, Hunt [37]

Hunt [37] hat im $Lu'v'$ -System die Lage der verfügbaren Charts mit Munsell-Value 5 ermittelt. Man erkennt auch hier einen Verlauf, der eher an ein Dreieck mit gebogenen Seiten erinnert als an eine Ellipse (Abb. 4.5.5).

Es erscheint plausibel, dass sich unsere Uempfindungen im Zusammenhang mit der empfundenen Sättigung zeigen. Sollte es sechs Grundempfindungen geben?

Mit seiner Annahme von fünf Grundempfindungen steht Munsell ziemlich allein. Er hat Purpur als eigene Empfindungsqualität herausgehoben. Die meisten gehen von vier Grundempfindungen aus, aber zahlreiche auch von sechs [94], z. B.:

- Goethe
- Runge
- Fechner
- Zwimpfer [113]

- Max Becke (Direktor des Textilforschungsinstituts Wien 1924)
- Aemilius Müller (Schweizer Ökonom)
- Alfred Hickethier

Unter Urfarben (Urempfindungen) versteht die Psychologie ein Rot, das weder gelblich noch bläulich ist und ebenso ein Grün, das weder bläulich noch gelblich ist. Zur Bestimmung dieser Farben legt man Personen Farbcharts vor und lässt sie das „Rot“ und das „Grün“ auswählen.

Die folgende Abbildung 4.5.6 zeigt die Lage der Empfindungsqualitäten in der Normfarbtafel.

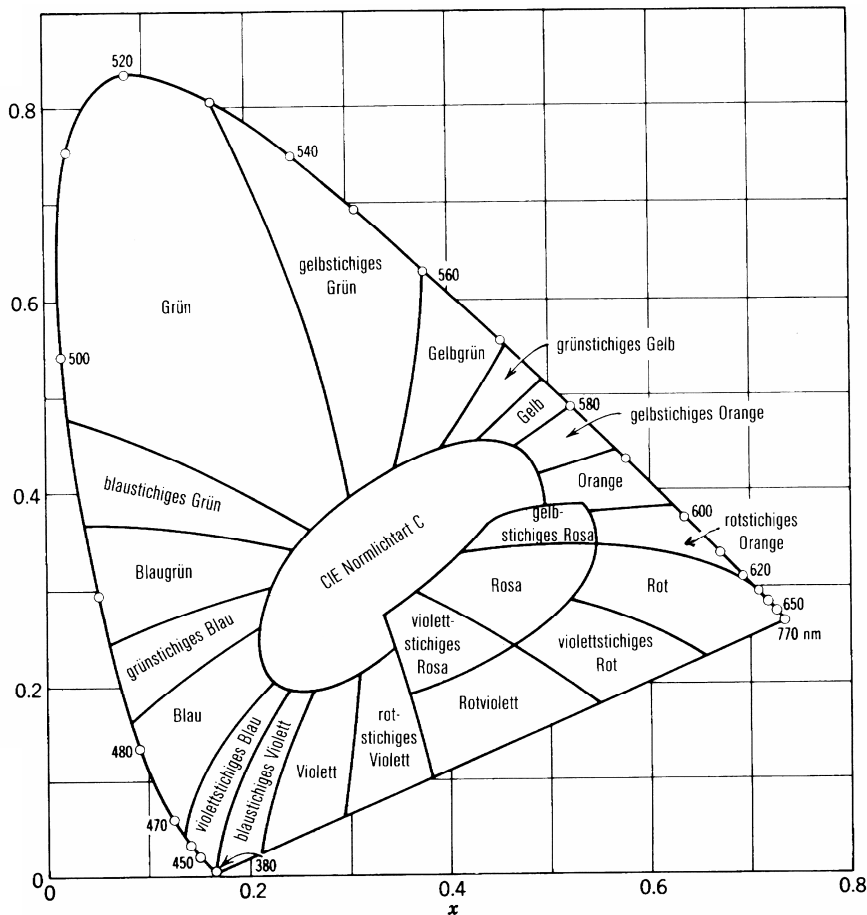


Abb. 4.5.6 Lage der Empfindungsqualitäten der Normfarbtafel (nach Judd [50]).

Eine Erklärung für die gemessenen Effekte in den Sättigungslinien lässt sich in Gegenfarbenfunktionen von Wolf und Scheibner [106] finden, beziehungsweise in den entgegengesetzten spektralen Momenten M_1 und M_2 in der Theorie von Hurvich und Jameson.

Diese Momente basieren auf einer linearen Transformation des Juddschen Modells [51] mit den Tristimuluswerten X' , Y' und Z' .

Valberg [100] hat diese Momente geometrisch addiert:

$$M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2} \quad (4.7)$$

mit $M_1 = X' - Y'$ (4.8)

$M_2 = 0,4 \cdot (Y' - Z')$ (4.9)

Der spektrale Verlauf ist in Abb. 4.5.7 zu sehen.

Bei der Verrechnung der Gegenfarbensignale ergeben sich drei Maxima und drei Minima, die sich komplementär gegenüberliegen.

Das heißt, die vektorielle Addition der Gegenfarbensignale führt zu sechs bevorzugten Farben.

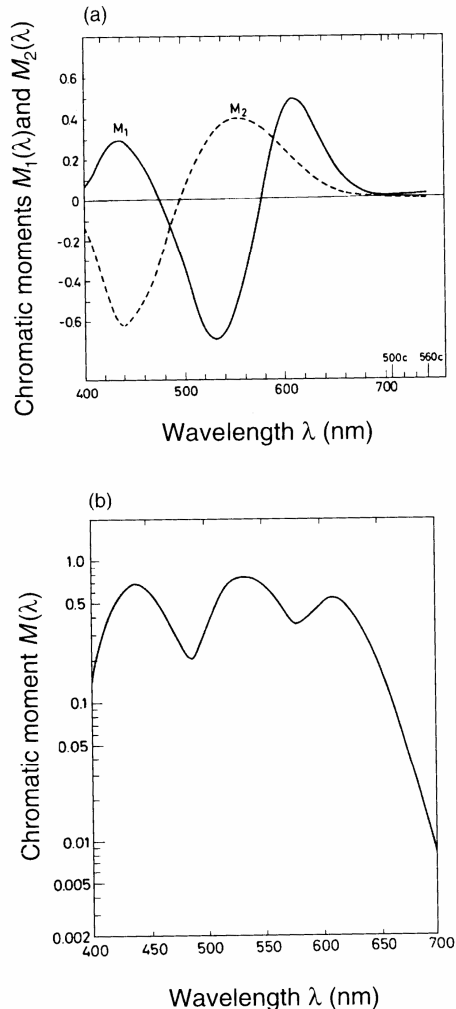


Abb. 4.5.7 Gegenfarbensignale nach Hurvich und Jameson oben und entgegengesetzte spektrale Momente nach Valberg [100] unten.

Mit Hilfe von drei Farbsensoren arbeitet die erste Ebene die Netzhaut, wie ein Farbmessgerät. Die Rezeptoren haben ihre maximale Empfindlichkeit im Violettblau, Grün und Zitronengelb. Diese Empfindungen bei diesen Wellenlängen würde man allein nicht als Grundempfindungen ansehen. In der nächsten Verarbeitungsebene wurden sechs Gegenfarbenpaare entdeckt, deren Wirkung man auch in den Sättigungslinien erkennen kann, wobei das Blau-Gelbe Paar das stärkste Maximum und Minimum des Abstandes der Sättigungslinien besitzt.

Abbildung 4.5.8 zeigt die Wellenlängen der maximalen Empfindlichkeit aus den Forschungsergebnissen der Neurologie in Verbindung mit den Wellenlängen der Normfarbtafel.

Rezeptoren Gegenfarben- Zellen im CGL
 zellen

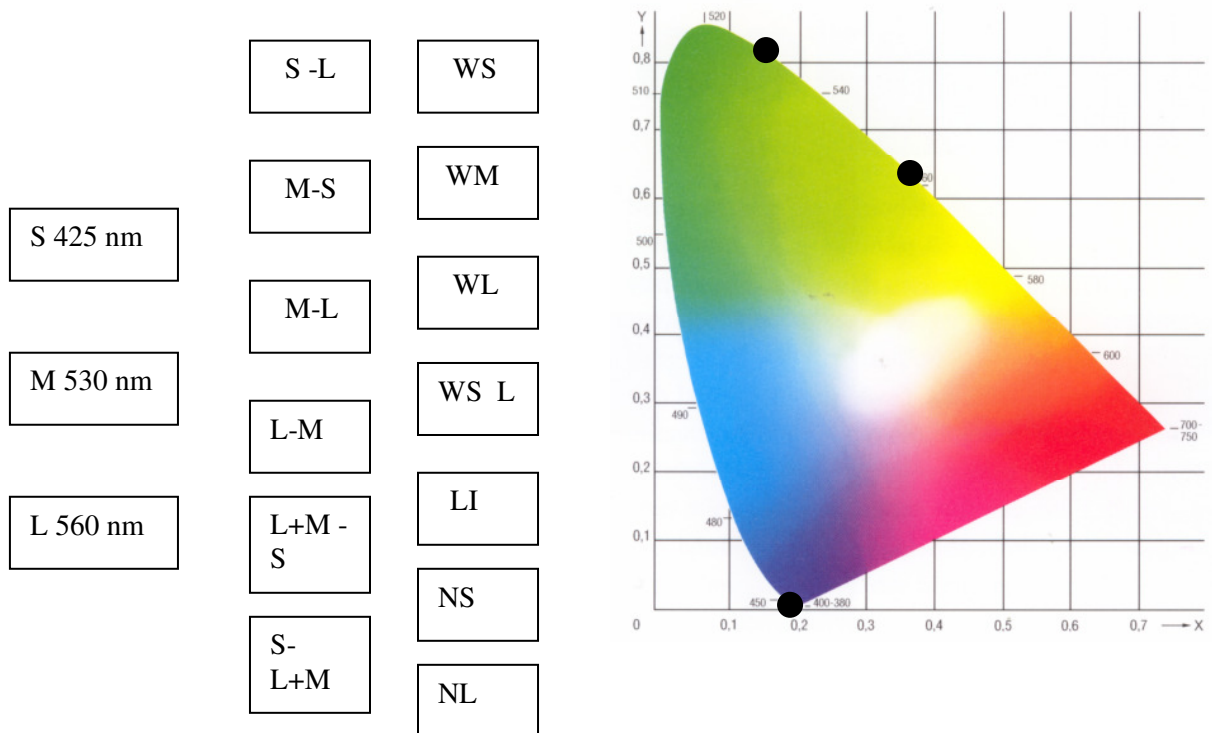


Abb. 4.5.8 Links: Signalgewinnung mit drei Rezeptoren, Weiterverarbeitung in sechs Gegenfarbzellen und sieben Zelltypen zur Bildentstehung im CGL; rechts: Lage der Maxima der Empfindlichkeit der Rezeptoren in der Normfarbtabelle

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, können WM-Zellen zwischen Gelb und Weiß unterscheiden, d. h. sie können zwischen Gelb (M-S) und einer Erregung aller drei Rezeptoren L, M und S und damit zwischen Gelb und Unbunt unterscheiden und das könnte möglicherweise eine Information zur Farbsättigung liefern. Für die Richtigkeit dieser Annahme spricht auch das auf Seite 39 dargestellte Ergebnis von Jacobs [45] und Marre [70], dass für Gelb die Schwelle der Sättigungsunterscheidung für die erste Stufe vor Weiß am geringsten ist.

Die Zellen LI können die Helligkeitsempfindung erzeugen.

Möglicherweise sind die NS und NL -Zellen für den Unterschied zwischen der Wahrnehmung von Kalt- und Warmfarben verantwortlich.

Die Gegenfarbensignale führen zu sechs Grundfarben, drei stellen Minima dar und drei Maxima der relativen Sättigung dar, wobei das Maximum bei Gelb besonders deutlich ist.

- Violettblau entspricht S-L,
- Zitronengelb M-S,
- Purpur (L+M) -S,
- Grün M-L,
- Orangerot L-M,
- Cyan S- (M+L).

Man könnte damit sagen, wir besitzen einen Farbkasten mit sechs Grundfarben zur Erzeugung unserer Bilder.

Jedem Maximum liegt ein Minimum komplementär gegenüber. Bei dieser Sichtweise ergibt sich gemäß Abb. 4.5.9 ein symmetrischer Farbraum, bei dem sich jeweils zwei Komplementärfarben gegenüberliegen.

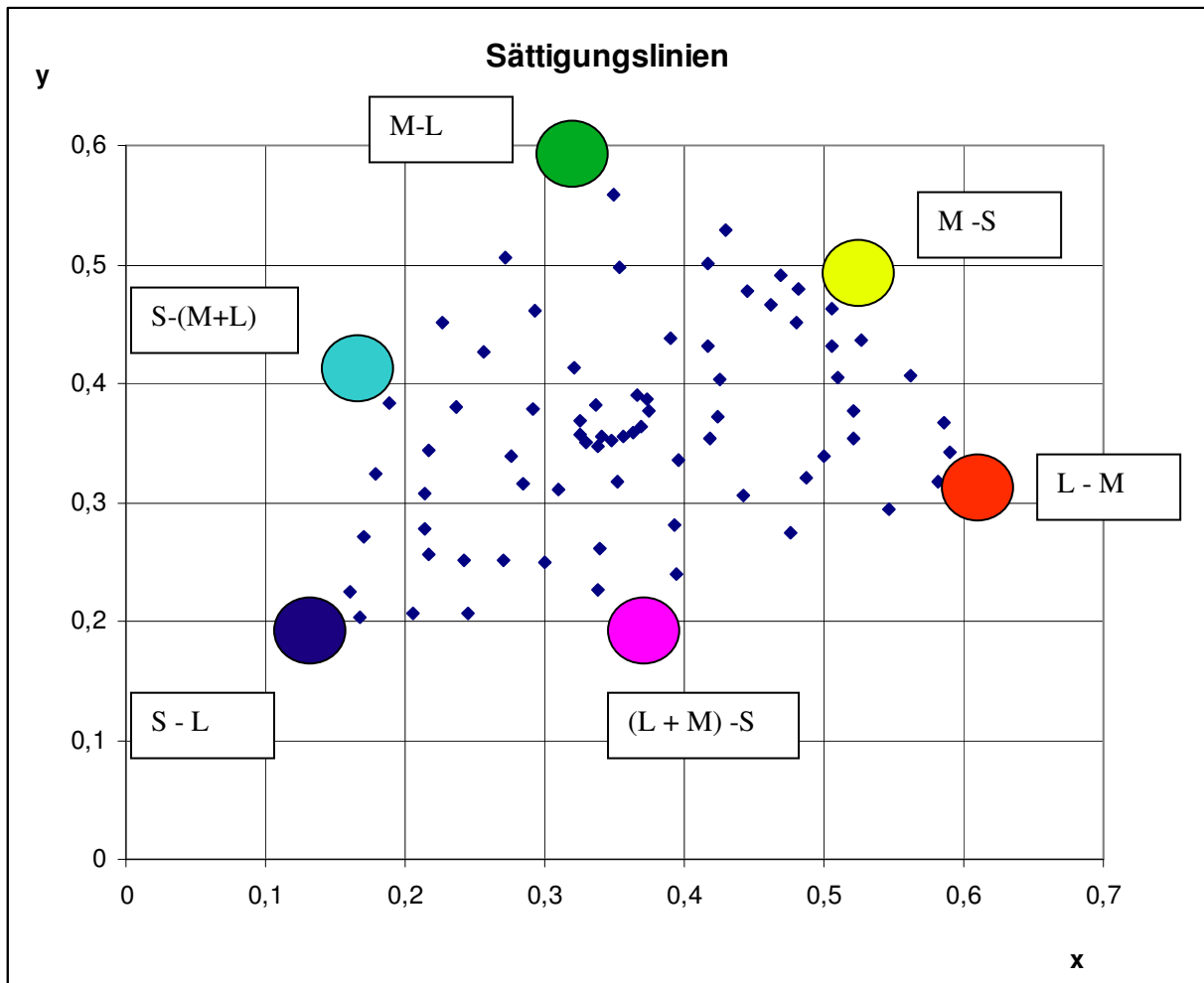


Abb. 4.5.9 Symmetrie im Farbkreis: Lage der drei Minima und der drei Maxima in der x,y -Ebene. Weiterhin sind die Gegenfarbentzellen eingezeichnet, die man diesen Extrema zuordnen kann.

Die Maxima der Linien relativer Sättigung, bzw. die minimalen Abstände zwischen den Charts der 2. Sättigungslinie und den Volltonlinie im PCCS-System entsprechen den drei subtraktiven Grundfarben Cyan, Gelb und Magenta.

Die Minima der Linien relativer Sättigung, bzw. die maximalen Abstände zwischen den Charts der 2. Sättigungslinie und den Volltoncharts entsprechen den drei additiven Grundfarben Rot, Grün und Blau.

Die Effekte in den Sättigungslinien bilden damit die Grundlage für ein neues Farbenentstehungsmodell. Das Modell hat den Vorteil einer Symmetrie und beseitigt das, was bisher unbefriedigend war: In dem Modell mit vier Urfarben, liegen sich zwar Gelb und Blau komplementär gegenüber, nicht aber Rot und Grün. Auf der Basis von sechs Grundfarben kann ein Modell entwickelt werden mit drei komplementär gegenüberliegenden Farbpaaren.

5. Zusammenfassung

Die Buntheit, so wie sie von der Farbwissenschaft definiert ist, stellt für viele Anwender ein Problem dar. Sie erwarten einen Farbraum mit drei von einander unabhängigen Größen und nach der Ansicht der meisten Nutzer sollte er symmetrisch sein. Das heißt, es gibt ein Problem mit dem Begriff der Buntheit, die die Helligkeit beinhaltet. Es war deshalb ein Ziel der Arbeit, die Begriffe Buntheit und Sättigung für den Anwender klar zu trennen und anschaulich zu erklären.

Insbesondere sollte gezeigt werden, dass die Sättigung über die folgende Beziehung mit der Buntheit und der Helligkeit zusammenhängt:

$$S^+ = \frac{C}{\sqrt{L^2 + C^2}} 100 \% \quad (5.1)$$

Diese, bisher unbekannte Gleichung, hat sich aus einer verbalen Definition des Begriffes Sättigung von Manfred Richter ableiten lassen.

Bei dem Versuch, die Sättigungsformel mit den empirischen Werten der DIN 6164 zu verifizieren, die ebenfalls von M. Richter entwickelt wurde, musste festgestellt werden, dass dieses System einen etwas geänderten Sättigungsbegriff verwendet. Die aktuelle Definition der Sättigung in der deutschen Norm Farbmessung, die auf diesem neuen Begriff von Richter basiert, entspricht nicht dem, was die meisten Anwender unter Sättigung verstehen.

Bei dem neuen Sättigungsbegriff lassen sich für Gelb und Grüngelb keine Sättigungseffekte in den Sättigungslinien finden. Der alte Sättigungsbegriff dagegen entspricht einer Sättigung bei allen Farben bei der Darstellung von Sättigungslinien in der Normfarbtafel.

In dem von Richter ausführlich untersuchten Bereich der gelben Ebene konnte eine sehr gute Übereinstimmung von S^+ mit den visuellen Ergebnissen der Sättigung ermittelt werden. Damit konnte gezeigt werden, dass die Formel für S^+ den Zusammenhang zwischen den Größen Helligkeit, und Buntheit richtig wiedergibt.

Die Verifikation der Sättigungsformel mit Hilfe der DIN 6164 erwies sich als aufwändig, weil zunächst die Sättigungslinien wieder rekonstruiert werden mussten, die durch Begradigung der Messwerte verloren gegangen waren. Richter machte Annahmen über die Linearität der Sättigungsstufen innerhalb der Bunttöne, die, wie sowohl durch seine eigenen Messungen als auch durch visuelle Betrachtungen gezeigt werden konnte, nicht im gesamten Farbraum gegeben sind. Es konnte gezeigt werden, dass sich bei Korrektur der Abstände der Sättigungslinien in der Normfarbtafel ein linearer Zusammenhang zwischen der mit der Formel berechneten Sättigung S^+ und den Sättigungsstufen der DIN 6164 ergibt.

In einigen Bereichen konnte keine perfekte Übereinstimmung zwischen der Formel für S^+ und den empirischen Untersuchungen der DIN 6164 festgestellt werden, insbesondere werden im Rot-Purpur-Bereich etwas zu hohe Sättigungswerte ermittelt. Da die DIN 6164 nur im gelben Bereich visuell abgemustert ist, fehlt eine Skalierung, die sich über den gesamten Farbraum erstreckt.

Aus diesem Grund wurde eine Abmusterung der Charts des japanischen Systems vorgenommen.

Durch die visuelle Abmusterung des japanischen PCCS konnte gezeigt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen den visuellen Sättigungswerten und den mit der neuen Formel ermittelten Werten besteht.

Bei den Untersuchungen konnte außerdem an mehreren Beispielen gezeigt werden, dass die bisher zum Teil verwendete Formel

$$S = \frac{C}{L} \quad (5.2)$$

weniger gut geeignet ist, die Sättigung zu beschreiben.

Man hat mit der Formel für die Sättigung S^+ die Möglichkeit, die Sättigung aus den Größen zu bestimmen, die ein Farbmessgerät liefert. Das ist für die Anwender ein Fortschritt.

Mit Hilfe der Sättigung S^+ kann ein neuer Farbenraum entwickelt werden, der LSh-Farbenraum. Er ist ein Raum mit drei quasi voneinander unabhängigen Größen.

Der LSh-Farbenraum ist wesentlich symmetrischer als der LCh-Farbenraum und Gelb fällt nicht mit extrem hohen Werten aus dem Rahmen. Das macht die Anwendung des Farbenraumes in der Praxis einfacher.

Die Formel beschreibt auch einen bisher nach Meinung der Autorin nicht in der Literatur benannten, aber manchen Anwendern bekannten Effekt: Durch geringfügiges Zumischen von Schwarz ist eine Steigerung der Sättigung möglich. Dass die Formel diesen Effekt wieder gibt, spricht dafür, dass es sich um eine grundlegende Formel und nicht nur um eine Näherungsformel handelt.

Des Weiteren wurden in der Arbeit einige der in der Praxis häufig verwendeten Systeme gezeigt und in diesen Farbsystemen die Parameter Buntheit und Sättigung. Weiterhin wurde ein auf der Sättigung basierendes neues System vorgestellt, in dem sich automatisch Platz für die Empfindungen Braun und Oliv ergibt.

Die Effekten in den Sättigungslinien brachten die Autorin auf ein neues Farbestehungsmodell, das einen Farbraum mit drei Komplementärfarbenpaaren besitzt. Diese Komplementärfarbenpaare lassen sich mit den Gegenfarbenzellen in Zusammenhang bringen.

Die größere Symmetrie des LSh-Farbenraumes und die Berücksichtigung der Sättigung anstelle der Buntheit lassen möglicherweise Vorteile gegenüber dem LCh-Farbenraum bei der Farbabstandsbewertung erwarten. Dazu könnte sich eine weitere Arbeit anschließen: Man könnte die auf der Basis der Sättigung vorgeschlagene Farbabstandsformel noch an weiteren visuellen Daten, insbesondere für große Farbabstände, erproben und mit anderen Abstandsformeln vergleichen.

Literatur

1. Adams, E. Q., Cobb, P. W.
The effect on foveal vision of bright surroundings, *J. Exp. Psychol.* 5, S.39 (1922)
2. Adam, M.
Theoretische Grundlagen eines modernen entwicklungsfähigen Farbsystems, Internationale Farbentagung, Interfarbe 68 Dresden, Vortrag 29, 535.641.1
3. Backhaus, W.
Allgemeine Sinnesphysiologie, in : *Neurowissenschaft*, hrsg. von Dudel, J., Menzel, R., Schmidt, R. F. Springer Berlin, Heidelberg, New York (1996)
4. Backhaus, W.
Physiologie der Insekten, hrsg. von Gewecke, M., Gustav Fischer Verlag Stuttgart Jena, New York 1995
5. Bedford, R. E., Wyszecki, G. W.
Wavelength discrimination for point sources, *J. Opt. Soc. Am.* 48 (1958), S.129-135
6. Bendin, E.
Farbatlanten im analytisch- und experimentell-ästhetischen Gebrauch, *Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden*, 49 (2000) Heft 4/5 S.109-115
7. Berger-Schunn, A.
Praktische Farbmessung, Musterschmidt-Verlag Göttingen Zürich 1991
8. Brown, R. O.; MacLeod, D. I. A. Color appearance depends on the variance of surround colors, *Current Biology* 7 (11) (1997), S. 844-849
9. Brown, P. K., Wald, G.
Visual Pigments in Single Rods and Cones of the Human Retina, *Science* 144 (1964), S.45-51
10. Bownmaker, J. K.
The evolution of vertebrate visual pigments and photoreceptors. In: *Vision and Visual Dysfunktion*, Vol. II. Evolution of the eye and visual system. (ed: Cronly-Dillon J. R., Gregory R.L.) London. Maximilian 1991, p. 63-81
11. Campenhausen, Ch, Schramme, J. Vor- und Nachgeschichte von Wilhelm Ostwalds Farbsystematik, *Phänomen Farbe* 9, 2003, S. 14-20
12. CIE Technical Report, Fundamental chromaticity Diagramm with physiological Axes, CIE 1701: 2006
13. Creutzfeldt, O., Lee B., Valberg, A.
Colour and brightness signals of parvocellular lateral geniculate neurons, *Exp Brain Res* 63 (1986) S.21-34
14. Creutzfeldt, O., Lange-Malecki, B., Wortman, K.
Darkness induction, retinex and cooperative mechanisms in vision, *Exp. Brain Res.* 67 (1987) S.270-283
15. Cytowic, R. E.
Farbenhören, Töne schmecken, Byblos Verlag Berlin 1997
16. De Valois, R. D.
Physiological Basis of Color Vision, *Die Farbe* 20 (1971), S.151-169

17. Dartnall, H. J. A., Browmaker, J. K., Mollon, J. D.
Human visual pigments: Microspectrophotometric results from the eyes of seven persons, Proc.R. Soc. Lond B 220, (1983) S.115-130
18. DIN 5033 Farbmessung, Teil 1 bis 9
19. DIN 6164 DIN-Farbenkarte (1980/1981)
20. DIN 6174, Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen nach der CIELAB-Farbenraum 2007-10
21. DIN 6176 Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99 Formel 2001
22. Dudel, J., Menzel, R., Schmidt, R.F. Neurowissenschaft, Springer Berlin, Heidelberg, New York 1996
23. Dreppe, W.
Farbkonstanz und simultaner Umfeldkontrast- Beziehungen und Wechselwirkungen, Diss.Georg-August-Universität Göttingen 1988
24. Ebenhöf, H.
Mathematische Beziehungen zwischen Farbreizen und Farbempfindungen, Dissertation Freiburg, 1976
25. Ekroll, V.
On the nature of simultaneous colour contrast, Dissertation Kiel 2005
26. Emrich, H. M., Schneider, U. Zedler, M.
Welche Farbe hat der Montag, Hirzel 2001
27. Fairchild, M. D.
Formulation and Testing of an Incomplete-Chromatic-Adaption Model, Color research and application, 16, Nr.4 (1991), S.243-250
28. Fairchild, M. D.
Refinement of the RLAB Color Space, Color research and application, 21, Nr.5 (1996), S.338-346
29. Fairchild, M. D.
RLAB: A Color-Appearance Space for Color Reproduction, SPIE Vol. 1909, (1993), S.19-30
30. Fairchild, M. D.
Color Appearance Models, Wiley John + Sohns 2005
31. Fechner, G.
Elemente der Psychophysik, Band 2, Leipzig, Druck und Verlag von Breitkopf und Härtel 1907
32. FOGRA-Forschungsbericht 60.054 (2008)
33. Gescheider, G. A. Psychophysics the Fundamentals, Lawrence Erlbaum Associates Publishers London 1997
34. Helmholtz, H. von
Handbuch der physiologischen Optik, 2. Band, 3. Auflage 1911, Verlag von Leopold Voss, Hamburg und Leipzig 1909-1911
35. Hering, E.
Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn, Verlag Julius Springer, Berlin 1920

36. Hill, B., Roger, Th., Vorhagen, F. W.
Comparative Analysis of the Quantization of Color Spaces on the Basis of the CIELAB Color-Difference Formula, ACM transactions on Graphics, Vol.16, Nr.2 (1997) S.109-154
37. Hunt, R. W.G
The Specification of Color Appearance 1. Concepts and terms, Color research and application Vol. 2, Nr. 2 (1977) S. 55-68
38. Hunt, R. W. G.
A Model of Colour Vision for Predicting Color Appearance in various viewing conditiones, Color research and application Vol. 12, Nr. 6 (1987) S. 297-314
39. Hunt, R. W. G.
Color research and application, Revised Colour-Appearance Model for related and unrelated Colours, Vol. 16, Nr.3 (1991) S.146-165
40. Hunt, R. W. G.
An Improved Predictor of Colourfulness in a Model of Colour Vision, Color research and application Vol. 19, Nr.1 (1994) S.23-26
41. Hunt, R. W. G., Luo, M. R.
Evaluation of a Model of Colour Vision by Magnitude Scalings: Discussion of Collected Results, Color research and application Vol. 19, Nr.1 (1994) S.27 -33
42. Hunt, R. W. G., Luo, M. R.
Comparison of the structures and performances of colour appearance models, Tagungsband der AIC Color 97 Kyoto, S.171-174
43. Hurvich, L. M.
Color vision, Sunderland, Mass.: Sinauer Associated Inc. 1981
44. Irtel, H.
Psychophysische Invarianzen in der Farb- und Helligkeitswahrnehmung, Springer-Verlag 1991
45. Jacobs, G.H. Saturation estimates and chromatic adaption, Perception Psychophysics, Vol.2 (1967) S. 271-274
46. Jameson, D., Hurvich, L. M. Perceived Color and its Dependence on Focal, Surrounding, and Preceding Stimulus, Variables, Journal of the optical society of Amerika, Band 49, Nr. 9, September 1959, S. 890ff
47. Jameson, D., Hurvich, L. M.
Opponent chromatic induction: Experimental evaluation and theoretical account, J. opt. Soc. Am. 51(1961) S.46-53
48. Jameson, D., Hurvich, L. M.
Theorie of brightness and color contrast in human vision, Vision Res.4 (1964) S.135-154
49. Juan. L.G., Luo, M. R.
Magnitude estimation for scaling saturation, 9th Congress of the International Colour Association, Proceedings of SPIE Vol. 4421 (2002) S. 575-578
50. Judd, D. B.
Hue, saturation and lightness of surface colors with chromatic illumination, J. opt. Soc. Am. 30 (1940) S.2

51. Judd, D. B.
CIE Technical Committee no.7, Colorimetry and Artificial Daylight, Report of Secretariat US Committee. In Proceedings of the 12th Session of the CIE, Stockholm 1951, Vol. 9, Part 7. Central Bureau of the CIE: Paris, pp. 1-60
52. Kries, J. von
Die Gesichtsempfindungen, Handbuch der Physiologie des Menschen, 3. Band, Verlag von F. Vierweg und Sohn, Braunschweig , 1905
53. Kuehni, R. www4.ncsu.edu/~rgkuehni/books.html
54. Kurtenbach, W.
Zum Farbsehen des Menschen: psychophysisch registrierte Farbtonänderungen als Funktion der Sättigung, Diss. Freiburg 1979
55. Ladd-Franklin, Ch.
Colour and Colour Theories, London, Kegan Paul 1929
56. Land, E. H.
An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision, Proc. Natl. Acad. Sci. (USA), Vol. 83 (1986) S. 3078-3080
57. Lang, H.
Farbmetrik und Farbsehen, München 1978
58. Lee, B. B., Pokorny, J., Smith; V. C. Kremers, J.
Responses to Pulses and Sinusoids in Macaque Ganglion Cells, Vision Res. Vol.34, No.23 (1994) S.3081-3096
59. Lee, B. B.
Receptive Field Structure in the Primate Retina, Vision Res. Vol. 36, No 5, (1996) S.631-644,
60. Loos, H.
Farbmessung, Verlag Beruf + Schule, Itzehoe 1989
61. Lübbe, E.
Farbmessungen für eine Optimierung der Druckqualität im Offsetdruckverfahren, Deutscher Drucker 40 (1994) w6-w8
62. Lübbe, E.
Verbesserung der Farbabstandsformel CIELAB für Druckfarben, Die Farbe, Nr. 41(1995) S. 25-29
63. Lübbe. E.
Empfindungsgemäße Farbbeschreibung unter Berücksichtigung des Umfeldes, Diss. 1999, Aachen 2000, Shaker
64. Lübbe. E.
Neue Gleichungen der Farbenlehre, in: Phänomen Farbe, 3(2007) S. 27ff
65. Luo, M. R., Clarke, A. A., Schappo, A., Scrivener, S. A. R., Tait, C. J.
Quantifying Colour Appearance. Part II. Testing Colour Models Performance using LUTCHI Colour Appearance Data, Color research and application Vol. 16, Nr.3 (1991), S.181-197
66. Luo, M. R., Xu, H., Tang, S., Zhou, F.
Testing Color Models' Performance using unrelated Colour Appearance Data, Tagungsband der AIC Color 97 Kyoto, S. 175-178

67. Luque, M. J., Capilla, P., Felipe, A., Artigas, J. M.
Brightness Induction in a Chromatic Center-Achromatic Surround configuration, Colour research and application Vol. 22, Nr. 4 (1997), S. 228 -239
68. MacAdam, D. L.
Visual sensitivities to color differences in daylight. In: J. Opt. Soc. Am. 32 (1942), S. 247-274
69. Mach, E.
Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt 1991, Nachdruck der 9. Auflage, Jena 1922
70. Marre, M, Marre, E.
Erworbene Störungen des Farbsehens, G. Fischer Verlag Stuttgart 1986
71. Marks, W. B., Dobelle, W. H., Mac Nichol, J. E. F.
Visual Pigments in Single Primate Cones, Science 143 (1964), S. 1181-1183
72. Metzger, W.
Gesetze des Sehens, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt/Main, 1975
73. Mischer, K., Richter, K., Valberg, A. Color and Color Vision, Sonderdruck aus Farbe und Design 23/24 (1982)
74. Mischer, K., Hofman, K.-D. Weisenhorn, P., Früh, M.
Über das natürliche Farbsystem, Die Farbe (1961) 10, S. 115-144
75. Moroney, M., Fairchild, M. D., Hunt, R.W. G, Li, C., Luo, M.R., Newman, T. The CIECAM02 Color Appearance Model, IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference
76. Munsell, A. H.,
A Color Notation, Munsell Color Company, inc., 1941
77. Pointer, M. R. A
Comparison of the CIE 1976 Colour Spaces, Color Research and Application Vol.6, Nr.2 (1981) S. 108 -118
78. Richter, K.
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems, BAM Forschungsbericht 61, 1979
79. Richter, M.
Einführung in die Farbmeterik, de Gryter, Berlin, New York 1981
80. Richter, M.
Farbensättigung. Sonderdruck aus der Zeitschrift „Das Licht“, Heft 4 und 5, 6. Jg. (1936)
81. Richter, M,
Über Entstehung, Aufbau und Anwendung der DIN-Farbenkarte DIN 6164, Sonderdruck aus DIN Mitteilungen Band 42 (1963) H. 6, S. .269 -275
82. Richter, M.
Untersuchungen zur Aufstellung eines empfindungsgemäß gleichabständigen Farbsystems, Sonderdruck aus Zeitschrift f. wissenschaftliche Photographie, 'Photophysik, und Photochemie, Band 45 .Johann Ambrosius Barth. Verlag, Leipzig 1950

83. Richter, M.
Verfeinerte Bestimmung der Farbmaßzahlen im Farbsystem DIN 6164, Die Farbe 10 (1961); S. 263-304
84. Robertson, A. R.
The CIE 1976 Color-Difference Formula, Color research and Application Vol.2, No.1 (1977), S. 6-11
85. Rodriguez, A.
Measurement of metallic & perlescent colors, Vortrag auf dem AIC Interim Meeting Colorimetry, 3.-6.September 1995 Berlin
86. Russell, L. De Valois, Karen K.
A Multi-Stage Color Model, Vision Res., 1993, Vo.33, Nr. 8, S. 1053-1065
87. Schaich, R.
Farbmetrische Qualitätskontrolle im Textilveredlungsbetrieb, Separatum aus Textilveredlung 13 (1978), 1, S. 3-6
88. Scheibner, H.
Transformation of luminance coefficients, J. Opt. Soc. Am. 10, Nr.6 (1993), S. 1392-1395
89. Schierz, Ch., TU Ilmenau, persönliche Mitteilung, 2009
90. Schmidt, R. F. (Hrsg.)
Neuro- und Sinnesphysiologie, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1998
91. Schnabel, Gisela, Internetseite: edoc.hu-berlin.de/e_rzm/17/schnabel-gisela-1999-02-01-a
92. Schuler, M. B., Heinemann, A., Wetzel, E., Schramme, J.
Quantitativer Vergleich des Ostwald'schen Farbsystems mit dem DIN-Farbensystem auf der Basis des Physiologischen Farbsystems (PCS), Mitteilungen der Ostwald-Gesellschaft zu Großbothen e. V: 10. Jg. 2005, Heft 1
93. Schwarz, A.
Farbsysteme und Farbmuster, BDK-Verlag, Hannover 2004
94. Silvestrini, N., Fischer, E. P., Stromer, K.
Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft, Dumont 1998
95. Sölch, R.
Die Evolution der Farben, Ravensburger Buchverlag, 1998
96. Stanziola, R.
Colorimetry and the Calculation of Color Difference, American Ink Maker, Januar (1994) S.25-73
97. Terstiege, H.
Drei Nobelpreise 1967 für Beiträge zur physiologischen Optik, Die Farbe 17 (1968), S.167-182
98. TGL 21 579 Farbenkarte Grundsystem, Sonderdruck für die Internationale Farbtagung 1966 in Dresden, Buchhaus Leipzig 1965
99. Thornton, W. A.
Theory of Color-Difference Perception, Die Farbe 24 (1975) Nr.1/6, S.30-42
100. Valberg, A.
Light Vision Color, John Wiley & Sons, 2 005

101. Walraven, P. L.
The absorptionscurves of the three cone pigments, Vortrag auf der Farb-Info Berlin 1996
(unveröffentlichtes Tagungsmaterial)
102. Walraven, P. L.
Discounting the background-the missing link in the explanation of chromatic induction, *Vision Res.* 16, (1976) 289-295
103. Welsch, W.
Vorlesungen zur Philosophie
104. Werner, J. S., Walraven, J.
Effect of chromatic adaption on the achromatic locus: The role of contrast, luminance and background colour, *Vision Res.* 22, (1982) S. 929-943
105. Witt, K.
CIE-Empfehlungen zur industriellen Farbabstandsbewertung, Vortrag auf der DfwG-Jahrestagung 1994
106. Wolf, E. Scheibner, H.
Derivation of the fundamental and opponent colour space, in: *Normaland Pathologic Color vision*, martin Luther Universität Halle Wittenberg, *Wissenschaftliche Beiträge* 1987/20 (R101), Halle 1987, S. 166-171
107. Wortmann, K.
Abhängigkeit des Simultankontrasts von der räumlichen Anordnung der Induktionsfelder, Diss. Göttingen 1987
108. Wright, W. D., Pitt, F. H. G.
The color-vision characteristics of two trichromats, *Proc.Phys. Soc.*47, 2 (1935) S.205-217
109. Wright, W. D., Pitt, F. H. G.
Hue discrimination in normal color-vision; *Proc. Phys. Soc. (London)* 46 (1934) S.459-479
- 110 Yutaka, M., Minako, K., Hiroshi, S.
Memory for Color. Recognition of PCCS Color Cards, *Journal of the Color Science Association of Japan*, VOL.24; No.3; p.146-155(2000)
111. Zaidi, Q., Spehar, B., De Bonet, J.
Color constancy in variegated scenes: role of low-level mechanisms in discounting illumination changes, *J. Opt. Soc. Am.* Vol.14, No.10/ 1997, S.2608-2621
112. Zeki, S.
A Vision of the Brain, Blackwell Wissenschaftsverlag 1995
- 113 Zwimpfer, M.
Farben ordnen, mit Farben spielen, Basel, 1997
- 114 Zwisler. R. Experimentelle Untersuchung zu Kontexteffekten bei hochgesättigten Farben, Aachen, Shaker 1998

Anhang

A1. Sättigung im CIECAM System	118
A2. Tabellen	121
A2.1 Folienmessung	121
A2.2 Berechnung der Sättigung für die Dunkelstufe D = O der DIN 6164	122
A2.3 Daten zum Farbkreis von Manfred Adam	127
A2.4 Berechnung der Sättigung im Adamschen Farbkreis	128
A2.5 Messwerte zur Farbton-Harmonie nach Ostwald	129
A2.6 Abstandsbestimmung der Sättigungslinien in der Normfarbtafel	130
A2.6.1 Abbildungen	130
A2.6.2 Tabellen zur Abstandsbestimmung	132
A2.7 Messung des PCCS System	133
A2.8 Tabelle zur Bestimmung des Sättigungsabstandes in Abbildung 4.5.4 (PCCS)	138
A2.9 Tabelle zur Bestimmung der visuellen Sättigung und der Sättigung in CIECA02	142
A2.10 Tabelle Gegenüberstellung der Farbkreise von Adam, Richter und PCCS	145
A2.11 Tabelle zur Bestimmung von Adamschen Dreiecken (TGL 21579)1	146
A3 Eigenschaften des LCh- und des LSh-Farbraumes für Optimalfarben	148

A1. Sättigung im CIECAM System

Im folgenden sollen die Gleichungen des CIECAM Systems zusammengefasst dargestellt werden.

Das CIECAM System gestattet die Berücksichtigung von verschiedenen Umgebungsbedingungen:

Umfeld	Umfeldverhältnis	F	c	N _c	Anwendung
mittel	S _R >0.2	1,0	0,69	1,0	Sehbedingungen
gedimmt	0<S _R <0.2	0,9	0,59	0,95	Fernsehen
hell	S _R =0	0,8	0,525	0,8	Verwendung eines Projektors im dunklen Raum

$S_R = L_{sw} / L_{dw}$: Verhältnis der absoluten Helligkeit des Referenzweißes (Weißpunkt) gemessen im Umgebungsfeld zur Helligkeit der Displayfläche

Der Wert 0,2 stammt von der Annahme einer "grauen" Welt

F: Adaptionfaktor

c: Einfluss der Umgebung

N_c: chromatischer Induktionsfaktor

Für Zwischenbedingungen können die Werte linear interpoliert werden.

Die absolute Helligkeit der Beleuchtung sollte mit einem Photometer bestimmt werden. Falls keines vorhanden ist, kann ein Referenzweiß benutzt werden.

$$L_A = \frac{E_w Y_b}{\pi Y_w} = \frac{L_w Y_b}{Y_w} \quad (\text{A.1.1})$$

Y_b ist die relative Helligkeit des Hintergrundes,

L_A = Adaptionleuchtdichte

E_w = πL_w ist die Beleuchtungsstärke des Referenzweißes in lux,

L_w = absolute Leuchtdichte des Referenzweißes in cd/m²

Y_w = relative Helligkeit of Referenzweißes im adaptierten Feld.

Vereinfachend kann "graue Welt" angenommen werden:

$$L_A = L_w / 5 \quad (\text{A.1.2})$$

Ausgehend vom Standartbeobachter mit den Tristimuluswerten XYZ können die Antworten der menschlichen Rezeptoren LMS bestimmt werden.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.3})$$

Die Farbe ergibt sich unter Referenzbeleuchtung zu:

$$\begin{bmatrix} L_c \\ M_c \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \frac{L_{wr}}{L_w} D + 1 - D & 0 & 0 \\ 0 & \alpha \frac{M_{wr}}{M_w} D + 1 - D & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \frac{S_{wr}}{S_w} D + 1 - D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (\text{A.1.4})$$

Wobei $\alpha = Y_w / Y_{wr}$ ein Faktor ist, der zwei Beleuchtungen, die dieselbe Farbe aber verschiedenes Referenzweiß haben, beschreibt,

$$D = F \left(1 - \frac{1}{3.6} e^{-\frac{L_A + 42}{92}} \right) \quad (\text{A.1.5})$$

wobei die Umgebung F oben definiert ist und L_A die Helligkeit des adaptierten Feldes in cd/m^2 ist.

Im CIECAM02 hat die Referenzbeleuchtung

$$L_{wr} = M_{wr} = S_{wr} = 100 \quad (\text{A.1.6})$$

und das Referenzweiß $Y_{wr} = 100$.

$$L_c = \left(\frac{Y_w}{L_w} D + 1 - D \right) L \quad (\text{A.1.7})$$

$$M_c = \left(\frac{Y_w}{M_w} D + 1 - D \right) M \quad (\text{A.1.8})$$

$$S_c = \left(\frac{Y_w}{S_w} D + 1 - D \right) S \quad (\text{A.1.9})$$

Falls das Referenzweiß in zwei Beleuchtungen die Tristimuluswerte $Y_{wr} = Y_w$ hat, dann ist:

$$L_c = \left(\frac{L_{wr}}{L_w} D + 1 - D \right) L \quad (\text{A.1.10})$$

$$M_c = \left(\frac{M_{wr}}{M_w} D + 1 - D \right) M \quad (\text{A.1.11})$$

$$S_c = \left(\frac{S_{wr}}{S_w} D + 1 - D \right) S \quad (\text{A.1.12})$$

Postadaptation

Nach der Adaption wird die Zapfenantwort in den Hunt-Pointer-Estévez Raum zurück transformiert und schließlich wird die Antwort auf der Basis der Michaelis-Menten Gleichung berechnet:

$$k = (5L_A + 1)^{-1} \quad (\text{A.1.13})$$

$$F_L = 0.2k^4 (5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2 (5L_A)^{1/3} \quad (\text{A.1.14})$$

$$L'_a = \frac{400 (F_L L' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L L' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (\text{A.1.15})$$

$$M'_a = \frac{400 (F_L M' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L M' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (\text{A.1.16})$$

$$S'_a = \frac{400 (F_L S' / 100)^{0.42}}{27.13 + (F_L S' / 100)^{0.42}} + 0.1 \quad (\text{A.1.17})$$

CIECAM02 definiert neue Koordinaten für Blau-Gelb b und Rot-Grün a :

$$C_1 = L'_a - M'_a, C_2 = M'_a - S'_a, C_3 = S'_a - L'_a \quad (\text{A.1.18})$$

$$a = C_1 - \frac{C_2}{11} = L'_a - \frac{12}{11}M'_a + \frac{1}{11}S'_a \quad (\text{A.1.19})$$

$$b = \frac{1}{2}(C_2 - C_1 + C_1 - C_3)/4.5 = \frac{1}{9}(L'_a + M'_a - 2S'_a) \quad (\text{A.1.20})$$

Der Faktor 4,5 soll berücksichtigen, dass das Auge weniger empfindlich für Blau ist.

$$h = \angle(a, b), (0 < h < 360^\circ)$$

Zur Berechnung der Exzentrizität e_i und zur Bestimmung des Buntonbeitrags H muss bestimmt werden, in welchem Quadranten sich der Winkel befindet: ($h' = h$ bzw. $h' = h + 360^\circ$)

$$e_i = \frac{1}{4} \left[\cos \left(\frac{h'\pi}{180} + 2 \right) + 3.8 \right] \quad (\text{A.1.21})$$

$$H = H_i + \frac{100(h' - h_i)/e_i}{(h' - h_i)/e_i + (h_{i+1} - h')/e_{i+1}} \quad (\text{A.1.22})$$

Achromatische Antwort A :

$$A = (2R'_a + G'_a + B'_a / 20 - 0.305)N_{bb} \quad (\text{A.1.23})$$

Das Korrelat zu **lightness** ist:

$$J = 100 \left(\frac{A}{A_w} \right)^{c_z} \quad (\text{A.1.24})$$

Das Korrelat zu **brightness** ist:

$$Q = \frac{4}{c} \sqrt{\frac{J}{100}} (A_w + 4) F_L^{0.25} \quad (\text{A.1.25})$$

$$t = \frac{50000/13 \cdot N_c \cdot N_{cb} \cdot e_t \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \quad (\text{A.1.26})$$

Das Korrelat zu **chroma** ist

$$C = t^{0.9} \sqrt{\frac{J}{100}} (1.64 - 0.29^n)^{0.73} \quad (\text{A.1.27})$$

Das Korrelat zu **colorfulness** ist

$$M = C \cdot F_L^{0.25} \quad (\text{A.1.28})$$

Für Tageslicht D 65 lässt sich M folgendermaßen aus X , Y und Z berechnen:

$$M = -0,2263 X + 1,1653 Y + 0,0457 Z \quad (\text{A.1.29})$$

Nun kann die Sättigung S bestimmt werden:

$$s = 100 \sqrt{\frac{M}{Q}} \quad (\text{A.1.30})$$

A2. Tabellen

A2.1 Folienmessung

(Gretag-Magbeth, D 50, 2⁰)

Magenta mittel	L*	a*	b*	C	L*	S⁺
1	62,98	29,00	-24,35	37,87	62,98	51,53
2	41,94	40,57	-31,96	51,65	41,94	77,63
3	31,78	41,20	-31,44	51,83	31,78	85,25
4	26,45	35,75	-25,96	44,18	26,45	85,80
5	24,55	26,20	-20,74	33,42	24,55	80,59
6	23,92	22,92	-17,98	29,13	23,92	77,28
7	23,50	21,00	-17,40	27,27	23,50	75,76
8	23,46	20,50	-16,00	26,00	23,46	74,25
Magenta hell	L*	a*	b*	C	L*	S⁺
1	74,19	18,95	-15,72	24,62	74,19	31,50
2	58,17	29,00	-22,00	36,40	58,17	53,05
3	45,83	33,93	-25,59	42,50	45,83	68,00
4	37,80	33,54	-24,68	41,64	37,80	74,04
5	33,78	32,15	-23,26	39,68	33,78	76,15
6	31,93	30,01	-20,24	36,20	31,93	74,99
7	29,96	25,73	-16,96	30,82	29,96	71,70
Magenta	L*	a*	b*	C	L*	S⁺
1	43,25	76,83	-26,32	81,21	43,25	88,26
2	31,11	70,03	-6,55	70,34	31,11	91,45
3	24,44	59,46	6,41	59,80	24,44	92,57
4	19,48	50,82	11,82	52,18	19,48	93,68
5	16,23	44,41	12,12	46,03	16,23	94,31
6	13,53	39,11	10,26	40,43	13,53	94,83
7	11,53	34,55	7,82	35,42	11,53	95,09
8	9,84	31,02	5,07	31,43	9,84	95,43
9	8,51	28,33	3,29	28,52	8,51	95,83
Grün	L*	a*	b*	C	L*	S⁺
1	59,92	-69,11	48,14	84,22	59,92	81,48
2	41,16	-69,58	43,22	81,91	41,16	89,35
3	28,56	-56,84	33,11	65,78	28,56	91,73
4	20,22	-43,63	24,37	49,97	20,22	92,70
5	13,40	-32,92	16,70	36,91	13,40	94,00
6	11,02	-24,00	10,53	26,21	11,02	92,18
7	7,63	-15,03	7,54	16,82	7,63	91,06
8	6,24	-9,98	5,47	11,38	6,24	87,68

A2.2 Berechnung der Sättigung für die Dunkelstufe D = O der DIN 6164

T	S	A ₀	h _{xv}	r _l	X	Y	Y	L*	a*	b*	C	S ⁺
N		0	N	0,00000	0,3127	0,3290	0,3584	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1	98,54	54,020	0,01254	0,3280	0,3501	0,3220	99,43	-2,37	10,91	11,17	11,16
1	2	97,08	54,020	0,01254	0,3444	0,3728	0,2828	98,86	-4,62	22,50	22,97	22,63
1	3	95,58	54,020	0,01254	0,3623	0,3973	0,2405	98,27	-6,76	35,04	35,69	34,14
1	4	94,03	54,020	0,01254	0,3815	0,4239	0,1946	97,64	-8,79	49,03	49,81	45,44
1	5	92,45	54,020	0,01254	0,4025	0,4527	0,1447	97,00	-10,71	65,36	66,23	56,39
1	6	90,87	54,020	0,01254	0,4254	0,4843	0,0903	96,36	-12,54	86,14	87,05	67,04
1	7	89,31	54,020	0,01254	0,4505	0,5188	0,0307	95,71	-14,28	119,64	120,49	78,30
2	1	96,80	43,863	0,01379	0,3328	0,3484	0,3188	98,75	0,87	11,17	11,20	11,27
2	2	93,57	43,863	0,01379	0,3544	0,3691	0,2765	97,46	1,67	22,94	23,00	22,97
2	3	90,30	43,863	0,01379	0,3774	0,3912	0,2313	96,12	2,42	35,62	35,70	34,82
2	4	87,06	43,863	0,01379	0,4021	0,4150	0,1829	94,76	3,11	49,72	49,82	46,53
2	5	83,90	43,863	0,01379	0,4287	0,4405	0,1308	93,41	3,74	66,31	66,41	57,95
2	6	80,88	43,863	0,01379	0,4573	0,4680	0,0747	92,08	4,33	88,08	88,19	69,17
2	7	78,00	43,863	0,01379	0,4882	0,4977	0,0141	90,78	4,88	129,54	129,63	81,91
3	1	94,51	33,101	0,01643	0,3384	0,3458	0,3158	97,84	4,83	11,20	12,20	12,38
3	2	89,05	33,101	0,01643	0,3656	0,3635	0,2709	95,60	9,17	22,86	24,63	24,95
3	3	83,69	33,101	0,01643	0,3942	0,3822	0,2236	93,32	13,05	35,26	37,60	37,37
3	4	78,59	33,101	0,01643	0,4245	0,4019	0,1737	91,05	16,53	48,95	51,67	49,35
3	5	73,83	33,101	0,01643	0,4565	0,4227	0,1208	88,84	19,64	65,04	67,94	60,75
3	6	69,45	33,101	0,01643	0,4903	0,4448	0,0648	86,73	22,44	86,53	89,39	71,77
3	7	65,44	33,101	0,01643	0,5263	0,4683	0,0054	84,71	24,96	135,24	137,52	85,14
4	1	92,64	25,562	0,01914	0,3426	0,3433	0,3141	97,08	8,01	11,02	13,62	13,90
4	2	85,41	25,562	0,01914	0,3738	0,3582	0,2680	94,06	15,01	22,35	26,92	27,51
4	3	78,51	25,562	0,01914	0,4063	0,3738	0,2199	91,01	21,12	34,24	40,23	40,43
4	4	72,14	25,562	0,01914	0,4401	0,3900	0,1699	88,04	26,45	47,21	54,12	52,37
4	5	66,40	25,562	0,01914	0,4755	0,4068	0,1177	85,20	31,12	62,33	69,66	63,30
4	6	61,25	25,562	0,01914	0,5123	0,4245	0,0632	82,51	35,21	82,37	89,58	73,55
4	7	56,66	25,562	0,01914	0,5509	0,4429	0,0062	79,99	38,81	126,58	132,40	85,59
5	1	90,50	18,226	0,02270	0,3472	0,3404	0,3124	96,20	11,56	10,73	15,77	16,18
5	2	81,33	18,226	0,02270	0,3827	0,3520	0,2653	92,28	21,38	21,58	30,38	31,27
5	3	72,85	18,226	0,02270	0,4191	0,3640	0,2169	88,38	29,69	32,79	44,24	44,76
5	4	65,31	18,226	0,02270	0,4565	0,3763	0,1672	84,64	36,75	44,84	57,97	56,51
5	5	58,72	18,226	0,02270	0,4949	0,3890	0,1162	81,14	42,75	58,68	72,60	66,68
5	6	52,97	18,226	0,02270	0,5343	0,4020	0,0637	77,86	47,87	76,71	90,42	75,78
5	7	47,94	18,226	0,02270	0,5749	0,4153	0,0098	74,79	52,25	112,88	124,39	85,70
6	1	88,26	10,898	0,02663	0,3514	0,3364	0,3121	95,27	15,34	9,99	18,30	18,87
6	2	77,16	10,898	0,02663	0,3905	0,3440	0,2655	90,40	27,99	19,89	34,34	35,51
6	3	67,24	10,898	0,02663	0,4299	0,3516	0,2186	85,62	38,39	29,87	48,64	49,39
6	4	58,71	10,898	0,02663	0,4696	0,3592	0,1712	81,13	46,95	40,33	61,89	60,65
6	5	51,46	10,898	0,02663	0,5096	0,3669	0,1235	76,96	54,03	51,93	74,93	69,76
6	6	45,24	10,898	0,02663	0,5500	0,3747	0,0753	73,05	59,85	66,12	89,19	77,36
6		39,89	10,898	0,02663	0,5907	0,3825	0,0268	69,39	64,65	88,26	109,40	84,45
7	1	86,21	3,704	0,03033	0,3544	0,3317	0,3139	94,40	18,94	8,71	20,85	21,57
7	2	73,43	3,704	0,03033	0,3956	0,3344	0,2700	88,65	34,18	17,12	38,23	39,60
7	3	62,36	3,704	0,03033	0,4363	0,3370	0,2267	83,10	46,38	25,36	52,87	53,67
7	4	53,09	3,704	0,03033	0,4766	0,3396	0,1838	77,93	56,17	33,67	65,49	64,34
7	5	45,32	3,704	0,03033	0,5163	0,3422	0,1415	73,10	64,00	42,39	76,76	72,42
7	6	38,77	3,704	0,03033	0,5556	0,3447	0,0997	68,58	70,20	52,12	87,43	78,68
7	7	33,16	3,704	0,03033	0,5945	0,3472	0,0583	64,29	75,02	64,21	98,74	83,80
7	8	28,29	3,704	0,03033	0,6328	0,3497	0,0174	60,15	78,60	84,32	115,27	88,66

Fortsetzung Tabelle

T	S	A ₀	h _{xy}	r ₁	X	Y	Y	L*	a*	b*	C	S ⁺
8	1	85,65	356,135	0,03087	0,3524	0,3263	0,3213	94,16	20,67	6,28	21,60	22,36
8	2	72,43	356,135	0,03087	0,3909	0,3237	0,2854	88,18	37,31	12,22	39,26	40,67
8	3	60,99	356,135	0,03087	0,4281	0,3212	0,2507	82,37	50,62	17,84	53,67	54,59
8	4	51,40	356,135	0,03087	0,4643	0,3187	0,2170	76,92	61,26	23,24	65,52	64,84
8	5	43,36	356,135	0,03087	0,4993	0,3164	0,1843	71,80	69,71	28,50	75,31	72,38
8	6	36,55	356,135	0,03087	0,5333	0,3141	0,1526	66,94	76,30	33,74	83,43	78,00
8	7	30,71	356,135	0,03087	0,5663	0,3118	0,1218	62,26	81,27	39,06	90,17	82,29
8	8	25,62	356,135	0,03087	0,5984	0,3097	0,0920	57,67	84,73	44,66	95,78	85,67
8	9	21,12	356,135	0,03087	0,6295	0,3076	0,0629	53,08	86,75	50,89	100,58	88,44
8	10	16,98	356,135	0,03087	0,6597	0,3055	0,0347	48,23	87,11	58,61	105,00	90,87
8	11	13,12	356,135	0,03087	0,6892	0,3035	0,0073	42,94	85,57	69,54	110,26	93,18
9	1	85,80	347,728	0,03010	0,3484	0,3212	0,3304	94,23	21,41	3,60	21,71	22,45
9	2	72,70	347,728	0,03010	0,3824	0,3138	0,3038	88,30	38,86	6,94	39,47	40,81
9	3	61,24	347,728	0,03010	0,4148	0,3068	0,2784	82,51	52,98	10,02	53,92	54,70
9	4	51,52	347,728	0,03010	0,4457	0,3000	0,2542	76,99	64,36	12,88	65,64	64,87
9	5	43,29	347,728	0,03010	0,4752	0,2936	0,2311	71,75	73,45	15,52	75,07	72,29
9	6	36,26	347,728	0,03010	0,5034	0,2875	0,2091	66,72	80,56	17,97	82,53	77,77
9	7	30,18	347,728	0,03010	0,5304	0,2816	0,1880	61,81	85,87	20,20	88,21	81,90
9	8	24,86	347,728	0,03010	0,5562	0,2760	0,1678	56,94	89,50	22,22	92,22	85,09
9	9	20,08	347,728	0,03010	0,5809	0,2706	0,1485	51,93	91,36	23,94	94,44	87,63
9	10	15,65	347,728	0,03010	0,6046	0,2655	0,1299	46,51	91,13	25,24	94,56	89,73
9	11	11,44	347,728	0,03010	0,6274	0,2605	0,1121	40,31	88,19	25,86	91,91	91,58
9	12	7,41	347,728	0,03010	0,6493	0,2558	0,0949	32,72	81,38	25,33	85,23	93,36
9	13	3,69	347,728	0,03010	0,6703	0,2512	0,0785	22,62	68,39	22,67	72,05	95,41
9	14	0,38	347,728	0,03010	0,6906	0,2468	0,0626	3,43	28,07	4,54	28,44	99,28
10	1	86,78	323,198	0,02766	0,3374	0,3105	0,3521	94,64	21,80	-2,58	21,95	22,59
10	2	74,63	323,198	0,02766	0,3601	0,2935	0,3464	89,22	40,31	-4,92	40,61	41,43
10	3	63,64	323,198	0,02766	0,3810	0,2778	0,3411	83,78	55,91	-7,00	56,35	55,81
10	4	53,94	323,198	0,02766	0,4003	0,2634	0,3363	78,43	68,95	-8,85	69,52	66,33
10	5	45,46	323,198	0,02766	0,4182	0,2500	0,3318	73,19	79,73	-10,46	80,42	73,95
10	6	38,00	323,198	0,02766	0,4348	0,2376	0,3276	68,02	88,43	-11,84	89,22	79,52
10	7	31,39	323,198	0,02766	0,4503	0,2260	0,3237	62,84	95,12	-12,99	96,01	83,67
10	8	25,48	323,198	0,02766	0,4648	0,2152	0,3200	57,54	99,80	-13,88	100,76	86,84
10	9	20,07	323,198	0,02766	0,4783	0,2050	0,3166	51,92	102,17	-14,45	103,18	89,33
10	10	14,94	323,198	0,02766	0,4910	0,1955	0,3134	45,55	101,49	-14,59	102,53	91,39
10	11	9,95	323,198	0,02766	0,5030	0,1866	0,3104	37,75	96,28	-14,05	97,30	93,23
10	12	5,11	323,198	0,02766	0,5142	0,1782	0,3076	27,05	83,14	-12,31	84,05	95,19
10	13	0,70	323,198	0,02766	0,5248	0,1703	0,3049	6,32	45,36	-6,67	45,85	99,06
11	1	84,50	284,465	0,02581	0,3208	0,2975	0,3817	93,67	20,29	-10,60	22,89	23,74
11	2	72,35	284,465	0,02581	0,3279	0,2699	0,4022	88,14	38,32	-19,79	43,13	43,95
11	3	62,44	284,465	0,02581	0,3342	0,2453	0,4204	83,15	54,53	-27,88	61,24	59,31
11	4	54,06	284,465	0,02581	0,3399	0,2234	0,4367	78,50	69,18	-35,07	77,56	70,29
11	5	46,73	284,465	0,02581	0,3450	0,2037	0,4513	74,02	82,40	-41,44	92,23	77,99
11	6	40,09	284,465	0,02581	0,3496	0,1859	0,4645	69,53	94,14	-47,01	105,23	83,43
11	7	33,83	284,465	0,02581	0,3537	0,1698	0,4765	64,83	104,19	-51,69	116,31	87,35
11	8	27,87	284,465	0,02581	0,3575	0,1551	0,4874	59,77	112,25	-55,35	125,15	90,24
11	9	22,11	284,465	0,02581	0,3610	0,1416	0,4974	54,14	117,76	-57,74	131,15	92,43
11	10	16,43	284,465	0,02581	0,3642	0,1292	0,5066	47,53	119,60	-58,33	133,07	94,17
11	11	10,82	284,465	0,02581	0,3671	0,1178	0,5151	39,28	115,72	-56,16	128,63	95,64
11	12	5,27	284,465	0,02581	0,3699	0,1072	0,5229	27,49	100,62	-48,60	111,74	97,10
11	13	0,17	284,465	0,02581	0,3724	0,0974	0,5302	1,54	20,00	-10,58	22,62	99,77
12	1	79,10	263,994	0,02555	0,3087	0,2910	0,4003	91,28	17,24	-14,97	22,83	24,26
12	2	64,25	263,994	0,02555	0,3052	0,2582	0,4366	84,10	32,53	-27,24	42,43	45,05

Fortsetzung Tabelle

T	S	A ₀	h _{xy}	r ₁	X	Y	Y	L*	a*	b*	C	S ⁺
12	3	53,14	263,994	0,02555	0,3022	0,2296	0,4682	77,96	46,42	-37,65	59,77	60,84
12	4	44,52	263,994	0,02555	0,2996	0,2045	0,4960	72,57	59,25	-46,71	75,45	72,07
12	5	37,63	263,994	0,02555	0,2972	0,1822	0,5206	67,75	71,26	-54,76	89,87	79,85
12	6	31,95	263,994	0,02555	0,2951	0,1622	0,5426	63,30	82,58	-62,00	103,26	85,26
12	7	27,15	263,994	0,02555	0,2932	0,1444	0,5624	59,11	93,29	-68,55	115,76	89,06
12	8	23,00	263,994	0,02555	0,2915	0,1282	0,5803	55,07	103,40	-74,46	127,42	91,79
12	9	19,30	263,994	0,02555	0,2900	0,1135	0,5965	51,04	112,78	-79,69	138,09	93,80
12	10	15,80	263,994	0,02555	0,2886	0,1002	0,6112	46,71	120,89	-83,90	147,15	95,31
12	11	12,23	263,994	0,02555	0,2873	0,0879	0,6248	41,58	126,38	-86,20	152,98	96,50
12	12	8,33	263,994	0,02555	0,2861	0,0767	0,6372	34,66	126,09	-84,58	151,83	97,49
12	13	4,27	263,994	0,02555	0,2850	0,0663	0,6486	24,54	114,21	-75,38	136,84	98,43
12	14	0,29	263,994	0,02555	0,2840	0,0567	0,6592	2,62	43,79	-30,68	53,47	99,88
13	1	75,44	251,026	0,02619	0,2983	0,2873	0,4144	89,60	13,64	-17,87	22,48	24,34
13	2	59,14	251,026	0,02619	0,2861	0,2516	0,4623	81,37	25,84	-31,97	41,11	45,09
13	3	47,52	251,026	0,02619	0,2754	0,2207	0,5038	74,52	37,08	-43,65	57,27	60,94
13	4	38,82	251,026	0,02619	0,2662	0,1937	0,5401	68,62	47,67	-53,67	71,78	72,29
13	5	32,04	251,026	0,02619	0,2580	0,1700	0,5721	63,38	57,80	-62,48	85,11	80,21
13	6	26,62	251,026	0,02619	0,2507	0,1488	0,6004	58,62	67,61	-70,40	97,61	85,73
13	7	22,16	251,026	0,02619	0,2442	0,1300	0,6258	54,20	77,21	-77,61	109,47	89,62
13	8	18,43	251,026	0,02619	0,2384	0,1130	0,6486	50,01	86,66	-84,25	120,87	92,40
13	9	15,25	251,026	0,02619	0,2331	0,0976	0,6693	45,97	96,02	-90,42	131,89	94,43
13	10	12,49	251,026	0,02619	0,2283	0,0837	0,6880	41,98	105,28	-96,13	142,56	95,93
13	11	10,04	251,026	0,02619	0,2239	0,0710	0,7051	37,91	114,31	-101,27	152,72	97,05
13	12	7,80	251,026	0,02619	0,2199	0,0593	0,7208	33,56	122,70	-105,49	161,82	97,92
13	13	5,69	251,026	0,02619	0,2163	0,0486	0,7352	28,62	129,44	-107,99	168,57	98,59
13	14	3,61	251,026	0,02619	0,2129	0,0387	0,7484	22,34	131,45	-106,35	169,08	99,14
13	15	1,70	251,026	0,02619	0,2097	0,0295	0,7607	13,83	122,75	-96,17	155,93	99,61
13	16	0,17	251,026	0,02619	0,2068	0,0210	0,7722	1,54	54,41	-46,85	71,81	99,98
14	1	73,55	243,593	0,02709	0,2912	0,2858	0,4230	88,71	10,60	-19,41	22,12	24,19
14	2	56,60	243,593	0,02709	0,2729	0,2489	0,4781	79,95	20,17	-34,43	39,90	44,65
14	3	44,80	243,593	0,02709	0,2571	0,2171	0,5258	72,76	29,11	-46,71	55,04	60,33
14	4	36,12	243,593	0,02709	0,2433	0,1893	0,5674	66,61	37,69	-57,16	68,47	71,68
14	5	29,46	243,593	0,02709	0,2312	0,1648	0,6040	61,19	46,07	-66,32	80,75	79,70
14	6	24,19	243,593	0,02709	0,2204	0,1431	0,6365	56,28	54,36	-74,55	92,26	85,37
14	7	19,91	243,593	0,02709	0,2108	0,1237	0,6655	51,74	62,66	-82,07	103,26	89,41
14	8	16,36	243,593	0,02709	0,2021	0,1063	0,6916	47,44	71,07	-89,06	113,94	92,32
14	9	13,37	243,593	0,02709	0,1943	0,0906	0,7151	43,32	79,67	-95,63	124,47	94,44
14	10	10,81	243,593	0,02709	0,1872	0,0763	0,7365	39,26	88,53	-101,87	134,96	96,02
14	11	8,60	243,593	0,02709	0,1807	0,0633	0,7560	35,20	97,77	-107,85	145,56	97,20
14	12	6,67	243,593	0,02709	0,1748	0,0514	0,7738	31,04	107,45	-113,58	156,35	98,09
14	13	4,96	243,593	0,02709	0,1694	0,0404	0,7902	26,62	117,56	-118,93	167,23	98,76
14	14	3,45	243,593	0,02709	0,1643	0,0303	0,8054	21,76	128,11	-123,73	178,11	99,26
14	15	2,12	243,593	0,02709	0,1597	0,0210	0,8193	16,10	138,62	-127,25	188,18	99,64
15	1	73,00	237,856	0,02727	0,2860	0,2866	0,4274	88,45	7,39	-19,87	21,20	23,31
15	2	55,91	237,856	0,02727	0,2632	0,2502	0,4866	79,56	14,15	-35,12	37,87	42,97
15	3	44,10	237,856	0,02727	0,2433	0,2186	0,5381	72,30	20,57	-47,54	51,80	58,24
15	4	35,46	237,856	0,02727	0,2259	0,1909	0,5832	66,11	26,83	-58,08	63,98	69,55
15	5	28,86	237,856	0,02727	0,2105	0,1664	0,6231	60,66	33,05	-67,31	74,98	77,75
15	6	23,66	237,856	0,02727	0,1968	0,1446	0,6586	55,75	39,33	-75,59	85,21	83,68
15	7	19,46	237,856	0,02727	0,1845	0,1251	0,6904	51,22	45,75	-83,18	94,93	88,01
15	8	15,98	237,856	0,02727	0,1735	0,1075	0,7191	46,95	52,39	-90,23	104,34	91,19
15	9	13,07	237,856	0,02727	0,1635	0,0915	0,7450	42,87	59,37	-96,93	113,66	93,57
15	10	10,58	237,856	0,02727	0,1543	0,0770	0,7686	38,86	66,74	-103,32	123,01	95,35

Fortsetzung Tabelle

T	S	A ₀	h _{xy}	r _l	X	Y	Z	L*	a*	b*	C	S ⁺
15	11	8,45	237,856	0,02727	0,1460	0,0638	0,7902	34,90	74,70	-109,60	132,64	96,71
15	12	5,75	237,856	0,02727	0,1384	0,0516	0,8100	28,77	79,67	-110,62	136,32	97,84
16	1	73,71	234,046	0,02642	0,2838	0,2892	0,4271	88,79	4,86	-19,30	19,90	21,87
16	2	56,88	234,046	0,02642	0,2587	0,2546	0,4868	80,11	9,35	-34,19	35,45	40,46
16	3	45,18	234,046	0,02642	0,2367	0,2242	0,5391	73,01	13,66	-46,36	48,33	55,20
16	4	36,57	234,046	0,02642	0,2172	0,1974	0,5854	66,95	17,91	-56,70	59,46	66,40
16	5	29,97	234,046	0,02642	0,1999	0,1735	0,6266	61,63	22,17	-65,75	69,38	74,77
16	6	24,75	234,046	0,02642	0,1843	0,1521	0,6636	56,83	26,52	-73,86	78,48	80,99
16	7	20,52	234,046	0,02642	0,1704	0,1328	0,6969	52,42	31,02	-81,28	87,00	85,65
16	8	17,03	234,046	0,02642	0,1577	0,1153	0,7270	48,30	35,74	-88,19	95,16	89,17
16	9	14,09	234,046	0,02642	0,1461	0,0994	0,7545	44,36	40,74	-94,72	103,11	91,86
16	10	11,59	234,046	0,02642	0,1356	0,0848	0,7796	40,56	46,10	-100,98	111,01	93,93
16	11	5,45	234,046	0,02642	0,1259	0,0715	0,8026	27,98	43,26	-89,18	99,12	96,24
17	1	77,55	225,452	0,02284	0,2826	0,2984	0,4190	90,57	-0,56	-16,22	16,23	17,64
17	2	62,22	225,452	0,02284	0,2555	0,2709	0,4737	83,03	-1,09	-29,18	29,20	33,18
17	3	51,10	225,452	0,02284	0,2309	0,2459	0,5232	76,74	-1,62	-39,98	40,02	46,24
17	4	42,66	225,452	0,02284	0,2085	0,2232	0,5684	71,32	-2,14	-49,27	49,32	56,87
17	5	36,03	225,452	0,02284	0,1880	0,2024	0,6096	66,54	-2,67	-57,45	57,51	65,39
17	6	30,68	225,452	0,02284	0,1692	0,1833	0,6475	62,24	-3,22	-64,78	64,86	72,15
17	7	26,29	225,452	0,02284	0,1519	0,1657	0,6824	58,31	-3,80	-71,47	71,57	77,53
17	8	22,61	225,452	0,02284	0,1359	0,1495	0,7146	54,67	-4,42	-77,66	77,78	81,81
17	9	16,40	225,452	0,02284	0,1211	0,1344	0,7445	47,49	-4,80	-78,79	78,93	85,68
17	10	7,13	225,452	0,02284	0,1073	0,1204	0,7723	32,10	-4,37	-66,83	66,97	90,18
18	1	82,70	215,219	0,01931	0,2843	0,3089	0,4068	92,88	-5,03	-12,25	13,24	14,12
18	2	69,84	215,219	0,01931	0,2576	0,2901	0,4523	86,92	-9,94	-22,52	24,62	27,25
18	3	59,89	215,219	0,01931	0,2325	0,2724	0,4951	81,78	-14,83	-31,36	34,69	39,05
18	4	51,97	215,219	0,01931	0,2089	0,2557	0,5354	77,26	-19,79	-39,12	43,84	49,35
18	5	45,51	215,219	0,01931	0,1866	0,2400	0,5734	73,23	-24,90	-46,05	52,35	58,16
18	6	40,15	215,219	0,01931	0,1655	0,2251	0,6094	69,58	-30,25	-52,32	60,43	65,58
18	7	35,62	215,219	0,01931	0,1455	0,2110	0,6435	66,23	-35,93	-58,05	68,27	71,77
18	8	30,32	215,219	0,01931	0,1266	0,1976	0,6758	61,93	-41,40	-62,38	74,87	77,06
18	9	18,37	215,219	0,01931	0,1086	0,1849	0,7065	49,94	-42,15	-59,05	72,55	82,37
18	10	8,52	215,219	0,01931	0,0915	0,1728	0,7357	35,04	-39,00	-50,61	63,90	87,68
19	1	89,83	196,846	0,01635	0,2884	0,3216	0,3899	95,93	-9,26	-7,01	11,61	12,02
19	2	81,32	196,846	0,01635	0,2645	0,3144	0,4210	92,27	-18,57	-13,30	22,84	24,03
19	3	74,09	196,846	0,01635	0,2410	0,3073	0,4517	88,97	-28,04	-19,01	33,88	35,59
19	4	67,86	196,846	0,01635	0,2179	0,3003	0,4818	85,94	-37,80	-24,22	44,89	46,30
19	5	62,44	196,846	0,01635	0,1951	0,2934	0,5115	83,15	-47,96	-29,02	56,06	55,90
19	6	57,69	196,846	0,01635	0,1726	0,2866	0,5408	80,57	-58,69	-33,47	67,56	64,25
19	7	51,35	196,846	0,01635	0,1505	0,2799	0,5696	76,89	-69,22	-37,10	78,54	71,46
19	8	39,27	196,846	0,01635	0,1287	0,2733	0,5980	68,95	-76,40	-38,34	85,48	77,84
19	9	27,53	196,846	0,01635	0,1072	0,2668	0,6260	59,46	-81,11	-37,92	89,54	83,30
19	10	17,03	196,846	0,01635	0,0861	0,2604	0,6536	48,30	-82,24	-35,57	89,60	88,03
19	11	7,36	196,846	0,01635	0,0652	0,2541	0,6807	32,61	-74,10	-29,33	79,69	92,55
20	1	96,12	168,678	0,01543	0,2935	0,3328	0,3737	98,48	-12,19	-2,01	12,35	12,44
20	2	91,87	168,678	0,01543	0,2738	0,3368	0,3895	96,77	-24,67	-3,92	24,98	25,00
20	3	87,20	168,678	0,01543	0,2535	0,3408	0,4056	94,82	-37,45	-5,73	37,89	37,11
20	4	81,88	168,678	0,01543	0,2328	0,3450	0,4222	92,52	-50,46	-7,41	51,01	48,28
20	5	75,64	168,678	0,01543	0,2115	0,3492	0,4393	89,69	-63,56	-8,95	64,19	58,20
20	6	68,29	168,678	0,01543	0,1896	0,3536	0,4568	86,15	-76,50	-10,30	77,19	66,73
20	7	59,77	168,678	0,01543	0,1671	0,3581	0,4748	81,71	-88,93	-11,40	89,66	73,91
20	8	50,18	168,678	0,01543	0,1439	0,3628	0,4933	76,18	-100,36	-12,20	101,10	79,86
20	9	39,95	168,678	0,01543	0,1202	0,3675	0,5123	69,43	-110,22	-12,62	110,94	84,77

Fortsetzung Tabelle

T	S	A ₀	h _{xy}	r ₁	X	Y	Z	L*	a*	b*	C	S ⁺
20	10	29,72	168,678	0,01543	0,0957	0,3724	0,5319	61,41	-117,92	-12,61	118,59	88,80
20	11	20,08	168,678	0,01543	0,0705	0,3775	0,5520	51,93	-122,57	-12,08	123,16	92,14
20	12	10,60	168,678	0,01543	0,0446	0,3827	0,5728	38,90	-119,10	-10,58	119,57	95,09
21	1	96,67	137,484	0,01473	0,2996	0,3409	0,3594	98,70	-12,74	2,14	12,92	12,98
21	2	93,13	137,484	0,01473	0,2859	0,3536	0,3606	97,28	-25,62	4,24	25,97	25,79
21	3	89,38	137,484	0,01473	0,2713	0,3669	0,3618	95,74	-38,65	6,29	39,16	37,86
21	4	85,31	137,484	0,01473	0,2559	0,3810	0,3631	94,02	-51,83	8,27	52,48	48,74
21	5	80,82	137,484	0,01473	0,2396	0,3960	0,3644	92,05	-65,11	10,18	65,90	58,21
21	6	75,78	137,484	0,01473	0,2222	0,4119	0,3659	89,76	-78,42	11,99	79,33	66,23
21	7	70,08	137,484	0,01473	0,2037	0,4289	0,3674	87,04	-91,66	13,67	92,67	72,89
21	8	63,72	137,484	0,01473	0,1840	0,4469	0,3691	83,82	-104,69	15,18	105,78	78,38
21	9	56,66	137,484	0,01473	0,1630	0,4662	0,3708	79,99	-117,30	16,47	118,45	82,87
21	10	48,95	137,484	0,01473	0,1404	0,4869	0,3727	75,42	-129,26	17,49	130,44	86,57
21	11	40,78	137,484	0,01473	0,1162	0,5091	0,3747	70,02	-140,32	18,17	141,49	89,63
21	12	32,35	137,484	0,01473	0,0901	0,5330	0,3769	63,63	-150,21	18,42	151,33	92,18
21	13	23,78	137,484	0,01473	0,0619	0,5589	0,3792	55,87	-158,43	18,09	159,46	94,38
21	14	14,73	137,484	0,01473	0,0314	0,5868	0,3817	45,26	-162,77	16,68	163,62	96,38
22	1	97,48	109,075	0,01398	0,3065	0,3468	0,3467	99,02	-11,87	5,60	13,12	13,14
22	2	94,84	109,075	0,01398	0,2999	0,3660	0,3341	97,97	-23,71	11,23	26,24	25,87
22	3	92,09	109,075	0,01398	0,2927	0,3867	0,3206	96,86	-35,54	16,92	39,36	37,65
22	4	89,21	109,075	0,01398	0,2850	0,4091	0,3059	95,67	-47,36	22,68	52,51	48,12
22	5	86,16	109,075	0,01398	0,2765	0,4334	0,2900	94,38	-59,17	28,53	65,69	57,13
22	6	82,90	109,075	0,01398	0,2674	0,4599	0,2727	92,97	-70,98	34,48	78,91	64,71
22	7	79,36	109,075	0,01398	0,2574	0,4889	0,2537	91,40	-82,75	40,55	92,15	71,00
22	8	75,47	109,075	0,01398	0,2463	0,5208	0,2329	89,61	-94,45	46,75	105,39	76,18
22	9	71,14	109,075	0,01398	0,2342	0,5559	0,2099	87,55	-106,01	53,12	118,58	80,45
22	10	66,24	109,075	0,01398	0,2207	0,5949	0,1844	85,12	-117,30	59,66	131,60	83,97
22	11	60,54	109,075	0,01398	0,2057	0,6383	0,1560	82,13	-128,04	66,39	144,23	86,90
22	12	53,48	109,075	0,01398	0,1888	0,6871	0,1240	78,16	-137,49	73,17	155,74	89,38
22	13	43,34	109,075	0,01398	0,1697	0,7423	0,0879	71,79	-143,05	79,11	163,46	91,56
22	14	17,43	109,075	0,01398	0,1480	0,8052	0,0468	48,80	-117,79	69,66	136,84	94,19
23	1	98,35	89,398	0,01325	0,3129	0,3501	0,3370	99,36	-10,09	8,02	12,89	12,86
23	2	96,61	89,398	0,01325	0,3131	0,3730	0,3139	98,67	-20,04	16,30	25,83	25,33
23	3	94,78	89,398	0,01325	0,3134	0,3980	0,2886	97,95	-29,86	24,92	38,89	36,90
23	4	92,83	89,398	0,01325	0,3137	0,4253	0,2610	97,16	-39,55	33,98	52,14	47,28
23	5	90,76	89,398	0,01325	0,3140	0,4554	0,2306	96,31	-49,11	43,63	65,70	56,35
23	6	88,50	89,398	0,01325	0,3143	0,4886	0,1971	95,37	-58,54	54,13	79,73	64,14
23	7	85,95	89,398	0,01325	0,3147	0,5254	0,1599	94,29	-67,79	65,85	94,51	70,79
23	8	82,78	89,398	0,01325	0,3152	0,5665	0,1184	92,92	-76,75	79,49	110,49	76,54
23	9	77,93	89,398	0,01325	0,3156	0,6126	0,0717	90,75	-84,95	96,55	128,60	81,71
23	10	59,99	89,398	0,01325	0,3162	0,6649	0,0189	81,83	-86,91	118,62	147,05	87,38
24	1	99,61	69,928	0,01240	0,3208	0,3513	0,3278	99,85	-6,61	10,04	12,02	11,95
24	2	99,09	69,928	0,01240	0,3297	0,3756	0,2947	99,65	-13,04	20,67	24,44	23,82
24	3	98,44	69,928	0,01240	0,3394	0,4021	0,2585	99,39	-19,30	32,08	37,44	35,25
24	4	97,61	69,928	0,01240	0,3500	0,4312	0,2189	99,07	-25,39	44,58	51,31	45,99
24	5	96,53	69,928	0,01240	0,3617	0,4631	0,1753	98,64	-31,30	58,70	66,52	55,91
24	6	95,03	69,928	0,01240	0,3745	0,4983	0,1271	98,05	-36,99	75,42	84,01	65,06
24	7	92,22	69,928	0,01240	0,3888	0,5375	0,0737	96,91	-42,31	97,13	105,94	73,79
24	8	76,19	69,928	0,01240	0,4048	0,5813	0,0139	89,95	-44,94	131,51	138,97	83,95

Helligkeit der Dunkelstufen der DIN 6164

D	A/A ₀
0	1
1	0,681
2	0,4613
3	0,31
4	0,2058
5	0,1341
6	0,0847
7	0,0507
8	0,0272

A2.3 Daten zum Farbkreis von Manfred Adam

		□[nm]	Y
1	Zitronengelb	572,8	63,80
2	Mittelgelb	578	43,70
3	Goldgelb	583	29,90
4	Gelborange	589,2	20,40
5	Rotorange	597	13,80
6	Zinnoberrot	606,9	9,77
7	Mittelrot	626,5	6,61
8	Karminrot	-495	5,25
9	Purpurrot	-502	4,03
10	Purpurviolett	-539,5	3,13
11	Violett	-561,2	2,43
12	Bläulichviolett	430	1,88
13	Violettblau	460,1	1,46
14	Ultramarinblau	469,3	1,88
15	Mittelblau	475	2,43
16	Bremerblau	479,1	3,13
17	Cyan	482,3	4,03
18	Türkisblau	486,4	5,25
19	Seegrün	492,5	6,61
20	Smaragdgrün	503,4	9,77
21	Bläulichgrün	525	13,80
22	Mittelgrün	549	20,40
23	Blattgrün	559,5	29,90
24	Gelbgrün	567	43,70

A2.4 Berechnung der Sättigung im Adamschen Farbkreis

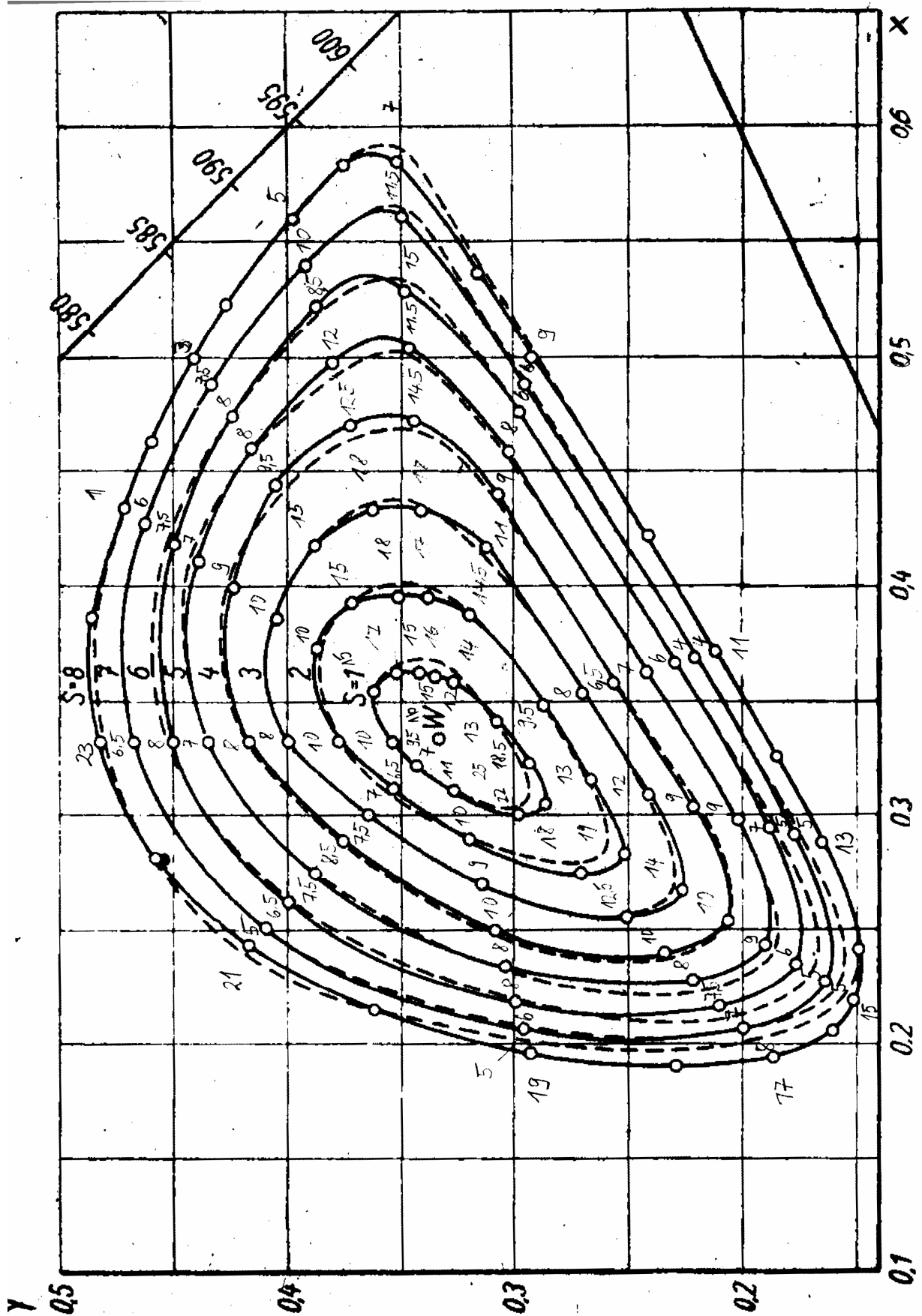
	x	y	H _N	Y	a'	b'	L*	a*	b*	C	S ⁺
1	0,4425	0,5045	9,40	63,80	0,21	-0,04	83,86	-15,64	95,39	96,66	75,54
2	0,4770	0,4780	8,62	43,70	0,22	-0,04	72,03	2,28	86,52	86,55	76,86
3	0,5080	0,4490	7,84	29,90	0,23	-0,04	61,57	16,38	75,91	77,66	78,36
4	0,5400	0,4155	7,05	20,40	0,24	-0,04	52,29	29,02	64,89	71,08	80,56
5	0,5700	0,3760	6,24	13,80	0,25	-0,04	43,94	40,42	52,19	66,02	83,24
6	0,5880	0,3400	5,52	9,77	0,26	-0,05	37,43	47,98	40,21	62,60	85,83
7	0,5810	0,3030	4,72	6,61	0,27	-0,06	30,90	50,67	25,36	56,66	87,79
8	0,5150	0,2470	4,24	5,25	0,28	-0,08	27,44	53,56	4,96	53,78	89,08
9	0,4370	0,1960	3,76	4,17	0,28	-0,10	24,23	54,64	-11,47	55,83	91,74
10	0,3440	0,1440	3,17	3,13	0,29	-0,12	20,56	54,48	-27,93	61,22	94,80
11	0,2580	0,1020	2,65	2,43	0,30	-0,15	17,60	53,82	-43,10	68,95	96,89
12	0,2050	0,0860	2,12	1,88	0,29	-0,16	14,84	45,83	-48,40	66,66	97,61
13	0,1770	0,0890	1,59	1,46	0,27	-0,16	12,35	32,50	-44,50	55,11	97,58
14	0,1615	0,1075	2,12	1,88	0,25	-0,15	14,84	20,34	-42,09	46,74	95,31
15	0,1530	0,1370	2,65	2,43	0,22	-0,14	17,60	6,44	-36,86	37,42	90,49
16	0,1500	0,1735	3,17	3,13	0,21	-0,13	20,56	-6,45	-30,77	31,44	83,70
17	0,1490	0,2065	3,69	4,03	0,19	-0,12	23,77	-16,63	-26,18	31,02	79,37
18	0,1520	0,2560	4,24	5,25	0,18	-0,11	27,44	-28,80	-18,75	34,36	78,15
19	0,1625	0,3340	4,72	6,61	0,17	-0,09	30,90	-42,08	-6,80	42,63	80,97
20	0,1890	0,4350	5,52	9,77	0,16	-0,08	37,43	-54,68	9,16	55,45	82,88
21	0,2400	0,5070	6,24	13,80	0,17	-0,06	43,94	-55,65	25,85	61,36	81,30
22	0,3020	0,5380	7,05	20,40	0,18	-0,05	52,29	-49,89	43,45	66,16	78,46
23	0,3535	0,5410	7,84	29,90	0,19	-0,05	61,57	-42,26	60,43	73,74	76,76
24	0,4025	0,5270	8,62	43,70	0,20	-0,04	72,03	-30,26	78,40	84,04	75,93

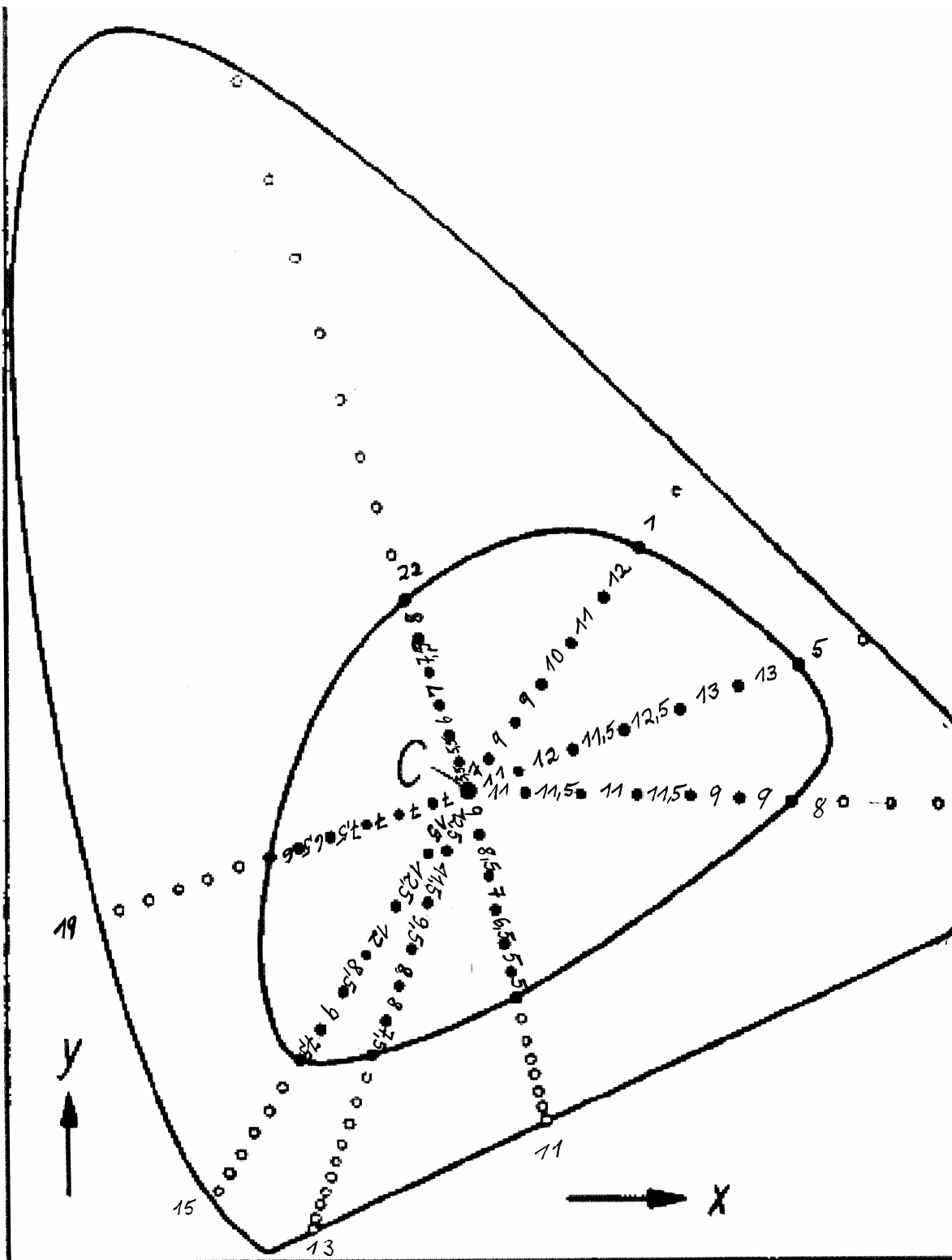
A2.5 Messwerte zur Farbton-Harmonie nach Ostwald (Gretag-Macbeth, D 50, 2⁰)

	L*	C	h	S⁺ hell	L*	C	h	S⁺ dunkel
1	87,28	59,17	99,9	56,11	68,33	47,42	99,75	57,01
2	86,76	73,02	85,52	64,39	60,89	38,61	85,44	53,55
3	82,79	65,66	73,45	62,14	58,25	40,09	72,17	56,69
4	72,19	61,57	54,06	64,89	55,3	37,67	54,88	56,30
5	67,27	62,27	46,73	67,93	52,58	35,66	48,14	56,13
6	60,74	62,08	34,11	71,48	44,87	44,11	33,68	70,10
7	57,83	57,93	26,73	70,77	38,5	38,68	17,56	70,88
8	57,17	51	12,58	66,57	35,84	31,37	2,28	65,86
9	57,56	51,03	2,08	66,34	35,43	24,74	355,33	57,25
10	50,6	49,83	333,92	70,17	31,73	35,27	324,96	74,34
11	52,7	34,78	323,56	55,08	33,87	36,2	322,14	73,02
12	46,71	35,72	305,02	60,75	31,54	38,33	299,83	77,22
13	52,73	38,05	283,38	58,52	38,8	32,52	283,81	64,24
14	50,66	35,44	265,22	57,32	41,28	38,89	267,51	68,57
15	53,11	35,38	248,15	55,44	40,33	34,48	248,29	64,98
16	59,83	37,93	231,52	53,54	43,52	25,55	219,07	50,63
17	60,39	28,78	228,41	43,02	45,71	26,26	218,89	49,81
18	58,82	32,79	215,69	48,69	42,68	29,04	202,18	56,25
19	64,74	35,18	189,34	47,75	47,93	26,91	178,56	48,96
20	63,89	34,82	181,92	47,85	51,62	26,25	182,99	45,33
21	68,76	40,5	167,03	50,75	45,51	34,09	172,8	59,95
22	66,93	40,67	151,27	51,93	48,87	37,5	157,62	60,88
23	79,64	54,65	123,02	56,58	57,44	33,26	129,93	50,11
24	83,83	65,59	105,75	61,62	65,1	44,98	108,22	56,84

A2.6 Abstandsbestimmung der Sättigungslinien in der Normfarbtafel

A2.6.1 Abbildungen





A2.6.2 Tabellen zur Abstandsbestimmung

Tabelle zur Abbildung 3.3.8

Spalten: Nummer des Bunttones, Zeilen: Nummer der Sättigungslinien

	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
1	16	15,5	15	12	12	13	18,5	25	22	11	7	9,5
2	15	17	15	16	14	9,5	13	19	18	10	6,5	10
3	10	15	18	17	14,5	8	12	14	12,5	9	7	10
4	10	15	18	18	11	6,5	9	10	10	10	7,5	8
5	9	9,5	12,5	14,5	9	7	9	9	8	8	8,5	8
6	7	8	12	11,5	8	6	7	6	7,5	8	7,5	7
7	7,5	8	8,5	15	6	4	5	5	7	6	6,5	8
8	6	7,5	10	11,5	6	4	5	5	8	5	5	6,5
	80,5	95,5	109	115,5	80,5	58	78,5	93	93	67	55,5	67
1	1,6	1,3	1,1	0,8	1,2	1,8	1,9	2,2	1,9	1,3	1,0	1,1
2	1,5	1,4	1,1	1,1	1,4	1,3	1,3	1,6	1,5	1,2	0,9	1,2
3	1,0	1,3	1,3	1,2	1,4	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,2
4	1,0	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	1,1	1,0
5	0,9	0,8	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	1,0	1,2	1,0
6	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,5	0,6	1,0	1,1	0,8
7	0,7	0,7	0,6	1,0	0,6	0,6	0,5	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0
8	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,6	0,5	0,4	0,7	0,6	0,7	0,8
1	1,6	1,3	1,1	0,8	1,2	1,8	1,9	2,2	1,9	1,3	1,0	1,1
2	3,1	2,7	2,2	1,9	2,6	3,1	3,2	3,8	3,4	2,5	1,9	2,3
3	4,1	4,0	3,5	3,1	4,0	4,2	4,4	5,0	4,5	3,6	3,0	3,5
4	5,1	5,2	4,8	4,4	5,1	5,1	5,4	5,8	5,4	4,8	4,0	4,5
5	6,0	6,0	5,8	5,4	6,0	6,1	6,3	6,6	6,1	5,7	5,3	5,4
6	6,7	6,7	6,6	6,2	6,8	6,9	7,0	7,1	6,7	6,7	6,3	6,3
7	7,4	7,4	7,3	7,2	7,4	7,4	7,5	7,6	7,3	7,4	7,3	7,2
8	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Tabelle zur Abbildung 3.3.9

	1	5	8	11	13	15	19	22
1	7	11	11	9	12,5	15	7	5,5
2	9	12	11,5	8,5	11,5	12,5	7	5,5
3	9	11,5	11	7	9,5	12	7	6
4	10	12,5	11,5	6,5	8	8,5	7,5	7
5	11	13	9	5	8	9	6,5	7,5
6	12	13	9	5	7,5	7,5	6	8
	58	73	63	41	57	64,5	41	39,5
1	0,7	0,9	1,0	1,3	1,3	1,4	1,0	0,8
2	0,9	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,0	0,8
3	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	0,9
4	1,0	1,0	1,1	1,0	0,8	0,8	1,1	1,1
5	1,1	1,1	0,9	0,7	0,8	0,8	1,0	1,1
6	1,2	1,1	0,9	0,7	0,8	0,7	0,9	1,2
1	0,7	0,9	1,0	1,3	1,3	1,4	1,0	0,8
2	1,7	1,9	2,1	2,6	2,5	2,6	2,0	1,7
3	2,6	2,8	3,2	3,6	3,5	3,7	3,1	2,6
4	3,6	3,9	4,3	4,5	4,4	4,5	4,2	3,6
5	4,8	4,9	5,1	5,3	5,2	5,3	5,1	4,8
6	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0

A2.7 Messung des PCCS System
(Gretag-Macbeth, D 65) Volltoncharts

v	L*	C	h	Nr. neu	S ⁺
8	79,03	97,34	85,68	1	77,63
7	74,29	99,54	80,06	2	80,14
6	68,83	90,52	71,85	3	79,6
5	59,76	90,98	63,62	4	83,58
4	55	82,02	48,83	5	83,06
3	50,44	74,91	37,74	6	82,95
2	45,82	67,64	25,11	7	82,79
1	38,93	57,18	10,06	8	82,66
24	38,44	51,21	351,97	9	79,98
23	32,71	50,86	330,83	10	84,11
22	33,08	49,22	319,16	11	83
21	33,82	57,83	308,99	12	86,32
20	35,5	45,56	292,36	13	78,88
19	36,21	43,07	274,77	14	76,54
18	38,42	45,43	254,36	15	76,36
17	39,44	44,55	237,59	16	74,87
16	42,83	45,99	217,23	17	73,18
15	44,72	50,73	198,44	18	75,01
14	47,75	58,55	183,51	19	77,5
13	51,45	58,1	168,04	20	74,87
12	55,68	60,72	151,03	21	73,7
11	60,58	77,17	122,79	22	78,66
10	68,93	91,92	100,73	23	80
9	75,95	97,99	89,69	24	79,04
		Mittelwert			79,35
		Standartabweichung			3,57

Vollständige Daten des PCCS
Messung mit Gretag/Macbeth D50

v	L*	a*	b*	X	Y	Z	x	y	Y
1	41,88	61,32	12,91	23,14	12,42	6,76	0,5469	0,2935	12,4194
2	48,56	66,74	30,02	31,67	17,24	5,54	0,5816	0,3167	17,2399
3	53,36	63,93	44,96	36,85	21,38	4,28	0,5895	0,342	21,3756
4	57,96	58,06	59,06	41,26	25,92	3,31	0,5854	0,3677	25,9165
5	62,78	43,42	73,73	43,31	31,32	2,47	0,5618	0,4062	31,3228
6	71,21	29,43	79,24	51,34	42,49	3,71	0,5264	0,4356	42,489
7	76,53	17,08	89,76	55,48	50,76	3,5	0,5056	0,4625	50,7591
8	80,53	6,01	89,69	57,97	57,62	4,66	0,4821	0,4792	57,6214
9	77,34	-1,01	85,81	49,84	52,11	4,37	0,4688	0,4901	52,1065
10	71,05	-20,83	81,21	34,32	42,27	3,37	0,4292	0,5286	42,2673
11	62,41	-45,34	55,94	19,33	30,89	5,13	0,3492	0,5581	30,89
12	56,22	-55,08	23,32	12,97	24,13	10,68	0,2714	0,505	24,1341
13	50,86	-56,41	5,37	9,6	19,15	13,68	0,2263	0,4513	19,1516
14	46,04	-53,83	-11,45	7,51	15,3	17,11	0,1882	0,3832	15,2988
15	42,87	-42,98	-23,3	7,22	13,07	20,03	0,179	0,3242	13,0725
16	40,45	-32,6	-34,57	7,21	11,52	23,65	0,1702	0,2719	11,5237
17	36,54	-21,35	-44,45	6,65	9,29	25,38	0,161	0,2248	9,2913

		L*	a*	b*	X	Y	Z	x	y	Y
	18	35,61	-11,29	-49,48	7,26	8,81	27,35	0,1672	0,2028	8,8054
	19	35,14	2,29	-44,87	8,52	8,57	24,27	0,206	0,2072	8,5688
	20	35	15,84	-42	10,09	8,5	22,61	0,245	0,2063	8,4996
	21	34,06	31,57	-42,53	11,67	8,04	22,04	0,2795	0,1925	8,0375
	22	34,57	34,38	-28,68	12,39	8,28	16,03	0,3376	0,2257	8,283
	23	34,82	42,87	-20,16	13,86	8,41	12,9	0,394	0,2391	8,4093
	24	41,12	53,02	-3,08	20,65	11,94	10,8	0,476	0,2751	11,9375
b	1	57,7	52,34	12,89	39,06	25,64	15,34	0,488	0,3204	25,645
	2	63,17	51,84	23	46,83	31,79	15,07	0,4999	0,3393	31,7855
	3	63,15	51,74	33,44	46,77	31,77	11,27	0,5208	0,3537	31,7683
	4	67,07	45,51	44,75	50,68	36,72	9,84	0,5211	0,3776	36,7249
	5	72,8	35,94	55,63	56,59	44,86	9,54	0,5099	0,4042	44,8553
	6	75,65	26,57	69,86	57,78	49,32	7,06	0,5062	0,432	49,3156
	7	80,71	13,75	72,16	61,55	57,94	8,72	0,4801	0,4519	57,9413
	8	85,11	3,91	75,1	65,55	66,21	10,07	0,4622	0,4668	66,2145
	9	81,38	-4,56	70,68	55,19	59,17	9,47	0,4457	0,4778	59,1654
	10	76,94	-18,93	66,68	42,87	51,43	8,44	0,4173	0,5006	51,4272
	11	71,88	-36,26	43,43	30,99	43,48	13,02	0,3542	0,497	43,4846
	12	66,23	-45,86	19,02	22,65	35,62	19,06	0,2929	0,4606	35,6157
	13	61,61	-48,48	4,61	18,05	29,95	22,23	0,257	0,4265	29,9499
	14	60,34	-44,69	-9,2	17,73	28,5	28,78	0,2364	0,38	28,4997
	15	57,62	-41,73	-20,19	16,14	25,56	32,82	0,2166	0,343	25,5635
	16	56,23	-31,68	-29,33	16,86	24,14	37,54	0,2147	0,3073	24,1402
	17	51,69	-21,33	-35,37	15,25	19,87	36,25	0,2137	0,2784	19,8698
	18	50,23	-12,39	-40,61	15,7	18,61	38,23	0,2164	0,2565	18,6085
	19	50,53	-0,46	-39,71	18,09	18,86	37,94	0,2416	0,2519	18,8626
	20	51,25	11,21	-37,46	21,04	19,48	37,2	0,2707	0,2507	19,4825
	21	50,6	22,06	-34,4	22,78	18,93	34,25	0,2999	0,2492	18,9283
	22	50,43	30,24	-26,26	24,46	18,78	28,76	0,3397	0,2608	18,7788
	23	50,61	37,63	-13,82	26,41	18,94	21,95	0,3924	0,2814	18,9382
	24	57,48	45,81	-0,17	36,75	25,42	21,04	0,4416	0,3055	25,4225
s	2	47,82	54,81	24,68	27,69	16,66	6,41	0,5455	0,3282	16,6557
	4	51,73	47,55	47,04	30,17	19,9	3,49	0,5632	0,3716	19,9021
	6	66,9	27,27	69,72	43,86	36,5	4,04	0,5197	0,4324	36,4981
	8	75,52	4,54	79,96	48,99	49,11	4,86	0,4758	0,477	49,1128
	10	66	-17,65	67,11	29,19	35,32	4,22	0,4247	0,5139	35,3199
	12	50,59	-46,51	19,35	10,73	18,92	8,97	0,2778	0,49	18,9154
	14	46,81	-45,36	-10,54	8,83	15,87	17,29	0,2102	0,378	15,8734
	16	40,57	-31,26	-31,6	7,4	11,6	22,19	0,1798	0,2815	11,595
	18	35,61	-11,84	-42,72	7,21	8,81	23,55	0,1821	0,2227	8,809
	20	35,57	15,67	-38,47	10,39	8,78	21,3	0,2566	0,2171	8,7845
	22	34,96	32,53	-26,14	12,36	8,48	15,27	0,3424	0,2348	8,4767
	24	42,31	46,29	-0,96	20,32	12,7	10,77	0,4641	0,29	12,6983
dp	2	36,87	52,98	21,49	17,08	9,47	3,49	0,5688	0,3152	9,4676
	4	41,02	44,67	42,52	18,89	11,88	1,79	0,5803	0,3648	11,8757
	6	51,83	24,23	61,34	24,47	20	1,77	0,5292	0,4324	19,9962
	8	60,88	5,49	72,5	29,47	29,11	2,23	0,4846	0,4787	29,1068
	10	50,68	-15,09	55,92	15,57	18,99	2,12	0,4245	0,5177	18,9916
	12	40,27	-44,72	17,23	5,97	11,41	5,23	0,2639	0,5047	11,4127
	14	36,37	-41,02	-10,9	4,86	9,2	10,68	0,1964	0,3719	9,2023

		L*	a*	b*	X	Y	Z	x	y	Y
	16	30,95	-28,09	-30,35	4,08	6,63	14,21	0,1638	0,266	6,6283
	18	25,92	-7,55	-40,83	4	4,72	14,91	0,1693	0,1997	4,72
	20	25,6	16,87	-36,6	5,82	4,61	13,1	0,2474	0,196	4,6135
	22	23,65	34,79	-28,73	6,71	3,99	9,43	0,3333	0,1983	3,9938
	24	32,01	45,5	-2,04	12,41	7,09	6,29	0,4811	0,275	7,0909
lt+	2	72,26	36,37	17,58	55,83	44,05	25,13	0,4466	0,3524	44,0462
	4	77	31,47	28,87	62,29	51,52	23,42	0,4539	0,3754	51,5239
	6	81,38	18,76	48,02	65,01	59,16	17,75	0,4581	0,4169	59,159
	8	86,84	1	54,68	67,61	69,67	19	0,4326	0,4458	69,6725
	10	80,47	-14,16	45,72	49,96	57,52	18,08	0,3979	0,4581	57,5175
	12	75,95	-33,23	15,7	36,92	49,81	30,04	0,3162	0,4266	49,8112
	14	70,56	-32,02	-5,77	30,6	41,56	38,4	0,2768	0,3759	41,5571
	16	66,25	-25	-20,86	27,59	35,65	44,37	0,2564	0,3313	35,6534
	18	60,08	-9,51	-30,48	24,89	28,21	43,53	0,2576	0,2919	28,2103
	20	61,07	6,89	-25,57	30,06	29,33	41	0,2994	0,2922	29,3314
	22	60,87	21,24	-16,4	33,8	29,1	34,05	0,3486	0,3002	29,1029
	24	67,53	32,47	2,19	46,63	37,34	29,41	0,4113	0,3294	37,3436
lt	2	76,71	28,47	12,72	60,48	51,05	32,82	0,419	0,3536	51,0461
	4	81,25	23,77	21,42	67,02	58,93	32,25	0,4236	0,3725	58,9326
	6	86,01	13,17	34,86	71,62	68,01	28,9	0,425	0,4035	68,0097
	8	90,51	0,63	45,08	74,92	77,42	27,42	0,4168	0,4307	77,4172
	10	84,93	-11,18	38,03	58,72	65,87	25,92	0,3901	0,4377	65,8726
	12	81,72	-28,95	13,32	46,54	59,78	38,5	0,3213	0,4128	59,7833
	14	75,73	-28,35	-3,05	38,13	49,45	43,18	0,2916	0,3782	49,4538
	16	69,56	-20,55	-16,48	32,56	40,13	45,45	0,2756	0,3396	40,1253
	18	65,46	-8,15	-21,46	31,1	34,63	43,74	0,2841	0,3163	34,6294
	20	66,15	4,49	-19,94	35,55	35,52	43,47	0,3104	0,3101	35,5173
	22	66,94	16,94	-11,6	40,48	36,55	38,08	0,3516	0,3175	36,5533
	24	72,09	26	1,52	51,48	43,79	35,03	0,3951	0,3361	43,7888
sf	2	62,15	29,95	13,79	38,06	30,58	18,24	0,438	0,352	30,5835
	4	67,5	27,98	23,72	44,99	37,29	17,92	0,449	0,3722	37,2944
	6	72,16	18,04	38,29	48,62	43,89	15,15	0,4516	0,4077	43,8914
	8	77,33	2,14	43,2	51	52,08	16,81	0,4254	0,4344	52,0757
	10	71,45	-11,7	35,4	37,57	42,85	15,83	0,3903	0,4452	42,8464
	12	65,99	-27,09	11,4	26,79	35,31	22,63	0,3162	0,4168	35,3124
	14	61,28	-27,86	-5,21	21,93	29,57	27,35	0,2781	0,375	29,5676
	16	56,13	-19,32	-16,32	19,11	24,04	28,7	0,266	0,3346	24,041
	18	51,3	-7,28	-21,97	17,44	19,53	27,09	0,2722	0,3049	19,5272
	20	51,29	6,49	-21,8	20,11	19,52	26,98	0,3019	0,2931	19,5239
	22	52,46	17,41	-14,25	23,53	20,56	23,86	0,3463	0,3026	20,5588
	24	57,46	26,4	1	31,12	25,39	20,45	0,4044	0,33	25,3921
d	2	47,73	29,89	13,11	21,79	16,59	9,34	0,4567	0,3476	16,5852
	4	52,25	28,27	23,57	25,84	20,36	8,59	0,4717	0,3716	20,3631
	6	57,35	17,39	38,04	28,61	25,28	7,12	0,4689	0,4143	25,2784
	8	61,61	2,18	43,1	29,44	29,95	7,7	0,4388	0,4465	29,9542
	10	55,33	-11,86	36,95	19,91	23,25	6,56	0,4005	0,4676	23,2498
	12	51,54	-25,55	10,78	14,44	19,74	12,16	0,3116	0,4259	19,7398
	14	46,6	-26,95	-5,95	11,05	15,72	15,22	0,2631	0,3743	15,7157
	16	41,11	-18,83	-17,88	9,06	11,93	16,23	0,2434	0,3206	11,9335

		L*	a*	b*	X	Y	Z	x	y	Y
	18	35,63	-5,7	-23,17	7,86	8,82	14,55	0,2517	0,2823	8,8168
	20	35,96	8,22	-23,27	9,65	8,99	14,82	0,2885	0,2687	8,9898
	22	35,07	19,47	-15,47	10,61	8,53	11,43	0,3469	0,2791	8,5339
	24	41,39	28,54	-1,31	16,19	12,11	10,38	0,4186	0,313	12,1096
dk	2	26,57	30	9,18	7,5	4,94	2,73	0,4944	0,3257	4,9422
	4	31,18	28,41	22,46	9,6	6,73	2,1	0,5208	0,365	6,7262
	6	36,37	16,33	32,99	10,93	9,2	1,94	0,4953	0,4168	9,2002
	8	41,81	4,07	38,55	12,53	12,38	2,35	0,4595	0,4542	12,3795
	10	36,58	-10,21	30,69	7,82	9,31	2,22	0,4039	0,4812	9,3137
	12	30,47	-21,89	8,01	4,38	6,43	3,87	0,2984	0,4382	6,43
	14	25,65	-21,83	-6,34	3,02	4,63	4,92	0,2405	0,3682	4,6288
	16	25,38	-15,99	-16,74	3,3	4,54	7,04	0,2218	0,305	4,5387
	18	21,16	-4,46	-22,68	2,91	3,29	6,73	0,2252	0,2543	3,2866
	20	21,21	8,31	-20,6	3,7	3,3	6,27	0,2788	0,2486	3,2995
	22	21,91	15,7	-12,67	4,43	3,49	4,9	0,3456	0,2723	3,4899
	24	27,76	24,93	-3,03	7,51	5,37	4,98	0,4204	0,3006	5,3685
p+	2	81,95	15,62	7,6	64,72	60,21	43,24	0,3848	0,3581	60,2142
	4	82,22	15,58	12,98	65,2	60,7	39,4	0,3945	0,3672	60,7011
	6	86,72	10,04	22,09	71,57	69,43	38,38	0,399	0,3871	69,4279
	8	90,69	0,14	24,74	75,07	77,81	41,6	0,386	0,4001	77,8123
	10	86,06	-6,62	22,28	62,73	68,12	37,42	0,3728	0,4048	68,116
	12	81,77	-18,36	8,98	50,49	59,88	41,89	0,3316	0,3933	59,8769
	14	80,01	-18,11	-1,78	47,78	56,7	48,27	0,3128	0,3712	56,6991
	16	80,6	-12,09	-8,27	50,96	57,76	55,07	0,3111	0,3526	57,7592
	18	77,22	-4,73	-11,05	48,27	51,89	52,23	0,3167	0,3405	51,894
	20	76,16	1,56	-9,84	48,91	50,15	49,52	0,3292	0,3375	50,1527
	22	77,13	6,86	-5,6	52,47	51,74	47,28	0,3463	0,3416	51,7415
	24	81,51	10,9	1,46	61,82	59,4	47,71	0,366	0,3516	59,4011
p	2	87,25	7,01	3,81	71,24	70,53	54,49	0,363	0,3594	70,5261
	4	86,45	7,28	6,76	69,73	68,89	50,52	0,3687	0,3642	68,8865
	6	91,05	4,92	13,07	78,19	78,58	51,98	0,3746	0,3764	78,5843
	8	91,01	0,27	16,87	75,8	78,51	48,55	0,3737	0,387	78,5124
	10	90,68	-4,42	16,31	72,83	77,78	48,54	0,3657	0,3906	77,783
	12	86,65	-12,82	6,75	61,14	69,29	50,83	0,3373	0,3822	69,2868
	14	85,45	-12,86	-0,31	58,95	66,89	55,45	0,3252	0,369	66,8926
	16	85,3	-8,22	-4,44	60,64	66,6	59,21	0,3252	0,3572	66,6037
	18	81,42	-2,85	-6,01	55,94	59,24	54,28	0,3301	0,3496	59,241
	20	81,04	1,16	-5,24	56,89	58,54	52,94	0,3379	0,3477	58,5399
	22	81,79	3,38	-2,08	59,15	59,92	51,25	0,3473	0,3518	59,9171
	24	86,86	5,8	1,22	69,86	69,71	56,3	0,3567	0,3559	69,7136
ltg	2	72,67	7,63	3,02	45,68	44,67	34,69	0,3653	0,3572	44,6699
	4	72,17	8,16	6,19	45,11	43,92	31,96	0,3729	0,363	43,9195
	6	76,85	6,11	12,31	51,73	51,29	33,26	0,3796	0,3763	51,2852
	8	76,24	0,2	15,47	48,52	50,27	30,49	0,3753	0,3888	50,2723
	10	75,91	-4,97	15,33	46,16	49,74	30,22	0,366	0,3944	49,7386
	12	72,41	-11,52	5,04	38,92	44,27	33	0,3349	0,381	44,2743
	14	71,29	-12,96	-1,58	36,97	42,61	36,25	0,3192	0,3679	42,6132
	16	71,42	-8,84	-6,39	38,41	42,8	39,97	0,317	0,3532	42,8015
	18	65,27	-2,58	-7,74	32,42	34,39	33,32	0,3238	0,3435	34,3906

		L*	a*	b*	X	Y	Z	x	y	Y
	20	67,25	0,79	-6,33	35,86	36,96	34,69	0,3336	0,3438	36,9627
	22	67,31	5,17	-4,46	37,27	37,05	33,48	0,3457	0,3437	37,0485
	24	71,52	7,12	0,59	43,79	42,95	35	0,3597	0,3528	42,9543
for	2	42,08	10,14	3,78	13,63	12,55	9,22	0,385	0,3546	12,5531
	4	41,65	10,44	7,15	13,39	12,28	8,09	0,3966	0,3637	12,2753
	6	47,06	6,09	11,23	16,55	16,07	9,55	0,3925	0,381	16,0657
	8	46,85	0,84	12,77	15,48	15,91	9	0,3832	0,3939	15,9073
	10	46,76	-4,86	12,05	14,46	15,84	9,17	0,3664	0,4014	15,8382
	12	42,6	-10,22	3,92	10,98	12,89	9,44	0,3296	0,3871	12,8939
	14	41,64	-10,57	-2,23	10,38	12,27	10,81	0,3102	0,3667	12,2695
	16	41,09	-7,92	-7,59	10,41	11,92	12,28	0,3009	0,3444	11,9205
	18	37,44	-2,08	-9,09	9,17	9,78	10,69	0,3094	0,3299	9,7762
	20	37,61	2,12	-9,39	9,78	9,87	10,88	0,3203	0,3233	9,8734
	22	37,19	7,61	-6,64	10,25	9,64	9,8	0,3451	0,3247	9,6397
	24	42,78	9,89	-0,1	14,06	13,01	10,76	0,3718	0,3439	13,0084
dkg	2	20,65	8,57	2,11	3,56	3,15	2,35	0,393	0,348	3,1541
	4	22,14	7,36	3,98	3,91	3,55	2,43	0,3949	0,3593	3,5538
	6	25,89	5,1	8,71	4,94	4,71	2,64	0,4017	0,3834	4,7106
	8	26,19	0,7	8,12	4,69	4,81	2,78	0,3819	0,3917	4,8108
	10	25,36	-3,03	7,37	4,15	4,53	2,69	0,3648	0,3984	4,5326
	12	21,37	-5,64	2,65	2,9	3,34	2,43	0,334	0,3857	3,3445
	14	21,88	-6,32	-1,4	2,98	3,48	3,06	0,3131	0,3657	3,482
	16	20,95	-4,5	-4,62	2,86	3,23	3,29	0,3048	0,3446	3,233
	18	17,38	-1,16	-6,46	2,24	2,38	2,7	0,3059	0,3252	2,3833
	20	16,73	2,5	-6,87	2,28	2,25	2,61	0,3195	0,3145	2,2458
	22	16,73	6,21	-5,6	2,46	2,25	2,46	0,3436	0,3133	2,247
	24	21,53	8,18	-1,26	3,79	3,39	2,96	0,3736	0,3343	3,3879
neutral	w	94,88	0,15	1,83	84,26	87,34	69,96	0,3488	0,3616	87,3413
	GY8.5	86,48	-0,24	0,2	66,35	68,95	56,66	0,3456	0,3592	68,9526
	GY7.5	76,29	-0,47	-0,15	48,36	50,36	41,64	0,3446	0,3588	50,358
	GY6.5	66,39	-0,62	-0,69	34,35	35,83	29,97	0,343	0,3577	35,8316
	GY5.5	56,78	-0,73	-1,06	23,64	24,7	20,89	0,3415	0,3568	24,702
	GY4.5	47,34	-0,66	-0,97	15,58	16,28	13,79	0,3413	0,3567	16,284
	GY3.5	36,58	-0,65	-1,37	8,9	9,32	8,03	0,3391	0,3549	9,3153
	GY2.5	26,08	-0,67	-1,88	4,55	4,77	4,25	0,3352	0,3517	4,774
	black	15,45	-0,55	-2,03	1,9	1,99	1,84	0,3314	0,3481	1,9937

A2.8 Tabelle zur Bestimmung der Sättigung S⁺ und des Abstandes in Abbildung 4.5.4 (PCCS)

		L*	a*	b*	x	y	Y	C	S ⁺
v	1	41,88	61,32	12,91	0,5469	0,2935	12,4194	62,66	83,14
	2	48,56	66,74	30,02	0,5816	0,3167	17,2399	73,18	83,32
	3	53,36	63,93	44,96	0,5895	0,342	21,3756	78,16	82,59
	4	57,96	58,06	59,06	0,5854	0,3677	25,9165	82,82	81,93
	5	62,78	43,42	73,73	0,5618	0,4062	31,3228	85,57	80,63
	6	71,21	29,43	79,24	0,5264	0,4356	42,489	84,53	76,48
	7	76,53	17,08	89,76	0,5056	0,4625	50,7591	91,37	76,66
gelb	8	80,53	6,01	89,69	0,4821	0,4792	57,6214	89,89	74,48
	9	77,34	-1,01	85,81	0,4688	0,4901	52,1065	85,82	74,28
	10	71,05	-20,83	81,21	0,4292	0,5286	42,2673	83,84	76,29
	11	62,41	-45,34	55,94	0,3492	0,5581	30,89	72,01	75,57
	12	56,22	-55,08	23,32	0,2714	0,505	24,1341	59,81	72,87
	13	50,86	-56,41	5,37	0,2263	0,4513	19,1516	56,67	74,42
	14	46,04	-53,83	-11,45	0,1882	0,3832	15,2988	55,03	76,70
	15	42,87	-42,98	-23,3	0,179	0,3242	13,0725	48,89	75,19
	16	40,45	-32,6	-34,57	0,1702	0,2719	11,5237	47,52	76,15
	17	36,54	-21,35	-44,45	0,161	0,2248	9,2913	49,31	80,35
	18	35,61	-11,29	-49,48	0,1672	0,2028	8,8054	50,75	81,86
	19	35,14	2,29	-44,87	0,206	0,2072	8,5688	44,93	78,77
	20	35	15,84	-42	0,245	0,2063	8,4996	44,89	78,86
	21	34,06	31,57	-42,53	0,2795	0,1925	8,0375	52,97	84,11
	22	34,57	34,38	-28,68	0,3376	0,2257	8,283	44,77	79,15
	23	34,82	42,87	-20,16	0,394	0,2391	8,4093	47,37	80,58
	24	41,12	53,02	-3,08	0,476	0,2751	11,9375	53,11	79,07
b	1	57,7	52,34	12,89	0,488	0,3204	25,645	53,90	68,27
	2	63,17	51,84	23	0,4999	0,3393	31,7855	56,71	66,81
	3	63,15	51,74	33,44	0,5208	0,3537	31,7683	61,61	69,83
	4	67,07	45,51	44,75	0,5211	0,3776	36,7249	63,83	68,94
	5	72,8	35,94	55,63	0,5099	0,4042	44,8553	66,23	67,29
	6	75,65	26,57	69,86	0,5062	0,432	49,3156	74,74	70,28
	7	80,71	13,75	72,16	0,4801	0,4519	57,9413	73,46	67,31
	8	85,11	3,91	75,1	0,4622	0,4668	66,2145	75,20	66,21
	9	81,38	-4,56	70,68	0,4457	0,4778	59,1654	70,83	65,65
	10	76,94	-18,93	66,68	0,4173	0,5006	51,4272	69,31	66,93
	11	71,88	-36,26	43,43	0,3542	0,497	43,4846	56,58	61,85
	12	66,23	-45,86	19,02	0,2929	0,4606	35,6157	49,65	59,98
	13	61,61	-48,48	4,61	0,257	0,4265	29,9499	48,70	62,01
	14	60,34	-44,69	-9,2	0,2364	0,38	28,4997	45,63	60,31
	15	57,62	-41,73	-20,19	0,2166	0,343	25,5635	46,36	62,68
	16	56,23	-31,68	-29,33	0,2147	0,3073	24,1402	43,17	60,90
	17	51,69	-21,33	-35,37	0,2137	0,2784	19,8698	41,30	62,43
	18	50,23	-12,39	-40,61	0,2164	0,2565	18,6085	42,46	64,55
	19	50,53	-0,46	-39,71	0,2416	0,2519	18,8626	39,71	61,79
	20	51,25	11,21	-37,46	0,2707	0,2507	19,4825	39,10	60,66
	21	50,6	22,06	-34,4	0,2999	0,2492	18,9283	40,87	62,83
	22	50,43	30,24	-26,26	0,3397	0,2608	18,7788	40,05	62,19
	23	50,61	37,63	-13,82	0,3924	0,2814	18,9382	40,09	62,09
	24	57,48	45,81	-0,17	0,4416	0,3055	25,4225	45,81	62,33
s	2	47,82	54,81	24,68	0,5455	0,3282	16,6557	60,11	78,26
	4	51,73	47,55	47,04	0,5632	0,3716	19,9021	66,89	79,10

		L*	a*	b*	x	y	Y	C	S ⁺
	6	66,9	27,27	69,72	0,5197	0,4324	36,4981	74,86	74,57
	8	75,52	4,54	79,96	0,4758	0,477	49,1128	80,09	72,76
	10	66	-17,65	67,11	0,4247	0,5139	35,3199	69,39	72,46
	12	50,59	-46,51	19,35	0,2778	0,49	18,9154	50,37	70,56
	14	46,81	-45,36	-10,54	0,2102	0,378	15,8734	46,57	70,53
	16	40,57	-31,26	-31,6	0,1798	0,2815	11,595	44,45	73,86
	18	35,61	-11,84	-42,72	0,1821	0,2227	8,809	44,33	77,96
	20	35,57	15,67	-38,47	0,2566	0,2171	8,7845	41,54	75,96
	22	34,96	32,53	-26,14	0,3424	0,2348	8,4767	41,73	76,66
	24	42,31	46,29	-0,96	0,4641	0,29	12,6983	46,30	73,82
dp	2	36,87	52,98	21,49	0,5688	0,3152	9,4676	57,17	84,04
	4	41,02	44,67	42,52	0,5803	0,3648	11,8757	61,67	83,26
	6	51,83	24,23	61,34	0,5292	0,4324	19,9962	65,95	78,63
	8	60,88	5,49	72,5	0,4846	0,4787	29,1068	72,71	76,67
	10	50,68	-15,09	55,92	0,4245	0,5177	18,9916	57,92	75,26
	12	40,27	-44,72	17,23	0,2639	0,5047	11,4127	47,92	76,56
	14	36,37	-41,02	-10,9	0,1964	0,3719	9,2023	42,44	75,93
	16	30,95	-28,09	-30,35	0,1638	0,266	6,6283	41,35	80,06
	18	25,92	-7,55	-40,83	0,1693	0,1997	4,72	41,52	84,83
	20	25,6	16,87	-36,6	0,2474	0,196	4,6135	40,30	84,41
	22	23,65	34,79	-28,73	0,3333	0,1983	3,9938	45,12	88,57
	24	32,01	45,5	-2,04	0,4811	0,275	7,0909	45,55	81,82
lt+	2	72,26	36,37	17,58	0,4466	0,3524	44,0462	40,40	48,80
	4	77	31,47	28,87	0,4539	0,3754	51,5239	42,71	48,50
	6	81,38	18,76	48,02	0,4581	0,4169	59,159	51,55	53,52
	8	86,84	1	54,68	0,4326	0,4458	69,6725	54,69	53,29
	10	80,47	-14,16	45,72	0,3979	0,4581	57,5175	47,86	51,12
	12	75,95	-33,23	15,7	0,3162	0,4266	49,8112	36,75	43,56
	14	70,56	-32,02	-5,77	0,2768	0,3759	41,5571	32,54	41,87
	16	66,25	-25	-20,86	0,2564	0,3313	35,6534	32,56	44,11
	18	60,08	-9,51	-30,48	0,2576	0,2919	28,2103	31,93	46,93
	20	61,07	6,89	-25,57	0,2994	0,2922	29,3314	26,48	39,78
	22	60,87	21,24	-16,4	0,3486	0,3002	29,1029	26,83	40,34
	24	67,53	32,47	2,19	0,4113	0,3294	37,3436	32,54	43,41
lt	2	76,71	28,47	12,72	0,419	0,3536	51,0461	31,18	37,66
	4	81,25	23,77	21,42	0,4236	0,3725	58,9326	32,00	36,64
	6	86,01	13,17	34,86	0,425	0,4035	68,0097	37,26	39,76
	8	90,51	0,63	45,08	0,4168	0,4307	77,4172	45,08	44,59
	10	84,93	-11,18	38,03	0,3901	0,4377	65,8726	39,64	42,29
	12	81,72	-28,95	13,32	0,3213	0,4128	59,7833	31,87	36,33
	14	75,73	-28,35	-3,05	0,2916	0,3782	49,4538	28,51	35,24
	16	69,56	-20,55	-16,48	0,2756	0,3396	40,1253	26,34	35,41
	18	65,46	-8,15	-21,46	0,2841	0,3163	34,6294	22,96	33,09
	20	66,15	4,49	-19,94	0,3104	0,3101	35,5173	20,44	29,52
	22	66,94	16,94	-11,6	0,3516	0,3175	36,5533	20,53	29,32
	24	72,09	26	1,52	0,3951	0,3361	43,7888	26,04	33,98
sf	2	62,15	29,95	13,79	0,438	0,352	30,5835	32,97	46,87
	4	67,5	27,98	23,72	0,449	0,3722	37,2944	36,68	47,75
	6	72,16	18,04	38,29	0,4516	0,4077	43,8914	42,33	50,60

		L*	a*	b*	x	y	Y	C	S+
	8	77,33	2,14	43,2	0,4254	0,4344	52,0757	43,25	48,82
	10	71,45	-11,7	35,4	0,3903	0,4452	42,8464	37,28	46,26
	12	65,99	-27,09	11,4	0,3162	0,4168	35,3124	29,39	40,69
	14	61,28	-27,86	-5,21	0,2781	0,375	29,5676	28,34	41,98
	16	56,13	-19,32	-16,32	0,266	0,3346	24,041	25,29	41,08
	18	51,3	-7,28	-21,97	0,2722	0,3049	19,5272	23,14	41,12
	20	51,29	6,49	-21,8	0,3019	0,2931	19,5239	22,75	40,54
	22	52,46	17,41	-14,25	0,3463	0,3026	20,5588	22,50	39,41
	24	57,46	26,4	1	0,4044	0,33	25,3921	26,42	41,77
d	2	47,73	29,89	13,11	0,4567	0,3476	16,5852	32,64	56,45
	4	52,25	28,27	23,57	0,4717	0,3716	20,3631	36,81	57,59
	6	57,35	17,39	38,04	0,4689	0,4143	25,2784	41,83	58,93
	8	61,61	2,18	43,1	0,4388	0,4465	29,9542	43,16	57,37
	10	55,33	-11,86	36,95	0,4005	0,4676	23,2498	38,81	57,42
	12	51,54	-25,55	10,78	0,3116	0,4259	19,7398	27,73	47,38
	14	46,6	-26,95	-5,95	0,2631	0,3743	15,7157	27,60	50,96
	16	41,11	-18,83	-17,88	0,2434	0,3206	11,9335	25,97	53,40
	18	35,63	-5,7	-23,17	0,2517	0,2823	8,8168	23,86	55,64
	20	35,96	8,22	-23,27	0,2885	0,2687	8,9898	24,68	56,59
	22	35,07	19,47	-15,47	0,3469	0,2791	8,5339	24,87	57,84
	24	41,39	28,54	-1,31	0,4186	0,313	12,1096	28,57	56,81
dk	2	26,57	30	9,18	0,4944	0,3257	4,9422	31,37	76,31
	4	31,18	28,41	22,46	0,5208	0,365	6,7262	36,22	75,78
	6	36,37	16,33	32,99	0,4953	0,4168	9,2002	36,81	71,13
	8	41,81	4,07	38,55	0,4595	0,4542	12,3795	38,76	67,99
	10	36,58	-10,21	30,69	0,4039	0,4812	9,3137	32,34	66,24
	12	30,47	-21,89	8,01	0,2984	0,4382	6,43	23,31	60,76
	14	25,65	-21,83	-6,34	0,2405	0,3682	4,6288	22,73	66,33
	16	25,38	-15,99	-16,74	0,2218	0,305	4,5387	23,15	67,39
	18	21,16	-4,46	-22,68	0,2252	0,2543	3,2866	23,11	73,76
	20	21,21	8,31	-20,6	0,2788	0,2486	3,2995	22,21	72,32
	22	21,91	15,7	-12,67	0,3456	0,2723	3,4899	20,17	67,74
	24	27,76	24,93	-3,03	0,4204	0,3006	5,3685	25,11	67,09
p+	2	81,95	15,62	7,6	0,3848	0,3581	60,2142	17,37	20,74
	4	82,22	15,58	12,98	0,3945	0,3672	60,7011	20,28	23,95
	6	86,72	10,04	22,09	0,399	0,3871	69,4279	24,26	26,95
	8	90,69	0,14	24,74	0,386	0,4001	77,8123	24,74	26,32
	10	86,06	-6,62	22,28	0,3728	0,4048	68,116	23,24	26,07
	12	81,77	-18,36	8,98	0,3316	0,3933	59,8769	20,44	24,25
	14	80,01	-18,11	-1,78	0,3128	0,3712	56,6991	18,20	22,18
	16	80,6	-12,09	-8,27	0,3111	0,3526	57,7592	14,65	17,88
	18	77,22	-4,73	-11,05	0,3167	0,3405	51,894	12,02	15,38
	20	76,16	1,56	-9,84	0,3292	0,3375	50,1527	9,96	12,97
	22	77,13	6,86	-5,6	0,3463	0,3416	51,7415	8,86	11,41
	24	81,51	10,9	1,46	0,366	0,3516	59,4011	11,00	13,37
p	2	87,25	7,01	3,81	0,363	0,3594	70,5261	7,98	9,11
	4	86,45	7,28	6,76	0,3687	0,3642	68,8865	9,93	11,42
	6	91,05	4,92	13,07	0,3746	0,3764	78,5843	13,97	15,16
	8	91,01	0,27	16,87	0,3737	0,387	78,5124	16,87	18,23

		L*	a*	b*	x	y	Y	C	S ⁺
	10	90,68	-4,42	16,31	0,3657	0,3906	77,783	16,90	18,32
	12	86,65	-12,82	6,75	0,3373	0,3822	69,2868	14,49	16,49
	14	85,45	-12,86	-0,31	0,3252	0,369	66,8926	12,86	14,89
	16	85,3	-8,22	-4,44	0,3252	0,3572	66,6037	9,34	10,89
	18	81,42	-2,85	-6,01	0,3301	0,3496	59,241	6,65	8,14
	20	81,04	1,16	-5,24	0,3379	0,3477	58,5399	5,37	6,61
	22	81,79	3,38	-2,08	0,3473	0,3518	59,9171	3,97	4,85
	24	86,86	5,8	1,22	0,3567	0,3559	69,7136	5,93	6,81
ltg	2	72,67	7,63	3,02	0,3653	0,3572	44,6699	8,21	11,22
	4	72,17	8,16	6,19	0,3729	0,363	43,9195	10,24	14,05
	6	76,85	6,11	12,31	0,3796	0,3763	51,2852	13,74	17,60
	8	76,24	0,2	15,47	0,3753	0,3888	50,2723	15,47	19,89
	10	75,91	-4,97	15,33	0,366	0,3944	49,7386	16,12	20,77
	12	72,41	-11,52	5,04	0,3349	0,381	44,2743	12,57	17,11
	14	71,29	-12,96	-1,58	0,3192	0,3679	42,6132	13,06	18,01
	16	71,42	-8,84	-6,39	0,317	0,3532	42,8015	10,91	15,10
	18	65,27	-2,58	-7,74	0,3238	0,3435	34,3906	8,16	12,40
	20	67,25	0,79	-6,33	0,3336	0,3438	36,9627	6,38	9,44
	22	67,31	5,17	-4,46	0,3457	0,3437	37,0485	6,83	10,09
	24	71,52	7,12	0,59	0,3597	0,3528	42,9543	7,14	9,94
tg	2	42,08	10,14	3,78	0,385	0,3546	12,5531	10,82	24,91
	4	41,65	10,44	7,15	0,3966	0,3637	12,2753	12,65	29,07
	6	47,06	6,09	11,23	0,3925	0,381	16,0657	12,78	26,20
	8	46,85	0,84	12,77	0,3832	0,3939	15,9073	12,80	26,35
	10	46,76	-4,86	12,05	0,3664	0,4014	15,8382	12,99	26,77
	12	42,6	-10,22	3,92	0,3296	0,3871	12,8939	10,95	24,89
	14	41,64	-10,57	-2,23	0,3102	0,3667	12,2695	10,80	25,11
	16	41,09	-7,92	-7,59	0,3009	0,3444	11,9205	10,97	25,79
	18	37,44	-2,08	-9,09	0,3094	0,3299	9,7762	9,32	24,17
	20	37,61	2,12	-9,39	0,3203	0,3233	9,8734	9,63	24,80
	22	37,19	7,61	-6,64	0,3451	0,3247	9,6397	10,10	26,21
	24	42,78	9,89	-0,1	0,3718	0,3439	13,0084	9,89	22,53
dkg	2	20,65	8,57	2,11	0,393	0,348	3,1541	8,83	39,30
	4	22,14	7,36	3,98	0,3949	0,3593	3,5538	8,37	35,35
	6	25,89	5,1	8,71	0,4017	0,3834	4,7106	10,09	36,32
	8	26,19	0,7	8,12	0,3819	0,3917	4,8108	8,15	29,71
	10	25,36	-3,03	7,37	0,3648	0,3984	4,5326	7,97	29,98
	12	21,37	-5,64	2,65	0,334	0,3857	3,3445	6,23	27,99
	14	21,88	-6,32	-1,4	0,3131	0,3657	3,482	6,47	28,37
	16	20,95	-4,5	-4,62	0,3048	0,3446	3,233	6,45	29,42
	18	17,38	-1,16	-6,46	0,3059	0,3252	2,3833	6,56	35,33
	20	16,73	2,5	-6,87	0,3195	0,3145	2,2458	7,31	40,04
	22	16,73	6,21	-5,6	0,3436	0,3133	2,247	8,36	44,71
	24	21,53	8,18	-1,26	0,3736	0,3343	3,3879	8,28	35,88

A2.9 Tabelle zur Bestimmung der visuellen Sättigung und der Sättigung im CIECAM 02

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S _{mittel}	□	S _{CIECAM}
v	2	95	85	88	87	85	85	85	80	70	80	79	70	82	85	82,57	3,40	70,39
	4	94	85	88	88	85	86	85	80	80	83	83	70	96	90	85,21	3,01	65,40
	6	94	85	88	83	85	86	68	70	70	68	79	65	86	86	79,50	7,36	57,24
	8	95	85	88	90	85	86	79	80	96	70	80	70	82	80	83,29	4,58	56,98
	10	92	85	88	82	85	84	79	80	70	80	79	60	90	78	80,86	3,85	60,61
	12	93	85	88	85	85	82	79	80	60	78	80	65	83	80	80,21	4,10	57,39
	14	91	85	88	82	84	86	84	75	80	72	79	80	83	85	82,43	2,76	61,17
	16	91	85	88	82	85	84	85	80	70	80	80	70	90	87	82,64	2,71	64,53
	18	93	85	88	80	85	85	85	80	60	80	82	70	95	85	82,36	3,64	68,31
	20	90	85	88	83	85	82	76	70	80	75	74	70	95	85	81,29	4,19	58,01
	22	90	85	88	80	85	85	75	70	70	80	71	70	88	80	79,79	4,66	56,75
	24	92	85	88	78	85	85	84	75	80	70	74	70	92	89	81,93	3,92	63,55
b	2	68	40	68	72	63	61	65	60	50	70	63	53	65	56	61,00	9,75	54,84
	4	81	35	66	75	67	65	63	50	70	68	55	58	48	60	61,50	13,44	53,93
	6	81	60	72	65	77	77	60	60	60	55	65	50	72	59	65,21	7,99	52,61
	8	75	63	77	63	71	55	73	50	60	60	60	55	72	54	63,43	7,40	50,84
	10	79	40	52	68	69	62	69	60	60	60	62	50	75	50	61,14	11,97	52,91
	12	80	53	57	65	65	64	59	55	50	65	60	50	73	58	61,00	8,01	50,06
	14	65	50	88	58	59	56	59	55	50	63	54	55	82	55	60,64	11,33	52,49
	16	73	65	45	70	63	61	78	40	50	60	55	55	76	54	60,36	9,84	55,50
	18	73	46	50	65	62	60	57	50	50	70	51	55	78	58	58,93	8,42	56,81
	20	71	43	62	48	61	57	72	60	60	53	58	50	80	55	59,29	10,05	49,66
	22	71	50	52	52	58	62	69	50	50	70	50	50	80	52	58,29	7,86	48,40
	24	72	47	60	58	60	57	67	24	55	60	58	50	83	60	57,93	7,32	51,97
s	2	81	68	71	83	74	75	72	50	60	62	65	65	72	73	69,36	5,00	63,47
	4	74	58	71	68	58	79	68	50	80	80	80	65	78	83	70,86	7,23	61,40
	6	87	80	81	72	84	77	74	80	60	80	79	70	94	85	78,79	4,95	55,33
	8	88	70	82	78	80	81	63	60	68	80	79	75	92	70	76,14	7,71	55,25
	10	85	62	82	58	83	79	63	60	80	70	73	70	88	73	73,29	10,74	56,52
	12	85	75	70	78	80	80	73	70	70	80	80	70	72	65	74,86	4,65	55,21
	14	85	72	82	70	77	82	78	50	70	80	79	70	74	79	74,86	5,10	57,28
	16	78	85	82	72	75	82	68	70	60	70	80	60	93	86	75,79	5,65	62,57
	18	86	72	85	80	74	82	80	70	70	80	82	60	88	85	78,14	4,85	64,57
	20	84	76	82	70	72	82	82	45	70	80	74	60	88	80	74,64	5,17	55,74
	22	77	85	84	72	85	85	80	60	60	80	63	60	95	80	76,14	4,70	55,05
	24	85	70	70	68	75	81	77	60	70	70	66	60	86	77	72,50	5,84	58,72
dp	2	88	85	80	93	81	77	75	65	80	70	85	80	85	88	80,86	5,87	68,77
	4	87	79	76	88	72	79	73	80	80	78	72	80	93	77	79,57	5,84	64,64
	6	67	75	80	85	78	75	82	80	90	65	70	80	85	60	76,57	5,42	57,37
	8	81	76	82	62	77	70	68	60	90	35	78	80	84	70	72,36	6,78	57,36
	10	72	73	69	80	80	76	53	55	90	50	74	75	78	68	70,93	8,58	57,34
	12	73	85	75	85	73	76	84	80	85	70	80	80	82	80	79,14	5,26	58,05
	14	78	85	27	90	77	81	73	50	90	40	77	75	83	79	71,79	19,47	59,51
	16	85	79	80	83	80	58	73	60	80	78	73	80	94	87	77,86	8,44	65,80
	18	80	77	82	82	80	72	65	70	90	50	80	80	95	85	77,71	5,82	68,12
	20	77	85	72	85	80	54	85	80	90	70	82	65	95	85	78,93	10,38	59,36
	22	77	76	70	85	85	81	84	80	80	75	80	80	95	87	81,07	5,23	62,62
	24	79	77	77	88	84	85	73	70	90	80	82	80	95	88	82,00	4,95	64,30
lt+	2	54	25	55	57	51	50	59	45	40	30	47	46	43	40	45,86	10,67	43,52
	4	67	20	40	42	51	38	23	65	40	50	48	42	52	40	44,14	14,87	42,04
	6	60	30	45	38	61	47	54	50	40	43	53	35	56	40	46,57	10,58	42,78
	8	68	30	43	47	52	41	45	40	40	40	48	40	68	42	46,00	10,76	43,09

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S _{mittel}	□	S _{CIECAM}
	10	59	27	39	52	48	41	12	40	39	50	48	40	72	38	43,21	14,75	42,88
	12	66	27	40	52	47	46	27	40	40	50	44	35	63	40	44,07	12,84	41,58
	14	59	28	57	48	43	45	46	40	40	43	41	35	46	38	43,50	9,45	43,32
	16	59	30	40	52	43	43	47	30	40	50	45	45	63	40	44,79	8,51	46,34
	18	60	27	40	48	52	45	48	40	40	50	40	40	46	40	44,00	9,54	47,06
	20	58	30	48	30	49	36	67	50	50	48	41	30	63	38	45,57	13,14	39,90
	22	58	36	30	50	42	45	25	40	40	60	37	40	52	40	42,50	10,62	38,37
	24	66	27	50	50	40	41	50	45	45	50	50	40	60	40	46,71	11,14	41,15
lt	2	34	20	42	42	39	41	53	30	30	50	35	27	32	30	36,07	9,28	37,53
	4	40	15	29	45	37	27	18	40	30	40	38	34	35	30	32,71	10,37	35,90
	6	40	25	32	30	38	30	14	35	30	30	40	25	43	29	31,50	8,01	35,94
	8	41	24	37	33	37	32	34	30	30	30	35	30	52	31	34,00	4,96	38,54
	10	46	16	30	35	35	32	17	30	30	40	37	30	63	29	33,57	9,82	38,07
	12	53	23	30	40	35	37	23	30	33	40	33	30	52	30	34,93	9,74	38,01
	14	39	21	53	36	30	35	21	30	30	35	30	30	38	28	32,57	10,31	39,66
	16	39	23	25	40	33	35	43	20	30	40	32	35	55	31	34,36	7,03	41,51
	18	53	23	27	33	35	36	21	30	30	40	27	30	38	29	32,29	9,94	39,59
	20	51	23	37	27	32	25	32	35	20	30	30	20	48	29	31,36	8,78	34,85
	22	51	23	25	45	30	32	20	30	30	40	28	30	38	30	32,29	10,74	32,93
	24	46	21	37	48	24	31	55	30	40	30	35	30	48	29	36,00	11,87	35,99
sf	2	48	30	38	75	43	46	41	25	40	40	43	48	35	40	42,29	13,09	41,94
	4	54	30	38	44	29	48	27	30	50	60	48	53	63	40	43,86	9,68	41,40
	6	47	35	55	60	60	47	27	40	40	20	50	35	64	40	44,29	11,62	41,06
	8	61	37	42	30	48	36	39	30	50	50	33	32	49	31	40,57	9,34	40,22
	10	39	34	40	42	51	39	43	20	60	60	45	40	63	38	43,86	4,82	39,82
	12	47	35	38	48	55	46	53	60	50	50	52	40	52	40	47,57	6,76	39,84
	14	52	35	42	40	41	45	39	40	40	53	23	45	38	38	40,79	4,96	42,94
	16	46	44	42	48	39	35	23	30	50	10	32	40	52	41	38,00	7,87	44,02
	18	47	34	30	45	32	35	25	30	50	60	45	45	60	34	40,86	7,35	43,15
	20	45	37	48	32	41	46	22	50	60	38	50	40	48	38	42,50	8,55	39,90
	22	45	28	50	38	40	47	28	20	40	50	42	30	66	40	40,29	8,14	38,37
	24	39	40	47	40	50	47	30	30	50	40	52	30	72	40	43,36	6,27	41,15
d	2	61	45	35	88	41	49	46	40	50	50	42	58	42	56	50,21	16,39	46,24
	4	47	40	59	55	45	45	37	20	60	40	53	45	37	52	45,36	7,22	45,83
	6	54	45	64	70	70	65	44	50	40	30	60	45	86	63	56,14	10,34	44,52
	8	48	50	47	45	60	34	52	40	80	20	63	55	64	31	49,21	7,27	43,97
	10	53	54	50	72	67	67	48	30	70	20	60	65	72	50	55,57	8,94	45,04
	12	41	41	53	68	52	57	33	20	70	10	60	55	46	50	46,86	10,91	42,32
	14	46	65	32	65	59	45	53	30	50	30	65	50	45	38	48,07	11,17	46,52
	16	52	53	63	53	49	44	27	40	70	30	49	50	52	53	48,93	10,32	49,36
	18	40	53	37	58	40	36	35	30	80	30	52	50	52	59	46,57	8,38	48,85
	20	39	56	47	55	49	34	27	30	70	60	64	40	52	60	48,79	10,09	45,31
	22	39	63	62	52	50	60	33	40	70	30	60	50	55	68	52,29	10,79	44,36
	24	53	53	50	60	58	65	37	30	70	60	65	35	48	48	52,29	8,28	46,41
dk	2	75	80	70	97	75	49	80	70	50	80	72	78	56	84	72,57	13,28	56,22
	4	60	50	65	90	75	70	80	70	80	55	63	80	92	66	71,14	12,25	54,88
	6	74	65	65	98	70	39	87	65	60	65	70	75	92	80	71,79	17,28	49,23
	8	61	83	40	98	60	43	56	70	90	50	62	80	94	70	68,36	19,33	48,05
	10	66	79	63	88	50	39	57	65	85	35	60	80	94	60	65,79	15,45	47,95
	12	60	67	60	82	44	36	63	55	80	35	62	80	93	62	62,79	13,96	46,28
	14	72	78	60	92	40	32	67	40	90	50	68	65	95	67	65,43	19,50	51,10
	16	65	73	32	88	45	27	61	70	90	53	65	65	95	60	63,50	20,55	54,02
	18	66	65	40	82	59	35	71	50	90	60	48	65	62	70	61,64	15,54	55,35

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S _{mittel}	□	S _{CIECAM}
	20	64	69	42	90	49	35	48	60	40	30	73	60	68	70	57,00	17,47	49,36
	22	64	70	25	82	30	38	48	60	80	50	79	50	74	78	59,14	19,95	45,95
	24	66	70	70	85	33	55	61	30	85	80	81	60	58	77	65,07	14,92	49,59
	2	27	10	27	28	24	24	13	20	20	20	23	28	22	20	21,86	6,75	27,62
p+	4	34	10	18	26	27	20	13	20	20	30	27	23	18	20	21,86	7,79	28,99
	6	34	10	20	25	20	20	9	20	20	20	34	20	27	20	21,36	7,94	29,55
	8	34	11	17	20	23	19	10	20	20	20	24	20	27	20	20,36	7,47	29,02
	10	33	10	18	15	23	19	22	20	18	20	22	20	38	20	21,29	6,68	29,31
	12	33	9	23	30	22	21	18	20	30	30	23	20	26	12	22,64	7,28	31,15
	14	33	9	18	22	19	21	17	20	20	18	20	20	20	19	19,71	6,64	32,08
	16	33	8	15	25	20	21	13	10	20	20	23	20	18	21	19,07	7,65	30,28
	18	33	8	9	22	20	21	10	20	20	20	15	20	22	20	18,57	8,43	27,87
	20	32	8	12	20	20	10	8	20	20	20	20	10	18	20	17,00	8,17	24,12
	22	32	10	9	22	20	20	5	20	20	20	20	20	18	20	18,29	8,66	21,23
	24	26	9	13	22	20	19	10	20	20	20	23	20	18	20	18,57	5,95	22,72
	2	7	5	15	14	11	12	7	10	10	10	12	18	10	10	10,79	3,56	18,71
p	4	7	5	8	12	13	10	7	10	10	10	12	13	8	10	9,64	2,70	20,40
	6	7	5	9	15	12	11	3	10	10	10	18	10	18	10	10,57	3,87	22,52
	8	7	5	8	10	12	12	8	10	10	10	12	10	13	10	9,79	2,42	24,33
	10	7	5	8	10	10	11	5	10	8	10	12	10	20	10	9,71	2,27	24,72
	12	7	3	14	12	10	14	8	10	10	10	11	10	13	10	10,14	3,73	26,07
	14	7	3	8	10	12	14	7	10	10	8	8	10	12	10	9,21	3,37	26,69
	16	7	3	15	10	10	13	5	10	10	10	13	10	12	12	10,00	3,96	24,15
	18	7	3	5	12	9	12	4	10	10	10	8	10	10	10	8,57	3,42	20,87
	20	6	3	10	11	10	10	4	10	10	10	8	5	10	10	8,36	3,06	17,38
	22	6	3	5	12	10	10	10	10	10	10	12	10	10	10	9,14	3,07	13,93
	24	7	3	7	12	11	10	4	10	10	10	12	10	10	10	9,00	3,19	16,52
	2	14	15	20	37	12	14	22	10	20	10	18	30	24	10	18,29	8,01	20,50
ltg	4	20	25	17	30	18	20	33	30	10	10	12	24	20	20	20,64	5,75	22,35
	6	20	15	10	40	12	20	20	10	20	10	18	20	28	19	18,71	9,16	24,01
	8	27	18	15	18	14	22	15	10	20	10	12	30	22	15	17,71	4,30	25,06
	10	26	23	19	27	23	19	9	10	20	30	18	20	46	20	22,14	5,62	26,04
	12	20	16	20	32	16	14	12	10	20	20	21	20	25	15	18,64	6,11	26,45
	14	26	15	18	12	19	21	12	10	20	28	11	30	26	19	19,07	4,69	29,04
	16	26	17	25	12	12	21	10	20	20	30	12	25	32	21	20,21	6,07	27,84
	18	20	15	10	25	11	19	15	20	30	10	28	20	28	20	19,36	4,89	24,71
	20	26	16	10	10	20	10	12	10	30	10	20	15	33	16	17,00	5,74	20,64
	22	32	16	13	25	10	10	15	10	20	30	20	20	28	15	18,86	7,63	19,80
	24	20	15	17	27	15	10	10	20	25	22	20	20	28	20	19,21	5,50	19,58
	2	20	35	27	87	12	21	27	15	20	30	23	41	35	10	28,79	23,13	28,55
g	4	27	45	33	78	52	35	43	20	30	10	20	32	52	48	37,50	15,63	30,19
	6	27	50	25	70	32	27	37	40	60	30	27	55	55	43	41,29	15,19	27,78
	8	20	43	21	50	30	13	21	20	40	30	43	50	53	31	33,21	12,53	27,39
	10	20	47	20	65	30	31	27	10	50	10	30	60	42	35	34,07	15,10	28,32
	12	27	47	34	55	32	11	37	20	60	30	15	50	28	43	34,93	13,08	30,03
	14	13	43	18	43	20	14	27	20	40	10	23	40	43	29	27,36	11,89	32,36
	16	20	37	25	60	30	19	32	20	30	10	32	30	43	32	30,00	12,96	33,87
	18	27	40	8	52	25	19	29	80	40	10	28	25	42	20	31,79	13,15	31,53
	20	19	53	10	50	27	17	37	80	20	20	30	40	42	25	33,57	15,47	30,19
	22	26	43	13	50	21	20	37	10	60	20	43	40	48	50	34,36	12,56	29,29
	24	33	34	17	48	20	19	18	10	40	10	36	40	45	20	27,86	10,82	27,56
	2	41	58	47	92	35	12	33	50	30	30	18	70	48	30	42,43	23,08	32,40
dkg	4	14	68	27	90	35	18	48	50	80	10	18	65	63	56	45,86	25,76	30,58

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	S _{mittel}	□	S _{CIECAM}
	6	14	70	18	80	30	17	33	55	40	40	28	50	83	75	45,21	24,76	30,14
	8	14	57	25	80	28	13	27	50	70	20	23	60	88	52	43,36	22,82	26,67
	10	13	67	22	90	18	18	30	45	60	40	18	60	89	50	44,29	27,47	27,35
	12	13	60	20	83	10	10	42	30	50	25	12	50	65	52	37,29	26,54	27,95
	14	20	57	10	70	18	10	33	20	30	20	11	50	43	24	29,71	21,95	31,04
	16	13	57	13	65	20	10	37	20	40	20	12	50	42	21	30,00	20,97	32,30
	18	13	58	8	70	11	10	40	60	60	30	15	40	45	20	34,29	23,96	32,96
	20	13	63	7	65	12	9	42	20	30	20	20	50	45	28	30,29	24,03	32,43
	22	13	56	5	70	10	8	43	50	40	20	13	60	45	32	33,21	24,61	33,07
	24	13	60	12	70	20	9	23	10	60	30	23	50	45	20	31,79	23,00	31,36

Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der drei Systeme. Ähnliche Farben sind jeweils einander zugeordnet, wobei das wegen der jeweils gewählten Farben nur annähernd möglich ist.

A2.10 Tabelle Gegenüberstellung der Farbkreise von Adam, Richter und PCCS

Adam	□	Richter	h_{xy}	PCCS
1 Zitronengelb	572,8	1	54,401	9 Zitronengelb (11) 8 Gelb (12)
2 Mittelgelb	578	2	44,809	7 Rotgelb (13)
3 Goldgelb	583	3	34,573	6 Gelborange (14)
		4	27,319	
4 Gelborange	589,2	5	20,173	5 Orange (15)
5 Rotorange	597	6	12,936	4 Rotorange (16)
6 Zinnoberrot	606,9	7	5,724	3 Orangerot (17)
7 Mittelrot	626,5	8	358,025	2 Rot (18)
8 Karminrot	-495	9	349,344	1 Purpurrot (19)
9 Purpurrot	-502	10	323,501	24 röt. Purpur (20)
10 Purpurviolett	-539,5	11	283,173	23 Flieder (21)
11 Violett	-561,2	12	262,937	22 Lila (22)
12 Bläulichviolett	430	13	250,487	21 röt. Violett (23)
		14	243,437	
13 Violettblau	460,1	15	238,017	20 Violett (24)
14 Ultramarinblau	469,3	16	234,423	19 Violettblau (1)
15 Marineblau	475	17	226,310	18 Blau (2)
16 Bremerblau	479,1			17 Blau (3)
17 Cyanblau	482,3	18	216,593	16 Cyan (4)
18 Türkisblau	486,4	19	198,813	15 Türkis (5)
19 Seegrün	492,5	20	170,323	14 Blaugrün (6)
20 Smaragdgrün	503,4	21	137,436	13 Smaragdgrün (7)
21 Bläulichgrün	525	22	107,841	12 Grün (8)
22 Mittelgrün	549	23	88,199	11 Gelbgrün (9)
23 Blattgrün	559,5			
24 Gelbgrün	567	24	69,443	10 Gelbgrün (10)
		1 Orange mehr		1 Gelb mehr
		1 Violett mehr		1 Grün weniger
		1 Blau weniger		
		1 Grün weniger		

Für das PCCS System kann in dieser Tabelle keine Wellenlänge oder Bunttonwinkel angegeben werden, weil der Winkel abhängig von der Weißzumischung ist

A2.11 Tabelle zur Bestimmung von Adamschen Dreiecken

			Gelb 1							
R	x	y	H _N	Y	a'	b'	L*	a*	b*	C
1	0,3330	0,3490	9,94	82,68	0,21	-0,08	92,87	-4,18	15,66	16,21
2	0,3545	0,3795	9,88	80,32	0,21	-0,07	91,83	-7,38	29,78	30,68
3	0,3740	0,4075	9,82	78,02	0,21	-0,07	90,79	-9,97	42,71	43,86
4	0,3930	0,4345	9,76	75,79	0,21	-0,06	89,76	-12,04	55,65	56,94
5	0,4085	0,4565	9,70	73,62	0,21	-0,05	88,74	-13,49	66,85	68,20
6	0,4240	0,4785	9,64	71,52	0,21	-0,05	87,73	-14,78	79,37	80,73
7	0,4290	0,4865	9,58	69,47	0,21	-0,05	86,74	-15,33	83,71	85,11
8	0,4345	0,4940	9,52	67,48	0,21	-0,04	85,75	-15,54	88,37	89,72
9	0,4385	0,4995	9,46	65,55	0,21	-0,04	84,77	-15,66	91,82	93,15
10	0,4425	0,5045	9,40	63,80	0,21	-0,04	83,86	-15,64	95,39	96,66
1	0,3330	0,3490	0,94	1,07	0,21	-0,08	9,52	-0,98	3,67	3,80
2	0,3545	0,3795	1,88	1,68	0,21	-0,07	13,70	-2,03	8,20	8,45
3	0,3740	0,4075	2,80	2,62	0,21	-0,07	18,44	-3,22	13,78	14,15
4	0,3930	0,4345	3,70	4,05	0,21	-0,06	23,82	-4,53	20,95	21,44
5	0,4085	0,4565	4,70	6,56	0,21	-0,05	30,79	-6,02	29,86	30,46
6	0,4240	0,4785	5,64	10,34	0,21	-0,05	38,44	-7,75	41,65	42,37
7	0,4290	0,4865	6,58	16,29	0,21	-0,05	47,35	-9,45	51,62	52,48
8	0,4345	0,4940	7,52	25,66	0,21	-0,04	57,71	-11,26	64,02	65,00
9	0,4385	0,4995	8,40	39,26	0,21	-0,04	68,94	-13,20	77,40	78,52
10	0,4425	0,5045	9,40	63,68	0,21	-0,04	83,80	-15,63	95,33	96,60
			Violettblau 13							
1	0,289	0,28	9,16	56,70	0,22	-0,09	80,01	7,45	-15,35	17,06
2	0,267	0,242	8,32	37,77	0,22	-0,10	67,85	14,55	-28,48	31,98
3	0,247	0,207	7,48	25,17	0,23	-0,11	57,24	21,39	-38,69	44,21
4	0,23	0,18	6,64	16,76	0,24	-0,12	47,96	25,48	-44,61	51,38
5	0,214	0,152	5,80	11,17	0,24	-0,13	39,86	30,89	-50,28	59,01
6	0,2015	0,131	4,95	7,40	0,25	-0,14	32,71	34,34	-52,87	63,05
7	0,195	0,118	4,11	4,93	0,26	-0,15	26,54	34,87	-51,42	62,13
8	0,189	0,11	3,27	3,29	0,26	-0,15	21,16	32,95	-48,24	58,42
9	0,1825	0,095	2,43	2,19	0,27	-0,16	16,45	35,17	-48,09	59,58
10	0,177	0,089	1,59	1,46	0,27	-0,16	12,34	32,49	-44,49	55,09
1	0,289	0,28	0,16	0,73	0,22	-0,09	6,51	1,75	-3,60	4,00
2	0,267	0,242	0,32	0,79	0,22	-0,10	7,10	4,01	-7,84	8,81
3	0,247	0,207	0,48	0,85	0,23	-0,11	7,70	6,92	-12,52	14,31
4	0,23	0,18	0,64	0,92	0,24	-0,12	8,32	9,69	-16,96	19,53
5	0,214	0,152	0,80	1,00	0,24	-0,13	8,95	13,80	-22,46	26,36
6	0,2015	0,131	0,95	1,07	0,25	-0,14	9,56	18,02	-27,75	33,09
7	0,195	0,118	1,11	1,16	0,26	-0,15	10,23	21,50	-31,71	38,31
8	0,189	0,11	1,27	1,25	0,26	-0,15	10,92	23,87	-34,95	42,32
9	0,1825	0,095	1,43	1,35	0,27	-0,16	11,62	29,93	-40,93	50,71
10	0,177	0,089	1,59	1,46	0,27	-0,16	12,34	32,49	-44,49	55,09
			Rot 6							
1	0,357	0,32	9,55	68,47	0,22	-0,08	86,24	19,44	9,10	21,46
2	0,399	0,324	9,10	55,08	0,23	-0,08	79,09	32,40	16,84	36,52
3	0,444	0,328	8,66	44,52	0,24	-0,07	72,58	43,38	24,82	49,98

R	x	y	H _N	Y	a'	b'	L	a*	b*	C
4	0,483	0,332	8,21	35,82	0,25	-0,07	66,38	50,16	31,38	59,17
5	0,52	0,335	7,76	28,81	0,25	-0,06	60,62	54,88	37,48	66,46
6	0,551	0,337	7,31	23,18	0,26	-0,06	55,26	57,11	42,41	71,14
7	0,5595	0,338	6,86	18,65	0,26	-0,05	50,27	54,52	41,69	68,63
R	x	y	H _N	Y	a'	b'	L*	a*	b*	C
8	0,572	0,339	6,42	15,07	0,26	-0,05	45,73	52,81	42,01	67,48
9	0,58	0,34	5,97	12,13	0,26	-0,05	41,41	50,20	41,22	64,96
10	0,588	0,34	5,52	9,75	0,26	-0,05	37,40	47,95	40,19	62,57
1	0,357	0,32	0,55	0,88	0,22	-0,08	7,97	4,56	2,13	5,03
2	0,399	0,324	1,10	1,15	0,23	-0,08	10,19	8,92	4,64	10,06
3	0,444	0,328	1,66	1,51	0,24	-0,07	12,66	14,04	8,03	16,17
4	0,483	0,332	2,21	1,97	0,25	-0,07	15,32	19,07	11,93	22,50
5	0,52	0,335	2,76	2,57	0,25	-0,06	18,22	24,51	16,74	29,68
6	0,551	0,337	3,31	3,35	0,26	-0,06	21,40	29,97	22,26	37,33
7	0,5595	0,338	3,86	4,37	0,26	-0,05	24,86	33,61	25,71	42,32
8	0,572	0,339	4,42	5,73	0,26	-0,05	28,72	38,26	30,43	48,89
9	0,58	0,34	4,97	7,48	0,26	-0,05	32,87	42,73	35,09	55,29
10	0,177	0,089	5,52	9,75	0,27	-0,16	37,40	61,21	-83,82	103,79

A3 Eigenschaften des LCh- und des LSh-Farbraumes für Optimalfarben

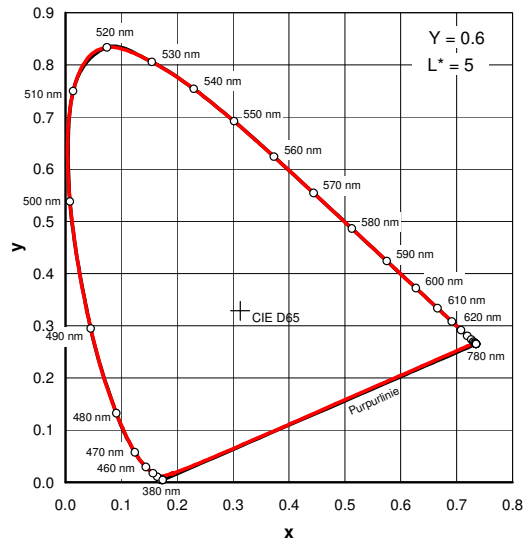


Abb. 3.1 Optimalfarben für $L^* = 5$ im xy -Diagramm

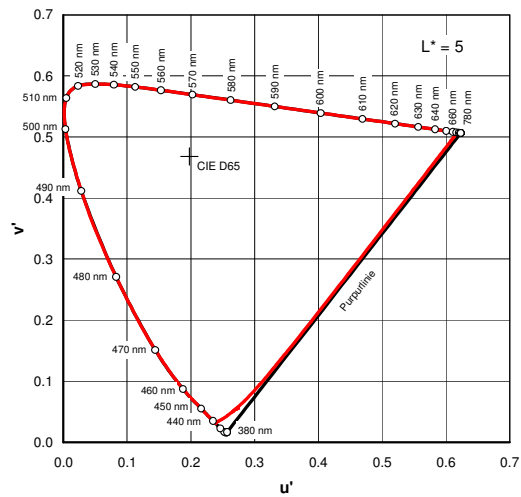


Abb. 3.2 Optimalfarben für $L^* = 5$ im $u'v'$ -Diagramm

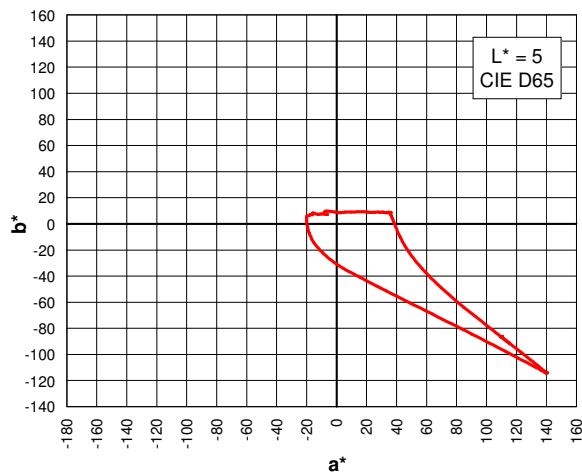


Abb. 3.3 Optimalfarben für $L^* = 5$, a^*b^* -Diagramm

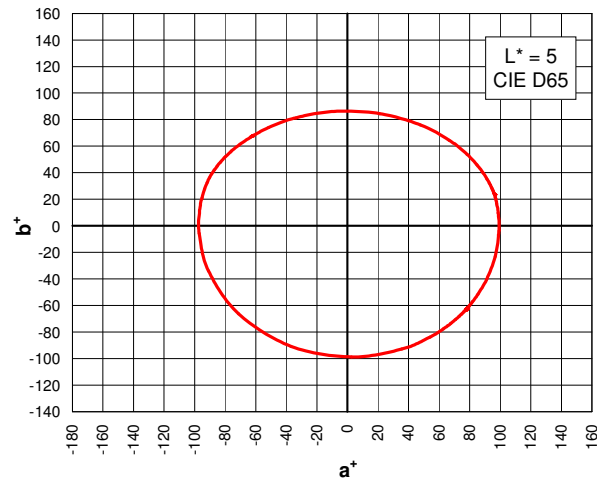


Abb. 3.4 Optimalfarben für $L^* = 5$, links a^+b^+ -Diagramm

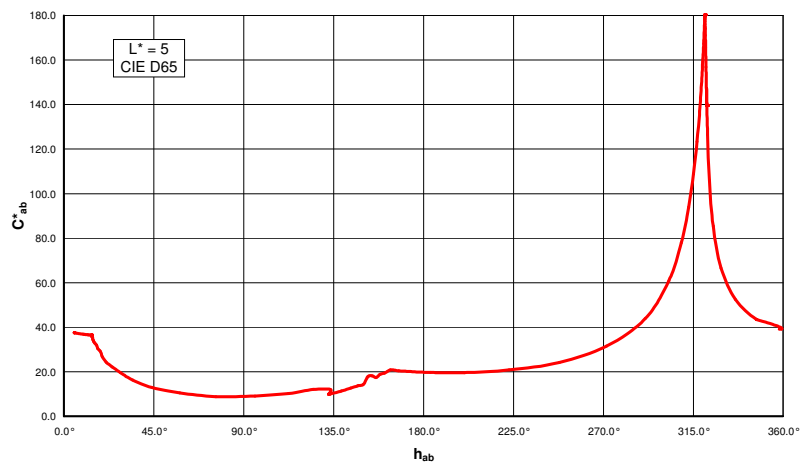


Abb. 3.5 Buntheit in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 5$

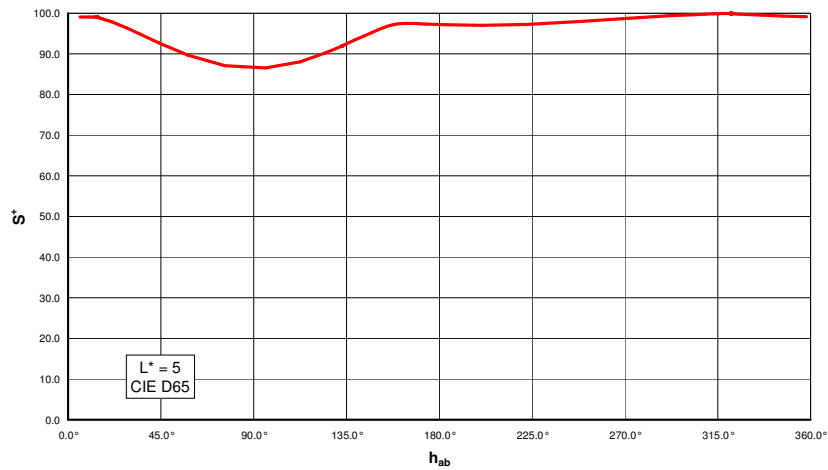


Abb. 3.6 Sättigung in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 5$

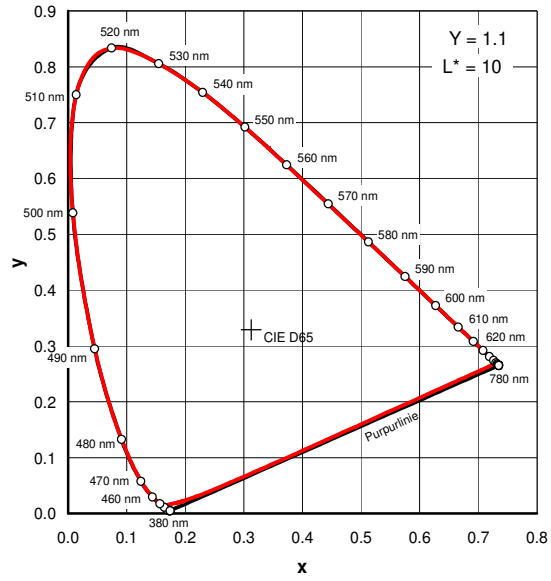


Abb. 3.7 Optimalfarben für $L^* = 10$ im xy -Diagramm

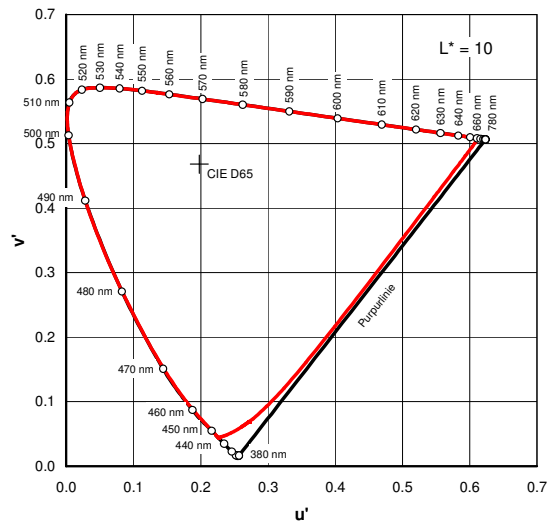


Abb. 3.8 Optimalfarben für $L^* = 10$ im $u'v'$ -Diagramm

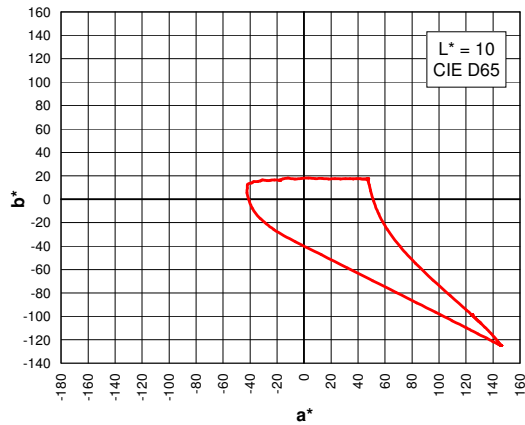


Abb. 3.9 Optimalfarben für $L^* = 10$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

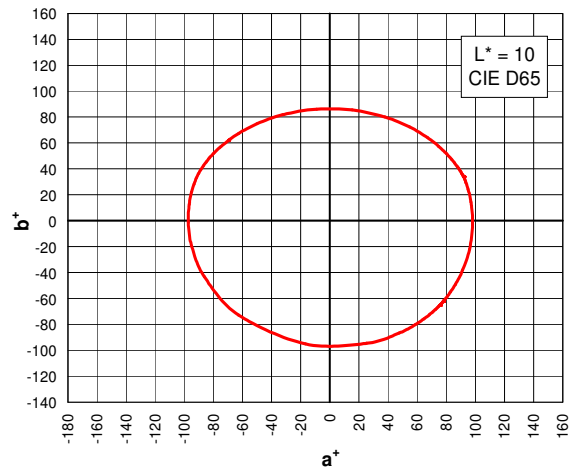


Abb. 3.10 Optimalfarben für $L^* = 10$ im $L^*a^+b^+$ -Diagramm

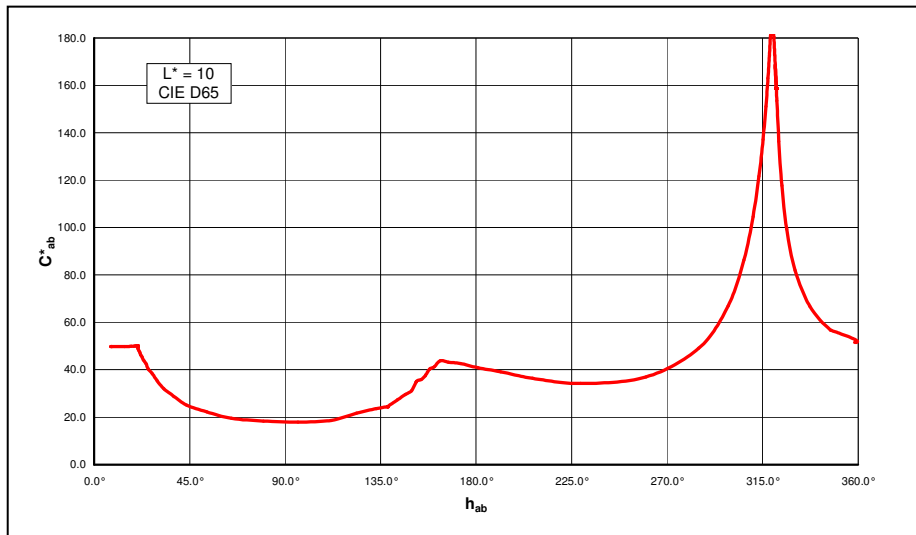


Abb.3.11 Buntheit in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 10$

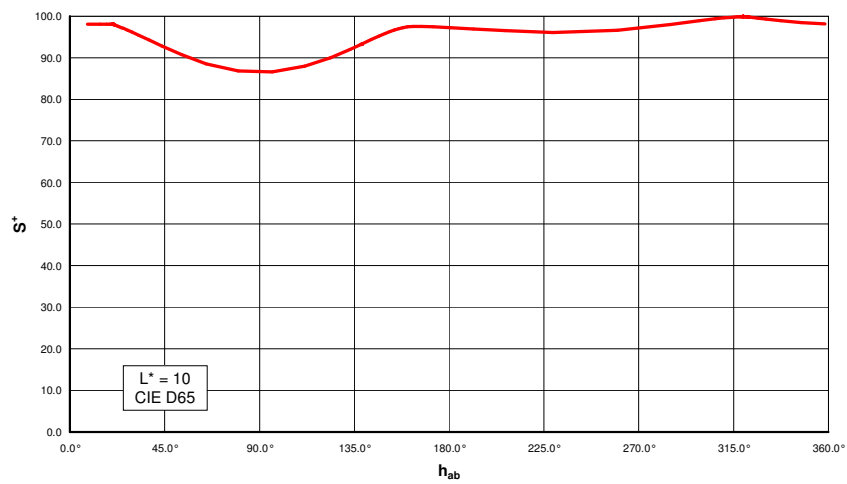


Abb.3.12 Sättigung in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 10$

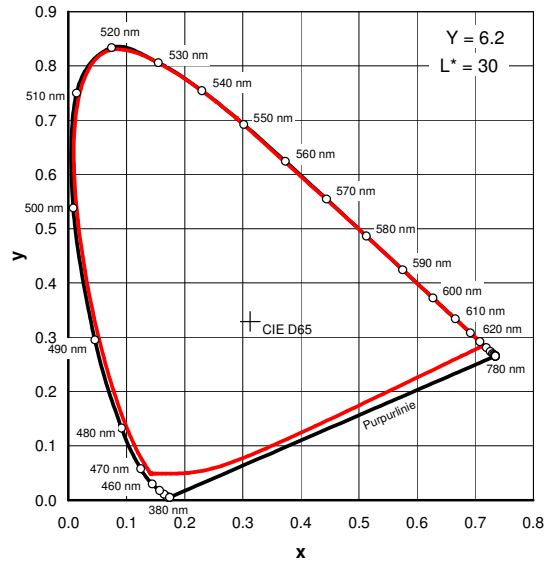


Abb. 3.13 Optimalfarben für $L^* = 30$ im xy -Diagramm

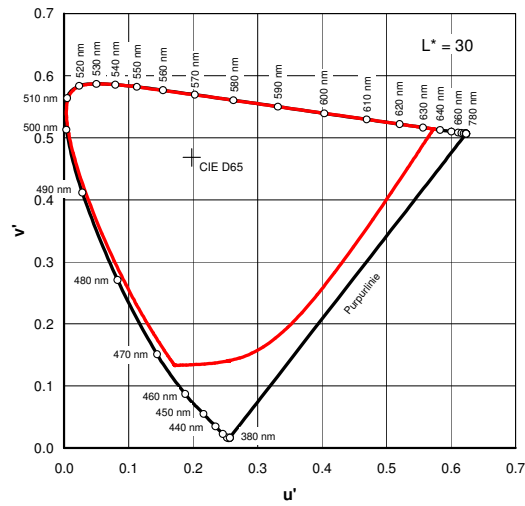


Abb. 3.14 Optimalfarben für $L^* = 30$ im $u'v'$ -Diagramm

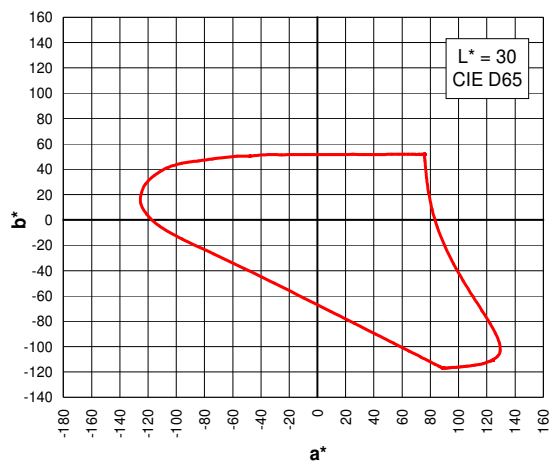


Abb. 3.15 Optimalfarben für $L^* = 30$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

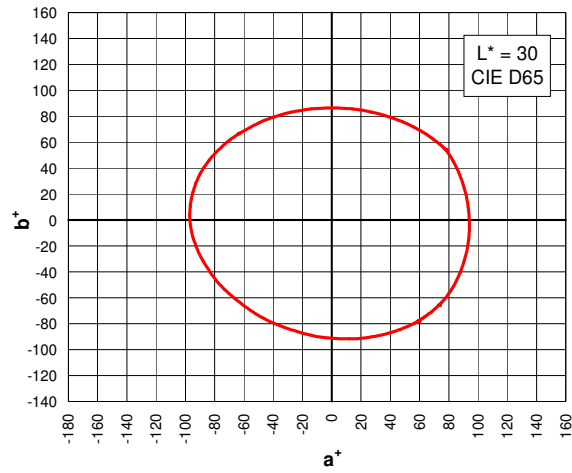


Abb.3.16 Optimalfarben für $L^* = 30$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

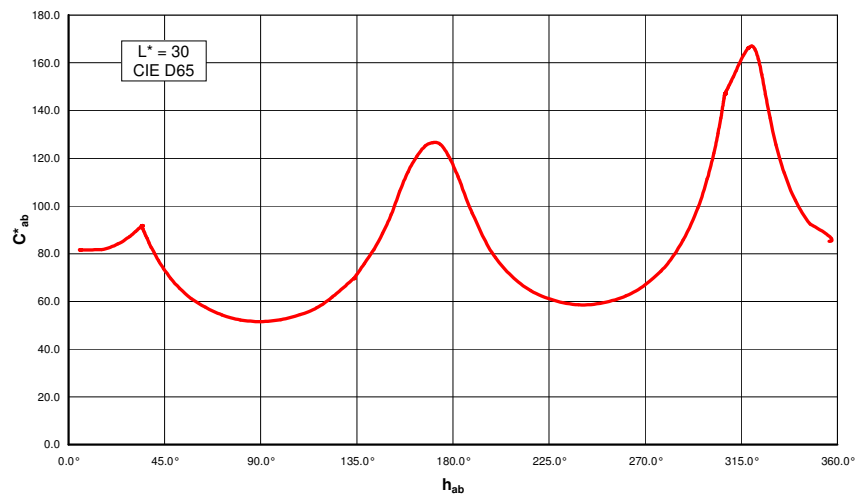


Abb. 3.17 Buntheit in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 30$

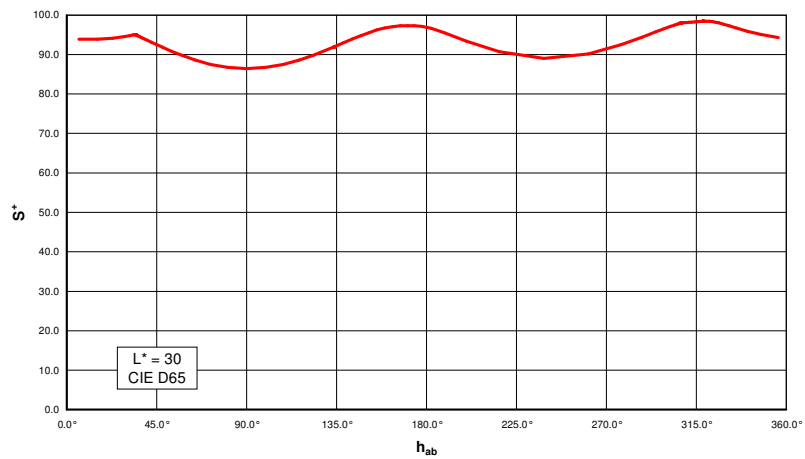


Abb. 3.18 Sättigung in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 30$

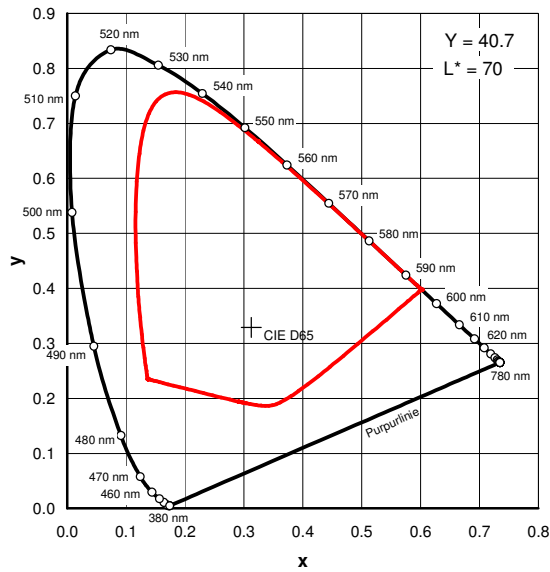


Abb. 3.19 Optimalfarben für $L^* = 70$ im xy -Diagramm

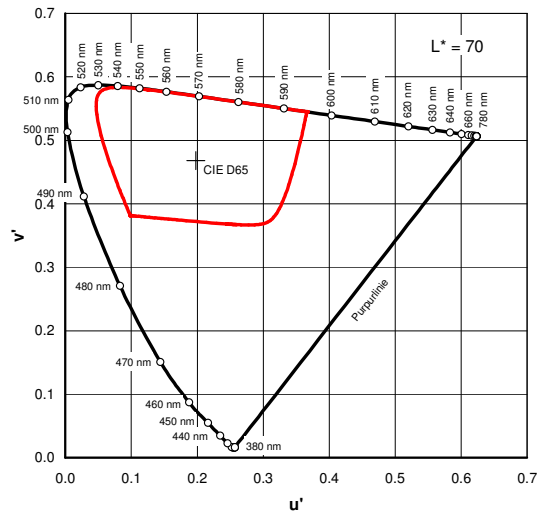


Abb.3.20 Optimalfarben für $L^* = 70$ im $u'v'$ -Diagramm

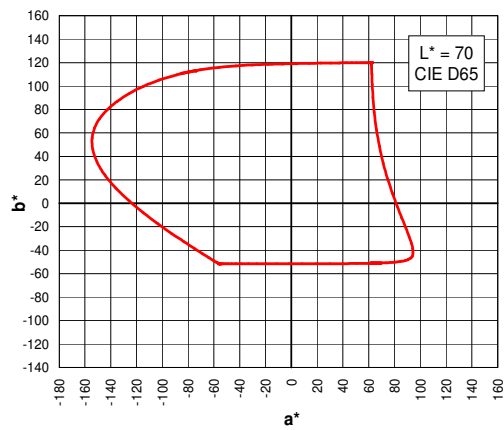


Abb.3.21 Optimalfarben für $L^* = 70$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

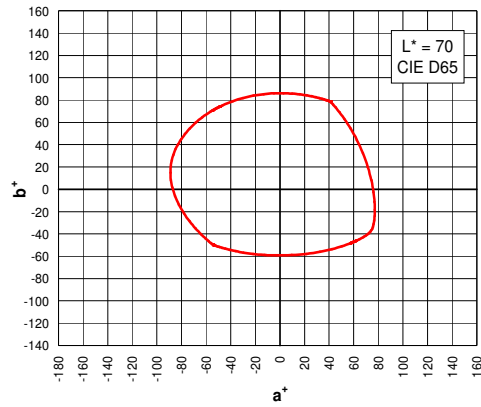


Abb. 3.22 Optimalfarben für $L^* = 70$ im $L^*a^+b^+$ -Diagramm

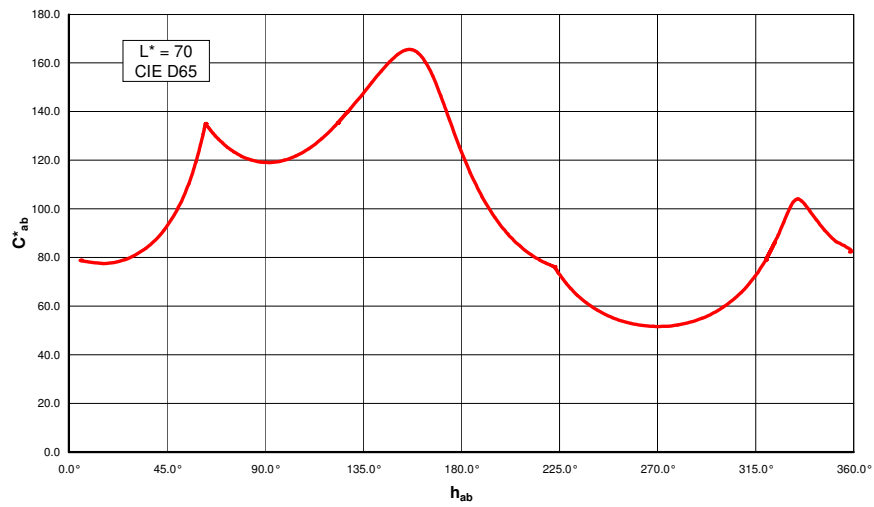


Abb.3.23 Buntheit in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 70$

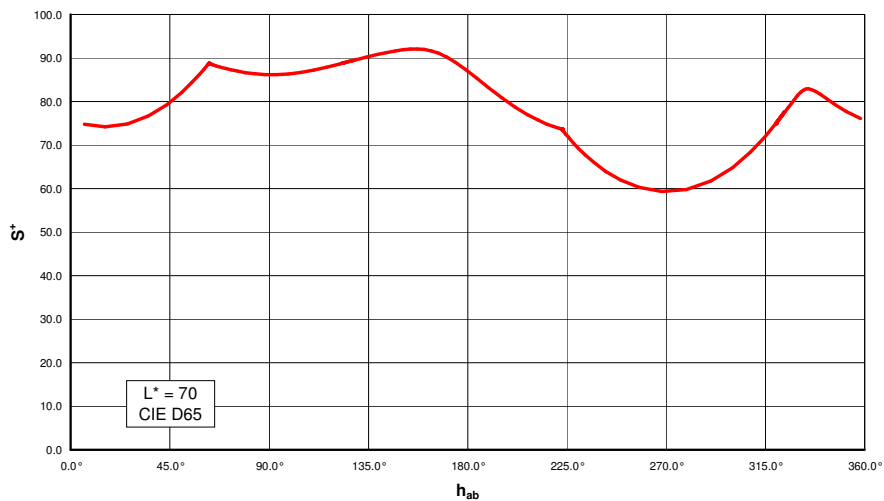


Abb.3.24 Sättigung in Abhängigkeit vom Buntton für Optimalfarben mit $L^* = 70$

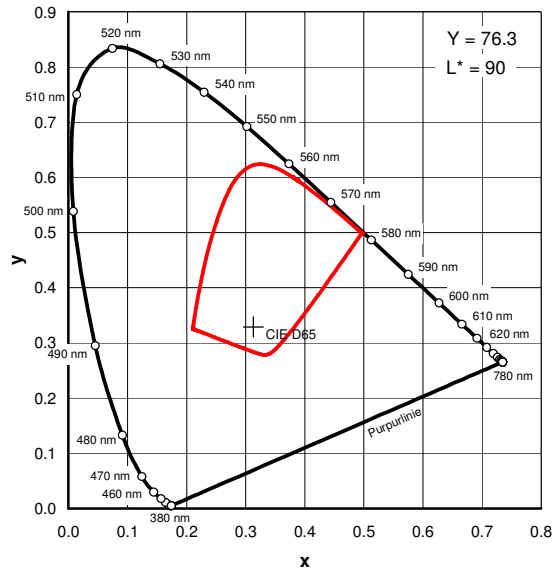


Abb. 3.25 Optimalfarben für $L^* = 90$ im xy -Diagramm

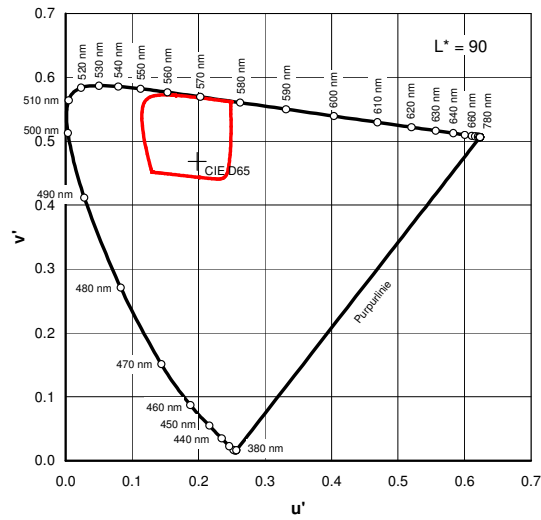


Abb.3.26 Optimalfarben für $L^* = 90$ im $u'v'$ -Diagramm

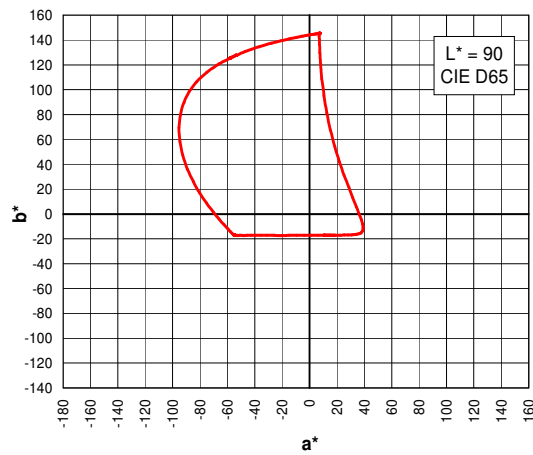


Abb.3.27 Optimalfarben für $L^* = 90$ im $L^*a^*b^*$ -Diagramm

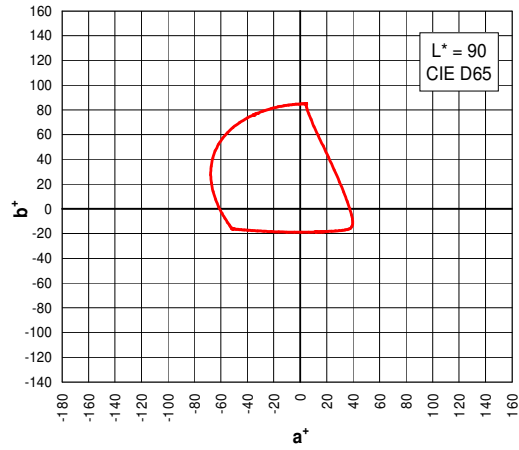


Abb.3.28 Optimalfarben für $L^* = 90$ im $L^*a^+b^+$ -Diagramm

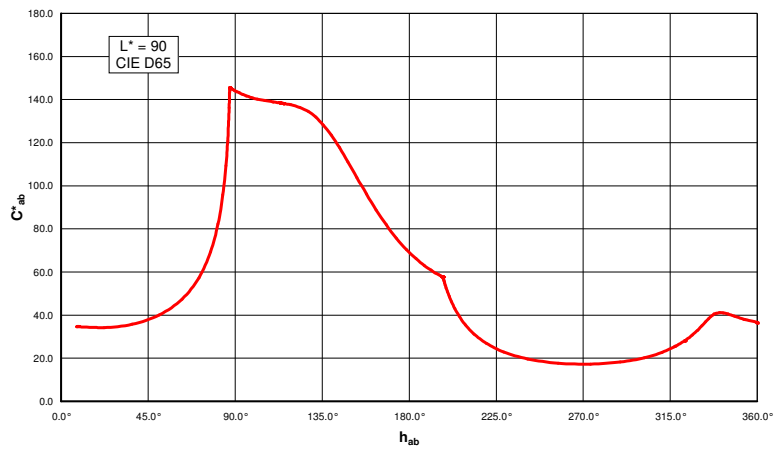


Abb. 3.29 Buntheit in Abhängigkeit vom Bunnton für Optimalfarben mit $L^* = 90$

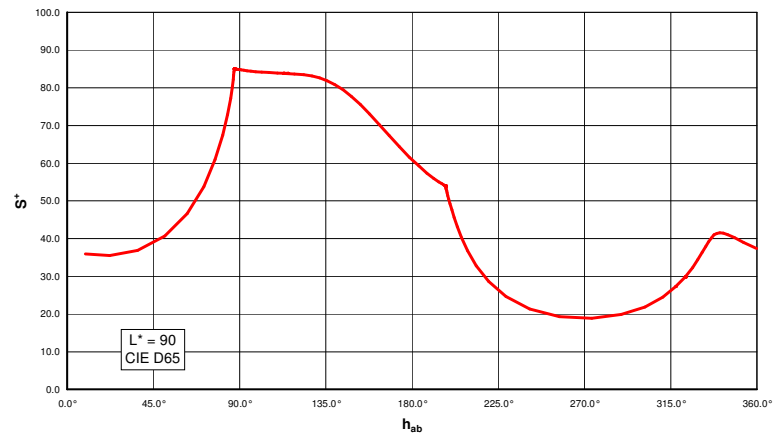


Abb.3.30 Sättigung in Abhängigkeit vom Bunnton für Optimalfarben mit $L^* = 90$

Die Abbildungen des Anhangs A3 wurden von Schierz [89] erstellt.

