

Farbabstände, Metamerie und
Toleranzberechnungen

Farbabstände und Akzeptanz von Farben

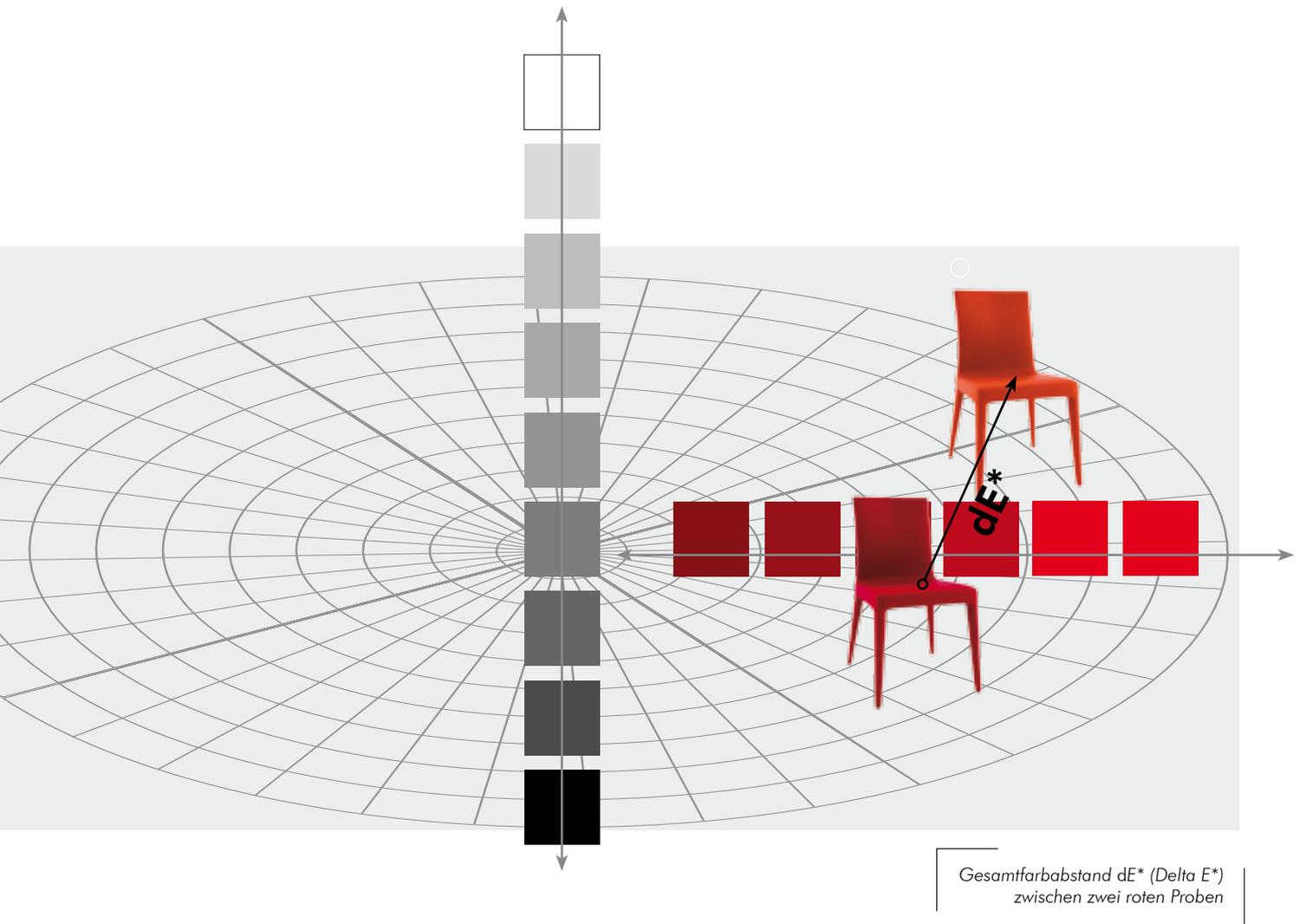
Einleitung

Ob in der Textil- und Möbelindustrie, im Automotive Design oder bei der Herstellung von Katalogen und Werbemitteln – zahlreiche Industrien, die Färbeverfahren anwenden, müssen Produkte von gleicher Farbe und gleichem Aussehen liefern, mit möglichst geringen Farbabweichungen von Original oder vom Standard.

In der Praxis ist es meist nicht möglich, eine Farbe eines Produktes 100% genau nachzustellen, denn schon dieselbe Probe (z. B. ein T-Shirt) wird an verschiedenen Stellen minimale Farbunterschiede aufweisen, auch wenn wir diese mit dem menschlichen Auge nicht als Unterschied wahrnehmen. Mit Hilfe der Farbmeterik können solche Farbunterschiede gemessen und erfasst werden. Die Messung

der Farbe und die Beurteilung der Farbunterschiede sind für die Hersteller eine große Hilfe zur Einhaltung der zwischen Kunde und Lieferanten vereinbarten Spezifikationen.

Um die Farbdifferenz von zwei Proben zu ermitteln, trägt man die Farbkoordinaten des Standards und der Nachstellung in einen Farbraum ein, wobei der Abstand der beiden eingetragenen Farbpunkte voneinander die Farbdifferenz (Farbunterschied) der beiden Proben darstellt. Die Entfernung zwischen zwei Punkten wird mit einer Relation berechnet, die auf ihrer räumlichen Projektion auf jede der drei Hauptvariablen des Farbsystems beruht. Hier kommen meist auch das CIELab-Farbsystem und die darin ermittelten Farbdifferenzen zur Anwendung.



Farbunterschiede im CIE Lab-Farbenraum

Der **Farbabstand** zwischen zwei Farben wird als Wert ΔE^* (alternative Schreibweise: Delta E^* , dE^*) angegeben. Er lässt sich durch eine Formel berechnen, die 1976 entwickelt wurde. Dabei bietet der CIE Lab-Farbenraum die Möglichkeit, die Farbabweichungen durch 2 Verfahren darzustellen:

- **In rechtwinklig aufgetragenen Koordinaten L^* , a^* und b^* lautet die Formel:**

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + da^{*2} + db^{*2}}$$

Dabei repräsentiert

- dL^* die Abweichung der Helligkeit auf der L^* -Achse
- da^* die rot-grün-Abweichung auf der a^* -Achse
- db^* die gelb-blau-Abweichung auf der b^* -Achse

- **In zylindrisch aufgetragenen Koordinaten L^* , C^* und h lautet die Formel:**

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + dC^{*2} + dH^{*2}}$$

Dabei repräsentiert

- dL^* die Abweichung der Helligkeit auf der L^* -Achse
- dC^* die Abweichung der Buntheit oder Sättigung auf dem Radius C^*
- dH^* die Längenabweichung zwischen den Vektorrichtungen der Bunntonwinkelabweichung dh



Standard (S_0) Probe (E_1)

$L^*_0 = 52,15$	$dL^* = +3,40$	$L^*_1 = 55,55$
$a^*_0 = +51,72$	$da^* = +2,60$	$a^*_1 = +54,32$
$b^*_0 = +19,29$	$db^* = +1,80$	$b^*_1 = +21,09$

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + da^{*2} + db^{*2}}$$

$$dE^* = \sqrt{3,40^2 + 2,60^2 + 1,80^2} = 4,64$$

Bei D65 / 10°

CIE Lab-Farbenraum.
Farbabstände in $L^* a^* b^*$



Standard (S_0) Probe (E_1)

$L^*_0 = 52,15$	$dL^* = +3,40$	$L^*_1 = 55,55$
$C^*_0 = 55,20$	$dC^* = +3,06$	$C^*_1 = 58,26$
$h_0 = 20,45^\circ$	$\left\{ \begin{array}{l} dh = 0,77^\circ \\ dH^* = 0,78 \end{array} \right.$	$h_1 = 21,22^\circ$

$$dE^* = \sqrt{dL^{*2} + dC^{*2} + dH^{*2}}$$

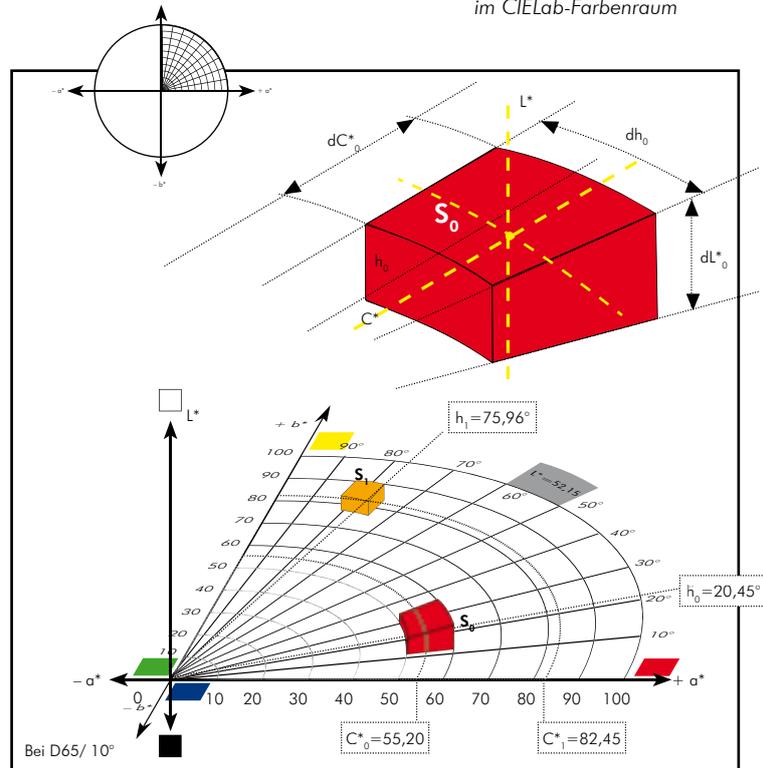
$$dE^* = \sqrt{3,40^2 + 3,06^2 + 0,78^2} = 4,64$$

Bei D65 / 10°

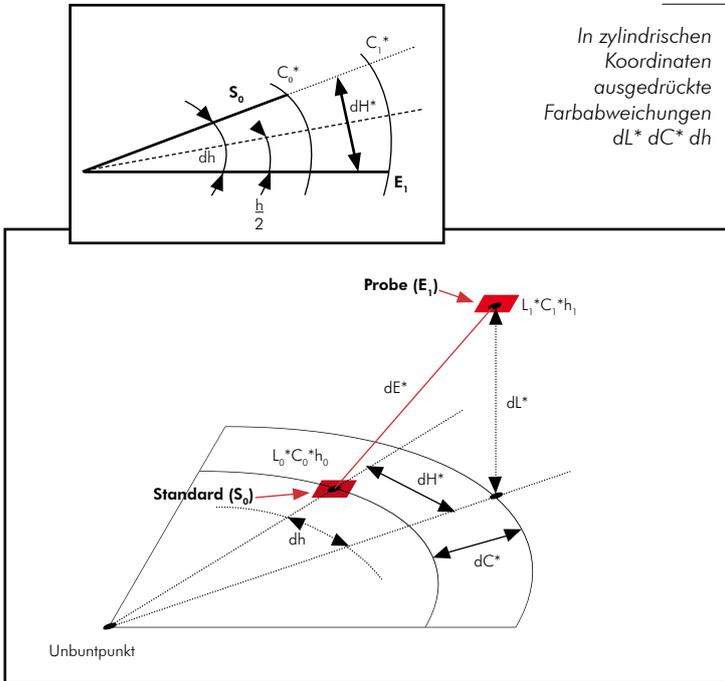
CIE Lab-Farbenraum.
Farbabstände in $L^* C^* h$

Da die Gleichung für die Abstandsberechnung (für die Größe dh) nur in Längeneinheiten ausgedrückt werden darf, wird der Abstand des Bunntonwinkels dh (eigentlich ausgedrückt in °) in eine Längeneinheit umgeformt. Dieser Bunntonabstand wird durch dH^* beschrieben, in Verbindung zum Radius des Farbkreises C^* , der die Sättigung darstellt.

in zylindrischen Koordinaten
ausgedrückte Toleranzen $dL^* dC^* h$
im CIE Lab-Farbenraum



In zylindrischen
Koordinaten
ausgedrückte
Farbabweichungen
 $dL^* dC^* dh$



Die Formel sieht dann wie folgt aus:

$$dE^* = \sqrt{(dL^*)^2 + (dC^*)^2 + (dh^*)^2}$$

L* Helligkeitsachse

dL^* = Helligkeitsabweichung: Wert und Interpretation sind identisch mit der Beschreibung im $L^*a^*b^*$ -System

C* Chroma (Buntheit)

dC^* = Buntheitsabweichung: Sie stellt die Differenz der Abstände dar, ausgehend von jedem Farbpunkt bis zur Achse der Helligkeit.

$dC^* = C_1^* - C_0^*$
wobei C_0^* = Sättigung des Standards Norm
und C_1^* = Sättigung der Probe

- wenn dC^* positiv ist, hat die Probe eine höhere Sättigung als die Norm
- wenn dC^* negativ ist, hat die Probe eine niedrigere Sättigung als die Norm

h Farbton(winkel)

dh = Bunntonwinkelabweichung: Sie stellt die Winkelabweichung (in Grad) zwischen den Vektorrichtungen dar, die den beiden Farben (Standard und Probe) zugeordnet sind. Die Winkelabweichung dh wird mit Hilfe folgender Umformung in den Längenabstand dh^* umgewandelt:

$$dh^* = 2 \sqrt{C_0^* C_1^*} \cdot \sin\left(\frac{dh}{2}\right)$$

Eine derartige Zerlegung der Gesamtfarbabweichung dE^* in dL^* , dC^* und dh^* setzt die Beschreibung der Farbabweichungen mit der visuellen Beurteilung in der natürlichen Einstufung der Farben gleich. Da sie einfacher und praktischer ist, ist sie die am meisten angewandte Methode.

Farbspezialisten nutzen die Ausdrucksform der Farbabweichungen dL^* , da^* und db^* sehr häufig, wenn $C^* \leq 5$ und die Farbabstandsbewertung nach $L^*C^*H^* > 5$ ist. Wenn $C^* \leq 5$, dann muss die Bewertung in den Koordinaten $L^*a^*b^*$ erfolgen. Ist der Betrag $C^* > 5$, dann ist die Bewertung in den Koordinaten $L^*C^*H^*$ vorzunehmen.

CMC-Konformitätssystem

Die Farbabstandsformeln im CIELab-Farbenraum $L^*a^*b^*$ und L^*C^*h haben den Vorteil, dass sie relativ einfach und praktisch in der Anwendung sind.

Nachteilig ist, dass das CIELab-Farbsystem nicht visuell gleichabständig ist. Die berechneten Farbabstände entsprechen nicht für alle Farben den wahrgenommenen bzw. empfundenen Farbabständen. In der Praxis heißt dies: Bei den unbunten Farben kann das menschliche Auge kleinste Differenzen im Farbton erkennen. Entsprechend müsste man hier einen möglichst kleinen dE^*_{ab} Zahlenwert festlegen. Je brillanter die zu beurteilenden Farbtöne sind, d. h. je größer C, umso weiter außen liegen die Farben im CIELab-System und umso unempfindlicher reagiert das menschliche Auge auf Farbabstände. Hier wird u. U. ein zahlenmäßig großer dE^*_{ab} Unterschied vom Auge nicht erkannt. Auch bewertet das Auge Unterschiede im Farbton stärker als Unterschiede in der Helligkeit oder Sättigung (Brillanz).

Um zu vermeiden, dass man im CIELab-System Farbtoleranzen pro Farbe festlegen muss und um eine bessere Anpassung an das menschliche Auge zu erreichen, wurde die dE^*_{ab} Farbabstandsformel weiter verbessert. So entstand u. a. die CMC-Formel, welche heute in der Textilindustrie weit verbreitet ist.

Die CMC-Formel stammt aus Grossbritannien, wo man seit 1970 ununterbrochen Forschungen durchführt. Sie wurde anhand von mehreren Tausend visuellen Beurteilungen getestet und schließlich vom englischen Normeninstitut, der British Standard Institution, genormt. Der ursprüngliche Name JPC70 wurde später in CMC (für Color Measurement Committee of the Society of Dyers and Colourists) geändert. Publiziert wurde die CMC-Formel 1984.

Die "Bestandteile" von dE^* , nämlich dL^* , dC^* und dH^* , werden durch Korrekturfaktoren S_L , S_C und S_H gewichtet, welche selbst wiederum von der Helligkeit, der Buntheit und dem Buntton abhängig sind. Im Grunde genommen sind S_L , S_C und S_H Hyperbelfunktionen, welche dafür sorgen, dass dL^* und dC^* umso stärker zählen, je dunkler und unbunter (grauer) die Farben sind. dH^* wird ebenfalls mit steigendem Chroma abgewertet. Zusätzlich erfolgt eine Korrektur in Abhängigkeit von der Lage im Farbkreis.

Die Farbabstandsformel nach CMC sieht wie folgt aus:

$$dE_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{S_H}\right)^2}$$

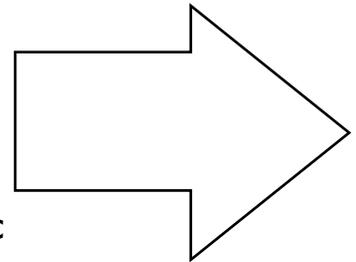
L Helligkeitsfaktor

c Sättigungsfaktor

S_L Funktion von L

S_C Funktion von C

S_H Funktion von H und C



■ Für S_L gilt:
Wenn $L^* < 16 \rightarrow S_L = 0,511$

$$\text{Wenn } L^* \geq 16 \rightarrow S_L = \frac{0,040975L^*}{1 + 0,01765L^*}$$

Mit dieser Korrektur werden dL^* -Werte bei sehr dunklen Farben beinahe 200% stärker bewertet!

■ Für S_C gilt:

$$S_C = \frac{0,0638C^*}{1 + 0,0131C^*} + 0,638$$

Mit der Größe S_C werden in der Nähe der Unbuntachse dC^* -Werte ca. 60% stärker gewichtet. Bei brillanten Farben (hohes Chroma) wertet CMC bestehende dC^* -Werte ab.

■ Für S_H gilt:

$$\rightarrow S_H = (FT + 1 - F) S_C$$

$$\text{Wobei } F = \sqrt{\frac{C^{*4}}{C^{*4} + 1900}}$$

$$\text{Und } T = 0,36 + |0,4 \cos(35 + h)|$$

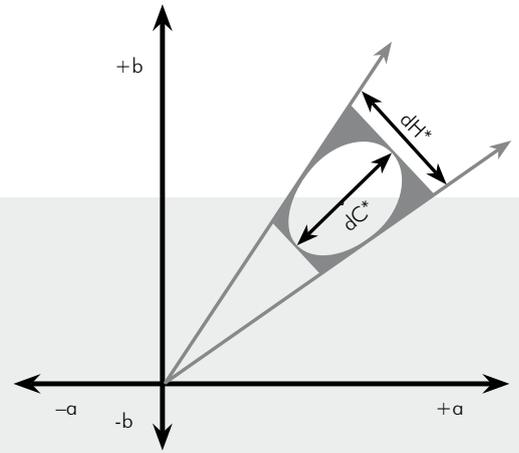
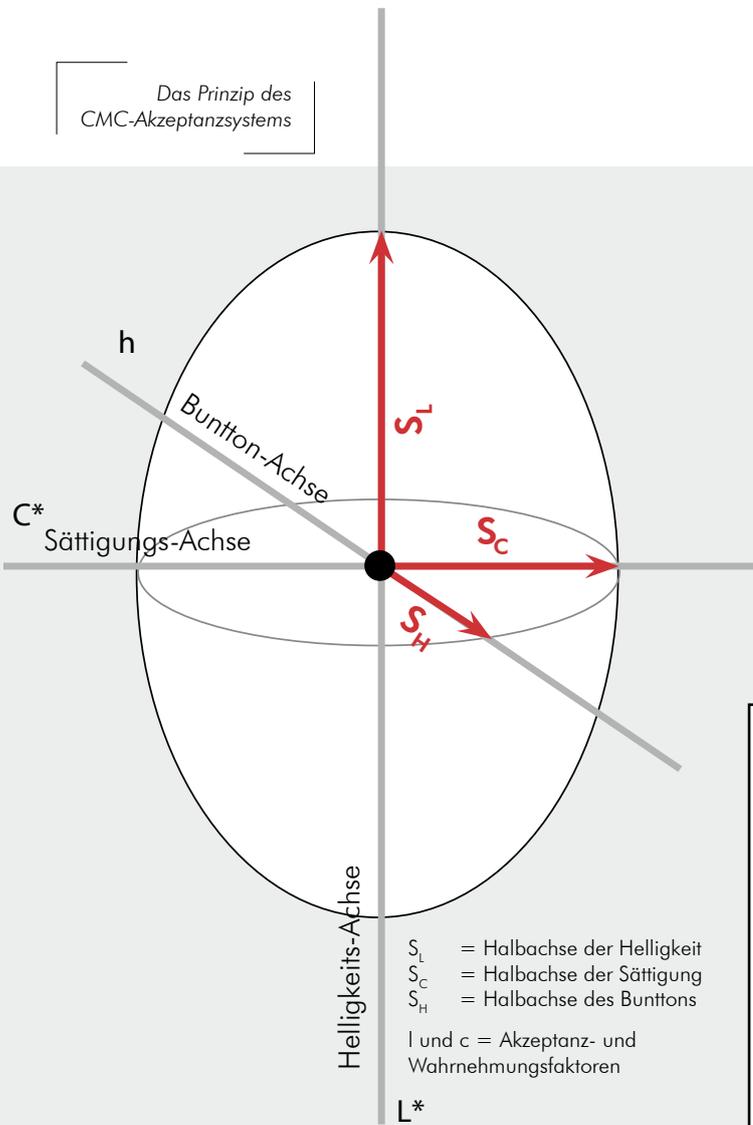
$$\text{Es sei denn } 164^\circ < h < 345^\circ$$

$$\text{Oder } T = 0,56 + |0,2 \cos(168 + h)|$$

Anmerkung: | stellt einen absoluten Wert dar

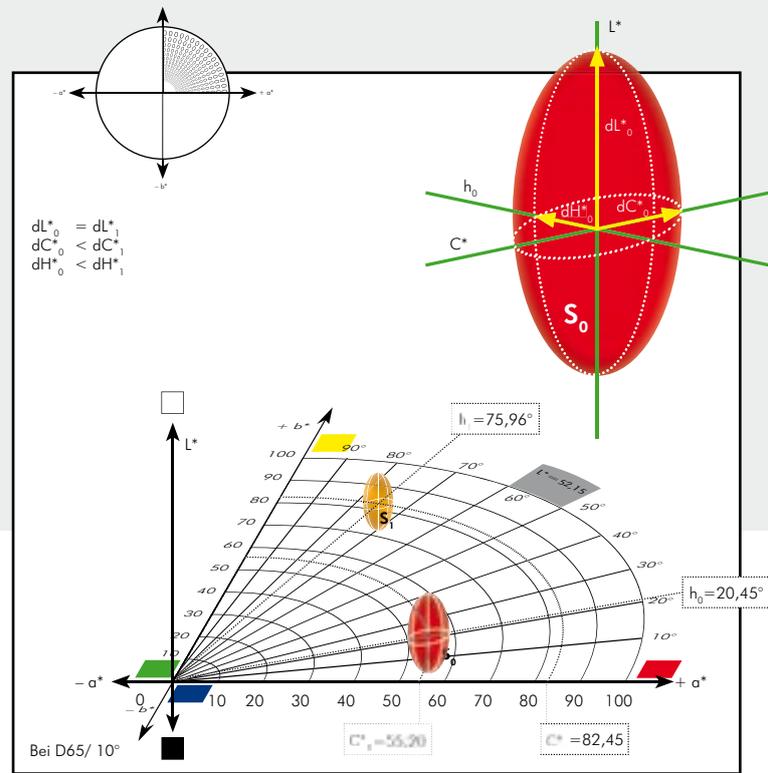
Durch den Einfluss von S_C werden gegebene dH^* in der Nähe der Unbuntachse stärker gewichtet, allerdings durch den Einfluss des Faktors F nicht so stark, wie mit S_C alleine. Nach der CMC-Formel wird dH^* im Orangebereich und im Violettbereich verstärkt, im Grün- bis Blaubereich und im Purpur- bis Rot-Bereich gedämpft.

Das Prinzip des CMC-Akzeptanzsystems



$$dE_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{l S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{c S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{S_H}\right)^2}$$

CMC - Toleranz = Ellipsoid



Die CMC-Farbabstandsformel basiert auf ca. 2000 Textilproben, die unter D65-Beleuchtung abgemustert und unter Benutzung der CIE64 10°-Normalbeobachterfunktion gemessen wurden.

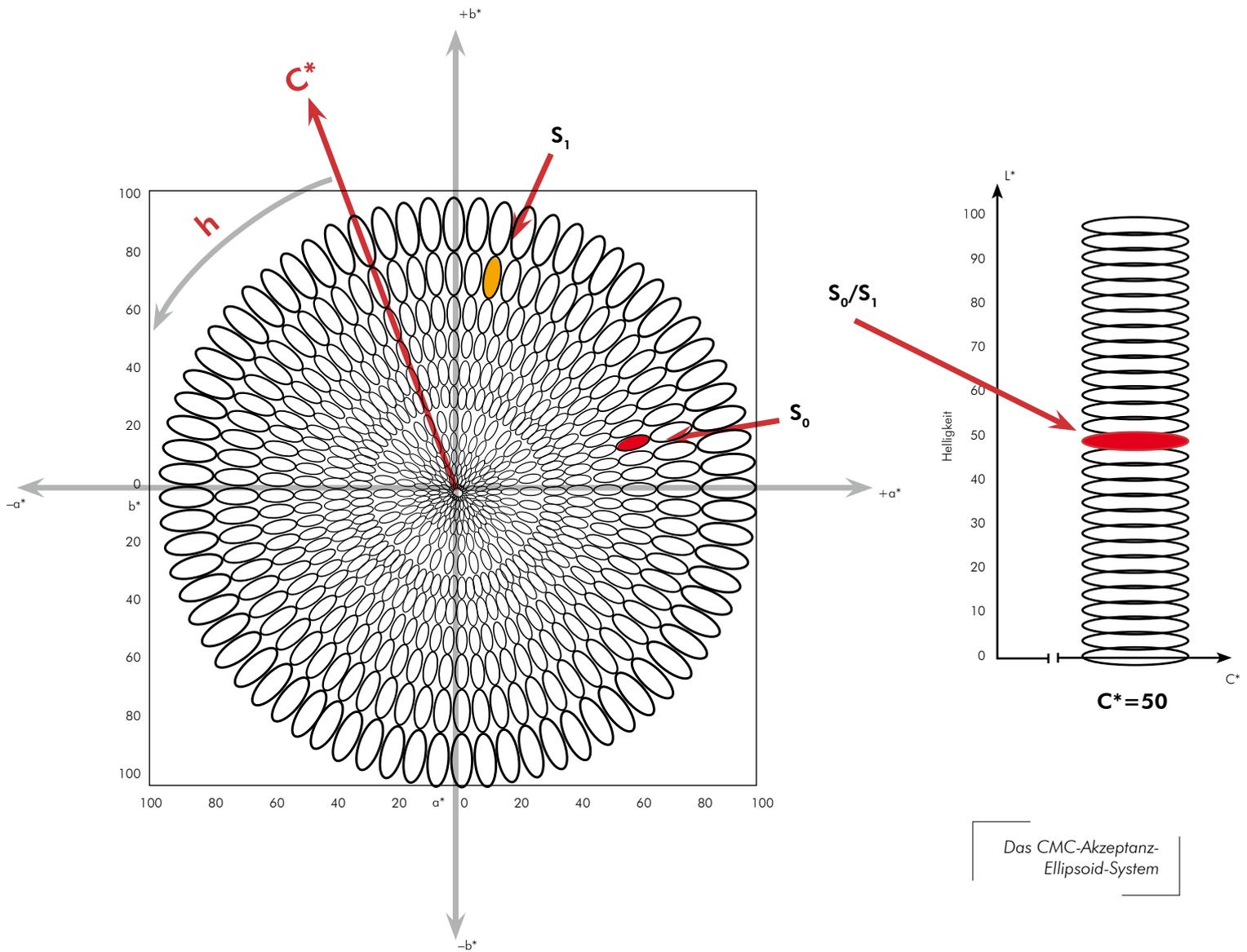
Die Korrekturgrößen ($S_L - S_C - S_H$) sind also empirisch bewertet worden und liegen in Formeln vor, die eine vorherige Berechnung ermöglichen. Darüber hinaus können die beiden zusätzlichen Faktoren l („lightness“) und c („chroma“) die Ergebnisse beeinflussen, je nachdem, wie ein Problem – insbesondere die Akzeptanz einer Abweichung - gelagert ist.

Die Korrektur-Parameter l und c können vom Anwender verändert werden. Sie sind beide gleich 1. Dies entspricht dem am häufigsten vorkommenden Fall bei der Bewertung der Wahrnehmbarkeit von Farbabweichungen. Um die Akzeptanz zu bewerten, können die Werte l und c erhöht oder gesenkt werden. So verwendet man z. B. in der Textilindustrie die Kombination CMC (2,1), wobei l = 2 und c = 1 ist. Dabei bedeutet l = 2, dass der Helligkeitsabstand nur zur Hälfte in die Berechnung des Gesamtfarbabstandes eingeht.

Die Helligkeitsabweichung (dL^*) wird nur durch die Helligkeit geändert. Sie wird größer bei geringen Helligkeitswerten und kleiner bei stärkeren Helligkeiten.

Die Buntheitsabweichungen (dC^*) werden nur von der Buntheit verändert. Im Vergleich zum CIELab-System sind sie im Allgemeinen geringer, mit Ausnahme der Buntheiten, die einen niedrigen Wert kleiner als 6 haben.

Die Buntonabweichungen (dH^*) werden durch den Buntonwinkel und die Buntheit verändert. Man sieht, dass insbesondere bei Orangetönen die Farbabweichungen in Bezug auf die Grüntöne größer werden und dass der Effekt der Farbabweichungen in Bezug auf das CIELab-System sich beträchtlich reduziert, wenn Farben relativ gesättigt sind.



Die Effekte dieser Korrekturgrößen sind in oben stehender Grafik zu sehen. Die visuell festgestellten Abweichungen gleichen Ausmaßes werden für die Fläche a^*/b^* bei konstanter Helligkeit als Ellipsen angegeben. Die Abweichungen innerhalb einer Ellipse werden vom menschlichen Auge als gleich empfunden. Die rechte Seite der Grafik zeigt die Akzeptanzellipsen auf der L^* -Achse (bei konstanter Buntheit $C^* = 50$, aber veränderlicher Helligkeit L^* von 0 -100).

Die Grafik macht eines deutlich: Die CMC-Formel liefert kein gleichförmiges Darstellungssystem und bildet auch keinen Farbraum, aber sie ermöglicht die Berechnung der Farbabweichungen und der Akzeptanz anhand eines empirischen Ansatzes von jedem beliebigen Farbpunkt im CIELab-Farbraum aus.

Im Rahmen der Verbesserung der Akzeptanzformeln und der Farbabstände hat die CIE die Farbabstandsformeln CIE94 und CIE2000 entwickelt.

Die Farbabstandsformel CIE94

1994 wurde von der CIE die Farbabstandsformel CIE94 publiziert. Sie basiert auf einem ähnlichen Ansatz wie die CMC-Formel, bietet allerdings drei Korrekturparameter (k_L , k_C und k_H), die je nach Anwendungsgebiet optimiert werden können. Darüber hinaus wird die Formel durch die Beobachtungsbedingungen ergänzt, die als Grundlage für die Präsentation und Beobachtung der Proben dienen.

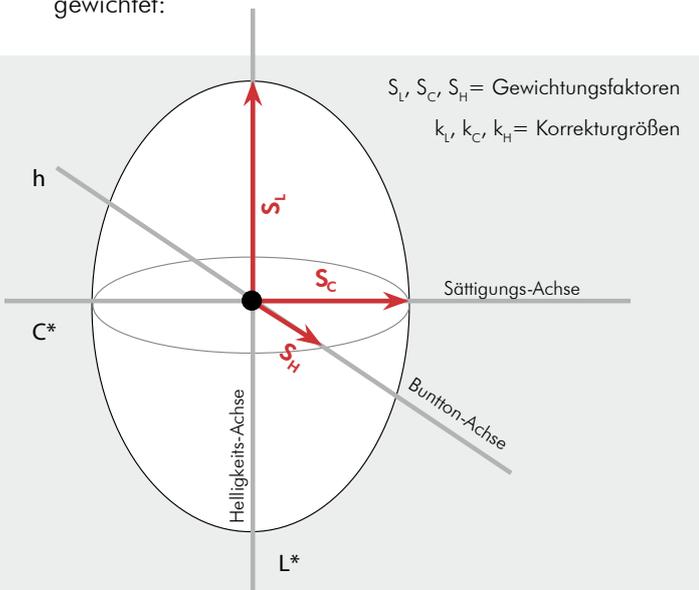
Die CIE94 Farbabstandsformel sieht wie folgt aus:

$$dE_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

$$L_2^* - L_1^* = dL^*$$

Der Gesamtfarbabstand dE_{94} zwischen 2 Farbproben stellt die gewichtete und vom Anwender angepasste Entfernung im Farbenraum CIE76 (CIELab) dar. Dabei berücksichtigt sie die Komponenten dieser Farbabstände, wie die Abweichungen für Helligkeit (dL^*), die Buntheitsabweichung (dC^*) und die Bunttonabweichung (dH^*), unter festgelegten Bezugsbedingungen.

Die Faktoren S_L , S_C und S_H stellen die jeweiligen Gewichtungsfaktoren der Abweichungen der Helligkeit, Buntheit und des Bunttons dar. Sie werden wie folgt berechnet und gewichtet:



$$dE_{94} = \sqrt{\left(\frac{L_2^* - L_1^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{C_2^* - C_1^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH_{ab}^*}{k_H S_H}\right)^2}$$

Farbabstandsformel CIE94

Die Faktoren k_L , k_C und k_H sind Korrekturgrößen, die mit den Beobachtungsbedingungen der Proben verbunden sind. Die Bezugsbedingungen werden experimentell als typische Bedingungen für die Beobachtung von Aufsichtfarben festgelegt.

$$\begin{aligned} S_L &= 1 \\ S_C &= 1 + 0,045 C^* \\ S_H &= 1 + 0,0015 C^* \end{aligned}$$

Die Bezugsbedingungen:

- Beleuchtung – Lichtquelle: die Lichtquelle simuliert die Normlichtart D65, die dem Tageslicht entspricht
- Beleuchtung der Probe mit einer Lichtstärke von ungefähr 1000 lux
- Umgebung: gleichmäßiger Beobachtungshintergrund von neutraler grauer Farbe und Helligkeit $L^* = 50$
- Die zu betrachteten Oberflächen (Proben) müssen so weit wie möglich die folgenden Bedingungen erfüllen:
 - Beobachtungsfeld und Entfernung müssen so beleuchtet werden, dass das Gesichtsfeld größer ist als das zentral fixierte Gesichtsfeld von 4°
 - Die Proben müssen nebeneinander angeordnet werden; sie dürfen nicht getrennt werden und müssen sich direkt berühren, so dass die Trennlinie so wenig wie möglich in Erscheinung tritt.
 - Die Struktur, die Textur und die Farbe müssen so gleichmäßig wie möglich sein.

Hinweis:

Die Korrekturfaktoren k_L , k_C und k_H sind für spezielle Voraussetzungen noch sehr schlecht bewertet. Die Korrekturfaktoren k_L , k_C und k_H werden für die Bezugsbedingungen gleich 1 gesetzt. In der Textilindustrie verwendet man in der Regel die folgenden Faktoren: $k_L = 2$ und $k_C = k_H = 1$.

Die Farbabstandsformel der CIE muss in der Form von dE_{94} ausgedrückt und mit der Abkürzung CIE94 geschrieben werden. Die Korrekturgrößen k_L , k_C und k_H müssen nicht gleich 1 sein. In dem Fall müssen sie nach der Abkürzung dE_{94} stehen. Ein Beispiel aus der Textilindustrie: Für die Faktoren $k_L = 2$ und $k_C = k_H = 1$ sieht die Schreibweise dann wie folgt aus: CIE94 (2:1:1) mit dem Symbol dE_{94} (2:1:1).

Toleranzgrafik CIE94

CIE2000 – Die aktuelle Farbabstandsformel der CIE

Obwohl eine Verbesserung zur CMC-Formel, erreichte die CIE94 keine bzw. kaum allgemeine Akzeptanz in der Industrie. Daher wurde sie mit Hilfe neuer Datensätze verfeinert und durch die neue Formel CIE2000 ersetzt. Die CIE2000 Farbabstandsformel ist die momentan am besten

an die visuelle Wahrnehmung angepasste Formel. Sie beinhaltet nicht nur Gewichtungsfunktionen für die Helligkeit, die Buntheit und den Buntton, sondern auch Mischterme. Diese Terme berücksichtigen eine zusätzliche Abhängigkeit der Buntheit vom Buntton.

Die CIE2000 Farbabstandsformel sieht wie folgt aus:

$$dE_{00} = \sqrt{\left(\frac{dL^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{dC^*}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{dH^*}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{dC^*}{k_C S_C}\right) \left(\frac{dH^*}{k_H S_H}\right)}$$

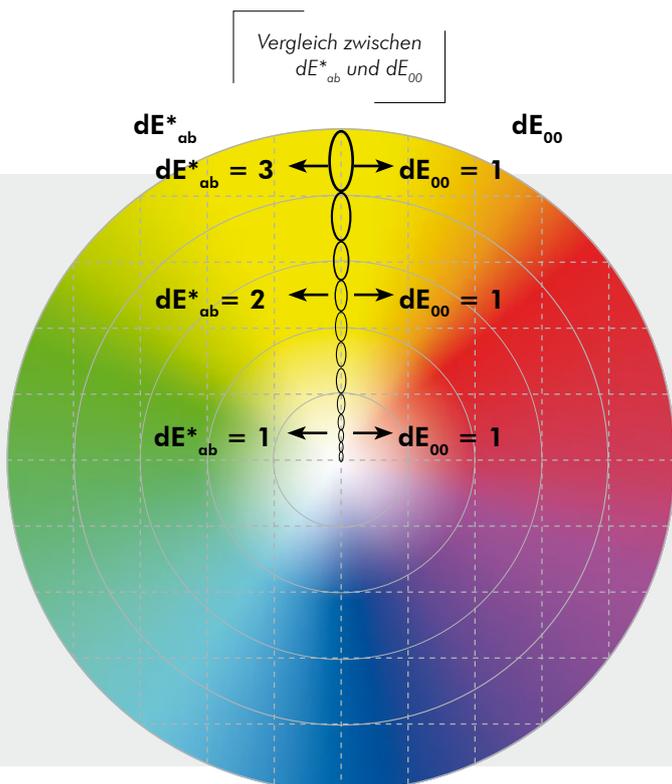
Der letzte Term in der Gleichung wird auch als Rotations-term bezeichnet. Er führt, abhängig vom „rotierenden“ Buntton, eine zusätzliche Wichtung ein und soll besonders schlechte Übereinstimmungen zwischen visuell empfundenen und berechneten Farbabständen im blauen Farb-be-reich beheben.

Anhand der o. g. Gleichung können alle bisher beschriebenen Farbabstandsformeln dargestellt werden. Bei CIE94 und bei CMC ist demnach $S_L = 1$. Der Rotationsterm bei den Farbabstandsformeln CMC und CIE94 ist nicht vorhanden und somit null ($R_T = 0$).

Mit CIE2000 ist man dem Ziel, einen gleichwertigen Farb-abstand für alle Farbtöne zu erhalten, sehr nahe gekommen.

Zusammenfassende Wertung von CMC, CIE94 und CIE2000

Alle Korrekturen der originalen CIELab-dE-Formel stellen eine wesentliche Verbesserung der Farbdifferenzbewertung dar. Solange aber keine DIN oder ISO Norm existiert, werden sich keine korrigierten dE-Formeln in der Praxis durchsetzen. Daher hatte der Fachnormenausschuss Farbe im DIN (und hier speziell der FNF-Arbeitsausschuss 4) parallel zur Entwicklung der CIE (CIE2000) die Idee, nicht die Farbabstandsformeln selbst zu modifizieren, sondern den gesamten Farbraum zu besserer Gleichabständigkeit zu transformieren. Das Ergebnis war ein neues Farbkoordinatensystem, das folglich einen für kleine Farbabstände empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum definierte. Da Farbabstände nun als Vektorlänge aus den Differenzen der Farbkoordinaten (hier L_{99} , a_{99} und b_{99}) berechnet werden können, spricht man in diesem Fall von einem „euklidischen Farbraum“. Die entsprechende Formel wurde 1999 als DIN99-Formel vorgestellt.



Relative Farbunterschiede – Vergleich verschieden berechneter Farbabstände

		L*	a*	b*	C* _{ab}	dE* _{ab}	dE ₉₄	dE ₀₀	dE ₉₉
Cyan (C)	1	54	-37	-50	62,2	6,00	3,54	2,29	2,16
	2	52	-41	-46	61,6				
Magenta (M)	1	47	75	-6	75,2	6,00	2,94	2,66	2,54
	2	45	79	-2	79,0				
Gelb (Y)	1	88	-6	95	95,2	6,00	2,77	2,69	2,54
	2	86	-10	91	91,5				
Schwarz (K)	1	18	0	-1	1,0	6,00	5,78	6,28	4,76
	2	16	4	-5	6,4				
C+M	1	26	22	-45	50,1	6,00	3,73	4,56	3,97
	2	24	26	-41	48,5				
C+Y	1	49	-65	30	71,6	6,00	3,26	2,97	2,83
	2	47	-69	26	73,7				
M+Y	1	48	65	45	79,1	6,00	3,23	3,48	2,59
	2	46	69	41	80,3				
Papier	1	93	0	-3	3,0	6,00	5,45	6,13	4,09
	2	91	4	-7	8,1				

Der DIN99 Farbraum

Basis des DIN99-Farbraumes ist der CIELab-Farbraum mit seinen Koordinaten L^* , a^* , b^* .

Die Transformation von CIELab in DIN99 wird in zwei Teilen ausgeführt: Eine Helligkeitstransformation zur neuen DIN99-Helligkeit L_{99} und eine Buntheits- oder Chroma-Transformation.

Nach den Transformationen können dann die Werte wie Chroma (C_{99}), Bunttonwinkel (h_{99}) und Farbabstand (dE_{99}) berechnet werden.

Die DIN99-Formel ist für kleine bis mittlere Farbabstände konzipiert. Die Anwendung wird für kleine Farbabstände bis $5 dE_{ab}^*$, wie sie in der Qualitätssicherung und in der Rezeptberechnung vorkommen, empfohlen.

Berechnung

Helligkeitstransformation

Die Helligkeit L^* wird zur DIN99-Helligkeit L_{99} transformiert:

$$L_{99} = \left(\frac{1}{k_E} \right) \cdot (105,51 \cdot \ln(1 + 0,0158 \cdot L^*))$$

Diese Transformation soll die Unterscheidbarkeit dunkler Farbtöne besser wiedergeben. Die Transformation ähnelt einer Potenzfunktion mit einem Exponenten von 0,75. Der Bereich der dunklen Farbtöne wird gestreckt und der Bereich der hellen Farbtöne wird gestaucht. Mittlere Helligkeitswerte werden auf der Helligkeitsachse nach oben verschoben.

Die Variable k_E beschreibt den Einfluss geänderter Betrachtungsbedingungen. Unter Referenzbedingungen gilt $k_E = 1$.

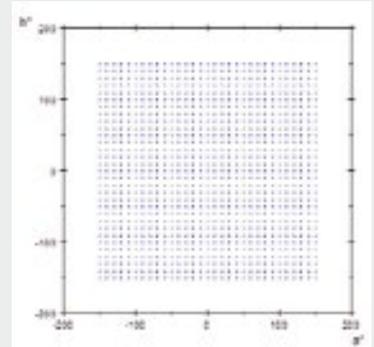
Buntheitstransformation

Die Transformation der Buntheitskoordinaten findet in drei Schritten statt:

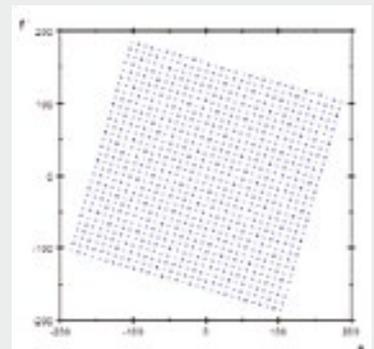
- Die Buntheitsachsen werden um 16° gedreht
- Die Gelb-Blau-Achse wird mit dem Faktor 0,7 multipliziert, also gestaucht
- Die Buntheitswerte (Chroma) werden radial um die L_{99} -Achse logarithmisch komprimiert

Anders als in den CIE94- und CIE2000-Formeln ist es für die Berechnung des Farbabstandes nicht erforderlich, den Bunttonwinkel zu ermitteln.

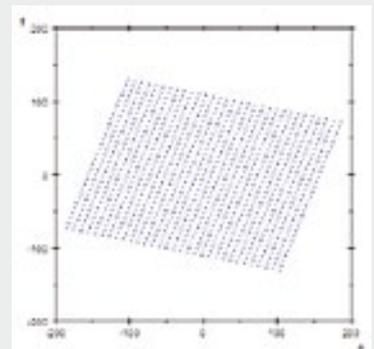
Ausgangssituation:
 a^*/b^* -Ebene.
Die Punkte dieser und der folgenden Abbildungen stellen die a^*/b^* -Koordinaten von jeweils -150 bis 150 in Zehnerschritten dar



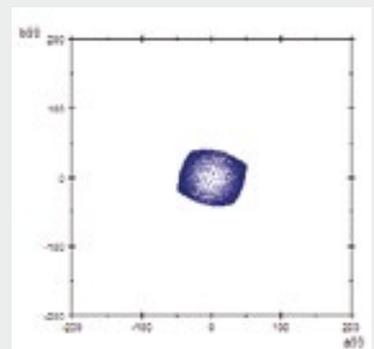
Schritt 1:
Rotation der a^*/b^* -Ebene um 16°



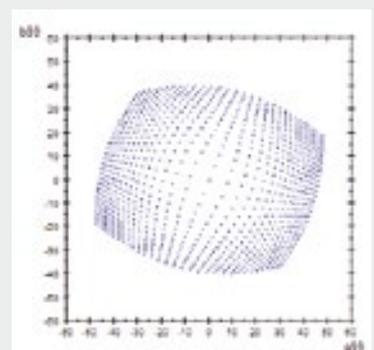
Schritt 2:
Stauchung der f-Achse



Schritt 3:
Radiale Kompression der e/f-Ebene



Vergrößerte Ansicht der a_{99}/b_{99} -Ebene



Die einzelnen Berechnungen sehen wie folgt aus:

Die a^* - und b^* -Werte werden durch e und f ersetzt, wobei die Achsen gedreht und gestaucht werden:

Drehung der Rot-Grün-Achse:

$$e = (a^* \cdot \cos(16^\circ) + b^* \cdot \sin(16^\circ))$$

Stauchung der Gelb-Blau-Achse:

$$f = 0,7 \cdot (-a^* \cdot \sin(16^\circ) + b^* \cdot \cos(16^\circ))$$

Vorteil gegenüber den anderen Korrekturverfahren:

Mit den transformierten a_{99} und b_{99} kann man nun genau so verfahren, wie man es in CIELab tut, um etwa nun ein C_{99} (korrigierte Buntheit, Chroma) oder ein H_{99} (korrigierter Buntton, Hue) zu berechnen.

Die Formeln sehen dann entsprechend so aus:

$$dH_{99} = \frac{(a_{99B} \cdot b_{99P}) - (a_{99P} \cdot b_{99B})}{\sqrt{0,5 \cdot ((C_{99B} \cdot C_{99P}) + (a_{99B} \cdot a_{99P}) + (b_{99B} \cdot b_{99P}))}}$$

Qualität und Weiterentwicklung

Der DIN99-Farbraum nähert sehr gut die CIE94-Farbabstandsformel an und besitzt ähnliche qualitative Eigenschaften, auch vergleichbar mit CMC(l:c). Ein großer Vorteil gegenüber CIE94 ist die Vertauschbarkeit von Muster- und Vergleichsprobe in der Berechnung, die dadurch ermöglicht wird, dass die Transformation vollständig und einfach umkehrbar ist.

Der Unterschied zu CIELab besteht in der verbesserten Übereinstimmung der Berechnungen mit wahrgenommenen Farbabständen. Die Handhabung der DIN99-Formel gleicht derjenigen der CIELab-Formel.

Daraus errechnet sich dann der Chromawert G (Buntheit):

$$G = \sqrt{e^2 + f^2}$$

Mit dem Kompressionsfaktor

$$k = \frac{\ln(1 + 0,045 \cdot G)}{(k_{CH} \cdot k_E \cdot 0,045)}$$

ergeben sich dann die

Bunttonwerte

$$a_{99} = k \cdot \frac{e}{G}$$

$$b_{99} = k \cdot \frac{f}{G}$$

Tritt der Fall ein, dass $a^* = b^* = 0$, also $e = f = G = 0$, dann gilt $a_{99} = b_{99} = 0$.

oder

$$dE_{99} = \sqrt{(dL_{99})^2 + (da_{99})^2 + (db_{99})^2}$$

wobei

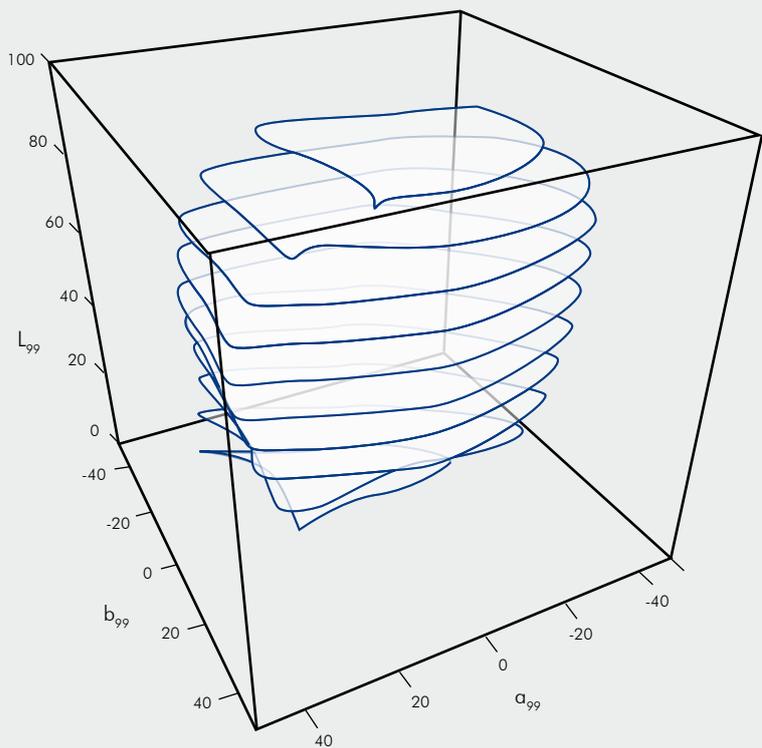
$$dE_{99} = \sqrt{(dL_{99})^2 + (dC_{99})^2 + (dH_{99})^2}$$

$$C_{99} = \sqrt{(a_{99})^2 + (b_{99})^2}$$

dC und dH im DIN99-System werden genau so berechnet wie in CIELab. Die Indizes B und P stehen für Bezug (Vergleichsprobe) und Probe (Muster).

Die Modifikation der Helligkeitsachse und die stärkere Gewichtung der Farben nahe der Unbuntachse durch die Kompression stark gesättigter Farben erhöhen die Gleichabständigkeit wahrgenommener Farbabstände beträchtlich.

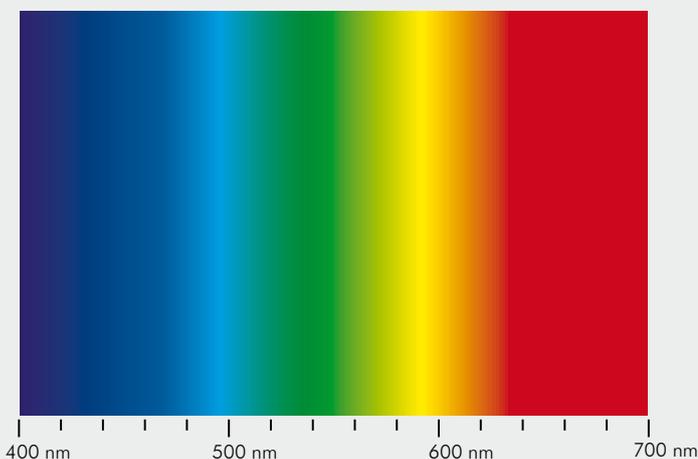
Die Bewertungskategorien *Helligkeits-* und *Bunttonachsen* (Gelb-Blau und Rot-Grün) ändern sich im Vergleich zu CIELab nicht. Die Berechnung des Farbabstandes als einfacher euklidischer Abstand ist ein großer Vorteil gegenüber CMC(l:c), CIE94 und CIE2000, deren Berechnung viel komplizierter ist.



Beispiel eines modernen Farbraums:

DIN99-Optimalfarbkörper in Schnittdarstellung. Schnittebenen von Helligkeit $L_{99}=5$ bis 95 in Zehnerschritten. a_{99} stellt die gelb-blaue Richtung dar, b_{99} die rot-grüne Richtung. Die Verzerrungen kommen dadurch zustande, dass in modernen Farbräumen die Verknüpfung der Farben mit Helligkeiten einfließt. Die Oberfläche dieses Farbkörpers wird durch Spektren erzeugt. Die Oberfläche stellt die Gesamtheit aller Optimalfarben (Farben höchster Sättigung und Leuchtkraft) dar. Das Volumen des Farbkörpers bildet alle theoretisch realisierbaren Farben ab.

SICHTBARES SPEKTRUM



DIN99-
Optimalfarbkörper -
Lichtart (Illuminant) D65

Schlussfolgerung und Ausblick in die Zukunft

Die instrumentelle Farbmessung dient in der Industrie als wesentliches Hilfsmittel für die Qualitätssicherung. Sie ergänzt die visuelle Farbmusterung und ermöglicht die Einführung von Zahlenwerten als Toleranzen. Damit ist die Zusammenarbeit zwischen Lieferanten und Kunden auf eine von beiden Seiten messtechnisch nachvollziehbare Grundlage gestellt. Wichtig ist aber, dass die farbmetrischen Urteile mit dem visuellen Urteil weitestgehend übereinstimmen.

Die im Laufe der Jahre entwickelten Farbräume kommen dem visuellen Farbpfinden schon sehr nahe, weisen aber auch Schwächen auf, weil die Übereinstimmung des visuell empfundenen Farbabstandes in vielen Fällen nicht der Größe des gemessenen Farbabstandes dE^* entsprechen.

An der Entwicklung eines völlig gleichförmigen Farbraums wie auch an einer Formel für den Farbabstand und der einfachen sowie repräsentativen Akzeptanz der visuellen Wahrnehmung wird ständig weitergearbeitet. Die Forschungen der letzten Jahre in der Neurophysiologie des Sehens, der Wahrnehmungspsychologie und der Statistik führen ebenfalls zu einer besseren Effizienz der Akzeptanzformeln und machen die automatische Nutzung immer zuverlässiger. So kann man guten Gewissens sagen: Die perfekte Beherrschung und die sachkundige Handhabung der derzeitigen mathematischen Modellrechnungen im Bereich der objektiven und automatischen Kontrolle der Farben und Farbabstände erlauben heute eine korrekte Anwendung der Farbmessung und garantieren somit eine hohe Qualität der farbigen Produkte.

Die Metamerie

Von Metamerie spricht man, wenn die Farbe eines Probenpaares mit unterschiedlichen Spektralwertkurven bei festgelegten Bedingungen für die Beobachtung und die Beleuchtung identisch erscheint, aber unterschiedlich, wenn sich die Beleuchtung ändert.

In der Farbmessung überprüft man die Metamerie, indem man für ein Probenpaar mit unterschiedlichen Spektralwertkurven die Normfarbwerte unter verschiedenen Lichtquellen (Lichtarten) ermittelt. Metamere Proben weisen unter einer Lichtart identische Normfarbwerte auf, aber unterschiedliche unter einer anderen Lichtart. Farbmess-technische Berechnungen reduzieren die Spektralwertkurve auf 3 Werte. Aus diesem Grund kann Metamerie nur dann über die drei Normfarbwerte identifiziert werden, wenn man die Lichtart ändert.

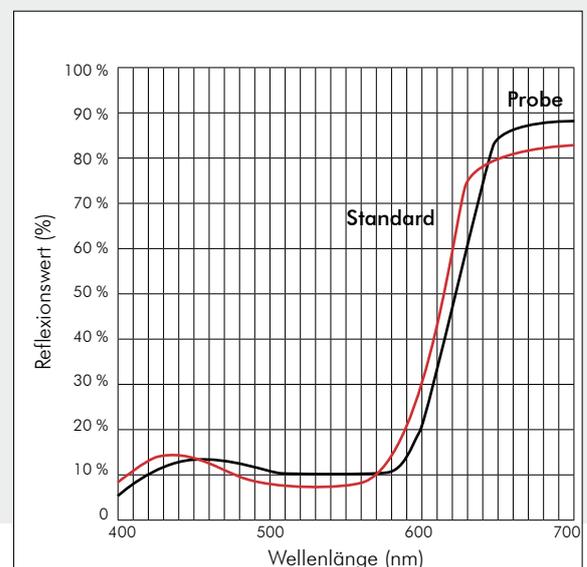


Die Metamerie

Normvalenzen (X-Y-Z)
für den 10°-Normalbeobachter

	Lichtart D65 (Tageslicht)		Lichtart A (künstliches Licht)	
	Standard STD.N	Probe Nr. 2 ECH2.N	Standard STD.N	Probe Nr. 2 ECH2.N
X	X _{0D} = 31,28	X _{2D} = 31,28	X _{0A} = 47,88	X _{2A} = 52,66
Y	Y _{0D} = 20,28	Y _{2D} = 20,28	Y _{0A} = 27,57	Y _{2A} = 31,41
Z	Z _{0D} = 12,71	Z _{2D} = 12,71	Z _{0A} = 4,04	Z _{2A} = 4,42

Spektralwertkurven



Referenzenliste

- Farbe sehen, Corinna Watschke, 01.2009 [www.planet-wissen.de],
- Farbmanagement in der Digitalfotografie (ISBN 3-8266-1645-6), 2006, Redline GmbH, Heidelberg
- Beschreibung und Ordnung von Farben, Farbmeterik, Farbmodelle, DMA Digital Media for Artists – Archiv 2006-2011, Kunstuniversität Linz, Gerhard Funk
- Messen – Kontrollieren – Rezeptieren, Dr. Ludwig Gall [www.farbmeterik-gall.de]
- Farbabstandsformeln, 2012, Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V. [www.fogra.org]
- Wikipedia, diverse Artikel über Farbe und Farbmessung [<http://de.wikipedia.org/wiki/Farbe>]
- Verschiedene Darstellungen von Farbmodellen und Farbräumen [http://www.chemie-schule.de/chemieWiki_120]
- Praktische Farbmessung, Anni Berger-Schunn, 2. überarbeitete Auflage, 1994, Muster-Schmidt Verlag, Göttingen – Zürich
- Farbabstandsformeln in der Praxis, SIP 01.2011
- Schläpfer, K.: Farbmeterik in der grafischen Industrie, 3. Aufl. St. Gallen; UGRA 2002 (Tabelle S. 48)

Publikationsdaten:

Herausgeber:

Datacolor, Inc. 5 Princess Road, Lawrenceville, NJ 08648, USA

Telefon: 1-800-982-6497 | Fax: 609-895-7472 | marketing@datacolor.com | www.datacolor.com

Text:

Gabriele Hiller, Hiller Direct Marketing, Stühren 41, 27211 Bassum, Deutschland

www.hiller-direct-marketing.de

Oktober, 2019

© Copyright Datacolor. Alle Rechte vorbehalten.

EUROPE

Datacolor AG Europe
6343 Rotkreuz
Telefon: +41 44.835.3800

AMERICA

Datacolor Headquarters
Lawrenceville, NJ
Telefon: +1 609.924.2189

ASIA

Datacolor Asia Pacific Limited
Hong Kong
Telefon: +852 24208283