

DIN EN ISO 18314-4



ICS 17.180.20; 87.060.10

Einsprüche bis 2023-03-06
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN ISO 18314-4:2021-09

Entwurf

**Analytische Farbmessung –
Teil 4: Metamerie-Index von Probenpaaren bei Lichtartwechsel
(ISO/DIS 18314-4:2022);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 18314-4:2023**

Analytical colorimetry –
Part 4: Metamerism index for pairs of samples for change of illuminant
(ISO/DIS 18314-4:2022);
German and English version prEN ISO 18314-4:2023

Analyse colorimétrique –
Partie 4: Indice de métamérisme de paires d'échantillons pour changement d'illuminant
(ISO/DIS 18314-4:2022);
Version allemande et anglaise prEN ISO 18314-4:2023

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2023-01-06 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an fnf@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Farbe (FNF), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 59 Seiten

DIN-Normenausschuss Farbe (FNF)
DIN-Normenausschuss Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB)
DIN-Normenausschuss Pigmente und Füllstoffe (NPF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 18314-4:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 256 „Pigments, dyestuffs and extenders“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 298 „Pigmente und Füllstoffe“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Gemeinschaftsarbeitsausschuss NA 025-00-02 GA „Gemeinschaftsarbeitsausschuss FNF/FNL: Farbmeterik“ im DIN-Normenausschuss Farbe (FNF).

Der NA 025-00-02 GA gibt folgende Hinweise zur Übersetzung:

Die Messwerte der CIELAB-Koordinaten L^* , a^* , b^* werden auch als Farbmaßzahlen bezeichnet. Unter metamere Schwarz wird der metamere, nicht sichtbare Anteil des spektralen Farbreizes verstanden (Residium). Die Matrix A der Integrationsgewichte nach Gleichung (8) unter 8.3.3 wird auch Wichtungsmatrix genannt. In die Wichtungsmatrix ist die beleuchtende Lichtart eingerechnet. Das metamere Schwarz der Reflexionsfunktion stellt den Anteil der spektralen Reflexionsfunktion dar, der zusammen mit der beleuchtenden Lichtart das metamere Schwarz des Farbreizes bildet. Entsprechend wird unter fundamentaler Reflexionsfunktion der Anteil der Reflexionsfunktion verstanden, der zusammen mit der beleuchtenden Lichtart den fundamentalen Farbreiz, also den sichtbaren Teil des Farbreizes bildet.

Einige der erwähnten Lichtarten sind Normlichtarten. Informationen zu Normlichtarten sind in DIN EN ISO/CIE 11664-2 enthalten.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO/CIE 11664-1	siehe	DIN EN ISO/CIE 11664-1
ISO/CIE 11664-2	siehe	DIN EN ISO/CIE 11664-2
ISO/CIE 11664-4	siehe	DIN EN ISO/CIE 11664-4
ISO/CIE 11664-5	siehe	DIN EN ISO 11664-5

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 18314-4:2021-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) in 8.1 wurde eine kurze Einführung zur Unterscheidung zwischen Metamerie und Paramerie hinzugefügt;
- b) aus Gründen der Konsistenz mit den vorherigen Gleichungen (2), (4) und (24) wurde die vorherige Gleichung (1) aktualisiert;
- c) die Legende zu Bild A.1 wurde aktualisiert;
- d) Norm redaktionell überarbeitet.

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 11664-5, *Farbmetrik — Teil 5: CIE 1976 $L^*u^*v^*$ -Farbenraum und gleichabständige u', v' -Farbtafel*

DIN EN ISO/CIE 11664-1, *Farbmetrik — Teil 1: CIE farbmimetrische Normalbeobachter*

DIN EN ISO/CIE 11664-2, *Farbmetrik — Teil 2: CIE-Normlichtarten*

DIN EN ISO/CIE 11664-4, *Farbmetrik — Teil 4: CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Farbraum*

– *Entwurf* –

E DIN EN ISO 18314-4:2023-02

– Leerseite –

**Analytische Farbmessung – Teil 4: Metamerie-Index von Probenpaaren bei
Lichtartwechsel (ISO/DIS 18314-4:2022)**

Analytical colorimetry – Part 4: Metamerism index for pairs of samples for change of illuminant
(ISO/DIS 18314-4:2022)

Analyse colorimétrique – Partie 4: Indice de métamérisme de paires d'échantillons pour changement d'illuminant
(ISO/DIS 18314-4:2022)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	3
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Abkürzungen	7
5 Referenzlichtart	8
6 Testlichtart	8
7 CIELAB-Koordinaten L^*, a^*, b^*	9
8 Metamerie-Index für Lichtartwechsel	9
8.1 Grundsätzliche Berechnungsmethoden	9
8.2 Grundsätzliche Berechnung des Metamerie-Indexes aus Farbabständen	10
8.3 Korrekturmethode	10
8.3.1 Additive Korrektur	10
8.3.2 Multiplikative Korrektur	11
8.3.3 Spektralkorrektur	11
8.4 Prüfbericht	15
Anhang A (informativ) Rechenbeispiele	16
Literaturhinweise	27

Bilder

Bild A.1 — Diagramme der Reflexionsspektren für den farbmetrischen CIE 1964-10°-Normalbeobachter	19
Bild A.2 — Diagramm der orthogonalen Projektionsmatrix R für den CIE 1964-10°-Normalbeobachter und Lichtart D65	20

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole	7
Tabelle 2 — Normfarbwerte	9
Tabelle A.1 — Elemente der orthogonalen Projektionsmatrix R für den CIE 1964-10°-Normalbeobachter und Lichtart D65, berechnet für den Wellenlängenbereich $400\text{ nm} \leq \lambda \leq 700\text{ nm}$ und einen Stützstellenabstand von $\lambda = 10\text{ nm}$	20
Tabelle A.2 — Cohen-Kappauf-Zerlegung eines parameren Probenpaares für die D65/10°-Lichtart-Normalbeobachter-Kombination	23
Tabelle A.3 — Farbmetrische Daten zu den in Tabelle A.4 zusammengestellten spektralen Kurven eines metameren Probenpaares inklusive der Metamerie-Indizes M_A für den spektralen, multiplikativen und additiven Korrekturansatz	24
Tabelle A.4 — Cohen-Kappauf-Zerlegung eines parameren Probenpaares für die D65/10°-Lichtart-Normalbeobachter-Kombination	25
Tabelle A.5 — Farbmetrische Daten zu den in Tabelle A.4 zusammengestellten spektralen Kurven eines metameren Probenpaares inklusive der Metamerie-Indizes M_A für den spektralen, multiplikativen und additiven Korrekturansatz	26

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN ISO 18314-4:2023) wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 256 „Pigments, dyestuffs and extenders“ in Zusammenarbeit mit dem Technischen Komitee CEN/TC 298 „Pigmente und Füllstoffe“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur parallelen Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN ISO 18314-4:2021 ersetzen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/DIS 18314-4:2022 wurde von CEN als prEN ISO 18314-4:2023 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 256, *Pigments, dyestuff and extenders*, erarbeitet.

Diese zweite Ausgabe ersetzt die erste Ausgabe (ISO 18314-4:2020), die technisch überarbeitet wurde.

Die wesentlichen Änderungen sind folgende:

- eine kurze Erläuterung zur Unterscheidung zwischen Metamerie und Paramerie wurde in 8.1 hinzugefügt;
- aus Gründen der Einheitlichkeit im Hinblick auf die vorherige Gleichung (2), Gleichung (4) und Gleichung (24) wurde die vorherige Gleichung (1) aktualisiert;
- die Legende zu Bild A.1 wurde aktualisiert;
- das Dokument wurde redaktionell überarbeitet.

Eine Auflistung aller Teile der Normenreihe ISO 18314 ist auf der ISO-Internetseite abrufbar.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Bei dem Phänomen der Metamerie von Probenpaaren werden drei verschiedene Ausprägungen unterschieden:

- a) Lichtart-Metamerie liegt vor, wenn die beiden Körperfarben eines Probenpaares nur unter einer bestimmten Lichtart als gleich wahrgenommen werden (z. B. unter der Lichtart D65), während sie sich unter einer anderen Lichtart (z. B. Lichtart A) unterscheiden.
- b) Beobachter-Metamerie liegt vor, wenn die Körperfarben eines Probenpaares durch einen Beobachter als gleich wahrgenommen werden, während ein anderer Beobachter unter der gleichen Lichtart und gleichen Umfeldbedingungen einen Farbabstand wahrnimmt.

ANMERKUNG 1 Die Ursache der Beobachter-Metamerie liegt in Unterschieden der Verläufe von Spektralwertfunktionen verschiedener Beobachter.

- c) Feldgrößen-Metamerie liegt vor, wenn die beiden Körperfarben eines Probenpaares für eine Größe eines Beobachtungsfeldes auf der Netzhaut (z. B. definiert durch den 2°-Normalbeobachter) als gleich wahrgenommen werden, während sie sich für ein verändertes Beobachtungsfeld auf der Netzhaut (z. B. 10°) unterscheiden.

ANMERKUNG 2 Die Ursache der Feldgrößen-Metamerie ist an die in einer Beobachtungssituation vorhandenen und wirksamen Spektralfunktionen eines Beobachters gebunden. Diese verändern sich mit der Größe des Beobachtungsfeldes auf der Netzhaut. Eine Änderung kann auch entstehen, wenn z. B. das Probenpaar aus unterschiedlicher Entfernung betrachtet wird.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt einen Formalismus zur Berechnung der Lichtart-Metamerie von Uni-Farben fest. Dieser kann ohne Anpassungen in der Metrik nicht auf Effektfarben von Überzügen bzw. Beschichtungen angewendet werden.

Dieses Dokument behandelt nur das Phänomen der Metamerie bei Lichtartwechsel, das in der praktischen Anwendung die größte Bedeutung hat. Für den Fall, dass die Farborte eines Probenpaares unter Referenzbedingungen nicht exakt übereinstimmen, werden Empfehlungen gegeben, welche Korrekturmaßnahmen zu ergreifen sind. Bei der Reproduktion von Farben wird der Metamerie-Index als Qualitätsmaß verwendet, um Toleranzen für Farbunterschiede zwischen einer Farbvorlage und einer Farbnachstellung bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen festzulegen.

Die Quantifizierung der Lichtart-Metamerie von Probenpaaren wird formal auf eine Farbabstandsbewertung zurückgeführt, bei der Toleranzen herangezogen werden können, die bei der Bewertung reiner Restfarbabstände üblich sind.

ANMERKUNG In der Farbliteratur und Fachbüchern wird manchmal auch der Begriff der Geometrischen Metamerie für den Fall verwendet, dass zwei Farben unter einer bestimmten Beobachtungsgeometrie und einer gewählten Kombination aus Normalbeobachter und Lichtart gleich erscheinen, aber bei veränderter Beobachtungsgeometrie als zwei verschiedene Farben wahrgenommen werden. Der Begriff Geometrische Metamerie unterscheidet sich von der in diesem Dokument beschriebenen Metamerie.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO/CIE 11664-1, *Colorimetry — Part 1: CIE standard colorimetric observers*

ISO/CIE 11664-2:—,¹ *Colorimetry — Part 2: CIE standard illuminants*

ISO/CIE 11664-4, *Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space*

CIE 015, *Colorimetry*

CIE S 017, *International Lighting Vocabulary*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach CIE S 017 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <https://www.electropedia.org/>

¹ In Vorbereitung. Stufe zum Zeitpunkt der Vorbereitung: ISO/CIE DIS 11664-2:2020.

3.1

Metamerie

Eigenschaft von spektral verschiedenen Farbreizen mit gleicher Farbvalenz in einem festgelegten farbmetrieblichen System

[QUELLE: CIE 017:2016, 17-23-006]

3.2

Paramerie

Eigenschaft eines Probenpaares mit spektralen Farbreizfunktionen, die im sichtbaren Spektralbereich sowohl unterschiedliche fundamentale Farbreizfunktionen als auch verschiedene Residuen bzw. Anteile von metamerem Schwarz besitzen

Anmerkung 1 zum Begriff: Paramere Objekte sind dadurch gekennzeichnet, dass sie unter Beleuchtung mit einer gegebenen Referenzlichtart Farbreize unterschiedlicher spektraler Leistungsverteilungsfunktion reflektieren, die unter den gewählten Beobachtungsbedingungen näherungsweise denselben Farbeindruck hervorrufen.

3.3

Farbabstand

ΔE^*

Unterschied zwischen zwei Farbreizen, festgelegt als Abstand zwischen den Punkten, die sie in einem bestimmten Farbraum darstellen

[QUELLE: CIE 017:2016, 17-22-041, modifiziert — Das Symbol ΔE^* wurde angepasst, „euklidischer“ und Anmerkung 1 zum Begriff wurden gestrichen]

3.4

Referenzlichtart

Lichtart, mit der andere Lichtarten verglichen werden

[QUELLE: CIE S 017:2016, 17-22-109 17]

3.5

Testlichtart

Lichtart, bei der der *Farbabstand* (3.3) zwischen den beiden zu prüfenden Proben bewertet wird

3.6

Metamerie-Index für Lichtartwechsel

M_t

Farbabstand ΔE^* (3.3), zwischen den beiden Proben unter der *Testlichtart* (3.5), wenn unter der *Referenzlichtart* (3.4) $\Delta E^* = 0$ gilt

3.7

Ausgleichskorrektur

Algorithmus, um einen *Farbabstand* (3.3) des Probenpaares unter der *Referenzlichtart* (3.4) theoretisch zu eliminieren

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Symbole nach Tabelle 1.

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Benennung
a	Normfarbwerte einer gemessenen Körperfarbe
X_n, Y_n, Z_n	Normfarbwerte der beleuchtenden Lichtart

Tabelle 1 (*fortgesetzt*)

Symbol	Benennung
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Spektralwertfunktionen
L^*, a^*, b^*	Basiskoordinaten des CIELAB-Systems
$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$	Differenzen zwischen Basiskoordinaten des CIELAB-Systems
M_t	Metamerie-Index für Lichtartwechsel
$\vec{N}, \vec{N}_f, \vec{N}_r$	Vektor der radiometrischen Funktion einer Probe mit zugehörigem fundamentalem Farbreiz (f) und metamerem Schwarz (r)
λ	Wellenlänge
S	Relative spektrale Verteilungsfunktion einer Lichtart
$\vec{W}$	Vektor der Normfarbwerte
w	Integrationsgewichte zur Berechnung der Normfarbwerte
A	Matrix der Integrationsgewichte w für die Berechnung der Normfarbwerte
R	Projektionsmatrix
I	Einheitsmatrix
Index spl	Testprobe
Index std	Standardprobe
Index t	Testlichtart
Index corr	Korrigierter Wert
Index f	Fundamentaler Farbreiz
Index r	Metameres Schwarz (Residuum)
Index ref	Referenzlichtart
Index T	Transponierte Matrix

5 Referenzlichtart

Als Referenzlichtart wird die Normlichtart D65 nach ISO/CIE 11664-2 gewählt. In Sonderfällen benötigte andere Referenzlichtarten müssen angegeben werden.

6 Testlichtart

Die Auswahl der Testlichtart hängt von der Anwendung ab. Wenn die Testlichtarten nicht speziell vorgegeben sind, müssen bevorzugt die Normlichtart A nach ISO 11664-2 und/oder Lichtarten vom Typ einer Leuchtstofflampe wie z. B. FL11 nach CIE 015 gewählt werden. Die verwendete Testlichtart muss als Index zu M angegeben werden, z. B. M_A oder M_{FL11} .

Bei der Berechnung der Normfarbwerte X, Y, Z unter den gewählten Testlichtarten müssen die in ISO/CIE 11664-2 oder CIE 015 für A und D65 bzw. in CIE 015 für FL11 und FL2 jeweils angegebenen grundlegenden Raster für die Wellenlängen eingehalten werden. In den Fällen, in denen Messwerte für diese Wellenlängen für die Standard- oder Testprobe fehlen, müssen sie durch interpolierte und/oder extrapolierte Werte ergänzt werden.

7 CIELAB-Koordinaten L^*, a^*, b^*

Der Metamerie-Index M_t basiert auf den CIELAB-Koordinaten L^*, a^*, b^* der zu vergleichenden Proben 1 und 2. L^*, a^*, b^* wird nach ISO/CIE 11664-4 aus den Normfarbwerten X, Y, Z der Proben für den CIE 1964-10°-Normalbeobachter entsprechend ISO/CIE 11664-1 für die Referenzlichtart und die ausgewählte Testlichtart berechnet. Bei der Berechnung von L^*, a^*, b^* unter den Testlichtarten müssen die jeweiligen Normfarbwerte X_n, Y_n, Z_n der vollkommen mattweißen Fläche verwendet werden (siehe CIE 015). Für die Normlichtarten A und D65 bzw. für die Lichtartempfehlung FL11 gelten die Normfarbwerte X_n, Y_n, Z_n der vollkommen mattweißen Fläche nach Tabelle 2.

In Tabelle 2 sind die Normfarbwerte für die häufig verwendeten Normlichtarten D65 und A sowie die Lichtart FL11 und die beiden Normalbeobachter nach CIE 015 festgelegt.

Tabelle 2 — Normfarbwerte

	2°-Normalbeobachter			10°-Normalbeobachter		
Normfarb- werte	Lichtart					
	D65	A	FL11	D65	A	FL11
X_n	95,04	109,85	100,96	94,81	111,14	103,86
Y_n	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Z_n	108,88	35,58	64,35	107,32	35,20	65,61

Bei fluoreszierenden Proben muss die bei der Messung verwendete Lichtart so dicht wie möglich an diejenige Lichtart angepasst sein, für die die Normfarbwerte ermittelt werden sollen.

ANMERKUNG Im Gegensatz zu nichtfluoreszierenden Proben ist die Berechnung von Metamerie-Indizes bei fluoreszierenden Proben fehlerhaft, wenn die Proben nur unter einer Beleuchtung gemessen werden.

8 Metamerie-Index für Lichtartwechsel

8.1 Grundsätzliche Berechnungsmethoden

Nach 3.1 stellt eine Metamerie keinen Farbabstand unter der Referenzlichtart dar. Der Farbabstand unter der Testlichtart wird als Metamerie-Index verwendet. Dieser Index wird durch Gleichung (1) dargestellt:

$$M_t = \sqrt{(\Delta L_t^*)^2 + (\Delta a_t^*)^2 + (\Delta b_t^*)^2} \quad (1)$$

Dabei ist

t die Testfarbe;

$$\Delta L_t^* = L_{\text{spl,corr,t}}^* - L_{\text{std,t}}^* ;$$

$$\Delta a_t^* = a_{\text{spl,corr,t}}^* - a_{\text{std,t}}^* ;$$

$$\Delta b_t^* = b_{\text{spl,corr,t}}^* - b_{\text{std,t}}^* .$$

Falls unter den Bedingungen der Referenzlichtart bereits kleine Farbabstände vorhanden sind, wird der Farbabstand bei Veränderung der Lichtart als Paramerie bezeichnet. Um den Effekt des Farbabstandes unter Referenzlichtart zu eliminieren, wird eine mathematisch korrigierte virtuelle Probe erzeugt, die unter der Referenzlichtart keinen weiteren Farbabstand aufweist.

Drei verschiedene Korrekturmethode für die Berechnung eines Metamerie-Indexes sind in den Literaturhinweisen [6] bis [13] vorgeschlagen. Bei allen Methoden wird davon ausgegangen, dass in der Praxis auch unter der Referenzlichtart von vornherein ein geringer Farbunterschied zwischen Testprobe und Standardprobe bestehen könnte, der auf fertigungstechnische Probleme zurückzuführen ist. Bei zwei Methoden, der additiven und multiplikativen Korrektur, werden diese inhärenten Farbabstände oft mit der Differenz vermischt, die durch den Wechsel der Lichtart eingeführt wird. Das dritte Verfahren, die spektrale Korrektur, arbeitet grundsätzlich durch die Trennung von inhärenten Farbabständen unter der Referenzlichtart von denen, die durch den Wechsel der Lichtart eingeführt werden.

ANMERKUNG Anhang A enthält Rechenbeispiele.

8.2 Grundsätzliche Berechnung des Metamerie-Indexes aus Farbabständen

Nach dieser Korrektur (siehe 8.1), die zur virtuellen Probe führt, ist die übliche Gleichung für einen Metamerie-Index bei Lichtartwechsel, ausgedrückt in CIELAB-Koordinaten für die Testlichtart (t), durch Gleichung (2) gegeben:

$$M_t(x) = \sqrt{(\Delta L_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta a_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta b_{\text{corr}}^*)^2} \quad (2)$$

Dabei ist

t die Testfarbe;

$$\Delta L_{\text{corr}}^* = L_{\text{spl,corr,t}}^* - L_{\text{std,t}}^*;$$

$$\Delta a_{\text{corr}}^* = a_{\text{spl,corr,t}}^* - a_{\text{std,t}}^*;$$

$$\Delta b_{\text{corr}}^* = b_{\text{spl,corr,t}}^* - b_{\text{std,t}}^*;$$

x die Bezeichnung der Korrekturmethode.

Die oben angegebenen Gleichungen sind als Beispiel für die Verwendung des CIELAB-Farbraums anzusehen.

Analoge Gleichungen gelten für andere euklidische Farbräume wie z. B. DIN 99o in DIN 6176. In nicht euklidischen Farbräumen wie z. B. CIE 94 oder CIEDE2000 werden die spezifischen Farbabstände noch mit farbortabhängigen Gewichtungsfunktionen versehen und in letzterem Fall noch um einen zusätzlichen Rotationsterm erweitert. Die CIELAB-Metrik ist in der vorliegenden Norm nur exemplarisch verwendet worden und sollte in der praktischen Anwendung durch eine der erwähnten neueren Metriken (z. B. CIE 94, CIEDE2000, DIN 99o) ersetzt werden, die erheblich gleichabständiger als das CIELAB-Modell sind.

8.3 Korrekturmethode

8.3.1 Additive Korrektur

Bei der additiven Korrektur werden die unter Referenzbedingungen (ref) beobachteten Differenzen jeder kolorimetrischen Achse zwischen Standardprobe (std) und Testprobe (spl) den spezifischen Differenzen zwischen Standardprobe und Testprobe unter Testbedingungen (t) hinzuaddiert. Die resultierende Gleichung für den Metamerie-Index M_t , ausgedrückt in CIELAB-Koordinaten, ist dann durch Gleichung (3) gegeben:

$$M_t(\text{add}) = \sqrt{(\Delta L_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta a_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta b_{\text{corr}}^*)^2} \quad (3)$$

Dabei ist

$$\Delta L_{\text{corr}}^* = L_{\text{spl,t}}^* - L_{\text{std,t}}^* - \Delta L_{\text{ref}}^*;$$

$$\Delta L_{\text{ref}}^* = L_{\text{spl,ref}}^* - L_{\text{std,ref}}^*$$

Analoge Beziehungen gelten für Δa^* und Δb^* . Es sollte angemerkt werden, dass leicht unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten sind, wenn die Korrektur auf Normfarbwerte vor der Transformation in einen gleichabständigen Farbenraum wie CIELAB oder DIN 99o angewendet wird.

8.3.2 Multiplikative Korrektur

Bei der multiplikativen Korrektur, die in CIE 015 als Korrekturmethode angegeben wird, werden die unter Testbedingungen (t) beobachteten Normfarbwerte der Testprobe (spl) mit dem Verhältnis der unter Referenzbedingungen (ref) ermittelten Normfarbwerte von Standardprobe (std) zu Testprobe (spl) multipliziert. Die resultierende Gleichung ist durch Gleichung (4) gegeben:

$$Y_{\text{spl,corr,t}} = Y_{\text{spl,t}} \frac{Y_{\text{std,ref}}}{Y_{\text{spl,ref}}} \quad (4)$$

wobei wieder analoge Verknüpfungen für X_{corr} und Z_{corr} gelten. Anschließend findet wieder eine Transformation in einen gleichabständigen Farbraum statt (z. B. CIELAB), wodurch sich Gleichung (5) ergibt:

$$M_t(\text{multipl}) = \sqrt{(\Delta L_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta a_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta b_{\text{corr}}^*)^2} \quad (5)$$

with

$$\Delta L_{\text{corr}}^* = L_{\text{spl,corr,t}}^* - L_{\text{std,t}}^*$$

Analoge Beziehungen gelten für die beiden verbleibenden spezifischen Differenzen a_{corr}^* und b_{corr}^* .

8.3.3 Spektralkorrektur

Die spektrale Methode berücksichtigt, dass schon unter der Referenzlichtart geringe Unterschiede zwischen den Farbvalenzen der Testprobe und der Standardprobe bestehen können, welche für die Metamerieeigenschaften nicht relevant sind. Um diese zunächst rechnerisch zu kompensieren und nur die für Metamerieeigenschaften bei Lichtartwechsel wirksamen Anteile von Probenpaaren mit gegebenem Reflexionsspektrum zu ermitteln, wird von der Möglichkeit Gebrauch gemacht, ein Reflexionsspektrum mathematisch in zwei additive Anteile aufzuspalten.

Davon beschreibt ein Anteil nur die zur Bildung der Farbvalenz unter der Referenzlichtart wirksame Funktion und der andere Anteil beschreibt eine Funktion, welche bei der Integration über den Farbreiz unter der Referenzlichtart zu keinem Beitrag an der Farbvalenz führt.

Diese Funktion enthält zwangsläufig positive und negative Komponenten. Die sich aus dem ersten Anteil für die Bildung der Farbvalenz wirksamen Anteil des Reflexionsspektrums unter der Referenzlichtart ergebende Farbreizfunktion wird fundamentale Farbreizfunktion genannt, der entsprechende zweite Teil der Farbreizfunktion führt auf ein metameres Schwarz der Zerlegung (Residuum), d. h. einen nicht sichtbaren Beitrag mit einer sich daraus ergebenden Farbvalenz identisch mit null.

Die Kompensation der für Metamerieeigenschaften nicht wirksamen Abweichungen der Farbvalenzen einer Testprobe von der Standardprobe wird dadurch erreicht, dass die fundamentale Farbvalenz der Testprobe durch die der Standardprobe ersetzt wird. Der für die Metamerieeigenschaft wirksame Anteil wird ungeändert beibehalten, d. h. es wird eine neue Farbreizfunktion der Testprobe aus der Überlagerung des angeglichenen fundamentalen Farbreizes und dem ungeänderten zweiten Anteil gebildet und aus der Summe wird die Metamerie zur Standardprobe bei Lichtartwechsel bestimmt.

Die folgende mathematische Beschreibung des Verfahrens der spektralen Korrektur basiert nicht auf einer Zerlegung der Farbreizfunktion selbst in ihre fundamentale Farbreizfunktion und die nicht sichtbare Funktion, das metamere Schwarz. Vielmehr wird eine Zerlegung der spektralen Reflexionsfunktion der jeweiligen

Farbe in eine „fundamentale Reflexionsfunktion“ und einen „schwarzen“ Anteil (die metamere Schwarzreflexionsfunktion) genutzt. Dieses Verfahren ist gültig unter der Annahme, dass diese Anteile nur zusammen mit der Verteilungsfunktion der Referenzlichtart (hier D65) auf die visuell wirksame fundamentale Farbreizfunktion und die unsichtbare Funktion des metameren Schwarz führen. Die Verteilungsfunktion der Referenzlichtart ist also inhärent in die Zerlegung der Reflexionsfunktionen eingerechnet. Um diesen Zusammenhang deutlich zu machen, werden die Anteile bei der Zerlegung der Reflexionsfunktion einer Farbe zusätzlich mit „für die Referenzlichtart“ gekennzeichnet.

In dem von Cohen und Kappauf entwickelten Modell der spektralen Dekomposition einer radiometrischen Funktion wird das im sichtbaren Wellenlängenbereich erfasste Reflexionsspektrum einer Objektfarbe im Vektor in Gleichung (6) zusammengefasst:

$$\vec{N} = \begin{pmatrix} \rho(\lambda_1) \\ \rho(\lambda_2) \\ \vdots \\ \rho(\lambda_n) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die Komponenten des Vektors $\vec{N}$ sind die an n Intervallen diskret vorliegenden Reflexionsfaktoren $\rho(\lambda_i)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) der betrachteten Farbe. Zur Berechnung der zugehörigen Normfarbwerte X, Y, Z aus den Reflexionsfunktionen müssen Produkte basierend auf den Stützstellen der Verteilungsfunktion der verwendeten Lichtart $S(\lambda)$, der jeweiligen Normspektralwertfunktion [siehe Gleichung (7)],

$$\vec{\alpha}(\lambda_i) = \{\bar{x}(\lambda_i), \bar{y}(\lambda_i), \bar{z}(\lambda_i)\} \quad (7)$$

dem Stützstellenabstand $\Delta\lambda$ und einer Normierungskonstanten k gebildet werden.

Die Komponenten $\rho(\lambda_i)$ des Vektors $\vec{N}$ sind die Reflexionsfaktoren der betrachteten Farbe. Unter Berücksichtigung der Lichtart $S(\lambda_i)$ werden die Normfarbwertkomponenten X, Y, Z aus der Summe der Produkte $S(\lambda_i) \rho(\lambda_i) \vec{\alpha}(\lambda_i) \Delta\lambda / k$ mit der Normierungskonstante k berechnet. Der Term $\vec{\alpha}(\lambda_i) = \{\bar{x}(\lambda_i), \bar{y}(\lambda_i), \bar{z}(\lambda_i)\}$ beschreibt die Spektralwertfunktionen. Die Konstante k wird aus der jeweiligen Summe $\sum_i^n S(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda$ für die Y -Komponente der betrachteten Lichtart ermittelt.

Diese oben genannten Produkte werden als Gewichte in Gleichung (8) eingeführt:

$$w_{\vec{\alpha}}(\lambda_i) = k S(\lambda_i) \vec{\alpha}(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (8)$$

Alle Gewichte aller Stützstellen für die Normspektralwertkurven sind in Gleichung (9) in Matrixform in einer $n \times 3$ -Matrix angegeben:

$$A = \begin{pmatrix} w_{\bar{x}}(\lambda_1) & w_{\bar{y}}(\lambda_1) & w_{\bar{z}}(\lambda_1) \\ w_{\bar{x}}(\lambda_2) & w_{\bar{y}}(\lambda_2) & w_{\bar{z}}(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{\bar{x}}(\lambda_n) & w_{\bar{y}}(\lambda_n) & w_{\bar{z}}(\lambda_n) \end{pmatrix} \quad (9)$$

Der transponierte Vektor der Normfarbwerte in Gleichung (10):

$$\vec{W} = \{X, Y, Z\}^T \quad (10)$$

ergibt sich in Übereinstimmung mit Gleichung (11):

$$\vec{W} = A^T \cdot \vec{N} \quad (11)$$

aus der Matrixmultiplikation der transponierten Wichtungsmatrix A^T mit der radiometrischen Funktion $\vec{N}$.

Aus dieser Matrix A der Integrationsgewichte haben Cohen und Kappauf eine orthogonale $n \times n$ -Matrix in Gleichung (12) konstruiert:

$$R = A (A^T \cdot A)^{-1} A^T \quad (12)$$

Die Anwendung dieser Matrix in Gleichung (13):

$$R \cdot \vec{N} = \vec{N}_f \quad (13)$$

auf die radiometrische Funktion $\vec{N}$ einer Objektfarbe isoliert ihre fundamentale Reflexionsfunktion für die Referenzlichtart $\vec{N}_f$, die aktiv den Farbwahrnehmungsprozess gestaltet.

Der zur spektralen Differenz gehörige Normfarbwert $\vec{W}_r$ in Gleichung (14):

$$\vec{N}_r = \vec{N} - \vec{N}_f \quad (14)$$

wird mit Gleichung (15) berechnet:

$$\vec{W}_r = A^T \cdot \vec{N}_r \quad (15)$$

und ergibt null.

Dieser als metameres Schwarz oder Residuum identifizierte Beitrag trägt keine Farbinformation und wird im Farbwahrnehmungsprozess unter der Referenzlichtart nicht sichtbar. $\vec{N}_r$ hat sowohl positive als auch negative Beiträge. Auch bei den ermittelten fundamentalen Farbreizen können negative Vektor-Elemente auftreten. Es ist entscheidend, dass für die aus fundamentaler Reflexionsfunktion und metamerer Schwarzreflexionsfunktion zusammengesetzte Reflexionsfunktion $\vec{N}_i \geq 0 \forall i$ gilt, um physikalisch realisiert werden zu können. Die Bezeichnungen der fundamentalen bzw. schwarzen Anteile der Reflexionsfunktion berücksichtigen deren Wirkungsweise in Kombination mit der Referenzlichtart, was in der Gewichtung nach Gleichung (8) enthalten ist. Die $n \times n$ -Projektionsmatrix R ist vom Normalbeobachter (2°, 10°) und der verwendeten Normlichtart abhängig.

Fairman hat auf der Basis der beschriebenen Zerlegung einer spektralen Reflexionsfunktion in eine fundamentale Reflexionsfunktion für die Referenzlichtart und Residuen als metamere Schwarzreflexionsfunktion ein Modell des Restfarbabstandes parameterer Probenpaare mit geringem Farbabstand vorgeschlagen.

Seien $\vec{N}_{std}$ und $\vec{N}_{spl}$ die Reflexionsfunktionen eines parameteren Probenpaares, deren n Elemente die gemessenen Reflexionsfaktoren der jeweiligen Objektfarbe innerhalb des sichtbaren Spektralbereiches repräsentieren. Sie können mit Gleichung (16) und Gleichung (17) mittels der Cohen-Kappauf-Dekomposition in ihre fundamentalen Reflexionsfunktionen für die Referenzlichtart und metameren Schwarzreflexionsfunktionen (r) für die Referenzlichtart zerlegt werden:

$$\vec{N}_{std} = \vec{N}_{f, std} + \vec{N}_{r, std} \quad (16)$$

$$\vec{N}_{spl} = \vec{N}_{f, spl} + \vec{N}_{r, spl} \quad (17)$$

Durch Addition von metamerer Schwarzreflexionsfunktion der Testprobe (Index r, spl) und fundamentaler Reflexionsfunktion für die Referenzlichtart der Standardprobe (Index f, std) wird eine virtuelle Testprobe mit korrigierter Reflexionsfunktion $\vec{N}_{spl, corr}$ erzeugt. Diese Komposition zeigt unter der Referenzlichtart keinen

Restfarbabstand zur Standardprobe, aber nach wie vor dieselben metameren Eigenschaften verglichen mit der Standardprobe. Die resultierende Gleichung (18) dazu lautet:

$$\vec{N}_{\text{spl,corr}} = R \cdot \vec{N}_{\text{std}} + (I - R) \cdot \vec{N}_{\text{spl}} \quad (18)$$

wobei I die $n \times n$ -Einheitsmatrix darstellt und R die von Cohen und Kappauf entwickelte Dekompositions- oder Projektionsmatrix. Zur Berechnung eines speziellen Metamerie-Indexes für die Lichtart-Metamerie wird die experimentelle Reflexionsfunktion der Testprobe $\vec{N}_{\text{spl}}$ durch die mittels der spektralen Korrektur modifizierte Reflexionsfunktion $\vec{N}_{\text{spl,corr}}$ ersetzt.

ANMERKUNG 1 Anhang A enthält Rechenbeispiele.

Zusammengefasst erfordert die Berechnung des Metamerie-Indexes für das Verfahren der spektralen Korrektur die folgenden Schritte.

- 1) Es werden die radiometrischen Funktionen $\vec{N}_{\text{std}}$ und $\vec{N}_{\text{spl}}$ der Standardprobe bzw. der Testprobe gemessen.
- 2) Es werden die Wichtungsmatrix A für die Referenzlichtart und die entsprechende Wichtungsmatrix A_t für die Testlichtart berechnet.
- 3) Es wird die Cohen-Kappauf-Matrix R für die Referenzlichtart nach Gleichung (19) berechnet:

$$R = A(A^T \cdot A)^{-1} A^T \quad (19)$$

- 4) Es wird die radiometrische Funktion der korrigierten Testprobe nach Gleichung (20) berechnet:

$$\vec{N}_{\text{spl,corr}} = R \cdot \vec{N}_{\text{std}} + (I - R) \cdot \vec{N}_{\text{spl}} \quad (20)$$

Dabei ist I die Einheitsmatrix.

- 5) Es werden die Farbwerte für die Referenzlichtart nach Gleichung (21) und Gleichung (22):

$$\vec{W}_{\text{std}} = A^T \cdot \vec{N}_{\text{std}} \quad (21)$$

$$\vec{W}_{\text{spl,corr}} = A^T \cdot \vec{N}_{\text{spl,corr}} \quad (22)$$

und für die Testlichtart nach Gleichung (23) und Gleichung (24) berechnet:

$$\vec{W}_{\text{std,t}} = A_t^T \cdot \vec{N}_{\text{std}} \quad (23)$$

$$\vec{W}_{\text{spl,corr,t}} = A_t^T \cdot \vec{N}_{\text{spl,corr}} \quad (24)$$

ANMERKUNG 2 Es ist zu beachten, dass $\vec{W}_{\text{std}} = \vec{W}_{\text{spl,corr}}$ unter der Referenzlichtart und dass die fundamentalen Anteile von $\vec{W}_{\text{std,t}}$ und $\vec{W}_{\text{spl,corr,t}}$ unter der Testlichtart angeglichen sind und etwaige Differenzen zwischen $\vec{W}_{\text{spl,corr,t}}$ und $\vec{W}_{\text{std,t}}$ nur durch den Restanteil von $\vec{N}_{\text{spl,corr}}$ eingeführt werden, der bei der Referenzlichtart schwarz erscheint und bei der Testlichtart verändert ist.

- 6) Es werden der Farbabstand zwischen $W_{\text{std,t}}$ und $W_{\text{spl,corr,t}}$ mithilfe eines beliebigen geeigneten Systems sowie der Metamerie-Index berechnet. Für den CIELAB-Farbraum ergeben sich beispielsweise Gleichung (25) bis Gleichung (28):

$$M_t(\text{spectr}) = \sqrt{(\Delta L_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta a_{\text{corr}}^*)^2 + (\Delta b_{\text{corr}}^*)^2} \quad (25)$$