ISBN 978-3-901906-97-8
DOI: 10.25039/TR.228.2018

International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

TECHNICAL REPORT

Grey-Scale Calculation for Self-Luminous Devices

CIE 228:2018

UDC: 159.937.51
612.843.31
535.66

Descriptor: Perception of colour
Colour vision
Colorimetry

THE INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION

The International Commission on Illumination (CIE) is an organization devoted to international co-operation and exchange of information among its member countries on all matters relating to the art and science of lighting. Its membership consists of the National Committees in about 40 countries.

The objectives of the CIE are:

1. To provide an international forum for the discussion of all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting and for the interchange of information in these fields between countries.
2. To develop basic standards and procedures of metrology in the fields of light and lighting.
3. To provide guidance in the application of principles and procedures in the development of international and national standards in the fields of light and lighting.
4. To prepare and publish standards, reports and other publications concerned with all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting.
5. To maintain liaison and technical interaction with other international organizations concerned with matters related to the science, technology, standardization and art in the fields of light and lighting.

The work of the CIE is carried out by Technical Committees, organized in seven Divisions. This work covers subjects ranging from fundamental matters to all types of lighting applications. The standards and technical reports developed by these international Divisions of the CIE are accepted throughout the world.
A plenary session is held every four years at which the work of the Divisions and Technical Committees is reported and reviewed, and plans are made for the future. The CIE is recognized as the authority on all aspects of light and lighting. As such it occupies an important position among international organizations.

LA COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE

La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) est une organisation qui se donne pour but la coopération internationale et l'échange d'informations entre les Pays membres sur toutes les questions relatives à l'art et à la science de l'éclairage. Elle est composée de Comités Nationaux représentant environ 40 pays.

Les objectifs de la CIE sont :

1. De constituer un centre d'étude international pour toute matière relevant de la science, de la technologie et de l'art de la lumière et de l'éclairage et pour l'échange entre pays d'informations dans ces domaines.
2. D'élaborer des normes et des méthodes de base pour la métrologie dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
3. De donner des directives pour l'application des principes et des méthodes d'élaboration de normes internationales et nationales dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
4. De préparer et publier des normes, rapports et autres textes, concernant toutes matières relatives à la science, la technologie et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.
5. De maintenir une liaison et une collaboration technique avec les autres organisations internationales concernées par des sujets relatifs à la science, la technologie, la normalisation et l'art dans les domaines de la lumière et de l'éclairage.

Les travaux de la CIE sont effectués par Comités Techniques, organisés en sept Divisions. Les sujets d'études s'étendent des questions fondamentales, à tous les types d'applications de l'éclairage. Les normes et les rapports techniques élaborés par ces Divisions Internationales de la CIE sont reconnus dans le monde entier.
Tous les quatre ans, une Session plénière passe en revue le travail des Divisions et des Comités Techniques, en fait rapport et établit les projets de travaux pour l'avenir. La CIE est reconnue comme la plus haute autorité en ce qui concerne tous les aspects de la lumière et de l'éclairage. Elle occupe comme telle une position importante parmi les organisations internationales.

DIE INTERNATIONALE BELEUCHTUNGSKOMMISSION

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) ist eine Organisation, die sich der internationalen Zusammenarbeit und dem Austausch von Informationen zwischen ihren Mitgliedsländern bezüglich der Kunst und Wissenschaft der Lichttechnik widmet. Die Mitgliedschaft besteht aus den Nationalen Komitees in rund 40 Ländern.

Die Ziele der CIE sind:

1. Ein internationales Forum für Diskussionen aller Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik und für den Informationsaustausch auf diesen Gebieten zwischen den einzelnen Ländern zu sein.
2. Grundnormen und Verfahren der Messtechnik auf dem Gebiet der Lichttechnik zu entwickeln.
3. Richtlinien für die Anwendung von Prinzipien und Vorgängen in der Entwicklung internationaler und nationaler Normen auf dem Gebiet der Lichttechnik zu erstellen.
4. Normen, Berichte und andere Publikationen zu erstellen und zu veröffentlichen, die alle Fragen auf dem Gebiet der Wissenschaft, Technik und Kunst der Lichttechnik betreffen.
5. Liaison und technische Zusammenarbeit mit anderen internationalen Organisationen zu unterhalten, die mit Fragen der Wissenschaft, Technik, Normung und Kunst auf dem Gebiet der Lichttechnik zu tun haben.

Die Arbeit der CIE wird durch Technische Komitees geleistet, die in sieben Divisionen organisiert sind. Diese Arbeit betrifft Gebiete mit grundlegendem Inhalt bis zu allen Arten der Lichtanwendung. Die Normen und Technischen Berichte, die von diesen international zusammengesetzten Divisionen ausgearbeitet werden, sind auf der ganzen Welt anerkannt.
Alle vier Jahre findet eine Session statt, in der die Arbeiten der Divisionen berichtet und überprüft werden, sowie neue Pläne für die Zukunft ausgearbeitet werden. Die CIE wird als höchste Autorität für alle Aspekte des Lichtes und der Beleuchtung angesehen. Auf diese Weise unterhält sie eine bedeutende Stellung unter den internationalen Organisationen.

Published by the

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE
CIE Central Bureau
Babenbergerstrasse 9, A-1010 Vienna, AUSTRIA
Tel: +43(1)714 31 87
e-mail: ciecb@cie.co.at
www.cie.co.at

International Commission on Illumination
Commission Internationale de l'Eclairage
Internationale Beleuchtungskommission

ISBN 978-3-901906-97-8
DOI: 10.25039/TR.228.2018

TECHNICAL REPORT

Grey-Scale Calculation for Self-Luminous Devices

CIE 228:2018

UDC:	159.937.51	Descriptor:	Perception of colour
	612.843.31		Colour vision
	535.66		Colorimetry

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 1-93 of Division 1 "Vision and Colour" and has been approved by the Board of Administration as well as by Division 1 of the Commission Internationale de l'Eclairage. The document reports on current knowledge and experience within the specific field of light and lighting described, and is intended to be used by the CIE membership and other interested parties. It should be noted, however, that the status of this document is advisory and not mandatory.

Ce rapport technique a été élaboré par le Comité Technique CIE 1-93 of Division 1 "Vision et Couleur" et a été approuvé par le Bureau et Division 1 de la Commission Internationale de l'Eclairage. Le document expose les connaissances et l'expérience actuelles dans le domaine particulier de la lumière et de l'éclairage décrit ici. Il est destiné à être utilisé par les membres de la CIE et par tous les intéressés. Il faut cependant noter que ce document est indicatif et non obligatoire.

Dieser Technische Bericht ist vom Technischen Komitee CIE 1-93 of Division 1 "Sehen und Farbe" ausgearbeitet und vom Vorstand sowie Division 1 der Commission Internationale de l'Eclairage gebilligt worden. Das Dokument berichtet über den derzeitigen Stand des Wissens und Erfahrung in dem behandelten Gebiet von Licht und Beleuchtung; es ist zur Verwendung durch CIE-Mitglieder und durch andere Interessierte bestimmt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass das Dokument eine Empfehlung und keine Vorschrift ist.

Any mention of organizations or products does not imply endorsement by the CIE. Whilst every care has been taken in the compilation of any lists, up to the time of going to press, these may not be comprehensive.

Toute mention d'organisme ou de produit n'implique pas une préférence de la CIE. Malgré le soin apporté à la compilation de tous les documents jusqu'à la mise sous presse, ce travail ne saurait être exhaustif.

Die Erwähnung von Organisationen oder Erzeugnissen bedeutet keine Billigung durch die CIE. Obgleich große Sorgfalt bei der Erstellung von Verzeichnissen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung angewendet wurde, besteht die Möglichkeit, dass diese nicht vollständig sind.

The following members of TC 1-93 "Calculation of Self-Luminous Neutral Scale" took part in the preparation of this Technical Report. The committee comes under Division 1 “Colour and Vision”.

Authors:

Carter, R. (Chair)	**USA**
Ayama, M.	Japan
Green, P.	United Kingdom
Krupinski, E.	USA
Oleari, C. †	Italy
Smet, K.A.G.	Belgium

Acknowledgement:

The committee would like to thank those who, although not members of the committee, contributed to the preparation of this report: K. Baah (author of Annex C), D. Couzin (author of Annex B), R. Huertas (contributor to Clauses 3.1 and 3.2), S. McFadden (co-author of Annex A), M. Melgosa (co-author of Clause 3.3 with C. Oleari and contributor to Clause 3.2), M.R. Pointer, and D.C. Rich (especially regarding the meaning of “neutral”).

CONTENTS

GREY-SCALE CALCULATION FOR SELF-LUMINOUS DEVICES

Summary

Contemporary colour media, to which a self-luminous grey (or more generally, neutral) scale would apply, include light emitting diode (LED) displays and liquid crystal displays (LCD). Every colour-difference calculation has a neutral or achromatic component. In stand-alone mode, this neutral scale can be used to calculate barely-visible threshold changes in luminance, equal-appearing suprathreshold steps of grey scale, matching grey appearance or conspicuousness of grey targets during visual search. CIE lightness, L^*, as part of the CIELAB and CIELUV colour spaces, was developed to serve similar purposes for reflective materials, and it was adapted in 1983 for use with cathode-ray tube (CRT) displays. Self-luminous devices such as computer displays, wide-area luminaires (when used not for lighting but for artistic or information purposes), advertising media, signage, safety lights, scientific and medical displays, avionics and heads-up displays, often exhibit high luminance, high spatial resolution and high contrast that require a self-luminous neutral scale. A self-luminous neutral scale does not require specification of a reference white; instead it is a function of the background luminance of the visual target, thus the scale has no upper limit. Because the self-luminous neutral scale can involve high contrast over a small visual subtense, it accounts for intraocular scattering. Finally, a self-luminous neutral scale enables the calculation of colour differences (e.g. CIELAB, CIEDE2000, or OSA-UCS) between self-luminous image segments, including consideration of a neutral point. This report recommends a method to calculate a self-luminous neutral scale fulfilling these requirements. The report also refers to applications, for which the recommended calculation could be improved:

- for mesopic light levels (e.g. cinema and video);
- to calculate effects of any particular visual subtense and shape of contrasts;
- to reflect the effects of stimulus geometry (e.g. comparison of adjoining fields versus separated fields);
- to incorporate post-retinal effects (e.g. due to visual cortical computations, such as the white point), and highlights in the surround not adjoining the visual target.

CALCUL D'ECHELLE GRISE POUR DISPOSITIFS AUTO-LUMINEUX

Résumé

Les médias de couleur contemporains, auxquels une échelle grise auto-lumineuse (ou plus généralement neutre) s'appliquerait, comprennent les écrans à diodes électroluminescentes (DEL) et les écrans à cristaux liquides (LCD). Chaque calcul de différence de couleur a une composante neutre ou achromatique. En mode autonome, cette échelle neutre peut être utilisée pour calculer des changements de valeur de seuil en luminance à peine visibles, des échelons supra-seuils d'échelles de gris à l'apparence égale, l'apparence grise correspondante ou la visibilité de cibles grises pendant la recherche visuelle. La luminosité CIE, L^*, qui fait partie des espaces colorimétriques CIELAB et CIELUV, a été développée pour servir des objectifs similaires en ce qui concerne les matériaux réfléchissants, et a été adaptée en 1983 pour être appliquée sur les écrans à tube cathodique (CRT). Les dispositifs auto-lumineux tels que les écrans d'ordinateur, les luminaires à grande surface (utilisés pour des raisons artistiques ou informatives, au lieu de raison d'éclairage), les panneaux publicitaires, les enseignes, l'éclairage de sécurité, les écrans scientifiques et médicaux, l'avionique et les affichages tête haute présentent souvent une luminance élevée, de haute résolution spatiale et de contraste élevé, qui nécessite une échelle neutre auto-lumineuse. Une échelle neutre auto-lumineuse ne nécessite pas de spécification de blanc de référence; au contraire, elle est fonction de la luminance de fond de la cible visuelle, donc l'échelle n'a pas de limite supérieure. Comme l'échelle neutre auto-lumineuse peut impliquer un contraste élevé sur un angle apparent limité, elle prend en compte la diffusion intraoculaire. Enfin, une échelle neutre auto-lumineuse permet de calculer de différences de couleur (par exemple CIELAB, CIEDE2000 ou OSA-UCS) entre des segments d'image auto-lumineux, y compris la prise en compte d'un point neutre. Ce rapport recommande une méthode de calcul d'une échelle neutre auto-lumineuse répondant à

ces exigences. Le rapport fait également référence à des applications pour lesquelles le calcul recommandé pourrait être amélioré:

- pour les niveaux de lumière mésopique (par exemple cinéma et vidéo);
- pour calculer l'effet de tout angle visuel particulier, et de la forme des contrastes;
- pour refléter les effets de la géométrie du stimulus (par exemple, comparaison de champs adjacents par rapport aux champs séparés);
- pour incorporer des effets post-rétiniens (par exemple en raison de calculs corticaux visuels, tels que le point blanc), et des surbrillances dans le champ périphérique qui ne sont pas adjacentes à la cible visuelle.

GRAUSKALABERECHNUNG FÜR SELBSTLEUCHTENDE GERÄTE

Zusammenfassung

Zu aktuellen Farbmedien, auf die eine Grau- (oder genereller, Neutral-) Skala für Selbstleuchter angewendet würde, gehören Leuchtdioden- (LED) Bildschirme und Flüssigkristall- (LCD-) Bildschirme. Jede Farbdifferenzberechnung hat eine neutrale oder achromatische Komponente. Im eigenständigen Modus kann diese Neutralskala benutzt werden zur Berechnung kaum erkennbarer Leuchtdichte-Schwellenänderungen, gleich erscheinender überschwelliger Graustufenschritte, welche mit der Grauerscheinung oder Sichtbarkeit grauer Objekte bei visueller Suche übereinstimmen. CIE Helligkeit, L^*, als Komponente der CIELAB- und CIELUV-Farbräume, wurde entwickelt, um ähnliche Zwecke für reflektierende Materialien zu erfüllen, und wurde 1983 für die Nutzung im Zusammenhang mit Röhrenbildschirmen übernommen. Selbstleuchtende Geräte wie Computer-Bildschirme, großflächige Leuchten (nicht für Beleuchtungs- sondern für künstlerische oder Informationszwecke), Werbemedien, Beschilderung, Sicherheitsleuchten, wissenschaftliche und medizinische Bildschirme, Avionik- und Warnbildschirme haben häufig eine hohe Leuchtdichte, eine hohe räumliche Auflösung und hohen Kontrast, was eine Neutralskala für Selbstleuchter erforderlich macht. Eine Neutralskala für Selbstleuchter erfordert nicht die Spezifikation einer (Weiß-) Referenz-Leuchtdichte; stattdessen ist es eine Funktion der Hintergrundleuchtdichte des Sehobjekts, somit hat die Skala keine obere Grenze. Da die Neutralskala für Selbstleuchter einen hohen Kontrast über einen kleinen Sehbereich beinhalten kann, bedingt sie intraokulare Streuung. Schließlich ermöglicht eine Neutralskala für Selbstleuchter die Berechnung von Farbdifferenzen (z.B. CIELAB, CIEDE2000 oder OSA-UCS) zwischen selbstleuchtenden Bildsegmenten, inklusive Berücksichtigung eines Neutralpunkts. Dieser Bericht empfiehlt eine Methode zur Berechnung einer Neutralskala für Selbstleuchter, die diese Anforderungen erfüllt. Der Bericht weist auch auf Anwendungen hin, für die die empfohlene Berechnung verbessert werden könnte:

- mesopische Lichtniveaus (z.B. Kino und Video);
- die Berechnung von Effekten jeglichen Sehbereichs und jeglicher Kontrastform;
- die Wiedergabe von Effekten der Geometrie des Sehreizes (z.B. Vergleich angrenzender Felder mit getrennten Feldern);
- die Einbindung post-retinaler Effekte (z.B. aufgrund visueller kortikaler Berechnungen, wie etwa der Weißpunkt), und Highlights im Umfeld, die nicht an das Sehobjekt angrenzen.

1 Introduction

This report presents the calculation of a self-luminous neutral scale as a complement to the original use of CIE lightness, L^*, as defined in the CIELAB and CIELUV colour spaces (ISO/CIE, 2008; ISO/CIE, 2016), for reflective surfaces.

The CIE colour-matching function $\bar{y}(\lambda)$ was defined to be the same as the spectral luminous efficiency for photopic vision, $V(\lambda)$, (Wyszecki and Stiles, 1982). $V(\lambda)$ was defined based on self-luminous flicker photometry. According to Wyszecki and Stiles (p. 157), in photometry "the Y-tristimulus value in the CIE 1931 system becomes the luminance". In applications to object-colour stimuli, in "most practical situations, only relative spectral radiant power distributions of the given light sources are required". Hence, the "Y-tristimulus value of the object-color stimulus, …, defines the *luminance-factor* of the object color stimulus". For Wyszecki and Stiles most practical situations involved reflective objects of colorimetry and isolated coloured lights, not self-luminous electronic displays with high luminance, high resolution and high contrast. The luminance of light reflected from an object depends upon the reflectance of the object and the luminous intensity of the light from the radiant source that illuminates the object. The luminous intensity of the source was measured as the Y tristimulus value of magnesium oxide or barium sulphate illuminated by that source. These highly-reflective materials were later idealized as a perfect diffuse reflector such that all of the energy incident upon the material will be reflected back into the hemisphere above the perfect diffuse reflector. When the CIELAB and CIELUV colour differences were developed (Robertson, 1977), Semmelroth suggested a pseudo-adaptation transform dividing the luminance of an object, Y, by the luminance of the perfect diffuse reflector (at first designated Y_0 and later designated Y_n as it is today). A perfect diffuse reflector would have a reflectance of Y/Y_n = 100 % and thus a maximum L^* magnitude of 100. Other tristimulus values, X and Z, are normalized to Y/Y_n = 100. Wyszecki and Stiles (1982) state (pp. 167, 168): "The tristimulus values X_n, Y_n and Z_n are those of the nominally white stimulus. … Under these conditions, X_n, Y_n and Z_n are the tristimulus values of the standard illuminant with Y_n equal to 100." The point is that, depending upon whether your application requires only relative information or the actual luminance of the visual target, Y_n can be thought of as unitless, defined as 100, or alternatively as a maximum luminance of a particular radiant source or reflective object (Pointer, 2017; Fairman, 2017). The self-luminous neutral scale recommended in this report is in the latter category (requiring actual luminances measured in cd·m^{-2}), whereas standard current practice (media-relative colorimetry) is in the former.

The use of CIE lightness, L^*, in colour-difference calculations for self-luminous electronic displays is based on a recommendation by Carter and Carter (1983), in which the tristimulus value of the white point, Y_n, is set equal to the numerical value of luminance obtained with maximum intensity on all display primaries, and the medium white point is completed by setting the other tristimulus values X_n and Z_n to CIE standard illuminant D65, relative to Y_n. This is different from the case of reflective media or isolated coloured lights, where Y_n is proportional to the luminance of a perfect diffuse reflector illuminated by a radiant source. Since the tristimulus values X_n, Y_n and Z_n represent the medium white point, the calculation of L^* is said to be "media relative" (for the definition of "media-relative colorimetry" see Annex A). In media-relative colorimetry, L^* represents the lightness relative to the range of luminances available from a specific self-luminous medium; this has become common practice (Oleari, 2016; Tooms, 2016).

1.1 Problem statement

Problems with the expedient extension of L^* into the self-luminous domain have been apparent for a long time. Contemporaneous with the recommendation, the Boeing Company was developing self-luminous electronic displays for use on the flight deck of aircraft (Silverstein and Merrifield, 1985). Of the Carter and Carter recommendation (Carter and Carter, 1983), Silverstein and Merrifield commented: "While this solution is not entirely satisfactory, it does preserve ΔE^* scale invariance with respect to the choice of luminance units and provides an acceptable interim recommendation. The choice of appropriate neutral reference values for color difference formulations to be used with self-luminous color displays will be a priority topic for a newly formed CIE committee on revised standards for self-luminous displays." The "priority topic" was attributed to Justin J. Rennilson in a personal communication with Silverstein and Merrifield. Rennilson confirmed (in communication with the chairman of TC 1-93) recently that this topic was not resolved by CIE TC 1-10, which had been formed to study colorimetric measurements and their correlations with colour appearance, for self-luminous displays, and published CIE 087-1990 *Colorimetry of Self-Luminous Displays, A Bibliography* (CIE, 1990).

Two long-standing objectives remain:

- the choice of appropriate neutral reference values for self-luminous colour-difference formulations;
- improvement upon the "not-entirely satisfactory" nature of using maximum image or device luminance as the normalizing factor in L^*.

What is unsatisfactory about using maximum luminance (of a medium or an image) as the self-luminous normalizing factor of L^*? Recent reviews (Gilchrist et al., 1999; Kingdom, 2011) warn against anchoring a grey scale to the maximum luminance and against thinking of the maximum luminance as white. The Gelb Effect illustrates the instability of normalizing a grey scale to Y_n; the entire grey scale is altered by a new maximum luminance. A consequence of Y_n representing the maximum luminance of the medium is that L^* is undefined for a target luminance greater than Y_n, which is a problem familiar to experienced practitioners (Pointer, 2015). Examples include fluorescence, hyper-additivity of display primaries, changes of a power source or display device, changes of ambient light transmitted (e.g. in a heads-up display) or reflected, or a different image than the one used to establish Y_n. It would be more satisfactory to have a self-luminous lightness calculation that is not sensitive to assumptions about Y_n, and that does not have an upper limit. Furthermore, the parameters of L^* were fit to Munsell Value (Robertson, 1977), a scale of *reflective* lightness. The same L^* parameters and assumptions apply when L^* is extended into the self-luminous domain. For instance, the full scale of L^* assumes a Munsell Value N/5 reflective background. Perceptual phenomena accentuated by self-luminous stimuli, such as crispening and the black point, may not be adequately represented by assumptions retained in a self-luminous lightness calculation imported from the reflective domain.

Lightness constancy is the cornerstone of L^* as originally applied to reflective surfaces. Constancy refers to a neutral scale appearing unaltered when the intensity of the illuminant changes. For reflective samples, the ratio Y/Y_n is unaltered when the illuminant intensity changes. Indeed, the target luminance (represented by the numerical value Y) and the perfect diffuse reflector luminance (represented by the numerical value Y_n) are each proportional to the intensity of the light source illuminating the surfaces. As a result, Munsell Value and L^* for reflective lightness are constant despite changes of source intensity. However, is constancy a reliable cornerstone for a self-luminous lightness calculation? For low contrasts (e.g. less than a 10:1 luminance ratio of a visual target luminance to a background luminance), constancy is preserved at least approximately. For higher contrast ratios (beyond those achievable with ordinary reflective samples), lightness constancy is increasingly doubtful (see Figure 1 and (Heinemann, 1989)). It would be more satisfactory to avoid assuming lightness constancy for high-contrast, self-luminous applications.

Hunt (1997) explains why the neutral-scale component of a self-luminous colour image is so important: it establishes a neutral point for colour-difference (see Clauses 3 and 4), it adjusts contrasts for the luminance of the background (see Clause 2), and it efficiently transmits and displays a sharp image (see Clause 2).