



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

ISBN 978-3-902842-06-0

# TECHNICAL REPORT

## **Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams**

**CIE 170-2:2015**

---

UDC: 612.84  
535.66

Descriptor: Physiological optics. 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



ISBN 978-3-902842-06-0

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

# TECHNICAL REPORT

## **Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 2: Spectral Luminous Efficiency Functions and Chromaticity Diagrams**

**CIE 170-2:2015**

---

UDC: 612.84  
535.66

Descriptor: Physiological optics. vision  
Colorimetry

This Technical Report has been prepared by CIE Technical Committee 1-36 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 1-36 de la 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 1-36 der 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 1-36 "Fundamental chromaticity diagram with physiologically significant axes" took part in the preparation of this technical report. The committee comes under Division 1 "Vision and Colour".

Authors:

<b>Viénot, F.</b>	<b>France (Chair)</b>
MacLeod, D.	USA
Mollon, J.D.	United Kingdom
Moreland, J.D.	United Kingdom
Pokorny, J.	USA
Sharpe, L.T.	Germany
Stockman, A.	United Kingdom
Valberg, A.	Norway
Vos, J.J.	Netherlands
Walraven, P.L. †	Netherlands (Secretary)
Wold, J.H.	Norway

Advisor:

Yaguchi, H.	Japan
-------------	-------

## CONTENTS

Summary .....	VI
Résumé .....	VI
Zusammenfassung.....	VII
Introduction to Part 2 .....	1
7 Photometric Aspects; the Choice of the Cone-Fundamental-Based Spectral Luminous Efficiency Functions .....	2
7.1 Task Definition .....	2
7.2 The Cone-Fundamental-Based Spectral Luminous Efficiency Functions $V_{F,q}(\lambda)$ and $V_F(\lambda)$ for 2° Field Size .....	2
7.3 The Cone-Fundamental-Based Spectral Luminous Efficiency Functions $V_{F,q,10}(\lambda)$ and $V_{F,10}(\lambda)$ for 10° Field Size .....	4
8 Chromaticity Diagrams .....	6
8.1 The MacLeod–Boynton Chromaticity Diagram .....	6
8.1.1 MacLeod–Boynton Tristimulus Values .....	6
8.1.2 The MacLeod–Boynton Constant LM-Luminance Plane .....	9
8.1.3 The MacLeod–Boynton Chromaticity Diagram.....	9
8.1.4 The MacLeod–Boynton Chromaticity Diagram for 2° Field Size.....	10
8.1.5 The MacLeod–Boynton Chromaticity Diagram for 10° Field Size.....	11
8.2 Cone-Fundamental-Based Colorimetric Systems Compliant with the Principles of the CIE XYZ Concept .....	13
8.2.1 Task Definition .....	13
8.2.2 Cone-Fundamental-Based Tristimulus Values and Cone-Fundamental-Based Chromaticity Coordinates .....	13
8.2.3 The General CIE XYZ Concept.....	14
8.2.4 Cone-Fundamental-Based Spectral Tristimulus Values for 2° Field Size.....	15
8.2.5 The $(x_F, y_F)$ Cone-Fundamental-Based Chromaticity Diagram for 2° Field Size .....	17
8.2.6 Cone-Fundamental-Based Spectral Tristimulus Values for 10° Field Size.....	18
8.2.7 The $(x_{F,10}, y_{F,10})$ Cone-Fundamental-Based Chromaticity Diagram for 10° Field Size.....	21
8.2.8 Practical Calculation of the Cone-Fundamental-Based Tristimulus Values.....	23
8.2.9 Comparison between Chromaticity Diagrams.....	24
9 Conclusion to Part 2 .....	25
10 Tables .....	26
Table 10.1 – The cone-fundamental-based spectral luminous efficiency function for 2° field size in terms of quanta (logarithmic values to base 10, in 5-nm steps).....	27
Table 10.2 – The cone-fundamental-based spectral luminous efficiency function for 2° field size in terms of energy (in 1-nm steps).....	28
Table 10.3 – The cone-fundamental-based spectral luminous efficiency function for 10° field size in terms of quanta (logarithmic values to base 10, in 5-nm steps).....	32
Table 10.4 – The cone-fundamental-based spectral luminous efficiency function for 10° field size in terms of energy (in 1-nm steps).....	33
Table 10.5 – Spectral MacLeod–Boynton chromaticity coordinates for 2° field size.....	37

Table 10.6 – Spectral MacLeod–Boynton chromaticity coordinates for 10° field size .....	39
Table 10.7 – Cone-fundamental-based spectral tristimulus values and spectral chromaticity coordinates for 2° field size .....	41
Table 10.8 – Cone-fundamental-based spectral tristimulus values and spectral chromaticity coordinates for 10° field size.....	51
References .....	61

## **FUNDAMENTAL CHROMATICITY DIAGRAM WITH PHYSIOLOGICAL AXES – PART 2: SPECTRAL LUMINOUS EFFICIENCY FUNCTIONS AND CHROMATICITY DIAGRAMS**

### **Summary**

CIE established, in 1991, the Technical Committee TC 1-36 with the following Terms of Reference: "Establish a fundamental chromaticity diagram of which the coordinates correspond to physiologically significant axes".

Part 1 of the report is presented in CIE 170-1 *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1: Definition of CIE 2006 Cone Fundamentals*. It is limited to the choice of a set of colour-matching functions (CMFs) and estimates of cone fundamentals for the normal observer, ranging in visual angle (field size) from 1° to 10°.

This report, entitled Part 2, aims at providing the user with practical colorimetric tools, in the form of chromaticity diagrams.

The report starts with the definition of cone-fundamental-based spectral luminous efficiency functions as a linear combination of the long-wave sensitive and the middle-wave sensitive cone fundamentals, following the proposal of Sharpe et al. (2011). Cone-fundamental-based spectral luminous efficiency functions are proposed for the 2° and for the 10° photometric observers.

The definition of the cone-fundamental-based spectral luminous efficiency functions offers the possibility of developing MacLeod–Boynton chromaticity diagrams based on cone fundamentals where the chromaticity is represented in an equi-luminant plane. MacLeod–Boynton tristimulus values  $L_{MB}$ ,  $M_{MB}$  and  $S_{MB}$  are computed in the traditional form, while chromaticity coordinates  $l_{MB}$  and  $s_{MB}$  are computed so as to preserve the equi-luminant property of the diagram.

In addition, to allow for comparisons with the traditional CIE procedures, transformations of the cone fundamentals in the form of cone-fundamental-based  $X_F$ ,  $Y_F$ ,  $Z_F$  tristimulus values and  $x_F$ ,  $y_F$  chromaticity coordinates are presented. Criteria that a colorimetric system should fulfil are maintained, and the properties of the spectral tristimulus values, summarized by Wold and Valberg (1999), are described in detail. The linear transformations that should be used to compute the  $X_F$ ,  $Y_F$ ,  $Z_F$  tristimulus values from the cone fundamentals are given with the number of decimal places necessary to produce spectral tristimulus values with 7 significant figures.

The report ends with tables and references.

All tables are downloadable in an Excel® file at [http://files.cie.co.at/813\\_Tables\\_CIE\\_170-2.xls](http://files.cie.co.at/813_Tables_CIE_170-2.xls).

## **DIAGRAMME FONDAMENTAL DE CHROMATICITE AVEC DES AXES PHYSIOLOGIQUES – PARTIE 2: FONCTIONS D'EFFICACITÉ LUMINEUSE SPECTRALE ET DIAGRAMMES DE CHROMATICITÉ**

### **Résumé**

La CIE a créé, en 1991, le Comité technique TC 1-36 avec pour mandat : «Etablir un diagramme de chromaticité fondamental dont les coordonnées correspondent à des axes physiologiquement significatifs».

La première partie du rapport a été publiée dans le document CIE 170-1 *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1: Definition of CIE 2006 Cone Fundamentals*. Elle se limite au choix d'un ensemble de fonctions colorimétriques et à



l'estimation des fondamentales de cônes pour l'observateur à vision des couleurs normale, couvrant un champ visuel de 1° à 10°.

Ce rapport-ci, intitulé Partie 2, vise à fournir à l'utilisateur des outils colorimétriques pratiques, sous la forme de diagrammes de chromaticité.

Le rapport commence par la définition des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale fondamentales comme résultant d'une combinaison linéaire de la fondamentale de cônes sensibles aux grandes longueurs d'onde et de la fondamentale de cônes sensibles aux moyennes longueurs d'onde, d'après la proposition de Sharpe et al. (2011). Des fonctions d'efficacité lumineuse spectrale fondamentales sont proposées pour les observateurs photométriques 2° et 10°.

La définition des fonctions fondamentales de l'efficacité lumineuse spectrale permet de développer des diagrammes de chromaticité selon MacLeod–Boynton basés sur les fondamentales de cônes où la chromaticité est représenté dans un plan équiluminant. Les composantes trichromatiques  $L_{MB}$ ,  $M_{MB}$  et  $S_{MB}$  selon MacLeod–Boynton sont calculées sous la forme traditionnelle, tandis que les coordonnées trichromatiques  $l_{MB}$  et  $s_{MB}$  sont calculées de manière à préserver la propriété equi-luminante du diagramme.

En outre, pour permettre des comparaisons avec les procédures traditionnelles de la CIE, on présente des transformations de fondamentales de cônes en composantes trichromatiques  $X_F$ ,  $Y_F$  et  $Z_F$  basées sur les fondamentales de cônes et des coordonnées trichromatiques  $x_F$  et  $y_F$ . Les critères que doit respecter un système colorimétrique sont maintenus ainsi que les propriétés des fonctions colorimétriques, tels que résumés par Wold et Valberg (1999), sont décrits en détail. Les transformations linéaires devant être utilisées pour calculer les composantes trichromatiques  $X_F$ ,  $Y_F$  et  $Z_F$  à partir des fondamentales de cônes sont données avec le nombre de décimales nécessaires pour produire des valeurs de composantes trichromatiques spectrales à 7 chiffres significatifs.

Tous les tableaux sont disponibles dans un fichier Excel® téléchargeable à l'adresse [http://files.cie.co.at/813\\_Tables\\_CIE\\_170-2.xls](http://files.cie.co.at/813_Tables_CIE_170-2.xls).

## **GRUNDLEGENDE FARBTAFEL MIT PHYSIOLOGISCHEN ACHSEN – TEIL 2: FUNKTIONEN DES SPEKTRALEN HELLEMPFINDLICHKEITSGRADES UND FARBTAFELN**

### **Zusammenfassung**

Im Jahre 1991 richtete die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) das technische Komitee TC 1-36 ein mit folgendem Auftrag: "Schaffung einer grundlegenden Farbtafel, deren Koordinaten physiologisch bedeutsamen Achsen entsprechen".

Teil 1 des Berichts ist in CIE 170-1 *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes – Part 1: Definition of CIE 2006 Cone Fundamentals* niedergelegt. Er ist begrenzt auf die Auswahl eines geeigneten Satzes von instrumentellen Spektralwertfunktionen und die Bereitstellung von spektralen Sehzapfen-Grundfunktionen für den Normalbeobachter, Funktionen, die für einen Sehwinkelbereich von 1° bis 10° gelten sollen.

Dieser mit Teil 2 bezeichnete Bericht hat das Ziel, dem Nutzer praktische farbmetrische Werkzeuge in Form von Farbtafeln an die Hand zu geben.

Der Bericht beginnt mit der Definition von auf Sehzapfen-Grundfunktionen basierenden Spektralwertfunktionen als eine Linearkombination der langwelligen und mittelwelligen Sehzapfen-Grundfunktionen, einem Vorschlag von Sharpe et al. (2011) folgend. Auf Sehzapfen-Grundfunktionen basierende Spektralwertfunktionen werden für den 2° und den 10° photometrischen Normalbeobachter vorgeschlagen.

Die Definition der auf Sehzapfen-Grundfunktionen basierenden Spektralwertfunktionen bietet die Möglichkeit, MacLeod–Boynton-Farbtafeln zu entwickeln, die auf Sehzapfen-Grundfunktionen basieren, wobei die Farbart in einer Ebene gleicher Leuchtdichte repräsentiert wird. MacLeod–Boynton-Farbwerte  $L_{MB}$ ,  $M_{MB}$  und  $S_{MB}$  werden in üblicher Weise berechnet, während die Farbkoordinaten  $l_{MB}$  und  $s_{MB}$  so berechnet werden, dass die Eigenschaft gleicher Leuchtdichte des Diagramms erhalten bleibt.

Des Weiteren werden, um Vergleiche mit üblichen CIE-Verfahren zu erlauben, Transformationen der Sehzapfen-Grundfunktionen in Form von auf Sehzapfen-Grundfunktionen basierenden Farbwerten  $X_F$ ,  $Y_F$ ,  $Z_F$  und Farbkoordinaten  $x_F$ ,  $y_F$  präsentiert. Von einem farbmétrischen System zu erfüllende Kriterien werden erhalten, und die Eigenschaften der spektralen Farbwerte, zusammengefasst von Wold und Valberg (1999), werden im Detail beschrieben. Die linearen Transformationen, die zur Berechnung der Farbwerte  $X_F$ ,  $Y_F$ ,  $Z_F$  aus den Sehzapfen-Grundfunktionen benutzt werden sollten, werden mit der Anzahl von Dezimalstellen angegeben, welche zur Ermittlung spektraler Farbwerte mit 7 signifikanten Stellen erforderlich sind.

Der Bericht endet mit Tabellen und Referenzen.

Alle Tabellen sind in einer Excel®-Datei unter [http://files.cie.co.at/813\\_Tables\\_CIE\\_170-2.xls](http://files.cie.co.at/813_Tables_CIE_170-2.xls) verfügbar.

## Introduction to Part 2

Since colorimetry was established in 1931, considerable improvements in the metrology of the colour stimulus and immense advances in the knowledge of colour vision have been made.

The colour sensation results from physiological processes, the first of which is the capture of photons by the cones of the retina. The fundamental sensitivities of the cones need to be precisely known to accurately specify a colour stimulus from a given spectral power distribution.

Part 1 of this report provides the scientific community with cone fundamentals, which are the relative spectral sensitivities of the long-wave sensitive (LWS), middle-wave sensitive (MWS) and short-wave sensitive (SWS) cones as measured at the entrance of the eye. The cone fundamentals have been derived from the best set of colour-matching functions experimentally collected on a 10° field. In particular, the 2° cone fundamentals, which have been reconstructed from the 10° data by guidance of psychophysical data for 2° field size, represent the best proposal available today.

Part 2 of the report aims at providing the user with practical colorimetric tools, in the form of chromaticity diagrams. The chromaticity diagram is a two-dimensional representation of colour, independent of the luminance of the colour stimulus. The hypothesis that luminous quantity as measured by flicker photometry (referred to as LM-luminance in this report) relies only on the sum of the activity of the LWS and MWS cones has been recognized, and a cone-fundamental-based spectral luminous efficiency function is implemented in Clause 7. As outlined in 8.1, this hypothesis offers the possibility of proposing an equi-luminant chromaticity diagram directly based on cone fundamentals, which is a considerable advantage for understanding colour. In addition, to allow for comparison with the traditional CIE procedures, a transformation of the cone fundamentals in the form of cone-fundamental-based XYZ tristimulus values and of an accompanying chromaticity diagram is presented in 8.2.

Part 2 ends by concluding that a link has been established between colorimetry and physiology. Such a reasoning, which has been developed by several scientists in the past, is a modern CIE approach that will improve the understanding of colour. It will be useful for education and will offer novel opportunities of solving problems of colour measurement and colour perception in everyday life and in industry.

NOTE The clause numbers in this document are continuous with respect to Part 1 of the report, i.e. start with Clause 7.