

TEXTE

05/2026

Abschlussbericht

Berücksichtigung der Lichtdienstleistung bei der Festlegung von Effi- zienzanforderungen an Produkte der Beleuch- tungstechnik

TEXTE 05/2026

EVUPLAN des Bundesministerium für Wirtschaft und
Energie

Forschungskennzahl 37EV 16 123 0
FB002027

Abschlussbericht

Berücksichtigung der Lichtdienstleistung bei der Festlegung von Effizienzanforderungen an Produkte der Beleuchtungstechnik

von

Peter Bodrogi, Quang Trinh Vinh, Tran Quoc Khanh,
Christian Becker (Lektor)
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik,
Darmstadt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik
Hochschulstraße 4a
64289 Darmstadt

Abschlussdatum:

Juli 2018

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 – Energieeffizienz
Christoph Mordziol

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren. Für die Entwicklung eines erfolgreichen Ansatzes zur Produktbewertung besteht aus Sicht der Fachbegleitung des Umweltbundesamtes weiterer Forschungsbedarf: So sind über den Betrachtungsumfang der vorliegende Studie hinaus weitere Aspekte der Lichtdienstleistung einzubeziehen. Zudem empfiehlt sich eine ausführliche Diskussion in der Fachöffentlichkeit.

Kurzbeschreibung: Berücksichtigung der Lichtdienstleistung bei der Festlegung von Effizienzanforderungen an Produkte der Beleuchtungstechnik

In diesem Dokument werden die Grundlagen für einen neuen Bewertungsansatz für die Festlegung von Effizienzanforderungen an Produkte der Beleuchtungstechnik dargestellt. Diese Methode kann verwendet werden, um die Effizienz der Beleuchtungsprodukte auf eine neue Weise zu beschreiben. Die Schwächen der $V(\lambda)$ -Funktion (als Grundlage für die heutige Berechnung der Lichtausbeute) und die Notwendigkeit für den neuen Bewertungsansatz werden erläutert. Im nächsten Schritt werden die Helligkeitswahrnehmung und deren Metriken beschrieben, sowohl im photopischen Bereich (für die Bewertung der Innenraumbeleuchtung) als auch im mesopischen Bereich (für die Bewertung der Außenbeleuchtung). Die visuellen Eigenschaften der Farbqualität und deren Metriken (der allgemeine Farbwiedergabeindex und weitere Indizes), die visuelle Qualität der Weißtöne und der Weg der circadianen Bewertung der Lichtquellspektren werden zusammengefasst. Nach der Darstellung der Metriken für die Bewertung der Einzelnutzen der Bewertungsprodukte wird die mathematische Definition des neuen Bewertungsansatzes beschrieben. Ein Datensatz von 304 Beleuchtungsprodukten wurde mit dem neuen Bewertungsansatz bewertet. Die Anzahl der Beleuchtungsprodukte unterschiedlichen Typs in den Kategorien A-G im neuen Bewertungssystem wurde bestimmt und dargestellt. Der neue Bewertungsansatz und seine Vorteile sowie Alternativen wurden erläutert.

Abstract: Considering the benefits of lighting by the development of efficiency requirements for lighting products

In this document, the fundamentals of a new evaluation method of the efficiency of lighting products are described. This method can be used to determine the efficiency of lighting products in a new way. The deficiencies of the $V(\lambda)$ function (as the method underlying the computation of luminous efficacy) and the necessity of the new evaluation method are explained. Brightness perception and its metrics are described, both in the photopic range (to evaluate interior lighting) and in the mesopic range (to evaluate exterior lighting). The visual properties of colour quality and its metrics (general colour rendering index and further indices) were summarized together with the issue of the visual quality of white tones as well as the way of the circadian evaluation of light source spectral power distributions. After introducing the metrics of these individual benefits of lighting, the mathematical definition of the new evaluation method was described. A sample dataset of 304 lighting products was evaluated by the aid of the new method. The number of lighting products of different type in the categories A-G of the new evaluation system was computed and presented. The advantages of the new method were described.

Résumé : Considérant les avantages de l'éclairage par l'élaboration d'exigences de l'efficacité pour les produits d'éclairage

Dans ce document, les bases d'une nouvelle méthode d'évaluation de l'efficacité des produits d'éclairage sont décrites. Cette méthode peut être utilisée pour déterminer l'efficacité des produits d'éclairage d'une manière nouvelle et complète. Les déficiences de la fonction $V(\lambda)$ (en tant que méthode sous-jacente au calcul de l'efficacité lumineuse) et la nécessité de la nouvelle méthode d'évaluation sont expliquées. La perception de la luminosité et ses métriques sont décrites, à la fois dans la gamme photopique (pour évaluer l'éclairage intérieur) et aussi dans la gamme mésopique (pour évaluer l'éclairage extérieur). Les propriétés visuelles de la qualité des couleurs et ses métriques (indice général de rendu des couleurs et autres indices) ont été résumés, ainsi que la question de la qualité visuelle des tons blancs et la façon circadienne d'évaluer les distributions spectrales de puissance des sources de lumière. Après avoir introduit les mé-

triques de ces avantages individuels de l'éclairage, la définition mathématique de la nouvelle méthode d'évaluation a été décrite. Un échantillon de 304 produits d'éclairage a été évalué à l'aide de la nouvelle méthode. Le nombre de produits d'éclairage de types différents dans les catégories A à G du nouveau système d'évaluation a été calculé et présenté. Les avantages et les alternatives possibles de la nouvelle méthode ont été décrits.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 10 |
| Tabellenverzeichnis | 12 |
| Abkürzungsverzeichnis | 13 |
| Zusammenfassung | 16 |
| Literatur | 23 |
| Summary | 25 |
| References | 32 |
| Résumé | 34 |
| Liste de références | 41 |
| 1 Zielstellung | 43 |
| 2 Die $V(\lambda)$-Funktion als Grundlage für die Berechnung der Lichtausbeute | 44 |
| 2.1 Einführung | 44 |
| 2.2 Netzhautmechanismen und $V(\lambda)$ -Funktion | 45 |
| 2.3 Geschichte der $V(\lambda)$ -Funktion | 48 |
| 2.4 Weitere Aspekte: Sehaufgabe, Adaptationsbereiche | 53 |
| 2.5 Zusammenfassung | 53 |
| 2.6 Literatur zu Abschnitt 2 | 54 |
| 3 Helligkeit | 56 |
| 3.1 Helligkeit im photopischen Bereich (Innenraumbeleuchtung) | 56 |
| 3.1.1 Einführung | 56 |
| 3.1.2 Äquivalente Leuchtdichte $L_{\text{äq}}$ nach Ware und Cowan | 61 |
| 3.1.3 Helligkeitsmetrik nach Fairchild und Pirrotta | 61 |
| 3.1.4 Helligkeitsmetrik nach Fotios und Levermore | 63 |
| 3.2 Helligkeit im mesopischen Bereich (Außenbeleuchtung) | 63 |
| 3.2.1 Einführung | 63 |
| 3.2.2 Mesopische Sehmodelle | 64 |
| 3.2.3 Mesopische Helligkeitsmodelle | 66 |
| 3.2.4 Mesopische Kontrastwahrnehmung | 68 |
| 3.2.5 Das mesopische Sehleistungsmodell der CIE | 70 |
| 3.3 Zusammenfassung | 74 |
| 3.4 Literatur zu Abschnitt 3 | 75 |
| 4 Farbqualität, Farbqualitätsmetriken | 76 |
| 4.1 Einführung | 76 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.2 | Definition der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex, CIE CRI R_a | 79 |
| 4.3 | Eigenschaften des Farbwiedergabeindex CIE CRI R_a | 80 |
| 4.4 | Alternative Farbwiedergabe- und Farbqualitätsindizes | 83 |
| 4.4.1 | Die CQS-Methode zur Beschreibung der Farbpräferenz: CQS Q_f , Q_a , Q_p und Q_g | 84 |
| 4.4.2 | CRI-CAM02UCS | 86 |
| 4.4.3 | RCRI (Ratingsskala-Index zur Farbwiedergabe) | 87 |
| 4.4.4 | Farbqualitätsindex nach Gedächtnisfarben (S_a) | 88 |
| 4.4.5 | Moderne Farbqualitätsmetriken nach IES (2015, TM30-15) und nach CIE 2017 | 88 |
| 4.4.6 | SBI | 91 |
| 4.4.7 | Zusammenfassung der vorgestellten neuen Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex | 93 |
| 4.5 | Literatur zu Abschnitt 4 | 94 |
| 5 | Weißtonqualität der Beleuchtungsprodukte | 97 |
| 5.1 | Literatur zu Abschnitt 5 | 98 |
| 6 | Circadiane Wirkung der Beleuchtungsprodukte | 99 |
| 6.1 | Einführung | 99 |
| 6.2 | Das Rea-et-al.-Modell für die Berechnung des Circadianen Stimulus (CS) | 101 |
| 6.3 | Der melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} (der sichtbaren Strahlung) | 103 |
| 6.4 | Zusammenfassung | 104 |
| 6.5 | Literatur zu Abschnitt 6 | 104 |
| 7 | Der neue Bewertungsansatz: Entwicklungsschritte und Vorteile | 106 |
| 7.1 | Allgemeine Vorteile des neuen Bewertungsansatzes | 106 |
| 7.2 | Vorteile der Berücksichtigung der ausgewählten Einzelnutzen im neuen Bewertungsansatz und der zur Beschreibung verwendeten Metriken | 107 |
| 7.3 | Vorteile und Nachteile der im neuen Bewertungsansatz verwendeten Kenngrößen (verwendeten und nicht verwendeten Metriken der Einzelnutzen aus Tabelle 7) im Vergleich zu anderen Metriken | 108 |
| 7.4 | Verknüpfung zwischen den identifizierten Einzelnutzen und der Verringerung der Stromeffizienz. Beschreibung der Einzelnutzen, die mit einer verringerten Stromeffizienz der Beleuchtungsprodukte verbunden sind oder sein können. Beschreibung der Entwicklungsschritte: Entscheidungen über die Aufnahme der verschiedenen Einzelnutzen in den neuen Bewertungsansatz | 109 |
| 7.5 | Literatur zu Abschnitt 7 | 113 |
| 8 | Der neue Bewertungsansatz: Mathematische Definition | 114 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 8.1 | Eingabeparameter und Ergebnis der neuen Methode..... | 114 |
| 8.2 | Mathematische Definition der Berechnungsmethode | 114 |
| 8.3 | Literaturverzeichnis zu Abschnitt 8 | 119 |
| 9 | Der neue Bewertungsansatz: Vorschlag für eine neue Grundlage zur Einteilung der Energieverbrauchsklassen (A bis G) bei der Energieverbrauchs kennzeichnung“. Zuordnung des Satzes von 304 Beleuchtungsprodukten zu diesen Klassen | 120 |
| A | Anlage A: Verbraucherwerkstatt Beleuchtung (1.11.2017 – Forsa) | 124 |
| B | Anlage B: Fragen der Umfrage im Internet | 130 |
| C | Anlage C: Austausch mit der Fachöffentlichkeit..... | 132 |
| C.1 | Zusammenkunft zwischen den Mitarbeitern der Industrievertreter des ZVEI, UBA und den Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt am 3. Juli 2017 und Tagung der LED-Leitmarktinitiative und BMWi (Vortrag von Hn. Prof. Khanh über das Vorhaben) am 14. Juli 2017..... | 132 |
| C.2 | Meeting Lighting Europe, WG (Working Group) HCL (Human Centric Lighting) am 7. September 2017 in Brüssel..... | 135 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der L-, M-, und S-Zapfen, der ipRGCs, die V-Funktion, die V'-Funktion (Stäbchen) sowie die sog. U(λ)-Funktion [27]..... | 46 |
| Abbildung 2: | Lokale winkelabhängige Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut..... | 46 |
| Abbildung 3: | Netzhautnahe Stufen der Gehirnignalverarbeitung..... | 47 |
| Abbildung 4: | Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen in den Untersuchungen vor 1923 | 49 |
| Abbildung 5: | Die spektralen Funktionen $V(\lambda)$, $V_m(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$ und $V^*(\lambda)$ | 51 |
| Abbildung 6: | Darstellung der Wechselwirkung zwischen den Strahlungsspektren (Beleuchtung), Reflexionsspektren der Objekte und dem Wahrnehmungsverhalten des menschlichen visuellen Informationsverarbeitungssystems | 56 |
| Abbildung 7: | Schema der menschlichen Sehmechanismen, die zur Helligkeitsempfindung eines Farbreizes beitragen. Das Signal der lichtempfindlichen Ganglienzellen (ipRGCs; rechts) hat ebenfalls einen Beitrag..... | 57 |
| Abbildung 8: | Relative spektrale Empfindlichkeitsfunktionen der drei Zapfentypen, der Stäbchen, der Ganglienzellen (ipRGC, intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells), der chromatischen Kanäle (L-M), (L+M-S); sowie die $V(\lambda)$ -Funktion | 58 |
| Abbildung 9: | Flimmerphotometrie nach Bechstein | 59 |
| Abbildung 10: | Helligkeit/Luminanz-Verhältnisse für monochromatische Lichtreize auf einem 2°-Gesichtsfeld | 60 |
| Abbildung 11: | Beispiel für einen sog. heterochromatischen Helligkeitsabgleich | 60 |
| Abbildung 12: | Verschiedene Ölfarben zur Untersuchung der visuellen Eigenschaften..... | 62 |
| Abbildung 13: | Vergleich der mesopischen Sehaufgaben Detektion und Helligkeitsbewertung. | 65 |
| Abbildung 14: | Signalflussdiagramm im CIE-Helligkeitsmodell [5]..... | 67 |
| Abbildung 15: | Schema der Sehmechanismen, die zur Detektion eines Sehobjektes im mesopischen Bereich beitragen..... | 69 |
| Abbildung 16: | Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für die Detektion..... | 69 |
| Abbildung 17: | Farberscheinung eines Stilllebens unter der Referenzlichtquelle (links) und der Testlichtquelle (rechts). | 77 |
| Abbildung 18: | Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex | 80 |
| Abbildung 19: | Auswahl der Testfarben (TCS) in der CIE-Farbwiedergabemethode | 81 |
| Abbildung 20: | Illustration der nicht vollkommenen Farbkonstanz: Farberscheinung eines Stilllebens mit farbigen Objekten unter niedriger Farbtemperatur | 82 |
| Abbildung 21: | Auf die CIELAB-a*-b*-Ebene projizierte Toleranzellipsoide. | 83 |
| Abbildung 22: | Testfarben der CQS-Methode (NIST, USA, Version 7.1), VS1-VS15 | 85 |
| Abbildung 23: | Doppelkammer-Beobachtungskasten zur visuellen Skalierung der wahrgenommenen Farbunterschiede (ΔE_{vis}) der gleichen zwei Farbmuster, | |

| | |
|--|-----|
| einmal unter der Testlichtquelle (in der linken Kammer) und der Referenzlichtquelle (in der rechten Kammer). | 87 |
| Abbildung 24: Die 17 RCRI-Testfarben [36], die z. T. von der MacBeth ColorChecker®-Farbtafel (oben) und z. T. vom Satz der CQS-Testfarben (unten) ausgewählt wurden | 87 |
| Abbildung 25: Farbgamut und Anordnung von 99 IES-Farben für eine Tageslichtphase und eine kaltweiße LED | 90 |
| Abbildung 26: Spektrale Reflexionsgrade und Farbortverteilung der acht CIE-Farben (CIE-1995) bei der Beleuchtung mit einem thermischen Strahler von 3200 K..... | 90 |
| Abbildung 27: Spektrale Reflexionsgrade der 99 IES Farben (IES, TM30-15, 2015)..... | 91 |
| Abbildung 28: Spektrale Reflexionsgrade und Farbortverteilung der 99 IES-Farben bei der Beleuchtung mit einem thermischen Strahler von 3200 K..... | 91 |
| Abbildung 29: Farbkoordinaten der im Experiment von M. Rea et al. empfundenen Weißpunkte..... | 97 |
| Abbildung 30: Experimentelle Daten für die Melatonin-Unterdrückung während der Nacht. | 100 |
| Abbildung 31: Spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren bzw. der Netzhautmechanismen, die zur nichtvisuellen Wirkung der Melatonin-Unterdrückung (dem sog. circadianen Reiz CS) im Rea-et-al.-Modell (außer $ L-M $) beitragen | 101 |
| Abbildung 32: Berechnungsverfahren des Rea-et-al.-Modells | 102 |
| Abbildung 33: Entwicklung des Bewertungsansatzes: Übergang vom 2-Komponenten-Konzept (oder 2D-Metrik) zur 1D-Metrik (vorgestellt am 3. 7. 2017) | 112 |
| Abbildung 34: Vergleich der beiden Kenngrößen der circadianen Wirkung, a_{mel} und CS für den Datensatz der Beleuchtungsprodukte. | 117 |
| Abbildung 35: Die Größe BioNote für den Datensatz der Beleuchtungsprodukte als Funktion der ähnlichsten Farbtemperatur CCT..... | 117 |
| Abbildung 36: Der Wert (L_{aq}/L_v) und die Größe $[(L_{aq}/L_v) + \text{BioNote}]$ als Funktion der CCT für die Beleuchtungsprodukte im Datensatz (in diesem Beispiel wird Innenraumbeleuchtung ohne Dynamik betrachtet; $\alpha=\beta=1$). | 118 |
| Abbildung 37: Die R_a -SEK-Ebene des neuen Bewertungssystems mit einem Satz von 304 Beleuchtungsprodukten..... | 120 |
| Abbildung 38: Die gleichen Lichtquellenspektren wie in Abb. 37 in einer anderen Darstellung d.h. mit der herkömmlichen Lichtausbeute (in lm/W) auf der Ordinate (statt SEK)..... | 122 |
| Abbildung 39: Beispielhafte graphische Kennzeichnung der CCT..... | 130 |
| Abbildung 40: Alternative Kennzeichnung für Leuchtmittel bezugnehmend auf die entspannendbzw. aktivierende Wirkung des Lichtes | 130 |
| Abbildung 41: Beurteilung von Lichtquellen anhand von SEK-Wert und LQ-Wert | 133 |
| Abbildung 42: Durch weitere Bearbeitung erstellte eindimensionale Darstellung der Abbildung 41 | 134 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Parameter der Untersuchungen zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeitsfunktion [7]. TP: Anzahl der Testpersonen..... | 49 |
| Tabelle 2: | Verhältnisse der nach den Funktionen $V_m(\lambda)$, $V^*(\lambda)$ und $V_{10^\circ}(\lambda)$ berechneten Leuchtdichten zu der heute gültigen $V(\lambda)$ -Leuchtdichte..... | 51 |
| Tabelle 3: | Abhängigkeit der mesopischen Leuchtdichte L_{mes} von der photopischen Leuchtdichte L und vom (S/P)-Verhältnis. | 72 |
| Tabelle 4: | Vergleich der den photopischen Wartungswerten entsprechenden mesopischen Leuchtdichten laut CIE-Modell [10] für gängige Straßen- und Kfz-Lichtquellen gemäß Tabelle 3 in den ME-Klassen der DIN EN 13201 | 73 |
| Tabelle 5: | Sehleistungsgewinn (positive Zahlen) oder Sehleistungsverlust (negative Zahlen) in Prozent, wenn die photopischen Leuchtdichten (Wartungswerte) laut DIN EN 13201 beibehalten werden. Die Berechnung basiert auf Tabelle 4 | 74 |
| Tabelle 6: | Farbqualitätsindizes im Vergleich zum CIE-Farbwiedergabeindex. Vorteile, Nachteile | 93 |
| Tabelle 7: | Liste der für den neuen Bewertungsansatz als sehr wichtig identifizierten Einzelnutzen und die zur Beschreibung verwendeten Metriken sowie alternative Metriken | 107 |
| Tabelle 8: | Die vorläufigen Grenzwerte SEK(A), Ra(A), usw. der Einstufung ins allgemeine Bewertungssystem..... | 121 |
| Tabelle 9: | Verteilung des Datensatzes der 304 Lichtquellen im allgemeinen Bewertungssystem (A-G) nach Lichtquellentyp | 123 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erklärung |
|-----------|---|
| a_{mel} | Melanopischer Wirkungsfaktor |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und –Prüfung |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| CCT | Correlated Colour Temperature: Ähnlichste Farbtemperatur |
| cd | Candela |
| CIE | Commission Internationale de l'Éclairage: Internationale Beleuchtungskommission |
| CL | Circadianes Licht |
| CPO-Lampe | Sog. „Cosmopolis“-Lampe der Firma Philips |
| CQS | Colour Quality Scale: Farbqualitätsskala |
| CRI | Colour Rendering Index : Allgemeiner Farbwiedergabeindex |
| CS | Circadian Stimulus (dt.: Circadianer Reiz) |
| D65 | Normlichtart D65: Tageslichtspektrum mit einer Farbtemperatur von 6504 K |
| EEI | Energieeffizienzindex |
| EU | Europäische Union |
| H7-Lampe | Halogenglühlampe für Fahrzeugscheinwerfer |
| HCL | Human Centric Lighting |
| HID | High Intensity Discharge, eine Hochdruckentladungslampe |
| HQL-Lampe | Halogenmetallampf-Lampe, bei Lampen der Marke Osram verwendetes Kürzel |
| HTI-Lampe | Halogen Metalldampflampe, bei Lampen der Marke Osram verwendetes Kürzel |
| Hz | Hertz |
| IES | Illuminating Engineering Society |
| ipRGC | Intrinsically photosensitive retinal ganglion cell: intrinisch photosensitive Ganglienzelle |
| K | photometrischer Strahlungsäquivalent |
| L, L_v | Leuchtdichte |
| $L_{äq}$ | Äquivalente Leuchtdichte |
| LED | Light Emitting Diode : Leuchtdiode |

| Abkürzung | Erklärung |
|------------------------|--|
| lm | Lumen |
| L_{mes} | Mesopische Leuchtdichte |
| LQ | Lichtqualitätskennzahl |
| lx | Lux |
| MH-Lampe | Halogenmetalldampf-Lampe |
| mm | Millimeter |
| NAV-Lampe | Natriumdampflampe, bei Lampen der Marke Osram verwendetes Kürzel |
| nm | Nanometer |
| P | Leistung |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| $R_{1,14}$ | Mittelwert der 14 speziellen Farbwiedergabeindizes R_1 bis R_{14} |
| R_a | Allgemeiner Farbwiedergabeindex |
| RCRI | Ratingsskala-Index zur Farbwiedergabe |
| R_f | Farbwiedergabe |
| R_g | Farbgamut |
| R_i | Spezieller Farbwiedergabeindex |
| S_a | Farbqualitätsindex nach Gedächtnisfarben |
| SBI | Subjektiver Bewertungsindex |
| SEK | Stromeffizienzkennwert |
| T5 | stabförmige Lampen mit einem Durchmesser von 5/8 Zoll, also rund 16 mm, daher auch mit „T16“ bezeichnet |
| T8 | stabförmige Lampen mit einem Durchmesser von 8/8 Zoll, also rund 26 mm, daher auch mit „T26“ bezeichnet |
| TCS | Test colour samples: Testfarben |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UCS | Uniform Colour Space |
| UGR | Unified Glare Rating: Vereinheitlichte Blendungsbewertung |
| USP | Unified System of Photometry: Vereinheitlichtes Photometrisches System |
| $V(\lambda)$ -Funktion | Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion |
| W | Watt |
| Xe-Lampe | Xenonlampe |

| Abkürzung | Erklärung |
|-----------|--|
| ZVEI | Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. |

Zusammenfassung

Die Energieeffizienz von Beleuchtungsprodukten wird z. Z. mit Hilfe der Größe *Lichtausbeute* (lm/W) bewertet. Diese Größe wird aus der Größe Lichtstrom (lm) errechnet. Die Größe *Lichtstrom* kann die Wirkung des Lichts (elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 360 nm bis 830 nm) auf die Menschen nicht vollständig beschreiben: der Lichtstrom ist keine geeignete Größe, um alle *Nutzen des Lichtes für die Menschen*, die aus allen Spektralbereichen resultieren, zu beschreiben.

Beleuchtungsprodukte und Beleuchtungssysteme ermöglichen verschiedene Sehaufgaben. Um diese Aufgaben durchzuführen, wird mehr als nur eine gewisse Menge an *Lichtstrom* benötigt: das Licht soll mit der korrekten *Helligkeit*, korrekten *Farbigkeit* und zur korrekten Zeit geliefert werden. Der Bedarf an elektrischer Leistung wird mit einem höheren *Nutzen des Lichtes* erhöht. Wird aber die Stromeffizienz nur mit Hilfe der Größe *Lichtausbeute* (lm/W) bewertet, dann könnte das, was als der reale Nutzen eines Beleuchtungsproduktes in einer realen Anwendung gewertet wird, sehr niedrig sein.

Wenn die *Lichtausbeute* als einziges Kriterium für die Bewertung von *Beleuchtungsprodukten* verwendet wird, dann könnten bestimmte Beleuchtungsprodukte mit hohem, mehrfachem *Nutzen* aber niedriger *Lichtausbeute* die gesetzlichen Vorgaben nicht erfüllen und vom Markt verschwinden, obwohl sie für die Benutzer sehr vorteilhaft wären. Darum soll der *Nutzen* der Beleuchtungsprodukte in Zusammenhang mit ihrer *Stromeffizienz* in der Zukunft besser formuliert und berücksichtigt werden.

Dementsprechend besteht das Ziel dieses Dokumentes darin, neue Kenngrößen zu definieren, um die realen *Nutzen der Beleuchtung für die Menschen* zu bewerten, und die numerischen Kenngrößen der *Einzelnutzen des Lichtes* zu kombinieren, um einen neuen *Bewertungsansatz* zu bekommen. Dieser neue Bewertungsansatz und die entsprechende mathematische Methode werden in diesem Dokument beschrieben. Der neue Bewertungsansatz und die neue Methode wurden für einen Datensatz von *Lichtquellen* angewendet und dieser Datensatz wurde mit der neuen Methode als Beispiel ausgewertet.

Der Entwurf der *spektralen Eigenschaften der Beleuchtung* bzw. der Entwurf der *räumlichen Leuchtdichteverteilungen* und der *räumlichen Beleuchtungsstärkeverteilungen* (z. B. „wall washing“, diffuse Beleuchtung oder Spotbeleuchtung, Highlights und Schatten) und der *zeitlichen Eigenschaften des Lichtes* (z.B. dynamische Beleuchtung d. h. Änderung der *ähnlichsten Farbtemperatur* CCT im Laufe eines Arbeitstages) ist Gegenstand der Forschung der *Lichtqualität* in der Architektur. Der vorhandene neue Bewertungsansatz beschäftigt sich nur mit den *spektralen Eigenschaften der Beleuchtung* d.h. mit solchen Eigenschaften, die aus der *spektralen Strahlungsflussverteilung* des Beleuchtungssystems, oder, spezifischer, der *Lichtquelle*, die im System benutzt wird, abgeleitet werden.

Präziser formuliert, das Konzept des neuen Bewertungsansatzes wurde so entwickelt, dass wir eine geeignete *numerische Kenngröße* suchten, die die wichtigsten Nutzen für den menschlichen Benutzer des Beleuchtungsproduktes darstellt, die aus dem Spektrum resultieren. Das Ziel bestand darin, alle Nutzen zusammenzufassen, und die *Nützlichkeit der Lichtquelle* praxisrelevant auszudrücken.

Das Ziel des vorhandenen Dokuments ist, die *mathematische Definition* von zwei numerischen Kenngrößen zu beschreiben, die ein neues, einheitliches, zweidimensionales Bewertungskonzept darstellen. Dieses Konzept fasst die wichtigsten Nutzen des Lichts für den Menschen zusammen. Die numerischen Messzahlen sollen vom *spektralen Strahlungsfluss* und der *eingehenden-*

den elektrischen Leistung (in W) der Lichtquelle errechnet werden. Wie oben bereits erwähnt, ist die *Lichtausbeute* in *Lumen-pro-Watt*-Einheiten keine geeignete Messzahl, obwohl sie heute weltweit benutzt wird.

Grund dafür ist, dass die *V(λ)-Funktion* (die Basis der herkömmlichen *Photometrie*) nur die Linearkombination der *im längeren Wellenlängenbereich empfindlichen Zapfen-Photorezeptoren* (sog. *L-Zapfen*) und der *im mittleren Wellenlängenbereich empfindlichen Zapfen-Photorezeptoren* (sog. *M-Zapfen*) enthält. Sie lässt die wichtigen Signale der *im kürzeren Wellenlängenbereich empfindlichen Zapfen-Photorezeptoren* (sog. *S-Zapfen*), der Stäbchen-Photorezeptoren (diese sind für das sog. *skotopische Sehen* oder Nachtsehen und in Zusammenarbeit mit den Zapfen-Rezeptoren auch für das mesopische Sehen oder Dämmerungssehen verantwortlich) und der intrinsisch lichtempfindlichen retinalen Ganglienzellen (ipRGCs; diese sind für die biologisch aktivierende Wirkung des Lichts oder die sog. *circadiane Wirkung* zuständig) unberücksichtigt.

Das Konzept des vorhandenen Dokuments ist, dass statt der Lichtausbeute eine Kombination von für zahlreiche Nutzen relevanten Kenngrößen verwendet wird. Die Kombination enthält Messzahlen der Farbqualität, der Helligkeit und der Sehleistung sowie der *circadianen Wirkung*. Mathematisch gesehen gibt es natürlich sehr viele Möglichkeiten, diese Messzahlen der einzelnen Nutzen, die aus dem Spektrum und der elektrischen Leistung resultieren, zu kombinieren. Im vorhandenen Dokument wird die Berechnungsmethode eines möglichen, plausiblen Vorschlags beschrieben, der für eine allgemeine Akzeptanz geeignet ist. Der Vorschlag enthält ein neues Bewertungssystem mit neuen Messzahlen für die Nutzen Helligkeit, Farbwiedergabe und circadiane Wirkung des Lichtes für den Menschen.

Bei der Entwicklung der Methode, um eine praxisrelevante und in breitem Kreis annehmbare Lösung für die Kennzeichnung der Beleuchtungsprodukte zu bekommen, wurden nur die wichtigsten Nutzen der Beleuchtung für den Menschen für die allgemeine Innenraum- und Außenbeleuchtung betrachtet. Es wurde hervorgehoben, dass die neue Methode in einem Dialog mit den Vertretern der Industrie und der Regierung entwickelt werden soll.

Die Metriken, die zur Beschreibung der ausgewählten (d. h. wichtigsten) Nutzen des Lichts herangezogen werden, sollen auf bekannten Arbeiten oder internationalen Normen basieren sollen. Es wurde ebenfalls vorgenommen, das neue Bewertungssystem mit Hilfe eines Satzes von mindestens 300 repräsentativen Lichtquellendaten zu testen. Diese Daten schlossen die absoluten spektroradiometrischen Daten und die Lichtausbeute in lm/W-Einheiten von heute oft verwendeten Lichtquellen ein. Im Laufe des Projektes wurde dieser Satz (Daten von typischen kommerziellen Beleuchtungsprodukten) von METAS (Schweiz) sowie von verschiedenen anderen Datenquellen erhalten.

Eine weitere Überlegung bestand darin, dass der Wert der neuen Kenngröße von der jeweiligen Anwendung abhängen soll. Wenn das Ziel z. B. konzentriertes Arbeiten in einem Büro ist, dann soll der Wert der neuen Kenngröße für eine warmweiße Lichtquelle sehr niedrig sein. Grund dafür ist, dass, obwohl viel elektrische Energie eingefüllt wird, die Benutzer (die arbeiten möchten) nicht zufrieden sind, weil sie für das konzentrierte Arbeiten kaltweißes Licht bevorzugen. Die gleiche warmweiße Lichtquelle soll aber einen hohen neuen Wert haben, wenn sie für die Beleuchtung eines Wohnzimmers am Abend benutzt wird, weil sich die Benutzer eher eine entspannende Atmosphäre wünschen. Es wurde gefordert, dass der Typ der Anwendung (Innenraumbeleuchtung, Außenbeleuchtung), das *Leuchtdichteniveau* in der Außenbeleuchtung (Straßentyp) und die Möglichkeit der *dynamischen Beleuchtung* ebenfalls in Betracht gezogen werden.

Dementsprechend wurden die folgenden Nutzen des Lichtes für den Menschen mit den folgenden Lichtqualitätsmetriken (den numerischen Messzahlen der einzelnen Nutzen) für das neue Bewertungssystem ausgewählt:

1. *Helligkeit und Sehleistung*: um diesen Nutzen zu beschreiben, wurden die sog. *äquivalente Leuchtdichte* $L_{\text{äq}}$ (nach Fotios und Levermore [1]) für die *Innenraumbeleuchtung* und die sog. *mesopische Leuchtdichte* L_{mes} (CIE 191:2010 [2]) für die *Außenbeleuchtung* herangezogen.
2. Farbqualität: um diesen Nutzen zu beschreiben, wurde der *allgemeine Farbwiedergabeindex*, CIE CRI R_a [3] ausgewählt.
3. Circadiane Wirkung (die biologisch aktivierende Wirkung des Lichtes): um diesen Nutzen zu beschreiben, wird die Größe a_{mel} [4] benutzt.

Es wurden also drei Nutzen des Lichtes, Helligkeit, Farbqualität und die circadiane Wirkung für die neue Bewertungsmethode ausgewählt. Es wurde entschieden, dass die Helligkeit für die Innenraumbeleuchtung mit der Messzahl $L_{\text{äq}} = L_v (S/V)^{0.24}$ nach Fotios und Levermore [1] beschrieben werden soll ($L_{\text{äq}}$ ist die sog. *äquivalente Leuchtdichte* und L_v ist *Leuchtdichte* in cd/m^2 -Einheiten). Das Symbol S stellt das Signal der oben bereits erwähnten *S-Zapfen* dar. Dieses Signal wird berechnet, indem der *relative spektrale Strahlungsfluss* der Lichtquelle mit der *spektralen Empfindlichkeit* der *S-Zapfen* (mit den sog. Smith-und-Pokorny-Rezeptorempfindlichkeitsdaten [5]) gewichtet und dann im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert wird. Die Größe V (sog. V -Signal) wird so berechnet, dass der *relative spektrale Strahlungsfluss* der Lichtquelle mit der $V(\lambda)$ -Funktion gewichtet und dann im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert wird.

Wenn das Beleuchtungsprodukt für die Außenbeleuchtung eingesetzt werden soll, dann wird die Messzahl L_{mes} (d.h. die *mesopische Leuchtdichte* der CIE Publ. 191:2010 [2]) herangezogen anstatt mit $L_v (S/V)^{0.24}$ zu arbeiten. Wenn die Größe der mesopischen Leuchtdichte L_{mes} berechnet wird, soll entweder $L_v = 3,0 \text{ cd}/\text{m}^2$ (für die Straßen in der *M-Klasse* [6]) oder $L_v = 0,3 \text{ cd}/\text{m}^2$ (für die Straßen der *P-Klasse* [6] mit 5 lx und dem Leuchtdichtekoeffizient der Straße von $0,06 \text{ cd}/(\text{m}^2 \times \text{lx})$) als Leuchtdichteniveau der Berechnungsmethode der CIE Publ. 191 [2] verwendet werden.

Der Grund, warum L_{mes} [2] für die Beschreibung der Helligkeit für die Außenbeleuchtung gewählt wurde, besteht darin, dass, obwohl L_{mes} auf der Basis von Sehleistungsversuchen entstand, diese Größe (d.h. L_{mes} [2]) mit der Helligkeit gut korreliert [7] ($r^2 = 0,86$ nach der Abb. 4 in [7]). Die mesopische Messzahl L_{mes} gewichtet das Stäbchensignal und das Zapfensignal auf den charakteristisch niedrigeren (mesopischen) *Leuchtdichteniveaus* der *Außenbeleuchtung*, während die $L_{\text{äq}}$ – Metrik nach Fotios und Levermore [1] die *S-Zapfen* in Betracht zieht, die bei höheren (photopischen) Niveaus, die in der Innenraumbeleuchtung wichtiger sind, ein stärkeres Signal als die Stäbchen liefern.

Die *circadiane Wirkung* wird mit Hilfe des sog. *melanopischen Wirkungsfaktors* a_{mel} charakterisiert, die aus dem *relativen Strahlungsfluss* der Lichtquelle nach DIN SPEC 5031-100 [4] wie folgt errechnet wird: der relative Strahlungsfluss wird mit der sog. $s_{\text{mel}}(\lambda)$ -Funktion [4] (nach Lucas et al. [8]) gewichtet und dann im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert. Das Ergebnis wird noch durch das oben definierte V -Signal des relativen Spektrums dividiert.

Den obigen Betrachtungen entsprechend wurde das neue Bewertungssystem wie folgt definiert. Als Eingabe des Berechnungsverfahrens dienen der *spektrale Strahlungsfluss* des Beleuchtungsproduktes sowie dessen Lichtstrom (lm) und elektrische Leistung (W). Das neue Bewertungssystem wurde zweidimensional definiert: das System besteht aus zwei Werten, die graphisch in einem Diagramm mit zwei orthogonalen Achsen als Datenpunkt dargestellt werden können.

Eine Messzahl der Farbqualität befindet sich auf der Abszisse. Diese Messzahl ist der allgemeine Farbwiedergabeindex (CIE CRI R_a [3]). Dieser Wert wird heute global allgemein verwendet. In den Diskussionen der Zukunft können andere Messzahlen wie CIE R_f [9] oder CQS Q_p [10] betrachtet werden.

Eine neue, kombinierte Messzahl der Helligkeit und der circadianen Wirkung wird auf der Ordinate des Diagrammes dargestellt. Diese neue, kombinierte Metrik wird *Stromeffizienzkennwert* (SEK) und das neue Diagramm R_a -SEK-Diagramm genannt. Die Größe SEK ist in der Gl. (1) definiert.

$$SEK = \left(\frac{\Phi_v}{P_{el}} \right) \cdot \left[\frac{\alpha \cdot L_{\text{äq}}}{L_v} + \beta \cdot BioNote \right] \quad (1)$$

In Gl. (1) stellt Φ_v den Lichtstrom (lm) des Beleuchtungsproduktes und P_{el} dessen elektrische Leistung (W) dar. Folgendes ist aus Gl. (1) ersichtlich: Die herkömmliche Größe *Lichtausbeute* (Φ_v/P_{el}) wird mit dem modifizierenden Ausdruck in den eckigen Klammern der Gl. (1) multipliziert. Dieser Ausdruck wird wie folgt erläutert. Wenn das Produkt für Innenraumbeleuchtung verwendet werden soll, dass verkörpert die Größe $L_{\text{äq}}$ die Messzahl der Helligkeit mit $L_{\text{äq}} = L_v$ (S/V)^{0,24} nach Fotios und Levermore [1]. Wenn das Produkt für Außenbeleuchtung verwendet werden soll, dann bedeutet $L_{\text{äq}} = L_{\text{mes}}$ [2], wie es oben bereits erwähnt wurde.

Um die Möglichkeit der *dynamischen Beleuchtung* zu favorisieren, ist der Wert von α in Gl. (1) gleich 1,00 wenn keine dynamische Beleuchtung in der vorhandenen Anwendung des Produktes gegeben ist und der Wert von α ist gleich 1,15 wenn dynamische Beleuchtung verwendet wird, aber nur dann, wenn die Dynamik im Bereich CCT=5500 K – 6500 K erfolgt. Die Daten (relatives Spektrum, Lichtstrom und elektrische Leistung) der höchsten Farbtemperatur-Einstellung sollen in diesem Fall für die Berechnung verwendet werden. Der Faktor $\alpha = 1,15$ ist vorläufig. Er wurde aus den Daten einer Studie abgeschätzt, in der die dynamische Beleuchtung eine signifikant positive Wirkung auf dauerhafte Frühschichtarbeiterinnen ausübte [11].

Die Absolutbeträge der Unterschiede der logarithmischen Werte der mittleren charakteristischen Werte aus der Studie [11] von Schlaf-Latenz, subjektiven Stimmungsurteilen von Angst/Depression, Erregung und Herzfrequenz-Variabilität zwischen der dynamischen und der statischen Situation wurden errechnet. Im Mittel wurde der Wert 15 % als charakteristischer Nutzen der dynamischen Beleuchtung herausgefunden. Darum verwendet das neue Bewertungssystem den (vorläufigen) Wert 1,15.

Die *circadiane Wirkung* des Produktes (die durch die Größe *BioNote* in Gl. 1 dargestellt wird) wird nicht in Betracht gezogen, wenn das Produkt in der Außenbeleuchtung verwendet wird. In diesem Fall ist der Wert des sog. *Entscheidungsfaktors* β gleich 0. Für die Innenraumbeleuchtung ist β gleich 1. Für die Innenraumbeleuchtung wird die Messzahl der circadianen Wirkung (*BioNote*) als aktivierend betrachtet, wenn die ähnliche Farbtemperatur CCT \geq 3800 K ist. Sie wird als *entspannend* betrachtet, wenn die ähnliche Farbtemperatur CCT \leq 3200 K ist. Dazwischen, d. h. bei 3200 K < CCT < 3800 K, wird das Produkt als *weder aktivierend noch entspannend* aufgefasst. Für ein aktivierendes Beleuchtungsprodukt (CCT \geq 3800 K) errechnet sich der Wert *BioNote* nach Gl. (2).

$$BioNote(\text{aktivierend}) = 0,1 [(a_{\text{mel}} / a_{\text{mel},0}) - 1] \quad (2)$$

Die Gl. (2) bedeutet, dass *stärker aktivierende* Lichtquellen ($CCT \geq 3800$ K d. h. neutralweiße – kaltweiße Lichtquellen) einen *höheren* Wert von *BioNote* bekommen. Die Größe a_{mel} in Gl. (2) wird aus der *relativen spektralen Strahlungsflussverteilung* der Lichtquelle berechnet. Das Symbol $a_{mel,0}$ bedeutet den *melanopischen Wirkungsfaktor* der *Referenzlichtart*. Die Referenzlichtart wird als eine *Tageslichtphase*, ein *Schwarzkörperstrahler* oder eine Mischung der beiden definiert. Die Referenzlichtart wird (für jede CCT) aus der *relativen spektralen Strahlungsflussverteilung* der Lichtquelle (als Testlichtquelle) nach der Methode der CIE Publ. 224:2017 [9] errechnet. Diese Methode [9] beinhaltet einen kontinuierlichen, linearen Übergang von einer *Schwarzkörperstrahler-Referenz* nach einer *Tageslichtreferenz*, so dass die zu verwendende Referenzlichtart bei 4000 K und darunter ein reiner *Schwarzkörperstrahler*, bei 4500 K eine 50:50 Mischung, und bei 5000 K und darüber eine reine Tageslichtphase ist [9].

Im Bereich $CCT \leq 3200$ K (warmweiß, entspannend) wird der Wert *BioNote* nach Gl. (3) definiert.

$$BioNote(\text{entspannend}) = 0,1 [(a_{mel,0} / a_{mel}) - 1] \quad (3)$$

Es soll betont werden, dass die Größe $a_{mel,0}$ (der *melanopische Wirkungsfaktor* der *Referenzlichtart*) in Gl. (3) im Zähler erscheint, und nicht im Nenner, wie in der Gl. (2). So erhalten *entspannende* Lichtquellen (d. h. wärmere Weißtöne) einen höheren Wert von *BioNote* im Bereich $CCT \leq 3200$ K. Für *weder aktivierende noch entspannende* Lichtquellen ($3200 \text{ K} < CCT < 3800 \text{ K}$) zeigt Gl. (4) die Berechnung von *BioNote*. Dabei werden die Gl. (2) und die Gl. (3) gemischt.

$$\begin{aligned} BioNote = & 0,1 [(a_{mel,0} / a_{mel}) - 1] [(3800 \text{ K} - CCT) / 600 \text{ K}] \\ & + 0,1 [(a_{mel} / a_{mel,0}) - 1] [(CCT - 3200 \text{ K}) / 600 \text{ K}] \end{aligned} \quad (4)$$

Im letzten Schritt des Berechnungsverfahrens des neuen Bewertungssystems wird ein Vorschlag dargestellt. Ziel dieses Vorschlages ist bei der Energieverbrauchs kennzeichnung eine Einteilung der Energieverbrauchsklassen (wie von der neuen Rahmenverordnung zur Energieverbrauchs kennzeichnung 2017/1369/EU vorgesehen, zukünftig wieder mit den Klassen A bis G) auf neuer Grundlage. Die Zuordnung der genannten Beleuchtungsprodukte zu diesen Klassen wird gezeigt. Jede Kategorie (A: am besten; G: am schlechtesten) wird aus zwei Werten, R_a und SEK der Lichtquelle bestimmt. Dabei werden zwei Grenzwerte für jede Kategorie benutzt. Die in diesem Bericht veröffentlichten Grenzwerte werden als vorläufig betrachtet. Es ist vorgesehen, dass diese Werte während der zukünftigen Diskussionen geändert werden. Ein Beleuchtungsprodukt gehört zur Kategorie „A“ dann, wenn sowohl R_a und SEK größer sind, als die Grenzwerte der Kategorie „A“. Also, um das Kriterium „A“ zu erfüllen, müssen sowohl $R_a > R_a(\text{Grenzwert}, A)$ als auch $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{Grenzwert}, A)$ erfüllt sein.

Die Grenzen $R_a(\text{Grenzwert}, A)$ und $\text{SEK}(\text{Grenzwert}, A)$ stellen im neuen (zweidimensionalen) Bewertungssystem die Grenzwerte für die Kategorie „A“ dar, d.h. die „beste Nützlichkeit“ oder den „bester Nutzen“ des Spektrums für den Benutzer in der vorhandenen Anwendung im Vergleich zur elektrischen Leistung. Der Bereich der Kategorie „A“ auf der R_a -SEK-Ebene entspricht einem *rechteckigen Bereich* (Bereich „A“) in der rechten, oberen Ecke im R_a -SEK-Diagramm. Die weiteren Bereiche (B-G) sind *L-förmige Flächen* nach links und nach unten vom Bereich „A“. Um z. B.

zur Kategorie "B" zu gehören, muss sowohl $R_a > R_a(\text{Grenzwert}, B)$ als auch $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{Grenzwert}, B)$ erfüllt sein; die Lichtquelle darf aber nicht zur Kategorie „A“ gehören, usw.

Es ist sehr wichtig zu betonen, dass das neue Bewertungssystem zweidimensional ist: jedes Beleuchtungsprodukt erhält zwei Werte, R_a und SEK . Die Kategorien A-G werden jedem Produkt auf der Basis dieser zweidimensionalen Darstellung zugeordnet. Mathematisch gesehen wäre es grundsätzlich falsch, eine eindimensionale Größe als Basis der Bewertung auszuwählen und die Kategorien so zu bestimmen.

Es wurde eine Beispiel-Kalkulation durchgeführt, wobei die Werte R_a und SEK für einen Satz von 304 Lichtquellen (aus der Datenbank von METAS, Schweiz sowie aus anderen Quellen) mit $\alpha=1$ (keine dynamische Beleuchtung) und $\beta=1$ (Innenraumbeleuchtung) berechnet wurden. Herkömmliche Glühlampen des Satzes erhielten die Kategorie G, Kompaktleuchtstofflampen die Kategorien F und G, und die anderen Leuchtstofflampen (semi-kompakte und rohrförmige) verschiedene Kategorien zwischen B und G. Nur einer rohrförmigen Leuchtstofflampe wurde die Kategorie B zugeordnet. Die 14 LED-Lichtquellen mit hoher Qualität erreichten eine Bewertung mit der Kategorie A.

Die vorläufigen R_a - und SEK -Grenzwerte der Kategorien wurden rechnerisch mit dem Kriterium bestimmt, dass sich in jeder Kategorie eine bestimmte, vordefinierte Anzahl an Produkten aus dem oben erwähnten Satz von 304 Produktdaten befindet. Dieses Kriterium stellt nur *eine* der möglichen Entscheidungsstrategien dar. Diese Strategie bzw. die Anzahl der Produkte in jeder Kategorie soll in der Zukunft diskutiert und angepasst werden.

Im Folgenden werden die allgemeinen Vorteile der neuen Methode zusammengefasst. Zuerst muss man einsehen, dass die Steigerung der Energieeffizienz der Beleuchtung heute eine sehr wichtige Angelegenheit ist. Um die Energieeffizienz zu beschreiben, wird heute weltweit die *Lichtausbeute* (lm/W) benutzt, eine Messzahl, die aus der Gewichtung des spektralen Strahlungsflusses der Lichtquelle mit der *$V(\lambda)$ -Funktion* und der darauf folgenden Integration resultiert. Die *$V(\lambda)$ -Funktion* gewichtet allerdings den spektralen Strahlungsfluss in der Nähe von 555 nm zu stark im Vergleich zum realen Nutzen [12] für den Menschen.

Im neuen Bewertungssystem werden aber alle Wellenlängen der wahren Bedeutung entsprechend in Betracht gezogen. Eine Messzahl der Farbqualität (der *allgemeine Farbwiedergabeindex CIE CRI* R_a) wird ebenfalls aufgegriffen. Die ebenfalls verwendeten Messzahlen der Helligkeit, der Sehleistung und des circadianen Effektes unterstützen kürzere (bläuliche) Wellenlängen. Wenn also das Spektrum des Beleuchtungsproduktes mit Hilfe der neuen Methode analysiert und dessen Nutzen mit Hilfe der neuen Methode dargestellt werden, dann wird die Energieeffizienz der Konversion der elektrischen Energie in sichtbare elektromagnetische Strahlung auf eine allumfassende Art und Weise quantifiziert, wesentlich besser, als mit Hilfe der herkömmlichen Lichtausbeute. „Bisher wurde mittels der Größe Lichtstrom (in lm) einer der Nutzen des Lichtes beschrieben (z. B. *Sehschärfe*). Diese Größe bleibt durch den Ausdruck Φ_v zwar in Gl. (1) erhalten, der betreffende Nutzen wird über den Gleichungsteil $L_{\text{äq}}/L_v$ nun aber besser beschrieben.“

Weitere Vorteile des neuen Konzeptes sind die Abhängigkeit von der Anwendung (Innenraum- oder Außenbeleuchtung) und die Berücksichtigung der Möglichkeit der *dynamischen Beleuchtung*. So bevorzugt die circadiane Komponente des neuen Bewertungsansatzes z. B. für den Abend zu Hause *warmweiße* Töne, was die Entspannung fördert und die Schlaf-Latenz (d. h. die Zeit bis zum Einschlafen) reduziert. Die *Kennzeichnung eines Beleuchtungsproduktes* mit den neuen Kategorien fördert die Produktivität der Arbeitsstunden sowie das Wohlbefinden und die Lebensqualität der Benutzer. Eine verbleibende Frage besteht darin, wie die neue Methode für Nichtexperten kommuniziert wird. Das in diesem Dokument vorgeschlagene R_a - SEK -Diagramm

ist zu diesem Zweck wahrscheinlich nicht geeignet. Viel zusätzliche Arbeit ist benötigt in der Zukunft, um neue Wege für die Darstellung zu entwickeln.

Wie oben beschrieben, wurden die Messzahlen der folgenden Nutzen der Beleuchtung in der neuen Methode aufgegriffen und kombiniert: Helligkeit und Sehleistung, der circadiane Effekt und die Farbqualität. Durch die Größe Φ_v in Gl. (1) wurde die Sehschärfe ebenfalls mitgenommen. Wie schon erwähnt, wurden nur die wichtigsten Aspekte ausgewählt, die aus dem *spektralen* Strahlungsfluss des Beleuchtungsproduktes resultieren.

So wurde z. B. die Eigenschaft der An- oder Abwesenheit von störenden Bunttönen im Weißton der Lichtquelle (z. B. grünliche oder lilafarbene Töne) [13] nicht berücksichtigt, weil die Hersteller in den meisten Fällen sehr sorgfältig auf diese sog. Weißtonqualität achten und mit schmalen visuellen Weißton-Toleranzbereichen arbeiten (in der heutigen LED-Technologie werden diese Toleranzbereiche „Bins“ genannt).

Im Bericht werden statt der verwendeten Messzahlen der Einzelnutzen (z.B. CIE CRI R_a oder a_{mel}) auch weitere mögliche Metriken als *alternative Metriken* erwähnt und analysiert. So wurde z. B. Bermans Helligkeitsmetrik [14] d.h. $L_{äq} = L_v (R/V)^{0.5}$ (R ist dabei das Stäbchensignal) nicht benutzt, weil (im Gegensatz zu L_{mes} der CIE 191:2010 [2]) diese Metrik (als Vorläufer der CIE- L_{mes} -Metrik) die Beiträge der Stäbchen- und Zapfensignale (bei verschiedenen Adaptationsleuchtdichten) nicht (unterschiedlich) gewichtet.

Um die wahrgenommene Helligkeit im photopischen Bereich zu beschreiben, wurde die Metrik von Fotios und Levermore [1] gewählt, weil diese experimentell sehr gut nachgewiesen wurde. Neue Experimente zeigten, dass das *S-Zapfen-Signal* ebenfalls geeignet ist, einen weiteren, wichtigen Nutzen, die sog. *Sehklarheit* [15] im photopischen Bereich zu beschreiben. Die CIE-Helligkeitsmetrik der äquivalenten Leuchtdichte [16] wurde nicht verwendet, weil sich ihre Genauigkeit bei der Deutung neuer Versuchsergebnisse als problematisch erwies.

Um die *circadiane Wirkung* zu charakterisieren, wurde der sog. *melanopische Wirkungsfaktor* a_{mel} [4] verwendet. In der Zukunft könnte dafür der sog. *circadiane Reiz* (CS) [17, 18, 19, 20] als alternative Metrik aufgegriffen werden. Die CS-Skala wurde in neuen Feldstudien verifiziert [20]. Die Größe CS beschreibt die Wechselwirkungen der Stäbchen- und Zapfen-Rezeptoren mit den Signalen der ipRGCs und die daraus resultierenden *spektralen Nichtadditivitäten*.

Der *melanopische Wirkungsfaktor* a_{mel} berücksichtigt die Neurophysiologie und Neuroanatomie der Netzhaut und die Funktionalität des *circadianen Systems* nicht [20]. Trotz dieser bekannten Schwäche wurde für die neue Methode die Größe a_{mel} gewählt, weil deren Berechnung einfach ist, im Gegensatz zum komplizierten Arbeitsablauf von CS. Die Einfachheit der Berechnung ist für praktische Lichtdesigner wichtig. Die zwei Messzahlen (a_{mel} und CS) wurden an Hand des oben erwähnten Satzes der 304 Spektraldaten verglichen. Es wurde festgestellt, dass die Größen CS und $\log_{10}(a_{mel} E_v)$ zwischen 10 lx und 1000 lx miteinander linear mit $r^2=0,95$ korrelieren.

Was die *Farbqualität* anbelangt, wurde der *allgemeine Farbwiedergabeindex* CIE CRI R_a [3] benutzt, weil dieser heute weltweit verwendet und in Messgeräten implementiert wird. In der Zukunft könnte stattdessen der sog. CIE-2017-Farbtreueindex (colour fidelity index; CIE R_f) [9] verwendet werden. Letzterer Index wurde für „wissenschaftliche Zwecke“ vorgeschlagen. Daraum wurde er für den neuen Bewertungsansatz des vorhandenen Berichtes nicht eingesetzt. Um die sog. Farbpräferenz-Eigenschaft (die für die Allgemeinbeleuchtung wichtiger ist, als die Farbtreue-Eigenschaft) zu beachten (die Eigenschaften der Farbpräferenz weichen von den Eigenschaften der Farbtreue oft stark ab [8, 19]), könnte statt R_a in der Zukunft die sog. Farbqualitäts-skala Q_p (colour quality scale; CQS Q_p [10]) verwendet werden. Die CQS Q_p -Metrik wies eine gute Leistung bei der numerischen Deutung von visuellen Farbpräferenzdaten auf [21].

Die CQS Q_p -Metrik ist leider nicht so bekannt (und wird in internationalen Arbeiten selten erwähnt), wie die andere, international bekanntere Messzahl der CQS-Methode, CQS Q_a , die eine schlechtere Korrelation mit visuellen Farbpräferenzdaten aufweist. Die Messzahlen des *Farbgamut* (wie viele Farben eine Lichtquelle wiedergibt; z. B. die sog. IES R_g [22] und CQS Q_g [10]) korrelieren schlecht mit den anderen, oben erwähnten Farbqualitätsmetriken. Dies wurde in einer weiteren Berechnung für die 304 Daten bestätigt. So könnte eine Farbgamutmetrik eine mögliche dritte Dimension der Bewertung der Lichtquellen darstellen. Eine Farbgamutmetrik wird in der neuen Methode allerdings nicht verwendet, weil sie die Übersättigung der Objektfarben unterstützt, was von den Beobachtern in der Allgemeinbeleuchtung visuell nicht bevorzugt wird [21].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der vorhandene Bericht ein neues Bewertungssystem für Beleuchtungsprodukte beschreibt. Mit Hilfe dieser neuen Methode können die wichtigsten Nutzen des Lichtes für den Menschen quantifiziert werden [23]. Das neue Bewertungssystem ist zweidimensional mit zwei orthogonalen Komponenten: 1. der *allgemeine Farbwiedergabeindex* (CIE CRI R_a ; Abszisse), der die Farbqualität beschreibt und 2. SEK, eine neue Messzahl, der sog. Stromeffizienzkennwert (Ordinate).

Die erste Komponente, d. h. die Größe CIE CRI R_a hängt (bei fixem relativen Spektrum eines Beleuchtungsproduktes) vom Leuchtdichteniveau und dadurch von der elektrischen Leistung (P_{el}) per Definition nicht ab. Die zweite Komponente, d. h. der Stromeffizienzkennwert SEK (die die Messzahlen der Helligkeit, der Sehleistung, der circadianen Wirkung und die konventionelle Lichtausbeute kombiniert) beinhaltet die Abhängigkeit von der elektrischen Leistung des Beleuchtungsproduktes.

Die Abhängigkeit von der Anwendung bedeutet, dass die neue Messzahl SEK für *entspannende* Anwendungen *warmweiße* Lichtquellspektren, für *aktivierende* Anwendungen aber *neutralweiße* oder *kaltweiße* Lichtquellspektren favorisiert. Es gibt ebenfalls eine Abhängigkeit davon, ob das Beleuchtungsprodukt in der Innenraum- oder der Außenbeleuchtung eingesetzt wird, bzw. davon, ob dynamisches Licht vorhanden ist. Die Definition der Kategorien (A-G) des Beleuchtungsproduktes im neuen Bewertungssystem ist zweidimensional. Die Grenzen der Kategorien in einem eindimensionalen System würden ein falsches Ergebnis liefern, weil der Bewertung der Nutzen des Lichtes für den Menschen (min.) zwei Dimensionen zugrunde liegen. Diese neuen Kategorien (A-G) charakterisieren den allgemeinen Nutzen eines Beleuchtungsprodukts für den menschlichen Benutzer im Vergleich zu dessen elektrischer Leistung.

Literatur

- [1] S. A. Fotios, G. J. Levermore, "Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model," *Lighting Res. Technol.* 30, 103–106 (1998).
- [2] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance, CIE Publication 191:2010 (CIE, 2010).
- [3] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3-1995 (CIE, 1995).

- [4] DIN, DIN SPEC 5031-100:2015-08, Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings – Quantities, symbols and action spectra (Beuth Verlag, 2015).
- [5] V. C. Smith, J. Pokorny, "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vis. Res.* 15(2), 161-171 (1975).
- [6] European Standard CSN EN 13201-2:2015, Road lighting - Part 2: Performance requirements (CSN EN, 2015).
- [7] S. A. Fotios, C. Cheal, "Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness," *Lighting Res. Technol.* 43, 143–157 (2011).
- [8] R. J. Lucas, S. Peirson, D. Berson, T. Brown, H. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, G. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age," *Trends Neurosci.* 37, 1-9 (2014).
- [9] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use, CIE Publication 224:2017 (CIE, 2017).
- [10] W. Davis, Y. Ohno, "Colour quality scale," *Opt. Eng.* 49, 033602 (2010).
- [11] M. Canazei, P. Dehoff, S. Staggia, W. Pohl, "Effects of dynamic ambient lighting on female permanent morning shift workers," *Lighting Res. Technol.* 46, 140–156 (2014).
- [12] M. S. Rea, A. Bierman, "A new rationale for setting light source luminous efficacy requirements," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Sept. 10 (2016).
- [13] Rea MS, Freyssinier JP, "White lighting," *Colour Research and Application* 2013; 38: 82–92.
- [14] S. M. Berman, The Reengineering of Lighting Photometry (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995).
- [15] P. Bodrogi, T. Q. Khanh, "Visual clarity and brightness in indoor and outdoor lighting: experiments and modelling," in Proceedings of the CIE Midterm Meeting 2017 (CIE, 2017).
- [16] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE Supplementary System of Photometry, CIE Publication 200:2011 (CIE, 2011).
- [17] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system," *Lighting Res. Technol.* 44, 386–396 (2012).
- [18] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough, "Circadian light," *J. Circadian Rhythms* 8(2) (2010).
- [19] M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, "A model of phototransduction by the human circadian system," *Brain Res. Rev.* 50, 213-228 (2005).
- [20] M. G. Figueiro, R. Nagare, L. L. A. Price, "Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness," *Lighting Res. Technol.* 50, 38–62 (2018).
- [21] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, X. Guo, T. T. Anh, "Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 4: Experiments with still life arrangements at different correlated colour temperatures," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Mar. 24 (2017).
- [22] A. David, P. T. Fini, K. W. Houser, L. Whitehead, "Development of the IES method for evaluating the colour rendition of light sources," *Optics Express* 23, 15888-15906 (2015).
- [23] Q. T. Vinh, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources, *Optics Express* 26, 14538-14551 (2018);
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-11-14538&id=389907>

Summary

The energy efficiency of lighting products is currently evaluated by the quantity *luminous efficacy* (lm/W). This quantity is calculated from *luminous flux* (lm). But the quantity of *luminous flux* does not provide a full description of the effect of light (electromagnetic radiation in the wavelength range of 360 nm to 830 nm) on humans: luminous flux is not a suitable quantity to describe all *benefits of lighting* for humans resulting from every *spectral range*.

Lighting products and lighting systems enable different visual tasks. To carry out these tasks, much more than a certain amount of luminous flux alone is needed: light should be delivered with the correct brightness, correct chromaticity and at the correct time. *Electric power* demand usually increases with increasing *lighting benefit* requirements.

If *luminous efficacy* is used as the only evaluation criterion of *lighting products* then the lighting products with high, multiple benefits but with lower luminous efficacy might not fulfill the requirements to obtain excellent energy efficiency assessment. Consequently, they might disappear from the market because they do not fulfil legal requirements although they would be very beneficial for their users. This is why the benefit of lighting products in terms of energy efficiency shall be better formulated and better taken into account in the future.

Accordingly, the aim of the present document is to derive new quantities to evaluate the real benefits of lighting for human users and to combine the numeric descriptors of the single benefits of lighting as a new numeric *evaluation concept*. This new evaluation concept and the corresponding mathematical method are presented in this document. The new concept and the new method were applied to a sample set of *light source* data and this set was evaluated by the new method as an example.

The design of the *spatial properties of light* e.g. *spatial radiance distributions* and *spatial irradiance distributions* e.g. “wall washing”, diffuse lighting or spot lighting, highlights and shadows and the *temporal properties of light* e.g. dynamic lighting (i.e. changing the *correlated colour temperature* abbreviated by CCT during a working day) constitute the subject of *lighting quality* considerations in architectural design. The present evaluation concept deals only with the *spectral properties of lighting* i.e. with those properties that result from the *spectral power distribution* of the lighting system, or, more specifically, the *light source* used in it.

More precisely, the present evaluation concept was developed by searching for an appropriate *numeric quantity* to represent the most important benefits resulting from the spectrum of the light source for a human user. The aim was to summarize all these benefits and to express the *usefulness of the light source* in a practicable way. By definition, we considered a light source or a lighting system *useful* if it exhibits as many benefits of lighting (e.g. brightness, visual performance, biological activating effect, *colour quality*) as possible by the use of *as less electric energy as possible*.

Thus, the aim of the present document is to describe the *mathematical definition* of a set of two numeric quantities that constitute a unique two-dimensional evaluation concept. This evaluation concept summarizes the most important benefits of a light source for a human. The numeric quantities are to be computed from the *spectral power distribution* and the *input electric power* (in W) of the light source. As mentioned above, the *luminous efficacy of a source* in *lumens per watt* units (which is still widely used today to this aim) is *not* an appropriate quantity.

More specifically, the reason is that the $V(\lambda)$ function (the basis of conventional photometry) represents only the linear combination of the *long-wavelength sensitive* and the *medium-wavelength sensitive* cone photoreceptors. It disregards the important signals of the *short-wavelength sensitive*

tive cone photoreceptors, the rod photoreceptors (that are responsible for *scotopic vision* and co-working with the cone photoreceptors in *mesopic vision*) and the *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* (ipRGCs; these are responsible for the biologically activating effect or *circadian effect of light*).

The concept of the present document is that, instead of the concept of the *luminous efficacy of a source*, a combination of benefit-relevant descriptor quantities should be used to characterize the light source including a *colour rendition index*, a measure of brightness and *visual performance*; and a measure of the *circadian effect*. Of course, mathematically, there are many possibilities to combine such *descriptor quantities* that result from the spectral power distribution of the light source and the electric power. In the present document, the computational method of one possible, plausible proposal (suitable for general industrial acceptance) is described. This proposal contains a new evaluation system with a new usefulness measure.

During the development of the new evaluation method, for the sake of a practicable and widely acceptable solution for the characterization of the light source, only the most essential *benefits of lighting for humans* for general *interior lighting* and *exterior lighting* were considered. It was accentuated that the new method should be discussed in a dialogue with lighting industry and governmental representatives during the development phase.

It was also emphasized that the metrics to describe the selected (i.e. most important) *benefits of lighting* should be based well-known work e.g. widely-known publications or international standards. By doing so, the aim was to be ready for world-wide industrial applications. We also proposed that the new evaluation system should be tested for a representative set of at least 300 absolute spectra (i.e. absolute spectro-radiometric data including the luminous efficacy of a source in lm/W units) of today's widely used light sources. During the development of the project, this set (typical commercial lighting products) was obtained from different sources.

Another consideration was that the value of the new usefulness measure should be *application dependent*. For example, if the aim is *concentrated work* in an office then the new value should be very low in case of a *warm white* light source. The reason is that, although we input electric energy, the users (who would like to work) will not be satisfied as they rather need a *cool white* light source for concentrated working. But the same *warm white* light source should obtain a higher new value if it is being used to illuminate a living room in the evening for relaxing. Additionally, we demanded that the type of application (interior lighting, exterior lighting) and the *luminance level* in exterior lighting (type of street) as well as the possibility of *dynamic lighting* should also be considered.

According to the above, the following *benefits of lighting* and *lighting quality metrics* (the numeric descriptors of the benefits of lighting) were selected to be represented in the new evaluation system:

1. *Brightness and visual performance*: to describe this benefit, the so-called *equivalent luminance* L_{aq} (Fotios and Levermore [1] was selected for *interior lighting* applications and the so-called *mesopic luminance* L_{mes} (CIE 191:2010 [2]) was selected for *exterior lighting* applications.
2. *Colour Quality*: to describe this benefit, the *general colour rendering index*, CIE CRI R_a [3] was selected.
3. *Circadian Effect* (the biological activating effect of light): to describe this benefit, the quantity a_{mel} [4] was selected.

Summarizing the above, three benefits of lighting, brightness, colour quality and the circadian effect were selected to be included in the *new evaluation method*. It was decided that the concept of brightness should be described by the quantity $L_{\text{aq}} = L_v (S/V)^{0.24}$ according to Fotios and Levermore [1] if the light source should be used for *interior lighting* (L_{aq} means *equivalent luminance* and L_v means *luminance* in cd/m^2). Here, the symbol S represents the signal of the *short-wavelength sensitive human photoreceptors* (the so-called S-cones) computed by weighting the *relative spectral power distribution* of the light source with the *spectral sensitivity* of the S-cones (with the so-called Smith and Pokorny *cone photoreceptor sensitivity* data [5]) and integrating in the *visible wavelength range*. The quantity V (so-called V -signal) is obtained by weighting the relative spectral power distribution of the light source with the $V(\lambda)$ *function* and integrating in the *visible wavelength range*.

If the light source should be used for *exterior lighting* then the quantity L_{mes} (the *mesopic luminance* of CIE Publ. 191:2010 [2]) comes into play instead of $L_v (S/V)^{0.24}$. When computing the value of the mesopic luminance L_{mes} , either $L_v=3.0 \text{ cd}/\text{m}^2$ (that represents *M-class streets* [6]) or $L_v=0.3 \text{ cd}/\text{m}^2$ (that represents *P-class streets* [6] with 5 lx and with a *luminance coefficient* of the road of 0.06 $\text{cd}/(\text{m}^2 \times \text{lx})$) is used as the luminance level in the computational method of CIE Publ. 191 [2].

The reason of choosing L_{mes} [2] to describe *brightness* for *exterior lighting* is that although it was developed from *visual performance* data, this measure (i.e. L_{mes} [2]) correlates well with brightness [7] ($r^2=0.86$ according to Fig. 4 in [7]). The mesopic metric L_{mes} weights the *rod photoreceptor signal* and the *cone photoreceptor signals* at the characteristic lower (mesopic) *luminance levels* of *exterior lighting* while the L_{aq} metric according to Fotios and Levermore [1] considers the *S-cone photoreceptors* that have a more accentuated response at the characteristically higher (photopic) *luminance levels* of *interior lighting* than the *rod photoreceptors*.

The *circadian effect* is characterized by the so-called *melanopic factor* a_{mel} computed from the *relative spectral power distribution* of the light source according to DIN SPEC 5031-100 [4] in the following way: the relative spectral power distribution is weighted by the so-called $s_{\text{mel}}(\lambda)$ *function* [4] (based on Lucas et al. [8]) and integrated in the visible wavelength range; and the result is divided by the above defined V -signal of the *relative spectrum*.

According to the above considerations, the new evaluation system was defined as follows. Input quantities of the computational method are the *spectral power distribution* of the light source, the luminous flux (lm) and the electric power (W) of the light source. The new usefulness measure was defined as a two-dimensional quantity (i.e. consisting of a set of two values) to be represented as a point in a diagram with two orthogonal axes. A measure of *colour quality* (R_a) is on the abscissa. Due to its widespread use today, this measure is the conventional CIE *general colour rendering index* CIE CRI R_a [3], as mentioned above. In future discussions, the quantities CIE R_f [9] or CQS Q_p [10] can also be considered.

A new combined measure of the brightness and the circadian effect of the light source appears on the ordinate of the above mentioned diagram. This new combined measure is called *new energy efficiency measure* (abbreviated by SEK). This the new diagram is called R_a -SEK diagram. The new quantity SEK is defined by Eq. (1).

$$SEK = \left(\frac{\Phi_v}{P_{el}} \right) \cdot \left[\frac{\alpha \cdot L_{\text{aq}}}{L_v} + \beta \cdot BioNote \right] \quad (1)$$

In Eq. (1), Φ_v is the luminous flux (lm) of the light source and P_{el} is the electric power (W). In the second component (SEK, Eq. 1), the *luminous efficacy of a source* (Φ_v/P_{el}) is multiplied by the compound modification term in the square brackets in Eq. (1). This modification term is explained as follows. If the light source should be used for *interior lighting* then the quantity L_{aq} represents the measure of scene brightness with $L_{aq} = L_v (S/V)^{0.24}$ according to Fotios and Levermore [1], and, if the light source should be used for exterior lighting then $L_{aq} = L_{mes}$ [2], as already mentioned above.

To be in favour of *dynamic lighting*, the value of α in Eq. (1) equals 1.00 if there is no dynamic lighting in the given application of the light source. The value of equals 1.15 if there is dynamic lighting with correlated colour temperatures in the range $CCT=5500\text{ K} - 6500\text{ K}$. Data (relative spectrum, luminous flux and electric power) of the highest available CCT shall be used to carry out the computation in this case. The factor $\alpha = 1.15$ is a preliminary value estimated from a previous experiment in which significant positive effect of dynamic lighting on female permanent morning shift workers was found [11].

The absolute values of the differences of the logarithms of the mean characteristic values of sleep latency, subjective mood rating of anxiety/depression, arousal and heart rate variability between the dynamic and the static conditions were calculated from the above mentioned data [11]. In average, the value of 15% was found as a characteristic benefit percentage of dynamic lighting hence the multiplicative factor of $\alpha = 1.15$ is used.

The *circadian effect* of the light source (represented by the value of *BioNote* in Eq. 1) is not taken into consideration if the light source is used for *exterior lighting* and this is expressed by setting the so-called *decision factor* β to zero in case of *exterior lighting* applications. For *interior lighting*, β equals 1. For interior lighting, the descriptor of the circadian effect (*BioNote*) is considered *activating* in case of $CCT \geq 3800\text{ K}$, *relaxing* for $CCT \leq 3200\text{ K}$ and *neither activating nor relaxing* for $3200\text{ K} < CCT < 3800\text{ K}$. For an activating light source ($CCT \geq 3800\text{ K}$), Eq. (2) shows how to compute the value of the descriptor of the circadian effect, the so-called *BioNote*.

$$BioNote(\text{activating}) = 0.1 [(a_{mel} / a_{mel,0}) - 1] \quad (2)$$

Equation (2) means that more activating light sources get a higher *BioNote* value in the range of $CCT \geq 3800\text{ K}$ (i.e. the neutral white – cool white light sources). In Eq. (2), the quantity a_{mel} is computed from the *relative spectral power distribution* of the light source while the symbol $a_{mel,0}$ means the *melanopic factor* of the *reference light source* which is defined as a *phase of daylight*, a *blackbody radiator* or a mixture of the two. This reference light source is determined (for any CCT) according to the method of CIE Publ. 224:2017 [9] from the *relative spectral power distribution* of the light source to be evaluated (as a test light source). This method includes “a smooth, linear transition from a *Planckian reference light source* to a *daylight reference light source* such that at 4000 K and below it is purely *Planckian*, at 4500 K it is a 50:50 mix of the two, and at 5000 K and above it is purely a *daylight reference light source*.” [9]

In the range of $CCT \leq 3200\text{ K}$ (warm white), the value of *BioNote* in Eq. (1) is defined according to Eq. (3).

$$BioNote(\text{relaxing}) = 0.1 [(a_{mel,0} / a_{mel}) - 1] \quad (3)$$

Note that the quantity $a_{\text{mel},0}$ (the *melanopic factor* of the *reference light source*) is in the numerator in Eq. (3) unlike Eq. (2). In Eq.(2), $a_{\text{mel},0}$ appears in the denominator. Thus, *more relaxing* light sources (i.e. warmer *white tones*) obtain a higher value of *BioNote* in the range of $\text{CCT} \leq 3200 \text{ K}$. Finally, in case of *neither activating nor relaxing* light sources ($3200 \text{ K} < \text{CCT} < 3800 \text{ K}$), Eq. (4) shows the way of computing the value of *BioNote* by mixing Eq. (2) and Eq. (3).

$$\begin{aligned} \text{BioNote} = & 0.1 \left[\left(a_{\text{mel},0} / a_{\text{mel}} \right) - 1 \right] \left[(3800 \text{ K} - \text{CCT}) / 600 \text{ K} \right] \\ & + 0.1 \left[\left(a_{\text{mel}} / a_{\text{mel},0} \right) - 1 \right] \left[(\text{CCT} - 3200 \text{ K}) / 600 \text{ K} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

As a last step of the computations in the new evaluation system, a *usefulness category* (A: best; down to G: worst) is determined from the values of R_a and SEK of the *light source* in the R_a -SEK *plane* by the use of a set of *category limit* values. These *category limit* values are considered as preliminary (subject to subsequent discussions). A light source belongs to the category „A“ if both R_a and SEK are greater than the limiting value of the category “A”. This means that, in order to satisfy the “A” criterion, both $R_a > R_a(\text{limit}, A)$ and $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{limit}, A)$ shall be satisfied.

The quantities $R_a(\text{limit}, A)$ and $\text{SEK}(\text{limit}, A)$ represent the limits for the category “A” (i.e. “best usefulness” or “best benefit” of the spectrum for the user in the given application) in the new (two-dimensional) evaluation system. This corresponds to a *rectangular domain* (domain “A”) in the top right corner of the R_a – SEK diagram. The following domains (B-G) are *L-shaped areas* to the left of and below domain “A” in the R_a -SEK diagram of the new evaluation system. To belong to the category “B”, both $R_a > R_a(\text{limit}, B)$ and $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{limit}, B)$ shall be true but the light source should not belong to domain “A”, etc.

At this point, it is very important to point out that the new evaluation system is *two-dimensional*: every light source obtains two values (R_a and SEK). The categories A-G are determined based on this two-dimensional representation. Mathematically, it would be false to use a one-dimensional quantity as a basis of the new evaluation system and the determination of the categories in the framework of the new concept.

In a sample computation, the values R_a and SEK were calculated for a *sample set* of 304 light sources (thankfully obtained from METAS, Switzerland) with $\alpha=1$ (no dynamic lighting) and $\beta=1$ (interior lighting) in this example. Conventional incandescent lamps in this *sample set* obtained the category G, compact fluorescent lamps obtained the categories F and G while the other fluorescent light sources (semi-compact and tube-shaped) obtained a broad range of category assignments between B and G with one tube-shaped fluorescent lamp in the category B. Finally, 14 high-quality LED light sources reached the “category A” evaluation.

The preliminary category limit values were determined computationally to get a predefined percentage value in each category. The use of predefined percentage values represents just one possible decision strategy. This strategy and the percentage values themselves should be discussed in the future.

Concerning the general advantages of the new usefulness evaluation method, it should be noted that the increase of *electric energy efficiency* of lighting is a very important issue today. To quantify energy efficiency, today's accepted metric is *luminous efficacy of a source* (lm/W), a quantity which is the result of weighting the *spectral radiant flux* of the light source by the $V(\lambda)$ function. But, as mentioned in the Introduction, the $V(\lambda)$ function over-weights the *spectral power distribution* of the light source in the range around 555 nm compared to its benefit [12] for human users.

In the new evaluation system, however, all useful wavelengths are equally considered because a *colour quality measure* (the CIE CRI R_a *general colour rendering index* in the present version) is also included. Latter measure is in favour of a *balanced* spectrum with ample yellow, orange and red content. At the same time, the measures of brightness and the circadian effect support shorter (bluish) wavelengths. Therefore, if the spectrum of the light source is characterized and then categorized by the aid of the new method then the efficiency of converting electric energy into electromagnetic radiation is represented in a more comprehensive way than provided by the conventional concept of *luminous efficacy of a source*. The *benefits of lighting* described by the luminous flux (in lm) of the light source (e.g. *visual acuity*) remain included via the term Φ_v in Eq. (1).

Also, the new concept includes a dependence on the type of *lighting application* (*interior lighting* or *exterior lighting*) and a possible way of considering the availability of *dynamic lighting*. E.g. for “relaxing” applications, the *circadian* component is in favour of *warm white tones* and this fosters relaxation and reduces sleep latency in the evening. The *labelling of a light source* by the new categories fosters the productivity of working hours and the satisfaction and life quality of the light source user. A remaining issue is how to communicate the new method for the labelling of lighting products for non-experts. The succeeding legislative procedure is a difficult task. The proposed R_a -SEK diagram is possibly not appropriate to this purpose and much additional work is required in the future.

As seen above, the descriptor quantities of the following *benefits of lighting* were combined in the new concept: brightness, the circadian effect and colour quality; and, implicitly, via the term Φ_v in Eq. (1), also a further aspect, *visual acuity*. As already mentioned, only some *selected aspects* were considered in the present version and only those aspects that can be described based on the *spectral power distribution* of the light source.

The presence or absence of *disturbing tints* (e.g. greenish or purplish shades) in the perceived *white tone* of the light source [13] was not included in the new method because manufacturers tend to avoid such *white tones* by the use of appropriately tight LED chromaticity regions (so-called “bins”) in recent times.

Concerning the use of *alternative metrics* to quantify the individual *benefits of lighting*, Berman's metric [14] i.e. $L_{\text{aq}} = L_v (R/V)^{0.5}$ (R is the *rod photoreceptor signal* to be computed by weighting the *relative spectral power distribution* of the light source by the *scotopic luminous efficiency function*) was not used because (unlike L_{mes} of CIE 191:2010 [2]) this metric (a forerunner of L_{mes}) does not *weight* rod photoreceptor and cone photoreceptor contributions at different mesopic levels *differently*.

To compute *brightness* in the photopic range, the Fotios and Levermore [1] metric was chosen because it is experimentally well-established. Also, recent experimental evidence showed the appropriateness of the *S-cone photoreceptor signal* to describe another important attribute, *visual clarity* [15] in the *photopic range of vision*. The *equivalent luminance metric* of the CIE [16] was

not used because its accuracy was problematic when predicting some recent experimental results.

To characterize the *circadian effect*, the *melanopic factor* a_{mel} [4] was used. In future possible modifications of the present version of the new evaluation method, the so-called *circadian stimulus* (CS) [17, 18, 19, 20] is an alternative. The CS scale was tested and verified in recent field studies [20]. The quantity CS accounts for the interactions of the rod photoreceptor and cone photoreceptor signals with the signals of the *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* (ipRGCs) and also for *spectral non-additivities*.

The *melanopic factor* a_{mel} does not take the neurophysiology and neuroanatomy of the retina nor the operating characteristics of the *circadian system* into account [20]. Despite this known deficiency, a_{mel} was chosen in the present version of the new evaluation method due to its simplicity. Simplicity is important for practical *lighting design*. Comparing the two measures (a_{mel} and CS) in case of the sample set of 304 light source data, it was found that the quantities CS and $\log_{10}(a_{\text{mel}} E_v)$ correlate linearly with $r^2=0.95$ between 10 lx and 1000 lx.

Concerning *colour quality*, the *general colour rendering index* CIE CRI R_a [3] is used in the present version of the new evaluation method due to its worldwide acceptance and universal implementation today. In the future, the CIE 2017 colour fidelity index (CIE R_f) [9] can also be considered instead. Latter index is intended only for “scientific use” at the moment, therefore it was not included in the present (application oriented) new evaluation method. To incorporate *colour preference* characteristics which are more relevant for *general lighting* than *colour fidelity* (*colour preference* characteristics deviate from the colour fidelity framework, see e.g. [8, 19]), the *colour quality scale metric* CQS Q_p [10] can be applied as an alternative metric in the future to replace R_a . Latter metric (CQS Q_p) performed reasonably well in recent visual *colour preference* experiments [21].

The metric CQS Q_p (which correlates better with visual *colour preference* characteristics than the other metric of the CQS method, CQS Q_a) is not so well known and it is not incorporated in international standards. The measures of *colour gamut* (IES R_g [22] and CQS Q_g [10]) do not correlate well with the other considered *colour quality* metrics. This was shown in an additional computation in case of the 304 light sources. Thus the measures of *colour gamut* represent a possible third dimension in a future version of the new evaluation method. A *colour gamut measure* was not included in the new evaluation method because a (standalone) *colour gamut metric* is in favour of oversaturating the coloured objects of an illuminated scene and this is *not preferred* by the users in *general lighting* applications [21].

In summary, it can be concluded that the present document contains a new evaluation system with a new measure to describe the most important benefits of a light source for human users [23]. The new evaluation system is two-dimensional with two orthogonal components, 1. the *general colour rendering index* (R_a ; abscissa) and 2. SEK, a new *energy efficiency measure* (ordinate). The first component, the conventional general colour rendering index (CIE CRI R_a) is intended to describe the *colour quality* of the light source.

As it is assumed that (above a certain *illuminance level*) *colour quality* does not depend on the amount of *electric energy* consumed, this quantity (R_a) was used because it intrinsically does not depend on input electric power (P_{el}). The second component (SEK) is an *application dependent* combination of a descriptor of *brightness* and a descriptor of the *circadian effect*. The dependence on *luminous flux* was preserved in the definition of the new quantity SEK (see Eq. 1) in order to retain a descriptor of *visual acuity*.

The dependence of lighting application (or *application dependence*) means that the value of SEK supports *warm white* light source spectra for *more relaxing* applications while it supports *neutral white* and *cool white* spectra for *activating* applications. The definition of the categories (A-G) of the *lighting product* in the *new evaluation system* is two-dimensional. Mathematically, a one-dimensional quantity to determine the category limits would be meaningless because there are (at least) two underlying dimensions. The categories (A-G) characterize the overall benefit of the lighting product for the human user (i.e. its usefulness) related to its electric energy consumption.

References

- [1] S. A. Fotios, G. J. Levermore, "Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model," *Lighting Res. Technol.* 30, 103–106 (1998).
- [2] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance, CIE Publication 191:2010 (CIE, 2010).
- [3] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3-1995 (CIE, 1995).
- [4] DIN, DIN SPEC 5031-100:2015-08, Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings – Quantities, symbols and action spectra (Beuth Verlag, 2015).
- [5] V. C. Smith, J. Pokorny, "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vis. Res.* 15(2), 161-171 (1975).
- [6] European Standard CSN EN 13201-2:2015, Road lighting - Part 2: Performance requirements (CSN EN, 2015).
- [7] S. A. Fotios, C. Cheal, "Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness," *Lighting Res. Technol.* 43, 143–157 (2011).
- [8] R. J. Lucas, S. Peirson, D. Berson, T. Brown, H. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, G. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age," *Trends Neurosci.* 37, 1-9 (2014).
- [9] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use, CIE Publication 224:2017 (CIE, 2017).
- [10] W. Davis, Y. Ohno, "Colour quality scale," *Opt. Eng.* 49, 033602 (2010).
- [11] M. Canazei, P. Dehoff, S. Staggia, W. Pohl, "Effects of dynamic ambient lighting on female permanent morning shift workers," *Lighting Res. Technol.* 46, 140–156 (2014).
- [12] M. S. Rea, A. Bierman, "A new rationale for setting light source luminous efficacy requirements," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Sept. 10 (2016).
- [13] Rea MS, Freyssinier JP, "White lighting," *Colour Research and Application* 2013; 38: 82–92.
- [14] S. M. Berman, The Reengineering of Lighting Photometry (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995).

- [15] P. Bodrogi, T. Q. Khanh, "Visual clarity and brightness in indoor and outdoor lighting: experiments and modelling," in Proceedings of the CIE Midterm Meeting 2017 (CIE, 2017).
- [16] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE Supplementary System of Photometry, CIE Publication 200:2011 (CIE, 2011).
- [17] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system," *Lighting Res. Technol.* 44, 386–396 (2012).
- [18] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough, "Circadian light," *J. Circadian Rhythms* 8(2) (2010).
- [19] M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, "A model of phototransduction by the human circadian system," *Brain Res. Rev.* 50, 213-228 (2005).
- [20] M. G. Figueiro, R. Nagare, L. L. A. Price, "Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness," *Lighting Res. Technol.* 50, 38–62 (2018).
- [21] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, X. Guo, T. T. Anh, "Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 4: Experiments with still life arrangements at different correlated colour temperatures," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Mar. 24 (2017).
- [22] A. David, P. T. Fini, K. W. Houser, L. Whitehead, "Development of the IES method for evaluating the colour rendition of light sources," *Optics Express* 23, 15888-15906 (2015).
- [23] Q. T. Vinh, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources, *Optics Express* 26, 14538-14551 (2018);
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-11-14538&id=389907>.

Résumé

L'efficacité énergétique des produits d'éclairage est actuellement évaluée par la quantité *d'efficacité lumineuse* (lm/W). Cette quantité est calculée à partir du *flux lumineux* (lm). Mais la quantité du *flux lumineux* ne fournit pas une description complète de l'effet de la lumière (rayonnement électromagnétique dans la plage de longueurs d'onde de 360 nm à 830 nm) sur l'homme : le flux lumineux n'est pas une quantité appropriée pour décrire tous les *avantages de l'éclairage* pour l'homme résultant de chaque *gamme spectrale*.

Les produits d'éclairage et les systèmes d'éclairage permettent de différentes tâches visuelles. Pour accomplir ces tâches, il faut beaucoup plus qu'une certaine quantité de flux lumineux : la lumière doit être délivrée avec la luminosité correcte, la chromaticité correcte et au bon moment. La *demande d'électricité* augmente généralement avec les besoins croissants *en avantage de l'éclairage*. Mais si nous n'évaluons l'efficacité électrique que à l'aide de la quantité *d'efficacité lumineuse* (lm/W), alors le bénéfice réel d'un produit d'éclairage peut être très faible dans une application réelle.

Si *l'efficacité lumineuse* est utilisée comme le seul critère d'évaluation des *produits d'éclairage*, alors les produits d'éclairage à bénéfices multiples et élevés mais avec une efficacité lumineuse plus faible, pourraient ne pas remplir les conditions requises pour obtenir une excellente évaluation de l'efficacité énergétique. Par conséquent, ils pourraient disparaître du marché parce qu'ils ne remplissent pas les exigences légales bien qu'ils seraient très bénéfiques pour leurs utilisateurs. C'est pourquoi les avantages des produits d'éclairage en termes d'efficacité énergétique doivent être mieux formulés et mieux pris en considération à l'avenir.

En conséquence, l'objectif du présent document est de dériver de nouvelles quantités afin d'évaluer les avantages réels de l'éclairage pour les utilisateurs humains et de combiner les descripteurs numériques des avantages individuels de l'éclairage en un nouveau *concept d'évaluation* numérique complet. Ce nouveau concept d'évaluation et la méthode mathématique correspondante sont présentés dans ce document. Le nouveau concept et la nouvelle méthode ont été appliqués à un jeu échantillon de données de *sources lumineuses* et cet ensemble a été évalué par la nouvelle méthode à titre d'exemple.

La conception des *propriétés spatiales de la lumière*, par exemple la *répartition spatiale de la radianc*e et la *répartition spatiale de l'irradiation*, p. ex. le « lavage des murs », l'éclairage diffus ou l'éclairage ponctuel, les fortes lumières et les ombres, et les *propriétés temporelles de la lumière*, par exemple l'éclairage dynamique (c'est-à-dire la modification de la *température de couleur en corrélation* abrégée par CCT pendant une journée de travail) font l'objet des considérations relatives à la *qualité de l'éclairage* dans le design architectural. Le présent concept d'évaluation concerne seulement les *propriétés spectrales de l'éclairage*, c'est-à-dire les propriétés qui résultent de la *répartition spectrale de la puissance* du système d'éclairage ou, plus précisément, de la *source lumineuse* utilisée.

Plus précisément, le présent concept d'évaluation a été développé en recherchant une *quantité numérique* appropriée pour représenter les avantages les plus importants résultant du spectre de la source lumineuse pour un utilisateur humain. L'objectif était de résumer tous ces avantages et d'exprimer *l'utilité de la source de lumière* d'une manière pratique. Par définition, nous considérons qu'une source lumineuse ou un système d'éclairage est *utile* s'il présente autant d'avantages de l'éclairage (p. ex. luminosité, performance visuelle, effet d'activation biologique, *qualité des couleurs*) que possible en utilisant *le moins d'énergie électrique possible*.

L'objectif du présent document est donc de décrire la *définition mathématique* d'un jeu de deux quantités numériques constituant un concept unique d'évaluation bidimensionnelle. Ce concept d'évaluation résume les avantages les plus importants d'une source lumineuse pour un être humain. Les quantités numériques seront calculées à partir de la *distribution spectrale de puissance* et de la *puissance électrique d'entrée* (en W) de la source lumineuse. Comme mentionné ci-dessus, *l'efficacité lumineuse d'une source en lumens par unité de watt* (qui est encore largement utilisée aujourd'hui dans ce but) n'est *pas* une quantité appropriée.

Plus précisément, la raison en est que la *fonction $V(\lambda)$* (la base de la *photométrie conventionnelle*) ne représente que la combinaison linéaire des photorécepteurs cône *sensibles aux longues longueurs d'onde* et aux *moyennes longueurs d'onde*. Il ne tient pas compte des signaux importants des photorécepteurs cône *sensibles aux longueurs d'ondes courtes*, des photorécepteurs tige (qui sont responsables de la *vision scotopique* et travaillent en collaboration avec les photorécepteurs cône dans la *vision mésopique*) et des *cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles* (ipRGCs ; ceux-ci sont responsables de l'effet d'activation biologique ou de *l'effet circadien de la lumière*).

Le concept du présent document est qu'au lieu du concept de *l'efficacité lumineuse d'une source*, on devrait utiliser une combinaison de quantités de descripteurs pertinents aux avantages pour caractériser la source lumineuse, y compris un *indice de rendu des couleurs*, une mesure de la luminosité et de la *performance visuelle*, et une mesure de *l'effet circadien*. Bien sûr, mathématiquement, il existe de nombreuses possibilités de combiner de telles *quantités descriptives* qui résultent de la distribution spectrale de la puissance de la source lumineuse et de l'énergie électrique. Dans le présent document, la méthode de calcul d'une proposition possible et plausible (susceptible d'être acceptée par l'industrie en général) est décrite. Cette proposition contient un nouveau système d'évaluation avec une nouvelle mesure d'utilité.

Pendant l'élaboration de la nouvelle méthode d'évaluation, dans l'intérêt d'une solution praticable et largement acceptable pour la caractérisation de la source lumineuse, seuls les *avantages essentiels de l'éclairage pour l'homme* pour *l'éclairage intérieur* et *l'éclairage extérieur* en général ont été pris en considération. On a souligné que la nouvelle méthode devrait être discutée dans le cadre d'un dialogue avec l'industrie de l'éclairage et les représentants gouvernementaux pendant la phase de développement.

Il a également été souligné que les métriques permettant de décrire les *avantages de l'éclairage* choisis (c'est-à-dire les plus importants) devraient être fondés sur des travaux bien établis et bien connus, par exemple des publications largement connues ou des normes internationales. Ce faisant, l'objectif était d'être prêt pour des applications industrielles à l'échelle mondiale. Nous avons également proposé que le nouveau système d'évaluation soit testé pour un jeu représentatif d'au moins 300 spectres absolus (c'est-à-dire des données spectro-radiométriques absolues, y compris l'efficacité lumineuse d'une source en unités lm/W) des sources lumineuses largement utilisées aujourd'hui. Pendant le développement du projet, ce jeu (produits d'éclairage commerciaux typiques) a été obtenu avec l'aide cordiale de METAS, Suisse.

Une autre considération était que la valeur de la nouvelle mesure de l'utilité devrait *dépendre de l'application*. Par exemple, si le but est un *travail concentré* dans un bureau, la nouvelle valeur devrait être très faible dans le cas d'une source de lumière *blanche chaude*. La raison en est que, bien que nous introduisions de l'énergie électrique, les utilisateurs (qui voudraient travailler) ne seront pas satisfaits car ils ont plutôt besoin d'une source de lumière *blanche froide* pour un travail concentré. Mais la même source de lumière *blanche chaude* devrait obtenir une nouvelle valeur plus élevée si elle est utilisée pour éclairer le soir un salon pour se détendre. De plus, nous avons exigé que le type d'application (éclairage intérieur, éclairage extérieur) et le *niveau*

de luminance dans l'éclairage extérieur (type de la rue) ainsi que la possibilité d'un *éclairage dynamique* soient également pris en considération.

Selon ce qui précède, les *avantages suivants de l'éclairage* et les *métriques de la qualité de l'éclairage* (les descripteurs numériques des avantages de l'éclairage) ont été choisis pour être représentés dans le nouveau système d'évaluation :

Luminosité et performance visuelle : pour décrire cet avantage, l'ainsi-dite *luminance équivalente* L_{aq} (Fotios et Levermore [1]) a été choisie pour les applications *d'éclairage intérieur*, et la *luminance* dite *mésopique* L_{mes} (CIE 191:2010 [2]) a été choisie pour les applications *de l'éclairage extérieur*.

1. Qualité des couleurs : pour décrire cet avantage, *l'indice général de rendu des couleurs*, CIE CRI R_a [3] a été sélectionné.
2. Effet circadien (l'effet biologique d'activation de la lumière) : pour décrire cet avantage, la quantité a_{mel} [4] a été sélectionnée.

Pour résumer ce qui précède, trois avantages de l'éclairage, la luminosité, la qualité des couleurs et l'effet circadien ont été choisis pour être inclus dans la *nouvelle méthode d'évaluation*. On a décidé que le concept de luminosité devrait être décrit par la quantité $L_{\text{aq}} = L_v (S/V)^{0.24}$ selon Fotios et Levermore [1] si la source lumineuse doit être utilisée pour *l'éclairage intérieur* (L_{aq} signifie *luminance équivalente* et L_v signifie *luminance* en cd/m^2). Ici, le symbole S représente le signal des *photorécepteurs humains sensibles aux longueurs d'onde courtes* (les dits cônes S) calculé en pondérant la *distribution spectrale relative de puissance* de la source lumineuse avec la *sensibilité spectrale* des cônes S (avec les données de *sensibilité des photorécepteurs coniques* de Smith et Pokorny [5]) et en intégrant dans la *gamme de longueurs d'onde visible*. La quantité V (le dit signal V) est obtenue en pondérant la distribution spectrale de puissance relative de la source lumineuse avec la *fonction $V(\lambda)$* et en l'intégrant dans la *gamme de longueurs d'onde visible*.

Si la source lumineuse doit être utilisée pour *l'éclairage extérieur*, la quantité L_{mes} (la *luminance mésopique* de CIE Publ. 191:2010 [2]) entre en jeu à la place de $L_v (S/V)^{0.24}$. Lors du calcul de la valeur de la luminance mésopique L_{mes} , soit $L_v=3.0 \text{ cd}/\text{m}^2$ (qui représente les *rues de classe M* [6]) ou $L_v=0.3 \text{ cd}/\text{m}^2$ (qui représente les *rues de classe P* [6] avec 5 lx et avec un *coefficient de luminance* de la route de $0.06 \text{ cd}/(\text{m}^2 \text{ lx})$) est utilisé comme niveau de luminance dans la méthode de calcul de la CIE Publ. 191 [2].

La raison pour laquelle on a choisi L_{mes} [2] pour décrire la *luminosité* pour *l'éclairage extérieur* est que, bien qu'elle ait été développée à partir de données de *performance visuelle*, cette mesure (c.-à-d. L_{mes} [2]) correspond bien à la luminosité [7] ($r^2=0.86$ selon la Fig. 4 dans [7]). La métrique mésopique L_{mes} pondère le *signal de photorécepteur tige* et les *signaux de photorécepteur cône* aux *niveaux de luminance* inférieurs (mésopiques) caractéristiques de *l'éclairage extérieur*, tandis que la métrique L_{aq} selon Fotios et Levermore [1] considère les *photorécepteurs S-cône* qui ont une réponse plus accentuée aux niveaux de luminance (photopique) de l'éclairage intérieur caractéristiquement plus élevés que les *photorécepteurs tige*.

L'effet circadien est caractérisé par le *facteur mélanorique* a_{mel} calculé à partir de la *distribution de puissance spectrale relative* de la source lumineuse selon DIN SPEC 5031-100 [4] de la manière suivante : la distribution de puissance spectrale relative est pondérée par la fonction $S_{\text{mel}}(\lambda)$ [4] (basée sur Lucas et al. [8]) et intégrée dans la gamme de longueurs d'onde visible ; et le résultat est divisé par le signal V défini ci-dessus du *spectre relatif*.

Compte tenu des considérations qui précèdent, le nouveau système d'évaluation a été défini comme suit. Les quantités d'entrée de la méthode de calcul sont la *distribution spectrale de puissance* de la source lumineuse, le flux lumineux (lm) et la puissance électrique (W) de la source lumineuse. La nouvelle mesure de l'utilité a été définie comme une quantité bidimensionnelle (c'est-à-dire consistant d'un jeu de deux valeurs) à être représentée comme un point dans un diagramme à deux axes orthogonaux. Une mesure de la *qualité de la couleur* (R_a) se trouve sur l'abscisse. En raison de son utilisation répandue aujourd'hui, cette mesure est *l'indice général de rendu des couleurs* CIE CRI R_a [3], conventionnel comme mentionné ci-dessus. Dans les discussions futures, les quantités CIE R_f [9] ou CQS Q_p [10] peuvent aussi être prises en considération.

Une nouvelle mesure combinée de la luminosité et de l'effet circadien de la source lumineuse apparaît sur l'ordonnée du diagramme ci-dessus. Cette nouvelle mesure combinée est appelée *nouvelle mesure d'efficacité énergétique* (en abrégé SEK). Ce nouveau diagramme est appelé diagramme R_a -SEK. La nouvelle quantité SEK est définie par l'équation (1).

$$SEK = \left(\frac{\Phi_v}{P_{el}} \right) \cdot \left[\frac{\alpha \cdot L_{aq}}{L_v} + \beta \cdot BioNote \right] \quad (1)$$

Dans l'équation (1), Φ_v est le flux lumineux (lm) de la source lumineuse et P_{el} est la puissance électrique (W). Comme on peut le voir, *l'efficacité énergétique* est incorporée dans cette deuxième composante (SEK, Eq. 1) en multipliant *l'efficacité lumineuse d'une source* (Φ_v/P_{el}) par le terme de modification composée dans les crochets de l'éq. (1). Ce terme de modification est expliqué comme suit. Si la source lumineuse doit être utilisée pour *l'éclairage intérieur*, la quantité L_{aq} représente la mesure de la luminosité de la scène avec $L_{aq} = L_v (S/V)^{0.24}$ selon Fotios et Levermore [1], et, si la source lumineuse doit être utilisée pour l'éclairage extérieur, alors $L_{aq} = L_{mes}$ [2], comme déjà mentionné ci-dessus.

Pour être en faveur de *l'éclairage dynamique*, la valeur de α dans l'éq. (1) est égale à 1,00 s'il n'y a pas d'éclairage dynamique dans l'application donnée de la source lumineuse. La valeur de α est égale à 1,15 s'il existe un éclairage dynamique avec des températures de couleur corrélées dans la plage de CCT=5500 K - 6500 K. Les données (spectre relatif, flux lumineux et puissance électrique) du CCT le plus élevé disponible doivent être utilisées pour effectuer le calcul dans ce cas. Le facteur $\alpha = 1,15$ est une valeur préliminaire estimée à partir d'une expérience précédente dans laquelle un effet positif significatif de l'éclairage dynamique sur les travailleuses des quartiers de travail permanents du matin a été trouvé [11].

Les valeurs absolues des différences des logarithmes des valeurs caractéristiques moyennes de la latence du sommeil, de l'humeur subjective de l'anxiété/dépression, de l'excitation et de la variabilité de la fréquence cardiaque entre les conditions dynamiques et statiques ont été calculées à partir des données susmentionnées [11]. En moyenne, la valeur de 15% a été trouvée comme pourcentage de bénéfice caractéristique de l'éclairage dynamique, d'où l'utilisation du facteur multiplicatif de 1,15.

L'effet circadien de la source lumineuse (représenté par la valeur de *BioNote* dans l'éq. 1) n'est pas pris en considération si la source lumineuse est utilisée pour *l'éclairage extérieur* et ceci est exprimé par le réglage du facteur de décision β à zéro dans le cas des applications *d'éclairage extérieur*. Pour *l'éclairage intérieur*, β est égal à 1. Pour l'éclairage intérieur, le descripteur de l'effet circadien (*BioNote*) est considéré comme *activant* dans le cas de $CCT \geq 3800$ K, *relaxant* pour $CCT \geq 3200$ K et *ni activant ni relaxant* pour $3200 \text{ K} < CCT < 3800$ K. Pour une source lumineuse activatrice ($CCT \leq 3800$ K), Eq. (2) montre comment calculer la valeur du descripteur de l'effet circadien, la *BioNote*.

$$BioNote (\text{activant}) = 0.1 [(a_{\text{mel}} / a_{\text{mel},0}) - 1] \quad (2)$$

L'équation (2) signifie que les sources lumineuses plus activatrices obtiennent une valeur *Bio-Note* plus élevée dans la plage $\text{CCT} \geq 3800 \text{ K}$ (c'est-à-dire les sources de lumière blanc neutre - blanc froid). Dans l'équation (2), la quantité a_{mel} est calculée à partir de la *distribution spectrale relative de puissance* de la source lumineuse tandis que le symbole $a_{\text{mel},0}$ signifie le *facteur mélanoïque de la source lumineuse de référence* qui est défini comme une *phase de lumière du jour*, un *radiateur à corps noir* ou un mélange des deux. Cette source lumineuse de référence est déterminée (pour tout CCT) selon la méthode de la publication CIE 224:2017 [9] à partir de la *distribution spectrale de puissance relative* de la source lumineuse à évaluer (en tant que source lumineuse d'essai). Cette méthode comprend « une transition linéaire lisse et linéaire d'une *source de lumière de référence planckienne* à une *source de lumière de jour de référence* de sorte qu'à 4000 K et moins, elle est purement *planckienne*, à 4500 K, elle est un mélange 50:50 des deux, et à 5000 K et plus, elle est purement une *source de lumière de référence de jour* »[9].

Dans la plage de $\text{CCT} \leq 3200 \text{ K}$ (blanc chaud ou relaxant), la valeur de *BioNote* en Eq. (1) est définie selon l'Eq. (3).

$$BioNote (\text{relaxant}) = 0.1 [(a_{\text{mel},0} / a_{\text{mel}}) - 1] \quad (3)$$

Notez que la quantité $a_{\text{mel},0}$ (le *facteur mélanoïque de la source lumineuse de référence*) est dans le numérateur de l'équation (3) contrairement à Eq. (2). Dans Eq. (2), $a_{\text{mel},0}$ apparaît dans le dénominateur. Ainsi, des sources lumineuses *plus relaxantes* (c'est-à-dire des *tons blancs* plus chauds) obtiennent une valeur plus élevée de *BioNote* dans la plage de $\text{CCT} \leq 3200 \text{ K}$. Enfin, en cas de sources lumineuses *ni activatrices ni relaxantes* ($3200 \text{ K} < \text{CCT} < 3800 \text{ K}$), Eq. (4) montre la façon de calculer la valeur de *BioNote* en mélangeant Eq. (2) et Eq. (3).

$$\begin{aligned} \text{BioNote} = & 0.1 [(a_{\text{mel},0} / a_{\text{mel}}) - 1] [(3800 \text{ K} - \text{CCT}) / 600 \text{ K}] \\ & + 0.1 [(a_{\text{mel}} / a_{\text{mel},0}) - 1] [(\text{CCT} - 3200 \text{ K}) / 600 \text{ K}] \end{aligned} \quad (4)$$

Comme dernière étape des calculs dans le nouveau système d'évaluation, une *catégorie de l'utilité* (A : meilleur ; jusqu'à G : pire) est déterminée à partir des valeurs de R_a et SEK de la *source lumineuse* dans le *plan R_a -SEK* par l'utilisation d'un jeu de valeurs *limites de catégorie*. Ces valeurs *limites par catégorie* sont considérées comme préliminaires (sous réserve de discussions ultérieures). Une source lumineuse appartient à la catégorie "A" si R_a et SEK sont tous les deux supérieurs à la valeur limite de la catégorie "A". Cela signifie que, pour satisfaire au critère "A", $R_a > R_a(\text{limite, A})$ et $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{limite, A})$ doivent être satisfaits.

Les quantités $R_a(\text{limite, A})$ et $\text{SEK}(\text{limite, A})$ représentent les limites de la catégorie "A" (c'est-à-dire "meilleure utilité" ou "meilleur avantage" du spectre pour l'utilisateur dans l'application donnée) dans le nouveau système d'évaluation (bidimensionnel). Cela correspond à un *domaine rectangulaire* (domaine "A") dans le coin supérieur droit du diagramme R_a -SEK. Les domaines suivants (B-G) sont des *zones en forme de L* à gauche et en dessous du domaine "A" dans le diagramme R_a -SEK du nouveau système d'évaluation. Pour appartenir à la catégorie "B", aussi bien $R_a > R_a(\text{limite, B})$ que $\text{SEK} > \text{SEK}(\text{limite, B})$ doivent être vrais, mais la source lumineuse ne doit pas appartenir au domaine "A", etc.

A ce stade, il est très important de souligner que le nouveau système d'évaluation est *bidimensionnel* : chaque source lumineuse obtient deux valeurs (R_a et SEK). Les catégories A-G sont déterminées sur la base de cette représentation bidimensionnelle. Mathématiquement, il serait faux d'utiliser une quantité unidimensionnelle comme base du nouveau système d'évaluation et de détermination des catégories dans le cadre du nouveau concept.

Dans un calcul d'échantillon, les valeurs R_a et SEK ont été calculées pour un *échantillon* de 304 sources lumineuses (heureusement obtenues de METAS, Suisse) avec $\alpha=1$ (pas d'éclairage dynamique) et $\beta=1$ (éclairage intérieur) dans cet exemple. Les lampes à incandescence conventionnelles de ce *jeu d'échantillon* ont obtenu la catégorie G, les lampes fluorescentes compactes ont obtenu les catégories F et G, tandis que les autres sources lumineuses fluorescentes (semi-compactes et en forme de tube) ont obtenu une large gamme d'affectations de catégories entre B et G avec une lampe fluorescente en forme de tube dans la catégorie B. Enfin, 14 sources lumineuses LED de haute qualité ont atteint l'évaluation "catégorie A".

Les valeurs limites préliminaires de catégorie ont été déterminées par calcul pour obtenir un pourcentage prédéfini dans chaque catégorie. L'utilisation de valeurs en pourcentage prédéfinies ne représente qu'une stratégie de décision possible. Cette stratégie et les valeurs en pourcentage elles-mêmes devraient être discutées à l'avenir.

En ce qui concerne les avantages généraux de la nouvelle méthode d'évaluation de l'utilité, il convient de noter que l'augmentation de *l'efficacité énergétique électrique* de l'éclairage est une question très importante aujourd'hui. Pour quantifier l'efficacité énergétique, la métrique acceptée aujourd'hui est *l'efficacité lumineuse d'une source* (lm/W), une quantité qui est le résultat de la pondération du *flux radiant spectral* de la source lumineuse par la *fonction $V(\lambda)$* . Mais, comme mentionné dans l'introduction, la fonction $V(\lambda)$ surpasse la *distribution spectrale de la puissance* de la source lumineuse dans la gamme autour de 555 nm par rapport à son avantage [12] pour les utilisateurs humains.

Dans le nouveau système d'évaluation, cependant, toutes les longueurs d'onde utiles sont également prises en compte parce qu'une *mesure de la qualité des couleurs* (*l'indice général de rendu des couleurs* CIE CRI R_a dans la version actuelle) est également incluse. Cette dernière mesure est en faveur d'un spectre *équilibré* avec un large contenu en jaune, orange et rouge. En même temps, les mesures de la luminosité et de l'effet circadien supportent des longueurs d'onde plus courtes (bleutées). Par conséquent, si le spectre de la source lumineuse est caractérisé et ensuite catégorisé à l'aide de la nouvelle méthode, l'efficacité de conversion de l'énergie électrique en rayonnement électromagnétique est représentée d'une manière plus complète que celle fournie par le concept conventionnel *d'efficacité lumineuse d'une source*. Les *avantages de l'éclairage* décrits par le flux lumineux (en lm) de la source lumineuse (par exemple *l'acuité visuelle*) restent inclus via le terme Φ_v dans l'équation (1).

De plus, le nouveau concept inclut une dépendance sur le type *d'application d'éclairage* (*éclairage intérieur* ou *extérieur*) et une façon possible de considérer la disponibilité de *l'éclairage dynamique*. Par exemple, pour les applications « relaxantes », la composante *circadienne* est en faveur des *tons blancs chauds*, ce qui favorise la relaxation et réduit la latence du sommeil le soir. *L'étiquetage d'une source lumineuse* par les nouvelles catégories favorisera la productivité des heures de travail ainsi que la satisfaction et la qualité de vie de l'utilisateur de la source lumineuse. Il reste à savoir comment communiquer la nouvelle méthode d'étiquetage des produits d'éclairage pour les non-experts. La procédure législative qui s'ensuit est une tâche difficile. Le diagramme R_a -SEK proposé n'est peut-être pas approprié à cet effet et beaucoup de travail supplémentaire sera nécessaire à l'avenir.

Comme nous l'avons vu plus haut, les quantités descriptives des *avantages* suivants de *l'éclairage* ont été combinées dans le nouveau concept : la luminosité, l'effet circadien et la qualité des couleurs ; et, implicitement, via le terme Φ_v dans Eq. 1, même un autre aspect, *l'acuité visuelle*. Comme nous l'avons déjà mentionné, seuls certains aspects *sélectionnés* ont été pris en considération dans la présente version, et seuls les aspects qui peuvent être décrits sur la base de la répartition *spectrale* de la puissance de la source lumineuse.

La présence ou l'absence de *teintes dérangeantes* (par exemple, des teintes verdâtres ou violacées) dans le *ton blanc* aperçu de la source lumineuse [13] n'a pas été incluse dans la nouvelle méthode, parce que les fabricants ont tendance à éviter ces *teintes blanches* par l'utilisation de zones de chromaticité des LED (appelées « bins ») suffisamment serrées ces derniers temps.

En ce qui concerne l'utilisation de *métriques alternatives* pour quantifier les *avantages* individuels de *l'éclairage*, la métrique de Berman [14], c'est-à-dire $L_{\text{aq}} = L_v (R/V)^{0.5}$ (R est le *signal photorécepteur tige* à calculer en pondérant la *distribution de puissance spectrale relative* de la source de lumière par la *fonction d'efficacité lumineuse scotopique*) n'a pas été utilisé parce que (contrairement à L_{mes} de la CIE 191:2010[2]) cette métrique (un précurseur de L_{mes}) ne *pondère pas différemment* les contributions des photorécepteurs tige et photorécepteurs cône à divers niveaux mésopiques.

Pour calculer la *luminosité* dans la gamme photopique, la métrique de Fotios et Levermore [1] a été choisie parce qu'elle est expérimentalement bien établie. De plus, des données expérimentales récentes ont démontré la pertinence du *signal photorécepteur du cône S* pour décrire un autre attribut important, la *clarté visuelle* [15] dans la gamme de *vision photopique*. La *métrique de luminance équivalente* de la CIE [16] n'a pas été utilisée parce que sa précision était problématique lors de la prédiction de certains résultats expérimentaux récents.

Pour caractériser l'*effet circadien*, on a utilisé le facteur mélanopique a_{mel} [4]. Dans les futures modifications possibles de la version actuelle de la nouvelle méthode d'évaluation, le *stimulus circadien* (CS) [17, 18, 19, 19, 20] est une alternative. Le cadran CS a été testé et vérifié lors d'études récentes sur le terrain [20]. La quantité CS tient compte des interactions des signaux des photorécepteurs à tige et des photorécepteurs à cône avec les signaux des *cellules ganglionnaires rétiniennes intrinsèquement photosensibles* (ipRGCs) et aussi pour les *non-additivités spectrales*.

Le *facteur mélanopique* a_{mel} ne tient pas compte de la neurophysiologie et de la neuroanatomie de la rétine ni des caractéristiques de fonctionnement du *système circadien* [20]. Malgré cette lacune connue, a_{mel} a été choisi dans la version actuelle de la nouvelle méthode d'évaluation en raison de sa simplicité. La simplicité est importante pour le *projet pratique de l'éclairage*. En comparant les deux mesures (a_{mel} et CS) dans le cas de l'échantillon de 304 données sur les sources lumineuses, on a constaté que les quantités CS et $\log_{10}(a_{\text{mel}} E_v)$ sont en corrélation linéaire avec $r^2=0,95$ entre 10 lx et 1000 lx.

En ce qui concerne la *qualité des couleurs*, l'*indice général de rendu des couleurs* CIE CRI R_a [3] est utilisé dans la version actuelle de la nouvelle méthode d'évaluation en raison de son acceptation mondiale et de sa mise en œuvre universelle aujourd'hui. A l'avenir, l'*indice de la fidélité des couleurs* CIE 2017 (CIE R_f) [9] peut également être pris en considération. Ce dernier indice n'est actuellement destiné qu'à un « usage scientifique », c'est pourquoi il n'a pas été inclus dans la nouvelle méthode d'évaluation actuelle (orientée à l'application). Pour incorporer les caractéristiques de *préférence de couleur* qui sont plus pertinentes pour *l'éclairage général* que la *fidélité de couleur* (les caractéristiques de *préférence de couleur* s'écartent du cadre de fidélité de couleur, voir par exemple [8, 19]), la *métrique du cadran de la qualité de couleur* CQS Q_p [10] peut être appliquée comme métrique alternative à l'avenir pour remplacer R_a . La dernière métrique

(CQS Q_p) s'est raisonnablement bien comportée dans des récentes expériences visuelles sur les *préférences de couleurs* [21].

La métrique CQS Q_p (qui correspond mieux aux caractéristiques de *préférence visuelle* des couleurs que l'autre métrique de la méthode CQS, la CQS Q_a) n'est pas aussi bien connue et n'est pas incorporée dans les normes internationales. Les mesures de la *gamme de couleurs* (IES R_g [22] et CQS Q_g [10]) ne sont pas bien corrélées avec les autres métriques de la *qualité des couleurs* considérées. Cela a été démontré dans un calcul supplémentaire dans le cas des 304 sources lumineuses. Ainsi, les mesures de la *gamme de couleurs* représentent une troisième dimension possible dans une future version de la nouvelle méthode d'évaluation. Une *mesure de gamme de couleurs* n'a pas été incluse dans la nouvelle méthode d'évaluation parce qu'une *métrique de gamme de couleurs* (autonome) est en faveur d'une sursaturation des objets colorés d'une scène illuminée, ce qui n'est *pas préféré* par les utilisateurs dans les applications *d'éclairage général* [21].

En résumé, on peut conclure que le présent document contient un nouveau système d'évaluation avec une nouvelle mesure pour décrire les avantages les plus importants d'une source de lumière pour les utilisateurs humains [23]. Le nouveau système d'évaluation est bidimensionnel avec deux composantes orthogonales, 1. *l'indice général de rendu des couleurs* (R_a ; abscisse) et 2. SEK, une nouvelle *mesure d'efficacité énergétique* (ordonnée). Le premier composant, l'indice général conventionnel de rendu des couleurs (CIE CRI R_a) est destiné à décrire la *qualité de la couleur* de la source lumineuse.

Comme on suppose que (au-dessus d'un certain *niveau d'éclairement*) la *qualité de la couleur* ne dépend pas de la quantité *d'énergie électrique* consommée, cette quantité (R_a) a été utilisée parce qu'elle ne dépend intrinsèquement pas de la puissance électrique d'entrée (P_{el}). La deuxième composante (SEK) est une combinaison *dépendant de l'application* d'un descripteur de *luminosité* et d'un descripteur de *l'effet circadien*. La dépendance au *flux lumineux* a été préservée dans la définition de la nouvelle quantité SEK (voir Eq. 1) afin de conserver un descripteur de *l'acuité visuelle*.

La dépendance de l'application d'éclairage (ou *dépendance de l'application*) signifie que la valeur de SEK supporte les spectres de source de lumière *blanche chaude* pour des applications *plus relaxantes* tandis qu'elle supporte les spectres *blanc neutre* et *blanc froid* pour des applications *activatrices*. La définition des catégories (A-G) du *produit d'éclairage* dans le *nouveau système d'évaluation* est bidimensionnelle. Mathématiquement, une quantité unidimensionnelle pour déterminer les limites de catégorie serait dénuée de sens parce qu'il y a (au moins) deux dimensions sous-jacentes. Les catégories (A-G) caractérisent l'avantage global du produit d'éclairage pour l'utilisateur humain (c'est-à-dire son utilité) par rapport à sa consommation d'énergie électrique.

Liste de références

- [1] S. A. Fotios, G. J. Levermore, "Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model," *Lighting Res. Technol.* 30, 103–106 (1998).
- [2] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance, CIE Publication 191:2010 (CIE, 2010).
- [3] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3-1995 (CIE, 1995).

- [4] DIN, DIN SPEC 5031-100:2015-08, Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings – Quantities, symbols and action spectra (Beuth Verlag, 2015).
- [5] V. C. Smith, J. Pokorny, "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," *Vis. Res.* 15(2), 161-171 (1975).
- [6] European Standard CSN EN 13201-2:2015, Road lighting - Part 2: Performance requirements (CSN EN, 2015).
- [7] S. A. Fotios, C. Cheal, "Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness," *Lighting Res. Technol.* 43, 143–157 (2011).
- [8] R. J. Lucas, S. Peirson, D. Berson, T. Brown, H. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, G. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age," *Trends Neurosci.* 37, 1-9 (2014).
- [9] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use, CIE Publication 224:2017 (CIE, 2017).
- [10] W. Davis, Y. Ohno, "Colour quality scale," *Opt. Eng.* 49, 033602 (2010).
- [11] M. Canazei, P. Dehoff, S. Staggia, W. Pohl, "Effects of dynamic ambient lighting on female permanent morning shift workers," *Lighting Res. Technol.* 46, 140–156 (2014).
- [12] M. S. Rea, A. Bierman, "A new rationale for setting light source luminous efficacy requirements," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Sept. 10 (2016).
- [13] Rea MS, Freyssinier JP, "White lighting," *Colour Research and Application* 2013; 38: 82–92.
- [14] S. M. Berman, The Reengineering of Lighting Photometry (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995).
- [15] P. Bodrogi, T. Q. Khanh, "Visual clarity and brightness in indoor and outdoor lighting: experiments and modelling," in Proceedings of the CIE Midterm Meeting 2017 (CIE, 2017).
- [16] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE Supplementary System of Photometry, CIE Publication 200:2011 (CIE, 2011).
- [17] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, R. Hamner, "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system," *Lighting Res. Technol.* 44, 386–396 (2012).
- [18] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough, "Circadian light," *J. Circadian Rhythms* 8(2) (2010).
- [19] M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, "A model of phototransduction by the human circadian system," *Brain Res. Rev.* 50, 213-228 (2005).
- [20] M. G. Figueiro, R. Nagare, L. L. A. Price, "Non-visual effects of light: How to use light to promote circadian entrainment and elicit alertness," *Lighting Res. Technol.* 50, 38–62 (2018).
- [21] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, X. Guo, T. T. Anh, "Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 4: Experiments with still life arrangements at different correlated colour temperatures," *Lighting Res. Technol.*, first published online on Mar. 24 (2017).
- [22] A. David, P. T. Fini, K. W. Houser, L. Whitehead, "Development of the IES method for evaluating the colour rendition of light sources," *Optics Express* 23, 15888-15906 (2015).
- [23] Q. T. Vinh, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources, *Optics Express* 26, 14538-14551 (2018);
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-11-14538&id=389907>

1 Zielstellung

Die Bewertung der Stromeffizienz von Produkten der Beleuchtungstechnik erfolgt bislang überwiegend mittels der Kenngröße Lichtausbeute (lm/W). Diese errechnet sich aus dem Lichtstrom. Der Lichtstrom ist aber keine erschöpfende Beschreibung für die als Licht bezeichnete elektromagnetische Strahlung im Wellenbereich von ca. 360 nm bis ca. 830 nm und damit auch kein hinreichendes Maß für den über das Spektrum von einer Beleuchtung erbrachten Nutzen. Einzelprodukte und Anlagen der Beleuchtungstechnik dienen unterschiedlichsten Sehauflagen, deren Erfüllung jedoch meistens weit mehr als nur Lichtstrom erfordert, nämlich Lieferung von Licht mit der richtigen Helligkeit, dem richtigen Spektrum zur richtigen Zeit. Der Bedarf an Elektrizität nimmt i. A. mit dem Umfang der Einzelnutzen zu. Wird zur Bewertung der Stromeffizienz nur der Wert der Lichtausbeute herangezogen, ergibt sich bei Produkten mit vielen Einzelnutzen ein niedrigerer Effizienzwert.

Richten sich die Anforderungen nach der Höhe der von beliebigen Produkten erreichbaren Lichtausbeutewerte, also auch Produkten, deren Nutzen nicht weit über den Einzelnutzen Helligkeit hinausgeht, können Produkte mit vielen Einzelnutzen diese Anforderungen schwerer oder gar nicht erfüllen. Im Falle gesetzlicher Vorgaben für die Produktgestaltung, beispielsweise der EU-Vorgaben, kann dies dazu führen, dass notwendige Produkte vom Markt verschwinden. Der von Produkten erbrachte Nutzen soll bei der Formulierung von Anforderungen an die Stromeffizienz in Zukunft besser berücksichtigt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in diesem Dokument geeignete, neue Bewertungsmaßstäbe aus dem neuesten Wissensstand abgeleitet. Diese neuen Bewertungsmaßstäbe werden in einem neuen Bewertungsansatz zusammengefasst.

2 Die $V(\lambda)$ -Funktion als Grundlage für die Berechnung der Lichtausbeute

2.1 Einführung

Im Jahr 1924 hat die CIE die heute unter dem Namen $V(\lambda)$ -Funktion bekannte spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion für das Tagessehen (photopisches Sehen) definiert [1] und damit aus der damaligen Sicht eine wahrnehmungsrelevante Grundlage zur Charakterisierung der Lichtquellen und Beleuchtungssituationen gelegt. Basierend auf der bereits bei der Einführung als provisorisch betrachteten Funktion und den abgeleiteten lichttechnischen Kenngrößen wird bis zur heutigen Zeit eine große Anzahl an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Ihre Resultate werden in den Standardwerken und Normen der Innenraumbeleuchtung, Außenbeleuchtung, der automobilen Lichttechnik und in der Display-Lichttechnik wiedergefunden. Im Jahr 1931 definierte die CIE das bis heute gültige farbmetrische System mit den spektralen Normfarbwertanteilsfunktionen, das mit der $y(\lambda)$ -Funktion gleich der $V(\lambda)$ -Funktion eine sehr enge Beziehung zu der Photometrie hat. Die Farbmetrik wurde somit untrennbar von der photopischen Lichttechnik konzipiert.

Von 1924 bis heute haben Entwicklungen in der Lichttechnik und Farbmetrik in mehreren Epochen stattgefunden. Beginnend mit den thermischen Strahlern (Glühlampen) am Anfang des 20. Jahrhunderts wurden zur Mitte desselben eine Reihe von Entladungslampen wie Quecksilber- und Natriumdampflampen, Xenonlampen und Leuchtstofflampen mit unterschiedlichen Spektren, Farben und Lichtausbeuten entwickelt. Seit den Sechzigern werden Generationen von Halogenlampen, Kompakteuchtstofflampen und Halogenmetalldampflampen serienreif auf den Markt gebracht. Vor wenigen Jahren wurde die Epoche der Halbleiter-Lichtquellen wie LEDs eingeleitet, die die Lichttechnik in einem bisher nicht geahnten Maß prägen wird. Die Lampenspektren werden vielfältiger und die Einsatzbereiche in der Beleuchtungstechnik werden wesentlich vergrößert.

Parallel zu dieser technologischen Entwicklung ruft eine zunehmende Bedeutung von Beleuchtung auch eine tiefgreifende wissenschaftliche Diskussion über die Wirkung optischer Strahlung generell und sichtbaren Lichtes im speziellen Fall hervor. Neben einer Diskussion über die Farbwiedergabe, deren Defizite und Lösungsansätze in der heutigen Farbmetrik zu finden sind, sowie einer Diskussion über die Wirkung des Lichtes auf die Gesundheit, die in den letzten Jahren eine neue Dimension eingenommen hat, gibt es einen intensiven Meinungsaustausch sowie Forschungsarbeiten zu Wahrnehmungsaspekten von Licht sowohl beim Tages- als auch beim Dämmerungssehen.

Es ist unübersehbar, dass man zur Lösung der wahrnehmungsgebundenen Aufgabenstellungen eine wissenschaftlich tiefgründliche Denkweise braucht und eine Reihe von Fragestellungen fundamental beantworten muss:

1. Welche physiologischen und psychophysischen Prozesse begleiten bzw. verursachen die spektralen optischen Empfindlichkeitsfunktionen? Welche Prozesse der Wahrnehmung bilden die Grundlage der $V(\lambda)$ -Funktion?
2. Sind Prozesse für die Sehaufgaben wie Helligkeit, Kontrast und Sehschärfe physiologisch nachweisbar? Welche Parameter bestimmen deren spektrales und integrales Verhalten?
3. Wo liegt der Gültigkeitsbereich der heute bekannten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen?

4. Welche modernen Wahrnehmungsmodelle stehen uns heute zur Verfügung und wie groß bzw. relevant sind die Differenzen zwischen ihnen und den heute gebräuchlichen, klassischen lichttechnischen Modellen?
5. Kann man die Blendung wirklich mit $V(\lambda)$ -gewichteten Kenngrößen wie Leuchtdichte oder Beleuchtungsstärke beschreiben? oder basiert die spektrale Blendungsbewertung auf einem anderen physiologischen Prozess, der durch die $V(\lambda)$ -Funktion nicht beschrieben werden kann?
6. Was für ein Prozess beschreibt den Adaptationszustand des menschlichen Sehapparats unter der photopischen oder mesopischen Sehbedingung? Wie äußert sich der für eine bestimmte Beleuchtungssituation eingestellte Adaptationszustand?

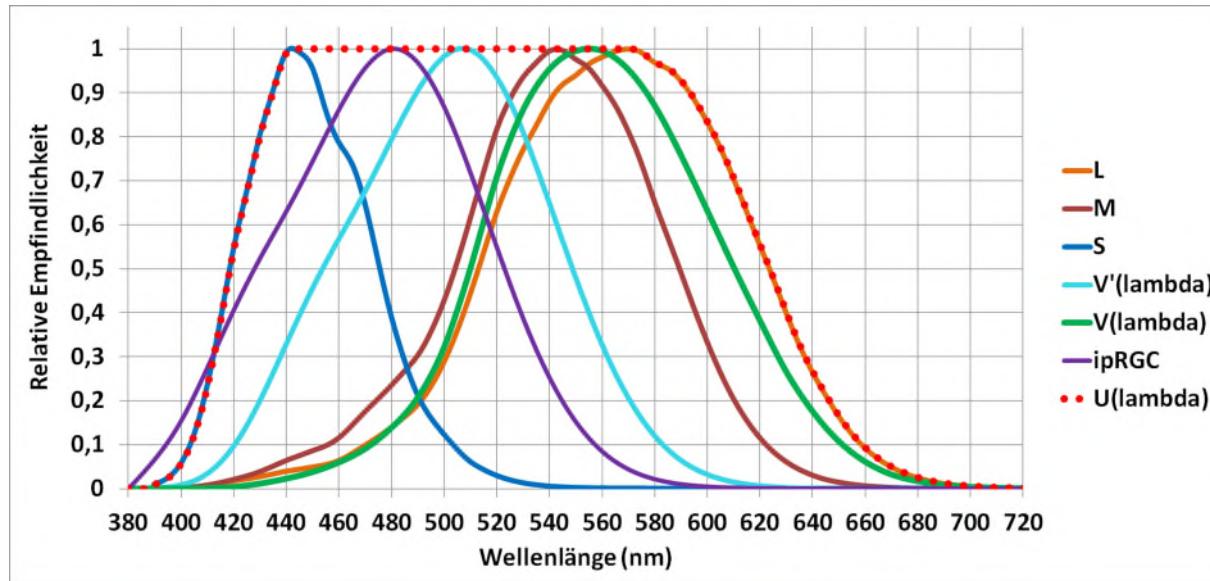
2.2 Netzhautmechanismen und $V(\lambda)$ -Funktion

Die wesentlichen Komponenten des menschlichen Auges sind, in Lichtrichtung gesehen, die Hornhaut, die Augenpupille, die Augenlinse und die Netzhaut. Nach dem bisherigen Kenntnisstand wird der Durchmesser der Augenpupille allein von der photopischen Objektleuchtdichte bestimmt. Das bedeutet, dass die Lampenspektren dabei keine Rolle spielen. Die derzeit favorisierte Formel für diese Abhängigkeit ist folgende [2]:

$$d = 5 - 3 \cdot \tanh(0,4 \cdot \log(L_p)) \quad (2.1)$$

In Gl. (2.1), d ist der Augenpupillendurchmesser und L_p die photopische nach $V(\lambda)$ -Funktion berechnete Leuchtdichte. Bei hoher Leuchtdichte (über 150.000 cd/m²) nähert sich der Augenpupillendurchmesser 2 mm an, bei niedriger Leuchtdichte (um 0,001 cd/m²) 8 mm. Die Formel gilt für ein Sehfeld von 50° und mehr. Auf der Netzhaut befinden sich 4 Rezeptortypen, die die optische Information aufnehmen und in Nervensignale umwandeln. Die drei Zapfenarten L, M und S sind aktiv beim Tag- und Dämmerungssehen und haben ihre spektrale Empfindlichkeitsfunktion in dem langwelligen, mittelwelligen und kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektralgebietes. Die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen, $V'(\lambda)$, die beim Dämmerungs- oder Nachtsehen aktiv sind, hat ihr Maximum bei 507 nm (s. Abbildung 1).

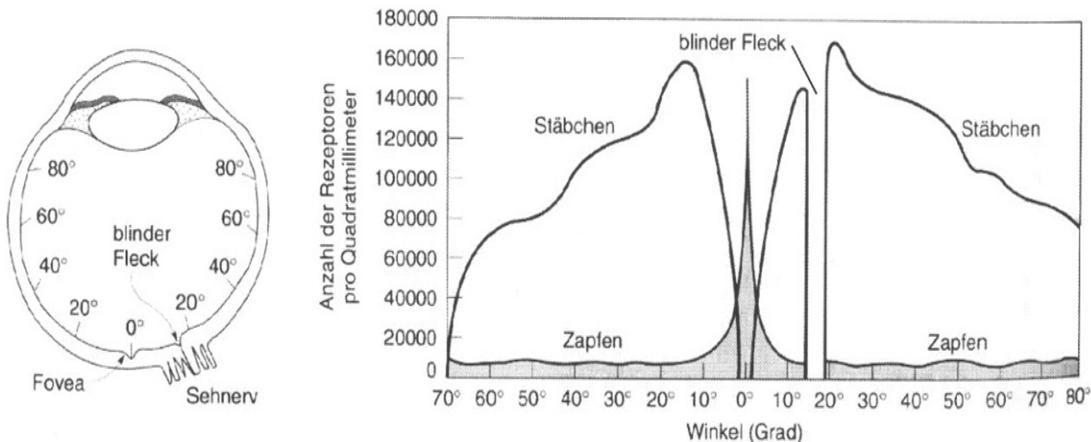
Abbildung 1: Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der L-, M-, und S-Zapfen, der ipRGCs, die V'-Funktion, die V'-Funktion (Stäbchen) sowie die sog. U(λ)-Funktion [27]



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Die lokale Verteilung der Zapfen und Stäbchen auf der Netzhaut wird in der Abbildung 2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Foveabereich um 2° nur mit Zapfenrezeptoren besetzt ist, nach außen reduziert sich der Zapfenanteil und der Anteil an Stäbchen nimmt zu. Eine fundierte Erklärung über das Zustandekommen der Helligkeitswahrnehmung im menschlichen Sehapparat und deren Berechnung wurde ausführlich in verschiedenen Literaturen beschrieben /5, 6/. Bei Lichteinfall auf der Netzhaut werden in den drei Zapfentypen drei unterschiedliche Signale als Produkt der photochemischen Reaktion generiert. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand, der sowohl durch psychophysische als auch durch physiologische Experimente einwandfrei unterstützt wird, werden auf dem Weg zum Gehirn die achromatischen Signale im Luminanzkanal und die chromatischen Signale in zwei Farbdifferenzkanälen R-G und Y-B erzeugt (s. Abbildung 3).

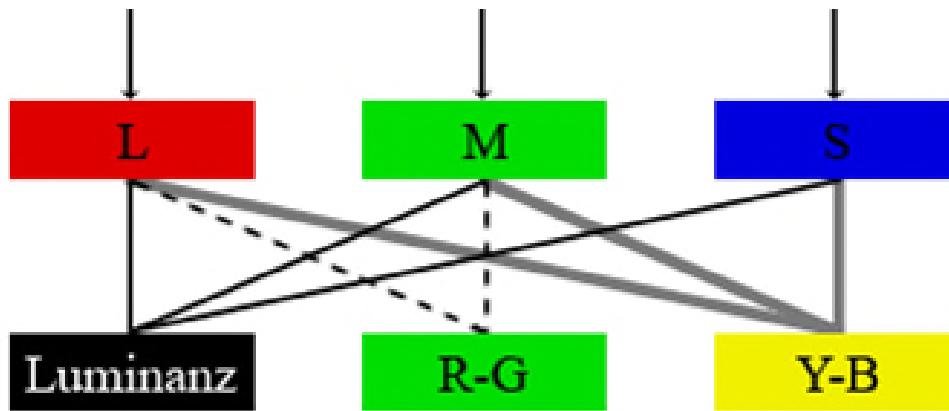
Abbildung 2: Lokale winkelabhängige Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut



Quelle:[4]

Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Sehapparates sind abhängig von den Abgleichmethoden und den Sehbedingungen, unter denen diese Funktionen ermittelt wurden. Beim Verfahren des minimalen Flimmerns wird der Testperson unter 2°-Sehwinkel ein farbiges Testlicht abwechselnd mit einem Referenzlicht bei einer bestimmten Frequenz (um 25 Hz, abhängig vom Beobachter) dargeboten. Die Testperson muss nun die Strahldichte so einstellen, dass sich ein Minimum der Flimmererscheinung wahrgenommen wird. Diese Frequenz ist oberhalb der Verschmelzungsgrenze für Farben (chromatische Kanäle inaktiv) aber unterhalb der Verschmelzungsgrenze für die Luminanz. Der Kehrwert der Strahldichte, dargestellt als Funktion der Wellenlänge des Testlichtes, ist die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion.

Abbildung 3: Netzhautnahe Stufen der Gehirnsignalverarbeitung



Quelle:[6]

Beim direkten heterochromen Abgleichverfahren soll die Testperson in einem Photometerfeld die zu bewertende monochromatische Strahlung gleich hell wie eine Referenzstrahlung (z. B. Planckscher Strahler mit 2045 K, Strahlung der Wellenlänge 555 nm oder D65) einstellen. Da es sich hier um einen niederfrequenten Vorgang handelt, gehen in das Abgleichsergebnis sowohl die achromatische als auch die chromatische Komponente ein. Zu den heterochromen Abgleichverfahren gehört das Kleinstufenverfahren.

Wyszecki und Stiles haben in [2] die Grundgesetze der Photometrie, die auch Abney-Gesetze genannt werden, formuliert:

Symmetrie: Wenn ein Strahlungsreiz A dem Strahlungsreiz B gleich hell abgeglichen ist, dann ist der Strahlungsreiz B auch dem Strahlungsreiz A gleich hell.

Transitivität: Wenn A zu B und B zu C abgeglichen sind, dann ist A zu C abgeglichen

Proportionalität: Wenn der Strahlungsreiz mit der Intensität A zum anderen Strahlungsreiz mit der Intensität B abgeglichen ist, dann ist der Strahlungsreiz mit der Intensität $k \cdot A$ auch gleich hell dem Strahlungsreiz mit der Intensität $k \cdot B$, wobei k ein beliebiger positiver Faktor ist, mit dem die Intensität der beiden Strahlungsreize reduziert oder erhöht werden, ohne die relative spektrale Verteilung zu verändern.

Während die Symmetrie und die Transitivität mehrfach in visuellen Experimenten [2] bestätigt wurden, ist die Einhaltung der Proportionalitätsbedingung keine Selbstverständlichkeit. Zum Beispiel wurden zwei Strahlungsreize mit unterschiedlichen spektralen Zusammensetzungen bei fovealem Sehen unter 2° im mittleren photopischen Bereich um 100 cd/m² auf die gleiche Helligkeit abgeglichen. Danach wurden die Strahldichten beider Teilfelder erhöht auf den Adaptationsbereich um 20.000 cd/m². Beide Teilfelder erscheinen nicht mehr gleich hell, da sich die

spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen spektral-selektiv verändern [2]. Die Proportionalität setzt voraus, dass das spektrale Verhalten des visuellen Systems über einen großen Strahldichtebereich konstant ist. Das gilt im mesopischen Bereich wegen des Purkinje-Effektes jedoch nicht.

Für den Aufbau eines photometrischen Systems und zur Bildung einer lichttechnischen Größe verwendet man die Gleichung (2.2).

$$L_v = 683 \text{ lm/W} \cdot \int V(\lambda) \cdot L_e(\lambda) d\lambda \quad (2.2)$$

mit $V(\lambda)$: die spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion für Tagesssehen

$L_e(\lambda)$: die spektrale Strahldichte des gesehenen Objektes bzw. der Lichtquelle

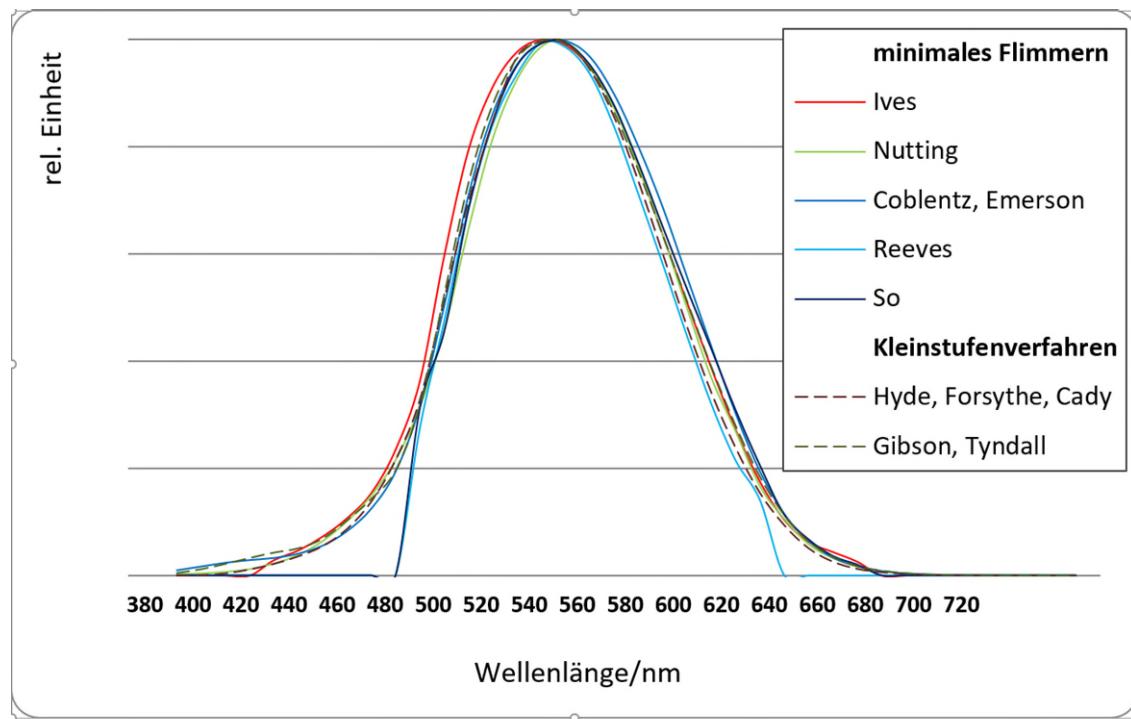
Bei jeder Wellenlänge wird die spektrale Strahldichte der Lichtquelle $L_e(\lambda)$ mit der spektralen Empfindlichkeitsfunktion des Sehapparates $V(\lambda)$ bewertet und zu einem Signal $S(\lambda)$ im Gehirn gebildet. Es erfolgt dann eine Summation (Integration) aller Signale $S(\lambda)$ im sichtbaren Wellenlängenbereich zu einem gesamten Signal, das der Hellempfindung entspricht. Eine Summation findet nur statt, wenn sich die einzelnen Signale $S(\lambda)$ nicht gegenseitig beeinflussen. Diese Voraussetzung nennt sich die Additivitätsbedingung und bildet die Grundlage der heutigen Photometrie. Aus dem heutigen Stand der Wissenschaft des Sehens gilt die Additivitätstheorie nur, wenn die Signale der einfallenden Strahlung eine hohe räumliche und zeitliche Frequenz haben. Eine hohe zeitliche Modulationsfrequenz etwa über 25 Hz macht die chromatischen Kanäle (R-G) und (Y-B) unwirksam. Eine hohe räumliche Frequenz realisiert man beispielsweise durch die Betrachtung (2-°-Sehwinkel) von Buchstaben oder Figuren, deren Form scharf abgegrenzt ist. Dafür ist die foveale Sehschärfe zuständig.

2.3 Geschichte der $V(\lambda)$ -Funktion

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde in Amerika eine Reihe von Untersuchungen zur Bestimmung der „spektralen relativen Visibilität“ (frei übersetzt aus dem englischen Begriff „relative visibility function“) durchgeführt. Die Untersuchungen unterschieden sich durch die Testmethoden, Wellenlängenbereiche, Gesichtsfeldwinkel und Adaptationsleuchtdichten. Abbildung 4 zeigt die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen verschiedener Untersuchungen. In der Tabelle 1 werden die in den Untersuchungen verwendeten Parameter dargestellt /7, 8, 9, 10, 11/. Daran erkennt man:

1. Die meisten Verfahren zählen zur Flimmerphotometrie. Die Verfahren von Hyde & Co (1918) und Gibson & Tyndall (1923) waren das Kleinstufenverfahren.
2. Der Gesichtsfeldwinkel betrug entweder 1,5 ° (So, 1920), 2 ° (Ives, Nutting, Coblenz & Emerson), 3 ° (Gibson & Tyndall) oder 7 ° (Hyde & Co).
3. Alle Untersuchungen wurden bei den Adaptationsleuchtdichten zwischen 0,135 cd/m² bis 3,65 cd/m² durchgeführt und lagen somit im mesopischen Bereich (Dämmerungssehen). Die bis heute geltende Annahme, dass die daraus sich ergebende $V(\lambda)$ -Funktion für das Tagesssehen repräsentativ sei, ist nicht korrekt.
4. Die meisten Testpersonen waren in einem jungen Alter. Die demographische Entwicklung in den meisten westeuropäischen und nordamerikanischen Ländern in den nächsten Jahren des 21. Jahrhunderts wird ein anderes Bild darstellen.

Abbildung 4: Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen in den Untersuchungen vor 1923



Quelle: [7]

Tabelle 1: Parameter der Untersuchungen zur Ermittlung der spektralen Empfindlichkeitsfunktion [7]. TP: Anzahl der Testpersonen

| Autor | Methode | Okular-Blende | Feld-winkel | Leuchtdichte L (cd/m ²) | Netzhautbeleuchtungsstärke/Troland | λ-Bereiche (nm) | TP | Alter |
|------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-------------|--|---|----------------------------|---------------|----------------------------|
| Ives (1912e) | Flimmern | 0,5 mm* 2 mm | 2 ° | 2,095 | 95 | 481-655 | 18 | 18-40 |
| Nutting (1914) | Flimmern | 0,57 mm* 2,57 mm | 2 ° | 3,66 | 163 | 490-640: 400-700: | 21 5 | |
| Coblentz & Emerson (1918) | Flimmern | 0,52 mm* 2,63 mm | 2 ° | 490-690 nm: 0,47 435-490 nm: 0,14 690-750 nm: 0,14 | 490-690 nm: 22 435-490 nm: 7 690-750 nm: 7 | 490-690: 435-750: 20 | 12 5 20 | 19-59 Mit- tel 29 |
| Hyde, Forsythe & Cady (1918) | Kleinstufenverfahren | 0,6 mm ² | 7 ° | 560 nm: 0,705 500 nm: 0,135 650 nm: 0,401 | 560 nm: 29 500 nm: 6 650 nm: 17 | 500-660 | 29 | |
| Reeves (1918) | Flimmern | | | | | 490-640 | 13 | |
| So (1920) | Flimmern | | 1,5 ° | ca. 3,58 | ca. 168 | 500-680 | 20 | 16-48 |
| Gibson & Tyndall (1923) | Kleinstufenverfahren | 0,2 bis 0,8 mm * 1,25 mm (λ-abh.) | 3 ° | 580 nm: 0,97 490 nm: 0,24 680 nm: 0,195 | 560 nm: 43 500 nm: 11 650 nm: 9 | 490-680: 430-740: | 52 38 | |

Im Jahre 1923 haben Gibson und Tyndall im Auftrag des amerikanischen Komitees der CIE die spektrale Visibilität nach dem Kleinstufenverfahren bestimmt (s. Tabelle 1). Sie veröffentlichten eine ausführliche Publikation, in der sie die eigenen Ergebnisse mit früheren sorgfältig verglichen und der CIE eine Hybrid-Funktion präsentierten, die letztendlich im Jahr 1924 durch die CIE unter dem heute bekannten Namen „spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V(\lambda)$ “ eingeführt wurde. Im Prinzip setzt sich die $V(\lambda)$ -Funktion aus den folgenden Funktionen nach Sharpe und Stockman [14] zusammen:

1. Von 400 nm bis 490 nm: nach den Ergebnissen von Hyde & Co (1918) mit dem Kleinstufenverfahren
2. Von 490 nm bis 540 nm: nach den Ergebnissen von Coblenz & Emerson (1918) mit dem Verfahren des minimalen Flimmerns
3. Von 540 nm bis 650 nm: nach den Ergebnissen von Gibson & Tyndall (1923) mit dem Kleinstufenverfahren
4. Oberhalb 650 nm: nach den Ergebnissen von Coblenz & Emerson (1918) mit dem Verfahren des minimalen Flimmerns

Die Mischungsfunktion $V(\lambda)$ ist somit ein Kunstprodukt aus verschiedenen Ergebnissen mit unterschiedlichen Methoden, die den verschiedenartigen augenphysiologischen Mechanismen unterliegen. Diese Funktion ist kein Repräsentant irgendeines Wahrnehmungseffektes.

Die $V(\lambda)$ -Funktion unterscheidet sich im Wellenlängenbereich kleiner als 460 nm durch die Übernahme der Ergebnisse von Hyde & Co (1918) erheblich von den anderen Ergebnissen von Nutting (1914), Coblenz & Emerson (1918) und Gibson & Tyndall (1923). Sie wurde durch Judd im Jahr 1951 und letztendlich durch Vos (1978) verbessert [12] und endgültig von der CIE im Jahr 1988 als die $V_m(\lambda)$ -Funktion verabschiedet [13].

Dennoch bleibt sie bis heute unbenutzt in der Lichttechnik. Im Jahr 1964 hat die CIE ein farbmetrisches System für den Gesichtsfeldwinkel von 10° [2] mit einer Funktion $y_{10^\circ}(\lambda)$ als Helligkeitsachse definiert, nicht aber eine spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion $V_{10^\circ}(\lambda)$. Da die meisten Anwendungen in der Lichttechnik mit einem Gesichtsfeld größer als 2° konfrontiert sind, hatten Schanda, Morren, Rea, Ronchi und Walraven [3] die $y_{10^\circ}(\lambda)$ -Funktion als $V_{10^\circ}(\lambda)$ provisorisch empfohlen. Seit dem Jahr 2000 bis heute gibt es von Stockman und Sharpe eine Reihe von grundlegenden und wissenschaftlich korrekten Untersuchungen zur Neubestimmung der $V(\lambda)$ -Funktion [14]. Die Testbedingungen sind wie folgt:

Das Verfahren ist das Verfahren des minimalen Flimmerns bei einer photopischen Adaptationsleuchtdichte (etwa 3,0 log photopische Trolands, was ca. 246 cd/m^2 entspricht) und bei einer Flimmerfrequenz von 25 Hz. Die Schwäche der bisherigen $V(\lambda)$ -Kurve durch die Adaptationsleuchtdichten im mesopischen Bereich ist somit vermieden.

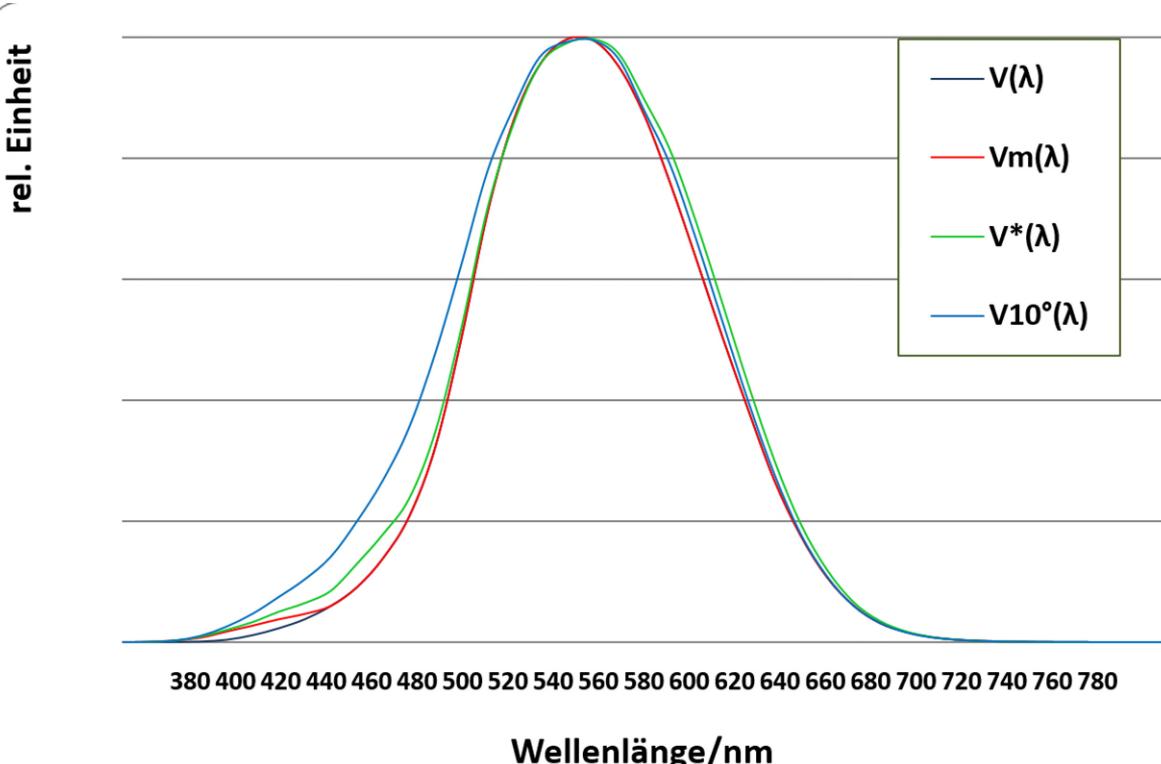
Das Adaptationslicht ist äquivalent dem Tageslicht D65. Der Gesichtsfeldwinkel ist 2° und garantiert damit gemeinsam mit der Frequenz von 25 Hz die Additivitätsbedingung der Photometrie. 40 Testpersonen mit einem durchschnittlichen Alter von 33 wurden getestet.

Die neu gewonnene Funktion $V^*(\lambda)$ wird zurzeit in der CIE diskutiert. Durch die sorgfältig gewählten Testbedingungen und Durchführungen kann man davon ausgehen, dass diese Funktion die augenphysiologischen Mechanismen im photopischen Bereich bei hoher Frequenz und Gesichtsfeldwinkel von 2° korrekt beschreiben kann. Nach Sharpe und Stockman [14] kann man die neue $V^*(\lambda)$ -Funktion wie folgt mathematisch formulieren:

$$V(\lambda) = |1,62434 \cdot l(\lambda) + m(\lambda)| / 2,525598 \quad (2.3)$$

Somit erfolgt die Bildung der Hellempfindungswerte nur mit Signalen aus den L-und M-Kanälen. Der Kanal der blauen Zapfen trägt nicht bzw. vernachlässigbar dazu bei. In Abbildung 5 werden die vier Funktionen $V(\lambda)$, $V_m(\lambda)$, $V_{10^\circ}(\lambda)$ und $V^*(\lambda)$ graphisch dargestellt. In Tabelle 2 werden die Verhältnisse der nach den Funktionen $V_m(\lambda)$, $V^*(\lambda)$ und $V_{10^\circ}(\lambda)$ berechneten Leuchtdichten zu der heute gültigen $V(\lambda)$ -Leuchtdichte für eine Reihe von repräsentativen Lichtquellen aufgelistet.

Abbildung 5: Die spektralen Funktionen $V(\lambda)$, $V_m(\lambda)$, $V_{10^\circ}(\lambda)$ und $V^*(\lambda)$.



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Tabelle 2: Verhältnisse der nach den Funktionen $V_m(\lambda)$, $V^*(\lambda)$ und $V_{10^\circ}(\lambda)$ berechneten Leuchtdichten zu der heute gültigen $V(\lambda)$ -Leuchtdichte

| Nr. | Lichtquelle | $L(V_m)/L(V)$ | $L(V^*)/L(V)$ | $L(V_{10^\circ})/L(V)$ |
|-----|--------------------------------------|---------------|---------------|------------------------|
| 1 | LED Rebel warmweiß 3300 K, Ra 92 | 1,003 | 1,06 | 1,08 |
| 2 | LED Rebel kaltweiß 6000 K, Ra 68 | 1,009 | 1,048 | 1,07 |
| 3 | LED Ledon warmweiß 2950 K, CRI 86 | 1,0014 | 1,051 | 1,06 |
| 4 | Xenon HID 4285 K | 1,004 | 1,05 | 1,08 |
| 5 | Normlichtart D65 | 1,002 | 1,05 | 1,08 |
| 6 | Normlichtart A | 1,00 | 1,05 | 1,06 |
| 7 | Leuchtstofflampe 58 W-840 | 1,00 | 1,05 | 1,06 |

| Nr. | Lichtquelle | $L(V_m)/ L(V)$ | $L(V^*)/ L(V)$ | $L(V10^\circ)/ L(V)$ |
|-----|---------------------------|----------------|----------------|----------------------|
| 8 | HQL 80 W deluxe | 1,00 | 1,05 | 1,06 |
| 9 | HQI TS 70 W-WDL | 1,00 | 1,055 | 1,06 |
| 10 | NAV-T 70 W Super | 1,00 | 1,06 | 1,04 |
| 11 | LED Luxeon K2 Amber | 1,00 | 1,08 | 1,04 |
| 12 | Luxeon K2 Rot | 1,00 | 1,11 | 1,02 |
| 13 | Platinum Dragon Deep Blue | 1,036 | 1,35 | 2,05 |

Betrachtet man die Tabelle 2, kann man schlussfolgern:

1. Der Unterschied zwischen der heutigen $V(\lambda)$ -Leuchtdichte und der mit der $V_m(\lambda)$ -Funktion berechneten Leuchtdichte nach Judd und Vos ist bei den meisten Lichtquellen bis auf die blaue LED (Nr. 13) verschwindend gering.
2. Die mit der $V^*(\lambda)$ -Funktion berechnete Leuchtdichte nach Stockman & Sharpe liegt bei den meisten polychromatischen Lichtquellen (4. Spalte, Nr. 1-10) um 5-6 % höher als die mit der heutigen $V(\lambda)$ -Funktion gemessene Leuchtdichte. Bei den roten und blauen LEDs (4. Spalte, Nr. 12-13) ist der Unterschied wesentlich größer und liegt bei 11 % und 35 %.
3. Die bei Sehobjekten unter 10° wahrgenommene Leuchtdichte, berechnet mit der $V_{10^\circ}(\lambda)$ -Funktion der CIE von 1964 liegt bei den meisten polychromatischen Lichtquellen (5. Spalte, Nr. 1-10) um 4-8 % höher als die gemessene Leuchtdichte ($V(\lambda)$). Bei den blauen LEDs (5. Spalte, Nr. 13) ist der Unterschied viel größer und liegt bei 105 % (Faktor 2,05).

Zudem sind sowohl die $V(\lambda)$ - als auch die $V^*(\lambda)$ -Funktion nur für den 2° -Gesichtsfeldwinkel und den photopischen Bereich ($L > 5 \text{ cd/m}^2$) sowie für Anwendungen mit hohen örtlichen und zeitlichen Frequenzen ($f > 25 \text{ Hz}$) gültig, bei denen die chromatischen Kanäle, die Stäbchen und die blauen Zapfen unwirksam sind. Die vorwiegende Zahl der Anwendungen in der Lichttechnik ist chromatisch, statisch und findet unter einem größeren Gesichtsfeldwinkel statt. Fast alle Anwendungen in der Straßenbeleuchtung und Kfz-Lichttechnik treten im mesopischen Bereich auf. Es soll hier angemerkt werden, dass die Probleme der $V(\lambda)$ -Funktion bereits seit 1938 (Jainskis Arbeit /31/) bekannt sind.

Das Thema Helligkeit wird in der Wissenschaft des Sehens seit vielen Jahrzehnten untersucht. In der Psychophysik wurde, begonnen in den Jahren 1955-1960 von Hurvich und Jameson [6] bis in die jüngste Zeit durch Experimente nachgewiesen, dass unsere Wahrnehmung optischer Strahlung in einen achromatischen Bereich und zwei chromatische Bereiche differenziert werden kann. In der optischen Physiologie und Biophysik wird bis heute versucht, die Gehirnzellen für den achromatischen und chromatischen Teil nachzuweisen. Es ist im Jahr 1988 endlich gelungen, durch Mikrosonden das Verhalten der magnozellulären Schicht (engl. MC-pathway) aufzuzeichnen, deren spektrale Antwort der photopischen Hellempfindlichkeitsfunktion für 10° -Sehwinkel (CIE 1964) entspricht [16]. In der parvozellulären Schicht (engl. PC-pathway) findet man „Rot-Grün“-Zellgruppen, die von den L- und M-Zapfen Signale bekommen, sowie „Gelb-Blau“-Zellgruppen, deren Zentren Signale von den S-Zapfen und deren Umfeld von den L- und M-Zapfen oder umgekehrt erhalten [17].

2.4 Weitere Aspekte: Sehaufgabe, Adaptationsbereiche

Im Allgemeinen können für das menschliche Auge drei Adaptationsbereiche festgelegt werden: der skotopische (Nachtsehen), der mesopische (Dämmerungssehen) und der photopische (Tagessehen) Bereich. Die CIE legt diese Bereiche anhand der Leuchtdichte fest, an die das menschliche Auge adaptiert ist. So entsprechen Leuchtdichten bis zu $0,001 \text{ cd/m}^2$ dem skotopischen, zwischen $0,001 \text{ cd/m}^2$ und etwa 5 cd/m^2 dem mesopischen und höhere Leuchtdichten werden dem photopischen Adaptationsbereich zugeschrieben.

Mit der Leuchtdichte ändert sich auch die Wichtigkeit der Sehaufgaben, die der Sehapparat erfüllen soll. Im photopischen Bereich, beispielsweise unter moderner Bürobeleuchtung oder Fabrikbeleuchtung, die DIN-Kriterien wie 300 lx bis 2000 lx bedienen, sind in der Regel die Voraussetzungen für das Kontrastsehen oder die Sehschärfe (Lesen von Dokumenten, Lesen und Mailen auf dem Monitor, Drehen, Fräsen, Montieren...) erfüllt. Unter dieser Bedingung ist es eher wichtig, die Helligkeitswahrnehmung zu betrachten, bei der die Szene nur nach den Kriterien wie „dunkel“ oder „hell“ beurteilt wird.

Verringert man die Leuchtdichte auf Werte im mesopischen Bereich, verliert die Helligkeitswahrnehmung an Bedeutung. Die Leuchtdichte einer Fahrbahn im unmittelbaren Vorfeld (bis 20 m Entfernung) eines Personenkraftwagens beträgt während einer Nachtfahrt etwa 2 cd/m^2 bis 10 cd/m^2 . In einer Entfernung von 60 m bis 70 m, auf die sich das Blickverhalten der Autofahrer zum großen Teil der Fahrzeit einstellt, liegt die Leuchtdichte der Fahrbahn in der Größenordnung von $0,1 \text{ cd/m}^2$ bis $0,2 \text{ cd/m}^2$. In den europäischen Ländern gilt die DIN EN 13201 zur Planung und Projektierung der Straßenbeleuchtung, wonach die Hauptstraßen mit mittlerem bis hohem Verkehrsaufkommen mit einer mittleren Leuchtdichte im Bereich $0,5\text{--}2 \text{ cd/m}^2$ konzipiert werden sollen. Nach den Kenntnissen der klassischen Lichttechnik stellt sich die Helligkeitswahrnehmung auf diese mittlere Leuchtdichte ein, bei der dann ein Mindestmaß an Kontrast vorhanden sein muss (Schwellenwertkontrast). Wenn die optischen Informationen im Hauptteil des Gesichtsfeldes um einiges über dieser Schwelle des Kontrastes liegen, sind diese relevanten Objekte relativ gut sichtbar.

Dies ist jedoch nicht immer der Fall, und so ist eine zweite Aufgabe, die Kontrastwahrnehmung, nun die wichtigere. Bei einem Gesichtsfeld geringer Leuchtdichte (geringe Adaptationsleuchtdichte) mit Objekten annähernd gleicher Leuchtdichte ist der Kontrast zwischen Objekt und Umfeld sehr klein. Der Sehapparat aktiviert alle Rezeptoren auf der Netzhaut, alle nachgeschalteten Verarbeitungskanäle und auch alle chromatischen Kanäle, um die optischen Signale noch auswerten zu können. Diese Situationen erlebt der Verkehrsteilnehmer auf einer Straße, die entweder nur durch Autoabblendlicht-Scheinwerfer oder durch eine unzureichende Straßenbeleuchtung erhellt wird und er zu jeder Zeit mit Hindernissen und unbekannten Objekten und Ereignissen rechnen muss.

2.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass die $V(\lambda)$ -Funktion eine Mischfunktion ist und keinen visuellen Effekt repräsentiert. Die neue $V^*(\lambda)$ -Funktion ist physiologisch gut begründet. Sie hat dennoch, wie die bisherige $V(\lambda)$ -Funktion, nur eine Gültigkeit für das achromatische Sehen bei hohen Frequenzen im photopischen Bereich für einen Gesichtsfeldwinkel von 2° . Für die Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im photopischen und mesopischen Bereich werden seitens der CIE neue Modelle entwickelt, die trotz einiger Defizite der bisherigen $V(\lambda)$ -lichttechni-

schen Berechnungsweise hoch überlegen sind. Die Blendungsforschung hat nach 100 Jahren Geschichte der CIE die neue Aufgabe, die Blendungswahrnehmung und die Blendungsursachen auf der Grundlage eines umfassenden Modells zu beschreiben, wobei die $V(\lambda)$ -Funktion nur eine Komponente darstellt.

2.6 Literatur zu Abschnitt 2

- [1] CIE Commission Internationale de l'Eclairage: Principales decisions (6e Session, 1924). CIE Sixieme Session, Geneve, Juillet 1924, Recueil des Travaux et Compte Rendu de Seances, Cambridge, University Press, 67-69, 1926
- [2] Wyszecki, G.; Stiles, S.W.: Color Science. 2nd Ed. New York: John Wiley&Sons, 1982
- [3] Schanda, J.; Morren, L.; Rea, M.; Ronchi, R.; Walraven, P.: Does lighting need more photopic luminous efficiency functions? In: Lighting Research and Technology, Vol. 34, No. 1, 69-76 (2002)
- [4] Østerberg, G.A.: Topography of the layer of rods and cones in the human retina. Acta Ophthalmologica 13 (Supplement 6) 1-97, 1935
- [5] Khanh, T.Q.: Physiologische und psychophysische Aspekte der Photometrie, Colorimetrie und Farbbildverarbeitung. Habilitationsschrift, Technische Universität Ilmenau, Institut für Lichttechnik und Technische Optik, Juni 2004
- [6] Hurvich, L.M.; Jameson, D.: Some Quantitative Aspects of an Opponent Colour Theory, a Psychlogical Colour Specification System. In: JOSA 46, p. 416-421, 1956
- [7] Vikari, M.; Eloholma, M.; Halonen, L.: 80 years of $V(\lambda)$ use: a review. In: Light& Engineering, Vol. 13, No. 4, pp.24-36, 2005
- [8] Gibson, K.S.; Tyndall, E.P.T.: The visibility of radiant energy. U.S. Natl. Bur. Stan. Bull. 19, S.131-191, 1923
- [9] Coblentz, W.W.; Emerson, W.B.: Relative sensibility of the average eye to the light of different colors and some practical applications to radiation problems. U.S. Natl. Bur. Stan. Bull. 14, 167-236, 1918
- [10] Hyde, E.P.; Forsythe W.E.; Cady F.E.: The visibility of radiation. In: The Astrophysical Journal, XLVIII, 65-88, 1918
- [11] Hartmann, L.W.: Visibility of radiation in the blue end of the visible spectrum. In: The Astrophysical Journal, XLVII, S.83-95, 1918
- [12] Vos, J.J.: Colorimetric and Photometric Properties of a 2° Fundamental Observer. In: Color Res. & Appl., 3, 125-128, 1978
- [13] CIE Technical report: CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision. Wien, Publ. No CIE 86, 1990
- [14] Sharpe, L.T.; Stockman & Co: A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. In: Journal of Vision 5, pp. 948-968, 2005
- [15] CIE technical report: Testing of supplementary systems of photometry. Wien, CIE 141, 2001.
- [16] Lee, B.B. et al.: The physiological basis of heterochromatic flicker photometry demonstrated in the ganglion cells of the macaque retina. In: Journal of Physiology 404, 323-347, 1988
- [17] Porkony, J.; Smith, V.C.: Scientific basis for visual performance. In: Proceedings of the CIE symposium on Advances in Photometry, Wien, S.80-88, 1994

- [18] Sagawa, K.: Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision. In: *Ophthal. Physiol. Opt.* 26: 240–245, 2006
- [19] Khanh, T.Q.; Böll, M.; Schiller, C.; Haferkemper, N.: Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich und deren Konsequenzen auf die Straßen- und Kfz-Beleuchtungstechnik. In: *Zeitschrift Licht*, Pflaum Verlag (München), Heft 3, S. 214-219, 2008
- [20] Kley, F.; Gottschalk, M.; Kliebisch, D.; Völker, S.; Böhm, M.: Ein Helligkeitsvergleich verschiedener Lichtquellen im mesopischen Bereich. In: *Zeitschrift Licht*, Pflaum Verlag, Heft 7/8, 2007
- [21] Fotios, S.A.; Cheal, C.: Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD. Part 2 – Brightness. In: *Lighting Research & Technology*, 39(3); 233-252, 2007
- [22] Alman, D.H.: Errors of the standard photometric system when measuring the brightness of general illumination light sources. In: *J.Illum. Eng. Soc.* 7, S.55-62, 1977
- [23] Thornton, W.A.: What is visual clarity? *J.Illum. Eng. Soc.* 7, S.85-94, 1978
- [24] Bodrogi, P.; Vas, Z.; Schiller, C.; Khanh T. Q.: Psycho-physical evaluation of a chromatic model of mesopic visual performance. In: *Proceedings of CGIV 2008, IS&T's Fourth European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (IS&T)*, 2008
- [25] Kurtenbach, A.; Meierkord, S.; Kremers, J.: Spectral sensitivities in dichromats and trichromats at mesopic retinal illuminances. In: *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 16, No. 7, pp. 1541-1547, 1999
- [26] Várady, G.; Bodrogi, P.: Mesopic spectral sensitivity functions based on visibility and recognition contrast thresholds. In: *Ophthalmic and Physiological Optics*, Volume 26, Issue 3, S. 246-253, 2006
- [27] Rea, M. et al.: A proposed unified system of photometry. In: *Lighting Research & Technology*, 36, 85-109, 2004
- [28] Goodman, T. et al.: Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to night-time driving and other applications. In: *Lighting Research & Technology*, 39, 365-392, 2007
- [29] CIE 200:2011: *CIE Supplementary System of Photometry*, CIE, Vienna, 2011
- [30] CIE191-2010: Recommended system for mesopic photometry based on visual performance, CIE, Vienna, 2010
- [31] P. Jainski, Die spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges und ihre Bedeutung für die Lichtmeßtechnik. Diss. T. H. Berlin (1938) und Union, Deutsche Verlagsgesellschaft Berlin, 1938

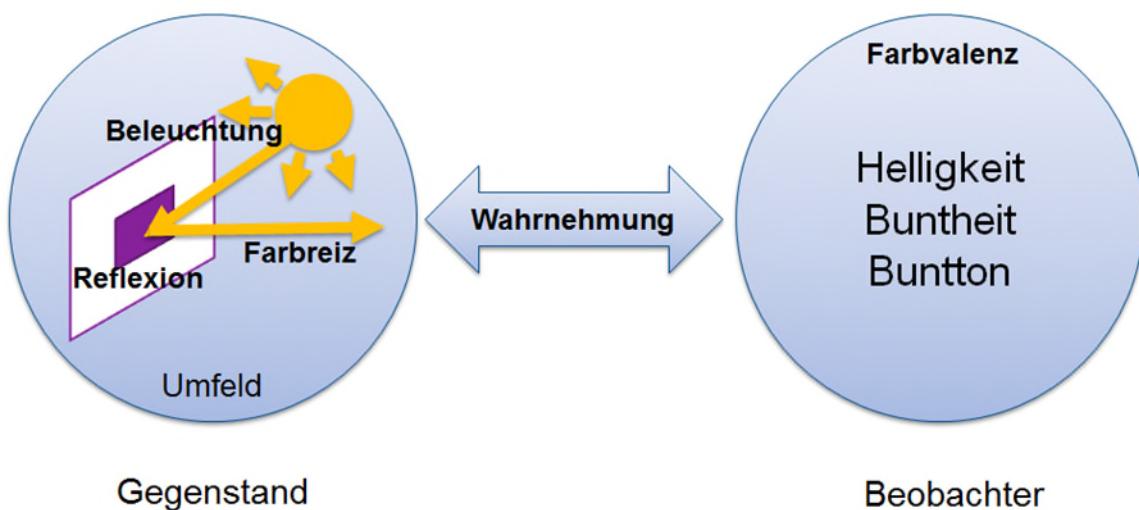
3 Helligkeit

3.1 Helligkeit im photopischen Bereich (Innenraumbeleuchtung)

3.1.1 Einführung

Aus der praktischen visuellen Erfahrung von Lichtingenieuren, Lichtplanern und Lichtnutzern ist es öfter bekannt, dass das weiße Licht mit einer höheren Farbtemperatur eine höhere Helligkeitswahrnehmung und einen besseren Räumlichkeitseindruck in einem Gebäude oder in einem Saal hervorruft. Generell besteht die optische Signalübertragungskette aus der absoluten spektralen Strahlungsleistung der Lichtquelle, dem spektralen Reflexionsgrad der gesehenen Gegenstände und dem menschlichen Augenapparat (Hornhaut, Augenlinse, Pupille, Glaskörper und Netzhaut), s. Abbildung 6.

Abbildung 6: Darstellung der Wechselwirkung zwischen den Strahlungsspektren (Beleuchtung), Reflexionsspektren der Objekte und dem Wahrnehmungsverhalten des menschlichen visuellen Informationsverarbeitungssystems

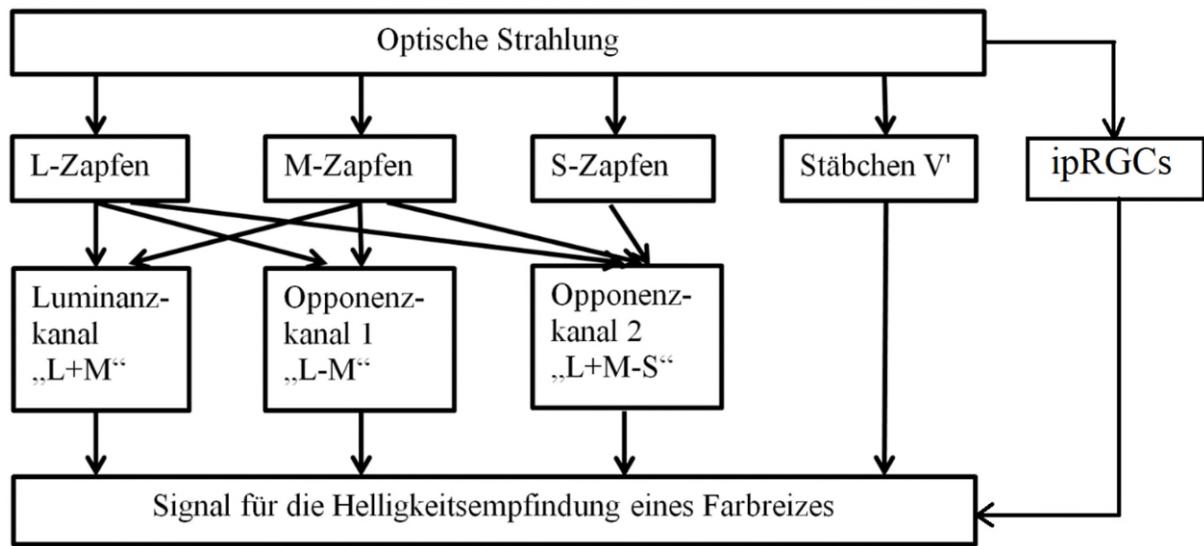


Quelle: Technische Universität Darmstadt

Auf der Netzhaut befinden sich die Zapfen (L-, M-, und S-Zapfen), die Stäbchen und die lichtempfindlichen Ganglienzellen. Nach der Photonenabsorption werden elektrische Impulse gebildet und zu den verschiedenen Gehirnverarbeitungsstufen übertragen. Innerhalb dieser Stufen werden die Signale von einzelnen Rezeptoren oder Rezeptorgruppen miteinander in Abhängigkeit von der Objektlage im Gesichtsfeld, von dem Adaptationszustand, von dem Umfeld und von der Struktur des Sehfelds vernetzt.

Die Helligkeits- bzw. Farbwahrnehmungsprozesse können nach dem Schema der Abbildung 7 erläutert werden.

Abbildung 7: Schema der menschlichen Sehmechanismen, die zur Helligkeitsempfindung eines Farbreizes beitragen. Das Signal der lichtempfindlichen Ganglienzellen (ipRGCs; rechts) hat ebenfalls einen Beitrag

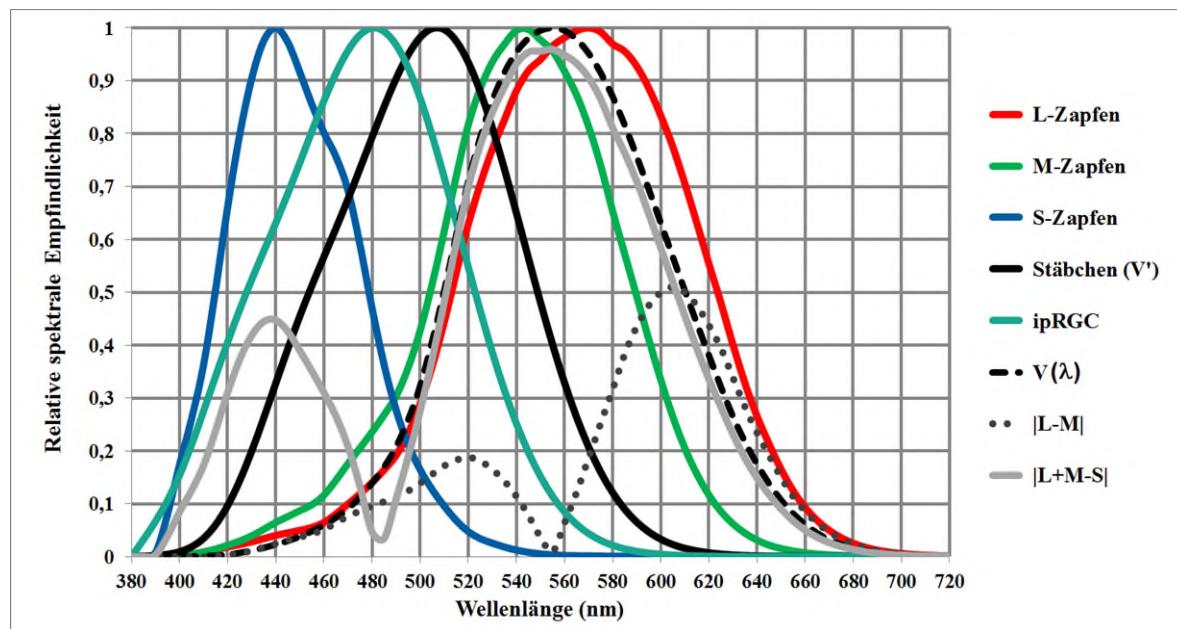


Quelle: Technische Universität Darmstadt

Nach dem Schema der Abbildung 7 bildet die Summe der L- und M-Zapfensignale den sog. Luminanzkanal. Die Differenz der L- und M-Zapfensignale bildet den sog. Opponenzkanal 1. Die Differenz der (L+M)- und S-Signale bildet den sog. Opponenzkanal 2. Im mesopischen Bereich (im Wohnbereich am Abend, in der nächtlichen Straßenbeleuchtung, in einem 3D-Kino mit einer absorbierenden 3D-Brille) tragen die Stäbchen (V') ebenfalls zur Licht- und Farbwahrnehmung bei. Aus der Sicht der Farbwahrnehmung sind die Farbattribute wie Sättigung und Farbton bis etwa 30 cd/m^2 den mesopischen Merkmalen unterworfen [12]. Im höheren photopischen Bereich ab 60 cd/m^2 werden die Stäbchen inaktiv. Aus den Signalen (L+M), (L-M), (L+M-S), V' und ipRGCs generiert die Gehirnverarbeitung die Farbattribute wie Helligkeit, Farbton und Farbsättigung.

In der Abbildung 8 sind die relativen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der drei Zapfentypen, der Stäbchen, der Ganglienzellen und der chromatischen Kanäle (L-M) und (L+M-S) der $V(\lambda)$ -Funktion gegenübergestellt.

Abbildung 8: Relative spektrale Empfindlichkeitsfunktionen der drei Zapfentypen, der Stäbchen, der Ganglienzellen (ipRGC, intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells), der chromatischen Kanäle (L-M), (L+M-S); sowie die V(λ)-Funktion



Quelle: Technische Universität Darmstadt

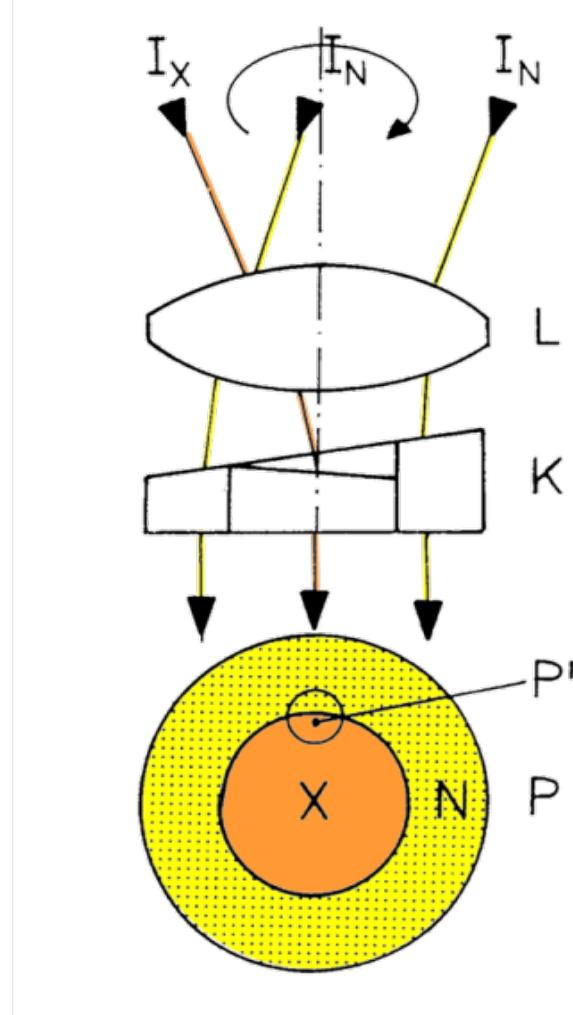
Im Kontext der Farbwahrnehmung und der tageslaufabhängigen Beleuchtung (s. auch Kapitel 6) ergeben sich aus Abbildung 8 die folgenden Erkenntnisse:

1. Außer der $V(\lambda)$ -Funktion sind auf der kürzerwelligen Seite (blau, cyan) die Wellenlängenbereiche um 440 nm (S-Zapfen), 480 nm (ipRGC-Zellen) und 507 nm (Stäbchen) wichtig. Soll die Wirkung der ipRGC-Zellen mit dem Stäbchensignal kombiniert werden, ist der Wellenlängenbereich zwischen 470 nm bis 525 nm sehr bedeutend. Um 470 nm sind die spektralen Empfindlichkeitswerte der drei erwähnten Kanäle relativ hoch.
2. Der L-Zapfen und der Opponenzkanal (L-M) haben eine hohe relative Empfindlichkeit im Bereich 620 nm bis 680 nm.
3. Am Abend, bei einem relativ geringen Beleuchtungsniveau, ist nur der spektrale Strahlungsanteil bis etwa 580 nm für die photische Suppression der Melatonin-Hormonausschüttung nennenswert. Jede spektrale Variation ab 580 nm, um z. B. die Farbwahrnehmung von gelben und roten Objekten oder die Sehleistung (wie die Sehschärfe) zu begünstigen, beeinflusst den Melatonin-Gehalt nicht und kann den Ermüdungszustand physiologisch nicht wesentlich verändern.
4. Werden die blauen Anteile der Lichtquellen, z. B. die Spitzen-Wellenlänge der blauen LED kontinuierlich zu den kürzerwelligen Bereichen von 470 nm zu 435 nm verschoben, dann wird die Sensibilisierung der ipRGC-Zellen und das Signal für die Synchronisation der zirkadianen Rhythmus reduziert. Diese Verschiebung erhöht dennoch die Signale der S-Zapfen und bewirkt öfter auch eine Verbesserung der Farbwiedergabe für blaue Objekte und sollte daher berücksichtigt werden.

Wie es bereits erläutert wurde, ist die $V(\lambda)$ -Funktion, die die relative spektrale Empfindlichkeit des Luminanzkanals (L+M) darstellt, unter der Bedingung der Flimmerphotometrie entstanden. Dabei sind Lichtsignale zweier unterschiedlich farbiger Lichtquellen (I_X und I_N in der Abb. 3.4) zeitlich abwechselnd (moduliert) mit einer Frequenz von etwa 24 Hz zum 2°-Gesichtsfeld einer Testperson gebracht und sollen abgeglichen werden. Der Abgleich erfolgt, wenn das Flimmern

der beiden Lichtsignale minimal wird. Bei dieser zeitlich relativ hohen Frequenz sind die chromatischen Kanäle (L-M) und (L+M-S) unwirksam, im Gegensatz zum Luminanzkanal (L+M).

Abbildung 9: Flimmerphotometrie nach Bechstein

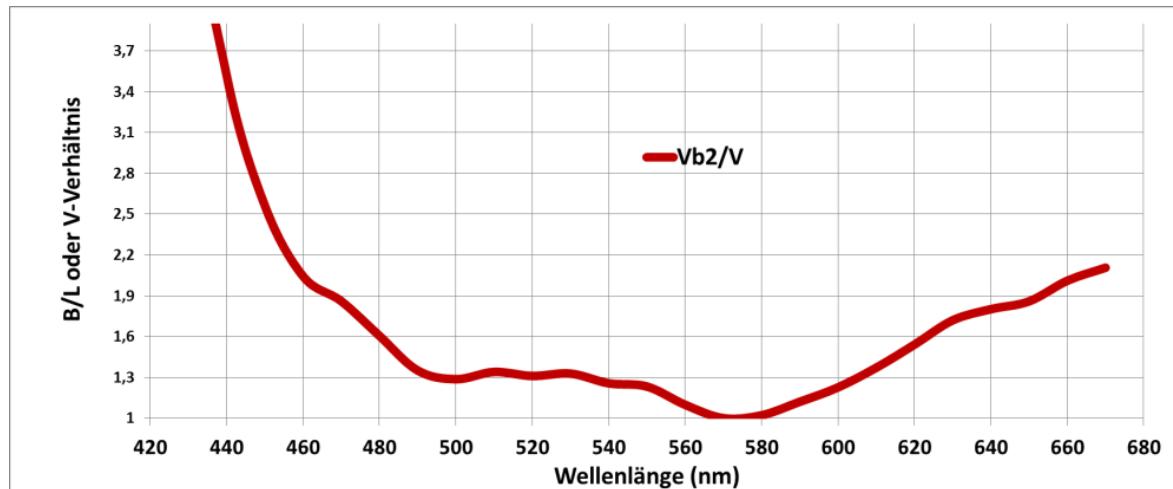


Quelle:[13]

Bei der Durchführung täglicher Sehaufgaben (z. B. Betrachtung von Gegenständen wie Gemälden, Textilien, Hausfassaden, Kochen, usw.) sind die Gegenstände zeitlich statisch, so dass die chromatischen Kanäle wirksam sind (s. Abbildung 7). Im Jahr 1988 definierte die CIE die spektrale Helligkeitsfunktion $V_{b,2}(\lambda)$ für ein 2°-Gesichtsfeld bei statischer Betrachtung monochromatischer Farbreize. Wird diese Funktion durch die $V(\lambda)$ -Funktion dividiert und dieses Verhältnis als Funktion der Wellenlänge von 430 nm bis 670 nm in der Abbildung 10 dargestellt, wird ersichtlich, dass die gesamte Helligkeit (d. h. das Luminanzsignal und die chromatischen Signale) dem Luminanzkanal nur bei 570 nm gleich ist (Verhältnis gleich 1).

Bei anderen Wellenlängen ist die Helligkeit erheblich größer als das Luminanzsignal. Zum Beispiel bei 460 nm (blau) und 660 nm (dunkelrot) ist die Helligkeit etwa doppelt so hoch wie das Luminanzsignal. Die chromatischen Anteile, die die $V(\lambda)$ -Funktion außer Acht lässt, sind bei diesen Wellenlängen nämlich sehr beachtlich: die chromatischen Gehirnsignale (Buntheit) steigen bei der Beobachtung monochromatischer Strahlung ab 570 nm stetig an. Bei 460 nm und 660 nm sind die chromatischen Signale zwar bedeutend, dennoch in der heutigen Photometrie und Lichtbewertung nicht berücksichtigt. Diese Kenntnisse gelten für die Beobachtung monochromatischer Selbstleuchter.

Abbildung 10: Helligkeit/Luminanz-Verhältnisse für monochromatische Lichtreize auf einem 2°-Gesichtsfeld



Quelle: Technische Universität Darmstadt

In der realen Welt setzen sich die Spektren der farbigen Objekte wie die bunten Bilder auf dem Monitor eines Computers oder eines Fernsehdisplays (farbige Selbstleuchter) oder die realen Oberflächenfarben (eine blaue Hose, Obst oder Blumen, usw.) aus mehreren monochromatischen Spektralanteilen zusammen. Die wahrgenommene Helligkeit einer i. A. farbigen Fläche oder eines bestimmten Weißtones (Kaltweiß, Neutralweiß oder Warmweiß) hängt nicht nur von deren Leuchtdichte, sondern auch von deren Farbart (d. h. Bunton und Sättigung) ab. Das ist der sog. Helmholtz-Kohlrausch-Effekt oder Helligkeit-Leuchtdichte-Widersprüchlichkeit, die in der Abbildung 11 veranschaulicht wird.

Abbildung 11: Beispiel für einen sog. heterochromatischen Helligkeitsabgleich



Quelle:[14]

Die Leuchtdichte des in Abbildung 11 rechts dargestellten bläulichen Farbreizes wird solange geändert, bis die wahrgenommene Helligkeit der beiden Farbreize gleich ist. Der linke Farbreiz

(gelblich) bleibt dabei konstant. Wird die Helligkeitsgleichheit visuell erreicht, unterscheiden sich trotzdem die photopischen Leuchtdichten der beiden Farbreize: der bläuliche Farbreiz weist i. A. eine niedrigere Leuchtdichte auf, als der gelbliche Farbreiz. Die die Helligkeit beschreibenden Größen sind die Metriken der sog. äquivalenten Leuchtdichten $L_{\text{äq}}$ nach verschiedenen Autoren.

3.1.2 Äquivalente Leuchtdichte $L_{\text{äq}}$ nach Ware und Cowan

Die sog. äquivalente Leuchtdichte $L_{\text{äq}}$ nach Ware und Cowan (s. [15] in Abschn. 2.6) wird wie folgt berechnet. Im ersten Schritt wird das Verhältnis (B/L) von der Helligkeit B zur Leuchtdichte L der Testlichtquelle aus den Normfarbwertanteilen x, y der Lichtquelle ermittelt (B : Brightness = Helligkeit; L : Luminance = Leuchtdichte), s. Gl. 3.1. Im zweiten Schritt wird das (B/L) -Verhältnis mit der photopischen Leuchtdichte L_p der Testlichtquelle (in cd/m^2) multipliziert, woraus sich die äquivalente Leuchtdichte $L_{\text{äq}}$ ergibt, s. Gl. 3.2.

$$\log_{10} (B/L) = 0,256 - 0,184 y - 2,527 xy + 4,656 x^3y + 4,657 xy^4 \quad (3.1)$$

$$L_{\text{äq}} = (B/L) L_p \quad (3.2)$$

3.1.3 Helligkeitsmetrik nach Fairchild und Pirrotta

Für die farbigen Objekte (also keine Selbstleuchter) in einem beleuchteten Umfeld (sog. „related colours“ oder bezogene Farbreize, s. Abbildung 12), z. B. Gemüse oder Obst in einem Gemüsegeschäft, Gemälde in einem Museum oder farbige Bücher und Zeitschriften auf dem Tisch in einer Buchhandlung, kann der Begriff „Relativhelligkeit“ verwendet werden, die als die Helligkeit eines farbigen Objektes bezogen auf das unter der gleichen Bedingung beleuchtete ideale weiße Oberflächenmaterial definiert wird.

Abbildung 12: Verschiedene Ölfarben zur Untersuchung der visuellen Eigenschaften



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Um die Relativhelligkeit unter Berücksichtigung des Helmholtz-Kohlrausch-Effektes wahrnehmungsgerecht zu beschreiben, wurde im Jahr 1991 von Fairchild und Pirrotta (s. [15] in Abschn. 3.4) eine Formel entwickelt, s. Gl. (3.3)-(3.5).

$$L^{**} = L^* + f(L^*) g(h^\circ) C^* \quad (3.3)$$

mit

$$g(h^\circ) = 0,116 |\sin((h^\circ - 90^\circ) / 2)| + 0,085 \quad (3.4)$$

und

$$f(L^*) = 2,5 - 0,025 L^* \quad (3.5)$$

Die Symbole der Gl. (3.3)-(3.5) bedeuten:

L^{**} : Messzahl für die Relativhelligkeit mit Berücksichtigung des Helmholtz-Kohlrausch-Effektes

L^* : Messzahl für die Relativhelligkeit nach CIELAB 1976

$f(L^*)$: L^* -basierte Korrekturfunktion

$g(h^\circ)$: Korrekturfunktion in Abhängigkeit des Bunttonwinkels h

C^* : Buntheit nach CIELAB 1976

Die in Gl. (3.3)-(3.5) definierte chromatische Messzahl für die Relativhelligkeit L^{**} hängt somit von der Buntheit und vom Buntton (grün, rot, blau, cyan...) der Oberflächen ab und wird in der heutigen Photometrie zur Lichtplanung und -bewertung nicht angegeben.

3.1.4 Helligkeitsmetrik nach Fotios und Levermore

Die (im neuen Bewertungsansatz verwendete) Helligkeitsmetrik nach Fotios und Levermore [17] (L_{aq}) dividiert das Signal der blauempfindlichen Zapfen (S) durch das Signal der $V(\lambda)$ -Funktion und rechnet danach wie folgt mit der 0,24-Potenz: $L_{\text{aq}}(\text{Fotios}) = (S/V)^{0,24}$. Um diese Signale zu errechnen, muss der relative spektrale Strahlungsfluss des Beleuchtungsproduktes mit der spektralen Empfindlichkeitsfunktion der S-Zapfen multipliziert und dieses Produkt im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert werden.

3.2 Helligkeit im mesopischen Bereich (Außenbeleuchtung)

3.2.1 Einführung

In der Straßenbeleuchtung finden die Sehaufgaben der Verkehrsteilnehmer im Dämmerungsbereich (mesopischer Bereich) zwischen typischerweise $0,05 \text{ cd/m}^2$ und ca. $5-10 \text{ cd/m}^2$ statt. Die wichtigsten Sehaufgaben schließen

1. die visuelle Bewertung der Helligkeitsempfindung,
2. den visuellen Suchvorgang,
3. die Detektion der (oft gefährlichen) Sehobjekte,
4. die schnelle Reaktion auf diese Sehobjekte sowie
5. die Erkennung dieser Sehobjekte

ein.

Dabei erweist sich die Sehaufgabe der Objektdetektion (ohne Objekterkennung) – als Grundlage für eine schnelle Reaktion – besonders verkehrsrelevant. Im Folgenden werden die obigen Sehaufgaben zusammenfassend erläutert.

Die Bewertung der wahrgenommenen Helligkeit der gesamten Straßenszene ist ein längerer Vorgang, der typischerweise mehr als 3 Sekunden dauert. Die insgesamt vorhandene, von den Objekten reflektierte Lichtmenge wird dabei visuell erfasst. Eine Folge davon ist die Bewertung des eigenen Sicherheitsgefühls sowie der ästhetische Eindruck von der betrachteten Straßenszene. Der Suchvorgang beinhaltet die visuelle Erschließung der Szene. Dabei sucht der Beobachter nach bestimmten Sehobjekten, die ihn interessieren. Dabei spielen die Auffälligkeit der Sehobjekte sowie die Anzahl der vorhandenen Sehobjekte, die die visuelle Aufmerksamkeit ablenken, eine wichtige Rolle.

Die Sehaufgabe der Detektion besteht darin, das Vorhandensein eines Sehobjektes zu erfassen und darauf zu reagieren, ohne das Sehobjekt im Detail zu erkennen. Für eine schnelle Reaktion ist es nicht notwendig, das Sehobjekt zu identifizieren. Zur Vermeidung einer Kollision auf einer Landstraße bei Nacht ist es z. B. unbedeutend, welcher Gegenstand das Sehobjekt genau darstellt. Das Erkennen eines Sehobjektes geschieht auf Grund dessen Detailausprägungen, die auf der Netzhaut des Beobachters örtlich fein aufgelöst werden.

Der Prozess des Erkennens findet durch einen Abgleich des erfassten Sehobjektes mit bekannten, im Gehirn gespeicherten Mustern statt. Ein Beispiel hierfür ist das Erkennen eines roten Stopperschildes. Die erfassten Objektdetails "achteckiges Schild", "rote Farbe" und "weiße Aufschrift (STOPP)" werden mit den im Gehirn gespeicherten Erfahrungswerten und Mustern abgeglichen. Erst wenn dieser Abgleich ein positives Ergebnis liefert, weiß der Beobachter, wie er sich an diesem Schild verhalten muss.

Im mesopischen Bereich ändert sich der Wahrnehmungsmechanismus des menschlichen Sehsystems sehr stark. Entscheidende Einflussparameter sind:

1. Die Sehaufgabe, z. B. Helligkeitswahrnehmung oder Detektion,
2. Das Leuchtdichteniveau, z. B. $0,05 \text{ cd/m}^2$ oder $0,5 \text{ cd/m}^2$,
3. Die Lichtfarbe der (Straßen-)Beleuchtung, z. B. eine gelbliche Natriumdampf-Hochdrucklampe oder eine kaltweiße Straßenlampe mit leuchtstoffkonvertierter Leuchtdiodenstrahlung und
4. Die Position des Sehobjektes, z. B. zentrale Erscheinung des Sehobjektes in der Mitte des Sehfeldes oder Erscheinung in der Peripherie unter einem Sehwinkel von 5° bis 30° [1].

Die deutliche Abhängigkeit der Wahrnehmung von den o. g. Parametern hängt damit zusammen, dass die Wechselwirkungen der beiden Rezeptortypen der Netzhaut (L-, M- und S-Zapfen sowie Stäbchen) den Sehvorgang im Dämmerungsbereich bestimmen. So werden die verschiedenen Rezeptorsignale in Abhängigkeit der Einflussparameter im Verlauf der Verarbeitung im Sehsystem unterschiedlich kombiniert.

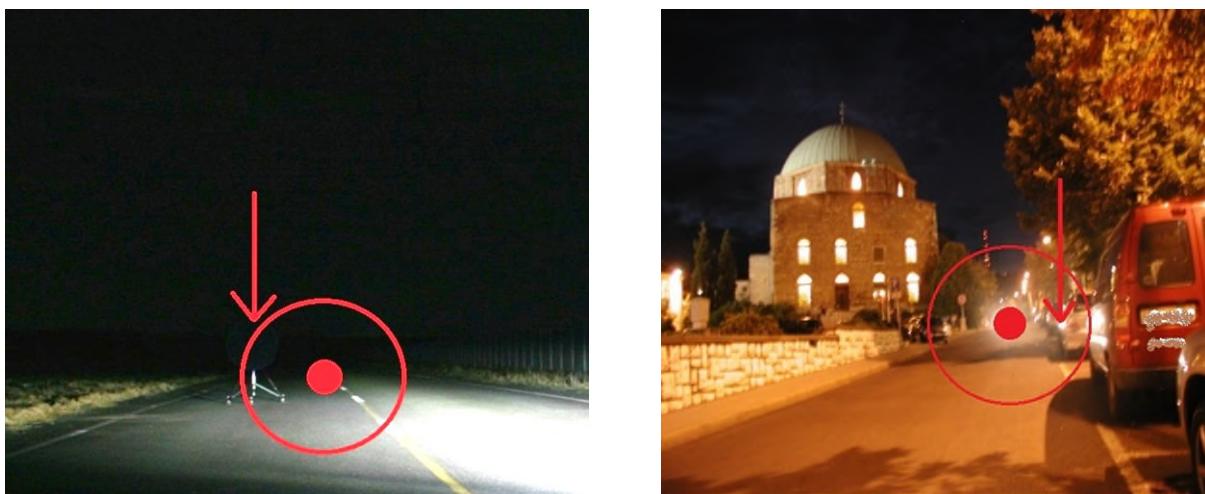
Die herkömmliche Photometrie – das heißt die auf der $V(\lambda)$ -Funktion basierenden Größen der photopischen Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke – beschreibt nur die Sehaufgabe der zentralen Objekterkennung. Daran sind aber nur die L- und M-Zapfen beteiligt. Somit ist die Anwendbarkeit der photopischen Leuchtdichte auf das Erkennen von kleineren fovealen Sehobjekten bis zu einer Größe von 2° begrenzt. Diese Bedingung hat, wie oben erläutert, jedoch lediglich eine untergeordnete Bedeutung im alltäglichen Verkehrsgeschehen. Zur Beschreibung der verkehrsrelevanten mesopischen Sehaufgaben müssen – wie im weiteren Verlauf erläutert – mesopische Sehmodelle eingesetzt werden.

3.2.2 Mesopische Sehmodelle

Von den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts bis zum Beginn des 21. Jahrhundert wurden mehrere Modelle zur Beschreibung der Helligkeitswahrnehmung vorgeschlagen [1]. Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) strebt zurzeit ein neues Verfahren zur Beschreibung der mesopischen Helligkeitswahrnehmung an. Im Jahre 2004 wurde das sog. X-Modell oder Vereinigtes Photometrisches System (USP, Unified System of Photometry [2]) mit dem Wahrnehmungskriterium der Reaktionszeit aufgestellt. Ein weiteres im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes hervorgegangenes mesopische Modell (MOVE-Modell) vereinigt die Kriterien Reaktionszeit, Sehschärfe und Detektionsvermögen und weist eine ähnliche mathematische Form auf [3].

Die mesopischen Helligkeitsmodelle basieren auf dem Beobachtungsverfahren des sog. heterochromatischen Helligkeitsabgleiches [1]. Dabei wird die wahrgenommene Helligkeit eines Testfeldes mit einem Referenzfeld visuell verglichen bzw. abgeglichen. Es kann gezeigt werden, dass die Sehaufgabe der Versuchsperson dabei wesentlich vom realen Verkehrsgeschehen abweicht. Die für die Verkehrssicherheit und somit für die Straßenbeleuchtungsplanung relevanteren mesopischen Sehleistungsmodelle beschreiben die verkehrsrelevante Detektionswahrscheinlichkeit und die damit eng verbundene Reaktionszeit der Sehobjekte mit niedrigem Kontrast an der Detektionsschwelle (s. Abbildung 13). Im Vergleich zum Helligkeitsmodell weisen diese Modelle jedoch eine abweichende mathematische Form auf.

Abbildung 13: Vergleich der mesopischen Sehaufgaben Detektion und Helligkeitsbewertung.



Gefüllte rote Kreisfläche: das zentrale Sehfeld am Fixationspunkt des Beobachters mit einem Durchmesser von 2° . Roter Kreis: ein Sehfeld mit einem Durchmesser von 10° . Links: Detektion eines typischen mesopischen Sehobjektes, hier: ein künstliches graues Sehobjekt in einem Feldversuch bei 5° in der Peripherie, am roten Pfeil. Rechts: mesopische Helligkeitsempfindung: langes Betrachten der gesamten Straßenszene. Der rote Pfeil zeigt den möglichen Erscheinungsort eines zu detektierenden Sehobjektes (z. B. Fußgänger) zwischen den beiden parkenden Autos.

Quelle: Technische Universität Darmstadt

Im Beispiel der Abbildung 13 (links) erscheint das künstliche graue Sehobjekt 5° peripheral mit einem bestimmten Strahldichteunterschied (Kontrast) im Vergleich zum Hintergrund. Das abgebildete typische mesopische Sehobjekt befindet sich an der sog. Detektionsschwelle. Die Detektionsschwelle kann wie folgt definiert werden: der Kontrast, mit dem das Sehobjekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 % detektiert wird. Die typische Sehaufgabe der mesopischen Detektion stellt daher eine sog. Schwellenbeobachtung in der Peripherie zwischen 5° und 30° dar. Hier tragen die räumlichen Signalunterschiede der Rezeptoren mit niedrigen Ortsfrequenzen zwischen Sehobjekt und dessen Hintergrund zur Detektion bei.

Im Beispiel der Abbildung 13 (rechts) betrachtet und bewertet der Beobachter die Helligkeit der gesamten Szene. In der Abbildung sind das zentrale Sehfeld am Fixationspunkt (2°) sowie ein Teil des Sehfeldes mit einem Durchmesser von 10° gekennzeichnet. Ein typischer Erscheinungsort (5°) eines zu detektierenden Sehobjektes (z. B. Fußgänger) zwischen den beiden parkenden Autos ist ebenfalls markiert. Im Gegensatz zur Detektion arbeitet das Sehsystem bei der Bewertung der Helligkeit mit den überschwelligen Rezeptorsignalen der räumlich ausgedehnten Sehfeldbereiche. Dementsprechend sind die retinalen und post-retinalen Verarbeitungsmechanismen des Sehsystems für die Detektion bzw. die Helligkeitswahrnehmung unterschiedlich.

Für das Erkennen eines Sehobjektes (z. B. Buchstaben) wandert das zentrale 2° -Sehfeld mit der höchsten Sehschärfe (rote Kreisflächen in Abbildung 13) durch Augenbewegungen zum Sehobjekt. Dort werden die Sehdetails der Buchstaben Schritt für Schritt abgetastet. Die Effizienz der Objekterkennung im zentralen Sehfeld kann – sowohl im mesopischen als auch im photopischen Bereich – mit Hilfe des *photopischen* Leuchtdichtheckontrastes beschrieben werden. Für die anderen mesopischen Sehaufgaben müssen hingegen die *mesopischen* Sehmodelle angewendet werden.

3.2.3 Mesopische Helligkeitsmodelle

Zur mesopischen Helligkeitsbewertung wurde der Begriff der äquivalenten Leuchtdichte $L_{\text{äq}}$ herangezogen. Dieser Begriff wird durch die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) folgendermaßen definiert: die Leuchtdichte eines quasi-monochromatischen Referenzreizes von 555 nm, der visuell gleich hell erscheint wie der Testreiz [4]. Die äquivalente Leuchtdichte sagt voraus, ob zwei Helligkeitsempfindungen gleich sind, oder ob eine Helligkeitsempfindung größer oder kleiner als eine andere Helligkeitsempfindung ist. Die äquivalente Leuchtdichte stellt aber keine absolute Helligkeitsskala für die wahrgenommene Helligkeit dar.

Die sog. Zweikomponentenmodelle berechnen den Wert von $L_{\text{äq}}$ aus dem Wert der photopischen Leuchtdichte L und der skotopischen Leuchtdichte L' . Sie berücksichtigen damit den Purkinje-Effekt, d. h. die mesopische Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit in den blauen Spektralbereich. Gesättigte Farben erscheinen i. A. heller, als unbunte Farben der gleichen photopischen Leuchtdichte. Die sog. Vierkomponentenmodelle (L_s, X, Y, Z) fügen den *chromatischen* Beitrag zur wahrgenommenen Helligkeit (Helmholtz-Kohlrausch-Effekt) hinzu.

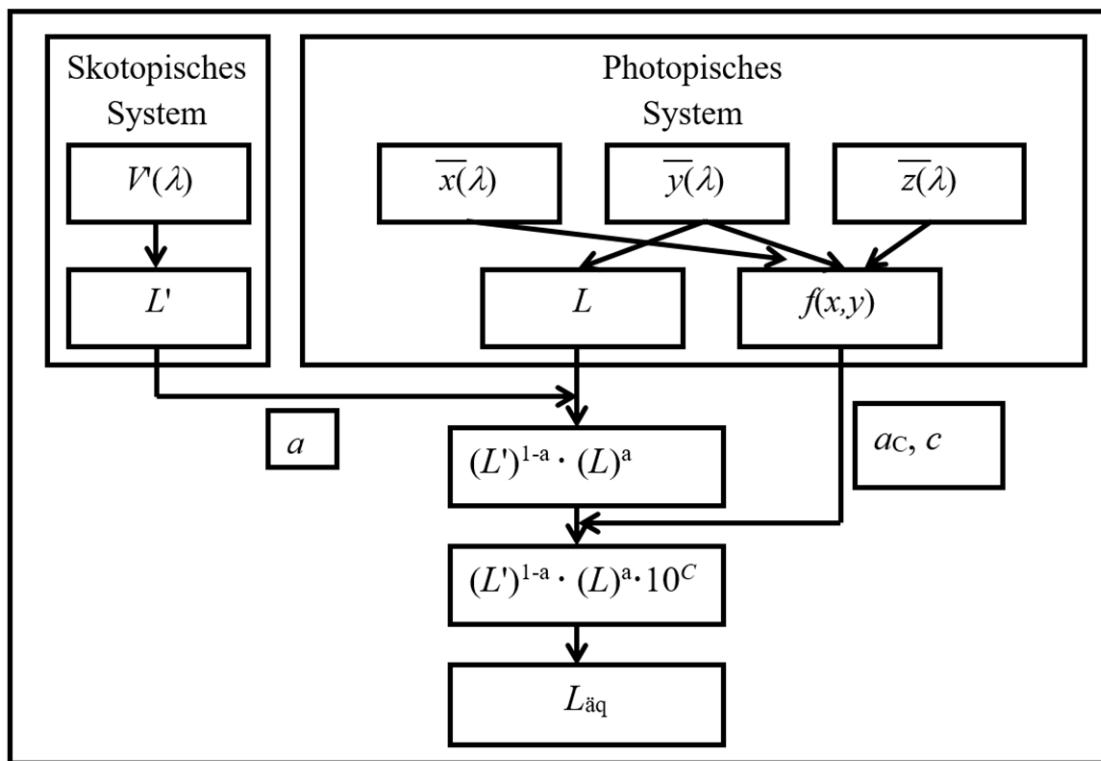
Die CIE arbeitet derzeit an einem allgemeinen mesopischen Helligkeitsmodell für den gesamten mesopischen Adaptationsbereich. Die Grundlagen dieses Modells wurden bereits veröffentlicht [5]. Das Modell benutzt die Summe der adaptierten photopischen und skotopischen Leuchtdichtesignale (achromatische Signale), die danach mit dem adaptierten chromatischen Signal (Zapfensignalunterschiede) ergänzt werden. Abbildung 14. zeigt die Verarbeitungsschritte der Rezeptorsignale in diesem Modell, die zur äquivalenten Leuchtdichte beitragen. Die Größe $f(x, y)$, d.h. das chromatische Signal der äquivalenten Leuchtdichte, wird mit Hilfe der Gl. (3.6) [5] berechnet. In der Publikation [5] erschien der falsche Wert von -0,054, der in Gl. (3.6) schon korrigiert ist:

$$f(x, y) = (1/2) \log_{10} \{-0,0054 - 0,21x + 0,77y + 1,44x^2 - 2,97xy + 1,59x^2 - 2,11[(1-x-y)y^2]\} - \log_{10}(y) \quad (3.6)$$

Für die numerischen Werte der Parameter α, β sowie k wurde Folgendes vorgeschlagen: $\alpha=0,05 \text{ cd/m}^2$; $\beta=2,24 \text{ cd/m}^2$; $k=1,3$ [5]. Im letzten Schritt berechnet sich die äquivalente Leuchtdichte laut Gl. (3.7) wie folgt:

$$L_{\text{äq}} = L'^{(1-\alpha)} L^\alpha 10^\beta \quad (3.7)$$

Abbildung 14: Signalflussdiagramm im CIE-Helligkeitsmodell [5]



$a=L/(L+\alpha)$: Adaptationskoeffizient für die Kombination der achromatischen Signale L' (skotopische Leuchtdichte) und L (photopische Leuchtdichte); $c=aC \cdot f(x,y)$: chromatisches Signal; $aC=kL^{1/2}/(L^{1/2}+\beta)$: Adaptationskoeffizient für das chromatische Signal $f(x,y)$, s. Gl. (3.6), $L_{äq}$: äquivalente Leuchtdichte, s. Text. Quelle: Technische Universität Darmstadt

Das CIE-Helligkeitsmodell [5] (das auch „Sagawa-Modell“ genannt wird) schneidet im Vergleich zu visuellen Helligkeitsergebnissen auch nach der Korrektur des falschen Wertes von -0,054 schlecht ab.

Im Helligkeitsmodell von Berman – $L_{äq}(\text{Berman})$ – wird das Stäbchensignal durch die Größe (Stäbchen/ V)^{0,5} berücksichtigt. Um das Stäbchensignal zu errechnen, muss der relative spektrale Strahlungsfluss des Beleuchtungsproduktes mit der $V'(\lambda)$ -Funktion der spektralen Empfindlichkeit der Stäbchen multipliziert und dieses Produkt im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert werden.

Als weitere, alternative Metrik für die allgemeine numerische Beschreibung der visuellen und nichtvisuellen Effekte der elektromagnetischen Strahlung auf den Menschen (inkl. Helligkeit) wurde die sog. $U(\lambda)$ -Funktion [16] (s. Abbildung 1) vorgeschlagen, die den gesamten Spektralbereich der spektralen Empfindlichkeiten der S-Zapfen, M-Zapfen, L-Zapfen, Stäbchen und ipRGCs, also einen wesentlich breiteren spektralen Bereich, als die $V(\lambda)$ -Funktion umfasst. Um die Helligkeit zu beschreiben, soll die spektrale Strahldichte mit der $U(\lambda)$ -Funktion multipliziert und dann im sichtbaren Bereich integriert werden. Diese Größe stellt allerdings nur den ersten Schritt einer pauschalen Beschreibung der o. g. Effekte dar. Für eine genauere Modellierung soll auf die einzelnen Vorgänge des Sehsystems detaillierter eingegangen werden.

3.2.4 Mesopische Kontrastwahrnehmung

Der Begriff *Kontrastwahrnehmung* fasst zwei unterschiedliche Sehaufgaben zusammen:

1. die Detektion und
2. die auf der Sehschärfe basierende Objekterkennung.

Bei der Detektion muss die Versuchsperson ein Sehobjekt entdecken, ohne es zwingend auch erkennen zu müssen. Sie muss lediglich eine Entscheidung treffen, ob irgendein Objekt gesehen wurde. Dabei spielen die Sehdetails höherer Ortsfrequenzen keine wichtige Rolle. Es werden nur die Rezeptorsignale niedrigerer Ortsfrequenzen verarbeitet. Zur Vermeidung von Unfällen müssen alle gefährlichen Sehobjekte unter allen Umständen detektiert werden. Die Detektion im *nichtzentralen* Sehfeld zwischen 5° und 20° – d. h. außerhalb der fovealen Region – ist die relevanteste mesopische Sehaufgabe für die Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik sowie die Planung der Straßenbeleuchtung.

Bei der Objekterkennung muss die Versuchsperson die räumlichen Details eines Sehobjektes erkennen, wie z. B. das Nummernschild des vorausfahrenden Autos. Die Frage besteht darin, welches Sehobjekt genau gesehen wurde, wobei die höheren Ortsfrequenzen des Sehobjektes – z. B. in der Sehaufgabe eines Sehschärfetests – zur Erkennung führen.

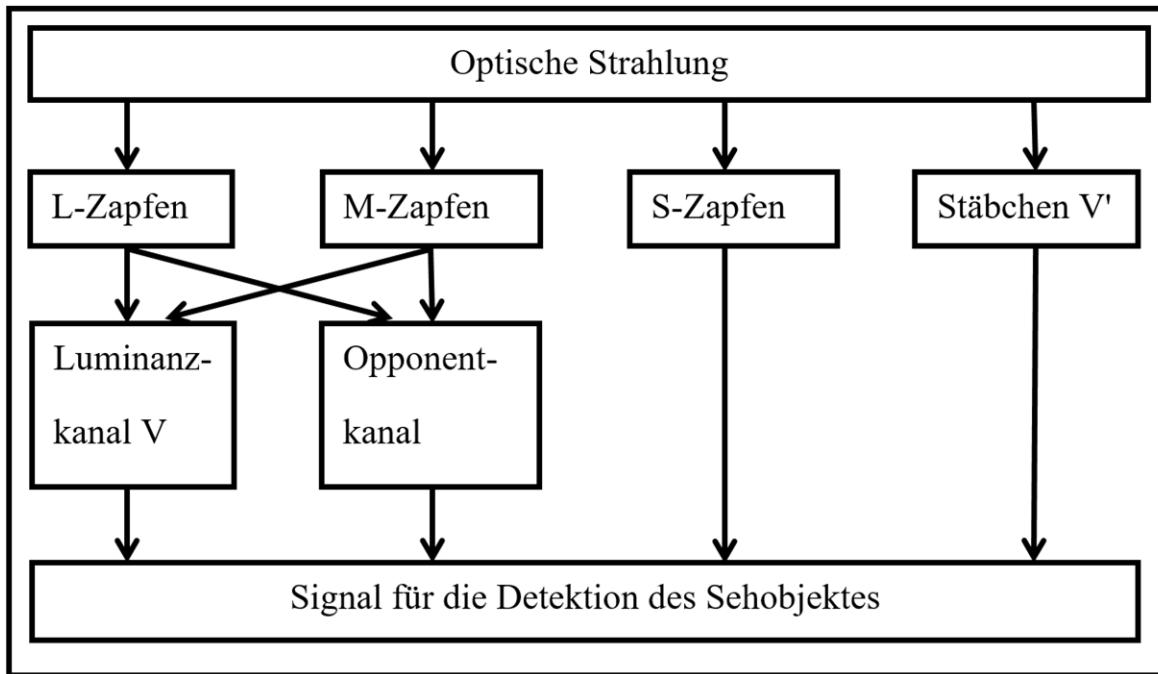
Zur Beschreibung der Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich empfiehlt die CIE das sog. mesopische Sehleistungsmodell [10]. Die chromatischen Sehmechanismen tragen – außer dem niedrigsten mesopischen Adaptationsbereich (unter ca. 0,01 cd/m²) – zur mesopischen Detektion ebenfalls bei [11]. Das Einbeziehen der chromatischen Mechanismen in ein neues Modell bietet einen wichtigen Gegenstand für die mesopische Forschung.

Der Beitrag der chromatischen Sehmechanismen lässt sich auf Grund der psychophysikalisch ermittelten mesopischen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen für die Detektion ($V_{mes, det}$) erkennen, die – im Gegensatz zu den $V(\lambda)$ - und $V'(\lambda)$ -Funktionen – mehrere (lokale) Maxima aufweisen [12, 13, 14]. Die Wellenlängen der (lokalen) Maxima hängen vom mesopischen Adaptationsniveau und Erscheinungsort bzw. der retinalen Position des Sehobjektes ab [11]. An diese empirischen Empfindlichkeitsfunktionen wurde eine Linearkombination $V_{mes, lin}(\lambda)$ der verschiedener Sehmechanismen angepasst [11]. Hierzu zählen:

1. Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der L-, M-, und S-Zapfen: $L(\lambda)$, $M(\lambda)$, und $S(\lambda)$,
2. Die spektrale Empfindlichkeitsfunktion der Stäbchen $V'(\lambda)$,
3. Ein chromatischer Mechanismus, der sog. Opponenzkanal $|L(\lambda) - M(\lambda)|$ und
4. Die Summe der L- und M-Zapfensignale, der sog. Luminanzkanal V .

Das Signalflussdiagramm in Abbildung 15 illustriert das Schema dieser Sehmechanismen.

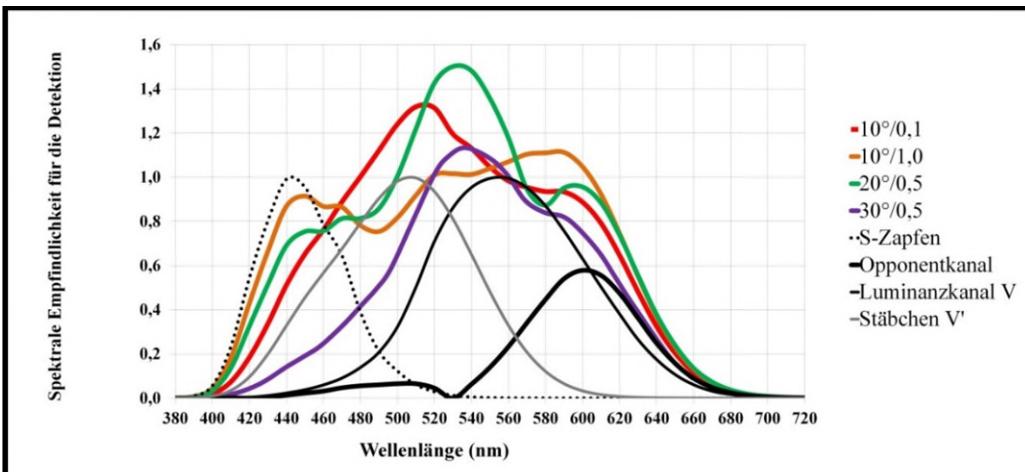
Abbildung 15: Schema der Sehmechanismen, die zur Detektion eines Sehobjektes im mesopischen Bereich beitragen.



Die Summe der L- und M-Zapfensignale bildet den Luminanzkanal V. Die Differenz der L- und M-Zapfensignale bildet den Opponentenkanal. Zum Detektionssignal tragen die S-Zapfen sowie die Stäbchen (V') ebenfalls bei. Quelle: Technische Universität Darmstadt

Die relativen Beiträge der Mechanismen hängen vom mesopischen Adaptationsniveau und dem Erscheinungsort des Sehobjektes auf der Netzhaut ab [11]. Abbildung 16 veranschaulicht die angepassten $V_{mes,lin}(\lambda)$ -Funktionen aus Abbildung 15 für verschiedene Adaptationsniveaus und retinale Positionen des Sehobjektes.

Abbildung 16: Spektrale Empfindlichkeitsfunktionen für die Detektion.



Farbige Kurven: modellierte mesopische spektrale Empfindlichkeitsfunktionen $V_{mes,lin}(\lambda)$ für die Detektion in Abhängigkeit des Sehwinkels in Grad und für verschiedene Adaptationsniveaus. $10^\circ/1,0$ entspricht z. B. einer retinalen Position von 10° und einer Adaptation mit der Hintergrundleuchtdichte von $1,0 \text{ cd/m}^2$. Unbunte Kurven: spektrale Empfindlichkeiten der einzelnen Sehmechanismen zur Deutung der bunten $V_{mes,lin}(\lambda)$ -Kurven, vgl. mit Abbildung 15. Quelle: Technische Universität Darmstadt

Die verschiedenen Verläufe der spektralen Empfindlichkeitskurven in Abhängigkeit von den unterschiedlichen mesopischen Sehbedingungen lassen sich durch die unterschiedlichen Beiträge der einzelnen Sehmechanismen erklären. So tragen z. B. die S-Zapfen und der Opponenzkanal unter $10^\circ/1,0 \text{ cd/m}^2$ - im Gegensatz zu $30^\circ/0,5 \text{ cd/m}^2$ - zur mesopischen Detektion eines Sehobjektes wesentlich bei.

3.2.5 Das mesopische Sehleistungsmodell der CIE

Das mesopische Sehleistungsmodell der CIE [10] ist ein intermediäres Modell, dessen numerische Voraussagen zwischen den beiden mesopischen Sehleistungsmodellen (X-Modell [2] und MOVE-Modell [3]) liegen. Die für eine sichere Verkehrsführung verwendeten lichttechnischen Systeme und Komponenten müssen immer und überall gute mesopische Sehleistung ermöglichen. Deshalb stellt die wichtigste Anwendung dieses Modells die Straßen- sowie Kfz-Beleuchtung dar, da hier mesopische Sehbedingungen zwischen 0,05 und $1,5 \text{ cd/m}^2$ vorherrschen. Das Modell [10] beabsichtigt die Beschreibung aller drei oben erwähnten Aspekte der mesopischen Sehleistung, d. h. die Detektion, die Reaktionszeit sowie die Objekterkennung.

Die Sehauflage der Detektion ist zur Vermeidung von Unfällen am relevantesten. Um die Verkehrssicherheit zu erhöhen, muss die Detektionswahrscheinlichkeit des typischen Sehobjektes durch die *mesopische* Planung der Straßenbeleuchtung erhöht werden. Dazu bietet das mesopische Sehleistungsmodell der CIE eine Möglichkeit.

Die Anwendung der konventionellen (photopischen) Photometrie führt zu einem wesentlichen Fehler, weil das typische zu detektierende Sehobjekt in einem *mesopischen* Sehvorgang wahrgenommen wird. Es erscheint vertikal orientiert, 5° - 30° außerhalb des Zentrums des Sehfeldes, wo sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen aktiv sind. Zudem hat es im Vergleich zu seinem mesopischen Umfeld nur einen geringen Kontrast, d. h. Strahldichteunterschied.

Zur sicheren Detektion eines solchen Sehobjektes ist ein minimaler Kontrast, der sog. Schwellenkontrast erforderlich. Ist der Schwellenkontrast niedrig, dann erscheinen die Sehobjekte mit geringem Kontrast über der Detektionsschwelle und können sicher detektiert werden.

Im mesopischen Bereich vermindert sich der Wert des Schwellenkontrastes, wenn sich der Wert der *mesopischen* Umfeldleuchtdichte erhöht. Die Anwendung der rein photopischen oder rein skotopischen Leuchtdichtewerte führt deshalb zu falschen Ergebnissen [10]. Somit besteht das Ziel der Straßenbeleuchtungsplanung darin, die *mesopische* Umfeldleuchtdichte zu steigern, um die Detektionswahrscheinlichkeit eines typischen Sehobjektes in diesem Umfeld zu erhöhen.

Da die Wartungswerte in der heutigen Norm als photopische Leuchtdichten angegeben sind, müssen diese photopischen Werte auch eingehalten werden. Der Lichtplaner darf allerdings zwischen unterschiedlichen Lampenspektren und demzufolge unterschiedlichen Lichtfarben wählen. Die verschiedenen Lichtquellen unterschiedlicher Farbart weisen jedoch beim gleichen photopischen Leuchtdichtewert unterschiedliche mesopische Leuchtdichten und somit unterschiedliche Niveaus für die mesopische Sehleistung, vor allem für das Detektionsvermögen auf.

Im mesopischen Sehleistungsmodell der CIE [10] berechnet sich der Wert der mesopischen Leuchtdichte aus den entsprechenden Werten der photopischen Leuchtdichte L der L- und M-Zapfensignale und der skotopischen Leuchtdichte L' des Stäbchensignals. Hierfür soll zuerst das sog. S/P-Verhältnis wie folgt definiert werden: Dieser Parameter stellt das Verhältnis der skotopischen Leuchtdichte zur photopischen Leuchtdichte der Lichtquelle dar. Die spektrale Strahldichteverteilung der Lichtquelle ($X_e(\lambda)$) kann mit der $V(\lambda)$ -Funktion (s. Abbildung 15 ; für Nachtsehen oder skotopisches Sehen, wobei die Stäbchen aktiv sind) bzw. mit der $V(\lambda)$ -Funktion

(s. Abbildung 15; für Tagesssehen oder photopisches Sehen, wobei die Zapfen aktiv sind) gewichtet und spektral integriert werden, um die skotopische Leuchtdichte (L_S) bzw. die photopische Leuchtdichte (L_P) zu errechnen, und das sog. *S/P-Verhältnis* zu bilden:

$$L_S = 1699 \text{ (lm/W)} \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} X_e(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$$

$$L_P = 683 \text{ (lm/W)} \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (3.8)$$

$$(S/P) = L_S / L_P$$

Der relative Beitrag der beiden Rezeptortypen hängt vom mesopischen Leuchtdichteniveau sowie von der Farbart bzw. dem Wert der skotopischen Leuchtdichte dividiert durch die photopische Leuchtdichte (S/P-Verhältnis) des Umfeldes ab. So weist z. B. eine durch eine *weiße* Straßenlichtquelle beleuchtete Szene bei gleicher photopischer Leuchtdichte im Vergleich zu *gelblichen* Straßenlichtquellen eine erhöhte mesopische Leuchtdichte und somit eine höhere Sehleistung auf. Auf diese Weise kann beispielsweise das Detektionsvermögen verbessert werden.

Die Berechnungsschritte des mesopischen Sehleistungsmodells der CIE [10] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Eingabe: Photopische Leuchtdichte L in cd/m^2 sowie S/P-Verhältnis der Lichtquelle
2. Berechnung der skotopischen Leuchtdichte L'
3. $m_0 := 0,5$ (Anfangswert für den Adaptationskoeffizienten m für die Kombination der achromatischen Signale L' und L)
4. Berechnung eines Anfangswertes für die mesopische Leuchtdichte: $L_{\text{mes},1}$
5. Berechnung von m_1 (erste Annäherung für m) aus dem Wert von $L_{\text{mes},1}$
6. Berechnung des nächsten Wertes für die mesopische Leuchtdichte ($L_{\text{mes},2}$) aus L , L' sowie m_1
7. Berechnung des nächsten Wertes für den Adaptationskoeffizienten (m_2) aus dem Wert von $L_{\text{mes},2}$

Die Schritte Nr. 6 sowie Nr. 7 müssen solange iteriert werden, bis der Wert der mesopischen Leuchtdichte (L_{mes}) an einer gewünschten Dezimalstelle konstant bleibt. Erfahrungsgemäß liefern schon 4-7 Iterationen ein zufriedenstellendes Ergebnis. Über $5,0 \text{ cd}/\text{m}^2$ arbeitet das Modell rein photopisch. Die folgenden Gleichungen zeigen die mathematischen Formeln für die obigen Berechnungsschritte:

$$L' = (S/P) L \quad (3.9)$$

$$L_{\text{mes},n} = \frac{m_{n-1} L + (1 - m_{n-1}) L' (683/1699)}{m_{n-1} + (1 - m_{n-1})(683/1699)} \quad (3.10)$$

$$m_n = 0,767 + 0,3334 \log_{10}(L_{\text{mes},n}), \quad 0 \leq m_n \leq 1 \quad (3.11)$$

Tabelle 3 veranschaulicht die Abhängigkeit der mesopischen Leuchtdichte L_{mes} von der photopischen Leuchtdichte L (in der ersten Zeile der Tabelle 3) und vom (S/P)-Verhältnis (in der ersten Spalte der Tabelle 3) im mesopischen Leistungsmode der CIE [10].

Tabelle 3: Abhängigkeit der mesopischen Leuchtdichte L_{mes} von der photopischen Leuchtdichte L und vom (S/P)-Verhältnis.

| S/P | Photopische Leuchtdichte L (cd/m ²) | | | | | | |
|------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,30 | 1,00 | 3,00 | 4,50 |
| 0,25 | 0,0025 | 0,0145 | 0,0705 | 0,2467 | 0,9130 | 2,9265 | 4,4782 |
| 0,35 | 0,0035 | 0,0174 | 0,0750 | 0,2545 | 0,9253 | 2,9367 | 4,4812 |
| 0,45 | 0,0045 | 0,0198 | 0,0793 | 0,2620 | 0,9373 | 2,9468 | 4,4842 |
| 0,55 | 0,0057 | 0,0220 | 0,0834 | 0,2693 | 0,9492 | 2,9568 | 4,4872 |
| 0,65 | 0,0069 | 0,0239 | 0,0873 | 0,2764 | 0,9608 | 2,9666 | 4,4901 |
| 0,75 | 0,0079 | 0,0258 | 0,0911 | 0,2833 | 0,9722 | 2,9763 | 4,4929 |
| 0,85 | 0,0088 | 0,0275 | 0,0947 | 0,2901 | 0,9835 | 2,9859 | 4,4958 |
| 0,95 | 0,0096 | 0,0292 | 0,0983 | 0,2967 | 0,9945 | 2,9953 | 4,4986 |
| 1,05 | 0,0104 | 0,0308 | 0,1017 | 0,3032 | 1,0054 | 3,0046 | 4,5014 |
| 1,15 | 0,0111 | 0,0323 | 0,1051 | 0,3096 | 1,0161 | 3,0139 | 4,5041 |
| 1,25 | 0,0118 | 0,0338 | 0,1083 | 0,3158 | 1,0267 | 3,0230 | 4,5068 |
| 1,35 | 0,0125 | 0,0353 | 0,1115 | 0,3220 | 1,0371 | 3,0319 | 4,5095 |
| 1,45 | 0,0132 | 0,0367 | 0,1147 | 0,3280 | 1,0473 | 3,0408 | 4,5122 |
| 1,55 | 0,0138 | 0,0381 | 0,1178 | 0,3339 | 1,0575 | 3,0496 | 4,5148 |
| 1,65 | 0,0145 | 0,0395 | 0,1208 | 0,3398 | 1,0674 | 3,0582 | 4,5174 |
| 1,75 | 0,0151 | 0,0408 | 0,1238 | 0,3455 | 1,0773 | 3,0668 | 4,5200 |
| 1,85 | 0,0157 | 0,0421 | 0,1267 | 0,3512 | 1,0870 | 3,0753 | 4,5225 |
| 1,95 | 0,0163 | 0,0434 | 0,1295 | 0,3568 | 1,0966 | 3,0836 | 4,5250 |
| 2,05 | 0,0169 | 0,0446 | 0,1324 | 0,3623 | 1,1060 | 3,0919 | 4,5275 |
| 2,15 | 0,0174 | 0,0459 | 0,1352 | 0,3677 | 1,1154 | 3,1001 | 4,5299 |
| 2,25 | 0,0180 | 0,0471 | 0,1379 | 0,3731 | 1,1246 | 3,1082 | 4,5323 |
| 2,35 | 0,0185 | 0,0483 | 0,1406 | 0,3784 | 1,1338 | 3,1162 | 4,5347 |
| 2,45 | 0,0191 | 0,0495 | 0,1433 | 0,3836 | 1,1428 | 3,1241 | 4,5371 |
| 2,55 | 0,0196 | 0,0506 | 0,1459 | 0,3888 | 1,1517 | 3,1319 | 4,5395 |
| 2,65 | 0,0201 | 0,0518 | 0,1485 | 0,3939 | 1,1605 | 3,1396 | 4,5418 |
| 2,75 | 0,0207 | 0,0529 | 0,1511 | 0,3989 | 1,1693 | 3,1473 | 4,5441 |

Die photopische Leuchtdichte L ist in der ersten Zeile angegeben und das (S/P)-Verhältnis in der ersten Spalte. Alle L_{mes} -Werte wurden mit Hilfe der Gl. (3.9)-(3.11) berechnet. Über 5,0 cd/m² arbeitet das Modell photopisch.

Quelle: [10]

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass ein höheres (S/P)-Verhältnis – bei der gleichen photopischen Leuchtdichte L – eine höhere mesopische Leuchtdichte L_{mes} erzeugt. Die Bedeutung des mesopischen Sehleistungsmodells der CIE [10] besteht darin, dass der Wert von L_{mes} nicht nur von der photopischen Leuchtdichte L , sondern auch vom (S/P)-Verhältnis abhängt. Eine gelbliche Natriumdampf-Hochdrucklampe NAV weist z. B. einen niedrigen (S/P)-Wert (d. h. einen niedrigen Blauanteil in der spektralen Strahldichtevertteilung) von nur 0,422 auf, der – laut Tabelle 3, zwischen den (S/P)-Zeilen 0,35 und 0,45 – niedrige mesopische Leuchtdichten verursacht. Im Gegensatz dazu hat die weiße LED-Lichtquelle einen hohen (S/P)-Wert (d. h. einen hohen Blauanteil in der spektralen Strahldichtevertteilung) von 2,240, zwischen den (S/P)-Zeilen 2,15 und 2,25 in Tabelle 3, der zu höheren mesopischen Leuchtdichten führt (vgl. mit den photopischen Leuchtdichten in der ersten Zeile der Tabelle 3).

Als weiteres Beispiel für die Anwendung des mesopischen Sehleistungsmodells der CIE [10] werden – unter der Annahme, dass die (graue) Fahrbahn die Strahlung der Straßenbeleuchtung annähernd neutral reflektiert – die mesopischen Leuchtdichten L_{mes} laut Gl. (3.9)-(3.11) für die sieben typischen Straßen- und Kfz-Lichtquellen der Tabelle 4 berechnet. In diesem Beispiel werden die photopischen Leuchtdichtevorgaben der ME-Beleuchtungsklassen der Norm DIN EN 13201 für die trockene Fahrbahn herangezogen.

Diese sind zur Anwendung auf Verkehrswegen mit mittleren bis höheren Fahrgeschwindigkeiten vorgesehen und sind in die photopischen Wartungswerte gemäß Tabelle 4. Diese zeigt außerdem die Ergebnisse der Berechnung der mesopischen Leuchtdichten, die den photopischen Wartungswerten der DIN EN 13201 entsprechen. In Tabelle 5 ist der Sehleistungsgewinn als Prozentsatz – im Vergleich zur photopischen Leuchtdichte – ausgedrückt, wenn die Straßenbeleuchtung mit einer Lichtquelle der Tabelle 4 geplant wird. Negative Werte in Tabelle 5 stellen einen Verlust an Sehleistung dar.

Tabelle 4: Vergleich der den photopischen Wartungswerten entsprechenden mesopischen Leuchtdichten laut CIE-Modell [10] für gängige Straßen- und Kfz-Lichtquellen gemäß Tabelle 3 in den ME-Klassen der DIN EN 13201

| ME-Klasse | Photopischer Wartungswert (cd/m ²) | HQL | CPO | MH | NAV | H7 | Xe | LED |
|-----------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 2,000 | 2,012 | 2,001 | 2,029 | 1,930 | 2,059 | 2,071 | 2,133 |
| 2 | 1,500 | 1,512 | 1,501 | 1,530 | 1,429 | 1,560 | 1,572 | 1,634 |
| 3 | 1,000 | 1,011 | 1,001 | 1,028 | 0,934 | 1,055 | 1,067 | 1,124 |
| 4 | 0,750 | 0,760 | 0,751 | 0,775 | 0,690 | 0,800 | 0,811 | 0,862 |
| 5 | 0,500 | 0,508 | 0,501 | 0,521 | 0,449 | 0,542 | 0,551 | 0,594 |
| 6 | 0,300 | 0,306 | 0,301 | 0,316 | 0,260 | 0,333 | 0,339 | 0,373 |
| S/P | | 1,101 | 1,008 | 1,259 | 0,422 | 1,526 | 1,644 | 2,240 |

Tabelle 5: Sehleistungsgewinn (positive Zahlen) oder Sehleistungsverlust (negative Zahlen) in Prozent, wenn die photopischen Leuchtdichten (Wartungswerte) laut DIN EN 13201 beibehalten werden. Die Berechnung basiert auf Tabelle 4

| ME-Klasse | Wartungswert (cd/m ²) | HQL | CPO | MH | NAV | H7 | Xe | LED |
|-----------|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 2,000 | 0,58 | 0,04 | 1,47 | -3,49 | 2,94 | 3,57 | 6,64 |
| 2 | 1,500 | 0,78 | 0,06 | 1,99 | -4,73 | 3,97 | 4,82 | 8,93 |
| 3 | 1,000 | 1,09 | 0,08 | 2,76 | -6,61 | 5,51 | 6,68 | 12,37 |
| 4 | 0,750 | 1,32 | 0,10 | 3,35 | -8,05 | 6,67 | 8,09 | 14,96 |
| 5 | 0,500 | 1,67 | 0,13 | 4,23 | -10,26 | 8,43 | 10,21 | 18,84 |
| 6 | 0,300 | 2,16 | 0,17 | 5,46 | -13,38 | 10,85 | 13,14 | 24,17 |
| S/P | | 1,101 | 1,008 | 1,259 | 0,422 | 1,526 | 1,644 | 2,240 |

Aus Tabelle 4 und Tabelle 5 geht hervor, dass die Lichtquellen mit einem höheren S/P-Verhältnis (s. die letzten Zeilen der Tabelle 4 und Tabelle 5) eine höhere Sehleistung ermöglichen, wenn für das Einhalten des photopischen ME-Wartungswertes mesopischen Berechnungsverfahren ansetzt. So ermöglichen Lichtquellen mit einem erhöhten Blauanteil in der spektralen Strahldichteverteilung ein besseres Detektionsvermögen. Der höchste Sehleistungsgewinn erreicht im Vergleich zur photopischen Leuchtdichte einen Wert von 24 % für die weiße LED in der ME6-Klasse. Wird stattdessen eine gelbliche Natriumdampf-Hochdrucklampe (NAV) mit niedrigem S/P-Verhältnis eingesetzt, entsteht ein Verlust von 13,38 %. Unter dieser Beleuchtung können kritische Verkehrssituationen entstehen, weil wichtige Sehobjekte nicht ausreichend detektiert werden können.

3.3 Zusammenfassung

Die Helligkeit ist für den Raumeindruck (Raumwahrnehmung oder Wahrnehmung der Dreidimensionalität), die Sehleistung und das Sicherheitsgefühl zuständig. Die Helligkeit kann mit Hilfe der Leuchtdichte und der Beleuchtungsstärke nicht vollständig beschrieben werden, da beide Kenngrößen von dem für die Beschreibung des Helligkeitseindruckes nur eingeschränkt geeigneten Lichtstrom abgeleitet sind. Das ist die grundsätzliche Schwäche der Kenngröße „Lichtstrom (lm)“ und damit auch der von ihr abgeleiteten Kenngrößen. Die in diesem Abschnitt erläuterten Helligkeits- bzw. Sehleistungsmodelle verwenden deswegen weitere, aus dem Spektrum abgeleitete Kenngrößen und leiten geeignete numerische Kennzahlen für die Charakterisierung der Helligkeit und der Sehleistung ab. Die äquivalente Leuchtdichte nach Ware und Cowan (3.1.2) und die Helligkeitsmetrik nach Fairchild und Pirrotta (3.1.3) wurden nicht auf der Basis von visuellen Experimenten von realen, ausgedehnten Szenen erarbeitet und sind deswegen lichttechnisch weniger relevant. Lichttechnisch relevant ist – in dieser Hinsicht – die Helligkeitsmetrik nach Fotios (3.1.4), die im neuen Bewertungsansatz dieses Berichtes im photopischen Bereich verwendet wird. Im mesopischen Bereich wird das mesopische Sehleistungsmodell der CIE (3.2.5), das auf einer umfangreichen experimentellen Datenbank basiert, herangezogen.

3.4 Literatur zu Abschnitt 3

- [1] M. Eloholma, M. Liesiö, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, J. Alferdinck, A. Freiding, P. Bodrogi, G. Várady, Mesopic models - from brightness matching to visual performance of night-time driving: a review, *Lighting Res. Technol.* 37/2, pp. 155-175, 2005.
- [2] M. S. Rea, J. D. Bullough, J. P. Freyssinier-Nova, A. Bierman, A proposed unified system of photometry, *Lighting Res. Technol.* 36/2, pp. 85-111, 2004.
- [3] M. Eloholma, L. Halonen (Editors), MOVE – Mesopic Optimization of Visual Efficiency, EU project, Performance based model for mesopic photometry, Report, 2005.
http://www.lightinglab.fi/CIETC1-58/files/MOVE_Report.pdf.
- [4] Commission Internationale de l'Eclairage, Testing of supplementary systems of photometry, CIE Central Bureau, CIE Pub. 141, 2001.
- [5] Ken Sagawa, Toward a CIE supplementary system of photometry: brightness at any level including mesopic vision, *Ophthal. Physiol. Opt.* 26, pp. 240–245, 2006.
- [6] T. Q. Khanh, M. Böll, Ch. Schiller, N. Haferkemper, Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung im mesopischen Bereich, *Licht* 3/2008, pp. 214-219, 2008.
- [7] S. A. Fotios, C. Cheal, Lighting for subsidiary streets: investigation of lamps of different SPD, Part 2 – Brightness, *Lighting Res. Technol.* 39/3, pp. 233-252, 2007.
- [8] P. Bodrogi, Ch. Schiller, N. Haferkemper, M. Böll, T. Q. Khanh, Jüngste Labortestergebnisse der mesopischen Helligkeitwahrnehmung verschiedener Straßenlampenspektren und weißer LEDs, *Tagungsband Licht 2010*, pp. 43-46, Wien, 2010.
- [9] H. C. Walkey, J.A. Harlow, J.L. Barbur, Characterising mesopic spectral sensitivity from reaction times, *Vision Research* 46, pp. 4232–4243, 2006.
- [10] Commission Internationale de l'Eclairage, Recommended system for mesopic photometry based on visual performance, CIE Publ. 191-2010, 2010.
- [11] P. Bodrogi, Z. Vas, N. Haferkemper, G. Varady, Ch. Schiller, T. Q. Khanh, J. Schanda, Effect of chromatic mechanisms on the detection of mesopic incremental targets at different eccentricities, *Ophthal. Physiol. Opt.* 30, pp. 85–94, 2010.
- [12] N. Haferkemper, A. Frohnapfel, G. Paramei, T. Q. Khanh, A mesopic experiment series at automotive visual conditions, Proc. 7th International Symposium on Automotive Lighting ISAL 2007, Technische Universitaet Darmstadt, pp. 402–409, 2007.
- [13] Z. Vas, P. Bodrogi, Additivity of mesopic photometry, Proc. 7th International Symposium on Automotive Lighting ISAL 2007, Technische Universitaet Darmstadt, pp. 187–194, 2007.
- [14] A. Freiding, M. Eloholma, J. Ketomäki, L. Halonen, H. Walkey, T. Goodman, J. Alferdinck, G. Várady, P. Bodrogi, Mesopic visual efficiency I: detection threshold measurements, *Lighting Res. Technol.* 39, 319–334, 2007.
- [15] M. D. Fairchild, E. Pirrotta, Predicting the Lightness of Chromatic Object Colors using CIELAB, *Color Research and Application* 16, pp. 385-393; 1991.
- [16] M. S. Rea, The lumen seen in a new light: Making distinctions between light, lighting and neuroscience, *Lighting Res. Technol.* 47, 259–280, 2015.
- [17] S. A. Fotios and G. J. Levermore, “Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model,” *Light. Res. Technol.* 30(3), 103–106 (1998).

4 Farbqualität, Farbqualitätsmetriken

4.1 Einführung

Zum Beginn der Ära der elektrischen Beleuchtung spielte zunächst die sog. Lichtqualität mit den Kenngrößen des Beleuchtungsniveaus (Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke), der Blendung und der Kontrastwahrnehmung eine dominierende Rolle bei der Lichtplanung und der Dimensionierung von Beleuchtungssystemen. Erst zum Anfang der 1960er Jahre wurde der allgemeine Farbwiedergabeindex (R_a , engl. Colour Rendering Index, CRI) eingeführt, um ein Kriterium für die Farbqualität während der Lichtplanung zu definieren und deren Messzahlen für verschiedene Beleuchtungssituationen (Bürobeleuchtung, Verkaufsraumbeleuchtung oder Hotelbeleuchtung) anzugeben. Die Definition des Farbwiedergabeindex ermöglicht, aus einer bis zu den Jahren 2010-2012 begrenzten Auswahl an Lampenspektren (thermische Strahler wie Glühlampen, Halogenglühlampen, Entladungslampen wie Leuchtstofflampen T8 und T5, HMI oder HTI-Lampen) die Lichtquelle für eine ansprechende Farbgestaltung in der Innenraumbeleuchtung auszuwählen.

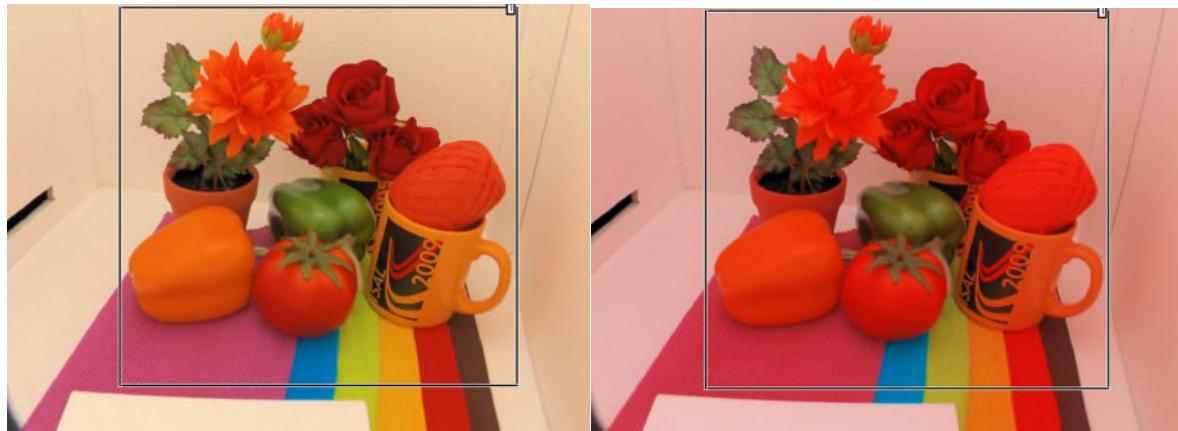
Die Farbwiedergabe einer Lichtquelle wird als die „Auswirkung einer Lichtart auf den Farbeindruck von Objekten, die mit ihr beleuchtet werden, im bewussten oder unbewussten Vergleich zum Farbeindruck der gleichen Objekte unter einer Bezugslichtart“ definiert. Diese Definition basiert auf der Vorstellung, dass der Farbeindruck unter einer zu bewertenden Lichtart und der Farbeindruck der gleichen Objekte unter einer Bezugslichtart möglichst ähnlich sein soll. Da die Emissionsspektren der Bezugslichtart im konkreten Fall (Plancksche Strahler, die Glühlampenlicht ähneln oder Tageslichtphasen) ein volles Emissionsspektrum aufweisen, sind für alle Wellenlängen zwischen 380 nm bis 780 nm genug Strahlungsanteile vorhanden, um bei der Beleuchtung der Oberflächen der farbigen Objekte ausreichende und nahezu unverfälschte Farbinformationen zu übertragen. Das Betrachten der Objekte fokussiert sich dabei auf eine „Beziehung zwischen Wiedergabefarbe und Originalfarbe“. Mit diesem Begriff sind bereits kontext-bezogene Beurteilungen wie „Natürlichkeit, Identifikation und Originalität“ der einzelnen Farben verbunden.

In der Zeit zwischen 1945 bis etwa 2008-2010 gab es bis auf die Halogenmetalldampflampen sehr wenige Änderungs- und Variationsmöglichkeiten für den Entwurf oder die Auswahl von Lampenspektren. Die technologische Entwicklung war eher darauf eingestellt, die Lichtausbeute der Lichtquelle (in lm/W) zu maximieren. Von der Seite der Farbwissenschaft existierten allerdings bereits einzelne Studien über die visuellen Aspekte der Farbqualität, die in einem akademischen Umfeld damals bereits begrüßt wurden.

Seit einigen Jahren wurde eine Reihe von intensiven Forschungsarbeiten über die verschiedenen Aspekte der Beleuchtung und deren farbliche Gestaltung durchgeführt. Diese Forschungsergebnisse wurden zügig in reale Lampenkonzepte und Beleuchtungsempfehlungen der Lichtindustrie umgesetzt. Dieses erhöhte Tempo der Forschung und deren industrieller Umsetzung ist der früher unbekannten Flexibilität der LED-Technik zu verdanken, die es ermöglicht, die Beleuchtungsspektren dynamisch und adaptiv zu ändern. Hierzu findet ein weltweiter Wettbewerb zur LED-Ideengabe und der Neu-Orientierung in den gesellschaftlichen Diskussionen über die LED-basierten Produktpräsentationen statt: die Waren und Produkte sollen nicht nur ihre Originalfarbe aufweisen, sondern deren Präsentation soll zum Kauf anregen. Somit ist neben dem Farbqualitätsaspekt „Farbwiedergabe“ auch das Farbqualitätsmerkmal Farbpräferenz Gegenstand der Diskussion und Forschung geworden.

Eine wichtige Aufgabe der modernen Beleuchtungsplanung besteht darin, neue Lichtquellen mit einer zur Sehauflage passenden spektralen Verteilung sowie neue Leuchten mit angemessenen räumlichen Lichtstärkeverteilungen zu wählen. Dies muss so geschehen, dass die neuen Beleuchtungssysteme langzeitige Akzeptanz finden [1]. Diese Akzeptanz (oder gute Farbwiedergabe) entsteht vorwiegend auf Basis der Farberinnerung des Benutzers, durch Vergleichen der Farbwahrnehmung der Gegenstände unter Tageslicht oder Glühlampenlicht mit der Wahrnehmung unter den eingesetzten Kunstlichtspektren, siehe Abbildung 17. Den Farbwiedergabe-eigenschaften kommt bei der Auswahl einer Lichtquelle in der Praxis große Bedeutung zu.

Abbildung 17: Farberscheinung eines Stilllebens unter der Referenzlichtquelle (links) und der Testlichtquelle (rechts).



Zur Beurteilung der Farbwiedergabe-Eigenschaft einer Testlichtquelle vergleicht der Benutzer die Farbwahrnehmung der Gegenstände unter einer Referenzlichtquelle (links) mit der Farbwahrnehmung unter einer Testlichtquelle (rechts). In den meisten Situationen ist die Referenzseite (links) nicht vorhanden und die Beurteilung geschieht auf Basis der Farberinnerung. Quelle: Technische Universität Darmstadt

Man findet heutzutage viele künstliche Lichtquellen, deren Lichtfarbe dem natürlichen Licht zu einer bestimmten Tageszeit sehr ähnlich ist, bzw. der Lichtfarbe einer Halogenglühlampe sehr nahe kommt. Dies bedeutet, dass diese Lichtquellen die „weiße“ Farbempfindung einer neutral-weißen Oberflächenfarbe nicht stören, solange die Lichtquelle selbst als Weiß empfunden wird. Probleme mit der Farbempfindung entstehen, wenn im spektralen Strahlungsfluss der Lichtquelle bestimmte Spektralbereiche fehlen bzw. nur niederwertig vorhanden sind. Eine numerische Bewertung der Wirkung des spektralen Strahlungsflusses auf die wahrgenommene Farbwiedergabe-eigenschaft der Lichtquelle liegt zurzeit noch nicht vor. Daher spielen die Thematik Farbwiedergabe allgemein und der bekannte Farbwiedergabeindex nach der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) [2] in der lichttechnischen Forschung eine wichtige Rolle.

Die Farbwiedergabe einer Testlichtquelle ist dann gut, wenn die Erscheinung der reflektierenden Objektfarben unter der Testlichtquelle mit der Farberscheinung unter einer Referenzlichtquelle gut übereinstimmt. Die Übereinstimmung bestimmt der Benutzer visuell, indem er den Vergleich zwischen Test- und Referenzlichtquelle – bewusst oder unbewusst – durchführt [3]. Die Farbwiedergabe-eigenschaft wird heute international durch den allgemeinen CIE-Farb-wiedergabeindex R_a [2] beschrieben. Visuelle Experimente haben gezeigt, dass der CIE-Farb-wiedergabeindex moderne Lichtquellen, wie weiße Leuchtdioden mit speziellen spektralen Strahldichtefunktionen, nicht genau beschreibt. Das bestätigte 2007 auch die CIE [4].

Im Folgenden wird auf Defizite aktueller mathematischer Definitionen zur Farbwiedergabe eingegangen. Ebenso werden Lösungsansätze aufgezeigt. Natürlich ist die Anzahl der möglichen

mathematischen Methoden zur Berechnung der Farbwiedergabe hoch. Maßgeblich für die Annahme einer Methode sind allerdings die Ergebnisse visueller Experimente. Demgemäß werden die wichtigsten visuellen Experimente zur Farbwiedergabe erörtert, die zur Entwicklung oder zur Validierung der erwähnten Formeln beigetragen haben. Ebenso wird die interpersonelle Streuung der wahrgenommenen Farbunterschiede diskutiert, weil unterschiedliche Versuchspersonen die Erscheinung von Farben und Farbunterschieden unterschiedlich bewerten.

Außer der Farbwiedergabe können noch weitere Farbqualitätsparameter wie z. B. die Farbharmonie, die Farbpräferenz oder die Größe des Farbgamut erwähnt werden. Diese werden nicht durch einen Farbwiedergabeindex, sondern durch den sog. Harmoniewiedergabeindex, Farbpräferenzindex oder Farbgamutindex beschrieben. Vor allem der Unterschied zwischen „Farbwiedergabe“ und „Farbpräferenz“ ist bedeutsam. Der Begriff Farbpräferenz bezieht sich auf eine von einem Beobachter bevorzugte Farberscheinung eines farbigen Objekts. Im Gegensatz dazu bedeutet eine exzelle Farbwiedergabe eine gleiche Farberscheinung unter Test- und Referenzlichtquelle. Sie ist also unabhängig von einer Bevorzugung der Farberscheinung durch einen Beobachter.

Die CIE entwickelte 1948 zuerst zur Charakterisierung der Farbwiedergabeeigenschaft einer Lichtquelle eine Spektralbandmethode mit 8 Spektralbändern entwickelt [5]. Dabei hatten die Spektralbänder die folgenden Grenzen: 380-420 nm, 420-440 nm, 440-460 nm, 460-510 nm, 510-560 nm, 560-610 nm, 610-660 nm sowie 660-760 nm. Die Strahldichten der Testlichtquelle in diesen 8 Spektralbändern wurden mit denen einer Referenzlichtquelle verglichen [6, 7, 8]. Die Gewichtung der einzelnen Spektralbänder und die optimale Wahl der Bandgrenzen wiesen in Verbindung mit Leuchtstofflampen bei Bewertung des Einflusses der Spektrallinien Probleme auf. Die schlechten Ergebnisse im Vergleich zur visuellen Bewertung konnten weder durch die Änderung der Anzahl der Bänder, der Lage der Bandgrenzen, noch durch die Einführung einer Gewichtungsfunktion verbessert werden [9].

Dementsprechend empfahl die CIE, alternative Beschreibungsmethoden der Farbwiedergabe zu untersuchen, die für alle Lichtquellen gelten [10, 11]. Als alternative Methode erschien die Methode der Farbverschiebungen verschiedener Testobjekte (d. h. reflektierender Oberflächen) geeignet. Dabei werden Veränderungen in der Farberscheinung beim Umschalten zwischen Referenz- und Testlichtquelle ausgewertet. Dieses Prinzip bildet bis heute die Grundlage aller Farbwiedergabemethoden. Die Methode und deren Probleme, wie die Beschreibung der chromatischen Adaptation oder die visuelle Gleichabständigkeit des Farbenraumes wurden von zahlreichen Autoren untersucht [12, 13, 14].

Aufgrund dieser Studien gab die CIE der Methode der Farbverschiebungen der Testobjekte Priorität gegenüber der Spektralbandmethode. Es wurde gezeigt, dass eine verhältnismäßig kleine Anzahl der Testfarben (von 8 bis 15) genügt, um die Farbwiedergabe der Testlichtquelle zu charakterisieren, und dass nur die gleichmäßige Verteilung der Testfarben im Farbraum wichtig ist [9, 15, 16, 17]. Die erste Version der Methode wurde präsentiert [18] und später in einer CIE-Publikation (erste Edition) zusammengefasst [19]. Das wichtigste Ergebnis der Methode stellt eine reelle Zahl dar, die aus dem spektralen Strahlungsfluss der Testlichtquelle berechnet wird und die Farbwiedergabe der Testlichtquelle charakterisiert. Diese Zahl ist der sogenannte allgemeine CIE-Farbwiedergabeindex (R_a).

Offene Fragen der ersten Edition betrafen die Möglichkeiten zur Vereinfachung der Methode, eine bessere Beschreibung der chromatischen Adaptation und die Einbeziehung von fluoreszierenden Farben. Die zweite Edition der CIE-Publikation über die Farbwiedergabe [20] veränderte nur die Formel zur Nachbildung der chromatischen Adaptation [21, 22]. Diese Verbesserung gilt allerdings nur für kleine Unterschiede der Farbörter von Test- und Referenzlichtquelle, die in

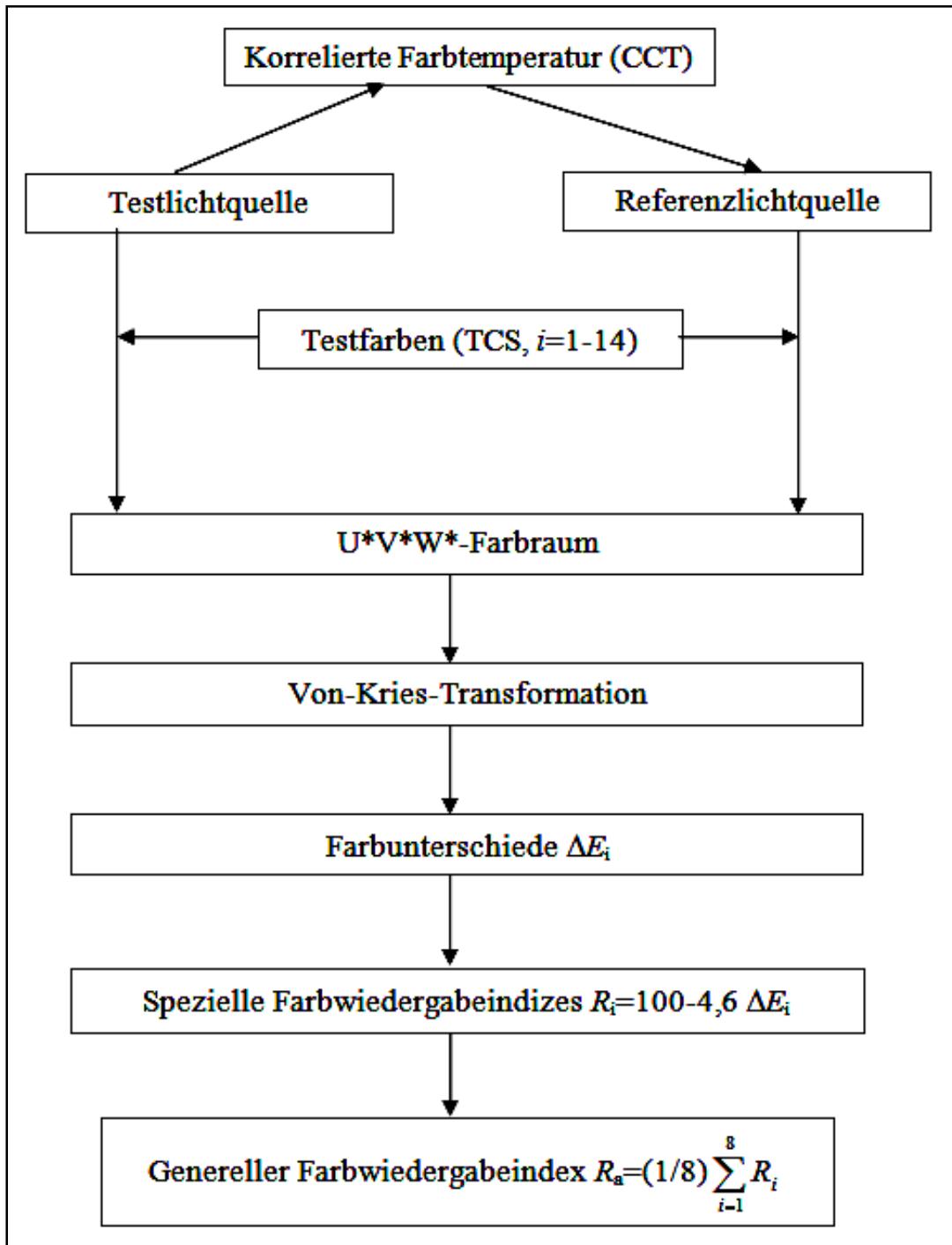
der Methode durch eine schmale Toleranzgrenze bei der Auswahl der Referenzlichtquelle garantiert wird [20]. In der dritten, aktuellen Edition [2] wurden nur Druckfehler korrigiert, wobei die technischen Empfehlungen der zweiten Edition unverändert blieben.

4.2 Definition der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex, CIE CRI R_a

Die ausführliche Beschreibung sowie die numerischen Werte der aktuellen CIE-Methode zur Berechnung des Farbwiedergabeindex können der entsprechenden CIE-Publikation [2] entnommen werden. Hier werden – zur Erläuterung der Methode – lediglich die wichtigsten Schritte (1 bis 7) zusammengefasst, siehe auch Abbildung 18.

1. Es wird eine Referenzlichtquelle gewählt, die die gleiche ähnliche Farbtemperatur (T_{cp} ; engl.: „Correlated Colour Temperature“, Abkürzung: CCT) wie die Testlichtquelle hat. Beträgt T_{cp} der Testlichtquelle weniger als 5000 K, dann wird die Schwarzkörperstrahlung (Planckscher Strahler, der Glühlampenlicht ähnelt) der gleichen Farbtemperatur als Referenzlichtart verwendet. Beträgt die ähnliche Farbtemperatur der Testlichtquelle 5000 K oder mehr, dann wird eine Tageslichtphase mit gleichem T_{cp} als Referenzlichtart verwendet. Dabei darf der Farbunterschied ΔC im u, v -Farbdiagramm maximal $5,4 \cdot 10^{-3}$ betragen.
2. 14 Farbmuster des Munsell-Farbatlas' wurden als Testfarben (test colour samples, TCS) gewählt. Zu den ersten 8 TCS werden spezielle Farbwiedergabeindizes bestimmt, aus denen der allgemeine Farbwiedergabeindex (R_a) berechnet wird. Die letzten 6 TCS werden für ergänzende Betrachtungen in Form weiterer spezieller Farbwiedergabeindizes hinzugezogen.
3. Die CIE-1931-Normfarbwerte X, Y, Z werden für die 14 TCS unter der Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle berechnet und in CIE-1960-UCS-Koordinaten (u, v) sowie in den CIE-1964- U^*, V^*, W^* -Farbraum transformiert.
4. Die Farbart der Testlichtquelle wird mit einer von-Kries-Transformation in die Farbart der Referenzlichtquelle transformiert [21].
5. Die 14 CIE-1964-Farbabstände werden für die 14 TCS (ΔE_i , $i=1 \dots 14$) zwischen den U^* -, V^* - und W^* -Werten unter der Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle berechnet.
6. Für jedes TCS wird mit der Gleichung $R_i = (100 - 4,6 \Delta E_i)$ ein spezieller Farbwiedergabeindex berechnet ($i=1 \dots 14$).
7. Der allgemeine Farbwiedergabeindex (R_a) wird als arithmetischer Mittelwert der ersten 8 speziellen Farbwiedergabeindizes definiert.

Abbildung 18: Flussdiagramm zur Veranschaulichung der Berechnung des CIE-Farbwiedergabeindex



Quelle:[2]

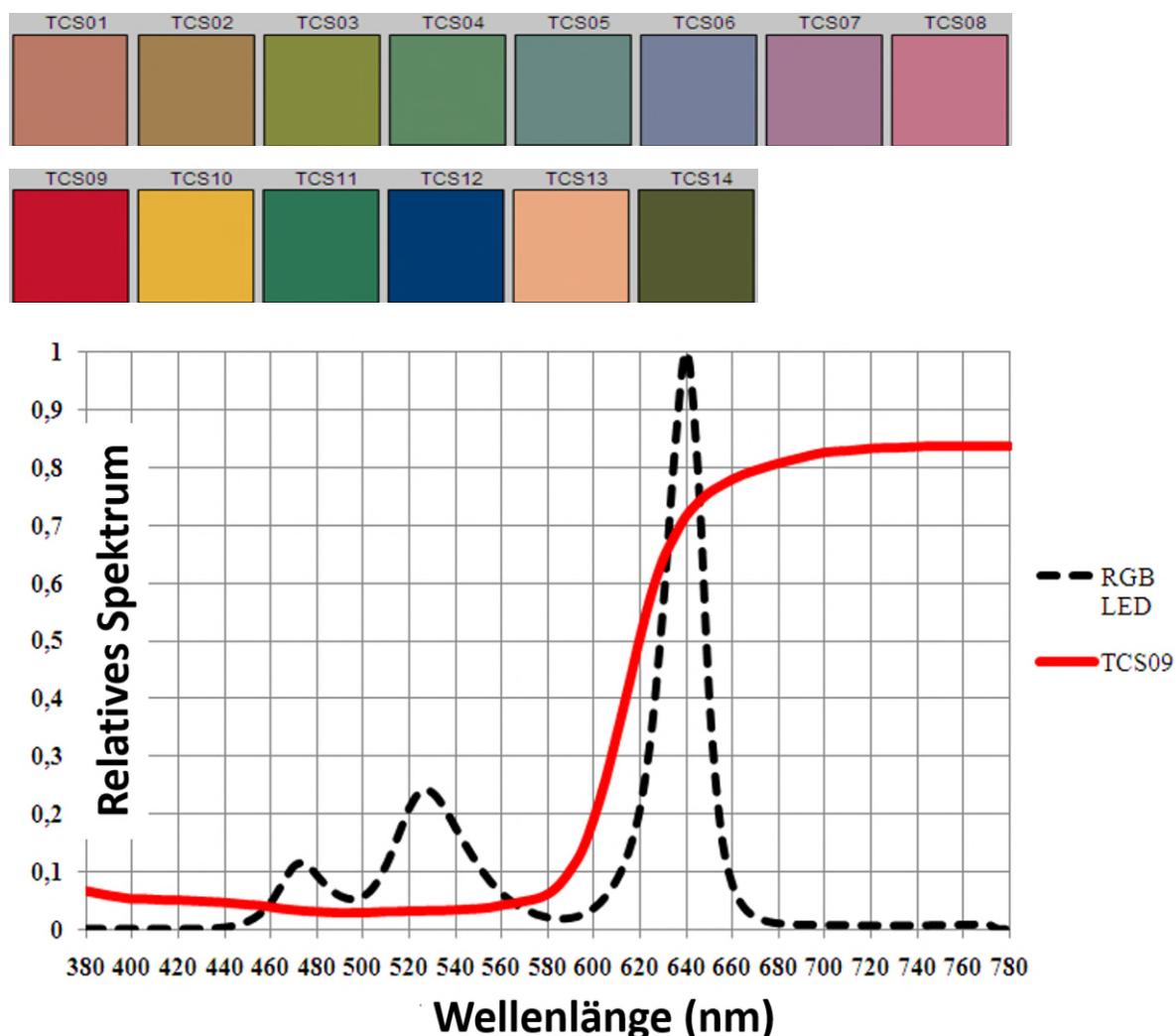
4.3 Eigenschaften des Farbwiedergabeindex CIE CRI R_a

Visuelle Experimente der Farbwiedergabe haben gezeigt, dass der allgemeine CIE-Farbwiedergabeindex (d. h. der Wert von R_a) die wahrgenommene Farbwiedergabeeigenschaft der Lichtquellen nicht einwandfrei beschreibt, d. h., die Rangordnung der Lichtquellen nach Farbwiedergabe oft falsch voraussagt. Dieses Defizit ist besonders dann bemerkenswert, wenn vor allem

RGB-LED-Lichtquellen oder auch leuchtstoffkonvertierte Leuchtdioden im Zusammenhang mit anderen Lichtquellen bewertet werden. Die Ursachen der Defizite der Anwendung des R_a -Wertes (vor allem im Zusammenhang mit Leuchtdioden) wurden bereits identifiziert [23] und können wie folgt zusammengefasst werden (1 bis 7):

Auswahl der Testfarben (TCS): Die ersten 8 TCS sind ungesättigt und die Wechselwirkung der LED-Spektren mit gesättigten Objektfarben (z. B. mit gesättigtem Rot) ergibt eine Farberscheinung, die mit den ersten 8 TCS nicht beschreibbar ist, s. Abbildung 19.

Abbildung 19: Auswahl der Testfarben (TCS) in der CIE-Farbwiedergabemethode



Oben (Quelle: NIST, USA): die ungesättigten Testfarben TCS01-TCS08, die zur Berechnung des generellen Farbwiedergabeindex herangezogen werden; Mitte (Quelle: NIST, USA): die gesättigten Testfarben TCS09-TCS14; unten: Wechselwirkung eines RGB-LED-Emissionsspektrums mit dem spektralen Reflexionsgrad von TCS09 (zur Erläuterung s. Text)
Quelle:[2]

Abb. 19 zeigt, dass die spektrale Strahlungsverteilung der LED-Lichtquelle ($T_{cp}=2690K$) eine Spur bei 640 nm hat. In der Folge wird bei der Testfarbe TCS09 – gesättigtes Rot – der Rotton erheblich verstärkt. Aufgrund dieser Verfälschung beträgt der zugehörige spezielle Farbwiedergabeindex R_9 in diesem Beispiel -180. Diesen Effekt kann der Wert des generellen Farbwiedergabeindex (in diesem Beispiel $R_a=17$) nicht beschreiben, weil er ausschließlich auf den ungesättigten Testfarben (TCS01-TCS08) basiert.

Referenzlichtart: Die Versuchspersonen favorisieren eine kategoriale Einstufung des wahrgenommenen Weißtons [24]. Außerdem wird die Auswahl der Referenzlichtart beim Übergang vom Planckschen Strahler zu den Tageslichtphasen beim CIE-Farbwiedergabeindex [2] bei 5000K gebrochen, was problematische Berechnungsabläufe hervorruft. Andererseits weist die Farberscheinung einer farbigen Umgebung unter Referenzlichtarten niedrigerer Farbtemperaturen (z. B. ein Planckscher Strahler mit 2000 K) visuell einen deutlichen Gelbstich auf, der auf die nicht vollkommene Farbkonstanz des menschlichen Sehsystems unter diesen Bedingungen zurückzuführen ist, s. Abbildung 20.

Abbildung 20: Illustration der nicht vollkommenen Farbkonstanz: Farberscheinung eines Stilllebens mit farbigen Objekten unter niedriger Farbtemperatur



Quelle: Technische Universität Darmstadt

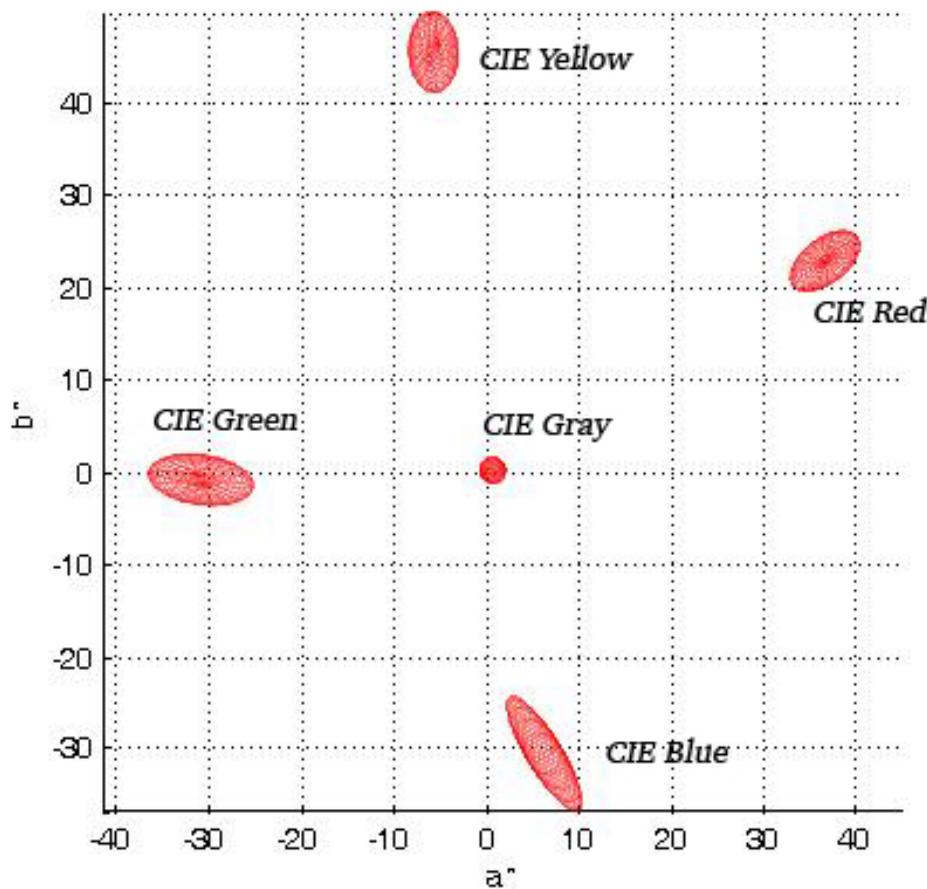
Formeln der chromatischen Adaptation: Für größere Adaptionsunterschiede, die bei der Erneuerung der Farbwiedergabemethode öfters auftreten, beschreibt die von-Kries-Transformation die chromatische Adaptation im Allgemeinen sehr schlecht.

Farbraum und Farbabstandsformeln: Die Korrelation zwischen den im U*-V*-W*-Farbraum berechneten Farbunterschieden (ΔE_{calc}) und den wahrgenommenen Farbunterschieden (ΔE_{vis}) ist niedrig. Ein solcher Farbraum wird als „visuell nicht gleichabständig“ bezeichnet. In einem gleichabständigen Farbraum sollen sich alle Testfarben T, die einen als konstant wahrgenommenen Farbunterschied (ΔE_{vis}) zwischen T und einer festgelegten Referenzfarbe R aufweisen, auf einer Kugelfläche befinden, deren Mittelpunkt die Referenzfarbe R bildet. Außerdem soll der Kugeldurchmesser für alle Referenzfarben im gesamten Farbraum konstant sein.

Statt der oben erwähnten Kugelflächen ergeben sich im U*-V*-W*-Farbraum Ellipsoide, deren Halbachsen je nach Referenzfarbe variieren. Zur Veranschaulichung eines nicht gleichabständigen Farbraumes wird hier das Beispiel der sogenannten Toleranzellipsoide herangezogen, die in Abbildung 21 auf die CIELAB-a*-b*-Ebene projiziert gezeigt werden. Die Farben, die sich auf der Oberfläche dieser Toleranzellipsoide befinden, stellen einen für 50 % aller Versuchspersonen tolerierbaren Farbunterschied im Vergleich mit der Farbe des Mittelpunktes dar [25].

Aus Abbildung 21 geht hervor, dass die visuell ermittelten Toleranzellipsoide stark von der Farbart des Mittelpunktes abhängen. Somit ist der CIELAB-Farbraum visuell nicht gleichabständig.

Abbildung 21: Auf die CIELAB-a*-b*-Ebene projizierte Toleranzellipsoide.



Bildquelle: [25]

Arithmetischer Mittelwert: Eine einzige Zahl (d. h. eine lineare Transformation des Durchschnitts der Farbabstände der acht ungesättigten Testfarben zwischen Test- und Referenzlichtquelle) kann die möglichen Farbverschiebungen für alle in einer modernen visuellen Umgebung relevanten spektralen Reflektanzfunktionen (inkl. gesättigte Objektfarben) nicht beschreiben. Dieser Effekt ist besonders für neuartige (gesättigte) Pigmente in Kombination mit neuartigen Lichtquellspektren (z. B. Leuchtdiodenspektren) signifikant, vgl. mit Abbildung 19.

Interpretation der R_a -Skala: Es ist schwierig, die Werte der R_a -Skala (z. B. $R_a=83$) als visuelles Gütemerkmal der Farberscheinung zu interpretieren, ähnlich wie die Deutung der *Unterschiede* der R_a -Skala (z. B. $\Delta R_a=3$).

Farbqualität: Die wahrgenommene Farbqualität hat außer der Farbwiedergabe noch weitere visuelle Aspekte oder Eigenschaften, wie Farbgamut, Farbharmonie oder Farbpräferenz. Bestimmte Eigenschaften korrelieren mit dem Wert von R_a in den visuellen Experimenten nur geringfügig oder gar nicht [26, 27].

4.4 Alternative Farbwiedergabe- und Farbqualitätsindizes

Mit Hilfe des Mittelwertes (R_{1-14}) der 14 speziellen Indizes (R_1 bis R_{14}) kann die Wechselwirkung des Emissionsspektrums des Beleuchtungsproduktes mit den spektralen Reflexionseigenschaften der Objekte besser beschrieben werden (Abbildung 19 zeigt für diese Wechselwirkung ein Beispiel). Durch die Erweiterung auf R_9 bis R_{14} können auch gesättigte Farben berücksichtigt werden, woran es bei der Berechnung von R_a mangelt. Weitere Verbesserungsmöglichkeiten

wurden schon 1991 von der CIE in Betracht gezogen, als die technische Arbeitsgruppe Farbwiedergabe (TC 1-33) gegründet und dadurch 1999 eine neue Berechnungsmethode (R96_a) vorgeschlagen wurde [28]. In dieser international nicht eingeführten Methode wurden die folgenden Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex empfohlen:

1. Die Testfarben (TCS) werden von der MacBeth-ColorChecker®-Farbtafel übernommen, die sowohl gesättigte als auch ungesättigte Farben sowie wichtige Gedächtnisfarben enthält.
2. Statt der kontinuierlichen Menge der Referenzlichtarten (Planckscher Strahler und Tageslichtphasen) wird mit nur noch 6 bestimmten Referenzlichtarten gearbeitet (d. h. D65, D50, P4200, P3450, P2950 sowie P2700, wobei P einen Planckschen Strahler mit der darauf folgenden Farbtemperatur bedeutet) [24].
3. Als Formel für die chromatische Adaptation wird statt der von-Kries-Transformation die CIE-Adaptationsformel [29] eingesetzt.
4. Die Testfarben werden sowohl unter der Test-, als auch unter der Referenzlichtquelle nach D65 transformiert. Danach wird zur Berechnung der Farbabstände der CIELAB-Farbraum verwendet, da dieser unter D65 weitgehend getestet wurde.

Außer der oben geschilderten R96_a-Methode wurden kürzlich international etliche neue Farbwiedergabeindizes vorgeschlagen. Im Folgenden werden einige ausgewählte Methoden zusammengefasst.

4.4.1 Die CQS-Methode zur Beschreibung der Farbpräferenz: CQS Q_f , Q_a , Q_p und Q_g

Die Betrachtung von farbigen Objekten (zum Beispiel in einem Museum, einem Möbelhaus oder einem Lebensmittel-Supermarkt) ist ein ständiger Vergleich zwischen den dargebotenen Farben und der Idealvorstellung des Beobachters, wie diese Farben aussehen sollen, verbunden mit einem Wunsch, für die farbigen Objekte eine Attraktivitätssteigerung durch Beleuchtung zu bewirken. Die Farbpräferenz ist oft mit dem Begriff *Lebhaftigkeit* (engl.: *vividness*) verbunden. Das ist in der Geschichte besonders in der Film- bzw. Fernsehindustrie und der Kosmetikindustrie ausgeprägt.

Die Farbpräferenz ist oft mit einer Buntonverschiebung und Buntheiterhöhung verbunden (z. B. Buntheitsverbesserung von Hauttönen im roten Farbtonbereich durch Creme oder Hautmaske). Die Buntheitssteigerung durch die Lichtquelle ist in der Kunst und in der Kosmetikindustrie oft willkommen. In der Lebensmittel-Präsentation (z. B. in einer Metzgerei) könnte eine übertriebene Buntheitssteigerung zu einer Produktverfälschung führen.

Wichtige Farbpräferenz-Indizes sind in der vom NIST (National Institute for Standards and Technology) entwickelten sog. *CQS-Methode*. In der Version 9 von 2011 gibt es drei Varianten des *CQS*:

1. *CQS Q_a* – Präferenzindex, der eine maßvolle Erhöhung der Buntheit der Testfarben unter der bewerteten Lichtquelle positiver als CIE CRI R_a bewertet;
2. *CQS Q_f* – Fidelity-Index, der die Bewertung von Testlichtquellen ähnlich der Bewertung durch den R_a vornimmt, ohne die Buntheiterhöhung positiv zu bewerten;
3. *CQS Q_g* – Gamut-Index, der ähnlich den bereits beschriebenen Gamut-Indizes die Größe der Testfarbenfläche im Farbraum relativ zu einer Referenz bewertet.

Bei der Entwicklung des *CQS* sind einige Prinzipien des R_a beibehalten worden. So ist auch der *CQS* ein testfarbenbasierter, referenzbezogener Index. Die Referenzlichtquelle wird nach denselben Grundlagen wie beim *CIE-R_a* ausgewählt. Auch der Maximalwert liegt wie beim R_a bei 100

für eine sehr gute Farbwiedergabe. Die wichtigsten Änderungen zum CIE-Farbwiedergabeindex sind:

1. Änderung der Testfarben von 8 Farben mit geringer Buntheit auf 15 Farben mit hoher Buntheit (siehe Abbildung 22), da vorangegangene Untersuchungen zeigten, dass Lichtquellen, welche Farben mit geringer Buntheit gut wiedergeben, Farben mit höherer Buntheit verfälschen können. Umgekehrt ist dieser Umstand jedoch nicht nachweisbar.
2. Statt der chromatischen Adaptationskorrektur durch die *von-Kries*-Transformation wurde das der Wahrnehmung besser entsprechende *CMCCAT2000*-System [Li et al., 2002] eingesetzt.
3. Der Farbabstand zwischen Test- und Referenz wird im *CIE-1976-L*-a*-b**-Farbraum statt dem *W*-U*-V*(1964)*-Farbraum berechnet, da dieser als wahrnehmungsmäßig gleichabständiger gilt.
4. Um den allgemeinen Index zu berechnen, wird das quadratische Mittel der 15 Farbabstände berechnet und nicht das arithmetische Mittel.

$$\Delta E_{rms}^* = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (\Delta E_{ab,i}^*)^2}$$

Dadurch bekommen Testfarben mit größeren Abweichungen vom Mittelwert ein höheres Gewicht, als das beim arithmetischen Mittel der Fall ist. Diese Abweichungen beeinflussen damit den Gesamtindex stärker.

5. Außerdem wurde der *CQS* auf eine Untergrenze von Null begrenzt, sodass keine negativen Werte wie beim R_a auftreten können.

Abbildung 22: Testfarben der CQS-Methode (NIST, USA, Version 7.1), VS1-VS15



Quelle:[30]

Um bei einer maßvollen Buntheitserhöhung (ΔC_{ab}^* ist maximal 10) die Lichtquelle gemäß der Attraktivitätssteigerung bewerten zu können, wird für den Wert von *CQS* Q_a ein Buntheitsfaktor eingeführt:

$$\Delta E_{ab,i,sat}^* = \Delta E_{ab,i}^* \quad \text{für} \quad \Delta C_{ab,i}^* \leq 0$$

$$\Delta E_{ab,i,sat}^* = \sqrt{(\Delta E_{ab,i}^*)^2 - (\Delta C_{ab,i}^*)^2} \quad \text{für} \quad \Delta C_{ab,i}^* > 0$$

$$Q_a = 100 - 3,2 \cdot \Delta E_{rms}(E_{ab,i,sat}^*)$$

Für die Fidelity-Metrik CQS Q_f wird dieser Buntheitsfaktor weggelassen:

$$Q_f = 100 - 3,0305 \cdot \Delta E_{rms}(E_{ab,i}^*)$$

Der gamutbasierte CQS Q_g ist der einzige Index, welcher – ähnlich anderen Gamutindizes – einen Wert größer als 100 und somit größer als die Referenz annehmen kann. Als Referenz wird immer die Normlichtart D65 angenommen ($Q_g(D65)=100$).

CQS Q_p , der vierte hier behandelte Index (der in einer anderen Version der CQS-Methode definiert wurde) gewichtet die Übersättigung stärker als Q_a [48]. So wird Q_p ähnlich wie CQS Q_a berechnet, es wird aber im letzten Schritt anders (wie folgt) errechnet:

$$Q_{p,rms} = 100 - 3,780 \left[\sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} (\Delta E_{ab,sat,i}^*)^2 - \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta C_{ab,i}^* K(i)} \right]$$

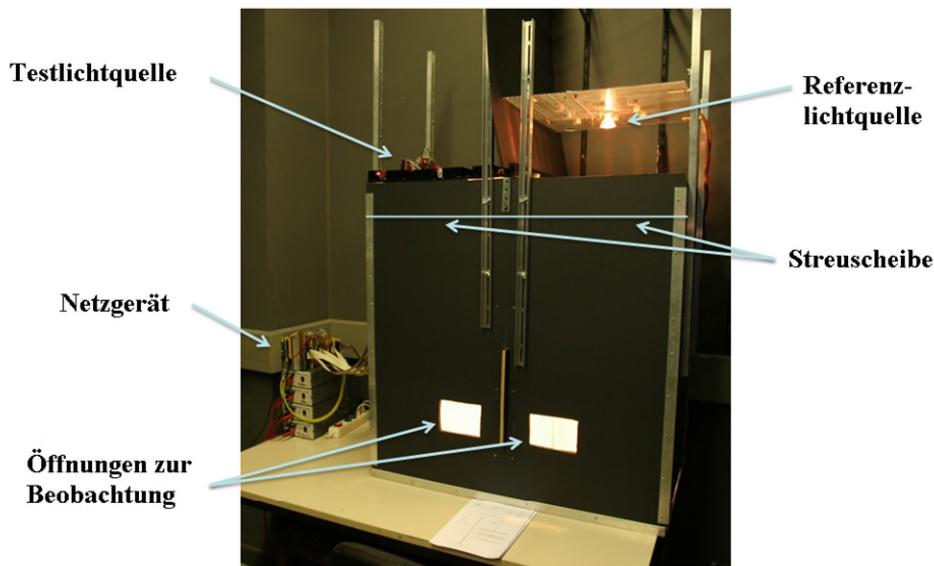
In der obigen Gleichung, wenn $C_{ab,i,test}^* \geq C_{ab,i,ref}^*$ ist, dann ist $K(i)=1$ und wenn $C_{ab,i,test}^* \leq C_{ab,i,ref}^*$ ist, dann ist $K(i)=0$. Dies bedeutet, dass der Wert von Q_p – im Vergleich zu Q_a – eine stärkere Übersättigung zulässt. Der Index CQS Q_p korreliert mit den visuellen Präferenzbewertungen in den jüngsten Farbpräferenzexperimenten i. A. unter allen Metriken am besten.

4.4.2 CRI-CAM02UCS

Der an der Universität Leeds (Großbritannien) entwickelte Farbwiedergabeindex [33] wendet einen neuen, empfindungsgemäß gleichabständigen Farbraum (sog. CAM02-UCS) an [34], in dem die Farbunterschiede zwischen der Farberscheinung der Testfarben unter den Test- und Referenzlichtquellen berechnet werden. Dabei werden die gleiche Referenzlichtquelle wie in der CIE-Methode [2] sowie die ersten 8 CIE-Testfarben [2] eingesetzt. Da die Veränderung der Adaptationsverhältnisse im CIECAM02-Farbmodell [35] grundsätzlich eingebaut ist, sind CIECAM02-basierte Farbabstandsformeln oder gleichabständige Farbräume zur Beschreibung der Wahrnehmung von Farbabständen unter den verschiedenen Adaptationsleuchtdichten und -farbarten sehr gut geeignet.

Die Überlegenheit des CAM02-UCS-Farbraumes wurde (unabhängig von den Studien an der Universität Leeds) mit Hilfe einer Doppelkammer-Anordnung (s. Abbildung 23) an der Technischen Universität Darmstadt ebenfalls bestätigt [36].

Abbildung 23: Doppelkammer-Beobachtungskasten zur visuellen Skalierung der wahrgenommenen Farbunterschiede (ΔE_{vis}) der gleichen zwei Farbmuster, einmal unter der Testlichtquelle (in der linken Kammer) und der Referenzlichtquelle (in der rechten Kammer).

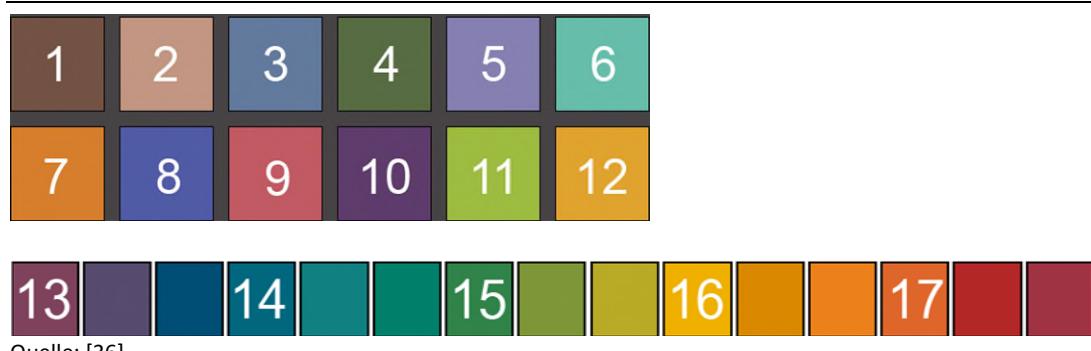


Quelle: Technische Universität Darmstadt

4.4.3 RCRI (Ratingkala-Index zur Farbwiedergabe)

Daher basiert der von der Technischen Universität Darmstadt entwickelte neue Ratingskala-Index (RCRI) [36] auf den Farbabständen, die in diesem neuen CAM02-UCS-Farbraum berechnet werden. In der RCRI-Methode werden die Farbabstände rechnerisch in Kategorien (sog. ordinale Ratings) mit dem Übereinstimmungsgrad der Farberscheinung einer Testfarbe unter den Test- und Referenzlichtquellen eingestuft. Hat der berechnete CAM02-UCS-Farbabstand einer Testfarbe einen sehr kleinen (sehr großen) Wert, erhält diese Testfarbe das Rating „sehr gut“ („sehr schlecht“). Ähnlich kann jedem der 17 RCRI-Testfarben auch ein zwischenliegendes Rating, d.h. „gut“, „tolerierbar“, oder „nicht annehmbar“ zugeordnet werden. Die 17 RCRI-Testfarben wurden z. T. von der MacBeth-ColorChecker®-Farbtafel und z. T. von den CQS-Testfarben gewählt [30], s. Abbildung 24.

Abbildung 24: Die 17 RCRI-Testfarben [36], die z. T. von der MacBeth ColorChecker®-Farbtafel (oben) und z. T. vom Satz der CQS-Testfarben (unten) ausgewählt wurden



Quelle: [36]

Die RCRI-Methode arbeitet mit der gleichen Referenzlichtquelle, wie die CIE-Methode [2]. Der Wert des RCRI berechnet sich als eine Transformation der Anzahl der „sehr guten“ und „guten“ Ratings unter den 17 Testfarben. Somit hat der Index eine anschauliche Bedeutung für den Benutzer darüber, wie viele Testfarben in guter oder sehr guter Übereinstimmung mit der Farberscheinung unter der Referenzlichtquelle stehen.

4.4.4 Farbqualitätsindex nach Gedächtnisfarben (S_a)

Dieser Index ist *keine echte Farbwiedergabeskala*, sondern eine Metrik, die die Ähnlichkeit der Farberscheinung zehn oft gesehener Objekte unter der Testlichtquelle zu deren Gedächtnisfarben beschreibt [37]. Die Methode arbeitet ohne Referenzlichtquelle. Der Maximalwert des Index S_a (=1,000) bedeutet, dass die Testlichtquelle die Farberscheinung des Objektes so wiedergibt, wie es die Beobachter nach ihrem Langzeit-Farbgedächtnis erwarten. Der allgemeine Index S_a bildet sich als geometrischer Mittelwert der speziellen Indizes der zehn Objekte.

4.4.5 Moderne Farbqualitätsmetriken nach IES (2015, TM30-15) und nach CIE 2017

Eine Arbeitsgruppe der IES (Illuminating Engineering Society of North America) hat im Jahr 2015 zwei neue Farbqualitätsmetriken, R_f (für Farbwiedergabe, colour fidelity) und R_g (für Farbgamut, colour gamut) definiert. Die Ziele der neuen Definitionen (s.g. TM-30-15 Definitionen) waren:

1. Verwendung des derzeit korrektesten Farbraumes (CAM02-UCS) mit der gleichabständigen Farbdifferenz-Wahrnehmung sowohl für kleine, als auch für große Farbdifferenzen.
2. Ermittlung einer überschaubaren Testfarben-Sammlung (99 Farben unterschiedlicher Helligkeiten) aus einer großen Farbendatenbank von 105.000 verfügbaren Farben (s. Abbildung 27). Die vorgeschlagenen Metriken für Farbwiedergabe und Farbgamut sollen auf der Basis dieser gleichen Farbensammlung errechnet werden. Die sich aus den Metriken ergebenden Zahlenwerte für R_g und R_f für jede beliebige Lichtquelle (konventionelle und Halbleiter-Lichtquellen wie LED/OLED) sollen repräsentativ für dieses große Kollektiv an Testfarben sein.

Bei der Definition der Metriken IES R_f und IES R_g verwendet man immer Referenzlichtquellen mit der gleichen Farbtemperatur. Bis 4500 K sind es Plancksche Strahler und von 5500 K an sind es die Tageslichtphasen. Zwischen 4500 K bis 5500 K benutzt man eine Linearkombination der beiden Lichtarten. Aus den 99 Farben, beleuchtet mit der Testlichtquelle und Referenzlichtquelle, berechnet man die Attribute J' (Helligkeit) sowie a' und b' (für die rot-grünen und blau-gelben Anteile in der jeweiligen Farbe) im Farbraum CAM02-UCS und mit den CIE-1964-10°-Norm-farbwertfunktion, woraus man den Wert der Farbdifferenzmetrik, den Farbwiedergabeindex R_f und den Farbgamutindex R_g berechnen kann:

$$R_f = 100 - 7,54 \cdot \Delta E$$

$$R_g = 100 \cdot A(\text{Testlicht}) / A(\text{Referenzlicht})$$

ΔE bedeutet den mittleren Farbabstand zwischen Test- und Referenzlichtquelle für diese 99 Farben im CIECAM02-UCS.

Die verwendeten Symbole haben die folgende Bedeutung:

A(Testlicht): Fläche des durch die Farben aufgespannten Polygonzuges im Fall der Testlichtquelle,

A(Referenzlicht): Fläche des durch die Farben aufgespannten Polygonzuges im Fall der Referenzlichtquelle

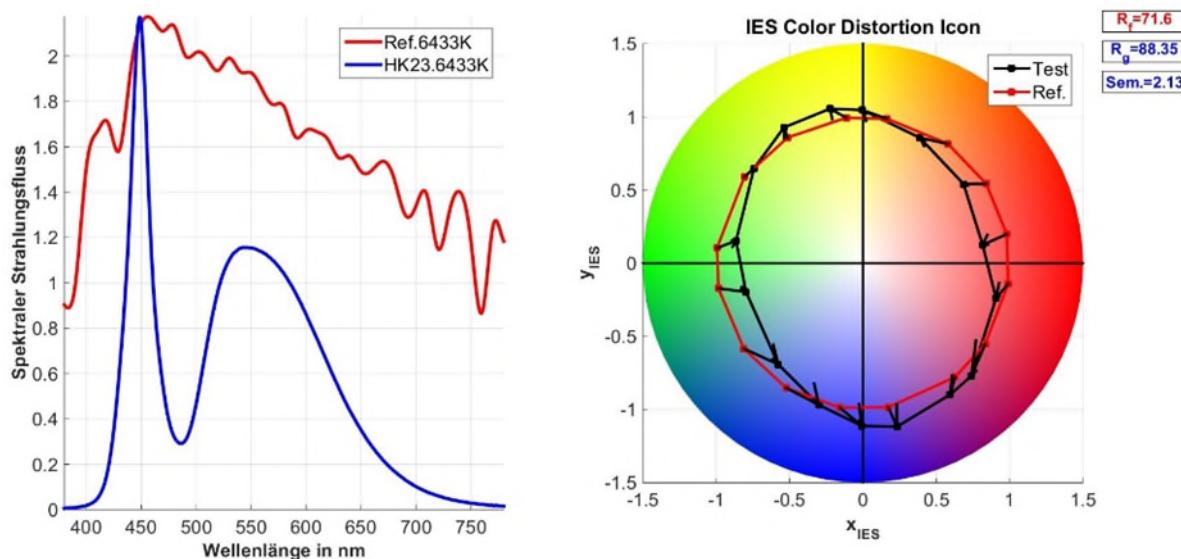
Im Prinzip haben die beiden Farbwiedergabeindizes R_a (CIE 1965, CIE 1995) und R_f (IES, 2015) die gleiche Struktur und verfolgen die gleiche Philosophie. Der R_f -Wert kann also auch nicht größer als 100 sein. Der neue Farbwiedergabeindex R_f mit den 99 Farben, die in einem gleichabständigen Farbraum angeordnet sind, hat das Potential, den bisherigen Farbwiedergabeindex R_a der CIE 1995 abzulösen. Weitere Analysen folgen im nächsten Abschnitt. Der Farbgamut-Index R_g wurde durch IES in der Absicht definiert, die Sättigung einer Testlichtquelle gegenüber der Referenzlichtquelle der gleichen ähnlichen Farbtemperatur zu beschreiben. Auf den ersten Blick wäre R_g die richtige Metrik für den beschriebenen Zweck, denn er kann größer als 100 sein, da die Flächen der durch die Farben aufgespannten Polygonzüge der Testlichtquellen mit größerem Farbgamut größer als die entsprechenden Flächen der Referenzlichtquellen sein können. Es ist möglich, R_g -Werte bis 140-150 zu bekommen. Das heißt, dass es Lichtquellen mit 50 % mehr Farbgamut als die Referenzlichtquelle gibt.

Betrachtet man aber die Abbildung 25(rechts), sind die Flächen innerhalb des Polygonzugs der Testlichtquelle und der Referenzlichtquelle sicherlich unterschiedlich und führen zahlenmäßig zu unterschiedlichen Farbgamut-Werten. Falls aber der Lichtanwender im roten Objektbereich (z. B. in der Metzgerei) oder im grünen Bereich (z. B. grüne Pflanzen) mit der Testlichtquelle beleuchten möchte, hat er dort einen kleineren Farbgamut (was in den meisten Fällen nicht erwünscht ist). Wenn er aber die Objekte im gelben oder violetten Bereich (eine gelbe Banane, eine violette Pflaume), hat er ein größeres Farbvolumen mit der Testlichtquelle als mit der Referenzlichtquelle im Beispiel der Abbildung 25.

Der Wert R_g sagt somit nichts über die Form des Farbvolumens bzw. der Farbfläche aus und ist somit nicht geeignet, die Sättigung in einem spezifischen Buntonbereich zu charakterisieren. Da der Farbgamutindex R_g in unterschiedlichen visuellen Experimenten seit 2015 bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht mit den visuellen Beurteilungen der Testpersonen bezüglich der Farbpräferenz und Natürlichkeit korreliert, bemüht sich die internationale Farbforschung derzeit, andere Sättigungsparameter zu definieren und experimentell nachzuweisen.

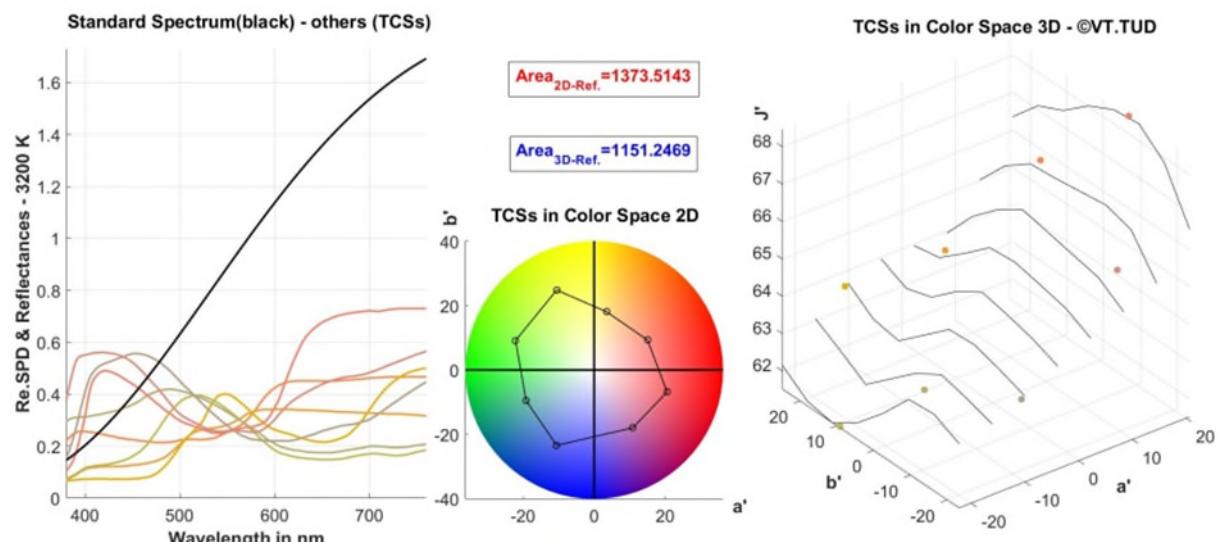
In der Abbildung 26 (links) sind die spektralen Reflexionsgrade der acht Testfarben für die Farbwiedergabedefinition R_a der CIE 1995 dargestellt. Solche Kurvenverläufe sind kontinuierlich von 380 nm bis 780 nm (die Testfarben sind daher entsättigt) und können somit die Schwächen von diskontinuierlichen Lampenspektren nicht aufdecken. Außerdem sind die relativen Helligkeiten J' dieser 8 Farben auf acht unterschiedlichen Helligkeitsniveaus um $J'=62-68$ und repräsentieren nur die Farben im mittelhellen Bereich.

Abbildung 25: Farbgamut und Anordnung von 99 IES-Farben für eine Tageslichtphase und eine kaltweiße LED



Quelle: Technische Universität Darmstadt

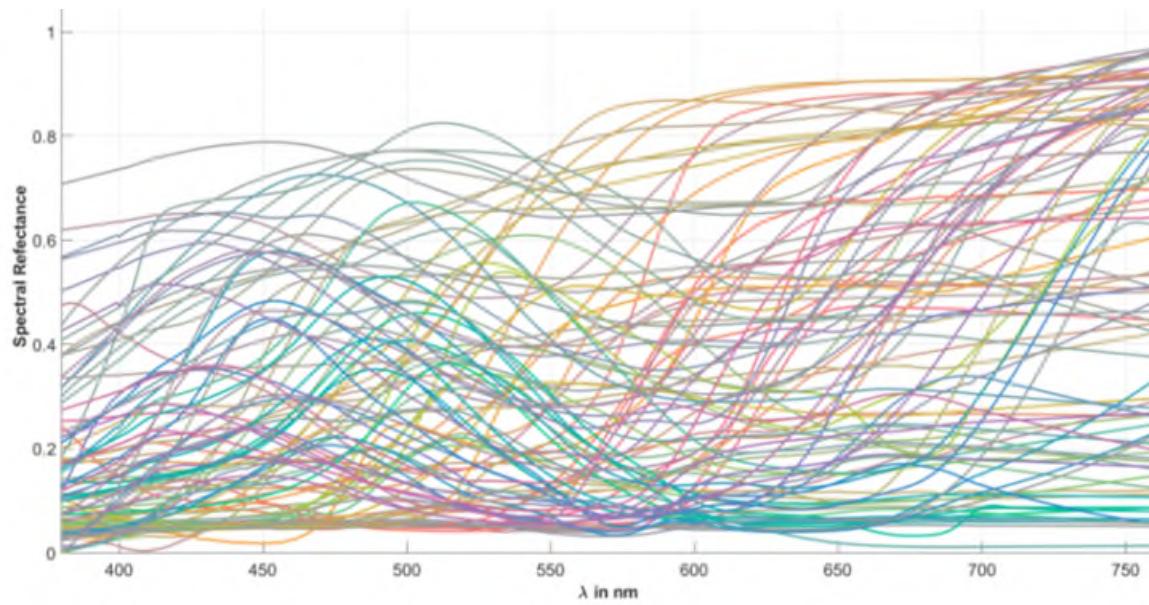
Abbildung 26: Spektrale Reflexionsgrade und Farbortverteilung der acht CIE-Farben (CRI-CIE, 1995) bei der Beleuchtung mit einem thermischen Strahler von 3200 K.



Die Linien im rechten 3D-Diagramm veranschaulichen eine an die acht Punkte (acht CIE-Farben) angepasste Fläche. Quelle: Technische Universität Darmstadt

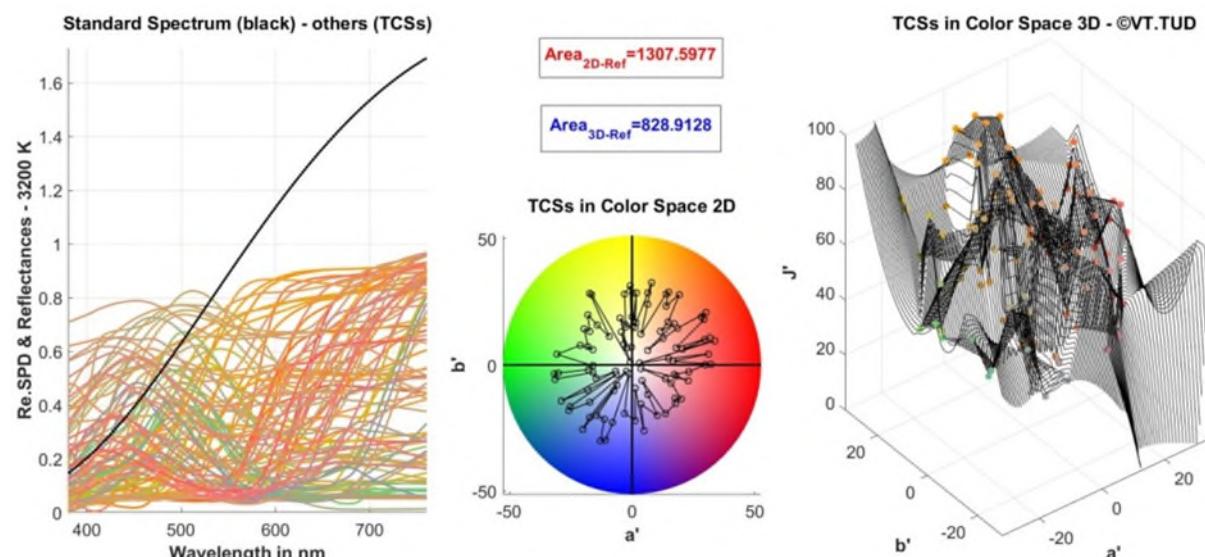
In der Abbildung 27 sind die spektralen Strahldichtekoeffizienten der 99 IES-Farben dargestellt. Man findet dort eine große Zahl an Farben mit niedriger Reflexion bis 550 nm und mit hoher Reflexion über 550 nm. Das sind gesättigte gelbe, orange und rote Objektfarben. Ebenfalls sind sehr viele Farben mit hoher Reflexion im Bereich zwischen 500 nm und 570 nm (cyane, grüne und grün-gelbe Objektfarben). Alle diese Farben verteilen sich relativ gleichmäßig über den Bunttonkreis (mittleres Diagramm der Abbildung 28) und entlang der Helligkeitsachse j' zwischen 20 und 85 (s. das rechte Diagramm der Abbildung 28). Dunkle und helle Farben sind somit präsent. Eine Farbwiedergabeberechnung mit diesen 99 Farben liefert somit zuverlässigere Farbwiedergabewerte bei diskontinuierlichen Lampenspektren (z. B. bei RGB-LED-Mischungen).

Abbildung 27: Spektrale Reflexionsgrade der 99 IES Farben (IES, TM30-15, 2015)



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Abbildung 28: Spektrale Reflexionsgrade und Farbortverteilung der 99 IES-Farben bei der Beleuchtung mit einem thermischen Strahler von 3200 K.



Die Farborte der 99 IES-Farben unter dieser Lichtquelle sind in der Mitte in einem zweidimensionalen, rechts in einem dreidimensionalen Diagramm gezeigt. Quelle: Technische Universität Darmstadt

4.4.6 SBI

Der SBI-Index (Jungnitsch et al. [49]) basiert auf der subjektiven Bewertung des simultanen Vergleiches der Farberscheinung der Testobjekte unter den Test- und Referenzlichtquellen. Da er auf den subjektiven Antworten von Probanden basiert, ist der SBI keine numerische Farbqualitätsmetrik. Die Faktoren, mit welchen jede Farbprobenbewertung in die Auswertung ein geht, sind Helligkeit (H), Sättigung (S), Temperatur (T), Empfindung (E) und Farbverschiebung (FV). Für diese Auswertung wurde der sog. subjektive Bewertungsindex *SBI* wie folgt definiert:

$$SBI = \frac{1}{n_c} \sum_c A$$

Bei der Berechnung ist n_c die Anzahl der bewerteten Farbproben c . Die einzelnen Berechnungsschritte sind nachfolgend aufgezeigt:

$$A = 100 \times \frac{1}{5} \sum x_i \quad i = H, S, T, E, FV$$

$$x_i = 1 - \frac{|s_0 - s|}{|s_0 - s_{max}|} \quad \text{für } i = \text{Helligkeit (H), Sättigung (S), Temperatur (T), Empfindung (E)}$$

$$x_i = 1 - \frac{|\vec{s}|}{|\vec{s}_{max}|} \quad \text{für } i = \text{Farbverschiebungsvektor (FV)}$$

s = Median der subjektiven Bewertungen

s_0 = Wert für „kein Unterschied zwischen Test und Referenz“

s_{max} = Maximalwert der Bewertungsskala

Der Maximalwert, den der SBI annehmen kann, beträgt 100. Dieser Wert ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass zwischen Test- und Referenzspektrum keine wahrnehmbaren Farbunterschiede bestehen. Je geringer der SBI wird, umso größer sind die wahrgenommenen Unterschiede.

4.4.7 Zusammenfassung der vorgestellten neuen Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex

Tabelle 6 fasst die oben vorgestellten neuen Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex zusammen.

Tabelle 6: Farbqualitätsindizes im Vergleich zum CIE-Farbwiedergabeindex. Vorteile, Nachteile

| Methode | Beschreibung | Vorteile | Nachteile |
|---------------------------|--|---|--|
| R_{1-14} | Mittelwert der 14 speziellen Farbwiedergabeindizes (R_1-R_{14}) | Die Wechselwirkung des Emissionsspektrums mit den spektralen Reflexionseigenschaften der Objekte kann besser beschrieben werden. Mehr Farben sind berücksichtigt, auch gesättigte Farben. | |
| $CQS Q_a$ | Kombinierter Farbwiedergabe- und Präferenzindex | Berücksichtigt die Farbpräferenz | Verfälscht die objektive Bewertung der Farbwiedergabe. |
| $CQS Q_f$ | Farbwiedergabeindex | Visuell gleichabständiger Farbraum (CIELAB) | Es gibt visuell gleichabständigere Farbräume als CIELAB, z. B. CAM02UCS. |
| $CQS Q_p$ | Kombinierter Farbwiedergabe- und -präferenzindex | Korreliert mit visuellen Ergebnissen der Farbpräferenz besser als Q_a | Die 15 Testfarben stellen die wahren Objektfarben nur begrenzt dar. |
| $CQS Q_g$ | Farbgamut-Index | Beschreibt die Lebhaftigkeit | |
| CRI-CAM02UCS | Echter Farbwiedergabeindex | Basiert auf einem erprobten gleichabständigen, adaptionsfähigen Farbraum (CIE-CAM02-UCS) | |
| RCRI | Auf einer Ordinalskala basierender Index | Visuell gleichabständiger CIE-CAM02-UCS Farbenraum. Semantische Ratings zur einfachen Deutung für Nicht-experten | Validierung durch unabhängige visuelle Experimente steht noch aus. |
| S_a | Gedächtnisfarben-Wiedergabeindex | Korreliert sehr gut mit der Farbpräferenzeigenschaft | Kein echter Farbwiedergabeindex |
| IES TM30-15 R_f , R_g | Moderne Farbqualitätsmetriken nach IES (2015, TM30-15) und nach CIE 2017; s. 4.4.6 | Moderner Farbraum, repräsentative Sammlung von Farbmustern | Diese Indizes befinden sich noch nicht in den Normen; sie müssen noch validiert werden. |
| SBI | Basiert auf einer subjektiven Bewertung | Eine Anzahl von subjektiven Bewertungen fließt ein: Helligkeit (H), Sättigung (S), Temperatur (T), Empfindung (E) und Farbverschiebung (FV) | Keine numerische Farbqualitätsmetrik, weil er immer auf den subjektiven Antworten der Probanden basiert. |

Die Farbqualitätsindizes in der Tabelle 6 stellen neue Lösungsansätze für die Defizite des CIE-Farbwiedergabeindex dar. Diese Ansätze sollen noch in visuellen Versuchen validiert werden. Zwei vielversprechende Metriken (R_f und R_g), die z. Z. ebenfalls noch experimentelle Validierung benötigen, werden im Abschnitt 4.4.6 vorgestellt. In der Zukunft könnten letztere Metriken (R_f und R_g) – eventuell in Kombination – zur allgemeinen Beschreibung der Farbqualität verwendet werden. Der kombinierte Farbwiedergabe- und Präferenzindex CQS Q_p ist auch eine alternative vielversprechende Metrik, die mit den visuellen Bewertungen der Farbpräferenz gut korreliert.

4.5 Literatur zu Abschnitt 4

- [1] Khanh TQ, Grechana N, Über Untersuchungen der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen auf der Basis der Farbdifferenz-Evaluierung, *Licht* 7-8/2007, pp. 554-559, 2007.
- [2] Commission Internationale de l’Éclairage, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, Publ. CIE 13.3-1995, 1995.
- [3] Commission Internationale de l’Éclairage, International Lighting Vocabulary (a joint CIE/IEC Publication), Publ. CIE 17.4-1987, 1987.
- [4] Commission Internationale de l’Éclairage, Colour rendering of white LED light sources, Publ. CIE 177:2007, 2007.
- [5] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Compte Rendue de 11 Session, Paris, 1948.
- [6] Barnes BT, Band system for appraisal of color rendition, *J. Opt. Soc. Am.* 47/12, pp. 1124-1129, 1957.
- [7] Crawford BH, Measurement of color rendering tolerances, *J. Opt. Soc. Am.* 49/12, pp. 1147-1156, 1959.
- [8] Crawford BH, Colour-rendering tolerances and the colour-rendering properties of light sources, *Trans. Illum. Eng. Soc.* 28/2, pp. 50-64, 1963.
- [9] Ouweltjes JL, The specification of colour rendering properties of fluorescent lamps, *Farbe* 9/4-6, pp. 207-246, 1960.
- [10] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Compte Rendue de 13 Session, Vol. 3. p. 41, Zurich, 1955.
- [11] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Compte Rendue de 14 Session, Vol. A, p. 111, Bruxelles, 1959.
- [12] Helson H, Judd DB, Wilson M, Color rendition with fluorescent sources of illumination, *Illum. Eng.*, 51/4, pp. 329-346, 1956.
- [13] Nickerson D, Measurement and specification of color rendition properties of light sources, *Illum. Eng.* 53, pp. 77-90, 1958.
- [14] Nickerson D, Light sources and color rendering, *J. Opt. Soc. Am.* 50/1, pp. 57-69, 1960.
- [15] Nickerson D, Recent work on colour rendering properties of fluorescent lamps, *Farbe* 9/1-6, pp. 69-74, 1963.
- [16] Hennicke I, Zur Frage der Farbwiedergabe durch Lichtquellen und ihrer Kennzeichnung, *Farbe* 9/4-6, 1960.
- [17] Münch W, Schultz U, Bestimmung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen nach einem vereinfachten Testfarbenverfahren, *Lichttechnik* 15/5, pp. 269-274, 1963.

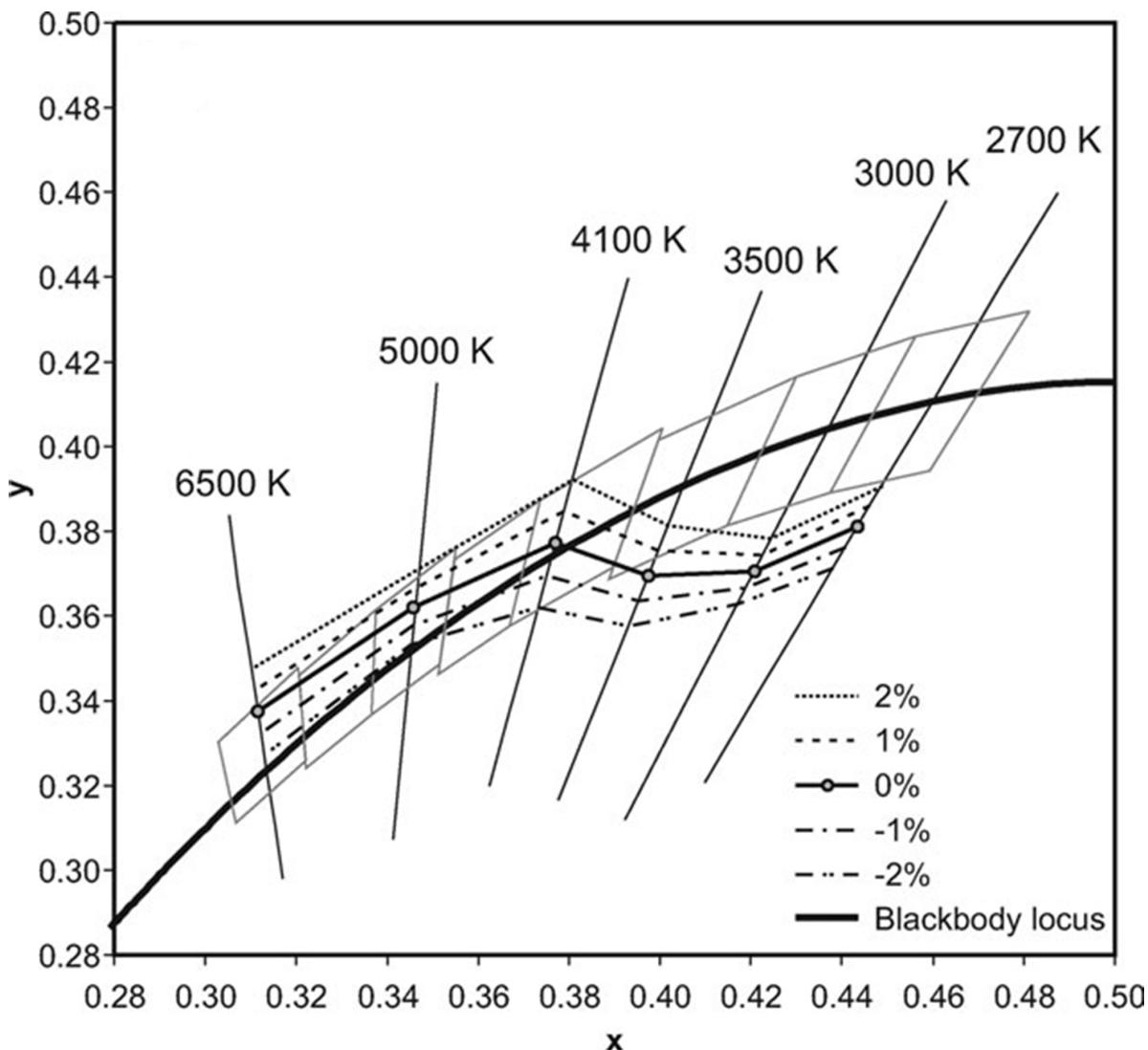
- [18] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Compte Rendu de 15. Session, Vienna, Vol. A, pp. 115-159, 1963.
- [19] Commission Internationale de l’Éclairage, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE Publication 13 (E-1.3.2), 1st ed., 1965.
- [20] Commission Internationale de l’Éclairage, Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources, CIE 13.2-1988, 1988.
- [21] Münch W, Schultz U, Zur Berücksichtigung der Farbumstimmung in der Bewertung der Farbwiedergabe, *Farbe* 19/1-6, pp. 130-134, 1970.
- [22] Judd DB, Standard response functions for protanopic and deutanopic vision, *J. Opt. Soc. Am.* 35/3, pp. 199-220, 1945.
- [23] Bodrogi P, Csuti P, Horváth P, Schanda J, Why does the CIE Colour Rendering Index fail for white RGB LED light sources?. Proc. CIE Expert Symposium on LED Light Sources: Physical Measurement and Visual and Photobiological Assessment, Tokyo, 2004.
- [24] Borbély Á, Sámon Á, Schanda J, The Concept of Correlated Colour Temperature Revisited, *Color Res. Appl.* 26, pp. 450-457, 2001.
- [25] Fedutina M, Durchführung und Auswertung von Farbdiskriminierungsexperimenten auf einem Flüssigkristallbildschirm, Master Thesis, Betreuer: Philipp Urban, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 2010.
- [26] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Dimensions of light source colour quality, CGIV 2010, 5th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, Joensuu, 14-17 June 2010.
- [27] Rea MS, Freyssinier JP, Color Rendering: Beyond Pride and Prejudice, *Color Res. Appl.* 35/6, pp. 401–409, 2010.
- [28] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Pub. 135: CIE Collection 1999: Vision and Colour, Physical Measurement of Light and Radiation, 135/2: Colour rendering, closing remarks, 1999.
- [29] Commission Internationale de l’Éclairage, CIE Pub. 109-1994, A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations, 1994.
- [30] Davis W, Ohno Y, Color quality scale, *Optical Engineering* 49/3, 033602, 2010.
- [31] Schanda J, A combined colour preference – colour rendering index, *Lighting Res. Technol.* 17, pp. 31-34, 1985.
- [32] Jungnitsch K, Bieske K, Vandahl C, Untersuchungen zur Farbwiedergabe in Abhängigkeit vom Lampenspektrum, Tagung Licht 2008, 10.-13. September 2008 Ilmenau, Tagungsband pp. 289-296, 2008.
- [33] Li Ch, Luo MR, Li Ch, Cui G, The CRI-CAM02UCS Colour Rendering Index, *Color Res. Appl.* Early View, 2011.
- [34] Luo MR, Cui G, Li Ch, Uniform Colour Spaces Based on CIECAM02 Colour Appearance Model, *Color Res. Appl.* 31, pp. 320-330, 2006.
- [35] Commission Internationale de l’Éclairage, A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02, Pub. CIE 159:2004, 2004.
- [36] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Ordinal scale based description of colour rendering, *Color Res. Appl.*, Early View, 2010.
- [37] Smet K, Ryckaert WR, Pointer MR, Deconinck G, Hanselaer P, Color appearance rating of familiar real objects, *Color Res. Appl.* 36/3, pp. 192–200, 2011.

- [38] Jost-Boissard S, Fontoynont M, Blanc-Gonnet J, Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables, *J. Modern Optics* 56/13, pp. 1420–1432, 2009.
- [39] Boissard S, Fontoynont M, Optimization of LED-based Light Blendings for Object Presentation, *Color Res. Appl.* 34, pp. 310-320, 2009.
- [40] Rea MS, Freyssinier-Nova JP, Color Rendering: A Tale of Two Metrics, *Color Res. Appl.* 33, pp. 192-202, 2008.
- [41] Mahler E, Ezrati JJ, Viénot F, Testing LED Lighting for Colour Discrimination and Colour Rendering, *Color Res. Appl.* 34, pp. 8-17, 2009.
- [42] Nakano Y, Tahara H, Suehara K, Kohda J, Yano T, Application of multispectral camera to color rendering simulator, Proc. AIC Colour ,05, pp. 1625-1628, 2005.
- [43] Sándor N, Schanda J, Visual colour rendering based on colour difference evaluations, *Lighting Res. Technol.* 38/3, pp. 225-239, 2006.
- [44] Podobedov V, Ohno Y, Miller C, Davis W, Colorimetric control and calibration of NIST spectrally tunable lighting facility, CIE 2010 Conference on Lighting Quality & Energy Efficiency, Wien, 14 – 17 März 2010.
- [45] Davis W, Ohno Y, Development of a Color Quality Scale (CQS), Proc., Sixth International Lighting Research Symposium on Light and Color, Orlando, FL, February 2006.
- [46] Kuehni RG, Color Difference Formulas: An Unsatisfactory State of Affairs, *Color Res. Appl.* 33, pp. 324-326, 2008.
- [47] Bodrogi P, Brückner S, Khanh TQ, Effect of inter-observer variability of colour vision on the colour quality of modern light sources, Lux Europa 2009, Istanbul, 2009.
- [48] W. Davis and Y. Ohno, The Color Quality Scale, *Optical Engineering* 49/3, 033602, 2010.
- [49] K. Jungnitsch, C. Vandahl, D. Gall, H. Krömker, "Subjektive Bewertung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lampen mit unterschiedlichen Spektren", Diplomarbeit, TU Ilmenau, 2005

5 Weißtonqualität der Beleuchtungsprodukte

Hochqualitative Weißtöne (oder Weißpunkte) ermöglichen den Betrachtern, die Farbkonstanz und die vollständige chromatische Adaptation bei der Anschauung von farblichen Szenen zu bewerkstelligen. Nach der jüngsten Untersuchung von M. Rea et al. (Quelle: s. Abb. 29) liegen diese hochqualitativen (d. h. visuell wirklich weiß wirkenden) Weißpunkte für den Farbtemperaturbereich bis etwa 4000 K unterhalb dem Planckschen Kurvenzug (s. Abbildung 29). Die Szenen mit farbigen Objekten, die mit Lichtquellen mit einem Farbort leicht unterhalb dem Planckschen Kurvenzug (bis $\Delta u'v' = 0,0054$) beleuchtet werden, werden als attraktiv bezeichnet. Die Weißtöne dieser Lichtarten ermöglichen eine Buntheitssteigerung der Objekte im rötlichen Bereich. Obwohl die Forschung in diesem Kontext noch nicht abgeschlossen ist, wird das Ergebnis bereits in den letzten Jahren ins Beleuchtungskonzept zahlreicher LED-Leuchtenhersteller für die Warenbeleuchtung (sog. *retail lighting*) umgesetzt.

Abbildung 29: Farbkoordinaten der im Experiment von M. Rea et al. empfundenen Weißpunkte.



Bildquelle: M. S. Rea, J. P. Freyssinier, White Lighting, Color Res. Appl. 38/2, pp. 82–92, 2013; reproduziert mit Erlaubnis der Zeitschrift Color Res. Appl.

Die Wiedergabe des Weißtones des Beleuchtungsproduktes wird (wie es später in Abschnitt 9 erläutert wird) in den neuen Bewertungsansatz nicht mit einbezogen. Der Grund dafür besteht darin, dass der Weißton von Anfang an dem Beleuchtungszweck entsprechend vom Hersteller wahrnehmungsgemäß richtig (d. h. im Bereich der wahrnehmungsgemäß annehmbaren Weißtöne) festgelegt wird und, wie es Abschnitt 7.4 erläutert, keine signifikante Auswirkung auf die Stromeffizienz hat.

Ein weiterer wichtiger Aspekt besteht darin, dass das Spektrum der Lichtquelle von den Oberflächen von weißen bzw. grauen Objekten reflektiert wird, wobei die Reflexionseigenschaften dieser Objekte ebenfalls berücksichtigt werden sollen, was mit verschiedenen, in der Literatur bekannten, sog. Weißgradformeln beschrieben werden kann.

5.1 Literatur zu Abschnitt 5

- 5.1 Yoon Ji Cho, Li-Chen Ou, Guihua Cui, Ronnier Luo, New colour appearance scales for describing saturation, vividness, blackness, and whiteness, *Color Res. Appl.*, First published: 19 April 2017,
<https://doi.org/10.1002/col.22114>

6 Circadiane Wirkung der Beleuchtungsprodukte

6.1 Einführung

Für die Bewertung der Beleuchtungsprodukte (Leuchten, Lampen, Leuchtmittel) sind sowohl die Mechanismen der Licht- und Farbwahrnehmung als auch die Mechanismen der „nicht-visuellen Signalverarbeitung und des Biorhythmus relevant [1]. Die beiden Aspekte müssen immer gleichzeitig in Betracht gezogen werden. Die sog. circadiane Wirkung charakterisiert den Effekt der elektromagnetischen Strahlung, die das menschliche Auge erreicht, auf die sog. „circadiane Uhr“ des menschlichen Organismus. Die circadiane Uhr organisiert die zeitliche Koordination der menschlichen biologischen Funktionen im Tagesverlauf (sog. circadianer Rhythmus) [2]. Die Organfunktionen des Menschen verlaufen in dieser circadianen Rhythmisik. Die Leistungsfähigkeit des Menschen im Lauf des Tages ergibt sich über die verschiedenen Maxima und Minima der einzelnen biochemisch kontrollierten Funktionen [3]. Wird dementsprechend in einem bestimmten Zeitintervall im Tagesverlauf die Ausschüttung des Schlafhormons Melatonin durch Licht unterdrückt, steigt die Leistungsfähigkeit des Menschen.

Die Frage besteht nun darin, inwieweit die Leistung des menschlichen Benutzers der Beleuchtungsanlage durch die Änderung der örtlichen und spektralen Strahlungsverteilung der Beleuchtung gefördert werden kann. Am Tag findet nämlich – durch das vorherrschende Tageslicht – immer eine starke Melatonin-Unterdrückung statt, so dass die Beeinflussung der circadianen Uhr durch künstliches Licht i. A. nicht wirksam ist. Somit kommen tagsüber solche Beleuchtungskonzepte nur dort in Frage, wo Tageslicht fehlt und der circadiane Rhythmus durch Kunstlicht unterstützt werden muss. Tagsüber sind dementsprechend solche Beleuchtungskonzepte wichtig, die die Farbqualität, Sehleistung bzw. weitere biologische oder emotionale/psychologische Aspekte fördern.

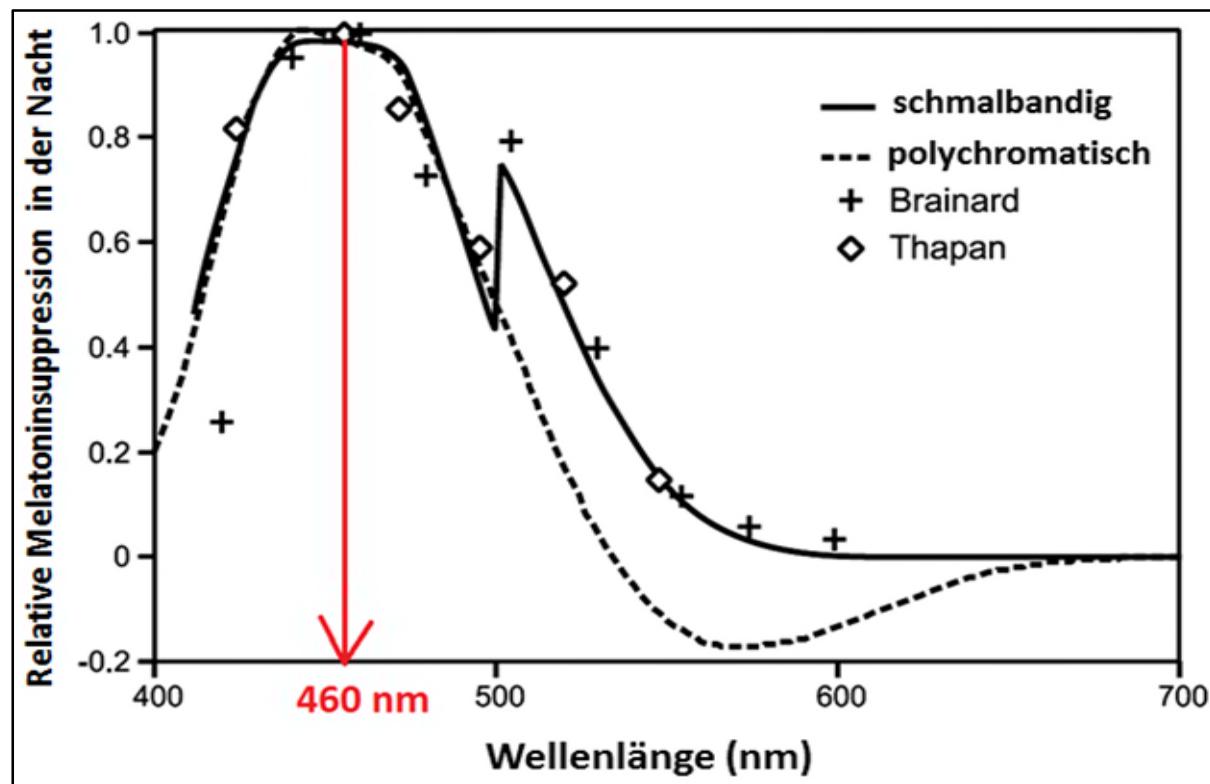
Am Abend oder während der Nacht hat das künstliche Licht einen erhöhten Effekt, wobei die Frage darin besteht, wie der circadiane Rhythmus mit Licht gefördert werden kann und wie das Emissionsspektrum von Lichtquellen, vor allem von intelligent ansteuerbaren LED-Lichtquellen mit mehreren farbigen oder weißen LED-Kanälen (sog. Multi-LEDs) nach circadianer Wirkung optimiert werden kann.

Dem Konzept der *tageslaufabhängigen Beleuchtung* entsprechend besteht das endgültige Ziel der Optimierung der Beleuchtung jedoch nicht darin, die Farbqualität zu optimieren oder mit Licht in den circadianen Rhythmus des Menschen einzugreifen, sondern die allgemeine Benutzerakzeptanz der Beleuchtungsanlage für eine bestimmte Benutzergruppe oder Anwendung zu erhöhen, was nur durch eine intelligente Kombination der beiden Aspekte (d. h. der visuellen bzw. nichtvisuellen Aspekte) möglich ist. Es existiert nämlich nur ein einziges Gehirn, das durch die komplexen Schritte der visuellen und nichtvisuellen Signalverarbeitung [4] auf das Licht der Lichtquelle mit einem bestimmten Verhalten reagiert oder die beleuchtete Szene bewusst bewertet.

Um den circadianen Effekt eines Lichtreizes zu quantifizieren, wird hier das Berechnungsverfahren des sog. Circadian Stimulus (CS) im Rea-et-al.-Modell [2] beschrieben. Die Größe CS beschreibt die Wirksamkeit eines Lichtreizes für die Melatonin-Unterdrückung in Abhängigkeit von dessen Intensität und spektraler Zusammensetzung. Die Größe CS wird hier verwendet, um die Emissionsspektren eines rechnerisch simulierten LED-Beleuchtungssystems mit mehreren LED-Kanälen (Multi-LED) nach dem circadianen Effekt und gleichzeitig auch nach dem Farbqualitätskriterium zu optimieren.

Abbildung 30 [2] illustriert experimentelle Daten aus der Literatur [5, 6, 7]: der Effekt des spektralen Strahlungsflusses einer Lichtquelle auf die nächtliche Unterdrückung des Melatonin-Niveaus wird gezeigt.

Abbildung 30: Experimentelle Daten für die Melatonin-Unterdrückung während der Nacht.



Die Versuchspersonen wurden während der Nacht mit schmalbandigem ([5], [6]) und breitbandigem [7] Licht stimuliert, dessen charakteristischer Wellenlängenbereich auf der Abszisse gezeigt wird. Die Ordinate zeigt die Reaktion der Versuchspersonen (Melatonin-Unterdrückung). Reproduziert mit Genehmigung des Journal of Circadian Rhythms [2]

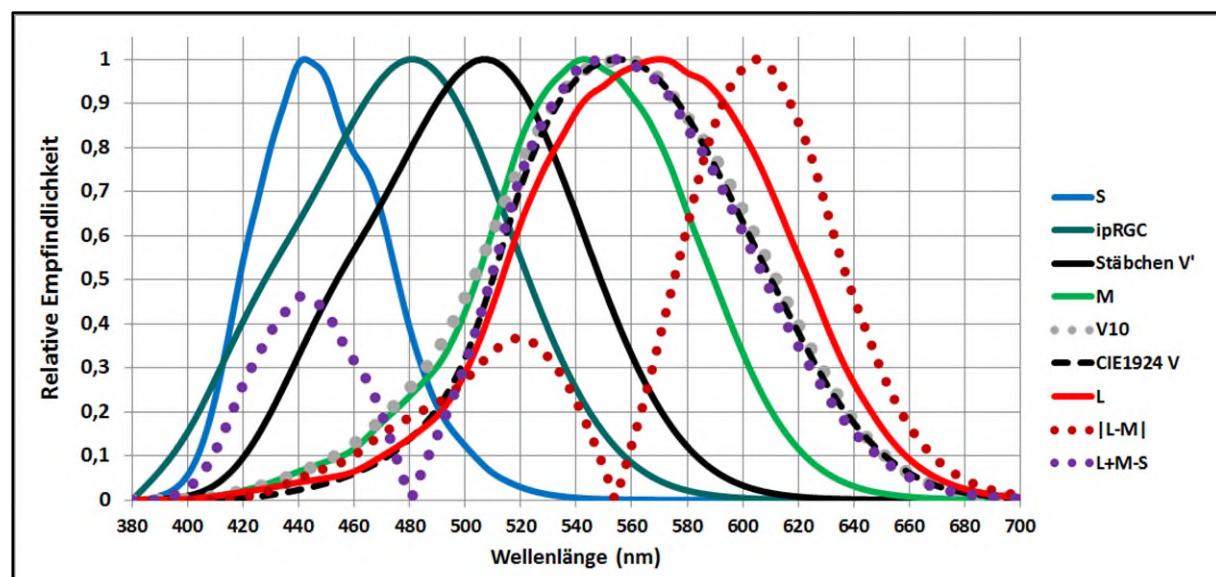
Aus Abbildung 30 geht bei schmalbandigem Licht [5, 6] der Effekt von mindestens zwei Netzhautmechanismen hervor, da zwei spektrale Maxima erscheinen [2]. Es fällt ein lokales Maximum bei ca. 505 nm bei schmalbandigen Farbreizen auf, das bei der Reaktion auf breitbandige Reize wegen eines spektral opponenten Mechanismus [1] verschwindet, s. die gestrichelte Kurve in Abbildung 30. Das absolute Maximum der Melatonin-Unterdrückung befindet sich bei 460 nm (s. den roten Pfeil in Abbildung 30) und nicht bei 480 nm, wobei 480 nm dem Maximum der spektralen Empfindlichkeit von Melanopsin entspricht.

Melanopsin ist das Photopigment der sog. intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen, der sog. ipRGCs, die selbst lichtempfindlich sind und zur Regelung der circadianen Uhr beitragen [8]

6.2 Das Rea-et-al.-Modell für die Berechnung des Circadianen Stimulus (CS)

Abbildung 31 zeigt die spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren bzw. der Netzhautmechanismen, die zur nichtvisuellen Wirkung der Melatonin-Unterdrückung über den Circadianen Stimulus CS im Rea-et-al.-Modell [2] beitragen.

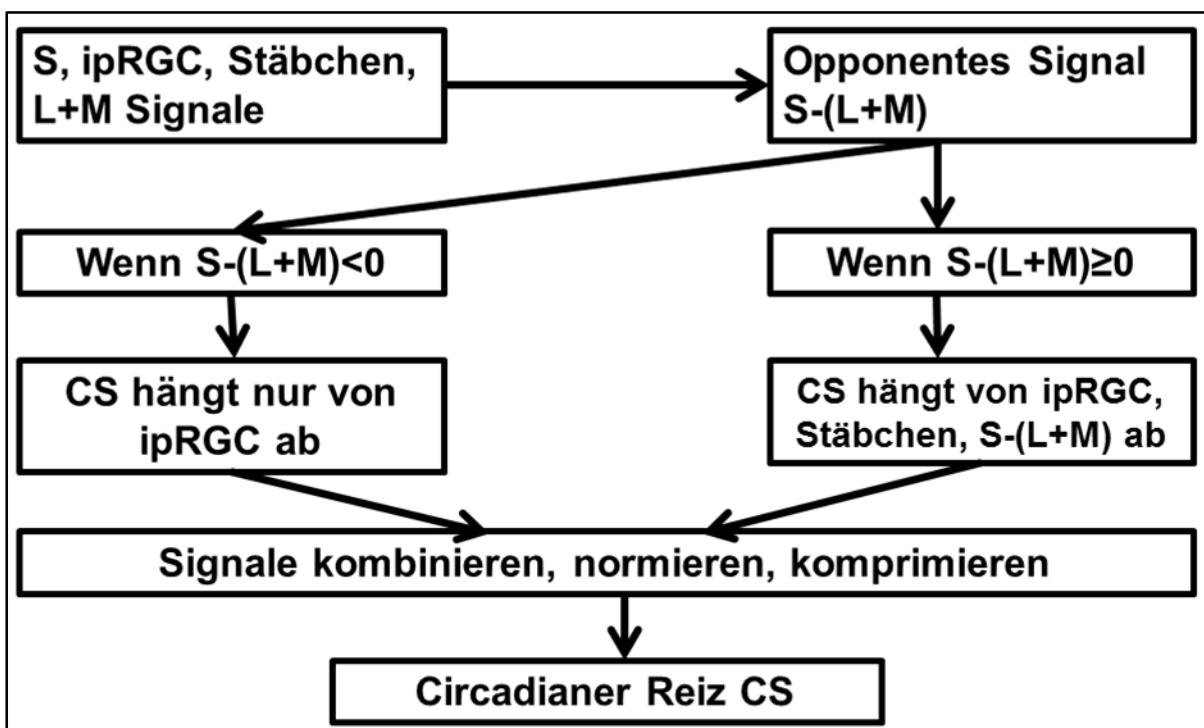
Abbildung 31: Spektrale Empfindlichkeit der Rezeptoren bzw. der Netzhautmechanismen, die zur nichtvisuellen Wirkung der Melatonin-Unterdrückung (dem sog. circadianen Reiz CS) im Rea-et-al.-Modell (außer $|L-M|$) beitragen



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Aus Abbildung 31 sind die folgenden Mechanismen ersichtlich: 1. S-Zapfen; 2. Intrinsisch photosensitive Ganglienzellen (ipRGC); 3. Stäbchen, die durch die $V'(\lambda)$ -Funktion modelliert werden; 4. der Luminanzkanal L+M, der wegen der erhöhten Ausdehnung eines circadian aktiven Lichtreizes durch die $V_{10}(\lambda)$ -Funktion [9], die für den 10°-Beobachter vorgeschlagen wurde, modelliert wird; sowie 5. die Opponenzkanäle 1-2 ($|L-M|$ bzw. $|L+M-S|$). Der Mechanismus $|L-M|$ wird nur der Vollständigkeit halber gezeigt, dieser Mechanismus wird im Rea-et-al.-Modell nicht verwendet. Abbildung 32 veranschaulicht das Berechnungsverfahren für den Circadianen Reiz (CS) im Rea-et-al.-Modell.

Abbildung 32: Berechnungsverfahren des Rea-et-al.-Modells



Eingabe: vertikale Beleuchtungsstärke am Auge und relative spektrale Strahldichte des Farbreizes, wovon die S-Stäbchen-ipRGC-, Stäbchen- und L+M-Signale berechnet werden; Ausgabe: Circadianer Stimulus (CS) oder Circadianer Reiz, der die nichtvisuelle Wirkung der Melatonin-Unterdrückung des Farbreizes modelliert. Quelle: [2]

Die in der Abbildung 32 dargestellten Berechnungsschritte werden im Folgenden ausführlich erläutert.

1. Die S-, ipRGC-, Stäbchen (V')- und (L+M)-Signale werden aus der relativen spektralen Strahldichte $L_{e,rel}(\lambda)$ des für den circadianen Effekt als verantwortlich betrachteten Farbreizes (z. B. eine große Wandfläche in einem Büro) lt. Gl. (6.1)-(6.4) mit einem absoluten Anschluss durch die Beleuchtungsstärke am Auge lt. Gl. (6.5) errechnet.

$$S = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,rel}(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (6.1)$$

$$\text{ipRGC} = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,rel}(\lambda) ipRGC(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

$$V' = k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,rel}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda \quad (6.3)$$

$$(L+M) = 0,31 k \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,rel}(\lambda) V_{10}(\lambda) d\lambda \quad (6.4)$$

$$\text{mit } k = \frac{E_v}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} L_{e,rel}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (6.5)$$

In den Integralen der Gl. (6.1)- (6.5) werden die folgenden spektralen Gewichtungsfunktionen verwendet: Empfindlichkeit der S-Zapfen ($S(\lambda)$), Empfindlichkeit der intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen ($ipRGC(\lambda)$), die $V'(\lambda)$ -Funktion sowie die $V_{10}(\lambda)$ -Funktion (s. Abbildung 31). Das Symbol E_v in Gl. (6.5) bedeutet die Beleuchtungsstärke am Auge des Beobachters (lx)

2. Das Signal des 2. Opponenzkanals, $S - (L+M)$, wird mit Hilfe der Gl. (6.1), (6.4) und (6.5) berechnet.
3. Wenn das Signal des 2. Opponenzkanals negativ ist, d. h. wenn $S-(L+M) < 0$, dann wird das sog. „circadiane Licht“ CL (eine Zwischengröße für die Berechnung des circadianen Reizes CS) lt. Gl. (6.6) berechnet. In diesem Fall hängt CS nur von dem ipRGC-Signal ab.

$$CL = 0,285 \text{ ipRGC} - 0,01 \text{ lx} \quad (6.6)$$

4. Wenn das Signal des 2. Opponenzkanals nicht negativ ist d. h. wenn $S-(L+M) \geq 0$, dann hängt CL (lt. Gl. 6.8) von der Wechselwirkung der ipRGC-, Stäbchen-, und $S-(L+M)$ -Signale ab. Dazu wird zunächst die Sättigung des Stäbchensignales bei höheren retinalen Beleuchtungsstärkeniveaus lt. Gl. (6.7) berücksichtigt.

$$R_{\text{gesättigt}} = 1 - e^{-(V'/6,5 \text{ lx})} \quad (\text{lx}) \quad (6.7)$$

$$CL = [(0,285 \text{ ipRGC} - 0,01) + (0,2 \{S-(L+M)\} - 0,001)] - 0,72 R_{\text{gesättigt}} \quad (6.8)$$

5. Der Wert von CL aus Gl. (6.6) oder Gl. (6.8) wird lt. Gl. (6.9) normiert.

$$CL_A = 5831 \text{ CL} \quad (6.9)$$

Der Normierungsfaktor in Gl. (6.9) entspricht dem Kriterium, dass ein Farbreiz der Farbart der CIE-Normlichtart A und einer Beleuchtungsstärke von 1000 lx am Auge einen CL_A -Wert von 1000 lx aufweisen soll.

6. Die Größe CL_A wird lt. Gl. (6.10) reskaliert (sog. Signalkompression), um die finale Größe CS (den circadianen Reiz) zu bekommen.

$$CS = 0,75 - \frac{0,75}{1 + \left(\frac{CL_A}{215,75 \text{ lx}} \right)^{0,864}} \quad (6.10)$$

6.3 Der melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} (der sichtbaren Strahlung)

Der melanopische Wirkungsfaktor a_{mel} (der sichtbaren Strahlung) wird nach DIN SPEC 5031-100 [15] als das „Verhältnis der melanopisch wirksamen Strahlungsgröße zu der mit der Empfindlichkeit für Tagessehen bewerteten photometrisch wirksamen Strahlungsgröße“ definiert, s. Gl. (6.11). Dabei wird der relative Strahlungsfluss mit der sog. $S_{\text{mel}}(\lambda)$ -Funktion [15] (nach Lucas et al. [16]) gewichtet und dann im sichtbaren Wellenlängenbereich integriert. Das Ergebnis wird noch durch das sog. V -Signal des relativen Spektrums (s. den Nenner in Gl. (6.11)) dividiert.

$$a_{\text{mel, v}} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_u} X_\lambda(\lambda) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_u} X_\lambda(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6.11)$$

6.4 Zusammenfassung

Die Berücksichtigung der circadianen Wirkung der Beleuchtungsprodukte ist sehr wichtig, um deren entspannende oder aktivierende Wirkung zu beschreiben. Wenn die circadiane Wirkung berücksichtigt wird, dann kann das Wohlbefinden, die Zufriedenheit und die Arbeitsleistung der Benutzer gesteigert werden. Für die numerische Beschreibung der circadianen Wirkung wurden zwei Kenngrößen, der sog. Circadiane Reiz oder Circadianer Stimulus (CS) und der melanopische Wirkungsfaktor amel eingeführt. Der circadiane Reiz (CS) hat den Vorteil, dass in ihn alle relevanten Mechanismen einfließen, während der melanopische Wirkungsfaktor amel nur den ipRGC-Mechanismus berücksichtigt. Im lichttechnisch relevanten Leuchtdichtebereich korreliert der Wert von amel mit dem Wert von CS. Wegen der einfacheren und standardisierten Berechnungsmethode von amel wird in diesem Bericht mit dieser Kenngröße gearbeitet. Der Nachteil von CS besteht in dessen mathematisch komplizierten Berechnungsmethode.

6.5 Literatur zu Abschnitt 6

- [1] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Human Centric Lighting und Farbwahrnehmung (Teil 1), Licht 5, 2015.
- [2] M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough, Circadian light, Journal of Circadian Rhythms 8:2, 2010.
- [3] Licht.de (ZVEI), Wirkung des Lichts auf den Menschen, licht.wissen 19, 2010.
- [4] E. Rautkylä, M. Puolakka, L. Halonen, Alerting effects of daytime light exposure – a proposed link between light exposure and brain mechanisms”, Lighting Res. Technol. 44: 238–252, 2012.
- [5] G. C. Brainard, J. P. Hanifin, J. M. Greeson, B. Byrne, G. Glickman, E. Gerner, M. D. Rollag, Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor, J. Neurosci 21, pp. 6405-6412, 2001.
- [6] K. Thapan, J. Arendt, D. J. Skene, An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, J. Physiol. 535, pp. 261-267, 2001.
- [7] M. S. Rea, M. G. Figueiro, J. D. Bullough, A. Bierman, A model of phototransduction by the human circadian system, Brain Res. Rev. 50, pp. 213-228, 2005.
- [8] S. Hattar, H. W. Liao, M. Takao, D. M. Berson, K. W. Yau, Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity, Science 295:1065-70, 2002.
- [9] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer, CIE Publication 165:2005, 2005.

- [10] P. Bodrogi, T. Q. Khanh, Review on the spectral sensitivity of the circadian effect and circadian stimulus of artificial and natural light sources, Green Lighting Shanghai 2013, Session P202: Biological and Health Effects of Lighting, 2013.
- [11] B. Dietz, Das Klinikum am Bruderwald in Bamberg – Lichtblicke für die alters- und demenzsensible Krankenhausplanung, Licht 5/2012, pp. 20-24, 2012.
- [12] M. S. Islam, R. Dangol, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, User preferences for LED lighting in terms of light spectrum, Lighting Res. Technol. 45/6, pp. 641-665, 2013.
- [13] T. Q. Khanh, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, S. Brückner, *Farbwiedergabe von konventionellen und Halbleiter-Lichtquellen*, Pflaum Verlag, München, 2013.
- [14] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V., Market Study: Human Centric Lighting: Going Beyond Energy Efficiency, 2013.
- [15] DIN SPEC 5031-100, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik – Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen – Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren, 2015.
- [16] R. J. Lucas, S. Peirson, D. Berson, T. Brown, H. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, G. Brainard, "Measuring and using light in the melanopsin age," Trends Neurosci. 37, 1-9 (2014).

7 Der neue Bewertungsansatz: Entwicklungsschritte und Vorteile

7.1 Allgemeine Vorteile des neuen Bewertungsansatzes

In der heutigen Zeit ist die Erhöhung der Stromeffizienz sehr wichtig, weil wir sowohl in den Haushalten, als auch im Straßenverkehr und der Industrie elektrische Energie einsparen möchten. Die jetzige Bewertung (Lichtausbeute, lm/W) gewichtet – durch die $V(\lambda)$ -Funktion – den spektralen Bereich um 555 nm im Vergleich zu seinem Nutzen für den menschlichen Nutzer nach dem heutigen Kenntnisstand zu stark, so dass in diesem Wellenlängenbereich der $V(\lambda)$ -Funktion elektrische Energie verschwendet wird. Hersteller optimieren Lichtquellen nämlich mit dem Ziel einer Lichtstromerhöhung zu ungünstigen Wellenlängenbereichen abseits der Spitze der $V(\lambda)$ -Funktion.

Nach dem neuen Bewertungsansatz werden hingegen die spektralen Bereiche außerhalb des oben erwähnten Bereiches der $V(\lambda)$ -Funktion mit in die Bewertung eingezogen. Dies passiert nach einer ausführlichen Analyse des neuesten modernsten Kenntnisstandes aus der Literatur. Somit wird die elektrische Energie in den für den menschlichen Benutzer wirklich relevanten spektralen Bereichen in den richtig d. h. nach dem neuen Bewertungsansatz bewerteten bzw. optimierten Beleuchtungsprodukten in elektromagnetische Energie umgewandelt.

Weil die Spektralbereiche außerhalb der $V(\lambda)$ -Funktion in die neue Bewertung einbezogen werden, wandeln Beleuchtungsprodukte, die nach dem neuen Ansatz optimiert sind, Strom in Strahlung in allen, wirklich wichtigen Spektralbereichen um. Dies geschieht nicht durch eine Kurve, die die $V(\lambda)$ -Funktion ersetzt, sondern durch die im Abschnitt 8 geschilderte Methode. So werden z. B. durch das Einbeziehen des blauen Spektralanteiles im neuen Ansatz die Helligkeit und die Sehleistung erhöht. Es wird dadurch erhofft, dass die Anzahl der Unfälle im Straßenverkehr reduziert wird. Somit könnten auch die Kosten der Behandlungen in den Krankenhäusern herabgesetzt werden. Ebenfalls könnten Handarbeiten in Industriehallen mit weniger Fehlern durchgeführt werden.

Nichtvisuelle Effekte und die Möglichkeit der dynamischen (tageslaufabhängigen) Beleuchtung werden im neuen Ansatz ebenfalls in Betracht gezogen. Somit wird erhofft, dass mit dem neuen Bewertungsansatz Konzentration und Kreativität am Arbeitsplatz sowie die Erholungsfähigkeit zu Hause, nach der Arbeit gefördert werden kann. Dies könnte die Produktivität der investierten Arbeitsstunden erhöhen und zu einer höheren Arbeitsleistung in allen Ländern der EU führen. Zufriedenheit und Lebensqualität der Bürger (Arbeitgeber und Arbeitnehmer) könnten somit erhöht werden.

Die oben identifizierten Einzelnutzen wurden im oben geschilderten neuen Ansatz kombiniert, was zu einer neuen Einstufung der Lichtquellen ins Kennzeichnungssystem (A-G) führt. Ein großer Vorteil des neuen Bewertungsansatzes besteht darin, dass das Einbeziehen der von der TU Darmstadt als sehr wichtig identifizierten Einzelnutzen (s. Tabelle 7) unmittelbar und einfach ins allgemeine Kennzeichnungssystem einfließt. Es wurde nämlich ein Algorithmus entwickelt, der aus den bekannten lichttechnischen Eigenschaften des Beleuchtungsproduktes die Energieklassenzuordnung (A-G) automatisch durchführt.

Zusammenfassend trägt der neue Bewertungsansatz – durch die neue Methode der Einstufung der Produkte ins allgemeine Kennzeichnungssystem – gleichzeitig sowohl zur Energieeinsparung als auch zur Erhöhung des Nutzens des Lichtes für den Menschen bei, indem die Beleuchtungsprodukte nach dem neuen Ansatz – dem neuen Kenntnisstand der Wissenschaft entsprechend – nach ihrem Nutzen bewertet bzw. entworfen werden.

7.2 Vorteile der Berücksichtigung der ausgewählten Einzelnutzen im neuen Bewertungsansatz und der zur Beschreibung verwendeten Metriken

Tabelle 7 enthält die Liste der ausgewählten Einzelnutzen, die im neuen Bewertungsansatz verwendeten Metriken sowie alternative Metriken.

Tabelle 7: Liste der für den neuen Bewertungsansatz als sehr wichtig identifizierten Einzelnutzen und die zur Beschreibung verwendeten Metriken sowie alternative Metriken

| Einzelnutzen | Verwendete Metriken | Alternative (nicht verwendete) Metrik(en) |
|--------------------|---|--|
| Helligkeit | L_{aq} (Fotios)*; L_{mes} (CIE)** | L_{aq} (Berman); Lichtstrom |
| Farbqualität | CIE CRI R_a | CIE CRI R_{1-14} ; R_f , CQS Q_a , Q_p |
| Circadiane Wirkung | a_{mel} | CS |
| Sehleistung | gleich wie für die Helligkeit | gleich wie für die Helligkeit |

*für Innenräume; **für die Außenbeleuchtung

Im Folgenden werden die Produkteigenschaften, die für die Einzelnutzen in der Tabelle 7 stehen, beschrieben.

Helligkeit (Sehleistung): Der Bedarf an Elektroleistung steigt bei Lichtquellen gleicher Lichterzeugungstechnik mit der gelieferten Helligkeit (Sehleistung). Als Einzelnutzen hängt die Helligkeit nicht allein von der gesamten Strahlungsleistung ab, sondern besonders stark vom Blauanteil im relativen Spektrum des Beleuchtungsproduktes. Dieser kann mit der ähnlichsten Farbtemperatur beschrieben werden und ist je nach Lichterzeugungstechnik unterschiedlich.

Farbqualität: Die Farbqualität bleibt mit steigender Strahlungsleistung – bei Lichtquellen gleicher spektraler Strahlungsverteilung – grundsätzlich konstant.

Circadiane Wirkung: Die circadiane Wirkung bleibt mit steigender Strahlungsleistung – bei Lichtquellen gleicher Lichterzeugungstechnik – grundsätzlich konstant.). Als Einzelnutzen hängt die circadiane Wirkung nicht allein von der gesamten Strahlungsleistung ab, sondern besonders stark vom Blauanteil im relativen Spektrum des Beleuchtungsproduktes. Dieser kann mit der ähnlichsten Farbtemperatur beschrieben werden und ist je nach Lichterzeugungstechnik unterschiedlich. Ein hoher Blauanteil verursacht eine hohe circadiane Wirkung.

Aus Tabelle 7 geht hervor, dass – im neuen Bewertungsansatz – die vier Einzelnutzen Helligkeit, Farbqualität, circadiane Wirkung und Sehleistung als sehr wichtig identifiziert wurden. Der neue Ansatz bewertet nur diejenigen Eigenschaften, die aus dem relativen Spektrum des Beleuchtungsproduktes resultieren. Dabei wurde aber die Wiedergabe des Weißtones des Beleuchtungsproduktes nicht mit einbezogen, weil der Weißton von Anfang an – dem Beleuchtungszweck entsprechend – vom Hersteller festgelegt wird, und, wie in Abschnitt 7.4 erläutert wird, keine signifikante Auswirkung auf die Stromeffizienz hat. Im Folgenden wird erläutert, warum diese Einzelnutzen als sehr wichtig identifiziert wurden. Die Helligkeit ist für den Raumeindruck (Raumwahrnehmung oder Wahrnehmung der Dreidimensionalität), die Sehleistung und das Sicherheitsgefühl zuständig. Eine hohe Farbqualität ruft positive Emotionen hervor; eine niedrige Farbqualität beeinträchtigt die Annehmbarkeit des beleuchteten Raumes signifikant. Die circadiane Wirkung hängt stark mit der Schlafqualität und dem langfristigen Wohlbefinden des

Benutzers zusammen. Die Wahl dieser Einzelnutzen resultiert aus der gründlichen Studie der in diesem Bericht dargestellten Literatur sowie aus den eigenen Vorarbeiten der Verfasser.

Andere Eigenschaften wie die Lichtstromminderung, Änderung der Lichtverteilung, Lichtbündelung, Abschirmung, Lichtlenkung, Vermeidung von Blendung, Flimmern, Gesamt- oder Teilmattierung sollen ins neue Bewertungssystem nicht einfließen. Grund dafür ist, dass diese Eigenschaften nicht grundsätzlich mit der Lichtquellentechnologie des Leuchtmittels zusammenhängen, weil sie eher den Aufbau und Anordnung der Leuchten charakterisieren. Diese Eigenschaften sollen somit ergänzend geregelt und gekennzeichnet werden. Allerdings stellen die Lichtbündelung (z. B. bei Reflektor-Lampen), das Flimmern bei Lampen und die Mattierung solche Eigenschaften dar, die stark mit der Technik der (einzelnen) Lichtquellen zusammenhängen. Die Vorteile des Einbeziehens der wichtigsten vier Metriken in Tabelle 7 werden im Folgenden erläutert.

Eine größere Helligkeit führt zur höheren Sehleistung – die Sehleistung wird durch das Einbeziehen der Helligkeit automatisch berücksichtigt. Die Sehleistung bedeutet die Fähigkeit, Sehdetails (wie z. B. Buchstaben) zu identifizieren oder gefährliche Objekte (wie z. B. Hindernisse im Straßenverkehr) schnell zu detektieren. Wenn sich die Wahrnehmung der Helligkeit eines Raumes (z. B. eines Büros oder des Verkehrsraumes im nächtlichen Straßenverkehr) erhöht, erhöht sich damit – laut Literaturstudien – die Sehleistung.

Die Größe *Lichtstrom* (lm) der konventionellen Bewertung lässt die Abhängigkeit des *Helligkeitseindruckes* vom Weißton (z. B. warmweiß, neutralweiß, kaltweiß) außer Acht. So führt Kaltweiß (mit dem höheren Blauanteil) zu einer wesentlich höheren Helligkeit (und einer erhöhten Sehleistung) beim gleichen Lichtstrom als Warmweiß.

Der Einzelnutzen *Farbqualität* ist u. A. wegen der emotionalen Wirkung der Beleuchtung und der Identifikation der Farben wichtig. Er fließt nun – im Algorithmus des neuen Bewertungsansatzes – in die Einstufung der Energieeffizienz unmittelbar ein. Die jetzige Bewertung durch die Lichtausbeute (lm/W) lässt die Farbqualität, wie oben bereits erwähnt, außer Acht. Der neue Bewertungsansatz arbeitet nicht mit einem Zuschlag. Die Metrik der Farbqualität wird hier mit den Metriken der Helligkeit und der circadianen Wirkung in der Bewertungsmethode integriert.

Der Einzelnutzen *circadiane Wirkung* bedeutet die aktivierende bzw. entspannende Wirkung des Lichtes. Nach den jüngsten Ergebnissen der Literatur fließt dieses wichtige Ergebnis in den neuen Bewertungsansatz ein.

7.3 Vorteile und Nachteile der im neuen Bewertungsansatz verwendeten Kenngrößen (verwendeten und nicht verwendeten Metriken der Einzelnutzen aus Tabelle 7) im Vergleich zu anderen Metriken

Hier werden alle relevanten Bewertungsansätze aufgeführt und bewertet. Es wird ebenfalls erläutert, welche Metriken und warum im neuen Ansatz bevorzugt wurden.

Die im neuen Bewertungsansatz verwendete Metrik $L_{\text{äq}}$ (Fotios) beschreibt den Einzelnutzen Helligkeit für Innenräume. Diese Metrik dividiert das Signal der blauempfindlichen Zapfen durch das Signal der $V(\lambda)$ -Funktion: $(S/V)^{0.24}$. Der Vorteil ist, dass dadurch der Blauinhalt des Spektrums bei der Helligkeitswahrnehmung – den Ergebnissen aus der Literatur entsprechend – berücksichtigt wird. In der z. Z. üblichen Bewertung der Helligkeit mit der Lichtausbeute (lm/W) wird der Blauinhalt hingegen stark unterbewertet, weil in der Kenngröße Lichtstrom (lm) das Spektrum des Beleuchtungsproduktes mit Hilfe der $V(\lambda)$ -Funktion gewichtet wird.

Der Nachteil der $V(\lambda)$ -Funktion besteht – wie oben bereits erwähnt – darin, dass dadurch wichtige spektrale Anteile, wie der Blauanteil, außer Acht gelassen werden. Berman berücksichtigt dafür in der alternativen Formel $L_{\text{äq}}$ (Berman) die Stäbchen durch die Größe (Stäbchen/V)^{0,5}. Die Stäbchen sind aber im Bereich der Innenraumbeleuchtung i. A. nicht mehr aktiv. Für den mesopischen Bereich, wo die Stäbchen aktiv sind, und der für die Außenbeleuchtung relevant ist, wird im neuen Bewertungsansatz die Größe L_{mes} (CIE) verwendet. Diese Größe wurde in der CIE-Publikation Nr. 191 beschrieben und basiert – im Gegensatz zur Formel von Berman – auf mehreren internationalen Forschungsprojekten. Alternative mesopische Modelle, wie z. B. das Helligkeitsmodell $L_{\text{äq}}$ (Sagawa) wurden in den Versuchen der Literatur kontrovers bewertet, deswegen wird diese Größe im neuen Bewertungsansatz nicht verwendet.

Für den Einelnutzen Farbqualität wird im neuen Bewertungsansatz die Metrik CIE CRI R_a verwendet. Der neue Farbwiedergabeindex der CIE (R_f) wurde nur für wissenschaftliche Zwecke entwickelt und empfohlen, deswegen wurde er im neuen Bewertungsansatz ebenfalls nicht aufgegriffen.

Wissenschaftlich gesehen ist momentan das beste Modell für die Farbqualität der sog. Q_p -Wert der CQS-Metrik. Dieser Wert bevorzugt eine zur Farbpräferenz passende Übersättigung der Objektfarben. Der Q_p -Wert der CQS-Metrik ist leider – auch in engen Fachkreisen – nach wie vor unbekannt. Es wird eher mit der Größe CQS Q_a – die eine zu kleine Übersättigung zulässt – gearbeitet. In der Öffentlichkeit ist das gesamte CQS-Modell (NIST-USA) i. A. leider weiterhin unbekannt.

Um den Einelnutzen *circadiane Wirkung* zu beschreiben, wird im neuen Bewertungsansatz die Größe a_{mel} herangezogen. Diese Größe wird in der DIN SPEC 5031-100 beschrieben. Dadurch wird die aktivierende bzw. entspannende Wirkung des Lichtes charakterisiert, was in früheren Metriken der Lichtqualität und der Stromeffizienz bisher vollständig ignoriert wurde. Im Vergleich zur alternativen sog. CS-Metrik (Rea et al.) hat a_{mel} den Vorteil, dass a_{mel} linear skaliert wird und somit für den neuen, allgemeinen Bewertungsansatz besser geeignet ist.

Außerdem hat die CS-Metrik eine Diskontinuität in der Berechnungsmethode, was in der allgemeinen Praxis mathematische Schwierigkeiten verursachen könnte. Durch die Einführung der Größe a_{mel} im neuen Bewertungsansatz besteht nun erstmals die Möglichkeit, die *circadiane Wirkung* des Lichtes – die mit den anderen Einelnutzen integriert wurde – unmittelbar ins Kennzeichnungssystem (A-G) einführen zu lassen.

7.4 Verknüpfung zwischen den identifizierten Einelnutzen und der Verringerung der Stromeffizienz. Beschreibung der Einelnutzen, die mit einer verringerten Stromeffizienz der Beleuchtungsprodukte verbunden sind oder sein können. Beschreibung der Entwicklungsschritte: Entscheidungen über die Aufnahme der verschiedenen Einelnutzen in den neuen Bewertungsansatz

Im Folgenden wird dargestellt, welche Einelnutzen mit einer *verringerten Bewertung der Lumenausbeute der Beleuchtungsprodukte* verbunden sind oder sein können. Es geht in diesem Abschnitt also nicht um die Beschreibung des neuen Bewertungsansatzes, sondern um dessen Entwicklungsschritte. Es wird entschieden, welcher Einelnutzen und welche Metrik in den neuen Ansatz dementsprechend einfließen sollen. Es werden alle relevanten Bewertungsansätze aufgeführt und dem obigen Ziel entsprechend analysiert.

Die Einzelnutzen Helligkeit und Sehleistung hängen vom Lichtstrom ab und können somit eine verringerte Lumenausbeute der Beleuchtungsprodukte verursachen, wenn – aus einem technologischen Grund, z. B. der Ineffizienz der Leuchtstoffkonversion – der Lichtstrom herabgesetzt wird. Diese Einzelnutzen hängen ebenfalls von der ähnlichsten Farbtemperatur ab. Beleuchtungsprodukte mit einer niedrigeren ähnlichsten Farbtemperatur haben i. A. eine verringerte Lumenausbeute, somit fließen diese Einzelnutzen in den Neuen Bewertungsansatz ein. Der Grund dafür besteht darin, dass beide Einzelnutzen positiv mit der ähnlichsten Farbtemperatur korrelieren. So verursachen Beleuchtungsprodukte mit kaltweißem Licht eine höhere Helligkeit und Sehleistung, als Beleuchtungsprodukte mit warmweißem Licht. Diese Eigenschaft ist aus den folgenden relevanten Bewertungsansätzen ersichtlich:

1. In der Helligkeitsmetrik nach Fotios et al. [1] steigt der Wert der Helligkeitsmetrik mit dem steigenden Signal der blauempfindlichen Zapfen monoton. Dieses Signal korreliert wiederum positiv mit der ähnlichsten Farbtemperatur des Beleuchtungsproduktes. Dies gilt ebenfalls für die Helligkeitsmetrik der CIE [2].
2. In der Helligkeitsmetrik nach Berman [3] steigt der Wert der Helligkeitsmetrik mit dem steigenden Signal der Stäbchen (nach der $V'(\lambda)$ -Funktion) wiederum monoton. Dieses Signal korreliert abermals positiv mit der ähnlichsten Farbtemperatur des Beleuchtungsproduktes.
3. In der mesopischen Sehleistungsmetrik der CIE [4] steigt der Wert der mesopischen Leuchtdichte mit dem steigenden Signal der Stäbchen (je nach Leuchtdichteniveau der Außenbeleuchtungssituation) monoton. Dieses Signal korreliert positiv mit der ähnlichsten Farbtemperatur des Beleuchtungsproduktes.

Die Weißtonqualität hängt mit der Feinjustierung des Spektrums um einen vorderierten Weißpunkt zusammen, um das Vorhandensein von geringfügigen, störenden Bunttönen zu vermeiden, was mit der Stromeffizienz nicht zusammenhängt. Bei der Betrachtung dieses Einzelnutzens wird der absolute spektrale Strahlungsfluss des Beleuchtungsproduktes – im obigen Sinn – nur geringfügig variiert. Zur Beschreibung der Weißtonqualität wird die Größe $\Delta u'v'$ herangezogen. Wenn die ähnlichste Farbtemperatur kleiner als 5000 K ist, dann entspricht die Größe $\Delta u'v'$ dem Abstand des Weißpunktes vom Plankschen Kurvenzug im $u'-v'$ -Diagramm. Wenn die ähnlichste Farbtemperatur größer als oder gleich 5000 K ist, dann entspricht die Größe $\Delta u'v'$ dem Abstand des Weißpunktes vom Kurvenzug der Tageslichtarten im $u'-v'$ -Diagramm. Die Größe $\Delta u'v'$ befindet sich – bei den meisten gängigen Beleuchtungsprodukten der allgemeinen Innenraumbeleuchtung (wo die Weißtonqualität eine wichtige Rolle spielt) – im Bereich 0,0001 – 0,006, was keine signifikante Auswirkung auf die Stromeffizienz hat. Somit fließt dieser Einzelnutzen in den neuen Bewertungsansatz nicht ein.

Wird hingegen die Farbqualität als Einzelnutzen verändert, ergeben sich dabei bedeutende spektrale Änderungen und Lichtstromänderungen, wie z. B. das Erscheinen von einem zusätzlichen Maximum im roten Bereich, was – wegen der Ineffizienz dieser ein- oder ausgeschalteten LED-Typen – mit einer verringerten Stromeffizienz verbunden sein kann. Somit fließt dieser Einzelnutzen in den neuen Bewertungsansatz ein. Zur Beschreibung der Farbqualität wurden die folgenden Bewertungsansätze analysiert:

1. Der erste Ansatz ist der CIE-Farbwiedergabeindex CRI R_a [5]. Bekommt in dieser Methode das relative Spektrum einen höheren CRI- R_a -Wert, so wird die Lumenausbeute i. A. herabgesetzt. Mit dem gezielten spektralen Design von LED-Beleuchtungsprodukten kann aber Letzteres vermieden und somit die Stromeffizienz und der Farbwiedergabeindex gleichzeitig gesteigert werden.
2. Der arithmetische Mittelwert der 14 speziellen Farbwiedergabeindizes sowie der neue Colour Fidelity Index der CIE [5], die – alternativ zu CIE CRI R_a – ebenfalls in Betracht gezogen

- wurden, verhalten sich ähnlich: eine Herabsetzung der Stromeffizienz kann durch die bewusste Planung des Spektrums im Fall der LED-Beleuchtungsprodukte – vermieden werden.
3. Die Indizes der CQS-Methode [6] verhalten sich hinsichtlich der Stromeffizienz ähnlich, wie der CIE-Farbwiedergabeindex.

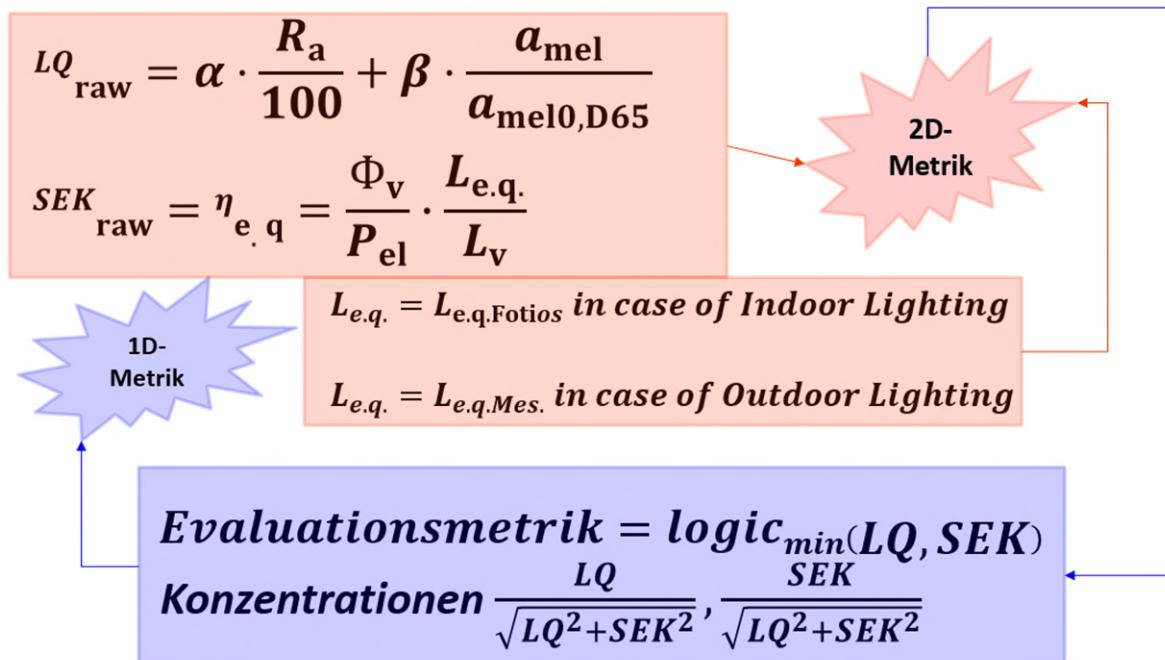
Der Einzelnutzen *circadiane Wirkung* (und die damit verbundene tageslaufabhängige Beleuchtung) erfordert eine systematische Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur zwischen Warmweiß und Kaltweiß im breiten Farbtemperaturbereich. Dadurch kann, wie oben bereits erwähnt, die Lumenausbeute – technologiebedingt – verringert werden. Somit fließt dieser Einzelnutzen in den neuen Bewertungsansatz ein. Zur Beschreibung der circadianen Wirkung wurden die Größen a_{mel} [7] sowie CS [8] herangezogen. In beiden Metriken erscheint eine Gewichtungsfunktion (die sog. Melatonin-Empfindlichkeitsfunktion) des absoluten spektralen Strahlungsflusses, die im eher bläulichen Bereich des Spektrums ihr Maximum haben (490 nm für a_{mel} und 480 nm für CS) und somit eine positive Korrelation mit der ähnlichsten Farbtemperatur aufweisen.

Die neue Kennzeichnung beschäftigt sich mit Beleuchtungsprodukten, deren Lichtverteilung von deren Anwendung in einer Beleuchtungsanlage abhängt, darum fließt der Einzelnutzen „Lichtverteilung“ in den neuen Bewertungsansatz nicht ein. Dies gilt ebenfalls für den Einzelnutzen Lichtstromminderung (Dimmung). Die Produkteigenschaft „Verteilung des Lichtes“ ist einerseits mit der erhöhten Helligkeit eines Bereiches, andererseits mir der Blendungsminderung (die wiederum die drei Teilespekte *Gesamtattierung*, *Teilmattierung* und *niedrigerer UGR-Wert* hat) verbunden. Diese Änderung der Verteilung des Lichtes (z. B. durch Lichtbündelung) führt i. A. – je nach Lampenausführung – durch den Einsatz von Reflektoren und Linsen zu Verlusten. So-wohl die Gesamt- oder Teilmattierung als auch die spiegelnden oder bündelnden Elemente verringern den von einer Lichtquelle abgegebenen Lichtstrom durch Absorption oder Teilreflexion in den optischen Komponenten.

Die Flimmerfreiheit sowie die Freiheit vom wahrgenommenen stroboskopischen Effekt sind Einzelnutzen, die visuell mit den Größen Modulationstiefe (Unterschied der maximalen und der minimalen Leuchtdichte dividiert durch deren Summe) und der benutzten PWM-Frequenz (bei LED-Beleuchtungsprodukten mit PWM-Dimmung) zusammenhängen [9] Je kleiner die Modulationstiefe und je höher die PWM-Frequenz, umso größer ist die zu erwartende visuelle Flimmerfreiheit. Die in den gängigen Beleuchtungsprodukten verwendeten PWM-Frequenzen und Modulationstiefen verursachen aber keine Änderung der Stromeffizienz. Diese hängt vom Maximalstrom stark ab, der aber bei der PWM-Dimmung (die Flimmern oder stroboskopische Effekte verursachen könnte) konstant bleibt. Somit hängt der Einzelnutzen Flimmerfreiheit – in der LED-Treibertechnik – mit der Stromeffizienz des Beleuchtungsproduktes nicht zusammen. Deswegen fließt dieser Einzelnutzen in den neuen Bewertungsansatz nicht ein.

Im Folgenden werden die wesentlichen Gedankengänge bzw. Schritte zur Entwicklung des Bewertungsansatzes zusammengefasst. Im ersten, anfänglichen Ansatz wurden zwei Bewertungsdimensionen (SEK_{raw} und LQ_{raw}) vorgeschlagen. Am 16. 6. 2017 wurde dieses 2-Komponenten-Konzept bei einem Gespräch vorgestellt. Man regte bei diesem Treffen an, einen neuen Ansatz, der nur eine einzige Komponente als Ausgangsgröße errechnet, einzuführen. Somit wurde die sog. 1D-Metrik erarbeitet und – in einem Vortrag am 3. 7. 2017 vorgestellt. Abb. 7.1 veranschaulicht den Übergang vom 2-Komponenten-Konzept (oder 2D-Metrik) zur 1D-Metrik. Aus Abbildung 33 geht hervor, dass die beiden Dimensionen der 2D-Metrik in einer einzigen Dimension (sog. Evaluationsmetrik) zusammengefasst wurden.

Abbildung 33: Entwicklung des Bewertungsansatzes: Übergang vom 2-Komponenten-Konzept (oder 2D-Metrik) zur 1D-Metrik (vorgestellt am 3. 7. 2017)



Quelle: Technische Universität Darmstadt

In dieser sog. 1D-Metrik wurde bei der Bewertung der Beleuchtungsprodukte nach den folgenden 12 Anwendungen unterschieden: Straßen (S-Klasse, M-Klasse), Büro, Bildung, Pflege, Verkauf, Industrie, Hotel, Museum, Krankenhaus, Sporthalle, Haushalt. Nach diesem Treffen am 3. Juli 2017 wurde der endgültige Bewertungsansatz (s. Abschnitt 8) – nach mehrfachen Diskussionen – den folgenden Gesichtspunkten entsprechend erarbeitet:

1. Der bisherige Lichtstrom beinhaltet weder die Farbqualität noch die circadianen Effekte und ist falsch, da der Mensch nur die Helligkeit wahrnimmt und nicht $V(\lambda)$ -gewichteten photometrischen Parameter wie Beleuchtungsstärke oder Lichtstrom.
2. Alle diese neuen Aspekte der Lichtwissenschaft in den letzten 50 Jahren wurden in den obigen 2 Ansätzen (1D-Metrik, 2D-Metrik, s. Abbildung 33) Ansätze 1 und 2 bereits integriert.
3. Diese beiden Ansätze dienten sowohl zur Grenzwertsetzung als auch zur Kennzeichnung.
4. Der 2. (sog. „1D“) Ansatz erschien allerdings mit der einzigen Komponente wissenschaftlich gesehen nachteilig (s. Abschn. 8). Es gibt nämlich 2 unabhängige Komponenten, die als mathematische Dimensionen einbezogen werden sollen.
5. Vorzugsweise werden im photopischen Bereich nur noch zwei Anwendungen deklariert, „Entspannung“ (sowohl im Büro als auch im Heimbereich) als auch „Aktivität- Funktionalität“ (sowohl auf der Arbeit als auch im Wohnbereich im Home-Office) mit unterschiedlichen a_{mel} -Gewichtungen. Es soll im mesopischen Bereich ebenfalls nur 2 Anwendungen geben: Straßenbeleuchtung mit 2 Anwendungen (S- und ME-Klassen).

7.5 Literatur zu Abschnitt 7

- [1] Fotios SA, Levermore GJ.: Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model. *Lighting Research and Technology* 1998; 30(3): 103–106.
- [2] CIE Supplementary System of Photometry, CIE Publ. 200:2011, ISBN 978 3 902842 37 4, 2011.
- [3] Berman, S.M, The Reengineering of Lighting Photometry. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 1995.
- [4] Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance, CIE 191:2010, ISBN: 978 3 901906 88 6, 2010.
- [5] CIE Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources, CIE Publication 13.3-1995. Vienna: CIE, 1995.
- [6] Davis W, Ohno Y. Colour quality scale. *Optical Engineering* 2010; 49: 033602.
- [7] DIN SPEC 5031-100:2015-08, Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings – Quantities, symbols and action spectra, Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [8] Circadian Stimulus; M. S. Rea, M. G. Figueiro, A. Bierman, J. D. Bullough, Circadian light, *Journal of Circadian Rhythms* 8:2, 2010.
- [9] D. Polin, T. Q. Khanh, Flimmern und Stroboskopische Effekte von PWM-gesteuerten Autoscheinwerfern, 48 Seiten, 2017, ISBN 978-3-927787-59-9.

8 Der neue Bewertungsansatz: Mathematische Definition

In diesem Abschnitt wird der neue Bewertungsansatz [1] mathematisch definiert. Im Abschnitt 9 wird damit ein Satz von 304 Beleuchtungsprodukten bewertet, s. Tabelle 9. Im Abschnitt 9 wird auch ein Vorschlag dargestellt für eine neue Einteilung der Energieverbrauchsklassen (A bis G) bei der Energieverbrauchskennzeichnung. Die Zuordnung der genannten Beleuchtungsprodukte zu diesen Klassen wird gezeigt.

8.1 Eingabeparameter und Ergebnis der neuen Methode

Eingabe: Relatives Spektrum (eine Auflösung von min. 1 nm ist erforderlich); Lichtstrom (lm) und elektrische Leistung (W) des zu bewertenden Beleuchtungsproduktes. Dabei soll die Elektrische Leistung der zu bewertenden Lichtquelle in Betracht gezogen werden. Außerdem soll der Wert des allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a angegeben werden.

Ergebnis: Der sog. Stromeffizienzkennwert (SEK) und eine Kategorie zwischen A und G im allgemeinen Bewertungssystem für das zu bewertende Beleuchtungsprodukt.

8.2 Mathematische Definition der Berechnungsmethode

Zuerst wird die neue Größe SEK (sog. Stromeffizienzkennwert) wie folgt berechnet:

$$SEK = \left(\frac{\Phi_v}{P_{el}} \right) \cdot \left[\frac{\alpha \cdot L_{aq}}{L_v} + \beta \cdot BioNote \right]$$

In der obigen Gleichung haben die Symbole die folgende Bedeutung:

- ▶ L_v : Leuchtdichte (cd/m²).
- ▶ Φ_v : Lichtstrom (lm)
- ▶ P_{el} : elektrische Leistung (W)
- ▶ L_{aq} :
 - L_{aq} (Fotios) dann, wenn das Produkt in der Innenraumbeleuchtung eingesetzt werden soll;
 - L_{mes} (CIE) dann, wenn das Produkt in der Außenbeleuchtung eingesetzt werden soll.

Es wird Produkte geben, die für beide Anwendungen geeignet sind. Dann wird für jede Anwendung jeweils ein Kennwert errechnet. Somit wird der Wert von L_{aq} anwendungsabhängig (d. h. für die Innenraum- bzw. Außenbeleuchtung) berechnet.

Bei der Berechnung des L_{mes} -Wertes wird – als mesopische Adaptationsleuchtdichte im CIE-Modell – entweder $L_v=3,0 \text{ cd/m}^2$ für die ME-Klassen oder $L_v=0,3 \text{ cd/m}^2$ für die S-Klassen herangezogen. Somit wird der Wert von L_{mes} anwendungsabhängig (ME- oder S-Klassen) berechnet. Es gibt Produkte, die für beide Anwendungen geeignet sind. In diesem Fall wird für jede Anwendung jeweils ein Kennwert errechnet.

α : Dynamikfaktor:

$\alpha=1,00$: wenn keine dynamische Beleuchtung vorhanden ist (laut Behauptung des Anbieters);

$\alpha=1,15$: wenn dynamische Beleuchtung vorhanden ist (laut Behauptung des Anbieters) und mindestens 1 brauchbarer Satz von Messdaten (relatives Spektrum, Lichtstrom, elektrische Leistung) des Beleuchtungsproduktes im Bereich von $T_{cp}=5500 \text{ K} - 6500 \text{ K}$ vorhanden ist; und

$\alpha=1,05$: wenn dynamische Beleuchtung vorhanden ist, aber kein Datensatz im Bereich von $T_{cp}=5500 \text{ K} - 6500 \text{ K}$ vorhanden ist.

Somit wird der Wert von α anwendungsabhängig (d.h. mit oder ohne Dynamik) berechnet.

β : Entscheidungsfaktor für die Berücksichtigung des circadianen Effektes

$\beta=1,00$ für Innenraumbeleuchtung (der neue Ansatz rechnet mit dem circadianen Effekt) und

$\beta=0,00$ für Außenbeleuchtung (der neue Ansatz rechnet nicht mit dem circadianen Effekt).

Somit wird der Wert von β anwendungsabhängig (Innenraum- bzw. Außenbeleuchtung) berechnet. Es gibt Produkte, die für beide Anwendungen geeignet sind. In diesem Fall wird für jede Anwendung jeweils ein Kennwert errechnet.

BioNote:

Diese Größe beschreibt die circadiane Wirkung des Beleuchtungsproduktes; aktivierend, wenn $T_{cp} \geq 3800 \text{ K}$; oder entspannend wenn $T_{cp} \leq 3200 \text{ K}$; oder eine Mischung d. h. weder deutlich aktivierend noch deutlich entspannend, wenn $3200 \text{ K} < T_{cp} < 3800 \text{ K}$. Somit wird der Wert der *BioNote* anwendungsabhängig (aktivierend oder entspannend) berechnet. Es gibt Produkte, bei denen unterschiedliche Farbtemperaturen eingestellt werden können. In diesem Fall wird für jede mögliche Einstellung jeweils ein Kennwert errechnet.

$$BioNote_{aktiviert} = 0,1 \left(\frac{a_{mel}}{a_{mel,0}} - 1 \right):$$

stärker aktivierende Lichtquellen bekommen somit eine bessere Bewertung im Bereich $T_{cp} \geq 3800 \text{ K}$ (in Richtung Neutralweiß - Kaltweiß);

$$BioNote_{entspannen\ d} = 0,1 \left(\frac{a_{mel,0}}{a_{mel}} - 1 \right) :$$

besser entspannende Lichtquellen bekommen somit eine bessere Bewertung im Bereich $T_{cp} \leq 3200 \text{ K}$ (Warmweiß); und die sog. „Mischung“:

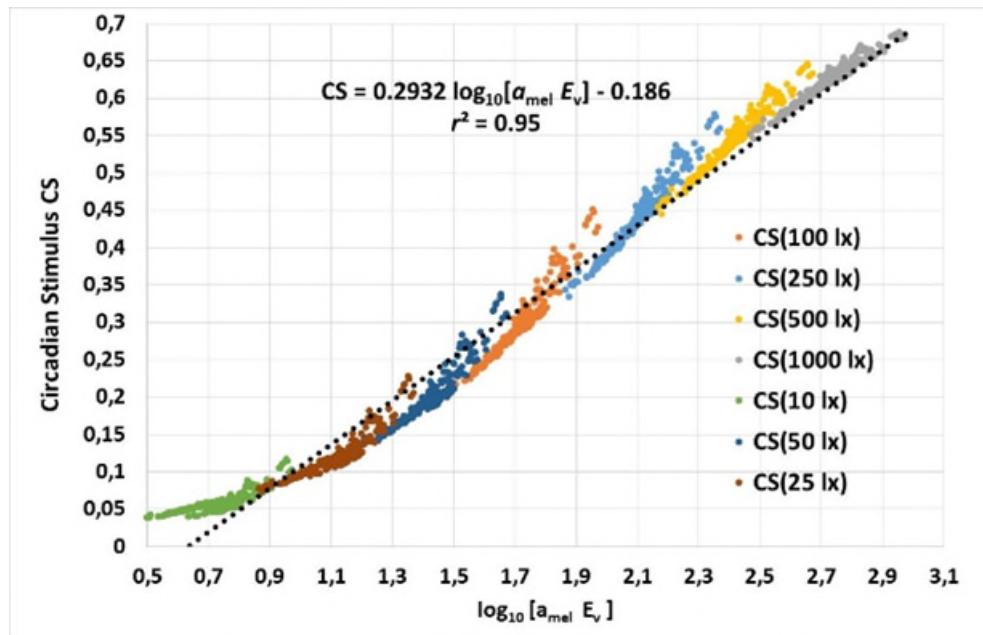
$$BioNote_{Mischung} = BioNote_{entspannen\ d} \cdot \left(\frac{3800 \text{ K} - T_{cp}}{600 \text{ K}} \right) + BioNote_{aktivieren\ d} \cdot \left(\frac{T_{cp} - 3200 \text{ K}}{600 \text{ K}} \right)$$

a_{mel} : melanopischer Wirkungsfaktor nach DIN SPEC 5031-100 für das Spektrum des zu bewertenden Beleuchtungsproduktes.

a_{mel0} : melanopischer Wirkungsfaktor nach DIN SPEC 5031-100 für die Referenzlichtquelle
Die Referenzlichtquelle hat das Spektrum einer Tageslichtphase oder eines Schwarzkörperstrahlers, oder die Mischung davon. Das Spektrum (Tageslicht, Schwarzkörper oder Mischung) wird nach der CIE-Publikation Nr. 224:2017 (Colour Fidelity Index for accurate scientific use) definiert.

Um die circadiane Wirkung zu charakterisieren, wurde der melanopische Wirkungsfaktor verwendet. Wie schon erwähnt, stellt der circadiane Stimulus CS eine Alternative dar (die Größe a_{mel} berücksichtigt weder die Neurophysiologie und Neuroanatomie der Retina, noch die Eigenschaften des circadianen Systems). Trotzdem wurde – wegen der einfachen Definition und Anwendung die Größe a_{mel} gewählt; diese Größe ist für die Praxis und Planung der Beleuchtung sehr wichtig. Für den relevanten Leuchtdichtebereich der Innenräume gibt es einen Zusammenhang der beiden Kenngrößen (a_{mel} und CS), s. Abbildung 34.

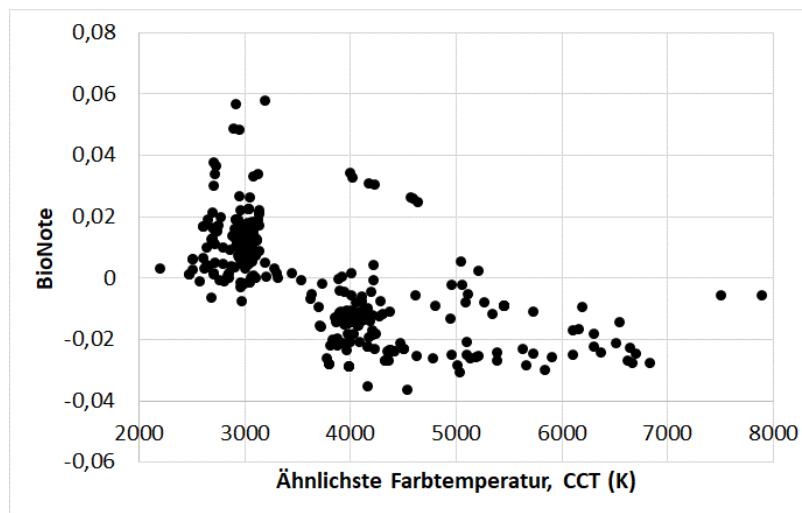
Abbildung 34: Vergleich der beiden Kenngrößen der circadianen Wirkung, a_{mel} und CS für den Datensatz der Beleuchtungsprodukte.



Reproduziert mit Genehmigung von Optics Express [1]

Abbildung 34 zeigt, dass die Größe $\log_{10}(a_{mel} E_v)$ mit der Größe CS linear zusammenhängt ($r^2=0,95$), wobei auch Abweichungen bis maximal $\Delta CS=0,08$ ersichtlich sind. Um die Größe Bio-Note zu erläutern, zeigt Abbildung 35 diesen Wert für den Datensatz der Lichtquellen als Funktion der ähnlichen Farbtemperatur CCT.

Abbildung 35: Die Größe BioNote für den Datensatz der Beleuchtungsprodukte als Funktion der ähnlichen Farbtemperatur CCT.



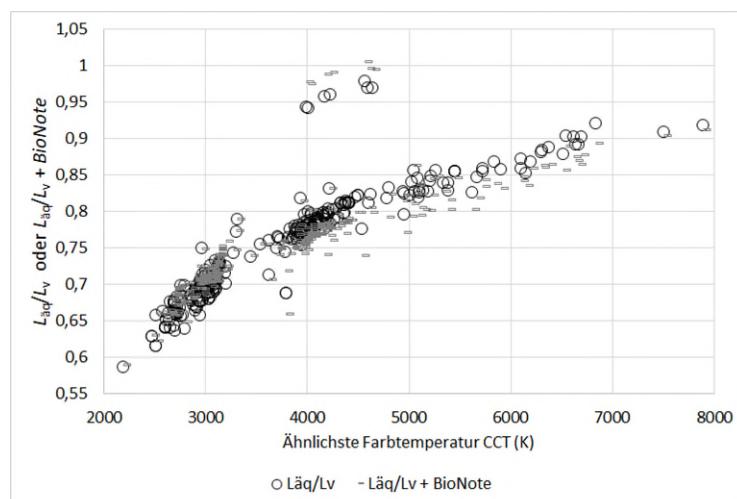
Reproduziert mit Genehmigung von Optics Express [1]

Aus Abbildung 35 geht hervor, dass die warmweißen Spektren tendenziell einen größere (und positive) BioNote bekommen, als neutralweiße oder kaltweiße Lichtquellspektren, die tendenziell einen negativen BioNote-Wert aufweisen. Der Grund dafür besteht darin, dass die Größe $a_{mel,0}$ (d. h. der melanopische Wirkungsfaktor der Referenzlichtquelle, der tendenziell größer als

a_{mel} ist) für warmweiße Lichtquellen im Zähler steht, für neutralweiße und kaltweiße Lichtquellen aber im Nenner erscheint. Ein negativer BioNote-Wert weist darauf hin, dass die circadiane Wirkung der Lichtquelle kleiner ist, als die circadiane Wirkung der Referenz dieser Lichtquelle und darum soll dieser Lichtquelle ein negativer BioNote-Wert zugewiesen werden.

Als weitere Erläuterung ist es ebenfalls interessant, den Wert ($L_{\text{äq}}/L_v$) und auch die Größe $[(L_{\text{äq}}/L_v) + \text{BioNote}]$ als Funktion der CCT für die Beleuchtungsprodukte im Datensatz darzustellen, s. Abbildung 36. Im Beispiel der Abbildung 36 wird Innenraumbeleuchtung ohne Dynamik betrachtet ($\alpha=\beta=1$).

Abbildung 36: Der Wert ($L_{\text{äq}}/L_v$) und die Größe $[(L_{\text{äq}}/L_v) + \text{BioNote}]$ als Funktion der CCT für die Beleuchtungsprodukte im Datensatz (in diesem Beispiel wird Innenraumbeleuchtung ohne Dynamik betrachtet; $\alpha=\beta=1$).



Reproduziert mit Genehmigung von Optics Express [1]

Aus Abbildung 36 geht hervor, dass der Wert der Größe $[(L_{\text{äq}}/L_v) + \text{BioNote}]$ steigt, wenn sich der Wert von CCT erhöht. Es ist auch ersichtlich, dass dabei die Größe der Helligkeit ($L_{\text{äq}}/L_v$) dominiert. Diese Größe wird aber durch die Größe BioNote modifiziert (erhöht für Warmweiß und reduziert für Neutralweiß und Kaltweiß). Der Wert der Größe BioNote ist für warmweiße Lichtquellen tendenziell positiv, weil für die warmweißen Lichtquellen im Datensatz der Beleuchtungsprodukte i.A. $a_{mel} < a_{mel,0}$ gilt. Darum gilt $\text{BioNote} > 0$ für warmweiße Spektren (die eine entspannende Wirkung hervorrufen). Wird der Wert BioNote mit dem Wert von $(L_{\text{äq}}/L_v)$ addiert, resultiert eine bessere Bewertung als mit dem Wert $(L_{\text{äq}}/L_v)$ allein. Der Grund dafür besteht darin, dass es für eine warmweiße Lichtquelle vorteilhaft ist, einen niedrigeren a_{mel} -Wert als die Referenz aufzuweisen, weil das Ziel der Beleuchtung die Entspannung ist. Aber der BioNote-Wert ist tendenziell negativ für die neutralweißen und kaltweißen Lichtquellen im vorhandenen Datensatz, weil tendenziell $a_{mel} < a_{mel,0}$ gilt und dann ist $\text{BioNote} < 0$. Das bedeutet, dass dabei eine kleinere circadiane Wirkung entsteht, als es mit einer bewussten circadianen Optimierung möglich wäre. Darum ist der resultierende Wert kleiner als die Größe $(L_{\text{äq}}/L_v)$ allein.

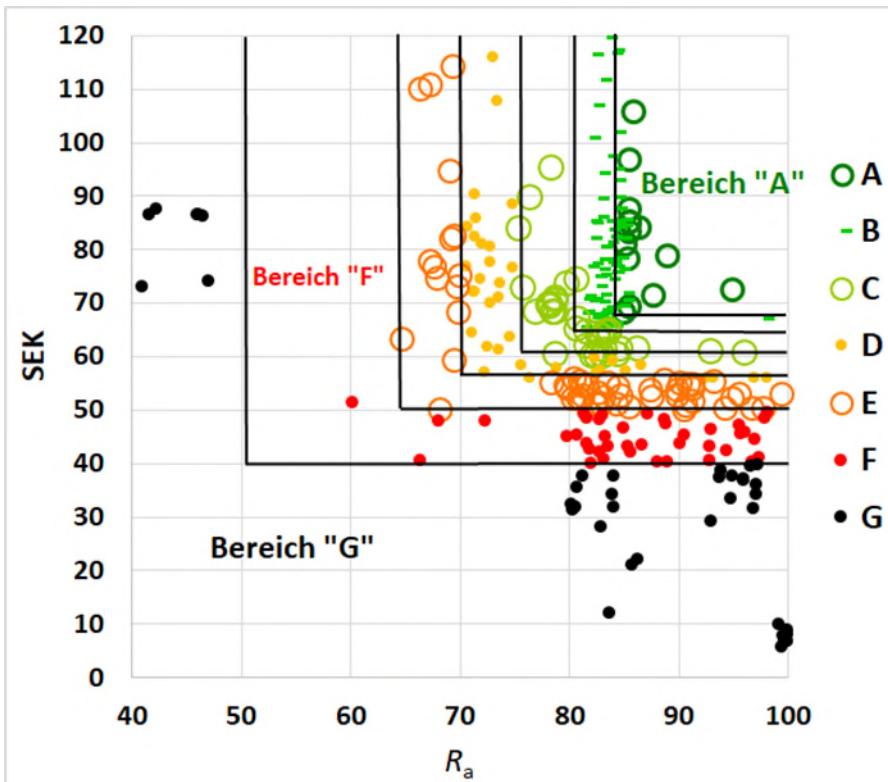
8.3 Literaturverzeichnis zu Abschnitt 8

- [1] Q. T. Vinh, P. Bodrogi, T. Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources, Optics Express 26, 14538-14551 (2018);
<https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-11-14538&id=389907>

9 Der neue Bewertungsansatz: Vorschlag für eine neue Grundlage zur Einteilung der Energieverbrauchsklassen (A bis G) bei der Energieverbrauchskennzeichnung“. Zuordnung des Satzes von 304 Beleuchtungsprodukten zu diesen Klassen

Hier wird ein Vorschlag dargestellt für eine neue Einteilung der Energieverbrauchsklassen (A bis G) bei der Energieverbrauchskennzeichnung. Die Zuordnung der genannten Beleuchtungsprodukte zu diesen Klassen wird gezeigt. Die Kategorie A-G wird aus dem errechneten SEK-Wert wie folgt bestimmt. Es fließt dabei auch noch die Kenngröße der Farbqualität (CIE CRI R_a) ein. Das Beleuchtungsprodukt bekommt die Kategorie „A“ dann, wenn sowohl die Farbqualität als auch der SEK-Wert hoch sind. Dafür müssen $R_a > R_a(A)$ und $SEK > SEK(A)$ erfüllt sein, wobei die Größen $R_a(A)$ und $SEK(A)$ die Grenzwerte für die Kategorie „A“ bedeuten. Somit wird ein „A“-Bereich auf der R_a -SEK-Ebene definiert, s. Abbildung 37. In der Abbildung 37 gibt es 304 Beleuchtungsprodukte (mit verschiedenen Symbolen für die verschiedenen Kategorien). Tabelle 8 enthält die vorläufigen Grenzwerte $SEK(A)$, $R_a(A)$, $SEK(B)$, $R_a(B)$, usw., für die Einstufung ins allgemeine Bewertungssystem. Diese Grenzwerte entsprechen den Trennlinien der Kategorien in Abbildung 37, in der das Beispiel $\alpha=1$ (keine dynamische Beleuchtung) und $\beta=1$ (Innenraumbeleuchtung) herangezogen wird.

Abbildung 37: Die R_a -SEK-Ebene des neuen Bewertungssystems mit einem Satz von 304 Beleuchtungsprodukten.



Die Grenzen der Bereiche sind vorläufig, diese werden hier nur als Diskussionsgrundlage gezeigt. Reproduziert mit Genehmigung von Optics Express [1] (s. 8.3). Beispiel $\alpha=1$ (keine dynamische Beleuchtung) und $\beta=1$ (Innenraumbeleuchtung).

Aus Abbildung 37 geht hervor, dass der neue Bewertungsansatz grundsätzlich zweidimensional ist, jedes Beleuchtungsprodukt bekommt also zwei kontinuierliche Werte im neuen Bewertungssystem: die Kenngröße für die Farbqualität (R_a -Wert; Abszisse) und den SEK-Wert (Ordinate). Der Grund dafür besteht darin, dass diese zwei Größen (R_a bzw. SEK) miteinander schlecht korrelieren und somit zwei kontinuierliche Bewertungsdimensionen darstellen.

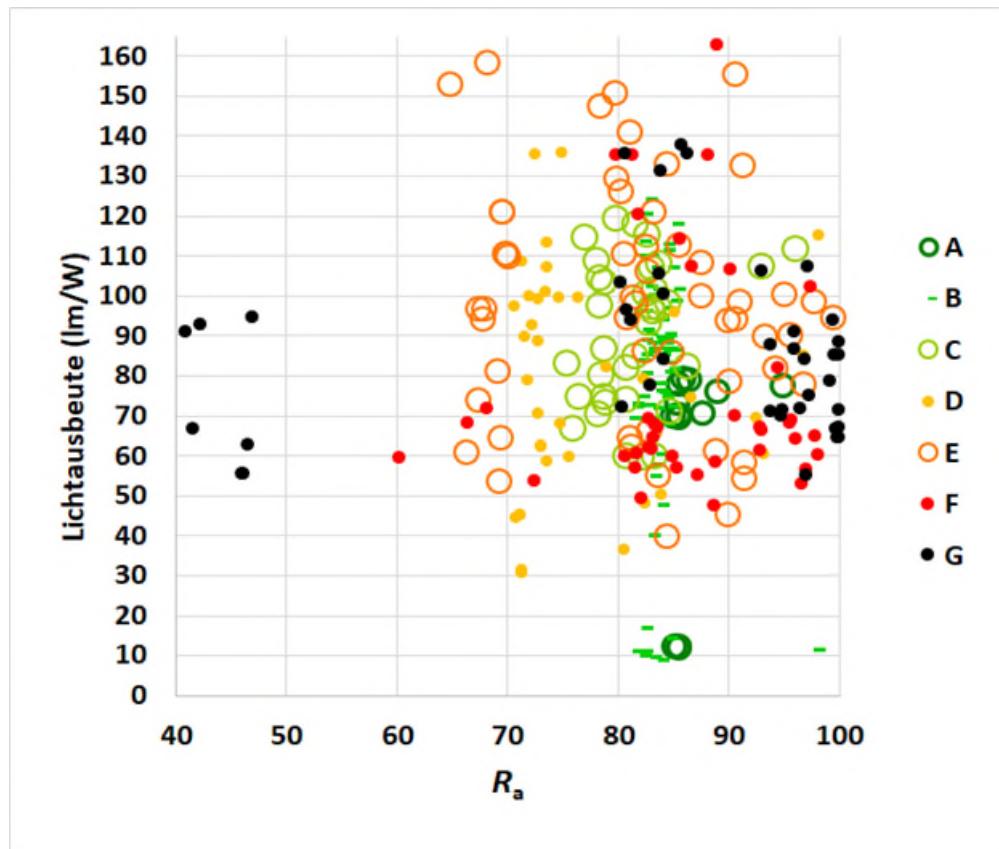
Es ist mathematisch sinnlos, die grundsätzlich zweidimensionale (vektorielle) Bewertungsgröße – mit Hilfe einer weiteren Metrik – in *einer* Dimension zusammenzufassen. In der Mathematik, Physik, Technik, usw. kommen oft grundsätzlich vektorielle Größen vor (z. B. die Geschwindigkeit, der elektrische Feldstärkevektor, usw.), die sich – aus der Sicht der Anwendungen – nicht sinnvoll in *eine* Skalar-Größe abbilden lassen. Analog passiert die Einstufung in das allgemeine Kennzeichnungssystem auf Grund der zweidimensionalen Größe $\{R_a; \text{SEK}\}$, s. Abbildung 37. Die Grenzen der Bereiche in Abbildung 37 sind vorläufig, diese werden hier nur als Diskussionsgrundlage gezeigt. Diese vorläufigen Grenzwerte $R_a(A)$, $\text{SEK}(A)$, usw. sind in der Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Die vorläufigen Grenzwerte $\text{SEK}(A)$, $R_a(A)$, usw. der Einstufung ins allgemeine Bewertungssystem.

| Größe | Kategorie | Grenzwert | Symbol in Abb. 37 |
|-------|-----------|-----------|--------------------|
| SEK | A | 67,725 | Dunkelgrüner Kreis |
| SEK | B | 64,800 | hellgrüner Strich |
| SEK | C | 60,563 | gelb-grüner Kreis |
| SEK | D | 55,900 | Gelber Punkt |
| SEK | E | 51,200 | Oranger Kreis |
| SEK | F | 40,400 | Roter Punkt |
| R_a | A | 84,656 | Dunkelgrüner Kreis |
| R_a | B | 81,000 | hellgrüner Strich |
| R_a | C | 75,703 | gelb-grüner Kreis |
| R_a | D | 69,875 | Gelber Punkt |
| R_a | E | 64,000 | Oranger Kreis |
| R_a | F | 50,500 | Roter Punkt |

Tabelle 9 zeigt die Verteilung der 304 Lichtquellen nach Lichtquellentyp und Kategorie, wenn mit den vorläufigen Grenzwerten der Tabelle 8 gerechnet wird. Die Grenzwerte können während der Diskussion geändert werden. Dann wird (mit Hilfe der Software, die die Methode implementiert,) Tabelle 9 sofort neu berechnet. Es ist auch sehr interessant, die gleichen Lichtquellenspektren wie in Abb. 37 in einer anderen Darstellung d. h. mit der herkömmlichen Lichtausbeute (in lm/W) auf der Ordinate (statt SEK), s. Abbildung 38.

Abbildung 38: Die gleichen Lichtquellspektren wie in Abb. 37 in einer anderen Darstellung d.h. mit der herkömmlichen Lichtausbeute (in lm/W) auf der Ordinate (statt SEK).



Reproduziert mit Genehmigung von Optics Express [1] (s. 8.3).

Aus Abbildung 38 geht hervor, dass die Ordnung der Lichtquellen nach Abbildung 37 unterbrochen wird und eine große Streuung der Kategorien erscheint. Der Grund dafür besteht darin, dass die Lichtausbeute auf der $V(\lambda)$ -Funktion basiert und die eher blauempfindlichen Mechanismen des Sehens (hier die ipRGCs und die S-Zapfen) außer Acht lässt, obwohl diese Mechanismen sowohl zur Helligkeitsempfindung als auch zur circadianen Wirkung beitragen.

Tabelle 9: Verteilung des Datensatzes der 304 Lichtquellen im allgemeinen Bewertungssystem (A-G) nach Lichtquellentyp

| Typ | Bezeichnung | Anzahl der Lichtquellen (nach Abb. 37) in jeder Kategorie | | | | | | | Alle |
|---------------------------|---|---|----|----|----|----|----|----|------|
| | | A | B | C | D | E | F | G | |
| Glühlampe | herkömmliche | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 11 |
| Glühlampe | Halogen- | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kompakteuchtstofflampe | mit eingebautem Vorschaltgerät | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 4 |
| Kompakteuchtstofflampe | ohne eingebautes Vorschaltgerät | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| sonstige Leuchtstofflampe | „halbkompakte“: U-, ring-, brezelförmige usf. | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 6 |
| sonstige Leuchtstofflampe | stabförmige (Röhren) | 0 | 1 | 12 | 5 | 7 | 0 | 7 | 32 |
| LED | Lampe | 6 | 37 | 11 | 22 | 34 | 36 | 21 | 167 |
| LED | Module | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| LED | Leuchte | 12 | 38 | 3 | 17 | 4 | 5 | 5 | 84 |
| Hochdruckentladungslampe | Natriumhochdruck | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hochdruckentladungslampe | Quecksilberdampf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hochdruckentladungslampe | Metallhalogeniddampf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alle | Alle | 18 | 76 | 27 | 46 | 46 | 45 | 46 | 304 |

A Anlage A: Verbraucherwerkstatt Beleuchtung (1.11.2017 – Forsa)

Die Verbraucherwerksatt fand im Rahmen des Auftrages statt. Acht Teilnehmer/innen (die keine Vorbildung zum Thema hatten) diskutierten dabei 135 Minuten lang (gemeinsam mit Hilfe einer Moderatorin von Forsa, einem Markt- und Meinungsforschungsinstitut) verschiedene Fragen zum Thema Beleuchtung, Beleuchtungsprodukte, deren Verpackungen, Anwendungen und deren Kennzeichnung. Dabei wurde ein ausführliches Protokoll erstellt und dem Auftraggeber gesendet. Das Protokoll wird anonymisiert unten gekürzt wiedergegeben. Das Geschlecht und der Beruf der acht Teilnehmer/innen wird wie folgt beschrieben:

1. Weiblich, 58, Verwaltungsangestellte;
2. Weiblich (ohne Angabe des Alters), im öffentlichen Dienst, Verwaltungsangestellte;
3. Männlich, 37, Haustechnik;
4. Männlich, 40, Entsorgungsunternehmen;
5. Männlich, 56, Verkaufsaußendienst;
6. Weiblich, 26, studiert;
7. Männlich, 65, Betriebswirt;
8. Weiblich, 54, Krankenschwester.

Die Verbraucherwerkstatt fand in den Räumlichkeiten von Forsa in einem Raum statt, wo mit Hilfe der Moderatorin verschiedene Fragen beantwortet wurden. Dabei wurden auf einem Tisch Verpackungsbeispiele mit der gegenwärtigen Kennzeichnung sowie eine Leuchte mit veränderlicher Farbtemperatur gezeigt. Nach einer Einleitung von 5 Minuten über die Bedeutung von elektrischem Licht wurden die Anforderungen an elektrisches Licht bzw. die Bedürfnisse der Benutzer in 20 Minuten diskutiert. Danach erfolgten in 15 Minuten Diskussionen über die Themen „Kauf von Lampen“ bzw. „Kauf von Leuchtmitteln“, das Verhalten der Anbieter bezüglich Präsentation der Information über die Produkte auf den Verpackungen bzw. die eigenen Kriterien der Teilnehmer/innen bei der Auswahl der Produkte beim Kaufen. In den kommenden 10 Minuten wurden die Verpackungen von Leuchtmitteln, die als Beispiele auf dem Tisch gelegt wurden, von den Teilnehmer/innen bewertet. Danach wurden die Bedeutung und die allgemeine Wahrnehmung von Energielabels auf den Verpackungen in 10 Minuten gemeinsam erörtert. Später mussten die Teilnehmer/innen die vorhandenen Verpackungen von Leuchtmitteln bewerten (15 Minuten). Anschließend wurden die Einzelheiten der Verpackungsinformationen (Energielabel, elektrische Leistung, Lichtstrom, Farbtemperatur, Farbwiedergabe) in 45 Minuten gemeinsam erfasst, diskutiert und bewertet. In den folgenden 10 Minuten wurden die Teilnehmer/innen gefragt, wie die Verpackungen optimiert werden können bzw. sollten. In den letzten 5 Minuten wurden die Ergebnisse der Verbraucherwerkstatt gemeinsam zusammengefasst.

Die (immer allgemein verständlich formulierten) Fragestellungen schlossen die folgenden Aspekte ein (weitere Aspekte gibt es im vollständigen Protokoll):

► Was geht Ihnen durch den Kopf, wenn Sie an elektrisches Licht denken? **Antworten:**

1. Viel Geld. Sehr teuer. In unserem Betrieb hatten wir früher die normalen Leuchten in den Hochregallagern und die verbrauchen sehr viel Strom. Ich bin Teilhaber der Firma und da ist es ganz interessant, seit es diese Sparleuchten gibt, es bringt ein paar Tausender mehr im Jahr in meine Tasche. In Frankfurt habe ich eine kleine Zweizimmerwohnung, weil ich nicht jeden Abend nach Idstein fahren will, aber das Haus in Idstein ist auch mit Energiesparlampen ausgerüstet und AAA+ Geräten, das merkt man doch im Portemonnaie. Im Internet gibt es Rechner, dass man bei einer normalen Glühbirne im Jahr schon 70 Euro spart, wenn man die zwei, drei Stunden am Tag laufen lässt. Das lohnt sich schon.
2. Der Wechsel der defekten Lampen fällt mir ein. Man merkt es wirklich.
3. Ja, die sind schon wesentlich effizienter, wenn man alles ausgetauscht.
4. Ich kaufe gar keine Sparlampen. Ich habe alles LEDs. Komplett. Das ist umweltfreundlicher.

► Was ist Ihnen wichtig, wenn Sie an die Beleuchtung zu Hause denken? Was sind die wichtigsten Anforderungen? Was brauchen Sie an Lichtqualität für Ihre Räume? Was sind Ihre wichtigen Momente rund ums Licht? **Antworten:**

1. Einmal Helligkeit, wenn ich Licht brauche, dann brauche ich wirklich Licht und dann muss es auch sehr hell sein oder auch, wenn man zum gemütlichen Teil übergeht, dann vermisst ich es auch hier und da, dann ist mir das Licht auch zu weiß oder zu hell oder zu gelb. Das stimmt schon. Das vermisst ich auch.
2. Kommt auch auf den Raum an. In welchem Raum ich die Lichtquelle brauche oder nutze. Im Wohnzimmer habe ich nicht das kalte, grelle Licht, aber im Büro brauchen wir schon ein starkes Licht. Im Bad teils, teils. An der Decke haben wir die Spots und die kann ich aber auch dimmen, das ist mir auch wichtig. Das geht mit den LEDs und Halogen eigentlich ganz gut.
3. Die Möglichkeit, das Licht dort zu haben, wo man es auch braucht. Dass es in großen Zimmern bspw. verschiedene Kreisläufe gibt. Es gibt ja viele Menschen, die das Esszimmer im Wohnzimmer mit drin haben, dass man das Esszimmer ausschalten kann, wenn man in die Wohn-Ecke geht und da ein anderes Licht anmachen kann. Das spart ja auch letztendlich.

► Haben Sie in den einzelnen Räumen unterschiedliche Leuchtmittel? **Antworten:**

1. Das Schlafzimmer muss nicht so hell sein wie die Küche. Im Schlafzimmer will ich kein Fleisch schneiden.

► Welche Leuchtmittel wählen Sie für die einzelnen Räume aus? **Antworten:**

1. Also in der Küche habe ich lauter Strahler, auch unter den Hängeschränken, dass ich immer anmachen kann da, wo ich bin, je nachdem, was ich beleuchten will und so ist das im gesamten Haus.
2. Mehrere Lichtquellen in einem Raum, ja. Wir haben im Wohnzimmer auch nicht nur eine Lampe. Bestimmt zwei Deckenlampen, eine Stehlampe.

► Die Leuchtmittel, die Sie reinschrauben oder montieren lassen, sind diese unterschiedlich von der „Stärke“ her? **Antworten:**

1. Ja, wir haben eine LED-Lampe und haben aber auch noch die Energiesparlampen.
2. Dann muss man gucken, ob man dimmen will oder nicht, sind sie dimmbar oder nicht. Wenn ich im Wohnzimmer sitze und gucke einen gescheiten Film, dann will ich das dimmen können, hoch oder runter, je nachdem.
3. Wir haben so Drehbirnen in der Stehlampe und im Küchenbereich sind auch zwei Verschiedene, einmal das Stecksystem für Birnen und auch LED unterm Schrank oder im Wohnzimmerschrank die LED.

► Wonach entscheiden Sie, wenn Sie in einem Raum unterschiedliche Lichtquellen haben? Gibt es Situationen, wo Sie speziell Ihre Bereiche haben, wo Sie sich das Licht so einschalten können, wie es für die jeweilige Situation passend ist? **Antworten:**

1. Ja. Und jetzt, wo es schon so zeitig dunkel wird, in der Küche haben wir drei Lichtquellen und wenn ich da was kuche, sind sie wahrscheinlich alle drei an, aber wenn ich nur mal so rein-gehe und was hole, dann brauche ich nur ein kleines Licht.

► Unterscheidet es sich auch von den Tageszeiten, was Sie benutzen? (z. B. nachmittags oder abends?) **Antworten:**

1. Wenn es hell ist, brauche ich kein Licht.

► Haben Sie es eher gerne dunkler, dass Sie die Beleuchtung dimmen oder: Sie steuern die Helligkeit über die Anzahl der Lampen? **Antworten:**

2. Wir haben eine Stehlampe im Wohnzimmer und wenn wir Fernsehen gucken, dann nutze ich nur die Stehlampe und zum Lesen nutze ich Stehlampe und Deckenlicht, sonst ist es zu dunkel.

► Wie ist Ihr Gesamteindruck, wenn Sie sich diese Schachtel (die Verpackung eines Beleuchtungsproduktes) anschauen? **Antworten:**

1. Viel zu viel drauf. Mit ISO-Norm und so. CE-geprüft, ja. Aber was bedeutet das Dreieck da unten. Viel zu viel drauf. 60 Watt, hält 15.000 Stunden und ist warmweiß und hat E27er Schraubgewinde. Fertig. Der Preis vielleicht noch.
2. Die ISO-Zertifizierung braucht kein Mensch. Das ist für den Käufer eher uninteressant.
3. Das ist so ein typisches Ding, das haben die vorgeschrieben, das muss da drauf. Wer weiß was ISO-Norm 4001 ist.
4. Das ist was für Fachleute. Das ist halt ein zertifiziertes Unternehmen, um Leuchtmittel herzustellen.
5. Das ist ja auch ein Qualitätsmerkmal. Es gibt ja ganz viele Bereiche- die zertifiziert sind und dann ist das auch wichtig. Ob es da drauf gehört- ist noch mal eine andere Sache, aber man weiß- das ist ein Hersteller- der zertifiziert ist und damit auch spezialisiert.

6. CE-geprüfte Sicherheit, das langt mir doch. Da brauche ich doch keine ISO-Norm. Dann müsste ich auch wissen, was es ist und was es aussagt.
7. Das Ding ist halt, ich kenne es aus meinem Kurs an der Uni mit dem ISO, das interessiert mich jetzt nicht, ich würde nicht danach gehen und es ist einfach zu viel. Wenn da einmal ISO stehen würde, aber so sind es sechs umrandete Kästchen und was FIECQ Ding da, von mir aus kann es da stehen, aber für mich ist das irrelevant.

► Also der Wert [der Farbtemperatur] hilft Ihnen nicht, sondern eher die Skala? **Antworten:**

1. Genau.
2. Die eigentlich viel zu klein hinten drauf ist.
3. Die geht irgendwo unter, im Gegensatz zu den 2800 vorne, aber mit dem Wert kann ich eben nichts anfangen.
4. Das sind vier Werte jetzt. 9,5 Watt entspricht 60 Watt, das verstehe ich. Und hinten ist noch mal aufgeschlüsselt wie viel 9,5 Watt in Lumen sind. Auch noch ganz nett. Aber kann man das nicht in einem schreiben? Ich würde dann bei Watt oder Lumen bleiben. Aber Watt Watt, Watt Lumen. Dann kann man doch gleich vorne drauf schreiben 810 Lumen entsprechen 60 Watt, dann weiß ich Bescheid.

► Wir haben hier noch ein Paar andere Schachteln; nicht jede ist gleich beschriftet. Können Sie sich anschauen, was darauf ist an Informationen? **Antworten:**

1. Das finde ich auch gut. Philips, warmweiß, 84% Energie sparen, 60 Watt.
2. Ohne Quecksilber ist doch schon mal gut.
3. Der Verbraucher ist damit absolut überfordert.
4. Die kleinen Kästchen als Abbildung finde ich OK.
5. Eigentlich ist es hier auf einer Seite in einer Tabelle gut. Unten die Skala, hier weiß ich es ist dimmbar und Kelvin sehe ich. Das finde ich gut. Aber das hier vorne finde ich auch too much. Da weiß man gar nicht wo man hingucken soll.

► Was sagen die anderen zu der Tabelle hier, wo man alle Werte noch einmal darin hat? **Antworten:**

1. Das ist wieder zu klein, brauche ich die Brille wieder für.
2. Was heißt denn RA?

► Weiß jemand, was das bedeutet? **Antworten:**

1. (Alle schweigen)

► Hat jemand den R_a -Wert in Erwägung gezogen beim Kauf? **Erkenntnis:**

1. Die Farbwiedergabe spielte keine wichtige Rolle für die Teilnehmer/innen.

- Licht hat eine Wirkung: wenn Sie warmes, dunkles Licht haben, werden Sie müde oder eventuell kreativer; Licht kann aber auch eine aktivierende Wirkung haben, stimulierend, dass die Hormone in Schwung kommen und Sie damit fitter werden, z. B. wenn Sie kaltes, starkes Licht bekommen. Ist das was, das Ihnen als Information helfen würde? Es geht tatsächlich darum, dass es stimulierende Wirkung hat. Der Pfeil nach rechts: das Licht hat dann eine eher aktivierende Wirkung. **Antworten:**

1. Nein.
2. Gar nicht.
3. Bestimmte Altersgruppen macht das glaube ich total durcheinander.
4. Mir fehlt da noch was: Chill-Licht und Sport-Licht?
5. Ja so hätte ich das auch gesehen, als Ersatz zur Farbskala, aber nicht, dass mich das aktiv macht und das zur Ruhe kommen lässt.
6. Das ist noch ein Wert zu viel. Es ist jetzt schon kompliziert mit Kelvin, Lumen, Watt. Jetzt kommt noch was drauf. Das ist eh schon zu viel. Also es wird immer komplizierter statt vereinfachter.
7. Die wollen es zwar einfacher machen, aber es verkompliziert dann doch.

- Haben Sie beim Kauf eines Leuchtmittels noch keine Gedanken gemacht, ob es aktivierend oder beruhigend ist? Wie würden Sie das hier darstellen, damit man es besser versteht? Weil Sie ja gerätselt haben, was das heißen soll. Was würden Sie dann als Symbol für die aktivierende bzw. entspannende Wirkung wählen? **Antworten:**

1. Das ist einfach zu viel auf dem kleinen Schäckelchen.
2. Wer sagt denn, dass aktives Licht hell oder dunkel sein muss. Jeder hat doch ein anderes Wohlfühlgefühl, wo er sagt, er ist mit Gelblicht trotzdem aktiv.
3. Ich finde die Farbskala mit Gelb- und Weißlicht zeigt das ja eigentlich auch schon. Deswegen würde ich nicht noch zusätzlich diese Skala bringen. Gelblich ist eher entspannt, das weiß jeder und Weißlicht ist hell, wach, das reicht.

- Wir hatten am Anfang über die Schaltfestigkeit gesprochen. Spielt das eine Rolle für Sie? Das sieht hier aus wie ein Lichtschalter und da steht darauf, wie oft man an- und ausschalten kann. **Antworten:**

1. Das ist schon wichtig.
2. Ja.
3. Und das bedeutet 1 Million mal?
4. Aber hier sind es nur 100.000.
5. Stimmt, das sind ja dann 900.000 Mal weniger an und aus, das ist ja schon erheblich.

- Dann haben wir vorhin auch noch über die Anlaufzeit gesprochen, wie lange braucht die Lampe, bis sie anspringt. Haben Sie das auf den Schachteln gefunden? **Antworten:**

1. On Off. Sofort an, aber Off heißt er braucht länger. Steht hier.

- Diejenigen, die LED zu Hause haben, ist Ihnen schon mal aufgefallen, je nachdem, welche LED Lampe das ist, dass diese manchmal ein bisschen flimmern? Stört Sie das? **Antworten:**

1. Ja.
2. Nein.
3. Doch.
4. Ja, es irritiert mich, weil man denkt ja es geht was kaputt. Das assoziiert man sofort damit.
5. Es ist ja nicht lange, nur beim Einschalten bei mir.
6. Kann ich gar nicht 100%-ig sagen, ob es nur beim Einschalten ist. Ich werde mal drauf achten.
7. Ich habe da noch nichts gemerkt.

- Wir haben bisher eine Reihe von verschiedenen Schachteln gesehen. Wie kann man aus Ihrer Sicht eine Verpackung so optimieren, was müsste für Sie darauf stehen, damit es für Sie optimiert ist? **Antworten:**

1. Die Farbskala für die Wärme des Lichtes
2. Dass es LED ist und die Wattzahl
3. Energie-Label
4. Die Lumen sagen mir nichts. Lieber Watt vorher und im Vergleich: jetzt.
5. Wie oft man das Leuchtmittel an- und ausschalten kann.
6. Die Info plus 40 bis minus 30 Grad könnte man eher weglassen, nicht verständlich. [*Eine andere Meinung:*] weglassen würde ich es nicht, weil das Informationen sind, die eigentlich wichtig sind, für gewisse Leute, die technisch oder elektrisch erfahren sind. (eher mit kleineren Buchstaben zeigen). Womit der Laie auch etwas anfangen kann: Das sind nur die Farbskala, die Energieeffizienz, die Helligkeit vom Licht und die „Watt-Zahl“, diese soll man auffällig auf die Verpackung schreiben.
7. Das Lumen könnte man weglassen. Auf der Rückseite im Kleingedruckten für die Fachleute wie viel Stunden und so. Die Angabe 2.800 Kelvin (warmes Licht) eher vorne anzeigen. Z. B. 2.800 K sagt nicht so vielen Leuten etwas, im Gegensatz zu der Skala.
8. Man darf nicht vergessen, dass der Hersteller nicht nur für ein Land produziert, sondern in unserer modernen, globalisierten Welt für viele Länder und da gibt es möglicherweise auch viele unterschiedliche Bedürfnisse bzw. Vorstellungen.

B Anlage B: Fragen der Umfrage im Internet

Eine Umfrage zur neuen Kennzeichnung der Lichtqualität und der Stromeffizienz von Beleuchtungsprodukten (Leuchtmitteln, Lampen, Leuchten) wurde ebenfalls durchgeführt. Diese Umfrage war kein Bestandteil des Auftrages. Sie wurde auf die Initiative des Auftragnehmers zur besseren Vorbereitung der Verbraucherwerkstatt (Anlage A) vor der Verbraucherwerkstatt durchgeführt. Diese Ergebnisse werden später ausgewertet und veröffentlicht. Hier werden nur die Einführung sowie die Fragen der Umfrage vorgestellt.

Einführung:

Wenn Sie ein Leuchtmittel kaufen (z. B. eine „LED-Lampe“), dann ist es oft schwer, aus der Vielfalt der Produkte das Richtige herauszusuchen und sich für ein Leuchtmittel entscheiden, welches Ihrem Bedarf entspricht. Wir möchten dafür eine neue Kennzeichnung auf der Verpackung erarbeiten. Dazu brauchen wir Ihre Meinung, die wir mit Hilfe dieser kurzen Befragung (max. 5 Minuten) erfahren möchten. Die Antworten werden anonym erfasst.

Fragen:

1. In wie weit schauen Sie beim Kauf die Informationen auf den Lampenverpackungen an?
2. Kennen Sie die Bedeutung der Angabe „elektrische Leistung“ (z.B. 12 W)?
3. Kennen Sie die Bedeutung der Angabe „Lichtstrom“ (z. B. 1055 lm)?
4. Kennen Sie die Bedeutung der Angabe „Farbtemperatur“ (z. B. $T_c=2700$ K)?
5. Kennen Sie die Bedeutung der Angabe „Farbwiedergabe“ (z. B. $R_a>80$)?

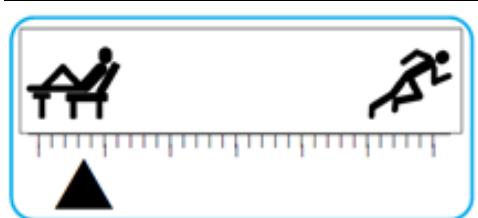
Abbildung 39: Beispielhafte graphische Kennzeichnung der CCT



Quelle: UBA

6. Erkennen Sie die Bedeutung der obigen Kennzeichnung? (siehe Abbildung 39)
7. Freies Eingabefeld: Beschreiben Sie, was das obige Bild (Kennzeichnung des Leuchtmittels) bedeutet.

Abbildung 40: Alternative Kennzeichnung für Leuchtmittel bezugnehmend auf die entspannend- bzw. aktivierende Wirkung des Lichtes



Quelle: UBA

8. Wie würden Sie die obige Kennzeichnung auf der Verpackung des Leuchtmittels deuten? (Freies Eingabefeld)
9. Wäre eine Kennzeichnung des Lichtes auf der Verpackung bezüglich der **entspannenden** bzw. **aktivierenden** Wirkung des Lichts für Sie hilfreich?
10. Woran orientieren Sie sich beim Kauf eines Leuchtmittels? (Freies Eingabefeld)
11. Möchten Sie am Abend (z. B. im Winter um 19 Uhr) eine eher hellere oder eine eher dunklere Umgebung haben? Auswahl: 1. Sehr hell, 2. Eher hell, 3. Moderat, 4. Eher dunkel, 5. Schwaches Niveau von Licht oder dunkel
12. Möchten Sie in Ihrem Wohnzimmer am Abend im Familienbereich (z. B. gemeinsam Kochen, Essen, Unterhalten, Spielen) eher Warmweiß, Neutralweiß oder Kaltweiß haben? Warmweiß hat einen eher gelblicheren d. h. wärmeren Ton. Kaltweiß weist einen eher bläulicherem d. h. kälteren Ton auf. Das neutralweiße Licht liegt zwischen Warmweiß und Kaltweiß. Auswahl: 1. Warmweiß, 2. Kaltweiß, 3. Neutralweiß
13. Möchten Sie in Ihrer Wohnung zum Arbeiten (z. B. in der Küche, Basteln, Daten eingeben, Lesen eines Dokuments oder einer Zeitung) eher Warmweiß, Neutralweiß oder Kaltweiß haben? Warmweiß hat einen eher gelblicheren d. h. wärmeren Ton. Kaltweiß weist einen eher bläulicherem d. h. kälteren Ton auf. Das neutralweiße Licht liegt zwischen Warmweiß und Kaltweiß. Auswahl: 1. Warmweiß, 2. Kaltweiß, 3. Neutralweiß
14. Wie wichtig ist für Sie der Preis beim Kauf des Leuchtmittels?
sehr wichtig, wichtig, mäßig, gar nicht wichtig (Auswahl)
15. Wie wichtig ist für Sie die Lichtfarbe (Warmweiß, Neutralweiß, Kaltweiß) beim Kauf des Leuchtmittels? sehr wichtig, wichtig, mäßig, gar nicht wichtig (Auswahl)
16. Wie wichtig ist für Sie die Lichtqualität (etwa die schöne Erscheinung der beleuchteten farbigen Objekte) beim Kauf des Leuchtmittels? sehr wichtig, wichtig, mäßig, gar nicht, wichtig (Auswahl)
17. Wie wichtig ist für Sie das Vorhandensein der Mattierung (um gleichmäßiges, gestreutes Licht herzustellen) beim Kauf des Leuchtmittels? sehr wichtig, wichtig, mäßig, gar nicht wichtig (Auswahl)
18. Wie wichtig ist für Sie das Vorhandensein der gerichteten Lichtverteilung (gezielte, starke Beleuchtung einer Sehauflage) beim Kauf des Leuchtmittels? sehr wichtig, wichtig, mäßig, gar nicht wichtig (Auswahl)
19. Achten Sie beim Kauf als Erstes auf den geringeren Stromverbrauch (d. h. effiziente Beleuchtungsprodukt) und erst danach auf die Aspekte der Lichtqualität wie Lichtfarbe und Helligkeit (die höchste Lichtmenge) des Beleuchtungsproduktes? Ja, Nein
20. Achten beim Kauf als Erstes auf die Aspekte der Lichtqualität wie die Lichtfarbe und die Helligkeit (die höchste Lichtmenge) und erst danach auf den geringeren Stromverbrauch (d. h. effiziente Beleuchtungsprodukt) des Beleuchtungsproduktes? Ja, Nein

C Anlage C: Austausch mit der Fachöffentlichkeit

C.1 Zusammenkunft zwischen den Mitarbeitern der Industrievertreter des ZVEI, UBA und den Mitarbeitern des Fachgebiets Lichttechnik der TU Darmstadt am 3. Juli 2017 und Tagung der LED-Leitmarktinitiative und BMWi (Vortrag von Hn. Prof. Khanh über das Vorhaben) am 14. Juli 2017.

Es wird hier zusammengefasst, welche Ergebnisse die Diskussionen mit UBA allein, mit den Ministerien sowie mit den Vertretern des ZVEI und der Industrie sowie den einzelnen Firmenvertretern gebracht haben. Zwei Ansätze wurden bis 14. Juli 2017 erarbeitet, die in einem Vortrag der TU Darmstadt am 3. Juli 2017 zur Bewertung von Beleuchtungsprodukten – Lampen, Modulen und Leuchten, nicht Anlagen – davor bereits vorgestellt wurden. Die vorgeschlagene Bewertungsmethode weicht im Wesentlichen in zwei Punkten von der bisher üblichen ab:

1. Es werden zum Teil andere Kennwerte verwendet und
2. es werden die Produkte nicht nach nur einem Maßstab bewertet. Stattdessen wird nach einer Reihe von Anwendungen unterschieden – Büro, Krankenhaus, Museum usf. –, aus denen sich unterschiedliche Anforderungen an das Lichtspektrum ergeben.

Diese neue **Produktbewertung** kann sowohl in die Formulierung von Mindesteffizienzanforderungen als auch in die Gestaltung der Energieverbrauchs kennzeichnung eingehen. Der Vortrag behandelte vor allem letzteres.

Der Ansatz verwendet folgende Bewertungskennwerte:

In die Berechnung der produktbezogenen Helligkeit geht neben dem bisher verwendeten Lichtstrom Φ_v (in lm) auch das Verhältnis zwischen äquivalenter ($L_{äq}$) und photopischer Leuchtdichte (L_v) ein, das je nach Anwendung unterschiedlich ausfallen kann. Bei Anwendungen in Außenräumen (S4- und ME-Straßen) wird die mesopische Leuchtdichte als $L_{äq}$ verwendet und bei Anwendungen in Innenräumen die Leuchtdichte nach dem Ansatz von Prof. Fotios und seinen Mitaufzonen. So werden Einflüsse der relativen spektralen Strahlungsverteilung auf das Helligkeitsempfinden berücksichtigt (CIE 2010 und CIE 191:2010), die bei der Lichtstromberechnung nicht eingehen.

Die Farbqualität wird über den allgemeinen Farbwiedergabeindex R_a (CIE 13.3:1995) bewertet.

Die Wirkung auf die Wachsamkeit am Tage wird über die Kenngröße a_{mel} berücksichtigt (DIN SPEC 5031-100).

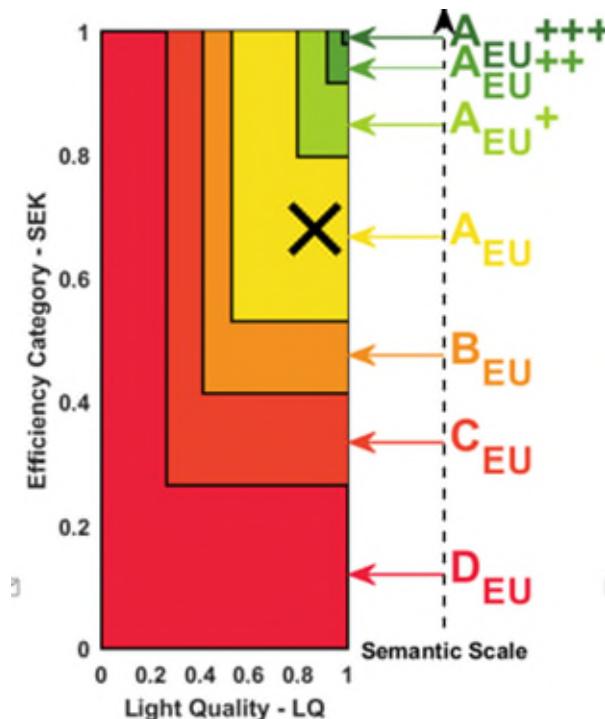
Die Unterschiedlichkeit der Nutzerbedürfnisse wird wie folgt einbezogen: Es wird unterschieden nach im Wesentlichen 12 Anwendungen. Für jede dieser Anwendungen kann eine Lichtqualitätskennzahl (LQ) errechnet werden. In diese gehen der R_a - und der a_{mel} -Wert eines Spektrums, sprich Produktes über Gewichtungsfaktoren ein: α für R_a und β für a_{mel} . Je nach Anwendung können diese Faktoren unterschiedlich ausfallen. So wird beispielsweise der R_a -Wert bei der Berechnung der Lichtqualitätszahl für die Anwendung Museum mit einem höheren α -Wert gewichtet als bei der Anwendung Büro, und der a_{mel} -Wert eines Produktes wird für die Anwendung Industrie mit einem niedrigeren β -Wert gewichtet als es bei der Anwendung Krankenhaus der Fall ist. So ergibt sich ein Rohwert für die Lichtqualität (LQ_{raw}). Zur besseren Verständlichkeit wird dieser Rohwert in einen LQ-Wert im Bereich 0 bis 1 umgerechnet.

Die Stromeffizienz wird mit dem derzeitigen Ansatz als Helligkeitsausbeute berechnet, die sich als Produkt aus Lichtausbeute und dem oben beschriebenen Leuchtdichteverhältnis $L_{e,q}/L_v$ ergibt. Der so errechnete Rohwert SEK_{raw} wird wie die Lichtqualitätszahl in einen Wert im Bereich 0 bis 1 umgerechnet.

LQ und SEK können einer Klasse zugeordnet werden; wie bei der derzeitigen Energieverbrauchskennzeichnung einer der Klassen A++ bis E oder zukünftig A bis G.

Die so gewonnenen Ergebnisse können beispielsweise zweidimensional dargestellt werden: der SEK-Wert wird über den LQ-Wert dargestellt, s. Abbildung 41.

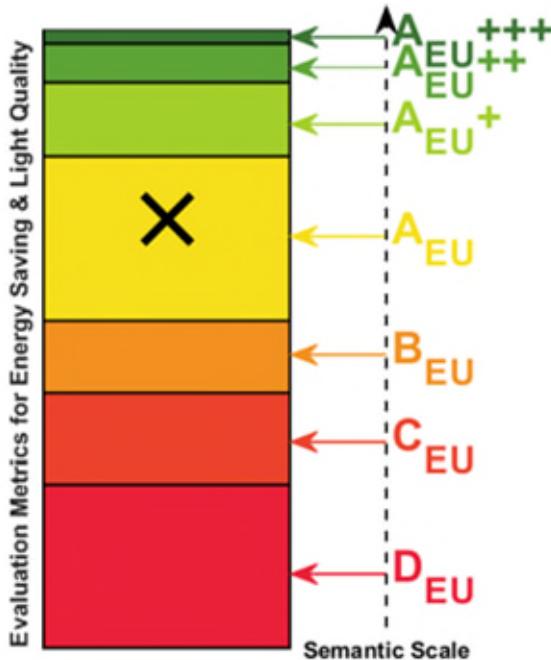
Abbildung 41: Beurteilung von Lichtquellen anhand von SEK-Wert und LQ-Wert



Quelle: Technische Universität Darmstadt

In einer weiteren Bearbeitung der Ergebnisse könnte eine Darstellung in einem eindimensionalen Label erreicht werden, s. Abbildung 42.

Abbildung 42: Durch weitere Bearbeitung erstellte eindimensionale Darstellung der Abbildung 41



Quelle: Technische Universität Darmstadt

Als Gesamtschätzung wurde Folgendes festgelegt:

Der bisherige Lichtstrom beinhaltet weder die Farbqualität noch die circadianen Effekte und ist falsch, da der Mensch nur die Helligkeit wahrnimmt und nicht $V(\lambda)$ -gewichteten photometrischen Parameter wie Beleuchtungsstärke oder Lichtstrom.

Alle diese drei o.g. neuen Aspekte der Lichtwissenschaft in den letzten 50 Jahren wurden in die Ansätze 1 und 2 integriert. Diese beiden Ansätze dienen sowohl zur Grenzwertsetzung als auch zur Kennzeichnung. Auch wenn der Ansatz 2 mit einer einheitlichen 1-Komponente etwas wissenschaftlich gesehen nachteilig erscheint, sollte man diese 1-Komponente-Metrik bevorzugen. In der gesamten Berechnungsmethode für diese 1-Komponente-Metrik sind alle drei lichttechnischen Merkmale implizit integriert. Somit ist der Kernwunsch, die Lichtqualität als Nutzen in die Stromeffizienz einzubauen, realisiert, auch wenn nicht vollständig optimal.

Man sollte nur noch zwei Anwendungen deklarieren „Entspannung“ (sowohl im Büro als auch im Heimbereich) als auch „Aktivität- Funktionalität“ (sowohl auf der Arbeit als auch im Wohnbereich im Home-Office) mit unterschiedlichen a_{mel} -Gewichtungen oder noch zusätzlich eine dritte Anwendung für hohe Farbqualität (Museum, Shop, Medizinische Untersuchungen) mit $R_a > 90$. Mehr als drei Anwendungen im photopischen Bereich sollte es nicht geben, dabei Straßenbeleuchtungen mit 2 Anwendungen (S- und ME-Klassen).

Der Ansatz 2 kann und sollte für Grenzwertsetzung und Kennzeichnung des Lichtproduktes verwendet werden. Auf der Verpackung könnten zwei Produkte abgebildet sein: Produkte für Wohnbereich und für professionellen Bereich.

Zusammenfassend: Es soll 5 Anwendungen mit 2 für Außenbeleuchtung (S und ME-Straßen) und maximal 3 Anwendungen für Innenraumbereich (Entspannung, Aktivität, Sonderanwendungen mit hoher Farbqualität) sowie einheitlich für 2 Produktgruppen Wohnraum und professionellen Bereich geben.

Der neue Bewertungsansatz wurde mit der Fachöffentlichkeit weiterhin wie folgt diskutiert:

C.2 Meeting Lighting Europe, WG (Working Group) HCL (Human Centric Lighting) am 7. September 2017 in Brüssel

Hier wurde ein mit dem AG abgestimmter neuer Diskussionsvorschlag zur Stellungnahme der deutschen Delegation (DE) für die EU-Kommission vorgestellt.