

DIN/TS 5031-100

ICS 17.180.01

Ersatz für
DIN SPEC 5031-100:2015-08**Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik –
Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts
auf den Menschen –
Größen, Symbole und Wirkungsspektren**

Optical radiation physics and illuminating engineering –
Part 100: Melanopic effects of ocular light on human beings –
Quantities, symbols and action spectra

Physique de radiation optique et technique d'éclairage –
Partie 100: Effet melanopique de lumière oculaire sur la personne –
Grandeurs, symboles et spectre d'activité

Gesamtumfang 46 Seiten

DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL)

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Melanopische Lichtwirkungen	20
4.1 Allgemeines	20
4.1.1 Übersicht über die melanopischen Lichtwirkungen	20
4.1.2 Suppression von Melatonin in der Nacht	21
4.1.3 Verschiebung der circadianen Phase	21
4.1.4 Änderung der circadianen Amplitude	22
4.1.5 Aktivierung mit Licht	22
4.1.6 Steuerung des Pupillenreflexes	22
4.1.7 Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD)	22
4.2 Melanopische Bewertung von Licht	23
4.3 Wirkungsspektrum für die melanopische Bewertung von Licht	23
4.4 Angabe von Lampen- und Leuchtendaten	26
4.4.1 Allgemeines	26
4.4.2 Melanopisch äquivalenter Tageslicht-Lichtstrom von Lichtquellen	26
4.4.3 Melanopischer Betriebswirkungsgrad von Leuchten	28
4.4.4 Melanopischer Dynamikbereich von Leuchten	28
5 Lichttechnische Beschreibung der Exposition	28
5.1 Beschreibung von Lichtquellen	28
5.2 Exakte Beschreibung bei einfachen Lichtquellen	29
5.3 Vereinfachte Beschreibung bei einfachen Lichtquellen	30
5.4 Beschreibung bei komplexen Lichtquellen	30
5.5 Bewertung der fotobiologischen Sicherheit	31
Anhang A (informativ) Spektrale Strahlungsverteilungen moderner Lichtquellen	32
Anhang B (informativ) Beispiele melanopisch äquivalenter Tageslicht-Größen	37
Anhang C (informativ) Wirkungsspektrum für die melanopische Bewertung von Licht in 5-nm-Schritten	39
Anhang D (informativ) Melanopische Tageslicht-Effizienzfaktoren, melanopische Wirkungsfaktoren und Korrekturfaktoren für die altersabhängige Linsentransmission .	40
Anhang E (informativ) Korrekturfaktoren für die Bewertung des Einflusses von Transmission und Reflexion auf die Bewertung von Licht hinsichtlich der melanopischen Wirkung	43
Literaturhinweise	44

Bilder

Bild 1 — Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ nach Gleichung (18)	14
Bild 2 — Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ nach Gleichung (19)	15
Bild 3 — Wirkungsspektrum für melanopische Lichtwirkungen $s_{\text{mel}}(\lambda)$	25
Bild 4 — Schematische Darstellung der Geometrie zur Beschreibung von Lichtquellen	29
Bild A.1 — Graphische Darstellung der relativen spektralen Strahlungsverteilung von weißen LED nach Tabelle A.1	35
Bild A.2 — Graphische Darstellung der relativen spektralen Strahlungsverteilung von Leuchtstofflampen mit hoher Farbtemperatur nach Tabelle A.1	35

Tabellen

Tabelle 1 — Spektrale optische Dichte $D(\lambda)$ und spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ nach Gleichung (21) und Gleichung (22) für die Altersgruppen 25, 32, 50, 75 und 90 Jahre in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ	17
Tabelle 2 — Näherungsweise Korrekturfaktor für die altersabhängige Linsentransmission für das Alter A für weißes Licht nach Gleichung (23)	18
Tabelle 3 — Korrekturfaktor für die altersabhängige Pupillenverkleinerung nach Gleichung (24)	18
Tabelle 4 — leuchtdichteabhängiger Faktor $c(L)$	19
Tabelle 5 — Melanopische Lichtwirkungen	21
Tabelle 6 — Wirkungsspektrum für melanopische Wirkungen von Licht $s_{\text{mel}}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ innerhalb des Definitionsbereichs $\lambda_u = 380 \text{ nm}$ bis $\lambda_o = 780 \text{ nm}$ in 1-nm-Schritten	23
Tabelle 7 — Vergleich fotopisch und melanopisch bewerteter Lichtströme für verschiedene Lichtarten	26
Tabelle A.1 — Auf den Maximalwert 1 normierte spektrale Strahlungsverteilungen moderner Lichtquellen	32
Tabelle B.1 — Zusammenstellung von melanopische äquivalenten Tageslicht-Größen	37
Tabelle C.1 — Wirkungsspektrum für melanopische Wirkungen von Licht $s_{\text{mel}}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ innerhalb des Definitionsbereichs $\lambda_u = 380 \text{ nm}$ bis $\lambda_o = 780 \text{ nm}$. .	39
Tabelle D.1 — Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor (MDER), melanopischer Wirkungsfaktor und Korrekturfaktoren für die altersabhängige Linsentransmission bei verschiedenen Lichtarten nach DIN 5033-7 und CIE 15:2018	40
Tabelle D.2 — Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor (MDER), melanopischer Wirkungsfaktor und Korrekturfaktoren für die altersabhängige Linsentransmission bei verschiedenen modernen Lichtquellen	41

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 058-00-27 AA „Wirkung des Lichts auf den Menschen“ im DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL) erarbeitet.

Technische Spezifikationen sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerks.

Eine Technische Spezifikation ist das Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt oder wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens von DIN noch nicht als Norm herausgegeben wird.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Erfahrungen mit dieser Technischen Spezifikation sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an NALichttechnik@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <http://www.din.de/stellungnahme> abgerufen werden;
- oder in Papierform an DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL), Deutsches Institut für Normung e.V., 10772 Berlin (Hausanschrift: Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin).

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

Änderungen

Gegenüber DIN SPEC 5031-100:2015-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Begriffe und Definitionen an die internationale Norm CIE S 026 angepasst und fehlende Begriffe und Definitionen ergänzt;
- b) Korrekturfunktion für die altersabhängige Linsentransmission nach CIE 203:2012 neu festgelegt und vereinfachte Näherungsformel für die Bewertung der altersabhängigen Linsentransmission bei weißem Licht ergänzt;
- c) Korrekturfunktion für die melanopische Bewertung der materialabhängigen Transmission und Reflexion von Licht eingeführt.

Frühere Ausgaben

DIN V 5031-100: 2009-06
DIN SPEC 5031-100: 2015-08

Einleitung

Licht, das über das Auge wirkt, löst unterschiedliche nichtvisuelle Wirkungen (en: non image forming effects, non-visual effects, ipRGC-influenced responses) aus. Gegenstand dieses Dokuments sind die nichtvisuellen Wirkungen des Lichts. Dazu können z. B. eine Unterdrückung der Melatoninausschüttung, eine Veränderung der Herzrate, Einflüsse auf die Thermoregulation, die Wachheit, Veränderungen der Frequenz im Elektroenzephalogramm und eine Verschiebung der Phase des circadianen Systems gehören. Darüber hinaus sind Reaktionen innerhalb einiger Sekunden bis Minuten auf kurzweiliges Licht wie z. B. die Regulation der Pupillenweite oder Veränderungen der Hirnaktivität möglich.

Diese Wirkungen wurden in der Vergangenheit häufig als „biologische“ Wirkungen des Lichts bezeichnet, um sie von den visuellen Wirkungen zu unterscheiden. Jedoch ist dieser Begriff missverständlich, da alle Wirkungen auf den Menschen biologischer Natur sind. In internationalen Dokumenten wie dem technischen Bericht CEN/TR 16791 [25] oder im internationalen Standard CIE S 026 werden Begriffe wie nichtvisuelle Wirkungen oder ipRGC-beeinflusste Wirkungen verwendet. In DIN SPEC 5031-100:2015-08 wurde der Begriff melanopische Lichtwirkung eingeführt. Er wird auch in diesem Dokument beibehalten. CIE S 026 führt auf, dass neben den melanopsinhaltigen intrinsisch fotosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC, en: intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) auch Zapfen und Stäbchen in der Netzhaut über die ipRGC an der Vermittlung nichtvisueller Wirkungen beteiligt sein können. Seitens der Wissenschaft sind Wirkungen, welche über die intrinsische Lichtempfindlichkeit der melanopsinhaltigen Ganglienzellen vermittelt werden, ausreichend quantifiziert, um sie in einer DIN/TS berücksichtigen zu können.

Für wissenschaftliche Studien zu nichtvisuellen Wirkungen wird empfohlen, Licht auch hinsichtlich seiner Wirkung auf die bekannten lichtempfindlichen Fotorezeptoren Zapfen und Stäbchen zu quantifizieren, wie in CEN/TR 16791 [25] und in CIE S 026 definiert. Für die praktische Anwendung in der Beleuchtung ist nach heutigem Stand der Kenntnisse in den meisten Fällen eine Quantifizierung über die melanopische Wirkung ausreichend. Weitere Hinweise zur Dokumentation von lichttechnischen Parametern bei Studien zu nichtvisuellen Wirkungen von Licht finden sich in Abschnitt 5. Wichtige Hinweise, welche Größen und Parameter bei Studien hinsichtlich nichtvisueller Wirkungen in Berichte oder Veröffentlichungen aufgenommen werden sollten, finden sich auch in der CIE Technical Note CIE TN 011.

Melanopische Lichtwirkungen werden durch melanopsinhaltige Ganglienzellen im Auge des Menschen vermittelt. Erste quantitative Belege für die Existenz dieser vorher unbekannten Art von Fotorezeptor im Auge stammen aus dem Jahre 2001 (vgl. [2] [3]). In der Folge wurden die ipRGC mit ihrem lichtempfindlichen Farbstoff Melanopsin nachgewiesen [12]. Da für diese Ganglienzellen ein eigenes Wirkungsspektrum nachgewiesen wurde, wird dieses auch für die Bewertung von Licht hinsichtlich seiner melanopischen Wirkungen herangezogen. Es wäre unzutreffend, Licht im Hinblick auf seine melanopischen Wirkungen wie bisher ausschließlich mit dem in DIN 5031-3 beschriebenen spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen zu bewerten. Visuelle und in diesem Dokument beschriebene melanopische Lichtwirkungen werden beide durch Lichtreize ausgelöst. Aufgrund unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeiten, unterschiedlicher Nervenpfade für die Weiterleitung der durch diese Lichtreize ausgelösten Signale und grundsätzlich verschiedener Wirkungsweisen werden die melanopischen Lichtwirkungen in diesem Dokument unabhängig von den visuellen Wirkungen betrachtet. Dies schließt nicht aus, dass Wechselwirkungen zwischen visuellen und nichtvisuellen Wirkungen bestehen. Weiterhin ist bekannt, dass auch die Fotorezeptoren im Auge, welche für visuelle Wirkungen verantwortlich sind, zu den nichtvisuellen Wirkungen beitragen. Dies ist mit Ausnahme des Pupillenreflexes bisher nicht ausreichend quantifizierbar.

Unter dem Begriff „melanopische Lichtwirkungen“, werden die oben genannten nichtvisuellen Effekte verstanden, die ausschließlich über das Auge vermittelt werden. Andere Wirkungen optischer Strahlung, z. B. Wirkungen von ultravioletter Strahlung auf Auge und Haut oder Wirkungen von infraroter Strahlung werden in diesem Dokument nicht behandelt. Solche Wirkungen und deren Wirkungsspektren sind in DIN 5031-10 beschrieben. Ultraviolette und infrarote Strahlung tragen zu den melanopischen Wirkungen nicht bei.

Da die Datenlage aufgrund der Neuigkeit der Entdeckung der ipRGC noch nicht in allen Aspekten gesichert ist, müssen, falls neue wissenschaftliche Erkenntnisse vorgelegt werden, möglicherweise das aufgeführte Wirkungsspektrum, oder Begriffe und Definitionen an diese Erkenntnisse angepasst werden. Auch die Internationale Normung hat die Beschreibung der nichtvisuellen Wirkungen aufgenommen und erste Dokumente

veröffentlicht. Mit der Vorlage dieser überarbeiteten Ausgabe wird im Wesentlichen die Vorgängerversion von 2015 an neue Begriffe, die international eingeführt wurden, angepasst. 2011 wurde ein Vorschlag für ein melanopisches Wirkungsspektrum veröffentlicht [1]. Das Wirkungsspektrum für melanopische Wirkungen, das in diesem Dokument verwendet wird, stammt aus dem Jahre 2014 [24], wurde bereits in der DIN SPEC 5031-100:2015-08 eingeführt und wird in dieser überarbeiteten Ausgabe unverändert weiterverwendet, wobei die Schrittweite durch kubische Spline-Interpolation von 5 nm auf 1 nm reduziert wurde. Dies entspricht auch der Vorgehensweise bei der internationalen Norm CIE S 026, so dass die Wirkungsspektren in diesem Dokument und in CIE S 026 übereinstimmen.

Die Bedeutung der melanopischen Lichtwirkung auf den Menschen ist so groß, dass es sinnvoll ist, eine DIN/TS zu erstellen, damit in der praktischen Anwendung einheitliche Bewertungsverfahren angewandt werden können. Diese sind beispielsweise für die Vergleichbarkeit wissenschaftlicher oder anwendungsnaher Studien erforderlich, oder für die Lichtplanung, wenn diese besonderen Anforderungen an die genannten melanopischen Lichtwirkungen genügen soll. Durch die erfolgte Anpassung an internationale Dokumente ist dieses Dokument auch widerspruchsfrei zu dem internationalen Standard CIE S 026.

Kurzwellige Spektralanteile bergen bei Vorliegen weiterer Randbedingungen, insbesondere bei sehr hohen Bestrahlungsstärken oder sehr hohen spektralen Strahldichten potenzielle Risiken für das Auge. Die Bewertung dieser Risiken durch optische Strahlung ist für Beschäftigte an Arbeitsplätzen in der EU Richtlinie 2006/25/EG [22] und der Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV [23], detailliert festgelegt. Die für die messtechnische Bewertung relevante Norm ist die DIN EN 62471 (VDE 0837-471). Da die Expositionsgrenzwerte der EU-Richtlinie 2006/25/EG, auf die in der OStrV verwiesen wird, für jede Auslegung von Beleuchtung, somit auch unter melanopischen Gesichtspunkten, verbindlich sind, bedarf es keiner weiteren Ausführung in diesem Dokument.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die spektrale Bewertung der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich zur Beurteilung melanopischer Lichtwirkungen fest. Weiterhin werden Begriffe und Wirkungsspektren zur Charakterisierung der melanopischen Lichtwirkungen festgelegt.

Dieses Dokument ermöglicht eine vereinheitlichte Bewertung von Lichtquellen und Beleuchtungssituationen, unabhängig davon, ob die Wirkungsspektren eine exakte Beschreibung der melanopischen Lichtwirkungen liefern.

Dieses Dokument legt auch Regelungen fest, wie zur vollständigen Beschreibung der Lichtexposition von Personen in wissenschaftlichen Experimenten und in Praxisanwendungen zu verfahren ist, wenn melanopische Lichtwirkungen im Fokus stehen.

2 Normative Verweisungen

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

DIN 5031-3:1982-03, *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*

DIN EN 13032-2, *Licht und Beleuchtung — Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten — Teil 2: Darstellung der Daten für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien*

DIN EN 12464-1, *Licht und Beleuchtung — Beleuchtung von Arbeitsstätten — Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*

DIN EN 62471 (VDE 0837-471), *Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen*

CIE 203 incl. Erratum 1, *A Computerized Approach to Transmission and Absorption Characteristics of the Human Eye*

CIE S 026:2018, *CIE-System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 5031-3 und die folgenden Begriffe.

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

— DIN-TERMminologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term/>

— DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

melanopische Lichtwirkungen en **melanopic effects of light**

durch Licht über die Stimulation der intrinsisch lichtempfindlichen Ganglienzellen (ipRGC) in der Netzhaut des Auges vermittelte Wirkungen auf physiologische und psychologische Vorgänge im menschlichen Organismus

Anmerkung 1 zum Begriff: In früheren Ausgaben wurde der Begriff „biologische“ Lichtwirkung verwendet. Dies wird als nicht spezifisch genug angesehen, da der Begriff „biologisch“ für alle Wirkungen auf den Menschen, selbst für den Sehvorgang zutreffend wäre.

Anmerkung 2 zum Begriff: Da die Wirkung auf dem Farbstoff Melanopsin beruht, wird die Bewertung, welche auf Basis dieses Wirkungsspektrums erfolgt, als „melanopisch“ bezeichnet. Dieses Kunstwort wurde gewählt, um sprachlich an die gängigen Begriffe „fotopisch“, „skotopisch“ oder „mesopisch“ anzuschließen und eine einfache Übersetzung ins Englische zu ermöglichen. Der Begriff „melanopic“ wird in englischsprachiger Fachliteratur für eine Bewertung der von retinalen Ganglienzellen vermittelten melanopischen Wirkung gebraucht.

Anmerkung 3 zum Begriff: International werden die Begriffe „non-visual effects“, „non-image-forming effects“ oder „ipRGC-influenced effects“ gebraucht. Die damit beschriebenen Wirkungen werden direkt oder indirekt durch die melanopsinhaltigen retinalen Ganglienzellen (ipRGC) beeinflusst. Da der Haupteinfluss auf die direkte Stimulation der ipRGC zurückgeht, wird in diesem Dokument der Begriff „melanopisch“ für diese nichtvisuellen Wirkungen verwendet.

3.2

melanopisch bewertete Strahlungsgröße

$X_{e, \text{mel}}$

en **melanopic radiant quantity**

mit dem melanopischen Wirkungsspektrum bewertete Strahlungsgröße

$$X_{e, \text{mel}} = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Dabei ist

$X_{e, \text{mel}}$ die melanopisch bewertete Strahlungsgröße;

$X_{\lambda}(\lambda)$ die spektrale strahlungsphysikalische Größe;

$s_{\text{mel}}(\lambda)$ das Wirkungsspektrum für die betrachtete melanopische Wirkung, bezogen auf den Maximalwert $s_{\text{mel}, \text{max}} = 1$, siehe Tabelle 6;

λ_u, λ_o die unteren und oberen Grenzwellenlängen für den Definitionsbereich der melanopischen Wirkung, siehe Tabelle 6.

Anmerkung 1 zum Begriff: Zusätzlich zum Index „mel“, der die melanopische Bewertung widerspiegelt, wird der Index „e“ verwendet, um die radiometrische Größe zu kennzeichnen und von fotometrischen, mit $V(\lambda)$ bewerteten Größen, wie in 3.5. und folgenden verwendet, zu unterscheiden.

Anmerkung 2 zum Begriff: Gleichung (1) impliziert, dass sich die Gesamtwirkung additiv aus den Einzelwirkungen monochromatischer Strahlung zusammensetzt (Additivitätsgesetz). Wissenschaftliche Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies bei melanopischen Wirkungen in erster Näherung gilt [1].

Anmerkung 3 zum Begriff: Das Wirkungsspektrum $s_{\text{mel}}(\lambda)$ nach [24] basiert auf Daten eines 32-jährigen Referenzbeobachters. Korrekturfaktoren für andere Altersgruppen sind in 3.8 aufgeführt.

Anmerkung 4 zum Begriff: Eine melanopische Lichtwirkung hängt im Allgemeinen nicht linear von der melanopisch wirksamen Strahlungsgröße ab. Da dieses Dokument keine Wirkung bewertet und damit auch keine Dosis-Wirkungsfunktion beschreibt, sondern die spektrale Strahlungsverteilung quantifiziert, spielt diese Betrachtung hier keine Rolle.

Anmerkung 5 zum Begriff: In DIN 5031-10 wird der Begriff „Wirkungsspektrum“ für die relative spektrale Empfindlichkeit für eine melanopische Wirkung verwendet. Auch die Begriffe „Spektrale Wirkungsfunktion“ oder „Aktionsspektrum“ sind gebräuchlich.

Anmerkung 6 zum Begriff: Die Integralbildung nach Gleichung (1) setzt stetige mathematische Funktionen für $X_{\lambda}(\lambda)$ und für $s_{\text{mel}}(\lambda)$ voraus. In der Praxis wird das Integral durch eine Summe diskreter Werte angenähert. Dies ist in Gleichung (2) dargestellt. Die Genauigkeit dieser Annäherung hängt wesentlich von der Schrittweite $\Delta\lambda$ ab, in der die Einzelwerte vorliegen. Die in diesem Dokument dargestellten Zahlenwerte basieren auf einer Schrittweite für $\Delta\lambda$ von 1 nm. Dies stellt in der Praxis im Allgemeinen eine ausreichend gute Annäherung dar. Bei Verwendung anderer Schrittweiten ist mit

Abweichungen der abgeleiteten Größen zu rechnen. Im Anhang C ist das Wirkungsspektrum für melanopische Wirkungen informativ auch in 5-nm-Schritten dargestellt.

$$X_{e, \text{mel}} = \sum_{n=1}^{n=m} X_{\lambda}(\lambda_n) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda_n) \cdot \Delta\lambda \quad (2)$$

Dabei ist

$X_{\lambda}(\lambda_n)$ die spektrale strahlungsphysikalische Größe; liegt i. A. vor als Reihe von $n = 1$ bis m diskreter Werte wie sie z. B. von einem Spektralradiometer geliefert werden. Dabei beziehen sich die Zahlenwerte der spektralen Strahlungsgröße auf das Wellenlängenintervall. Bei gleichen spektralen Strahlungsverteilungen unterscheiden sich die Beträge dieser Zahlenwerte je nach verwendetem Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$. Die Stützstellen λ_n sind durch die Definitionsstellen von $s_{\text{mel}}(\lambda_n)$ gegeben. Für den Fall, dass die spektrale Strahlungsgröße $X_{\lambda}(\lambda_n)$ in anderen Intervallen vorliegt, ist es sinnvoller, das Wirkungsspektrum auf die vorliegenden Stützstellen von $X_{\lambda}(\lambda_n)$ zu interpolieren als die spektrale Strahlungsgröße auf die Stützstellen des Wirkungsspektrums. Dies ist insbesondere bei stärker strukturierten Spektren (z. B. Linienspektren) sinnvoller als eine Interpolation der spektralen strahlungsphysikalischen Größe auf die definierten Stützstellen der Wirkungsfunktion;

$s_{\text{mel}}(\lambda_n)$ das Wirkungsspektrum für die betrachtete melanopische Wirkung, bezogen auf den Maximalwert $s_{\text{mel}, \text{max}} = 1$, siehe Tabelle 6;

$\Delta\lambda$ die Schrittweite in nm in der die diskreten Werte von $X_{\lambda}(\lambda_n)$ und $s_{\text{mel}}(\lambda)$ vorliegen;

n ein fortlaufender Index von $n = 1$ bis zum Maximalwert m . Dabei zeigt i. A. der Index $n = 1$ auf den Wert von Strahlungsgröße bzw. Wirkungsspektrum für die untere Grenzwellenlänge λ_u nach Gleichung (1) und der Index „ m “ auf die Werte für die obere Grenzwellenlänge λ_o . Bei einer Schrittweite von 1 nm geht „ n “ i. A. von $n = 1$ für $\lambda = 380$ nm bis $n = m = 401$ für $\lambda = 780$ nm.

Anmerkung 7 zum Begriff: Hinsichtlich einer detaillierteren Darstellung zum Umgang mit Gleichungen wie Gleichung (1) und Gleichung (2) siehe auch DIN 5031-10:2018-03, Anhang C; Interpolation von Wirkungsspektren und Integration der effektiven Strahlungsleistung

Anmerkung 8 zum Begriff: Melanopische Wirkungen werden über das Auge vermittelt. Daher werden in der Praxis die Strahlungsgrößen bewertet, welche in der Zielanwendung ins Auge des Nutzers gelangen können. Dies ist im Wesentlichen Licht, welches aus dem vorderen Halbraum auf das Auge des Nutzers fällt. Nach CIE S 026 ist ein Winkelbereich von etwa 50° nach oben, max. 70° nach unten und jeweils 90° nach rechts und links gegenüber der Blickrichtung dafür relevant.

Anmerkung 9 zum Begriff: Bei der Charakterisierung von Produkten ist es möglich die vom Produkt abgestrahlten Strahlungsgrößen oder melanopisch äquivalenten Tageslicht-Größen zu bewerten.

3.3 melanopischer Wirkungsfaktor (der sichtbaren Strahlung)

$a_{\text{mel}, v}$

en **melanopic factor (of luminous radiation)**

Verhältnis der melanopisch wirksamen Strahlungsgröße zu der mit der Empfindlichkeit für Tagessehen bewerteten fotometrisch wirksamen Strahlungsgröße nach Gleichung (3)

$$a_{\text{mel}, v} = \frac{\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (3)$$

Dabei ist

$a_{\text{mel}, v}$ der melanopischer Wirkungsfaktor;

$V(\lambda)$ der spektraler Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen nach DIN 5031-3.

Anmerkung 1 zum Begriff: Der melanopische Wirkungsfaktor ist eine dimensionslose Größe.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ist eine fotometrische Größe X_v (z. B. Leuchtdichte) für Tagessehen bekannt, lässt sich mit dem melanopischen Wirkungsfaktor die entsprechende melanopische Strahlungsgröße $X_{e, mel}$ nach Gleichung (4) ermitteln.

$$X_{e, mel} = \frac{1}{K_{cd}} \cdot a_{mel, v} \cdot X_v \quad (4)$$

Aus Gleichung (4) wird abgeleitet

$$a_{mel, v} = \frac{X_{e, mel}}{X_v} \cdot K_{cd} \quad (5)$$

In Gleichung (4) und Gleichung (5) ist

X_v die fotometrische Größe für Tagessehen entsprechend DIN 5031-3;

$K_{cd} = 683 \text{ lm/W}$ der Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents für Tagessehen nach DIN 5031-3.

Anmerkung 3 zum Begriff: Für eine bessere Vergleichbarkeit ist die Angabe der Wirkungsfaktoren auf drei Stellen nach dem Komma hinreichend.

Anmerkung 4 zum Begriff: Es wird auf Anmerkung 6 zum Begriff in 3.2 hingewiesen, die für Gleichung (3) entsprechend gilt.

Anmerkung 5 zum Begriff: Tabelle D.1 und Tabelle D.2 im Anhang D zeigen Beispiele für Werte von $a_{mel, v}$ für verschiedene Lichtarten.

3.4 melanopische Ausbeute (der sichtbaren Strahlung)

$K_{mel, v}$ en **melanopic efficacy (of luminous radiation)**

Verhältnis der melanopisch wirksamen Strahlungsgröße zu der fotometrischen Größe für Tagessehen

$$K_{mel, v} = \frac{\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{mel}(\lambda) \cdot d\lambda}{K_{cd} \cdot \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Gleichung (6) kann durch Anwendung der Gleichung (4) und Gleichung (5) in die Gleichung (7) überführt werden.

$$K_{mel, v} = \frac{X_{e, mel}}{X_v} = \frac{a_{mel, v}}{K_{cd}} \quad (7)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Definition in Gleichung (6) entspricht den Festlegungen des Dokuments CIE TN 002:2014 Relating Photochemical and Photobiological Quantities to Photometric Quantities, Abschnitt 4.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Einheit von $K_{mel, v}$ ist W/lm. Aufgrund der kleinen Zahlenwerte kann eine Angabe in mW/lm sinnvoll sein

Anmerkung 4 zum Begriff: Es wird auf Anmerkung 6 zum Begriff in 3.2 hingewiesen, die für Gleichung (6) entsprechend gilt.

3.5

melanopisches Tageslichtäquivalent

$K_{\text{mel, D65}}$

en **melanopic daylight equivalent**

Verhältnis der fotometrischen Größe für Tagessehen zu der melanopisch wirksamen Strahlungsgröße, für eine Lichtquelle, deren Strahlungsfunktion derjenigen von Normlichtart D65 entspricht

$$X_{\text{e, mel, D65}} = \int_{\lambda_{\text{u}}}^{\lambda_{\text{o}}} X_{\lambda, \text{D65}}(\lambda) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{a_{\text{mel, v, D65}}}{K_{\text{cd}}} \cdot X_{\text{v, D65}} \quad (8)$$

daraus leitet sich das melanopische Tageslichtäquivalent nach Gleichung (9) wie folgt ab:

$$K_{\text{mel, D65}} = \frac{K_{\text{cd}}}{a_{\text{mel, v, D65}}} \quad (9)$$

Dabei ist

$X_{\text{e, mel, D65}}$ die melanopische Strahlungsgröße für Normlichtart D65;

$X_{\lambda, \text{D65}}(\lambda)$ die spektrale Strahlungsverteilung für Normlichtart D65;

$a_{\text{mel, v, D65}}$ der melanopische Wirkungsfaktor für Normlichtart D65 ($a_{\text{mel, v, D65}} = 0,9058$);

$X_{\text{v, D65}}$ die lichttechnische Größe für Normlichtart D65;

K_{cd} der Maximalwert des fotometrischen Strahlungsäquivalents ($K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$).

Anmerkung 1 zum Begriff: Das melanopische Tageslichtäquivalent ist der Kehrwert der melanopischen Ausbeute (siehe 3.4) für eine Strahlungsgröße, deren Strahlungsfunktion derjenigen von Normlichtart D65 entspricht. Die Einheit von $K_{\text{mel, D65}}$ ist lm/W. Durch Einsetzen der Zahlenwerte in Gleichung (9) ergibt sich der Zahlenwert für $K_{\text{mel, D65}}$ in Gleichung (10).

$$K_{\text{mel, D65}} = 754,03 \text{ lm/W} \quad (10)$$

3.6

melanopisch äquivalente Tageslicht-Größe

$X_{\text{v, mel, D65}}$

en **melanopic equivalent Daylight quantity**

Produkt aus der melanopisch bewerteten Strahlungsgröße $X_{\text{e, mel}}$ und dem melanopischen Tageslichtäquivalent $K_{\text{mel, D65}}$ — dabei werden den aus der Fotometrie bekannten lichttechnischen Größen, wie sie in DIN 5031-3:1982-03, 3.1, definiert sind, die beschreibenden Begriffe „melanopisch äquivalente(r) Tageslicht-“ vorausgestellt

$$X_{\text{v, mel, D65}} = K_{\text{mel, D65}} \cdot X_{\text{e, mel}} \quad (11)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: In der vorherigen Ausgabe dieses Dokuments wurde im Jahre 2015 die gleiche Größe definiert und als „melanopische tageslicht-äquivalente lichttechnische Größe“ bezeichnet. Damit die Begriffe auch im internationalen Kontext konsistent definiert sind, wurde für diese Ausgabe der deutschsprachige Begriff an den in der CIE S 026 definierten Begriff angelehnt. Das mathematische Berechnungsverfahren ist identisch geblieben, so dass berechnete Zahlenwerte weiterhin Gültigkeit haben.

Anmerkung 2 zum Begriff: In CIE S 026 wurde der Begriff „ α -opic equivalent daylight (D65) illuminance“ definiert. Dabei wird für melanopische Wirkungen „ α -opic“ durch „melanopic“ ersetzt. Die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke nach diesem Dokument entspricht der in CIE S 026 definierten „melanopic equivalent daylight (D65) illuminance“. Daher kann anstelle des Begriffs auch die Abkürzung MEDI verwendet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Index „v“ wird hier und in den folgenden Gleichungen für fotometrische (mit $V(\lambda)$ bewertete) Größen verwendet, um diese von radiometrischen Größen eindeutig zu unterscheiden. Daher wird der Index „v“ in diesem Dokument auch für melanopisch äquivalente Tageslicht-Größen verwendet.

Anmerkung 4 zum Begriff: Dies bedeutet, dass die lichttechnische Größe $X_{v, \text{mel}, D65}$ nicht fotopisch mit $V(\lambda)$ und dem fotometrischen Strahlungsäquivalent K_{cd} , sondern melanopisch mit dem in 4.3 definierten Wirkungsspektrum $s_{\text{mel}}(\lambda)$ und dem in 3.5 definierten melanopischen Tageslichtäquivalent $K_{\text{mel}, D65}$ bewertet wird.

Anmerkung 5 zum Begriff: $X_{v, \text{mel}, D65}$ kann aus der zugehörigen visuell bewerteten lichttechnischen Größe X_v und dem melanopischen Wirkungsfaktor $a_{\text{mel}, v}$ nach Gleichung (12) bzw. dem melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktor nach Gleichung (13) errechnet werden:

$$X_{v, \text{mel}, D65} = \frac{K_{\text{mel}, D65}}{K_{cd}} \cdot a_{\text{mel}, v} \cdot X_v = 1,104 \cdot a_{\text{mel}, v} \cdot X_v \quad (12)$$

Wenn zum Beispiel X_v für die Beleuchtungsstärke E_v steht, entspricht $X_{v, \text{mel}, D65}$ der melanopisch äquivalenten Tageslicht-Beleuchtungsstärke $E_{v, \text{mel}, D65}$. Weitere Beispiele sind im Anhang B aufgeführt.

3.7

melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor

MDER, en: Melanopic Daylight Efficacy Ratio

$\gamma_{\text{mel}, v, D65}$

Verhältnis der melanopisch äquivalenten Tageslicht-Größe zur entsprechenden fotometrischen Größe für eine bestimmte Lichtart

$$\gamma_{\text{mel}, v, D65} = \frac{X_{v, \text{mel}, D65}}{X_v} \quad (13)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Nach Umstellung der Gleichung (13) kann der melanopische Tageslicht-Effizienzfaktor zur Bestimmung der melanopisch äquivalenten Tageslicht-Größe aus der entsprechenden fotometrischen Größe genutzt werden, wenn $\gamma_{\text{mel}, v, D65}$ bekannt ist.

$$X_{v, \text{mel}, D65} = \gamma_{\text{mel}, v, D65} \cdot X_v$$

Ein Vergleich mit Gleichung (12) zeigt, dass $\gamma_{\text{mel}, v, D65}$ das Produkt aus den Faktoren vor der fotometrischen Größe X_v in Gleichung (12) ist.

$$\gamma_{\text{mel}, v, D65} = \frac{K_{\text{mel}, D65}}{K_{cd}} \cdot a_{\text{mel}, v} = 1,10375 \cdot a_{\text{mel}, v} \quad (14)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Der in diesem Dokument definierte Faktor $\gamma_{\text{mel}, v, D65}$ nach Gleichung (13) wurde in der CIE S 026 für melanopische Wirkungen als „Melanopic Daylight Efficacy Ratio“ definiert. Anstelle des Begriffs kann auch die Abkürzung MDER verwendet werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Beispiele dafür sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Anmerkung 4 zum Begriff: In der vorherigen Ausgabe dieses Dokuments wurde der Faktor nicht mit γ sondern mit m bezeichnet. Weiterhin waren die Indizes „mel“ und „v“ des Faktors γ in der Reihenfolge vertauscht. Das in der aktuellen Ausgabe verwendete Symbol und die Reihenfolge der Indizes entspricht dem internationalen Standard CIE S 026.

Anmerkung 5 zum Begriff: In [24] ist eine melanopische Beleuchtungsstärke (melanopic lux) definiert, welche sich im Zahlenwert von der hier definierten melanopisch äquivalenten Tageslicht-Beleuchtungsstärke um den Faktor $1/a_{\text{mel}, v, D65} = 1/0,906$ unterscheidet. Der Gebrauch dieser Größe und der Einheiten „melanopic lux“ oder „melanopic equivalent lux“ sind nicht mit dem SI-System vereinbar und daher unzulässig.

3.8

altersabhängige Korrekturfaktoren

en age-related correction factors

Es wird zwischen einer Korrektur aufgrund der mit zunehmendem Alter reduzierten Linsentransmission und einer Korrektur aufgrund des mit zunehmendem Alter kleineren Pupillendurchmessers unterschieden. Beide Korrekturen können zusammengefasst werden. Dies ist in einer Näherung in 3.8.1 dargestellt. Die dieser Näherung zugrunde liegenden Korrekturen werden einzeln in 3.8.2 für die Linsentransmission und in 3.8.3 für die Pupillenverkleinerung im Detail dargestellt.

Anmerkung 1 zum Begriff: In CIE S 026 wird nur die Korrektur für die altersabhängige Linsentransmission definiert. Die Korrektur nach 3.8.2 ist identisch mit der Definition nach CIE S 026.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Korrektur für den reduzierten Pupillendurchmesser mit zunehmendem Alter nach 3.8.3 ist eine Korrektur, die auf den optisch-geometrischen Änderungen des alternden Auges basiert. Es ist nicht belegt, welchen Beitrag die darauf beruhende reduzierte Lichtstimulation der ipRGC auf die nichtvisuelle Wirkung hat. Die Studienlage dazu ist nicht einheitlich. Während in manchen Fällen Studien mit älteren Menschen eine verbesserte Aktivität am Tag und verbesserten Schlaf bei Lichtbedingungen nachweisen konnten, die nur eine Erhöhung um den Korrekturfaktor nach 3.8.2 berücksichtigen, waren in anderen Studien Erhöhungen nach 3.8.1, und somit unter Berücksichtigung von 3.8.2 und zusätzlich der Pupillenverkleinerung nach 3.8.3, erforderlich.

3.8.1

Korrekturfaktor für das Alter bei melanopischen Wirkungen von Licht

$k_{\text{mel}}(A)$

en age-related correction factor for melanopic light effects

Faktor zur Korrektur der melanopischen Strahlungsgröße im Hinblick auf Personen des Alters A unter Berücksichtigung der altersabhängigen Transmissionsänderung und Pupillenverkleinerung

$$k_{\text{mel}}(A) = k_{\text{mel,trans}}(A) \cdot k_{\text{Pupille}}(A) \quad (15)$$

Dabei ist

$k_{\text{mel,trans}}(A)$ der vom Alter A abhängige Korrekturfaktor für die Reduzierung der Transmission der Augenmedien nach 3.8.2;

$k_{\text{Pupille}}(A)$ der vom Alter A abhängige Korrekturfaktor für die Pupillenverkleinerung nach 3.8.3.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Korrekturfaktoren für das Alter $k_{\text{mel}}(A)$, $k_{\text{mel,trans}}(A)$ und $k_{\text{Pupille}}(A)$ sind dimensionslose Größen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für den 32-jährigen Referenzbeobachter sind die Korrekturfaktoren identisch 1. Es gilt: $k_{\text{mel}}(32) = 1$, $k_{\text{mel,trans}}(32) = 1$ und $k_{\text{Pupille}}(32) = 1$.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ist die fotometrische Größe X_v für Tagessehen bekannt, lässt sich daraus eine altersabhängige melanopisch bewertete Strahlungsgröße $X_{\text{e, mel}}(A)$ nach Gleichung (16) berechnen unter Beachtung von Gleichung (4):

$$X_{\text{e, mel}}(A) = X_v \cdot \frac{a_{\text{mel,v}}}{K_m} \cdot k_{\text{mel}}(A) \quad (16)$$

Anmerkung 4 zum Begriff: Der Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ berücksichtigt nur die Reduzierung der Transmission der Augenmedien und die Verkleinerung der Pupille mit dem Alter, nicht aber mögliche altersbedingte Veränderungen der physiologischen Prozesse, welche den melanopischen Wirkungen von Licht zugrunde liegen.

Anmerkung 5 zum Begriff: Der gleiche Korrekturfaktor für das Alter kann auch auf die in 3.6 definierten melanopisch äquivalenten Tageslicht-Größen angewandt werden. Aus Anwendung von Gleichung (11) auf Gleichung (16) folgt.

$$X_{v, \text{mel,D65}}(A) = X_{v, \text{mel,D65}} \cdot k_{\text{mel}}(A) \quad (17)$$

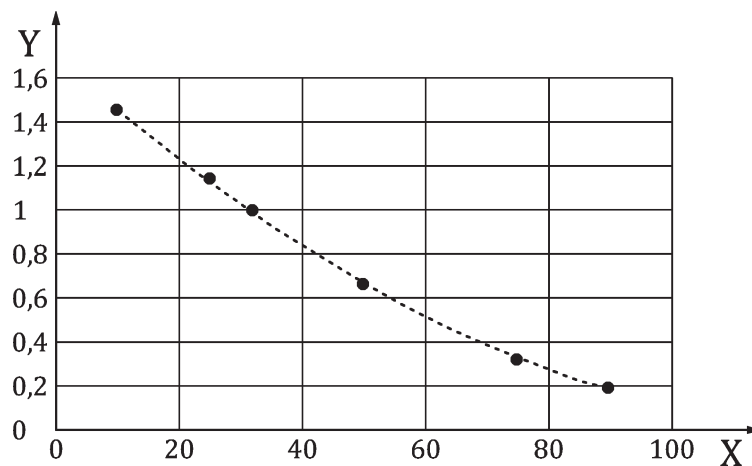
Anmerkung 6 zum Begriff: Bei weißem Licht kann, wie in 3.8.2, Anmerkung 4 zum Begriff dargelegt, aus den vereinfachten Werten für $k_{\text{mel, trans}}(A)$ nach Tabelle 2 und dem Pupillendurchmesser $k_{\text{Pupille}}(A)$ nach Tabelle 3 der altersabhängige Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ durch eine quadratische Näherungsformel nach Gleichung (18), siehe Bild 1, bestimmt werden:

$$k_{\text{mel}}(A) = 0,000\,095 \cdot A^2 - 0,025\,5 \cdot A + 1,71 \quad (18)$$

Die Abweichung für $k_{\text{mel}}(A)$ gegenüber der vollständigen Rechnung nach 3.8.2 und 3.8.3 ist dabei kleiner als 0,02 — entsprechend 2 %. Bei weiterer Vereinfachung unter Verwendung einer linearen Näherung ergibt sich:

$$k_{\text{mel}}(A) = -0,015\,8 \cdot A + 1,54 \quad (19)$$

Für den Fall der linearen Näherung ist die Abweichung kleiner als 8 %. Gleichung (19), siehe Bild 2, kann auch so interpretiert werden, dass die melanopisch wirksame Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut, unter Berücksichtigung von Linsentransmission und Pupillenverkleinerung für jedes Lebensjahr über 32 Jahre um etwa 1,6 % zurückgeht bzw. für jüngere Personen entsprechend ansteigt.



Legende

X Alter A in Jahren

Y Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ nach Gleichung (18) als gepunktete Linie

Bild 1 — Korrekturfaktor $k_{\text{mel}}(A)$ nach Gleichung (18)