

DIN/TS 67600

ICS 17.180.20; 91.160.01

Ersatz für
DIN SPEC 67600:2013-04**Ergänzende Kriterien für die Lichtplanung und Lichtanwendung im Hinblick auf nichtvisuelle Wirkungen von Licht**

Complementary criteria for lighting design and lighting application with regard to non-visual effects of light

Critères complémentaires pour la conception et l'application de l'éclairage en ce qui concerne les effets non visuels de la lumière

Gesamtumfang 75 Seiten

DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL)

Inhalt

	Seite
Vorwort	5
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	10
4 Erweiterte Planung	10
5 Zielgrößen	11
6 Kriterien für nichtvisuell wirksame Beleuchtung	12
6.1 Allgemeines	12
6.2 Spektrale Zusammensetzung des Lichts	14
6.2.1 Allgemeines	14
6.2.2 Spektrale Bewertung von Licht	15
6.2.3 Altersabhängigkeit des Auges	18
6.2.4 Optische Eigenschaften	19
6.3 Beleuchtungsstärke	30
6.4 Räumliche Verteilung des Lichts	31
6.4.1 Allgemeines	31
6.4.2 Fläche und Raumwinkel	32
6.4.3 Lichtrichtung	32
6.5 Dynamik des Lichtes	32
6.5.1 Allgemeines	32
6.5.2 Der Tageszeit angepasstes Licht	33
6.5.3 Der Jahreszeit angepasstes Licht	35
6.5.4 Dauer und Zeitpunkt der Lichtexposition	35
6.5.5 Spektrale und räumliche Verteilung des Lichts über der Zeit	36
6.5.6 Schnelle Lichtänderungen	36
6.6 Energieeffizienz melanopisch wirksamer Beleuchtung	36
6.7 Steuerung von Beleuchtungsanlagen	36
7 Berücksichtigung nichtvisueller Wirkungen in der Lichtplanung	37
7.1 Allgemeines	37
7.2 Aufgaben des Planers	38
7.3 Aufbau und Struktur eines Tagesverlaufes (Modelltag mit gewisser Flexibilität)	42
8 Dokumentation, Einweisung, Inbetriebnahme	50
9 Betrieb und Wartung von Beleuchtungsanlagen	52
Anhang A (informativ) Checklisten und Anwendungsbeispiele	53
A.1 Checkliste für die Planung einer nichtvisuell wirksamen Beleuchtungsanlage	53
A.2 Anwendungsbeispiele	54
A.2.1 Einleitung	54
A.2.2 Private Lebensbereiche	54
A.2.3 Ausbildungsstätten und Schulen	55
A.2.4 Büros	57
A.2.5 Leitwarten	59
A.2.6 Alten- und Pflegeeinrichtungen	60
A.2.7 Gesundheitseinrichtungen	65
A.2.8 Hotelzimmer	66
A.2.9 Schichtarbeit	67
Literaturhinweise	71

Bilder

Bild 1 — Visueller Pfad, retinohypothalamischer Trakt und nichtvisueller Pfad. Der visuelle Pfad führt vom Auge über den Sehnerv zum Sehzentrum im Gehirn. Der retinohypothalamische Trakt (RHT) führt vom Auge zum suprachiasmatischen Nucleus (SCN). Vom SCN werden die Signale über sympathische Fasern im Rückenmark und dem oberen Halsstrangganglion zur Zirbeldrüse weitergeleitet. Der RHT, SCN und sympathische Ganglien bilden den nichtvisuellen Pfad	8
Bild 2 — Melanopischer Wirkungsfaktor $a_{\text{mel},v}$ und MDER nach DIN/TS 5031-100 in Abhängigkeit von der ähnlichsten Farbtemperatur für verschiedene Lichtarten	16
Bild 3 — Visueller und melanopischer Transmissiongrad verschiedener Materialien nach Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8	24
Bild 4 — visueller und melanopischer Reflexionsgrad ausgewählter Materialien für unterschiedliche Lichtarten nach Tabelle 10	29
Bild 5 — Beispiel des Verlaufs von Farbtemperatur und vertikalen Beleuchtungsstärke und MEDI-Wert im Tagesverlauf, gemessen in nördlicher Himmelsrichtung, ohne direkte Sonnenstrahlung (MESZ am 1.5.2009, 48° 8' 14'' nördliche Breite, 11° 34' 32'' östliche Länge)	34
Bild 6 — Melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke MEDI [lx]	38
Bild 7 — Typischer Verlauf der melanopisch äquivalenten Tageslicht-Beleuchtungsstärke bei Tageslicht	43
Bild 8 — Beispiele für den Verlauf der Beleuchtungsstärke am Auge in Annäherung an den natürlichen Tageslichtverlauf	46
Bild 9 — Beispiele für den Verlauf der ähnlichsten Farbtemperatur am Auge in Annäherung an den natürlichen Tageslichtverlauf	49
Bild A.1 — Beispiel einer tageszeitabhängigen Lichtdynamik aus einer Lichtplanung in einer Abendschule. Darstellung unterschiedlicher Tagesphasen im Hinblick auf ihre Relevanz für nichtvisuelle Lichtwirkungen	57
Bild A.2 — Beispiel einer tageszeitabhängigen Lichtdynamik aus einer Lichtplanung im Büro. Bei diesem Beispiel wird von einem Sonnenaufgang um etwa 06:00 Uhr und einem Sonnenuntergang um etwa 20:00 Uhr ausgegangen	58
Bild A.3 — Tageszeitabhängige Lichtdynamik aus einer Lichtplanung im Alten- und Pflegeheim bzw. Krankenhaus. Darstellung unterschiedlicher Tagesphasen im Hinblick auf ihre Relevanz für nichtvisuelle Lichtwirkungen	62
Bild A.4 — Beispiel einer Beleuchtungslösung für Pflegeoasen	63
Bild A.5 — Beispiel einer tageszeitabhängigen Lichtdynamik für Personalräume, Dienstzimmer und Intensiv-Arbeitsbereiche	66

Tabellen

Tabelle 1 — Faktoren, die nichtvisuelle Lichtwirkungen grundsätzlich erhöhen oder verringern können	13
Tabelle 2 — Optimierungsmöglichkeiten für nichtvisuelle Lichtwirkungen	14
Tabelle 3 — Beispiele für Lichtarten	17
Tabelle 4 — Näherungsweise Korrekturfaktor für die altersabhängige Linsentransmission für das Alter A für weißes Licht nach DIN/TS 5031-100	18
Tabelle 5 — Korrekturfaktor für die altersabhängige Pupillenverkleinerung DIN/TS 5031-100	18
Tabelle 6 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch Verglasungen (Beispiele)	20
Tabelle 7 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch Stegplatten (Beispiele)	22

Tabelle 8 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch farbige Kunststoffe (Beispiele) 22

Tabelle 9 — Visueller und melanopischer Reflexionsgrad verschiedener Oberflächen für verschiedene Lichtarten 25

Tabelle 10 — Visueller und melanopischer Reflexionsgrad verschiedener Oberflächen für verschiedene LED-Lichtarten 26

Tabelle 11 — Effektiver melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor $MDER_{eff}$ bei Reflexion von Licht an verschiedenen Materialien (Beispiele) 27

Vorwort

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

Dieses Dokument beschreibt Ursache-Wirkungs-Beziehungen für melanopische Wirkungen von Licht, die für die Lichtplanung herangezogen werden können. Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung bestehender Regeln und Vorschriften kann der Planer neben einer guten Beleuchtung für Sehaufgaben und für emotionale Wirkungen auch die nichtvisuellen Wirkungen von Licht mit einbeziehen. Das Ziel ist im Wesentlichen eine Stabilisierung des circadianen Systems des Menschen mit einem günstigen Einfluss auf Konzentration und Leistungsfähigkeit in den aktiven Phasen und eine nachhaltige Verbesserung der Regeneration in den Erholungsphasen.

Licht ist entscheidend für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Menschen. Es beeinflusst physiologische und psychologische Prozesse und Zustände wie z. B. die Ausschüttung von Hormonen, die Aufmerksamkeit und auch Emotionen.

Die Bedeutung von Tageslicht und geeigneter künstlicher Beleuchtung zur Verbesserung des Wohlbefindens und zur Stabilisierung der inneren Uhr, welche die circadianen Rhythmen taktet, ist unumstritten [1] [2] [3] [4] [5] [6].

Im modernen Alltag entfernen sich Menschen in zunehmendem Maße vom natürlichen Tag-Nacht-Rhythmus. Die Helligkeit und Dynamik des Tageslichts haben ebenso wie die Dunkelheit der Nacht für viele Menschen im täglichen Leben einen immer geringeren Einfluss.

Die Wirkung des Lichts auf den Menschen hängt in komplexer Form hauptsächlich mit den Parametern Lichtspektrum, Bestrahlungsstärke, Lichtverteilung und deren zeitlichen Abfolgen zusammen.

Mit erweiterter Lichtplanung können verschiedene Aspekte für gute Beleuchtung in Bezug auf visuelle, nichtvisuelle und emotionale Wirkungen sowie Energieeffizienz umgesetzt werden. Nichtvisuell wirksame Beleuchtung und Energieeffizienz stehen dabei nicht im Widerspruch. Für nichtvisuell wirksame künstliche Beleuchtung wird Energie aufgewendet, die je nach Lichtspektrum nur in geringem Maß für den eigentlichen Sehvorgang genutzt wird und auch nicht danach zu bewerten ist.

Die über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen unterstützt den menschlichen Organismus und wird entsprechend der Wirkungsfunktion $s_{mel}(\lambda)$ energetisch eigenständig nach DIN/TS 5031-100 bewertet.

Hinweis zu Sicherheit und Gesundheitsschutz: Grundsätzliche gesetzliche Anforderungen an die Beleuchtung hinsichtlich der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit werden in Deutschland in der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)[11] geregelt. In den Anwendungsbereich der ArbStättV fallen alle Arbeitsstätten. Die allgemeinen Anforderungen der ArbStättV hinsichtlich Beleuchtung werden in der Arbeitsstättenregel ASRA3.4 „Beleuchtung“ [12] weiter konkretisiert. Bei Einhaltung der ASRA3.4 kann der Arbeitgeber davon ausgehen, dass die zugrundeliegenden Forderungen der ArbStättV erfüllt sind (Vermutungswirkung). In den derzeitigen Regelungen des Arbeitsschutzes werden die nichtvisuellen Wirkungen des Lichts auf den Menschen nicht explizit behandelt, müssen aber z. B. bei der Gefährdungsbeurteilung durch den Arbeitgeber mitberücksichtigt werden. Bewertungen des Arbeitsschutzes zum Thema enthält die DGUV Information 215-220 „Nichtvisuelle Wirkungen von Licht auf den Menschen“ [4]. Diese Technische Spezifikation enthält detaillierte Kriterien für die Lichtplanung und Anwendung.

Werden die Planung und/oder der Betrieb von Beleuchtungsanlagen in Arbeitsstätten ausschließlich nach diesem Dokument vorgenommen, kann das dazu führen, dass gesetzliche Mindestanforderungen oder die Anforderungen der Unfallversicherungsträger nicht eingehalten sind.

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.

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).

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.

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 67600:2013-04 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) der Begriff „biologische“ Lichtwirkungen wird als „nichtvisuelle“ Lichtwirkungen bezeichnet;
- b) Angaben in dieser DIN/TS 67600 basieren auf der Bewertung nach DIN/TS 5031-100. Es wird nicht mehr die Wirkungsfunktion der Melatoninsuppression, sondern die Empfindlichkeit des Photopigments Melanopsin herangezogen;
- c) Überarbeitung der Daten für Transmission und Reflexion von Materialien mit Aktualisierung der Tabellen in Abstimmung der Angaben zu DIN/TS 5031-100:2021-11;
- d) Aufnahme von Informationen zu Lichtsteuerung und Betrieb der Beleuchtungsanlagen;
- e) Löschung der Erläuterungen, der Übersicht und der Tabelle im Anhang A;
- f) angepasste erläuternde Beispiele sind jetzt im Anhang A aufgeführt;
- g) Erweiterung des Abschnittes „Private Lebensbereiche“ im Anhang;
- h) Hinweise zu Schichtarbeit jetzt ebenfalls im Anhang;
- i) Änderung von Empfehlungen bei der Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen;
- j) Umbenennung des Titels.

Frühere Ausgaben

DIN SPEC 67600: 2013-04

Einleitung

Jede Beleuchtung, egal ob natürliche oder künstliche, wirkt zu jeder Tages- oder Nachtzeit auf das biologische System des Menschen. Auch die allgegenwärtig eingesetzte sogenannte Standardbeleuchtung und sogar die Dunkelheit als vermeintlich „lichtlose“ Zeit haben Wirkungen auf die Biologie des Menschen.

Nach heutigem Kenntnisstand werden die nichtvisuellen Wirkungen des Lichts ganz wesentlich durch die Wirkung über eine im Jahr 2001 nachgewiesene Klasse von Photorezeptoren im Auge vermittelt. Diese sogenannten intrinsisch photosensitiven retinalen Ganglienzellen (ipRGC) haben ihre höchste Lichtempfindlichkeit in einem Spektralbereich, der visuell als blau-cyan empfunden wird. Die Lichtempfindlichkeit beruht auf dem Photopigment Melanopsin. Daher werden die Wirkungen auch melanopische Wirkungen genannt [7] [8]. Diese auch „nichtvisuell“ genannten Wirkungen auf den Menschen hängen dabei nicht nur von lichttechnischen Größen, wie der spektralen und räumlichen Verteilung des Lichts ab, sondern auch von Zeitpunkt und Dauer der Einwirkung des Lichts auf den Nutzer. Beleuchtungsszenarien, welche am Tag als unzureichend für eine Stimulierung des biologischen Systems anzusehen sind, können am Abend oder in der Nacht unerwünschte Wirkungen auslösen. Daher bekommt der zeitliche Verlauf der Lichtexposition eine zentrale Bedeutung für die Planung von Beleuchtungsanlagen.

In dem Technischen Bericht CEN/TR 16791 sowie in CIE S 026 werden neben der Wirkung von Licht auf ipRGC auch nichtvisuelle Wirkungen über die bekannten visuell wirksamen Photorezeptoren im Auge, die Zapfen und Stäbchen, genannt. Für wissenschaftliche Anwendungen wird daher empfohlen, die Bewertung von Licht auch auf die Bewertung mit der spektralen Empfindlichkeit der L-, M-, und S-Zapfen, sowie der Stäbchen im menschlichen Auge auszudehnen. Allerdings wird nicht angegeben, zu welchen nichtvisuellen Wirkungen die einzelnen Photorezeptoren beitragen und auch nicht, wie Gewichtung und Mischung der verschiedenen Beiträge verschiedener Photorezeptoren erfolgen kann. Mit wenigen Ausnahmen (z. B. dem Pupillenreflex) sind keine Ansätze zu einer quantitativen Beschreibung der nichtvisuellen Wirkungen anderer Photorezeptoren als der melanopsinhaltigen ipRGC publiziert.

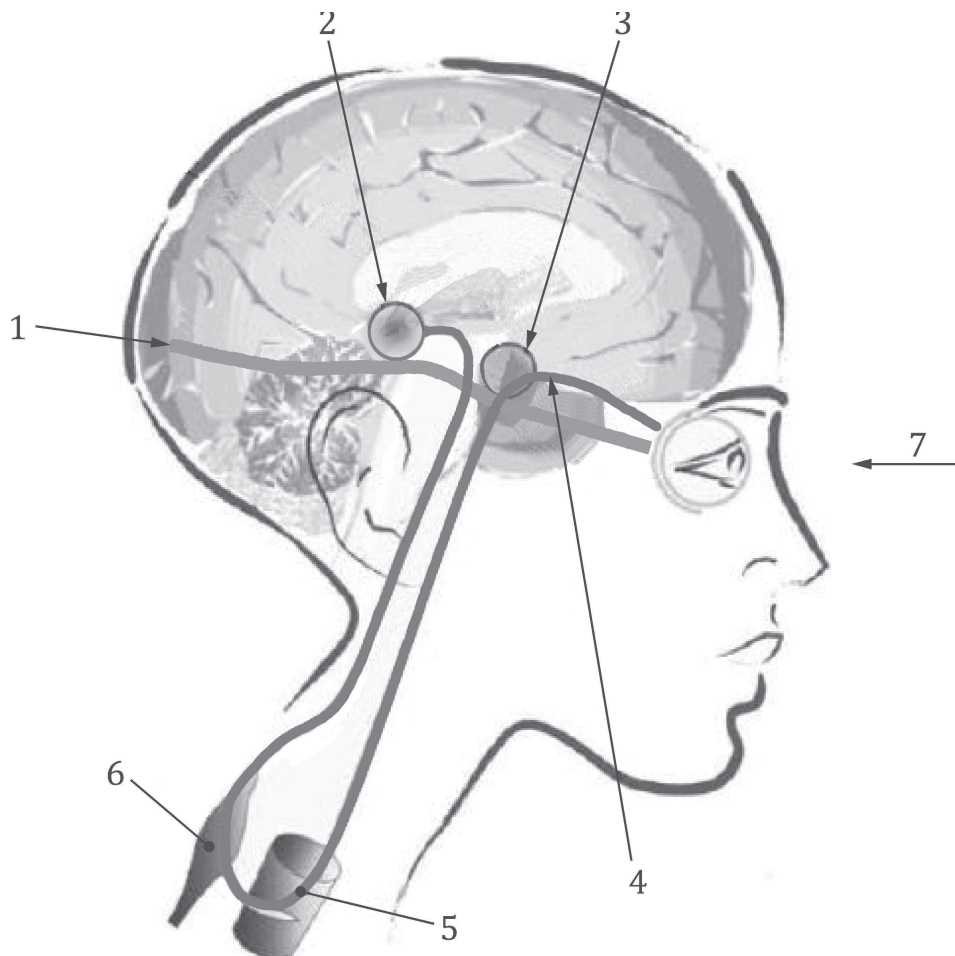
In diesem Dokument, wie auch in DIN/TS 5031-100, werden mögliche Einflüsse anderer Photorezeptoren auf die nichtvisuellen Wirkungen von Licht nicht betrachtet. Daher werden die Begriffe nichtvisuelle Wirkungen und melanopische Wirkungen synonym verwendet. Begriffe sind grundsätzlich in DIN/TS 5031-100 definiert.

Die visuellen und die emotionalen Aspekte des Lichts sind wichtige Bestandteile der Lichtplanung, werden aber in diesem Dokument nicht betrachtet. Die Evolution hat in Jahrtausenden zu Anpassungen des Menschen an das natürliche Licht des Himmels und der Sonne geführt. Heute halten sich Menschen besonders in den Industrienationen sowohl am Tag als auch in der Nacht überwiegend in Innenräumen und unter künstlicher Beleuchtung auf. Während die Beleuchtungsstärken im Freien selbst bei schlechtem Wetter noch einige tausend Lux ausmachen, ist das Niveau der üblichen künstlichen Beleuchtung in Innenräumen mit 300 lx bis 1 000 lx deutlich geringer als bei natürlichem Tageslicht. Durch ausreichend Tageslicht oder tageslichtähnliches Licht werden weitere Verbesserungen der Lebensqualität, der kognitiven Fähigkeiten und des Wohlbefindens der Menschen erreicht, wie z. B. eine höhere Schlafqualität in der Nacht und eine positivere Stimmungslage.

Auch andere Parameter des Tageslichts werden in der künstlichen Beleuchtung oft nicht nachgebildet, z. B. das Lichtspektrum oder die zeitlichen Variationen.

Die Wirkungen von ultravioletter (UV) Strahlung oder infraroter (IR) Strahlung, die ebenfalls Wirkungen auf den Menschen haben, werden in diesem Dokument nicht behandelt.

Der nichtvisuelle Pfad besteht im Wesentlichen aus den lichtempfindlichen melanopsinhaltigen Ganglienzellen der Retina (ipRGC), dem retinohypothalamischen Trakt, dem suprachiasmatischen Nucleus (nach heutiger Vorstellung der „Sitz“ der zentralen inneren Uhr), der Zirbeldrüse mit seinem Hormon Melatonin sowie den ausführenden Organen und Zellen des Körpers (siehe Bild 1).



Legende

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1 Sehzentrum | 5 Rückenmark |
| 2 Zirbeldrüse | 6 Ganglienzellen in oberen Halswirbeln |
| 3 Suprachiasmatischer Nucleus (SCN) | 7 Licht |
| 4 Retinohypothalamischer Trakt (RHT) | |

Bild 1 — Visueller Pfad, retinohypothalamischer Trakt und nichtvisueller Pfad. Der visuelle Pfad führt vom Auge über den Sehnerv zum Sehzentrum im Gehirn. Der retinohypothalamische Trakt (RHT) führt vom Auge zum suprachiasmatischen Nucleus (SCN). Vom SCN werden die Signale über sympathische Fasern im Rückenmark und dem oberen Halsstrangganglion zur Zirbeldrüse weitergeleitet. Der RHT, SCN und sympathische Ganglien bilden den nichtvisuellen Pfad

ANMERKUNG Eine der ersten nachgewiesenen melanopischen Wirkungen war die Suppression von Melatonin durch Lichtexposition in der Nacht [7] [8] [9].

Die Grundlagenforschung zu nichtvisuellen Lichtwirkungen bietet bereits heute ein verlässliches Fundament an Wissen [3] [10]. Für deren Umsetzung in die Praxis besteht weiterhin Erprobungs- und Optimierungsbedarf [14]. Mittlerweile gibt es viele Anwendungen, bei denen die positiven Wirkungen des Lichts nachgewiesen wurden [3] [10]. Die Beispiele im Dokument beruhen auf getesteten Umsetzungen.

Die hier beschriebenen Ursache-Wirkungs-Beziehungen und entsprechende Zahlenwerte basieren auf aktuellem Kenntnisstand und sind bei zukünftigen neuen Erkenntnissen und Forschungsergebnissen zu prüfen und gegebenenfalls zu aktualisieren.

Die Bewertung der nichtvisuellen Wirkungen von Licht erfolgt unabhängig davon, ob die Lichtquelle das Tageslicht oder die künstliche Beleuchtung ist. Beides sollte bei der Lichtplanung adäquat berücksichtigt sein.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt die nichtvisuellen Wirkungen des Lichts auf den Menschen (Ursache-Wirkungs-Beziehungen) übergreifend für viele Lebensbereiche. Überall, wo sich Menschen über längere Zeiträume aufhalten, können die nichtvisuellen Wirkungen des Lichts bei der Beleuchtung eine Rolle spielen. Daher beschreibt dieses Dokument den Einsatz von Beleuchtung zur Förderung von nichtvisuellen Wirkungen für alle Lebensbereiche, sowohl private als auch berufliche. Es ergänzt bestehende Normen zur Beleuchtung und erläutert allgemein den Ansatz einer erweiterten Planung ohne Vorgabe konkreter Planungsempfehlungen.

ANMERKUNG 1 Planungsanforderungen zur Erfüllung von Sehaufgaben werden in DIN EN 12464-1 angegeben. Für Arbeitsstätten gelten in Deutschland die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) [11] und der Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) [12]. Diese werden durch die Empfehlung des Ausschusses für Arbeitsstätten (ASTA) — *Künstliche biologisch wirksame Beleuchtung in Arbeitsstätten* [13] ergänzt. Empfehlungen hinsichtlich der Anwendung in Arbeitsstätten und in der Freizeit gibt die DGUV Information 215-220 „Nichtvisuelle Wirkungen von Licht auf den Menschen“ [4].

Die hier beschriebenen nichtvisuellen Wirkungen beziehen sich auf Tageslicht und auf künstliche Beleuchtung oder eine Mischung von beiden.

ANMERKUNG 2 Optimal und deshalb in der Planung nichtvisueller Lichtwirkungen zu bevorzugen, ist die Verwendung von möglichst viel Tageslicht. Da dieses in der Praxis aber nicht immer ausreichend zur Verfügung steht, bieten künstliche Beleuchtungsanlagen eine Ergänzung.

Dieses Dokument beschreibt allgemeine Ursache-Wirkungs-Beziehungen für mögliche Umsetzungen und konkrete Anwendungen.

Das vorliegende Dokument beinhaltet keine Ursache-Wirkungs-Beziehungen für die emotionalen Wirkungen von Licht.

Beabsichtigte Verschiebungen der circadianen Phase mit Licht werden in diesem Dokument nicht behandelt.

Hinsichtlich der medizinischen Behandlung mit Licht werden keine Hinweise gegeben, da dies nicht Inhalt von technischen und baulichen Planungen im Sinne dieses Dokuments ist.

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, *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*

DIN 5034 (alle Teile), *Tageslicht in Innenräumen*

DIN 5035 (alle Teile), *Beleuchtung mit künstlichem Licht*

DIN/TS 5031-100:2021-11, *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik — Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen — Größen, Symbole und Wirkungsspektren*

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

DIN EN 12665, *Licht und Beleuchtung — Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung*

DIN EN 17037, *Tageslicht in Gebäuden*

DIN EN ISO 11064-3, *Ergonomische Gestaltung von Leitzentralen — Teil 3: Auslegung von Wartenräumen*

CEN/TR 16791, *Quantifying irradiance for eye-mediated non-image-forming effects of light in humans*

CIE S 026, *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, DIN/TS 5031-100, DIN EN 12464-1, DIN EN 12665 und die folgenden Begriffe.

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

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Lebensräume

Bereiche in denen sich das [menschliche] Leben abspielt

3.2

Objekte

Gebäude, Innenräume und Flächen, die für Menschen geplant werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition wurde analog HOAI [15] aufgenommen.

3.3

interdisziplinäre Planung

Leistungsphasen der Objekt- und Fachplanungen innerhalb aller Leistungsbilder und für alle Objekte einschließlich der objektspezifischen Beratungsleistungen und besonderen Leistungen

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Definition wurde analog HOAI [15] aufgenommen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Durch interdisziplinäre Planung entstehen Lösungsansätze, die über die Grenzen eines einzigen Fachgebietes hinausgehen und deren Komplexität über ein fachübergreifendes Sprach- und Wertesystem für den Nutzer und Anwender allgemein verständlich vermittelt werden können.

3.4

tageslichtähnliche Beleuchtung

<in Bezug auf nichtvisuelle Wirkungen> künstliche Beleuchtung, die ähnliche nichtvisuelle Wirkungen wie Tageslicht erzielt

Anmerkung 1 zum Begriff: Im vorliegenden Dokument wird der Begriff für Beleuchtung mit Licht verstanden, welches die Eigenschaften der Normlichtart D65 hinsichtlich der melanopischen Bewertung nach DIN/TS 5031-100 aufweist.

4 Erweiterte Planung

Erweiterte Planung bezieht die Nutzung und die Wirkungen des Lichtes von Anfang an gesamtheitlich in den Planungsprozess ein und trägt dazu bei, unter anderem auch durch geeignete Nutzung von Tageslicht energieeffiziente Lösungen umzusetzen.

Erweiterte Planung bedeutet hierbei, dass nicht nur die visuellen, nichtvisuellen und emotionalen Wirkungen von Licht berücksichtigt werden, sondern auch die bauliche Lage und Nutzungen des Objektes, die wesentlichen Einfluss auf den Tageslichtanteil und damit auch auf die Planung der Beleuchtung haben.

Die erweiterte Planung berücksichtigt bevorzugt Räume mit längeren Verweilzeiten.

Erweiterte Planung ist interdisziplinär, was bedeutet, dass die Einflüsse der Gebäudearchitektur, insbesondere auch der Innenarchitektur, der Raumgestaltung und der Raumnutzung bei der Lichtplanung berücksichtigt werden.

Generelle Anforderungen und Empfehlungen für Arbeitsstätten in Innenräumen sind in ASR A3.4 [12] beziehungsweise DIN EN 12464-1 beschrieben und gelten unverändert auch bei der Einbeziehung der nichtvisuellen Wirkungen von Licht, die eine erweiterte Lichtplanung erfordern. Diese ist als Teil einer interdisziplinären Planung von Objekten auszuführen. Grundlage für die Planung ist dabei ein qualifiziertes Lichtkonzept im Ergebnis der Grundlagenermittlung und als Voraussetzung der Aufgabenstellung [17].

ANMERKUNG 1 Im Sinne der nichtvisuellen Lichtwirkung beginnt erweiterte Planung bei der Bedarfsplanung und führt von der Grundlagenermittlung über die Vorplanung und weiter durch alle Leistungsphasen entsprechend HOAI [15]. Die erweiterte Planung nichtvisueller Lichtwirkungen ist ein fachgebietsübergreifendes Bindeglied der interdisziplinären Planung.

Da in der Innenraumbeleuchtung — schon aus ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten — die Verhältnisse des Tageslichts nicht nachgebildet werden können, müssen in einer erweiterten Planung die verfügbaren Technologien umfassend einbezogen werden, um zu geeigneten Beleuchtungslösungen zu kommen. Weiterhin haben Studien gezeigt, dass die Rezeptoren des nichtvisuellen Systems bei den hohen Beleuchtungsstärken bei Tageslicht bereits weitestgehend in der Sättigung sind. Somit sind auch mit deutlich geringeren Beleuchtungsstärken zwischen 200 lx und 500 lx starke nichtvisuelle Wirkungen am Auge erreichbar [9].

ANMERKUNG 2 So kann das Wissen um nichtvisuelle Wirkungen von Licht mit bestimmten Spektralverteilungen bspw. dafür genutzt werden — mit geringem energetischen Aufwand am Tag — entsprechende melanopisch wirksame Spektralanteile des Lichts mit der künstlichen Beleuchtung zu generieren und somit aktivierend zu wirken. Am Abend und in der Nacht kann eine Störung des individuellen circadianen Rhythmus durch Reduzierung dieser Spektralanteile vermindert werden.

Nichtvisuell wirksame Beleuchtung und Energieeffizienz stehen nicht im Widerspruch. Eine sinnvoll geplante Lichtsteuerung stellt eine hohe Effizienz des Gesamtsystems sicher.

ANMERKUNG 3 Im Internationalen Sprachgebrauch wird der Begriff „Integrative Lighting“ [CIE S 017:2020, Eintrag 17-29-028] [16] verwendet. Der Begriff „Human Centric Lighting“ kommt in diesem Zusammenhang ebenfalls zur Anwendung. Nichtvisuelle Wirkungen von Licht bilden ein Kriterium in einer umfassenden Lichtplanung, neben visuellen und emotionalen Wirkungen sowie gestalterischen Aspekten.

Zur erweiterten Planung gehören auch gestalterische Aspekte, die hier nicht näher beschrieben werden.

5 Zielgrößen

Die nichtvisuellen Wirkungen von Licht beziehen sich in diesem Dokument ausschließlich auf die durch Licht über das Auge vermittelten Wirkungen nach DIN/TS 5031-100, die zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung ausgelöst werden.

Hier muss zwischen langfristigeren (über Stunden und Tage hinweg) Wirkungen und akuten (schnell eintretenden, über Minuten bis zu Stunden hinweg) Wirkungen unterschieden werden.

Folgende langfristige Wirkungen sind in Studien gezeigt worden:

— Stabilisierung des individuellen circadianen Rhythmus [18] [19];

- Stärkung der Amplitude der inneren Uhr [20] [21] [22] [23];
- Verbesserung der Schlafqualität [24] [25] [26] [27] [28];
- Senkung von krankheitsbedingten Ausfallzeiten [29].

Folgende akute Wirkungen sind in Studien gezeigt worden:

- Aktivierung und Verbesserung von Konzentration und Aufmerksamkeit [30] [31] [32] [33] [34];
- Stabilisierung der Leistungsbereitschaft [35];
- Senkung der unmittelbaren Müdigkeit [36] [37] [38];
- Senkung von Fehlerraten [30];
- Vermeidung von Unfällen [31].

Auf Basis nachgewiesener Wirkungen werden folgende positive nichtvisuelle Wirkungen von Licht erwartet:

- Ermöglichen und Fördern der Regeneration;
- Stärkung des Immunsystems;
- Steigerung des Wohlbefindens und der Leistungsfähigkeit;
- Verbesserung der Stimmungslage (z. B. Vermeiden von Depressionen).

Nicht in das Themengebiet dieses Dokuments fällt eine zeitliche Gestaltung des Schlaf-Wach-Zyklus, welche — abweichend vom natürlichen 24-Stunden Tag-Nacht-Rhythmus — eine Verschiebung oder Neusynchronisierung des Tag-Nacht-Rhythmus zum Ziel hat. Dazu würde z. B. die Anpassung des circadianen Rhythmus an Schichtarbeit oder die Behandlung von Jetlag gehören. Es ist zu berücksichtigen, dass die oben beschriebenen Wirkungen von Licht in hohem Maße zeitabhängig sind. Die gleiche Beleuchtungssituation, eingesetzt zur falschen Zeit, kann negative/entgegengesetzte Auswirkungen hervorrufen.

ANMERKUNG Unter langfristigen Wirkungen werden nichtvisuelle Wirkungen über das Hormonsystem und mit langen Zeitabschnitten verstanden, z. B. die circadianen Wirkungen des Lichts. Akute Wirkungen sind direkte Wirkungen, z. B. Erhöhung der Konzentration durch helles Licht (noch kürzere Reaktionszeiten sind nur mit für die Allgemeinbeleuchtung eher unüblichen Beleuchtungsstärken und Lichtfarben, z. B. sogenannte Lichtduschen, möglich).

6 Kriterien für nichtvisuell wirksame Beleuchtung

6.1 Allgemeines

Für einen sinnvollen Energieeinsatz dürfen nichtvisuelle Wirkungen nicht nur durch wahlweise Erhöhung oder Reduzierung der Beleuchtungsstärken erreicht werden. Die Zielgrößen sind vorrangig mit Hilfe interdisziplinärer Planung mittels gezielten Einsatzes von Spektren, Lichtverteilungen, Lichtrichtungen und zeitlichen Abläufen sinnvoll zu erhöhen oder zu verringern. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick, wie diese Faktoren die nichtvisuelle Lichtwirkung beeinflussen:

Tabelle 1 — Faktoren, die nichtvisuelle Lichtwirkungen grundsätzlich erhöhen oder verringern können

—	Höhere nicht-visuelle Wirkung wird erreicht durch	Geringere nicht-visuelle Wirkung wird erreicht durch	Erläuterungen	Ab-schnitt
a)	höhere melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke	geringere melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke	Mit Änderung der Beleuchtungsstärke ändert sich proportional auch die melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke (siehe DIN/TS 5031-100).	6.3
b)	höherer Anteil von melanopisch wirksamen Spektralanteilen	geringerer Anteil von melanopisch wirksamen Spektralanteilen	Die Spektralanteile des Lichts im Bereich, der vom Menschen als blau-cyan wahrgenommen wird, haben eine größere nichtvisuelle Wirkung. Im Allgemeinen steigt die nichtvisuelle Wirksamkeit mit zunehmender ähnlichster Farbtemperatur. Zusammensetzung des melanopisch bewerteten Spektrums (siehe DIN/TS 5031-100).	6.2
c)	längere Dauer der Lichtexposition	kürzere Dauer der Lichtexposition		6.5.4
d)	flächiges Licht	punktförmiges Licht	Mit flächigem Licht werden mehr Rezeptoren auf der Netzhaut angesprochen. Großflächiges Licht wird oft durch indirekte Beleuchtung erzeugt.	6.4
e)	Licht oberhalb der Sehachse	Licht unterhalb der Sehachse	Licht, das von oberhalb der Blickrichtung ins Auge gelangt, ist wirksamer als Licht von unterhalb [39] [40] [41] [42].	6.4.3
f)	Licht am Morgen ist am wirksamsten zur Synchronisierung der inneren Uhr.	Licht am Nachmittag hat eine geringe Wirkung auf die innere Uhr.	Phasenverschiebungen mittels Licht sind um den Zeitpunkt des Minimums der Körperkerntemperatur, üblicherweise gegen Ende der Schlafphase, am wirksamsten.	6.5

Tabelle 2 gibt einen Überblick über Optimierungsmöglichkeiten für nichtvisuelle Lichtwirkungen:

Tabelle 2 — Optimierungsmöglichkeiten für nichtvisuelle Lichtwirkungen

—	Optimierungsmöglichkeiten		Erläuterungen	Ab-schnitt
a)	dem Tageslicht angepasste Dynamik des Lichts	individuelle zielgerichtete Lichtänderungen durch bewussten Nutzereingriff	Zeitliche Änderungen der Beleuchtungsstärke [43], der Spektren, der Lichtverteilung und der Lichtrichtung. Eine dem Tageslicht angepasste Dynamik des Lichts stärkt den circadianen Rhythmus des Menschen. Individuelle, bewusste Änderungen der Lichtsituation ermöglichen eine Anpassung an persönliche Bedürfnisse und erhöhen die Akzeptanz.	6.5
b)	hohe melanopisch bewertete Bestrahlungsstärken am Tag	geringe melanopisch bewertete Bestrahlungsstärken am Abend und in der Nacht	Hohe Lichtexpositionen am Abend sind nicht so kritisch, wenn ein stabiler circadianer Rhythmus vorliegt [45]. Längere Zeit dunkel adaptierte Personen sind lichtempfindlicher und reagieren auf die Lichtexposition stärker. Daher sind auch Dunkelphasen bedeutsam für die nichtvisuelle Wirkung des Lichts (Lichthistorie).	6.3

6.2 Spektrale Zusammensetzung des Lichts

6.2.1 Allgemeines

Tageslicht ist tagsüber charakterisiert durch hohe Beleuchtungsstärken bei gleichzeitig hoher Farbtemperatur. Die spektrale Strahlungsverteilung des Tageslichts geht einher mit einer hohen melanopisch bewerteten Bestrahlungsstärke.

Im Innenraum liegt tagsüber im Vergleich zum Tageslicht im Freien nur eine relativ niedrige Beleuchtungsstärke vor, die meistens durch künstliche Beleuchtung ergänzt wird. Die ähnlichste Farbtemperatur der künstlichen Beleuchtung ist tagsüber häufig deutlich niedriger als die des Tageslichts.

In der Natur tritt am Morgen und am Abend zeitweise eine systematische Verschiebung des Spektrums zu einem erhöhten Rotanteil nur in den Zeiten des tatsächlichen Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergangs auf. In den Zeiten vor dem Sonnenaufgang und nach dem Sonnenuntergang enthält das Spektrum des Himmels einen erhöhten relativen Anteil an kurzwelligen Spektralanteilen.

Für die geringere melanopische Wirkung in den frühen Morgen- und späten Abendstunden sowie in der Nacht ist jedoch die geringe Beleuchtungsstärke maßgeblich.

Für die Beleuchtung im Innenraum am Abend und in der Nacht kann eine geringere melanopische Wirkung und somit eine geringe Melatonininsuppression — bei gleichzeitigem Erhalt guter Sehfähigkeit — mit einer Reduktion der melanopisch wirksamen Spektralanteile im Spektrum der Lichtquellen erreicht werden. Dabei müssen die spektralen Anteile für die visuelle Wirkung des Lichts ausreichend hoch bleiben. Dies wird am ehesten mit warmweißem Licht erreicht. Auch eine Beleuchtung weitgehend ohne blau-cyanfarbige Spektralanteile bewirkt nur eine geringe Melatonininsuppression, jedoch kann dies die Farberkennung beeinträchtigen.

Gerade in den späten Abend- und Nachtstunden können auch Lichtquellen mit geringer melanopischer Wirkung den circadianen Rhythmus beeinflussen. In der Planung sind Änderungen der spektralen Zusammensetzung der Lichtquelle durch Transmission in Leuchten und Reflexion an Oberflächen zu berücksichtigen und zu

bewerten. Entsprechend gilt dies bei der Nutzung des Tageslichts für die Transmission durch Fenster. Hier sollten tagsüber Verluste im melanopisch wirksamen Spektralbereich vermieden werden. Weitere Informationen sind in 6.2.4 zu finden.

ANMERKUNG 1 Die Bewertung der spektralen Strahlungsverteilung von Licht im Hinblick auf seine nichtvisuellen Wirkungen erfolgt nach DIN/TS 5031-100. Auf Europäischer Ebene ist der Technische Bericht CEN/TR 16791 maßgebend. CIE S 026 hat globale Gültigkeit und ist letztlich das Dokument, mit dem alle anderen konform sein müssen. Dies ist für die o. g. Dokumente der Fall.

ANMERKUNG 2 Beleuchtungsstärke und ähnlichste Farbtemperatur können aus der spektralen Strahlungsverteilung bestimmt werden. Die melanopisch bewertete Bestrahlungsstärke steigt dabei linear mit zunehmender Beleuchtungsstärke am Auge und für viele Lichtquellen auch annähernd linear mit zunehmender ähnlichster Farbtemperatur.

6.2.2 Spektrale Bewertung von Licht

6.2.2.1 Allgemeines

Nach CEN/TR 16791 und CIE S 026 werden die nichtvisuellen Wirkungen von Licht von allen fünf bekannten Fotorezeptoren im Auge vermittelt: Von drei Typen von Zapfen, mit Empfindlichkeit im kurz-, mittel- und langwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums (blau, grün, rot), von den Stäbchen, die primär für das skotopische Sehen in der Dämmerung verantwortlich sind, und von den ipRGC. Für letztere ist bekannt, in welcher Weise verschiedene nichtvisuelle Wirkungen vermittelt werden. Für die anderen vier Rezeptortypen sind die Zusammenhänge zwischen einer Stimulation der Rezeptoren und der Vermittlung einer nichtvisuellen Wirkung noch nicht ausreichend bekannt. Für die meisten der in diesem Dokument behandelten nichtvisuellen Wirkungen sind sie wahrscheinlich auch nur von sehr geringer oder von keiner Bedeutung.

Aus diesem Grund wird in diesem Dokument lediglich die melanopische Wirkung berücksichtigt. Falls in der Zukunft quantitative Zusammenhänge nichtvisueller Wirkungen mit den vier nicht-melanopsinhaltenen Fotorezeptoren beschrieben werden, wird dieses Dokument überarbeitet werden.

Die ipRGC haben ihre höchste Lichtempfindlichkeit im als blau-cyanfarbig wahrgenommenen Spektralbereich, mit einem Maximum bei 490 nm. Die Halbwertsbreite erstreckt sich um etwa ± 40 nm, so dass Licht mit Wellenlängen zwischen 450 nm und 530 nm die stärkste melanopische Wirkung hat. Das Wirkungsspektrum ist in DIN/TS 5031-100 definiert, sowie in identischer Form in den Dokumenten CEN/TR 16791 und CIE S 026.

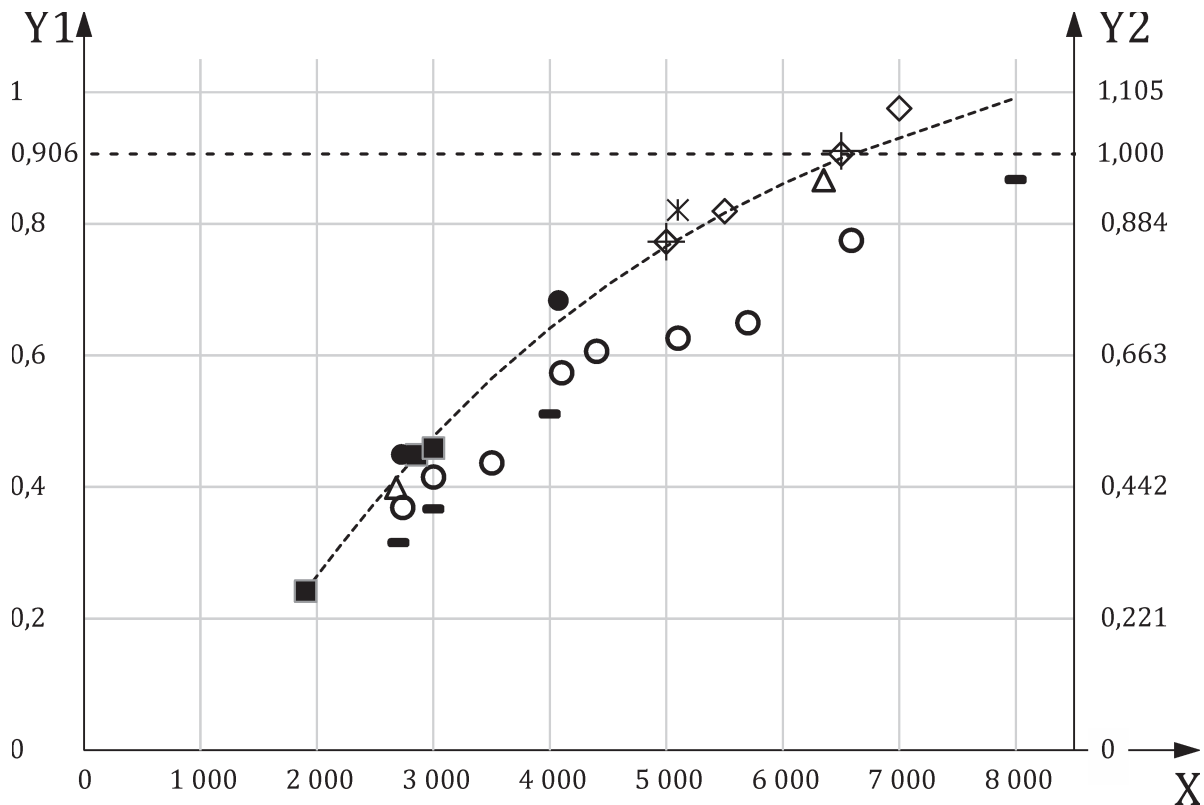
Dabei ist zu beachten, dass nach DIN/TS 5031-100 die Spektralverteilung über die gesamte Breite der Wirkungsfunktion mit ihrem Maximum bei 490 nm zu bewerten ist und nicht nur der kurzwellige Bereich der Spektralverteilung berücksichtigt werden darf.

ANMERKUNG Bei warmweißen Lichtquellen ist der Beitrag zur melanopischen Wirkung auf Seite der langwelligen Spektralanteile mit Wellenlängen $\lambda > 490$ nm im Allgemeinen größer als der Beitrag von kurzwelligen Spektralanteilen ($\lambda < 490$ nm).

6.2.2.2 Lichtquellen

Bei gleicher Beleuchtungsstärke erhöht sich die melanopische Wirksamkeit mit zunehmenden Spektralanteilen in dem oben genannten Bereich. Das Verhältnis der melanopisch bewerteten Spektralanteile zu den visuell bewerteten Spektralanteilen wird als melanopischer Wirkungsfaktor $a_{\text{mel},v}$ nach DIN/TS 5031-100 bezeichnet. Bei gleichen Arten von Lichtquellen (siehe Bild 2) besteht ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem Wirkungsfaktor $a_{\text{mel},v}$ und den ähnlichsten Farbtemperaturen im Bereich von 2 500 K bis 6 500 K.

DIN/TS 5031-100:2021-11, Tabelle D.1 und Tabelle D.2, liefern Beispiele für diese melanopischen Wirkungsfaktoren $a_{\text{mel},v}$.



Legende

X ähnlichste Farbtemperatur in K

Y1 melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$

Y2 melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor
MDER

LED nach CIE 15:2018 [46] definiert

(LED-B1 bis -B5 mit R_a 80 und phosphor-converted
Violet-LED LED V1 und -V2)

LED mit hoher Farbwiedergabe R_a 93

Tageslicht D55, D65, D75

Indoor-Daylight ID50, ID65 nach CIE 184:2009 [47]

Thermische Lichtquellen (Plancksche Strahler, Lichtart P
(Petroleum und Kerzenlicht), Normlichtart A (2 856 K))

Energiegleiches Spektrum (Equi-Energy), gleiche
spektrale Leistung bei allen Wellenlängen von 380 nm bis
780 nm

Standard Leuchtstofflampen der Lichtarten FL10, FL11
und FL12 nach CIE 15:2018 [46], sowie mit 8 000 K nach
DIN/TS 5031-100

○ LED (R_a 80)

● LED-Violet-pumped

△ LED (R_a 93)

◇ Tageslicht

+ Indoor Daylight

— Leuchtstofflampe

■ Thermische Lichtquelle

----- Planckscher Strahler

* Energiegleiches Spektrum

Bild 2 — Melanopischer Wirkungsfaktor $a_{mel,v}$ und MDER nach DIN/TS 5031-100 in Abhängigkeit von der ähnlichsten Farbtemperatur für verschiedene Lichtarten

In DIN/TS 5031-100 wurden melanopisch äquivalente Tageslicht-Größen eingeführt. So z. B. die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke. Das Verhältnis von melanopisch äquivalenter Tageslicht-

Beleuchtungsstärke (MEDI, en: melanopic equivalent daylight illuminance) zur bekannten Beleuchtungsstärke [fotopisch mit $V(\lambda)$ bewertet] wird dort als melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor definiert, der es erlaubt, gemessene Beleuchtungsstärken in melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärken umzurechnen.

Das verwendete Symbol ist $\gamma_{\text{mel},v,D65}$

In CIE S 026 wurde dieser Faktor melanopic daylight efficacy ratio (melanopic DER) genannt. In DIN/TS 5031-100 wurde dafür die Abkürzung MDER eingeführt. Es besteht ein einfacher rechnerischer Zusammenhang zwischen $a_{\text{mel},v}$ und MDER:

$$\text{MDER} = \gamma_{\text{mel},v,D65} = a_{\text{mel},v}/0,906 \quad (1)$$

Dabei ist

$$\text{MDER} = \gamma_{\text{mel},v,D65} = E_{v,\text{mel},D65}/E_v; \text{ oder in der praktischen Anwendung: } E_{v,\text{mel},D65}/E_v \cdot \text{MDER}.$$

E_v ist dabei die am Auge gemessene vertikale Beleuchtungsstärke.

Somit kann, wenn die Lichtart und damit MDER bekannt ist, aus der am Auge gemessenen Beleuchtungsstärke die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke bestimmt werden. Beispiele sind in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgeführt. Weitere Beispiele finden sich in DIN/TS 5031-100.

Tabelle 3 — Beispiele für Lichtarten

Lichtart	Beleuchtungsstärke E_v [Bewertung mit $V(\lambda)$]	Melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke $E_{v,\text{mel},D65}$ bzw. MEDI [Bewertung mit $s_{\text{mel}}(\lambda)$]	MDER
Normlichtart A (Glühlampe, $T_{\text{cp}} = 2\,856\text{ K}$)	1 000 lx	496 lx	0,496
Lichtart FL11 nach CIE (FL , $T_{\text{cp}} = 4\,000\text{ K}$)	1 000 lx	562 lx	0,562
Normlichtart D65 (Tageslicht, $T_{\text{cp}} = 6\,500\text{ K}$)	1 000 lx	1 000 lx	1,000
Indoor-Daylight ID65 (hinter Fenster)	1 000 lx	1 005 lx	1,005
Indoor-Daylight ID50 (hinter Fenster)	1 000 lx	853 lx	0,853
LED, weiß, CIE LED-B1 ($T_{\text{cp}} = 2\,700\text{ K}$)	1 000 lx	407 lx	0,407
LED, weiß, CIE LED-B2 ($T_{\text{cp}} = 3\,000\text{ K}$)	1 000 lx	458 lx	0,458
LED, weiß, CIE LED-B3 ($T_{\text{cp}} = 4\,000\text{ K}$)	1 000 lx	633 lx	0,633
LED, weiß, CIE LED-B5 ($T_{\text{cp}} = 6\,500\text{ K}$)	1 000 lx	855 lx	0,855
Equi-Energy ($T_{\text{cp}} = 5\,456\text{ K}$)	1 000 lx	906 lx	0,906

ANMERKUNG 1 Während $a_{\text{mel},v}$ das Verhältnis von melanopischen zu fotopischen Strahlungsgrößen beschreibt, steht MDER für das Verhältnis einer melanopisch äquivalenten Tageslicht-Größe zu der entsprechenden lichttechnischen Größe. In der Praxis hat sich der Faktor MDER bewährt.

ANMERKUNG 2 Mit dem zu planenden melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktor ist eine erste Bestimmung des einzusetzenden Lampentyps anhand der ähnlichsten Farbtemperatur möglich. So hat eine Halogenlampe (etwa 3 000 K) einen MDER von etwa 0,386. Weiße LED mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 6 500 K haben einen MDER, der zwischen 80 % und 95 % des Tageslichts liegt. So hat z. B. eine weiße LED vom Typ CIE LED-B5 mit 6 500 K einen MDER von 0,855.

Die von CIE definierten LED-Normspektren LED-B1 bis -B5 haben einen typischen Farbwiedergabeindex R_a von 80 bis 83. Bei LED mit Farbwiedergabeindex über 90 liegen die Werte für MDER um etwa 10 % bis 20 % höher als bei denen mit einem Farbwiedergabeindex von 80.

BEISPIEL Eine Lichtquelle der Normlichtart A (2 856 K), die einer bestimmten Anwendung eine Beleuchtungsstärke von 200 lx am Auge erzeugt, bewirkt eine melanopische Bestrahlungsstärke von $131,4 \text{ mW/m}^2$. In diesem Fall liegt der Wert für MDER bei 0,496 und die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke beträgt 99,2 lx.

6.2.3 Altersabhängigkeit des Auges

Da sich im Alter die optischen Eigenschaften des Auges verändern, ändert sich auch der nichtvisuelle Stimulus durch das Licht, das die Fotorezeptoren auf der Netzhaut erreicht. Es wird bei der lichttechnischen Bewertung von einem 32-jährigen Normalbeobachter ausgegangen. Mit zunehmendem Alter sind zwei optische Effekte zu berücksichtigen: eine reduzierte Transmission der Augenmedien und ein reduzierter Durchmesser der Pupille.

Insbesondere im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums reduziert sich die Transmission der Augenmedien. Generell sollten für ältere Menschen höhere Zielwerte für die Beleuchtungsstärke erreicht werden, um diesen Effekt zu kompensieren. Berechnungsgrundlage und detaillierte Daten hierzu sind DIN/TS 5031-100 zu entnehmen. Für üblicherweise verwendete weiße Lichtquellen beträgt der Korrekturfaktor nach DIN/TS 5031-100 für eine Person von 50 Jahren zwischen 0,8 und 0,9, für eine Person von 75 Jahren etwa 0,6. Dies bedeutet, dass 50-Jährige etwa 15 % bis 20 % mehr Licht benötigen, 75-Jährige etwa 40 % mehr, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4 — Näherungsweise Korrekturfaktor für die altersabhängige Linsentransmission für das Alter A für weißes Licht nach DIN/TS 5031-100

	A = 10	A = 25	A = 32	A = 50	A = 75	A = 90
$k_{\text{mel, trans}}(A)$	1,13	1,05	1,00	0,84	0,59	0,46

ANMERKUNG 1 Zwischen den Altersstufen kann linear interpoliert werden. Weitere detaillierte Informationen können DIN/TS 5031-100 entnommen werden.

Der Korrekturfaktor wird auf alle melanopischen Größen angewandt, wie z. B. den melanopischen Wirkungsfaktor, aber auch auf abgeleitete Größen wie die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke, -Leuchtdichte oder den melanopischen Tageslicht-Effizienzfaktor (MDER).

Es gibt eine Abhängigkeit dieses Korrekturfaktors von der Spektralverteilung der verwendeten Lichtquelle. Diese ist für farbiges Licht relevant. Für weißes Licht kann die spektrale Abhängigkeit vernachlässigt werden.

Für jüngere Personen (unter 32 Jahren) führt die Altersabhängigkeit sogar zu einer Reduzierung des erforderlichen Lichtbedarfs. Bei 10-Jährigen macht dies etwa 10 % Reduzierungspotenzial aus, während dies bei 25- bis 35-jährigen in der Praxis keine Rolle spielt.

Ein weiterer altersabhängiger Effekt ist die Reduzierung der Pupillengröße mit zunehmendem Alter bei gleichbleibender Adaptationsleuchtdichte. Unter gleichen Beleuchtungsbedingungen gelangt bei älteren Personen weniger Licht auf die Netzhaut. Dies reduziert auch die Stimulierung der melanopsinhalten Ganglienzellen. Für eine Adaptationsleuchtdichte von 200 cd/m^2 ergeben sich daraus altersabhängige Korrekturfaktoren entsprechend der nachfolgenden Tabelle 5. Für Details und andere Adaptationsleuchtdichten siehe DIN/TS 5031-100.

Tabelle 5 — Korrekturfaktor für die altersabhängige Pupillenverkleinerung DIN/TS 5031-100

	A = 10	A = 25	A = 32	A = 50	A = 75	A = 90
$k_{\text{Pupille}}(A)$	1,29	1,09	1,00	0,79	0,54	0,42

Bei einem 50-jährigen gelangen danach wegen der reduzierten Pupillengröße im Vergleich zu einem 32-Jährigen nur etwa 80 % des Lichts einer Lichtquelle auf die Netzhaut.

Beide Effekte in Tabelle 4 und Tabelle 5 multiplizieren sich in ihrer Wirkung, so dass der Planungswert für eine Beleuchtungsanlage mit den Kehrwerten der Korrekturfaktoren nach Tabelle 4 und Tabelle 5 zu multiplizieren ist.

BEISPIEL Der Zielwert für die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke von 250 lx ist im Falle eines mittleren Alters von 50 Jahren bei der Nutzergruppe mit den Faktoren (1/0,84) und (1/0,79) zu multiplizieren. Daraus ergibt sich ein Zielwert von 376 lx als melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke. Soll dies mit tageslichtweißen LED vom Typ CIE LED-B5 (siehe Tabelle 3) erreicht werden, so ist dafür eine Beleuchtungsstärke (fotopisch bewertet) von 439 lx am Auge des Nutzers optimal.

ANMERKUNG 2 Es gibt weitere altersabhängige Veränderungen, die hier nicht behandelt und nicht berücksichtigt werden, da sie bisher in der Fachliteratur nicht quantitativ beschrieben sind und weiterhin einer erheblichen individuellen Streuung unterworfen sind. So gibt es im weit fortgeschrittenen Alter Personen, bei denen die Funktion der retinalen Ganglienzellen stark eingeschränkt ist, sowie auch Personen, bei denen die Signalverarbeitung im Gehirn nicht mehr gesichert ist (z. B. bei Demenz).

6.2.4 Optische Eigenschaften

6.2.4.1 Allgemeines

Licht gelangt in erheblichem Maße erst nach Transmission durch Materialien und Reflexion an Oberflächen ins Auge. Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Materialien wie z. B. Glas, Raumelementen und Wandfarben wirken sich auf die spektrale Zusammensetzung des Lichts aus. Dies können getönte oder beschichtete Glasscheiben, Holzelemente oder Oberflächen mit gelben, roten oder braunen Farben („Erdfarben“) sein, welche die melanopisch wirksamen Spektralanteile von Licht deutlich reduzieren. Dies ist nicht nur für die künstliche Beleuchtung, sondern auch für die Beleuchtung mit Tageslicht relevant.

Die aufgeführten Materialien in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 und Bild 3 und Bild 4 stellen verschiedene Beispiele für Transmissions- und Reflexionseigenschaften bezüglich der nichtvisuellen Wirkung dar. In der Planung sind vielfältige andere Materialien möglich, deren Einfluss bei der Planung betrachtet werden sollte.

ANMERKUNG Die Daten der spektralen und integralen Reflexion und Transmission der untersuchten Materialien aus 6.2.4, Tabellen 6 bis 11 und Bildern 3 und 4 des vorliegenden Dokumentes sind unter folgendem Link abrufbar: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-11893.2>. Weiterhin ist hier eine erläuternde Dokumentation [43] hinterlegt.

6.2.4.2 Transmittierende Materialien

Die spektrale Zusammensetzung des Lichts ändert sich mit dem Durchgang durch transmittierende Materialien. Dies ist bei der Bewertung von nichtvisuellen Wirkungen des Lichts von Bedeutung. Nicht nur das Tageslicht ändert seine spektrale Zusammensetzung beim Durchgang durch Fenster oder Oberlichter, auch das Licht künstlicher Lichtquellen ändert beim Durchgang durch transparente Materialien seine spektrale Zusammensetzung.

Ein Korrekturfaktor $k_{\text{mel,trans}}$ der Veränderung für die melanopisch wirksamen Strahlungsgröße $X_{\text{e, mel}}$ nach DIN/TS 5031-100 infolge von Transmission durch Materialien mit dem spektralen Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ errechnet sich nach Gleichung (2).

Eine melanopische Strahlungsgröße $X_{\text{e, mel}}$ wird bei der Transmission durch das Material M zu $X_{\text{e, mel,trans}}(M)$ verändert. Das gleiche gilt für melanopische äquivalente Tageslicht-Größen wie z. B. die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke.

Dabei gilt

$$X_{\text{e, mel,trans}}(M) = X_{\text{e, mel}} \cdot k_{\text{mel,trans}}(M)$$

$$k_{\text{mel,trans}}(M) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda, M) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{mel}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2)$$

Dabei ist

$k_{\text{mel,trans}}(M)$ der Korrekturfaktor für die melanopische Strahlungsgröße von Licht bei der Transmission;

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

$s_{\text{mel}}(\lambda)$ das Wirkungsspektrum für die betrachtete melanopische Wirkung, bezogen auf den Maximalwert $s_{\text{mel,max}} = 1$, nach DIN/TS 5031-100:2021-11, Tabelle 6;

$\tau(\lambda, M)$ der spektrale Transmissionsgrad;

λ_1, λ_2 die unteren (380 nm) und oberen (780 nm) Grenzwellenlängen für den Definitionsbereich der melanopischen Wirkung nach DIN/TS 5031-100:2021-11, Tabelle 6;

X_e die Strahlungsgröße. Der Index „e“ steht zur Eindeutigkeit für Größen auf der energetischen Skala, um eine sichere Abgrenzung gegenüber visuell, bzw. fotopisch bewerteten Größen sicher zu stellen, die mit dem Index „v“ symbolisiert werden.

Beispielhafte Werte können Tabelle 6 und Tabelle 7 sowie Bild 3 und Bild 4 entnommen werden.

Tabelle 6 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch Verglasungen (Beispiele)

Verglasungs-Typ			Transmissionsgrad bei Normlichtart D65		Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor		Ähnlichste Farbtemperatur des transmittierten Lichts
	Bezeichnung	U-Wert W/m ² K	τ_{vis} fotopisch	τ_{mel} melanopisch	MDER	MDER _{eff}	T_{cp} K
0	ohne Glas (bei Lichtart D65)	—	1,000	1,000	1,000	1,000	6 503
101	Einfachverglasung	5,9	0,901	0,901	1,000	0,901	6 522
102	Doppel-ISV	2,8	0,817	0,818	1,000	0,818	6 544
103	Doppel-ISV	2,8	0,808	0,807	0,999	0,807	6 522
104	2-Scheiben-WMSV	1,1	0,786	0,778	0,990	0,778	6 431
105	2-Scheiben-WMSV	1,1	0,658	0,640	0,973	0,640	6 281
106	2-Scheiben-WMSV	1,1	0,720	0,703	0,977	0,703	6 350
107	2-Scheiben-SSV	1	0,685	0,673	0,982	0,673	6 385
108	2-Scheiben-SSV	1	0,522	0,509	0,975	0,509	6 320
109	2-Scheiben-SSV	1	0,585	0,568	0,971	0,568	6 365
110	3-Scheiben-WMSV	0,65	0,687	0,674	0,981	0,674	6 365
111	3-Scheiben-SSV	0,67	0,599	0,583	0,972	0,583	6 314
112	3-Scheiben-SSV	0,67	0,417	0,399	0,955	0,399	6 218

ANMERKUNG zu Tabelle 6 und Tabelle 7:

Die Transmissionsdaten wurden für die Normlichtart D65 (Tageslicht) als Referenzlichtart bestimmt. Bei weißem Licht anderer Spektralverteilungen ergeben sich nur geringe Abweichungen, die in der Größenordnung unter 1 % bis 2 % liegen.

In diesen Fällen, z. B. bei künstlichem Licht mit warmweißen oder kaltweißen Lichtquellen können die o. g. Werte als gute Näherung verwendet werden. Bei farbigem Licht sind die Werte stark von der spektralen Strahlungsverteilung abhängig. Daher ist der Wert für $K_{\text{mel,trans}}$ für die Transmission von farbigem Licht nach Gleichung (2) zu bestimmen.

Die gleiche Anmerkung gilt entsprechend, wenn nicht farblich neutrale Gläser zu bewerten sind, sondern farbige Materialien. Auch dann ist die vollständige Gleichung (2) für jede Lichtart heranzuziehen.

Bei den leicht gefärbten Stegplatten in den Zeilen 3, 6 und 9 von Tabelle 7 beträgt der Korrekturfaktor $K_{\text{mel,trans}}$ etwa 3 % zwischen der Bewertung für Normlichtart D65 (Tageslicht) und Normlichtart A (Glühlampenlicht 2 850 K).

Für Tageslicht und andere weiße Lichtquellen kann $k_{\text{mel,trans}}$ auch als melanopischer Transmissionsgrad τ_{mel} bezeichnet werden.

Der U-Wert beschreibt die Wärmedurchlässigkeit des Glasverbundes. Er charakterisiert den Glasverbund, hat aber keinen direkten Zusammenhang mit der Transmission. Es kann aber festgehalten werden, dass Verglasungen, die eine geringe Wärmeleitfähigkeit haben, i. A. auch eine geringere melanopische Transmission aufweisen.

Der Wert MDER gilt für die spektrale Strahlungsverteilung des transmittierten Lichts nach dem Glasverbund, wobei dieses als neue Lichtart bewertet wird. Dies entspricht der Definition nach DIN/TS 5031-100.

MDER_{eff} beschreibt das Verhältnis von melanopisch äquivalenter Tageslicht-Beleuchtungsstärke unmittelbar nach dem Glasverbund zu der Beleuchtungsstärke [fotopisch mit $V(\lambda)$ bewertet] vor dem Glasverbund. Dies entspricht nicht der Definition von MDER nach DIN/TS 5031-100, ist aber für die Planung zweckmäßig, da es erlaubt, die melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke nach dem Glasverbund direkt aus der Beleuchtungsstärke vor dem Glasverbund zu bestimmen.

BEISPIEL für einen Glasverbund nach Zeile 6, 2-Scheiben WMSV:

- vertikale Beleuchtungsstärke am Fenster außen auftreffend: $E_v = 10\,000$ lx, Tageslicht D65;
- visuelle Transmission: 0,72; vertikale Beleuchtungsstärke unmittelbar nach Fenster: 7 200 lx;
- melanopischer Transmissionsgrad: 0,703; vertikale melanopisch äquivalente Tageslicht-Beleuchtungsstärke (MEDI): 7 030 lx;
- der effektive melanopische Tageslicht-Effizienzfaktor (melanopisch nach Fenster/visuell vor Fenster): $\text{MDER}_{\text{eff}} = 0,703$;
- wird das transmittierte Licht als neue Lichtart gesehen, beträgt MDER für diese Lichtart: $\text{MDER} = 0,977$.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\text{MDER}_{\text{eff}} = \tau_{\text{mel}}$$

$$\text{MDER} = E_v \cdot \tau_{\text{mel}} / E_v \cdot \tau_{\text{vis}} = \tau_{\text{mel}} / \tau_{\text{vis}}$$

Für Stegplatten, wie sie in Tageslichtsystemen zum Einsatz kommen wurden die nachfolgenden Daten nach Tabelle 7 ermittelt.

Tabelle 7 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch Stegplatten (Beispiele)

Stegplatten			Transmissionsgrad bei Normlichtart D65		Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor		Ähnlichste Farbtemperatur des transmittierten Lichts
	Bezeichnung	U-Wert W/m ² K	τ_{vis} fotopisch	τ_{mel} melanopisch	MDER	MDER _{eff}	T_{cp} K
201	Typ 1, 16 mm, durchsichtig	2,3	0,735	0,733	0,996	0,733	6 410
202	Typ 1, 16 mm, streuend	2,3	0,618	0,623	1,008	0,623	6 538
203	Typ 1, 16 mm, durchsichtig, eingefärbt	2,3	0,297	0,264	0,891	0,264	5 317
204	Typ 2, 16 mm, durchsichtig	2,0	0,635	0,630	0,991	0,630	6 348
205	Typ 2, 16 mm, streuend	2,0	0,547	0,555	1,014	0,555	6 592
206	Typ 2, 16 mm, durchsichtig, eingefärbt	2,0	0,268	0,232	0,864	0,232	5 110
207	Typ 3, 25 mm, durchsichtig	1,4	0,485	0,482	0,993	0,482	6 375
208	Typ 3, 25 mm, streuend	1,4	0,404	0,409	1,013	0,409	6 505
209	Typ 3, 25 mm, durchsichtig, eingefärbt	1,4	0,133	0,114	0,857	0,114	5 037
210	Typ 4, 20 mm, durchsichtig	1,7	0,589	0,580	0,985	0,580	6 313
211	Typ 4, 20 mm, streuend	1,7	0,467	0,474	1,014	0,474	6 581

Tabelle 8 — Kenngrößen zur Veränderung melanopischer Strahlungsgrößen bei der Transmission von Licht durch farbige Kunststoffe (Beispiele)

Farbige Kunststoffe		Transmissionsgrad bei Normlichtart D65		Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor		Ähnlichste Farbtemperatur des transmittierten Lichts
	Bezeichnung ^a	τ_{vis} fotopisch	τ_{mel} melanopisch	MDER	MDER _{eff}	T_{cp} K
301	Plexiglas® GS233	0,924	0,923	0,998	0,923	6 485
302	Plexiglas® XT	0,924	0,923	0,999	0,922	6 488
303	Plexiglas® 7H	0,921	0,920	0,998	0,920	6 482
304	Plexiglas® 8N	0,923	0,921	0,998	0,921	6 484
305	Sonnenschutzglas RT95 (Schutzbrillen bei Makuladegeneration)	0,106	0,001	0,005	0,001	— ^b
306	Plexiglas® GS blau 602, 3 mm	0,158	0,437	2,764	0,437	— ^b
307	Plexiglas® GS blau 625, 3 mm	0,617	0,750	1,215	0,750	9 581
308	Plexiglas® GS blau 627, 3 mm	0,041	0,232	5,689	0,232	— ^b
309	Plexiglas® GS braun 400, 3 mm	0,190	0,105	0,553	0,105	3 705
310	Plexiglas® GS gelb 303, 3 mm	0,739	0,194	0,262	0,194	3 113
311	Plexiglas® GS grau 837, 3 mm	0,092	0,141	1,538	0,141	6 429
312	Plexiglas® GS grau 838, 3 mm	0,210	0,232	1,101	0,232	7 755
313	Plexiglas® GS grau 882, 3 mm	0,452	0,522	1,156	0,522	6 816

Tabelle 8 (fortgesetzt)

Farbige Kunststoffe		Transmissionsgrad bei Normlichtart D65		Melanopischer Tageslicht-Effizienzfaktor		Ähnlichste Farbtemperatur des transmittierten Lichts
	Bezeichnung ^a	τ_{vis}	τ_{mel}			
		fotopisch	melanopisch	MDER	MDER _{eff}	T_{cp} K
314	Plexiglas® GS grün 700, 3 mm	0,096	0,131	1,362	0,131	8 566
315	Plexiglas® GS grün 701, 3 mm	0,222	0,463	2,088	0,463	— ^b
316	Plexiglas® GS grün 777, 3 mm	0,701	0,737	1,051	0,737	7 310
317	Plexiglas® GS orange 478, 3 mm	0,474	0,046	0,097	0,046	1 977
318	Plexiglas® GS rot 501, 3 mm	0,134	0,013	0,099	0,013	— ^b
319	Plexiglas® GS rot 502, 3 mm	0,056	0,005	0,093	0,005	— ^b
320	Plexiglas® GS umbra 802, 3 mm	0,551	0,497	0,901	0,496	5 425
321	Plexiglas® GS umbra 807, 3 mm	0,471	0,526	1,118	0,526	7 664
ANMERKUNG Bei Verwendung von klaren, ungefärbten Glas- oder Kunststoffmaterialien bleibt die nichtvisuelle Wirkung von Lichtquellen weitgehend erhalten. Durch spektral neutrale aber stark absorbierende bzw. streuende Kunststoffe wird die nichtvisuelle Wirkung der Lichtquellen hingegen vermindert, in etwa dem gleichen Ausmaß wie die Reduktion der optischen Transmission. Bei gefärbten Gläsern und Kunststoffen wird die nichtvisuelle Wirkung ebenfalls absolut verringert, allerdings weicht das Ausmaß der Reduktion üblicherweise von der Reduktion in der optischen Transmission ab und ist auch deutlich vom Spektrum der Lichtquelle abhängig. Rote, gelbe und orangefarbene Gläser filtern kurze Wellenlängen sehr effektiv. Dagegen lassen bläuliche Gläser kurze Wellenlängen weitgehend passieren, filtern dagegen längere Wellenlängen, was zu einer Blauverschiebung im Licht führt und somit zu einem relativ höheren Anteil melanopisch wirksamen Lichts. Es bleibt zu beachten, dass auch bei blauen Gläsern eine absolute Reduktion der für das nichtvisuelle System verfügbaren Strahlung resultiert. Blaue Gläser sind somit kein Material, das geeignet ist, nichtvisuelle Wirkungen zu erhöhen.						
^a Bei Plexiglas® handelt es sich um Polymethylmethacrylat (PMMA). Die hier aufgeführten Bezeichnungen entsprechen den Bezeichnungen der vermessenen Proben.						
^b Der Farbort liegt außerhalb des Bereichs, für den eine ähnlichste Farbtemperatur bestimmt werden kann.						